



Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo



Facultad de Ingeniería Mecánica
Maestría en Ciencias de Ingeniería Mecánica
Con línea de investigación en
Diseño Mecánico y Ciencias de los Materiales en Ingeniería

Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica

“Diseño de un sensor de texturas para aplicaciones en mecatrónica”

Presenta:

Ing. José Alberto Flores Escobedo

Asesor:

Dr. Miguel Villagómez Galindo

Co asesor:

Dr. Luis Arthur Cleary Balderas

Morelia, Michoacán; Abril, 2026

Resumen

La presente investigación desarrolla un sensor de texturas avanzado bajo un enfoque interdisciplinario que integra la ciencia de materiales, la ingeniería electrónica y las ciencias de la computación. A diferencia de los enfoques convencionales, este trabajo establece una interdependencia crítica entre la síntesis de un biocompuesto conductor (matriz de almidón reforzada con partículas de grafito) y la implementación de la Tomografía de Impedancia Eléctrica (EIT). Durante la síntesis, se determinó que la relación entre grafito y glicerol es fundamental para equilibrar la conductividad eléctrica con la ductilidad necesaria para la flexibilidad del dispositivo.

La caracterización fisicoquímica mediante FTIR confirmó la formación de la matriz con bandas prominentes de grupos -OH ($\sim 3254\text{ cm}^{-1}$) y enlaces C-O-C ($1149\text{-}1018\text{ cm}^{-1}$), observándose una atenuación de señales proporcional a la concentración de grafito. Asimismo, los análisis de DRX revelaron el pico característico del grafito a 26.5° (002), demostrando la estabilidad estructural del refuerzo y la integridad del proceso de fabricación. Los resultados indican una dominancia del refuerzo en las propiedades electromecánicas, donde la matriz polimérica actúa como un soporte dieléctrico y flexible que permite la transducción de señales.

Finalmente, la validación del sistema se logró mediante el procesamiento de señales en Python, empleando los algoritmos de reconstrucción Back Projection y Gauss-Newton. Esta integración permitió transformar variaciones de conductividad en representaciones visuales de deformación en tiempo real, demostrando la capacidad del sensor para detectar formas y texturas en ambientes controlados. Esta convergencia de áreas supera las limitaciones de los sensores tradicionales y establece una base para la innovación en dispositivos inteligentes y pieles electrónicas biodegradables.

Palabras clave: Biocompuesto reforzado con partículas conductoras, EIT, Procesamiento de señales, Sensor de texturas.

Abstract

This research develops an advanced texture sensor through an interdisciplinary approach integrating materials science, electronic engineering, and computer science. Unlike conventional approaches, this work establishes a critical interdependence between the synthesis of a conductive biocomposite (a starch matrix reinforced with graphite particles) and the implementation of Electrical Impedance Tomography (EIT). During synthesis, it was determined that the ratio between graphite and glycerol is fundamental to balancing electrical conductivity with the ductility required for device flexibility.

Physicochemical characterization via FTIR confirmed the matrix formation with prominent bands of -OH groups ($\sim 3254\text{ cm}^{-1}$) and C-O-C bonds ($1149\text{-}1018\text{ cm}^{-1}$), observing a signal attenuation proportional to the graphite concentration. Likewise, XRD analyses revealed the characteristic graphite peak at 26.5° (002), demonstrating the structural stability of the reinforcement and the integrity of the fabrication process. The results indicate a dominance of the reinforcement in the electromechanical properties, where the polymer matrix acts as a dielectric and flexible support that enables signal transduction.

Finally, system validation was achieved through signal processing in Python, employing the Back Projection and Gauss-Newton reconstruction algorithms. This integration allowed the transformation of conductivity variations into real-time visual representations of deformation, demonstrating the sensor's capability to detect shapes and textures in controlled environments. This convergence of fields overcomes the limitations of traditional sensors and establishes a foundation for innovation in intelligent devices and biodegradable electronic skins.

Keywords: Biocomposite reinforced with conductive particles, EIT, Signal processing, Texture sensor.

Dedicatoria

A los compañeros, estudiantes y docentes a quienes considero mis amigos y con quienes recorrí estos últimos años la maestría

Agradecimientos

*Quiero agradecer a la **Facultad de Ingeniería Mecánica** de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por permitirme el ingreso a la Maestría de Ciencias en Ingeniería Mecánica y así lograr esta investigación.*

*Agradezco a la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)** por proporcionarme el financiamiento necesario para lograr mis estudios de maestría.*

*A los **docentes** cuya enseñanza me permitió lograr mis objetivos, junto con la **Dra. Ana Beatriz Martínez Valencia**, por su ayuda y apoyo en la realización de los experimentos en el laboratorio de Química.*

*A los integrantes de la mesa sinodal la **Dra. Lada Domratcheva Lvova**, El **Dr. Víctor López Garza** y el **Dr. Gilberto Gonzáles Ávalos**, por permitirme su tiempo y apoyo en el transcurso de mi investigación incluyendo a mi co asesor el **Dr. Luis Arthur Cleary Balderas**, que además se mantuvo al pendiente todo el tiempo de mi avance.*

*Un especial saludo y agradecimiento a la **Ma. Irene Monserrat Irepan Avilés**, quien me estuvo apoyando continuamente tanto en el desarrollo del proyecto, como en la realización de otros trabajos, eventos, que me llevaron a un mejor desarrollo como investigador.*

*Además, gracias a los **compañeros y amigos** que me proporcionaron su apoyo en este trayecto.*

*Finalmente, como agradecimiento especial y con profunda estima, extendo mi reconocimiento a mi asesor el **Dr. Miguel Villagómez Galindo**. Quien no solo me permitió trabajar bajo su mando y guía, sino también, en su momento, fue quien extendió su mano y provoco que me decidiera por esta maestría.*

“La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la ingeniería la que cambia el mundo.”

- Isaac Asimov

Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	VII
CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	2
JUSTIFICACIÓN.	2
HIPÓTESIS.	3
OBJETIVOS.	3
<i>Objetivo general.</i>	3
<i>Objetivos específicos.</i>	3
ESTADO DEL ARTE.	4
ANTECEDENTES	9
CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO	12
MATERIAL.	12
<i>Materiales compuestos</i>	12
<i>Clasificación de los materiales compuestos</i>	14
<i>Reforzado por partículas</i>	14
<i>Grafito como refuerzo.</i>	15
<i>Biopolímero como matriz</i>	16
<i>Compuesto deformable reforzado con partículas para aplicaciones electrónicas</i>	17
TOMA DE SEÑALES ELÉCTRICAS MEDIANTE TÉCNICAS DE “ELECTRO IMPEDANCE TOMOGRAPHY”	19
<i>Generación e interpretación de imágenes de EIT:</i>	20
<i>Reconstrucción de Imágenes mediante Conductividad y Resistencia</i>	20
EIT EN SENSORES DE DEFORMACIÓN	21
CAPÍTULO 3.- DESARROLLO DEL PROYECTO.	25
METODOLOGÍA.	25
<i>Metodología de Diseño Generalizada.</i>	25
<i>Flujo del proyecto.</i>	25
SÍNTESIS DEL MATERIAL.	28
<i>Selección (Reactivos)</i>	28
<i>Pesar (Reactivos).</i>	28
<i>Mezcla y polimerización</i>	29
<i>Dispersión de partículas</i>	29
<i>Secado.</i>	30
CARACTERIZACIÓN POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).....	30
CARACTERIZACIÓN POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).....	31
CARACTERIZACIÓN POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	33
CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA.....	34
<i>Medición por dos puntos (Multímetro en la modalidad de óhmetro)</i>	34
<i>Corrientes de Eddy</i>	35
<i>Potencial Termoeléctrico.</i>	36
<i>Medición por cuatro puntos (Método de Kelvin)</i>	38
INTERPRETACIÓN DE SEÑALES.	39
<i>Electrónica de control.</i>	39
<i>Configuración de los electrodos</i>	39
<i>Control de la inyección de corriente y medición (protocolo)</i>	41
<i>Sistema medición de 16 electrodos</i>	42

<i>Selección de canales</i>	44
<i>Microcontrolador para EIT</i>	45
RECONOCIMIENTO DE PATRONES.....	45
<i>Back Projection (BP)</i>	46
<i>Gauss-Newton (GN)</i>	47
CAPÍTULO 4.- RESULTADOS	49
PRIMEROS RESULTADOS.....	49
<i>Análisis Macroscópico de los Compósitos de Bioplástico y Grafito</i>	49
<i>Caracterización por Microscopia electrónica de barrido</i>	50
<i>Caracterización eléctrica</i>	54
EN BÚSQUEDA DEL MATERIAL IDÓNEO	56
<i>Parámetros clave del material</i>	56
<i>Caracterizaciones de Muestra con Glicerol 10% y grafito 3.2%</i>	61
<i>Muestra 7.5% de glicerol con 5% de grafito</i>	64
<i>Muestra 10% Glicerol con 5% grafito</i>	67
<i>Comparativa de FTIR para las muestras anteriores</i>	70
<i>Identificación de los picos base</i>	70
<i>Efecto de la Variación de Grafito (3% vs. 5%)</i>	71
<i>Aplicación de diferentes caracterizaciones eléctricas</i>	72
HARDWARE DEL SENSOR CON AGUA COMO MEDIO DE MEDICIÓN	74
<i>Baseline</i>	74
<i>Back Projection</i>	77
<i>Gauss-Newton</i>	79
SENSOR DE TEXTURAS CON UN BIOPOLÍMERO CONDUCTOR.....	81
<i>Baseline</i>	82
<i>Back Projection</i>	83
<i>Gauss-Newton</i>	85
PRUEBAS DE RECONOCIMIENTO DE FIGURAS-TEXTURAS	88
CONCLUSIONES	90
TRABAJOS FUTUROS.....	92
PRODUCTOS DERIVADOS DE LA PRESENTE TESIS	93
BIBLIOGRAFÍA	94
ANEXOS	96
ANEXO 1 CARTELES DERIVADOS DE LA TESIS.	96
<i>síntesis y caracterización de un material compósito biopolímero-grafito</i>	96
<i>Síntesis de un material compósito biodegradable para futuras aplicaciones en sensores</i>	97
ANEXO 2 DIAGRAMA DE CONEXIONES	98
MUX I+	98
MUX I-.....	98
MUX V+	99
MUX V-.....	99
SHIFT REG.1.....	99
SHIFT REG.2.....	100
Arduino UNO.....	100
ANEXO 3 CODIGOS UTILIZADOS 208 MEDICIONES	101
Arduino	101
Python baseline.....	104
Python Back Projection	106

<i>Python Gaus Newton</i>	108
ANEXO 4 CODIGOS UTILIZADOS 1456 MEDICIONES	110
<i>Arduino</i>	110
<i>Python baseline</i>	112
<i>Python Back Projection</i>	113
<i>Python Gauss Newton</i>	116

Índice de figuras

Figura 1. Desarrollos recientes en el reconocimiento de texturas mediante sensores [1].	5
Figura 2. Reconocimiento de sensaciones de tacto [4].....	5
Figura 3. Sensor de presión a base de un compuesto de matriz polimérica con nanotubos de carbono [11].....	6
Figura 4. Medición de la conductividad de una película por medio de una máquina con 4 conexiones a la película [11].	6
Figura 5. Tomografías por impedancia utilizadas en la adquisición de señales de deformación de una película conductora [12].	7
Figura 6. Medición del potencial eléctrico de un medio conductor [12].....	7
Figura 7 Ilustración de patrones de estimulación y medición por pares para un sistema de ocho electrodos, utilizando (fila superior) un patrón adyacente y (fila inferior) un patrón de "salto de 2". Los colores de fondo indican el potencial eléctrico (rojo positivo a azul negativo) debido a los electrodos de estimulación. Las líneas de corriente indican el flujo de corriente de estimulación (líneas azules) y el flujo de corriente de medición si se usaran los electrodos de medición como estímulo (líneas rojas). El producto escalar de los flujos de corriente de estimulación y medición en una región proporciona la sensibilidad de las mediciones a un cambio en la conductividad dentro de esa región [14].	8
Figura 8 Diagrama de flujo para la reconstrucción por Gauss-Newton [15].....	8
Figura 9. Probetas del material para el sensor vibración de J. Ignacio-Ramírez [16].	9
Figura 10. Estudio de la conductancia de un compósito conductor [16].....	9
Figura 11. Diagrama de conexión de J. Ignacio-Ramírez [16].....	10
Figura 12 Vaciado de la solución de un hidrogel sobre una caja Petri [17].	11
Figura 13. Representaciones esquemáticas de diversas características geométricas y espaciales de partículas en fase dispersa que repercuten en las propiedades de los materiales compuestos: (a) Concentración, (b) Tamaño (c) Forma, (d)distribución y (e) orientación [19].	13
Figura 14. Mapa conceptual de la clasificación de los materiales compuestos [19].	14
Figura 15. El concreto es un compuesto particulado, que contiene arena gruesa o grava en una matriz de cemento [19].	15
Figura 16 Estructura del grafito [19].	15
Figura 17 Esquema de la variación de resistencia en compuestos deformables con partículas conductoras.	18
Figura 18. Descripción general de los pasos de la generación e interpretación de imágenes EIT. (A) Los tejidos fisiológicamente interesantes tienen propiedades eléctricas que contrastan con los tejidos circundantes o cambian con el tiempo; (B) El hardware de los	

sistemas EIT aplica corriente eléctrica y mide voltajes en una secuencia de electrodos de superficie corporal; (C) El patrón de estimulación eléctrica y mediciones, y la geometría corporal y propiedades eléctricas, determinan la región sensible; (D) Las imágenes de la conductividad (EIT absoluta) o el cambio en la conductividad (EIT de diferencia) se calculan utilizando el campo de sensibilidad mediante un algoritmo de reconstrucción de imágenes; y (E) Las medidas fisiológicamente relevantes se calculan a partir de contrastes de imágenes y sus cambios con el tiempo [21].	19
Figura 19. Piel inteligente con cableado. (a) El tejido conductor se fija sobre una espuma elástica que permite una mejor discriminación entre las fuerzas normales y el estiramiento, y crea una capa aislante que permite aplicar la piel artificial sobre diferentes materiales. (b) Posible escenario de aplicación: fijado sobre el brazo de un maniquí [12].	22
Figura 20. Patrón común para la medición bipolar usada en EIT [12].	23
Figura 21. (a) una sonda circular de 15 mm de radio; (b) una sonda circular de 18 mm de radio; (c) una sonda circular de 25 mm de radio; y (d) una sonda cuadrada de 15 mm de lado [12].	23
Figura 22. Imágenes seleccionadas del experimento de multipresión. (a) Posiciones de las sondas; (b) voltaje de referencia; (c-e) carga secuencial; y (f-h) descarga de las diferentes sondas. En cada imagen, para cada sonda, se muestran su centroide y los límites calculados [12].	24
Figura 23 Diagrama de la Metodología de Diseño Generalizada.	25
Figura 24. Mapa del flujo del proyecto a seguir durante la investigación del sensor.	26
Figura 25. Diagrama de proceso de la síntesis del material.	28
Figura 26. Equipo de Microscopía Electrónica de Barrido del Instituto de Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), campus Morelia.	30
Figura 27 Equipo de Cubierta por espolvoreado catódico del Instituto de Materiales de Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) campus Morelia	31
Figura 28 Interacción entre los rayos X y la estructura [22].	32
Figura 29 Difractómetro de rayos X del Centro de Investigación de Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) campus Morelia [17].	33
Figura 30. Equipo de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier del Instituto de Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), campus Morelia.	34
Figura 31. Detector de corrientes de Eddy y sonda de medición.	36
Figura 32. Gaussmetro/fluxómetro con punta de medición de potencial termoeléctrico.	37
Figura 33. Ejemplo de la variación de resolución para un círculo. a) El círculo a replicar, b) Una baja resolución del círculo, c) Una mayor resolución del círculo.	40
Figura 34. Arreglo de los 16 electrodos en forma circular en la periferia del objeto a medir.	41
Figura 35. Multiplexor CD74HC4067 comercial para el control del protocolo.	42
Figura 36. Esquema de los Shift register conectados en forma de cascada para su funcionamiento conjunto, para el control de los multiplexores por medio de un registro de desplazamiento de 16 bits.	44

Figura 37 La arquitectura de software de pyEIT consta de tres partes: mallado, resolución de problemas directos e inversos. Los textos en azul indican los módulos de Python correspondientes [31] .	46
Figura 38. Primeras muestras de la experimentación con el material. Por cada 10 g de biopolímero: a) 2.5 g de grafito, b) 1.0 g de grafito, c) 0.5 g de grafito.	49
Figura 39. MEB del biopolímero con grafito a 0.5g para a) 100µm, b) 50µm.	50
Figura 40. Mapeo de composición química del biopolímero de papa con grafito a 0.5g. ...	50
Figura 41. Porcentajes de los elementos químicos obtenidos para la muestra de papa con 0.5 g de grafito.	51
Figura 42. Fotografías tomada en zona de desprendimiento de material en el MEB del biopolímero con grafito 0.5g a) 100µm, b) 10µm.	52
Figura 43. Fotografías en el MEB del a) Biopolímero con grafito 10/0.5, contra b) Biopolímero de almidón de camote blanco [17].	52
Figura 44. DRX para las muestras, en el orden de izquierda a derecha y de arriba a abajo a) Grafito, b) Compuesto 0.5g, c) Compuesto 1.0g.	53
Figura 45. Gráfica comparativa de DRX del compósito a 5 g contra el grafito y un almidón.	53
Figura 46. Medidas re la resistencia eléctrica de las muestras de 2.5g (25%), 1.0g (10%) y 0.5g (5%)	54
Figura 47. Relación del grafito contra la conductividad con las muestras realizadas.	55
Figura 48. Compósito de almidón de arroz y 5% de grafito, fracturado debido a una deficiente adhesión entre sí.	56
Figura 49 Compósito Biopolímero Arroz-grafito con glicerol a 7.5%.	57
Figura 50. Compósito arroz-grafito a 7.5% de glicerol y 3.2% grafito	58
Figura 51. Compósito Arroz-grafito a 10% de glicerol y 3.2% grafito.	58
Figura 52. Compósito Arroz-Grafito con 10% de glicerol, 3.2% de grafito y 4% de ácido acético.	59
Figura 53. Muestra Arroz-Grafito con 10% glicerol y 5% grafito	60
Figura 54. Microscopía Electrónica de Barrido para la muestra de almidón de arroz con 10% de glicerol y 3.2% de grafito.	61
Figura 55 Grafica de composición química para la muestra de Almidón de arroz con 10% de glicerol y 3.2% de grafito.	61
Figura 56. Mapeo de composición química para la muestra de 10% de glicerol y 3.2% de grafito, todos los elementos.	62
Figura 57. Mapeo de composición química para la muestra de 10% de glicerol y 3.2% de grafito, elementos particulares.	62
Figura 58 Grafica de Difracción de Rayos X para la muestra de 10% de glicerol y 3.2% de grafito	63
Figura 59. Grafica de Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) para la muestra de 10% de glicerol y 3.2% de grafito	63
Figura 60. Microscopía Electrónica de Barrido para la muestra de almidón de arroz con 7.5% de glicerol y 5% de grafito	64

Figura 61. Gráfica de composición química para la muestra de almidón de arroz con 7.5% de glicerol y 5% de grafito	64
Figura 62. Mapeo de composición química para la muestra de 7.5% de glicerol y 5% de grafito, todos los elementos	65
Figura 63. Mapeo de composición química para la muestra de 7.5% de glicerol y 5% de grafito, elementos particulares.....	65
Figura 64. Gráfica de difracción de rayos X para la muestra de 7.5% de glicerol y 5% de grafito.	66
Figura 65. Gráfica de Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) para la muestra de 10% de glicerol y 3.2% de grafito.....	66
Figura 66. Microscopía Electrónica de Barrido para la muestra de almidón de arroz con 10% de glicerol y 5% de grafito.	67
Figura 67. Grafica de composición química para la muestra de Almidón de arroz con 10% de glicerol y 5% de grafito	67
Figura 68. Mapeo de composición química para la muestra de 10% de glicerol y 5% de grafito, todos los elementos	68
Figura 69. Mapeo de composición química para la muestra de 10% de glicerol y 5% de grafito, elementos particulares.....	68
Figura 70. Gráfica de Difracción de Rayos X para la muestra de 10% de glicerol y 5% de grafito.	69
Figura 71. Gráfica de Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) para la muestra de 10% de glicerol y 3.2% de grafito.....	69
Figura 72. Grafica comparativa de FTIR de las muestras de Arroz-Grafito.	70
Figura 73. Grafica comparativa de las muestras de Arroz-Grafito contra un biopolímero de camote-papa.....	71
Figura 74. Grafica de las primeras pruebas de resistencia eléctrica con Arduino y dos conexiones.	73
Figura 75. Cambio de la resistencia eléctrica en una muestra con 5% de grafito, debido a la deformación de esta.	73
Figura 76. Hardware del sensor con agua como medio de medición.	74
Figura 77. Grafica de valores Diferenciales del sistema de 208 mediciones.	75
Figura 78 Grafica de valores Diferenciales del sistema de 1456 mediciones.	76
Figura 79. Reconstrucción EIT en BP para un medio de agua, sin interferencia en el sistema para 208 y 1456 mediciones.	77
Figura 80. Reconstrucción EIT en BP para un medio de agua, introduciendo un objeto no conductor a su derecha, en el sistema para 208 y 1456 mediciones.....	78
Figura 81 Reconstrucción EIT en BP para un medio de agua, introduciendo un objeto no conductor a su izquierda, en el sistema para 208 y 1456 mediciones	78
Figura 82. Reconstrucción EIT en GN para un medio de agua, sin interferencia en el sistema para 208 y 1456 mediciones.	79
Figura 83. Reconstrucción EIT en GN para un medio de agua, introduciendo un objeto no conductor a su derecha, en el sistema para 208 y 1456 mediciones.....	80

Figura 84. Reconstrucción EIT en GN para un medio de agua, introduciendo un objeto no conductor a su izquierda, en el sistema para 208 y 1456 mediciones.	80
Figura 85. Hardware del sensor con el material compuesto como medio de medición.	81
Figura 86 Grafica de valores Diferenciales para el compuesto	82
Figura 87. Reconstrucción BP, sin interferencia en el compuesto.	83
Figura 88. Reconstrucción BP, presionando arriba a la derecha.	84
Figura 89 Reconstrucción BP, presionando abajo a la derecha.....	84
Figura 90. Reconstrucción BP, presionando el centro.....	85
Figura 91. Reconstrucción GN, sin interferencia en el compuesto.	86
Figura 92. Reconstrucción GN, presionando arriba a la derecha.	86
Figura 93. Reconstrucción GN, presionando abajo a la derecha.....	87
Figura 94. Reconstrucción GN, presionando el centro.....	87
Figura 95. Figura de plástico "Triangulo", con sus imágenes reconstruidas por EIT en agua.	88
Figura 96. Figura de plástico "Circulo", con sus imágenes reconstruidas por EIT en agua.	89
Figura 97. Figura de plástico "Cruz", con sus imágenes reconstruidas por EIT en agua.	89

Índice de Tablas

Tabla 1. Comparativa de sensores encontrados en el estado del arte.	4
Tabla 2. 1456 mediciones para la construcción de una imagen.	43
Tabla 3. 208 mediciones para la construcción de una imagen.	44

Capítulo 1.- Introducción

Desde los inicios de los tiempos, los sentidos nos han abierto la puerta a contemplar nuestro entorno de diferentes maneras. Los cuales hemos intentado reproducir por medio de dispositivos para permitir que otras herramientas, máquinas o incluso robots sean capaces de realizar trabajos especializados con mayor fluidez, en otras palabras, más “humano”. El ejemplo más común de esto es la aplicación de las cámaras que recrean el sentido de la vista y pueden añadirse a dispositivos comerciales como es el caso de los drones u otras aplicaciones como el simplemente vigilar un espacio desde la comodidad de una silla.

Dejando de lado los dispositivos que recrean la vista y el oído, como las cámaras y los micrófonos, no podemos decir lo mismo al simular los demás sentidos. Aunque estos llevan décadas de investigación y aplicación, otras formas que obtengan información del espacio, como los sensores de texturas son relativamente nuevos, con muchas posibilidades para expandir su arquitectura y un nuevo mundo de aplicaciones.

La aplicación y desarrollo de estos sensores se han estudiado en diversos trabajos para prótesis de miembros superiores donde se plantea el recuperar la información sensorial perdida en la extremidad amputada [1], [2], [3].

Un enfoque alternativo fue usado en el estudio de Shibata et al. (2017), el cual nos muestra de manera detallada la aplicación de los sensores de textura en la simulación de una boca humana capaz de sentir la textura de los alimentos. En dicho estudio se plantea la metodología aplicada para el reconocimiento de los patrones para que el sensor reconozca y capte estas texturas [2].

Es importante destacar que los estudios mencionados abordan la aplicación de un sensor específicamente diseñado para cada uno de sus casos, presentándose la situación de que quedan una gran variedad de aplicaciones por probar, así como métodos para obtener las señales y cómo pueden ser interpretadas.

Por lo que, este documento abordará como tema de investigación el diseño de un sensor de texturas y el algoritmo para la identificación de las mismas. En el cual se pretende analizar un sensor de texturas existente y, a partir de este, desarrollar un diseño propio, con los materiales, características y tipo deseados para aplicaciones mecatrónicas.

Planteamiento del problema.

En la actualidad, las prótesis, robots y manipuladores carecen de métodos de retroalimentación de información por medio de sentidos como es el caso del tacto. Esto limita su capacidad para interactuar con el entorno de manera efectiva y cómoda para el usuario.

Si revisamos la literatura sobre prótesis actuales u otros dispositivos similares, podemos detectar que la mayoría carece de la capacidad de sentir texturas o detectar cambios en las superficies con las que interactúan. Siguiendo este contexto, podemos inferir que las personas con prótesis que reemplazan algún miembro tienen muy limitadas sus capacidades para percibir la textura de los objetos que manipulan, lo que dificulta las tareas cotidianas.

Justificación.

Los sensores táctiles permiten una mejora en la interacción con el entorno, lo que significa que, si estos se emplean en prótesis de extremidades, lograrán una mejora en la calidad de vida de una persona con discapacidad. De esta forma, estos sensores pueden aumentar la sensación de control sobre la extremidad artificial, así como reducir la cantidad de accidentes al detectar de manera más clara los obstáculos y cambios en el entorno.

Por otro lado, se tiene pensado implementar un material biodegradable en la fabricación de nuestro sensor, logrando así ser más amigable con el medio ambiente. Ya que los electrónicos son de los desechos más complicados para la separación de sus componentes, siendo casi imposible su reciclado total.

Hipótesis.

Se puede diseñar un sensor de texturas, capaz de analizar la información de las texturas, mediante materiales compuestos biodegradables y técnicas de procesamiento de señales.

Objetivos.**Objetivo general.**

Diseñar e implementar un sensor de texturas para aplicaciones en el ámbito de la salud que permita a las prótesis obtener información táctil en tiempo real, lo que dará como resultado un aumento de la calidad de vida de las personas con discapacidad.

Objetivos específicos.

- Sintetizar un material compuesto biodegradable para la elaboración del sensor.
- Obtener un dispositivo capaz de adquirir señales de tacto, por medio de una red de deformación, con un diseño similar al de la piel de los seres vivos, en un entorno controlado.
- Crear un sistema capaz de interpretar las señales del sensor, en datos útiles para identificar las texturas.

Estado del arte.

Para determinar el tipo de sensor a estudiar, se realizó un estudio comparativo de diferentes formas de funcionamiento de diferentes tipos de sensores de textura investigados. En la Tabla 1 se ejemplifica una comparativa de sensores para analizar de manera rápida la diferencia de funcionamiento de estos, así como los materiales utilizados y su aplicación en un entorno específico.

Tabla 1. Comparativa de sensores encontrados en el estado del arte.

Nombre	Obtención de señal	Aplicación	Material	
"Un sensor táctil que utiliza grafeno de una sola capa para el reconocimiento de la textura de la superficie"	Mediante deformación por fuerzas externas	No Especifica	Tereftalato de polietileno (PET), Naftalato de polietileno (PEN), cobre, oxido de silicio (SiO ₂) Grafeno	[4]
"Un sistema de detección táctil biomimético basado en una película de fluoruro de polivinilideno"	Mediante deformación por fuerzas externas	No Especifica	Fluoruro de polivinilideno o difluoruro de polivinilideno (PVDF), cobre, caucho, aluminio	[5]
"Información espaciocromática disponible" de diferentes capas neuronales mediante gaussianización	Mediante imágenes donde se mide la saturación del brillo, por medio de una fuente de iluminación	Obtención de datos de muestras biológicas	No Especifica	[6]
"Reconstrucción de la textura 3D del pavimento al manipular desniveles y picos mediante múltiples métodos de procesamiento de datos"	Por medio de laser	Reconocimiento del tamaño de grano del pavimento	No Especifica	[7]
"Un sensor táctil con forma de dedo para la evaluación de superficies de tela mediante tacto deslizante activo bidimensional"	Mediante un sensor de fuerza	Evaluación de linos	Fluoruro de polivinilideno o difluoruro de polivinilideno (PVDF), cobre, caucho, aluminio, etc.	[8]
"Utilización de sensores piezoacústicos para la identificación de rugosidades y texturas superficiales"	Mediante la acústica generada en la superficie	Obtención de la rugosidad de diversos metales	No Especifica	[9]
"Un sensor magnético de textura de alimentos y comparación de los datos de medición de nuggets de pollo"	Mediante un campo electromagnético inducido y la aplicación de una sonda que aplica fuerza sobre la comida	Obtención de datos de la textura de los alimentos	Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), + otros materiales no especificados	[10]

De manera más específica, se determinó en el estudio el desarrollo de un sensor de texturas con su medio de obtención de datos por medio de la deformación de una membrana debida al contacto con la textura. En este contexto se presentan los siguientes artículos.

El artículo de Masteller et al. (2020) muestra algunos de los desarrollos recientes en el reconocimiento de texturas mediante sensores y su aplicación en prótesis de miembros superiores. En este, se presentan seis arreglos diferentes para la creación de una capa con materiales conductivos que tiene como objetivo dar diferentes señales dependiendo de la deformación que esta sufra [1].

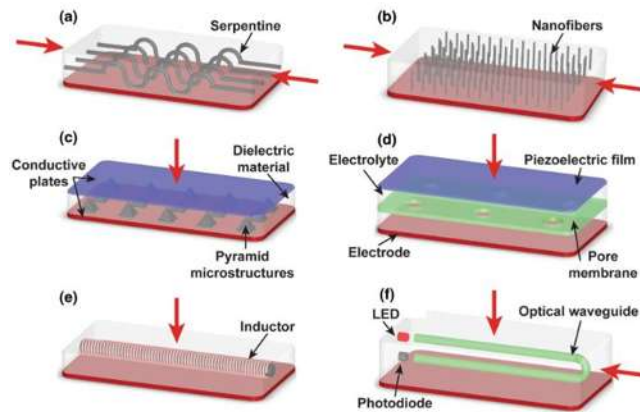


Figura 1. Desarrollos recientes en el reconocimiento de texturas mediante sensores [1].

Todos estos arreglos funcionan de la misma manera: el arreglo y el material utilizado sufren una deformación por medio de una fuerza externa, lo que genera un cambio en las señales eléctricas que manda normalmente. Este artículo es una pauta a seguir para nuestro proyecto, ya que aborda una forma parecida al sensor que queremos desarrollar.

En el estudio de Chun et al. (2017), se muestra cómo por medio de una delgada capa de grafeno se realiza el reconocimiento de sensaciones de tacto. Este tipo de estudio describe como por medio de unas delgadas capas de diversos materiales, entre ellos un material piezo-resistivo se pueden obtener resultados positivos, asemejándose en forma a la piel humana y por medio del tacto [4].

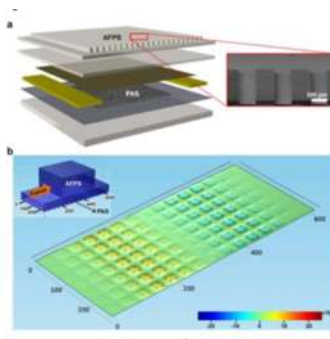


Figura 2. Reconocimiento de sensaciones de tacto [4].

S.Yan (2022), en su artículo, presenta el diseño de un sensor de presión basado en un compuesto de matriz polimérica con nanotubos de carbono. Igualmente, se presenta el uso de un material cuyas propiedades eléctricas mejoraron mediante la adición de carbono. En su diseño (Figura 3), se utiliza una capa fina de grafito, la cual es cubierta por medio de otras capas con irregularidades. Estas, dependiendo de la fuerza aplicada, entrarán en contacto más o menos irregular con la capa de grafito, lo que permite una variación de resistencia dependiendo de la fuerza aplicada al sensor [11].

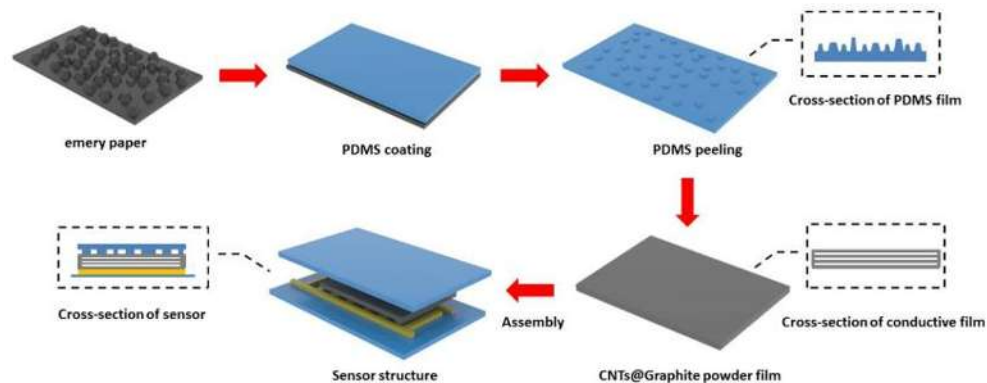


Figura 3. Sensor de presión a base de un compuesto de matriz polimérica con nanotubos de carbono [11].

Un punto muy interesante a tratar en el artículo de S.Yang (2022), es la mención del método de cuatro puntos para medir la conductividad de la película de grafito. Mediante 4 conexiones a la película, esta prueba mide su conductividad, lo que permite obtener mediciones como las mostradas en la siguiente gráfica (Figura 4).

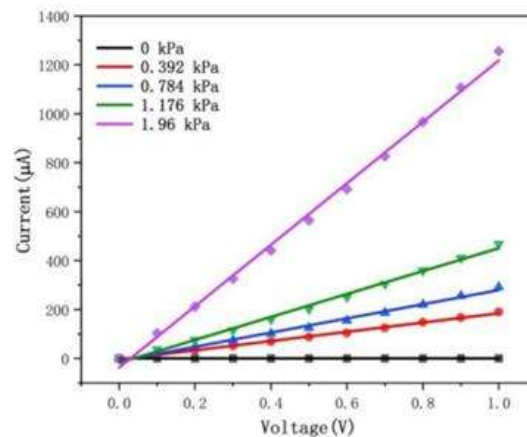


Figura 4. Medición de la conductividad de una película por medio de una máquina con 4 conexiones a la película [11].

Aunque se desconoce el tipo de funcionamiento o la metodología que utiliza la máquina para la medición e interpretación de las señales, eso no significa que no sea de utilidad. Al contrario, es una pauta de que existen métodos para la precisión en la conductividad y en un futuro nos permitirá servir de pauta para la replicación de la máquina para la medición por medio de métodos conocidos como la medición de conductividad eléctrica por cuatro puntos en fila, utilizado en lugares como la medición de la conductividad de suelos.

En el estudio de F. Visentin (2016), se presenta el uso de una piel deformable inteligente. En este se menciona cómo el uso de los fundamentos de las tomografías (Figura 5) pueden utilizarse en la adquisición de señales de deformación de una película conductora [12].

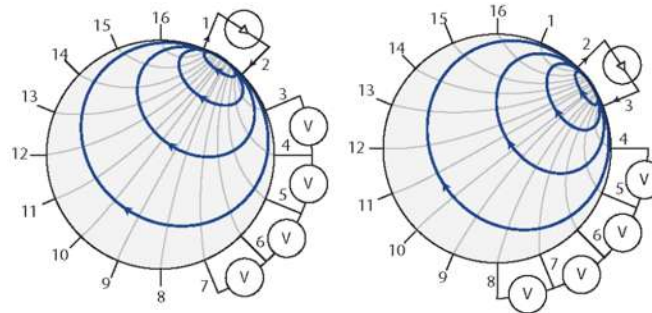


Figura 5. Tomografías por impedancia utilizadas en la adquisición de señales de deformación de una película conductora [12].

Para esto, F. Visentin y colaboradores utilizaron una medición del potencial eléctrico en diferentes secuencias. En la Figura 5 se muestran 16 números, o, en otras palabras, puntos de medición. Estos puntos no se van a mover, pero las mediciones de punto a punto sí. En otras palabras, se realizarán ciclos donde primero se inyectará corriente del punto 1 al 2, mientras que el resto sirve para mediciones. Posteriormente se cambiará del 2 al 3, y el resto para mediciones. Así continuará hasta cumplir el ciclo (Figura 6).

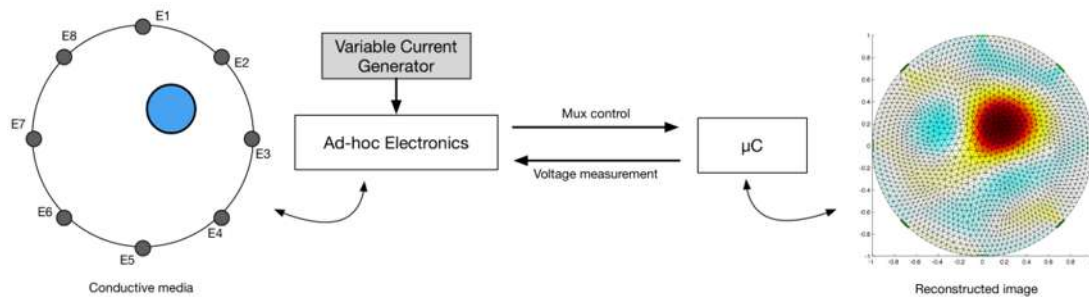


Figura 6. Medición del potencial eléctrico de un medio conductor [12].

El cartel de Marcin J. Krasny, publicado en la 23.^a conferencia internacional de las aplicaciones biomédicas de la Tomografía por Impedancia Eléctrica, explica la realización de un dispositivo EIT (Electro Impedance Tomography) de bajo costo creado por medio de Arduino con una serie de multiplexores, el cual fue probado en agua con sal. Este cartel nos detalla el hardware utilizado y permite tener una base por cómo y con qué empezar, para la realización de un sistema que utilice un enfoque por medio de EIT. Si consideramos que estos sistemas suelen tener costos elevados, esto representa una oportunidad en el desarrollo de sensores [13].

En cuanto a EIT, existen un gran número de investigaciones donde representan el proceso tanto las metodologías a seguir para su aplicación y construcción de los dispositivos. El estudio de A. Boyle, entre sus trabajos, también presenta información al respecto de las diferentes formas de medir la impedancia mediante la selección de electrodos.

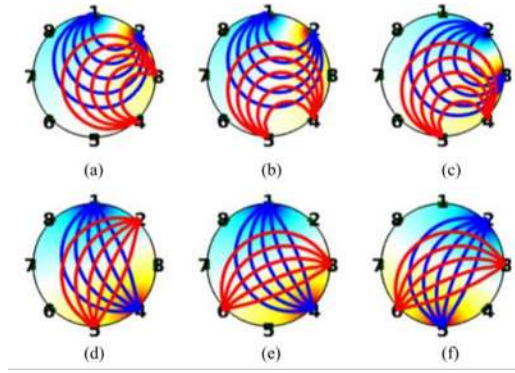


Figura 7 Ilustración de patrones de estimulación y medición por pares para un sistema de ocho electrodos, utilizando (fila superior) un patrón adyacente y (fila inferior) un patrón de "salto de 2". Los colores de fondo indican el potencial eléctrico (rojo positivo a azul negativo) debido a los electrodos de estimulación. Las líneas de corriente indican el flujo de corriente de estimulación (líneas azules) y el flujo de corriente de medición si se usaran los electrodos de medición como estímulo (líneas rojas). El producto escalar de los flujos de corriente de estimulación y medición en una región proporciona la sensibilidad de las mediciones a un cambio en la conductividad dentro de esa región [14].

Se mencionan diversas alternativas a la configuración serializada de pares de electrodos. En primer lugar, varios sistemas realizan mediciones paralelas simultáneas, lo que puede resultar más rápido. La forma de onda suele ser sinusoidal (mediante un oscilador o, más recientemente, síntesis digital) o aproximada con una onda cuadrada. Abordan los de manera superficial los “patrones de corriente óptimos”, que requieren la estimulación simultánea de corriente y la medición de voltaje en todos los electrodos [14].

Hay otros estudios que mencionan más al respecto de la forma de generación de imágenes reconstruidas, hablando más a detalle de las matemática y elemento finito de tras de estas como el estudio realizado por D. Canales Vázquez [15], que detalla estos temas, como es el caso de los algoritmos de Gauss-Newton como el mostrado en la Figura 8. Aunque esta investigación aborda principalmente el uso de EIDORS, la cual es una biblioteca utilizada en Matlab.

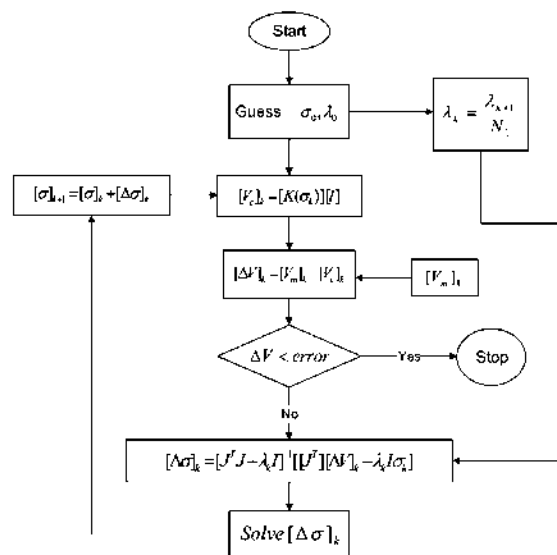


Figura 8 Diagrama de flujo para la reconstrucción por Gauss-Newton [15]

Antecedentes

J. Ignacio-Ramírez (2024), en su trabajo de tesis, presenta un sensor de vibraciones a base de un material compuesto polimérico con microfibra de carbono. En él se combina una matriz polimérica con propiedades elásticas con un material conductor, en este caso, la fibra de carbono.

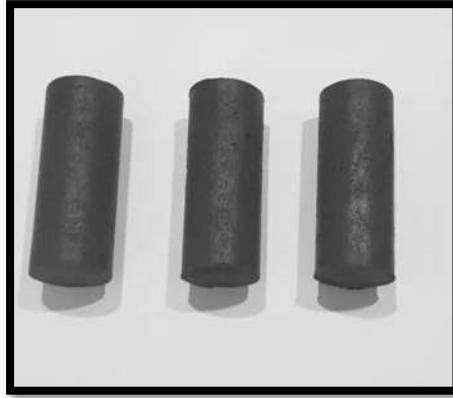


Figura 9. Probetas del material para el sensor vibración de J. Ignacio-Ramírez [16].

En su investigación se estudia un fenómeno en el que la conductancia del material varía dependiendo de la deformación del material. Además, por medio de estas variaciones se demostró la capacidad de obtención e interpretación de señales para su posterior análisis, como el uso de gráficas.

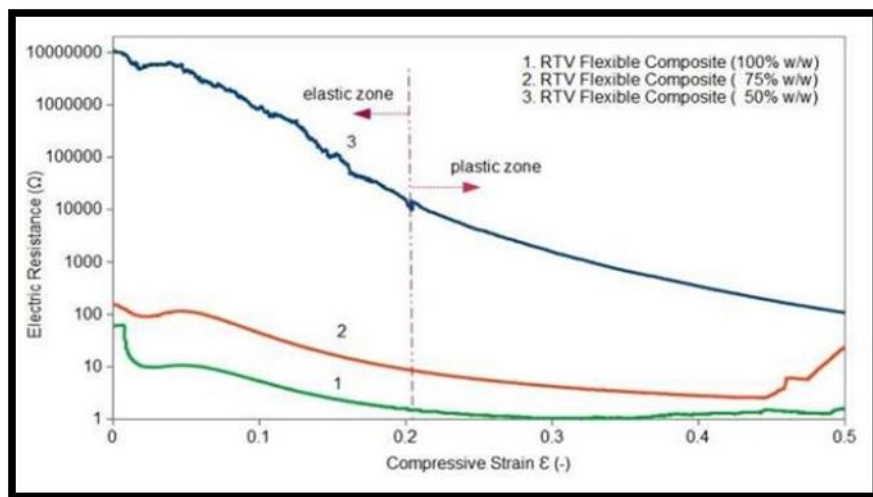


Figura 10. Estudio de la conductancia de un compuesto conductor [16].

En este contexto y tomando como referencia este fenómeno, podemos inferir que es posible diseñar un sensor de texturas en el que, por medio de las irregularidades del terreno, se deforme el material del sensor, ocasionando una variación en sus conductividades.

Para esto, igualmente se puede seguir una metodología similar a la presentada por J. Ignacio-Ramírez (2024) para la interpretación de señales, así como tener una base para la solución de algunos problemas que le surgieron y fueron resueltos (Figura 11).



Figura 11. Diagrama de conexión de J. Ignacio-Ramírez [16].

Otro factor importante a tomar en cuenta es que J. Ignacio-Ramírez (2024) en su proyecto presenta cambios de resistencia en materiales con poca conductividad:

1. Para el análisis de la variabilidad de la resistencia del material compuesto se recurrió a la utilización de un puente H que permite la correcta medición de resistencias y en el cual se trata de tres resistencias constantes y definidas, mientras una cuarta es la resistencia variable. En este caso, como se puede observar en la Figura 11 a), la resistencia variable es una probeta de material compuesto deformable.
2. El cambio de la conductividad es tan pequeño, que dispositivos que no son tan precisos como los arduinos son incapaces de detectar sus cambios. Para la resolución de este problema se utiliza un amplificador operacional (Figura 11b), lo que permite mostrar a mayor escala la variabilidad de la conductividad.

El fenómeno del cambio de conductividad debido a la deformación no es algo nuevo, y ha sido estudiado en otros cientos de trabajos y es aplicado en un dispositivo tan común que muchas veces pasa desapercibido como es en las básculas electrónicas. Estas trabajan mediante un sensor de Presión-Fuerza o mediante una celda de carga, que, entre más peso aplicado, varía su resistencia, pero lo que nosotros vemos simplemente es el cambio de peso, siendo este el resultado de todo un proceso que pasa desapercibido.

I. Monserrat Irepan (2025) realizó un trabajo de investigación que se centra principalmente en los biopolímeros, más específicamente en la síntesis de películas de hidrogel a base de almidones provenientes de tubérculos mexicanos. Entre uno de los puntos más importantes de esta investigación mencionada está la metodología descriptiva para la síntesis de las películas de hidrogel a base de un almidón dado. La información mostrada sobre los pasos a seguir, las cantidades y los tipos de almidón es un punto de partida para la realización de un material que se pueda usar en sensores, de manera similar al trabajo de J. Ignacio Ramírez (2024) que combinaba una base polimérica con un material conductor.



Figura 12 Vaciado de la solución de un hidrogel sobre una caja Petri [17].

El desarrollo de la experimentación realizada por I. Monserrat Irepán-Avilés (2025) presenta un proceso estandarizado de síntesis para que la experimentación sea replicable y las películas de hidrogel presenten la apariencia y la textura apropiadas para ser utilizadas como una película deformable para el desarrollo del sensor de texturas.

Finalmente, un dato importante del trabajo mencionado, son las técnicas de caracterización del material para determinar sus propiedades, con lo que por medio de las técnicas analíticas de DRX, FTIR y MEB, se obtuvieron sus resultados y datos referentes al material. De manera análoga, en la presente tesis se siguieron el desarrollo experimental y la aplicación de las técnicas de caracterización adaptándolos para el desarrollo de la película conductora del sensor desarrollado en el presente trabajo de investigación.

Capítulo 2.- Marco teórico

Material.

Materiales compuestos

Un material compuesto es un sistema de materiales formado por una mezcla o combinación debidamente dispuesta de dos o más micro o macro constituyentes con una intercara que los separa, que difieren en forma y composición química y son esencialmente insolubles entre sí [18]. Este concepto de materiales compuestos multifase ofrece oportunidades interesantes para el diseño de una gran variedad de materiales con combinaciones de propiedades que no podrían ser satisfechas por ninguno de los materiales monolíticos [3]. Estos materiales se obtienen al momento de unir dos materiales para conseguir una combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales. Estos compuestos pueden seleccionarse para lograr combinaciones poco usuales de rigidez, resistencias mecánicas o químicas, densidad o conductividad [19].

De hecho, la definición no satisface a todos los ingenieros en materiales ya que es muy amplia, pero podemos indicar los siguientes puntos clave que se aceptan generalmente para la definición de los materiales compuestos:

1. Consisten en dos o más materiales distintos que pueden ser separados mecánicamente y deben ser identificados fácilmente como fase dispersa y fase dispersante mediante la ayuda de un microscopio
2. Se logran mezclando la matriz y la fase dispersa; los dos componentes son, por lo general, de distinta naturaleza y propiedades (por ejemplo, fibras cerámicas en una matriz polimérica).
3. Las propiedades del compuesto son diferentes y superiores a las de los componentes individuales
4. La fase dispersa debe estar en el orden de micrómetros o superior, de modo que los materiales cerámicos y algunas aleaciones metálicas convencionales, a pesar de estar formados por varios elementos, no son considerados materiales compuestos.
5. Estas combinaciones de materiales también se caracterizan por tener un arreglo específico, el cual influye directamente en las propiedades del material.

La gran mayoría de los materiales compuestos están formados por dos fases: una, llamada matriz, es continua y rodea a la otra. Esta suele ser una resina polimérica, metal o cerámica, y tiene como función principal transferir los esfuerzos al refuerzo y protegerlo del entorno, también es denominada fase dispersa. Las propiedades de los compuestos están en función de las propiedades de las fases constituyentes, de sus proporciones relativas y de la geometría de la fase dispersa. La geometría de la fase dispersa en este contexto hace referencia a la forma, el tamaño, la distribución y la orientación de las partículas [19].

El refuerzo se utiliza para mejorar las propiedades mecánicas del compuesto, como la resistencia y la rigidez.

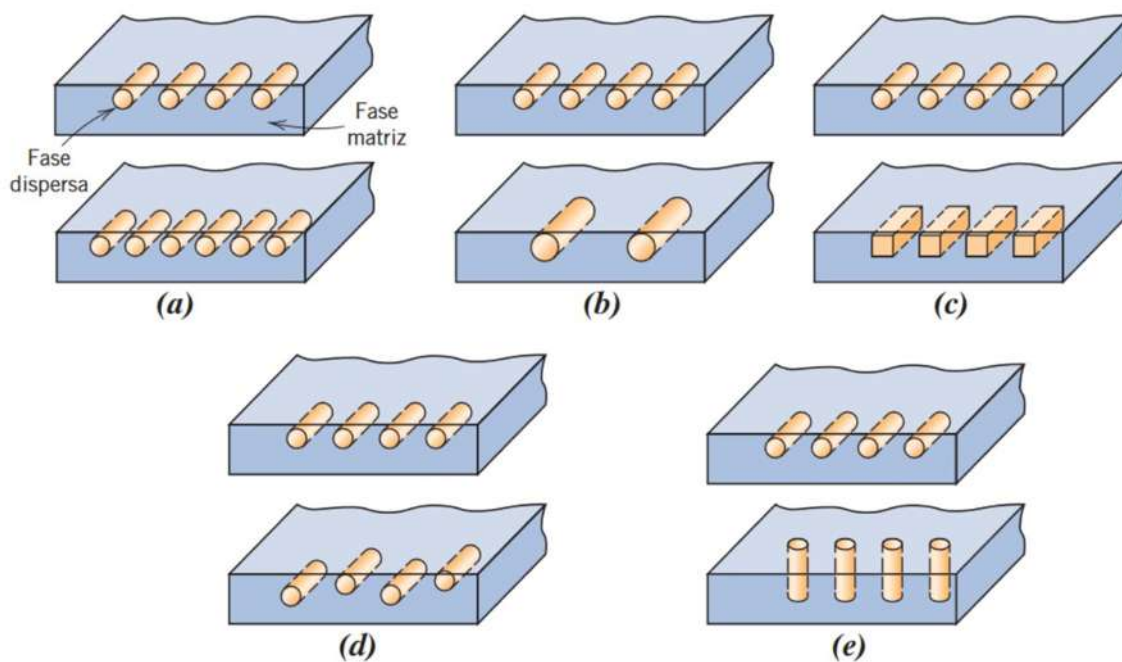


Figura 13. Representaciones esquemáticas de diversas características geométricas y espaciales de partículas en fase dispersa que repercuten en las propiedades de los materiales compuestos: (a) Concentración, (b) Tamaño (c) Forma, (d) distribución y (e) orientación [19].

En la Figura 13 a) podemos ver el esquema que indica a qué se le considera una matriz y a qué el refuerzo; en el caso de este ejemplo, la matriz está cubriendo las fibras y, como se aprecia, estas fibras variarán dependiendo del tipo de material deseado y del estudio que se le realiza. La forma, arreglo, tamaño y cantidad va a variar las características que el material de refuerzo le transfiera a la matriz y por ende al material compuesto. En el caso de las fibras, una fibra más delgada, no impactará la flexibilidad del compuesto como lo haría una fibra gruesa, al igual que espaciarlas de mayor a menor manera repercutirá directamente en las características del material. Esto es ejemplificando en el caso de los materiales compuestos con fibras, pero esto se aplica de igual manera para cada uno de los tipos, no porque sean laminares o de partículas se debe dejar pasar, todo influye y hay que intentar controlar la mayor cantidad de variables para obtener el material más adecuado para un trabajo.

Existe una amplia variedad de materiales compuestos debido a la generalidad de su definición. Los compuestos pueden clasificarse de distintas formas; por ejemplo, por su origen, ya sea natural o artificial, también podrían clasificarse por la naturaleza de la matriz, que puede ser metálica, cerámica o polimérica. Los compósitos de matriz metálica (MMCs) tienen buena resistencia y rigidez, pero son en general pesados, los compósitos de matriz cerámica (CMCs) son los de mayor rigidez, pero son frágiles; finalmente, los compuestos de matriz polimérica (PMCs) son los más livianos y de mayor demanda comercial.

Clasificación de los materiales compuestos

Para nuestro caso de estudio, los materiales compuestos los clasificaremos en tres categorías: con partículas, con fibras y laminares, dependiendo de la forma de los materiales (Figura 14).



Figura 14. Mapa conceptual de la clasificación de los materiales compuestos [19].

Los materiales compuestos reforzados con partículas se subdividen en reforzados con partículas grandes y en consolidados por dispersión. Esta distinción se fundamenta en el mecanismo de consolidación o de reforzamiento. El término "grande" se utiliza para indicar que las interacciones matriz-partícula no se pueden describir a nivel atómico o molecular, sino mediante la mecánica continua. En la mayoría de los materiales compuestos, la fase dispersa es más dura y resistente que la matriz y las partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la matriz en las proximidades de cada partícula. En esencia, la matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales soportan una parte de la carga. El grado de reforzamiento o de mejora del comportamiento mecánico depende de la fuerza de cohesión en la interfaz matriz-partícula.

Reforzado por partículas

Mientras la matriz soporta la mayor parte de la carga aplicada, las pequeñas partículas dispersas dificultan o impiden el desplazamiento de las dislocaciones (Figura 15). De este modo se restringe la deformación plástica de tal manera que aumenta el límite elástico, la resistencia a la tracción y la dureza. De igual manera, en algunos casos las partículas pueden mejorar otras propiedades quimicofísicas como es el caso de la conductividad eléctrica, absorción de la luz, transferencia térmica, etc.

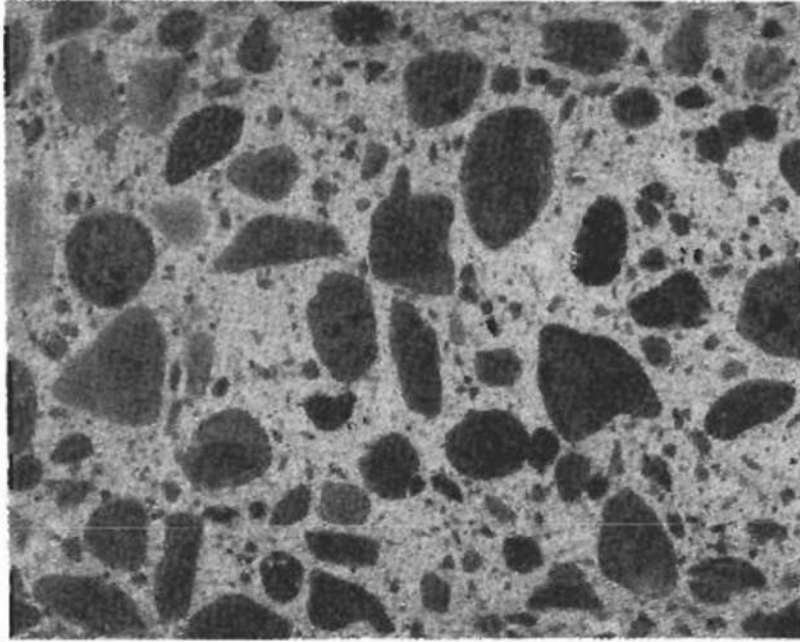


Figura 15. El concreto es un compuesto particulado, que contiene arena gruesa o grava en una matriz de cemento [19].

Grafito como refuerzo

El carbono es un elemento que existe en varias formas polimórficas, así como en estado amorfo. Este grupo de materiales no cae dentro de ninguna de las clases tradicionales en que se clasifican los materiales: metales, cerámicas y polímeros. Sin embargo, el grafito, una de las formas polimórficas, se clasifica a veces como una cerámica (Figura 16).

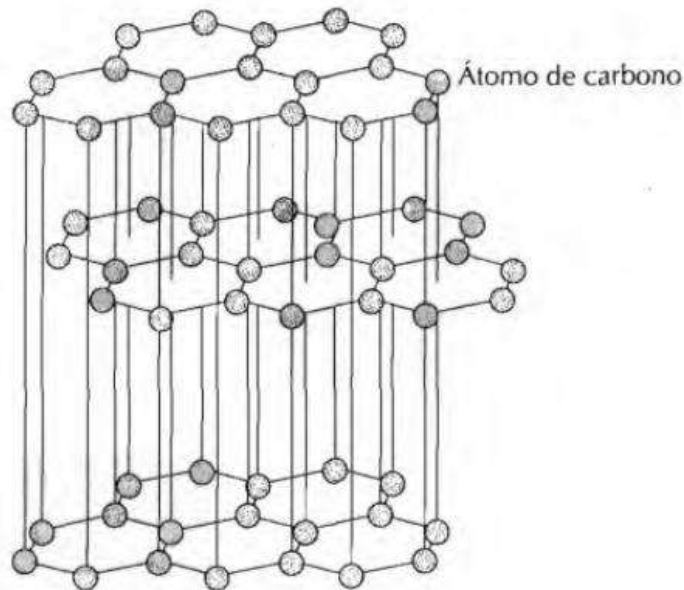


Figura 16 Estructura del grafito [19].

A diferencia del diamante, el grafito es la forma más estable del carbono en condiciones ambientales. Su estructura se organiza en capas hexagonales donde los átomos se unen fuertemente entre sí, pero se mantienen conectados a otras capas mediante enlaces débiles (fuerzas de Van der Waals). Esta debilidad entre láminas es lo que permite que se deslicen fácilmente, otorgándoles su característica capacidad lubricante.

Además de ser resistente al calor y químicamente estable, destaca por su versatilidad en aplicaciones industriales, desde moldes de fundición hasta componentes aeroespaciales. Sin embargo, su rasgo técnico más relevante es su excelente capacidad de conducción eléctrica: gracias a la disposición de sus electrones entre las láminas, el grafito actúa como un conductor altamente eficiente en dirección paralela a sus capas, lo que lo vuelve indispensable para fabricar electrodos, baterías y contactos eléctricos [19].

Biopolímero como matriz

Los polímeros, son materiales tan diversos que abarcan desde los productos comunes como los plásticos, el hule o el caucho y llegan a nuevos tipos de polímeros en desarrollo como los bioplásticos, adhesivos y algunos geles. Estas son moléculas orgánicas gigantes en cadena con pesos moleculares desde 10,000 hasta más de 1,000,000 g/mol. La polimerización es el proceso mediante el cual moléculas más pequeñas se unen para crear estas moléculas gigantes. Algunas aplicaciones comunes de los polímeros incluyen juguetes, aparatos domésticos, elementos estructurales y decorativos, recubrimientos, pinturas, adhesivos, llantas de automóvil, espumas, y empaques. Además, los polímeros son a menudo utilizados como matriz en compuestos.

Las propiedades de los polímeros varían dependiendo del tipo de polímero y su aplicación. Los polímeros estándar son materiales ligeros, resistentes a la corrosión, de baja resistencia y rigidez, adecuados muchas veces para tener cierta maleabilidad-flexibilidad, además de no ser adecuados a temperaturas altas. Suelen ser económicos y fácilmente pueden tomar una diversidad de formas. Entre otras propiedades físicas importantes, estos suelen ser aislantes eléctricos y pueden llegar a ser transparentes, reemplazando a los vidrios cerámicos en algunas aplicaciones [20].

La variedad y el desarrollo constante de estos han llegado a crear polímeros compuestos más resistentes que el acero, resistentes al calor o incluso conductores, siendo una opción viable para la investigación de nuevos productos con propiedades físicas muy específicas.

Ahora bien, los biopolímeros son una nueva clasificación de los polímeros clasificados normalmente bajo el esquema de biomateriales cuya investigación es relativamente nueva, y aún en las fases de desarrollo y experimentación. Como resumen de los biomateriales, estos son productos diseñados para reproducir la función de los materiales en sistemas biológicos de manera segura, funcional y con una buena aceptación fisiológica, aunque claro estos también buscan el reemplazar algunos materiales que generan algún tipo de problema, ya sea en un organismo biológico, medio ambiente o incluso se busquen y obtengan mejores propiedades para aplicaciones no relacionadas con sistemas biológicos pero que puedan tener mejor aplicación que otros materiales.

Entre los biopolímeros en estudio se encuentran los hidrogeles a base de almidón, donde se conoce que el almidón es uno de los biopolímeros más abundantes y económicos que existen. En la naturaleza, se encuentra en forma de partículas discretas o gránulos, cuyos diámetros oscilan entre 2 a 100 μm siendo las principales fuentes comerciales de producción de almidón la papa, el trigo, el maíz y el arroz.

La utilización del almidón como plástico biodegradable presenta ciertas limitaciones debido a su elevada afinidad por el agua, su manufacturación restringida y su escasa solubilidad en disolventes orgánicos comunes. En este contexto, los almidones han sido modificados tanto física como químicamente, para obtener propiedades mejoradas, lo que ha logrado aumentar su importancia con el paso de los años. Esto se debe no solo a su bajo costo y a la variedad de aplicaciones industriales, sino, ante todo, a su capacidad de biodegradabilidad, con lo que teóricamente se estarían reduciendo los compuestos contaminantes en los vertederos debido al exceso de polímeros comerciales en productos tan comunes como las bolsas de plástico [17].

Compuesto deformable reforzado con partículas para aplicaciones electrónicas

Ya se ha abordado lo que es un material reforzado con partículas, y aunque principalmente se usa su refuerzo para aumentar las propiedades mecánicas del compuesto, hay algunos casos en los que se buscan otras propiedades más puntuales, como es el caso del aumento de la conductividad eléctrica.

Para ejemplificar esto, mencionemos un caso de estudio, los polímeros. Incapaces de tener buena conductividad eléctrica, muchas veces se utilizan como aislantes eléctricos, como en el recubrimiento de los cables o en los guantes de seguridad de los electricistas, así como en el mango de sus herramientas. El polímero por sí solo no es capaz de darnos buena conductividad por sí solo, pero esto no significa que no tenga uso alguno en aplicaciones donde se requiere el transporte de la corriente eléctrica y no solo aislarla. Los polímeros, a diferencia de la mayoría de los materiales conductores, presentan una alta ductilidad y maleabilidad para tomar cualquier forma. En el caso de los materiales conductores como cobre, aluminio o grafito presentan características altas de rigidez con baja resistencia a la fatiga.

En este contexto, si a un polímero se quisiera añadir las características eléctricas de un material conductor, a este se le tendría que agregar el mismo material conductor, pero en menores proporciones, o recaeríamos de nuevo en los problemas de rigidez de los materiales conductores. De esta manera se utilizaría una matriz polimérica, la cual va a cubrir y contener las pequeñas cantidades de material de refuerzo en su interior. Esto provoca un aumento significativo en la conductividad del polímero, el cual variará por la concentración del refuerzo y el tipo de este. Cabe destacar que hay varias formas de refuerzo y su uso radica principalmente en el tipo de aplicación o características que se pretenden conservar o sacrificar. Un refuerzo de fibras con un material conductor muy rígido provocará una disminución significativa de la flexibilidad de este, en caso contrario, el uso de partículas permite que materiales muy frágiles, como es el caso del grafito, no afecten en gran medida la flexibilidad del compuesto.

Ahora bien, se mencionó que una matriz dúctil sirve para hacer materiales compuestos flexibles capaces de ser conductores eléctricos, pero estos no tendrán la misma conductividad eléctrica que otro material compuesto de las mismas características eléctricas que sea rígido, o al menos no siempre. Podríamos decir que bajo condiciones normales un compuesto de matriz flexible con partículas conductoras y un compuesto de matriz más rígida con partículas conductoras, y tanto matriz como partículas con las mismas características eléctricas que el compuesto con matriz flexible, tendrán la misma conductividad. Pero, ¿qué quiere decir bajo condiciones normales? En otras palabras, nos referiremos al hecho de que el compuesto flexible no está deformado. Entonces, ¿qué pasa si este se deforma? La respuesta es que dejan de tener la misma conductividad.

Este fenómeno es debido a la separación de las partículas en la matriz del material compuesto. Si la matriz no es un buen conductor, la corriente eléctrica buscará el paso con la menor resistencia, el cual es a través de las partículas del refuerzo conductor. Estas partículas no necesariamente están en contacto una con la otra, lo que ocasiona pequeñas distancias de matriz no conductora. Esta distancia genera un aumento de la resistencia, al bloquear el paso de la corriente hasta cierto punto. La Figura 17 a) muestra una ejemplificación de esto, la corriente representada por la línea punteada roja busca el paso a través de las partículas de refuerzo más próximas, teniendo cierta separación una de otra. En este caso, sobre un material compuesto por una matriz polimérica de baja conductividad eléctrica y un material de refuerzo por medio de partículas conductoras, como es el caso del grafito.

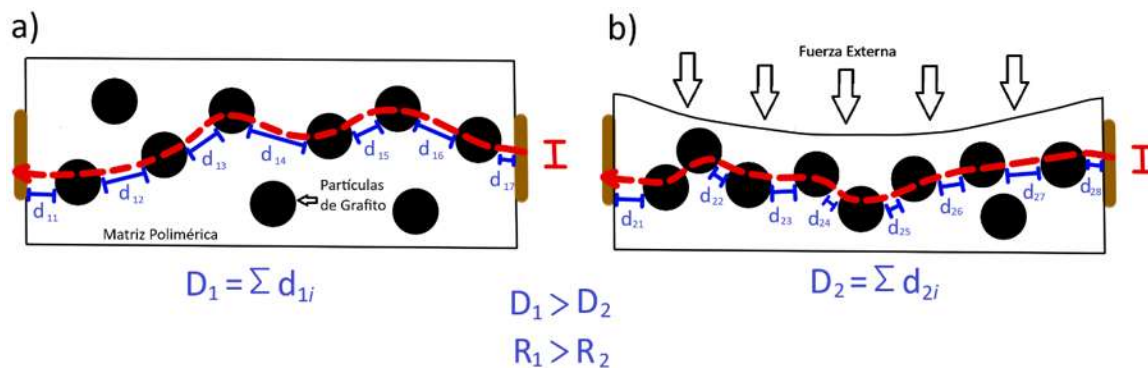


Figura 17 Esquema de la variación de resistencia en compuestos deformables con partículas conductoras.

Si este material presentaba una resistencia R_1 en condición normal, al momento de aplicar una fuerza externa, este material cambiaría su resistencia. El hecho de que el material sea deformable, significa el cambio de la posición y por ende el cambio de distancia de las partículas conductoras dentro del material. Si las partículas están más unidas una de la otra, la matriz polimérica será menor y el bloqueo del paso de la corriente también será menor. De igual forma, esto es ejemplificado en la Figura 17 b) donde se alcanza a apreciar que la línea punteada roja, pasa casi en su totalidad por las partículas de grafito y en menor cantidad por la zona blanca referente a la matriz polimérica no conductora y con una R_2 menor a la R_1 .

Esto da como resultado un material de resistencias variables, el cual ya se ha visto en diversas aplicaciones donde se requiere una variación analógica debida a una fuerza-deformación, como es el caso de los sensores de presión, que se pueden llegar a ver en cosas tan comunes como son las básculas digitales.

Toma de señales eléctricas mediante técnicas de “Electro Impedance Tomography”

La tomografía de impedancia eléctrica es una técnica que genera imágenes de las propiedades eléctricas del tejido a partir de mediciones de impedancia eléctrica realizadas con electrodos de superficie corporal. Este proceso implica la aplicación de corriente eléctrica y la medición de voltajes en una secuencia de electrodos, donde la geometría y las propiedades eléctricas del cuerpo influyen en las mediciones. Posteriormente, se calculan imágenes de conductividad (o cambios en la conductividad) mediante algoritmos de reconstrucción de imágenes y el campo de sensibilidad, lo que finalmente produce mediciones fisiológicamente relevantes.

El término "tomografía" se refiere a la obtención de imágenes del volumen interno de un cuerpo utilizando energía penetrante desde el exterior. Las modalidades tomográficas suelen recibir su nombre según la energía utilizada o su interacción con el cuerpo; la EIT se llama así porque utiliza mediciones de impedancia eléctrica.

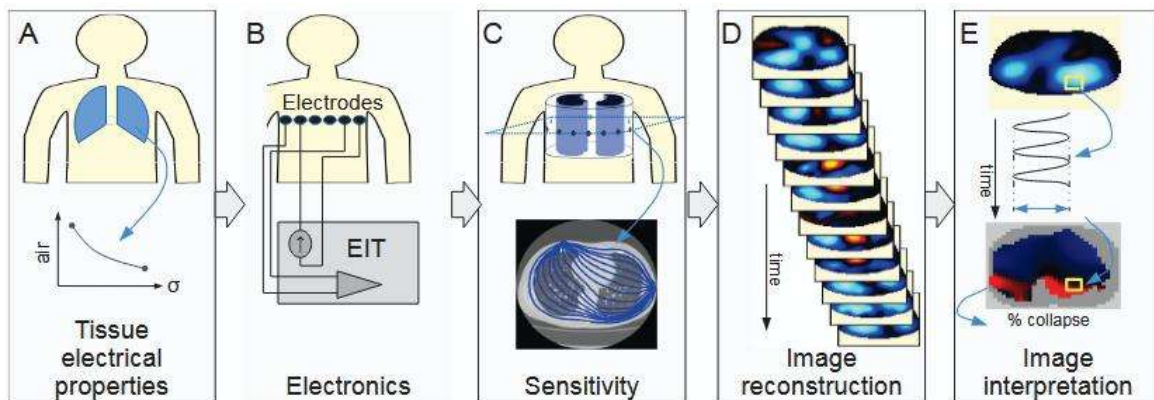


Figura 18. Descripción general de los pasos de la generación e interpretación de imágenes EIT. (A) Los tejidos fisiológicamente interesantes tienen propiedades eléctricas que contrastan con los tejidos circundantes o cambian con el tiempo; (B) El hardware de los sistemas EIT aplica corriente eléctrica y mide voltajes en una secuencia de electrodos de superficie corporal; (C) El patrón de estimulación eléctrica y mediciones, y la geometría corporal y propiedades eléctricas, determinan la región sensible; (D) Las imágenes de la conductividad (EIT absoluta) o el cambio en la conductividad (EIT de diferencia) se calculan utilizando el campo de sensibilidad mediante un algoritmo de reconstrucción de imágenes; y (E) Las medidas fisiológicamente relevantes se calculan a partir de contrastes de imágenes y sus cambios con el tiempo [21].

La Tomografía de Impedancia Eléctrica es principalmente usada en el ámbito de la salud para la toma de tomografías de los tejidos internos de un cuerpo, basándose en mediciones de impedancia eléctrica realizadas mediante electrodos en la superficie corporal. El concepto se ilustra de la siguiente manera: se colocan electrodos en el pecho y se calculan imágenes y formas de onda del movimiento del aire y la sangre [21].

Generación e interpretación de imágenes de EIT:

1. Contraste de tejidos (variación en sus conductividades): Los tejidos de interés fisiológico tienen propiedades eléctricas que contrastan con los tejidos circundantes o cambian con el tiempo.
2. Hardware del sistema: El hardware aplica corriente eléctrica y mide voltajes en una secuencia de electrodos superficiales.
3. Sensibilidad: El patrón de estimulación y la geometría del cuerpo determinan la región de sensibilidad.
4. Reconstrucción: Se calculan imágenes de la conductividad (EIT absoluta) o del cambio de conductividad (EIT diferencial) utilizando un algoritmo de reconstrucción.
5. Interpretación: Se calculan medidas fisiológicamente relevantes a partir de los contrastes de la imagen.

Reconstrucción de Imágenes mediante Conductividad y Resistencia

Para entender cómo la EIT convierte electricidad en imágenes, debemos visualizar el cuerpo no como algo sólido, sino como un mapa de resistencias variables. De esta manera, podemos traducir la técnica de EIT para aplicaciones como su aplicación a sensores de textura. Para continuar realizaremos primeramente el análisis de la técnica aplicada al cuerpo humano:

1. El Principio Físico: Conductividad vs. Resistencia

- Conductividad: Es la facilidad con la que un tejido deja pasar la corriente. Por ejemplo, la sangre es muy conductora.
- Resistencia/Impedancia: Es la oposición al paso de la corriente. El aire en los pulmones o el tejido graso tiene una resistencia alta.
- El contraste: La EIT funciona porque diferentes órganos tienen diferentes capacidades de conducción. Cuando inhalas, tus pulmones se llenan de aire, un aislante, lo que aumenta la resistencia eléctrica de esa zona.

2. La Adquisición de Datos (El "Problema Directo")

Se coloca un cinturón de electrodos alrededor del paciente. El sistema inyecta una corriente minúscula (imperceptible) entre dos electrodos y mide cuánto voltaje llega a los demás electrodos.

- Si el camino entre los electrodos está lleno de sangre (baja resistencia), el voltaje medido será diferente a si el camino está lleno de aire (alta resistencia).
- Este proceso se repite rotando los electrodos cientos de veces por segundo.

3. La Reconstrucción Matemática (El "Problema Inverso")

Aquí es donde ocurre la "magia" de la imagen. El software tiene un modelo matemático de cómo debería distribuirse la electricidad en un cilindro uniforme. Al comparar ese modelo ideal con los voltajes reales medidos, el algoritmo identifica "anomalías":

- Zonas de baja conductividad (alta resistencia): El algoritmo las interpreta como aire (pulmones) y las suele representar en colores específicos.

- Zonas de alta conductividad (baja resistencia): El algoritmo las identifica como fluidos (sangre/corazón).

4. Reconstrucción Diferencial

Dado que la anatomía de cada persona es distinta, es difícil crear una imagen absoluta perfecta. Por ello, la EIT suele destacar el cambio:

- Se toma una medida base (pulmón vacío).
- Se toma una medida nueva (pulmón lleno).
- La imagen final no muestra el órgano en sí, sino dónde cambió la resistencia eléctrica. Ese cambio de resistencia nos dice exactamente a qué partes del pulmón está llegando el aire en tiempo real.

En resumen, la reconstrucción de imágenes en EIT es el proceso de traducir variaciones de voltaje en un mapa visual de propiedades eléctricas, permitiendo "ver" funciones fisiológicas como la respiración o el flujo sanguíneo en el cuerpo humano con ventajas como la obtención de datos sin usar radiación

EIT en sensores de deformación

Entre los puntos clave para la aplicación en sensores de textura podemos inferir lo siguiente:

- La técnica se aplica sobre un cuerpo con variaciones de resistencia eléctrica en diferentes puntos de su entorno
- Se ocupa un “Cinturón de electrodos”, el cual tiene como objetivo inyectar corriente al mismo tiempo que realiza mediciones con el resto de sus electrodos y esto se repite unos cientos de veces en diferentes arreglos
- Se ocupa un algoritmo que, por medio de los datos crudos, nos pueda reconstruir una imagen
- Finalmente, ocupamos una reconstrucción diferencial. Para esto se ocupa una medida inicial la cual se estará comparando con las próximas medidas.

Para aprovechar la EIT como técnica tomográfica, es fundamental que el medio sobre el que se realizan las mediciones sea conductor; los mejores resultados se obtienen cuando la conductividad es homogénea en todo el dominio. En el artículo de F. Visentin 2016, muestran la aplicación de un tejido de grado médico altamente conductor (Statex, Shieldex MedTex180) como material de detección lo que permite la construcción de un sensor flexible y adaptable a diversas geometrías (Figura 19). El material cambia su conductividad de forma no lineal al estirarse en cualquiera de las dos direcciones. La capa conductora lo adhirieron firmemente a un sustrato de espuma delgado y extensible. Esto limita ligeramente la extensibilidad de todo el sensor, pero permite la conversión de fuerzas normales (es decir, fuerzas verticales, como el tacto) en deformaciones locales perceptibles en el plano. Una ventaja adicional del uso de su sustrato consiste en la posibilidad de aplicar la piel artificial sobre diferentes materiales, manteniendo su aislamiento de la corriente eléctrica inyectada [12].

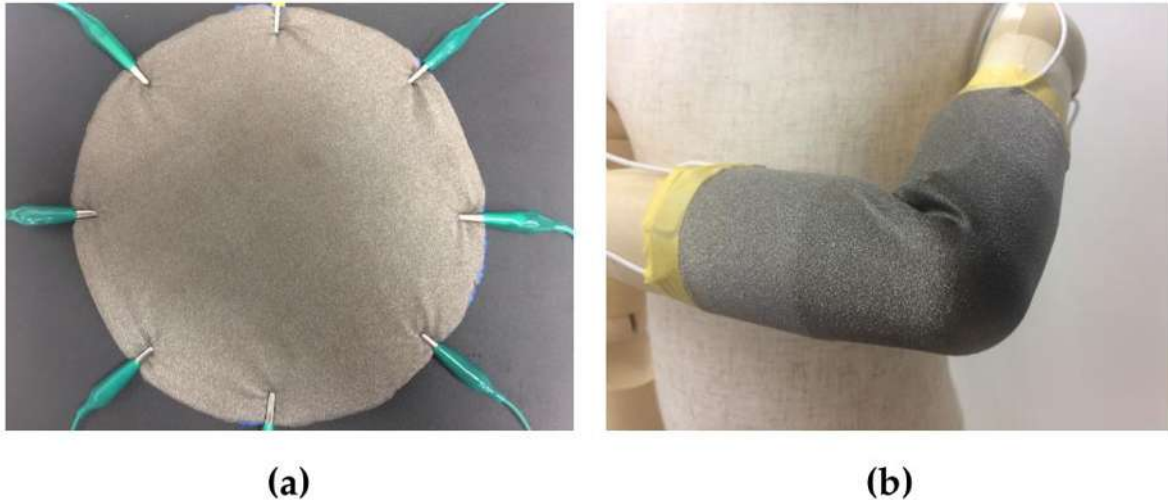


Figura 19. Piel inteligente con cableado. (a) El tejido conductor se fija sobre una espuma elástica que permite una mejor discriminación entre las fuerzas normales y el estiramiento, y crea una capa aislante que permite aplicar la piel artificial sobre diferentes materiales. (b) Posible escenario de aplicación: fijado sobre el brazo de un maniquí [12].

El proceso de reconstrucción en la Tomografía de Impedancia Eléctrica (EIT) inicia con la selección de patrones de inyección y medición, que dependen de factores como la aplicación, el ruido y la geometría del dominio. Los patrones se clasifican por el número de fuentes de corriente, siendo los bipolares, que usan una sola fuente, los más comunes para aplicaciones EIT debido a su menor susceptibilidad a errores de modelado y simplicidad de hardware, especialmente los patrones adyacentes que son populares y fáciles de implementar. La retroproyección fue un método inicial para procesar los potenciales eléctricos y reconstruir la estructura interna, pero no resuelve correctamente el problema de EIT, produciendo imágenes borrosas y artefactos. Enfoques más precisos utilizan algoritmos deterministas basados en el cálculo del jacobiano de la solución directa discreta. La reconstrucción puede ser estática, reconstruyendo el valor absoluto de la conductividad de forma iterativa, o dinámica, reconstruyendo las diferencias de conductividad entre intervalos de tiempo de forma no iterativa, siendo esta última más rápida y menos susceptible a problemas de impedancia o posición de electrodos. En ambos enfoques, se utiliza regularización para abordar la inestabilidad numérica [12].

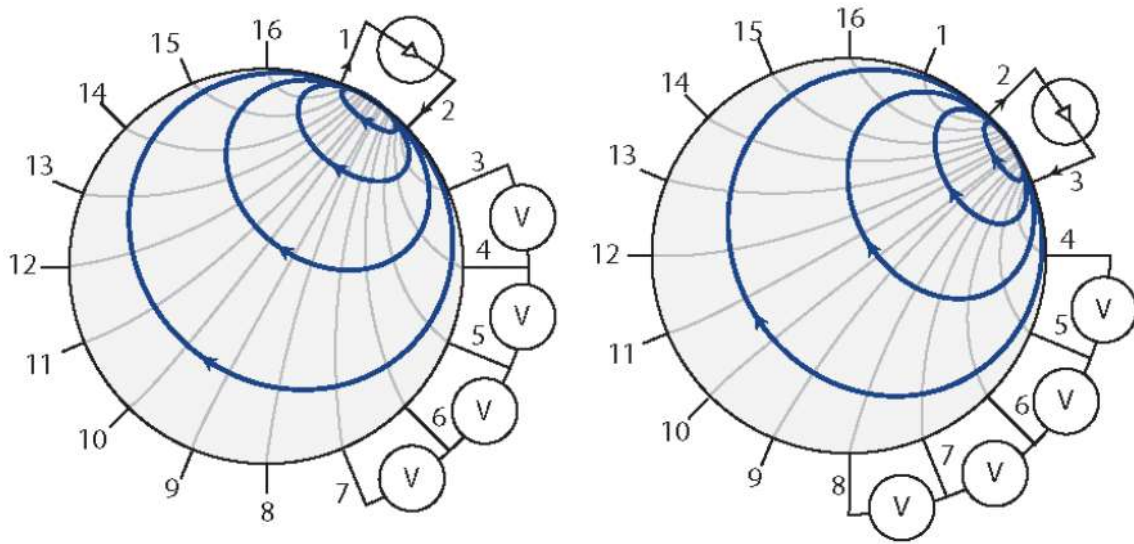


Figura 20. Patrón común para la medición bipolar usada en EIT [12].

Para ejemplificar esto, podemos referirnos a la Figura 20, donde se muestra un patrón bipolar adyacente. En esta se seleccionan dos electrodos como conductores, mientras que los demás se utilizan para medir los potenciales eléctricos generados entre pares adyacentes. El patrón de inyección y medición se conmuta cambiando los electrodos conductores hasta completar un ciclo. Normalmente, no se toman los potenciales eléctricos medidos en los electrodos conductores para garantizar la estabilidad de los datos adquiridos. En la imagen, las líneas grises oscuras indican las zonas de isopotencial, mientras que el flujo de corriente se muestra en azul.

La Figura 21 muestra una imagen reconstruida en función de diferentes sondas aplicadas en el centro de la piel artificial presentada por F. Visentin (2016). Un punto importante es la mención de que, debido a la baja resolución del sistema, no fue posible distinguir claramente las diferentes formas. Sin embargo, el cambio en el tamaño de la sonda se puede identificar fácilmente. Los resultados proporcionados corresponden a una diferencia en el tamaño de la sonda de prueba.

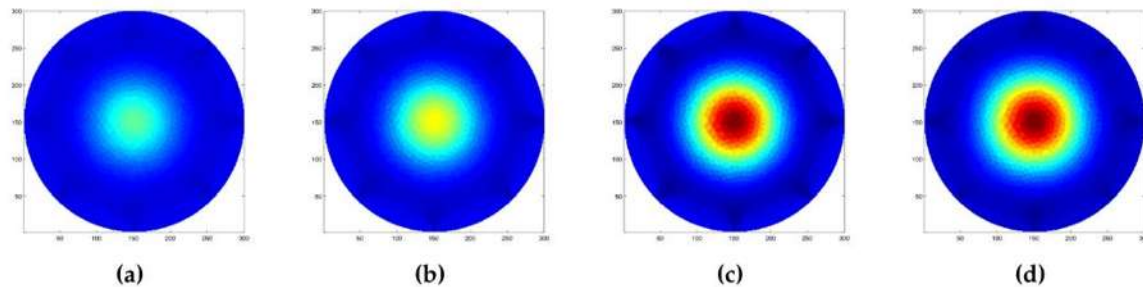


Figura 21. (a) una sonda circular de 15 mm de radio; (b) una sonda circular de 18 mm de radio; (c) una sonda circular de 25 mm de radio; y (d) una sonda cuadrada de 15 mm de lado [12].

Entre los resultados de este artículo, se muestra la experimentación en una prueba de presión múltiple. Para lo cual se realizó la aplicación de cero hasta tres sondas de prueba, de una masa de 400g cada una. Esto demuestra las capacidades del EIT en aplicaciones más complejas y considerando la baja resolución del sistema (8 electrodos), muestran muy buenos resultados en el textil conductor mencionado en el artículo

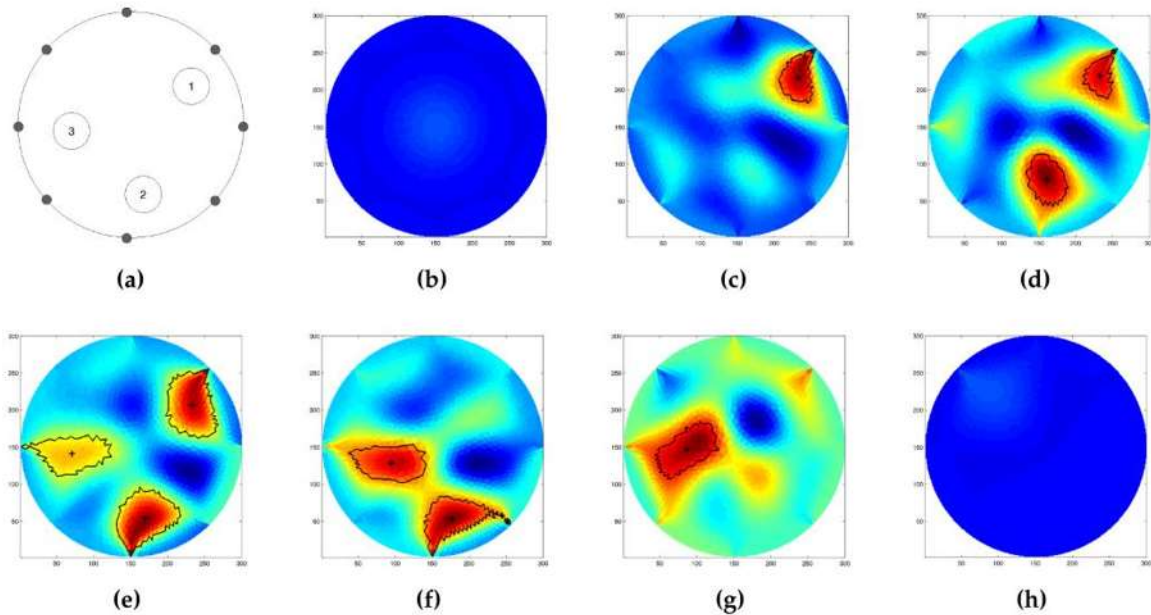


Figura 22. Imágenes seleccionadas del experimento de multipresión. (a) Posiciones de las sondas; (b) voltaje de referencia; (c-e) carga secuencial; y (f-h) descarga de las diferentes sondas. En cada imagen, para cada sonda, se muestran su centroide y los límites calculados [12].

La Figura 22, presenta las capacidades de la reconstrucción EIT de la piel artificial debida a la presión en varios puntos al mismo tiempo. Esto, a grandes rasgos, muestra la posibilidad de crear un sensor capaz de medir relieves, formas e incluso posiciones de los objetos.

Capítulo 3.- Desarrollo del proyecto.

Metodología.

Metodología de Diseño Generalizada.

Entonces, de acuerdo con el marco teórico, podemos crear un mapa conceptual del diseño generalizado utilizado en sensores de textura, por lo que se muestra de manera simplificada la metodología de diseño generalizada para el desarrollo del sensor inteligente. De manera compacta podemos decir que se divide en partes.

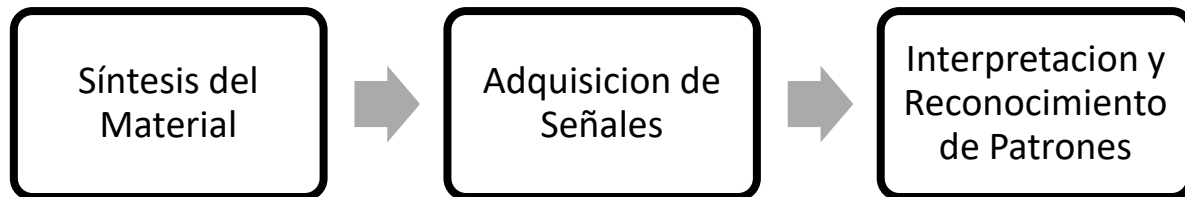


Figura 23 Diagrama de la Metodología de Diseño Generalizada.

La primera parte “Síntesis del Material” es la parte relacionada a la ciencia de materiales. En esta parte se abordan los pasos a seguir para la elaboración de un material compuesto capaz de cumplir con los requisitos propuestos del proyecto. La síntesis del material maneja desde la búsqueda bibliográfica de los materiales, como la comprensión química de estos, y finalmente se pasa al laboratorio, donde se pasa a realizar las pruebas experimentales y se fabrica el material.

La segunda parte es “Adquisición de las señales” es la parte relacionada a la Electrónica y Control. En esta parte se desarrolla el hardware necesario para la adquisición de las señales. En esta parte se buscan proyectos con fundamentos similares y se pasa a la replicación de estos con las adaptaciones pertinentes al proyecto.

La tercera parte, “Interpretación y Reconocimiento de Patrones”, está relacionada con la programación. En esta parte se buscará realizar un programa, que, por lógica matemática, sea capaz de traducir las listas de datos obtenidas en datos útiles y entendibles, como en la creación de imágenes. Para lo cual se utilizarán lenguajes de programación como Python, bibliotecas de código abierto que engloben la matemática avanzada, entre otros, y se procederá a mostrar los resultados del sensor.

Como se pudo apreciar, este proyecto analiza, sintetiza y armoniza los vínculos entre disciplinas en un todo coordinado y coherente para dar lugar a un proyecto interdisciplinario.

Flujo del proyecto.

En esta sección se presentan los pasos a seguir para el desarrollo e implementación del proyecto, que, en comparación con la metodología generalizada de diseño, esta informa de manera más detallada cada paso realizado en la solución de este proyecto.

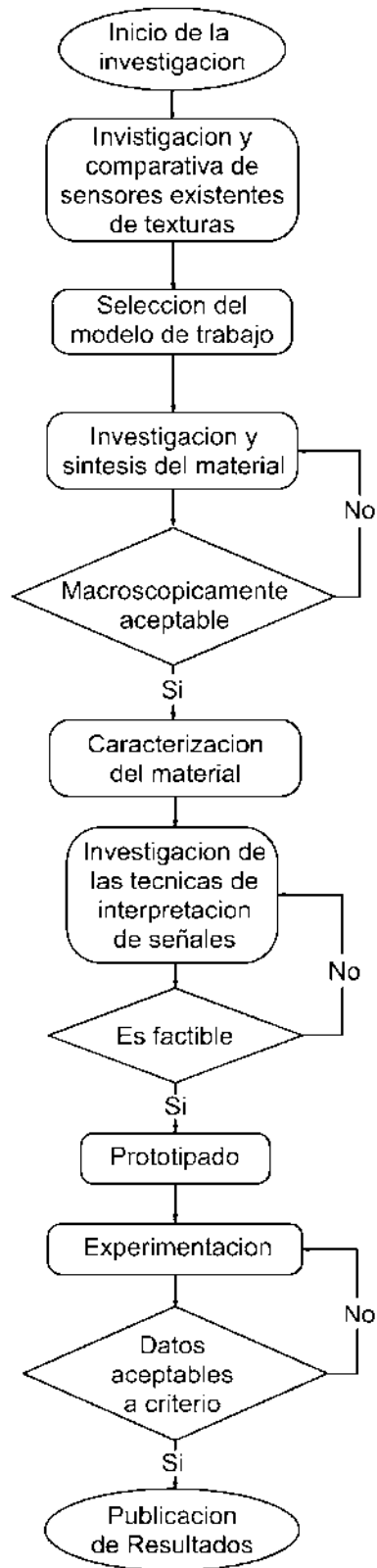


Figura 24. Mapa del flujo del proyecto a seguir durante la investigación del sensor.

Cada una de las fases representadas en el diagrama de flujo (Figura 24) se describe a continuación:

1. Inicio de la investigación: Se define el punto de partida del proyecto, estableciendo el marco teórico inicial y los objetivos generales que guiarán el desarrollo del sensor de texturas.
2. Investigación y comparativa de sensores existentes de texturas: Se realiza una revisión exhaustiva del estado del arte. El enfoque se centra específicamente en dispositivos que detectan texturas, analizando sus principios de funcionamiento (resistivos, ópticos, etc.) para identificar áreas de oportunidad
3. Selección del modelo de trabajo: Con base en la comparativa anterior, se elige la arquitectura o el principio físico que mejor se adapte a los objetivos del proyecto.
4. Investigación y síntesis del material: Esta etapa comprende la búsqueda y la síntesis química o física de los componentes del sensor. Aquí se trabaja en la formulación de mezclas que permitan obtener las propiedades mecánicas y eléctricas deseadas.
5. Evaluación macroscópica (¿Es aceptable?): Se realiza una inspección visual y física preliminar del material sintetizado. Si el material es demasiado frágil, no es homogéneo o presenta defectos críticos, el flujo regresa a la etapa de síntesis para ajustar la fórmula.
6. Caracterización del material: Una vez que el material se ha establecido, se somete a pruebas técnicas rigurosas para medir sus propiedades reales.
7. Investigación de técnicas de interpretación de señales: Se analizan los algoritmos y métodos matemáticos necesarios para procesar los datos crudos del sensor. Esta es la selección de herramientas y hardware para convertir el cambio de resistencia en información de textura legible.
8. Análisis de factibilidad (¿Es factible?): Se evalúa si la combinación del material caracterizado y las técnicas de interpretación permiten alcanzar los objetivos del proyecto. Si el método no es el adecuado, se debe replantear la técnica de interpretación.
9. Prototipado: Tras validar la factibilidad, se construye la versión funcional del sensor. En esta etapa se integran los materiales sintetizados con los sistemas de adquisición de datos y la estructura física diseñada.
10. Experimentación: Se somete el prototipo a pruebas de campo controladas y se recolectan datos reales para comprobar si el sensor responde de manera consistente a los estímulos externos.
11. Validación de datos (¿Datos aceptables a criterio?): Se analizan los resultados de la experimentación; si son datos aceptables, se regresa a la fase de experimentación o prototipado para corregir errores.
12. Publicación de resultados: Es la etapa final en la que se documentan los hallazgos, se valida la hipótesis inicial y se presentan los resultados en la tesis, aportando formalmente el conocimiento generado a la comunidad académica.

Síntesis del material.

El material compuesto tratado consiste en la incorporación de partículas de grafito a un material biopolímero de algún tipo de almidón, en este caso, almidón de papa. En este caso, el propósito de añadir las partículas de grafito es aumentar la capacidad conductiva del material, pasando así de un material no conductor, como el bioplástico, a uno que pueda usarse como conductor eléctrico.

En el proceso de fabricación de un material compuesto se sigue una serie de procedimientos estandarizados; estos tienen que ser reproducibles y controlables, de manera que se puedan volver a realizar y, además, se puedan realizar por cualquier individuo. En este caso, la fabricación utilizó las concentraciones y proceso estudiados en proyectos de elaboración de películas bioplásticas apoyados por la CIC del cuerpo académico CA-UMSNH-267, añadiendo el polvo de grafito en la fase de gelación para una óptima incorporación en el mezclado (Figura 25).



Figura 25. Diagrama de proceso de la síntesis del material.

Selección (Reactivos)

Se seleccionaron los reactivos utilizados en la creación de biopelículas estudiados por el cuerpo académico mencionado anteriormente, donde los principales materiales son: glicerol, ácido acético glacial, agua destilada desionizada, almidón (en este caso, almidón de papa y almidón de arroz). Además, se seleccionó grafito como material de refuerzo debido a que es conductor y relativamente barato.

Pesar (Reactivos)

Se pesaron y añadieron los reactivos en cantidades ya estudiadas y probadas para la creación de una película bioplástica de 10 g.

- Glicerol: variable para las diferentes pruebas de 0.5 a 1 g.
- Ácido acético glacial: 0.2 g
- Almidón: 0.6 g
- Grafito: el material de refuerzo y variable para las diferentes pruebas de 2.5 g a 0.3 g.
- Agua destilada desionizada: su proporción será la misma para completar los 10 g ya con los otros reactivos sumados.

Mezcla y polimerización

Nos referiremos en este paso a una serie de pasos y procesos, donde se necesitan los materiales en forma de polvos o en forma líquida para un mezclado uniforme. Podemos dividirlos en tres pasos a seguir para la correcta replicación del experimento.

El primer paso es la adición de los reactivos para formar la mezcla de la película de bioclástico. Lo recomendable es la adición inicial del glicerol y el ácido acético glacial, e incluso el almidón, antes del agua. Esto se debe a que reactivos como el glicerol se adhieren mucho a la superficie de los materiales de laboratorio, por lo que se puede utilizar la misma agua para desprender el material restante.

El segundo paso es la acción de mezclar, con lo cual se utilizó una mesa caliente con agitador cerámico, donde los reactivos se mezclan bajo baño maría. El compuesto se mezcla durante aproximadamente 30 min mientras sube su temperatura ambiente hasta aproximadamente 70 °C en este punto, la mezcla entra en un estado de gelación donde su estado se vuelve parecido a la miel, y donde debe retirarse del calor.

El tercer y último paso es la adición del grafito, el cual no se añade hasta el punto de gelación y es mezclado a mano por medio de una espátula de laboratorio hasta que el compuesto se vea homogéneo. El grafito, antes de su utilización, debe estar en forma de polvo y tamizado. Es recomendable un tamaño de partícula pequeño, por lo cual se optó por el uso de un tamiz de malla de 80/177 micrones. Un tamaño de partícula pequeño lograr una mejor dispersión y mezcla de las partículas de refuerzo sobre la matriz polimérica.

Dispersión de partículas

Como antes se mencionaba, una buena dispersión permite valores más constantes, evitando la aparición de zonas con propiedades diferentes. Tomando en cuenta que el grafito es el material de refuerzo conductor en un material no conductor, se deben tomar precauciones ante aglomeraciones, variabilidad de espesor y discontinuidades del material. Ya que, a mayores aglomeraciones del grafito en una zona, indican que habrá mayor fragilidad y conductividad en esa zona específica. Por el contrario, a menor aglomeración, podría simplemente traducirse en una zona que, por más que se deforme, no logre producir cambio alguno en sus propiedades conductivas, porque probablemente nunca pase la corriente por ahí.

Para una mejor dispersión de las partículas y del compuesto, se consideró utilizar el baño ultrasónico. El baño ultrasónico es un dispositivo que utiliza ondas sonoras de alta frecuencia para hacer vibrar el líquido de su interior. Entonces, en este contexto, las muestras, aun en la caja de Petri, se colocaron en el baño ultrasónico para que, por medio de las vibraciones transmitidas, se dispersaran las partículas de una mejor manera. Estas muestras se dejaron en el baño ultrasónico por un tiempo promedio de una hora cada muestra, lo cual también ayudó en el esparcimiento de la mezcla en sí sobre la caja Petri mejorando también una altura más uniforme en las películas finales

Secado

En este paso la mezcla se esparcida en cajas Petri resistentes al calor, se pasaron a un horno, con el fin de eliminar el exceso de agua a 50°C durante aproximadamente 24hrs. Al cabo del tiempo establecido, se retiraron del horno y, por medio de una espátula de laboratorio y con mucho cuidado, estas se retiraron de las cajas de Petri.

Caracterización por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

La microscopía electrónica de barrido (MEB) representa una herramienta analítica fundamental para la caracterización de superficies, destacando por su elevada resolución y su capacidad para generar imágenes con apariencia tridimensional (Figura 26). El principio operativo del equipo se basa en un cañón de electrones situado en una columna bajo condiciones de alto vacío (mm de Hg), donde se produce un haz de alta energía, generalmente en un rango de 5 a 30 kV. La imagen se construye a través de un barrido sistemático (rastering) del haz sobre un área específica de la muestra, procesando las señales resultantes de la interacción electrónica mediante detectores especializados.

Durante este desplazamiento, se produce una interacción física entre los electrones del haz y los átomos de la muestra, lo que origina distintas señales captadas por detectores específicos. Estas señales se procesan y transforman en información visual que se despliega en un monitor, representando de forma amplificada la zona barrida.

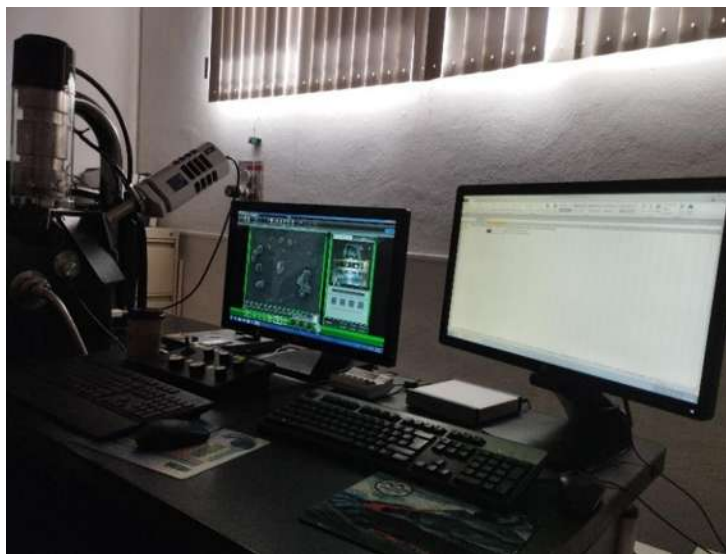


Figura 26. Equipo de Microscopía Electrónica de Barrido del Instituto de Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), campus Morelia.

La naturaleza de la imagen obtenida depende del tipo de electrón detectado. Unos son los electrones secundarios: al ser dispersados de forma inelástica y poseer baja energía (20-50 eV), provienen de las capas más superficiales, lo que permite obtener imágenes de máxima resolución y detalle topográfico. Y los otros son los electrones retrodispersados: estos resultan de una dispersión elástica con energías próximas al haz incidente (10-30 keV). Al emerger de zonas más profundas del volumen de interacción, su resolución es menor; no

obstante, su emisión está ligada al número atómico (Z). Esto permite identificar variaciones químicas: los elementos con mayor número atómico emiten estos electrones con más eficiencia, visualizándose como áreas brillantes, mientras que los de menor número atómico aparecen más oscuros [22].

En el estudio de biomateriales, la aplicación de esta técnica exige que las muestras sean conductoras y estables bajo vacío. Para especímenes no conductores, se requiere un tratamiento previo mediante espolvoreado catódico (sputtering), el cual consiste en la deposición de una película ultrafina de oro o carbono (10 a 40 nm) para conferir la conductividad necesaria sin alterar la morfología superficial (Figura 16) [17].



Figura 27 Equipo de Cubierta por espolvoreado catódico del Instituto de Materiales de Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) campus Morelia

Caracterización por Difracción de Rayos X (DRX)

La Difracción de Rayos X (DRX) se consolida como una de las metodologías más eficaces para el estudio estructural de la materia a nivel atómico. Su principio operativo se basa en el uso de radiación electromagnética con longitudes de onda cercanas a $1.5 \text{ \AA}$, dimensiones que guardan una analogía directa con el espaciado interplanar de los sólidos cristalinos. Debido a que los fotones carecen de carga y masa, la técnica permite una caracterización no destructiva y de fácil acceso, pues generalmente no requiere procesos complejos de preparación de muestras [17].

A nivel físico, el fenómeno ocurre cuando el haz de rayos X incide sobre los átomos del material, interactuando con sus orbitales electrónicos y provocando procesos de dispersión elástica e inelástica (Figura 28). La radiación dispersada elásticamente da lugar al patrón de difracción, el cual se rige fundamentalmente por la Ley de Bragg, expresada mediante la ecuación:

$$n\lambda = 2d \text{ Sen}\theta$$

En esta relación, n representa el orden de reflexión, λ es la longitud de onda incidente, d corresponde a la distancia interplanar y θ es el ángulo de incidencia. La posición de los máximos de difracción (picos) está determinada por la disposición espacial de los átomos, mientras que la intensidad de dichos reflejos depende de la naturaleza química de los elementos presentes.

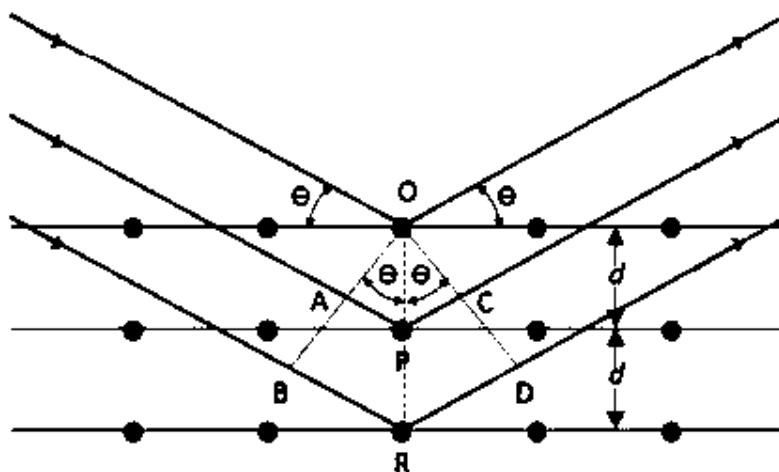


Figura 28 Interacción entre los rayos X y la estructura [22].

En el campo de las nanociencias y la ciencia de materiales, un difractograma funciona como una "huella digital" que permite la identificación cualitativa de componentes en mezclas, minerales, aleaciones y catalizadores. Al contrastar los perfiles obtenidos —intensidades relativas, distancias interplanares e índices de Miller— con las bases de datos del International Centre for Diffraction Data, es posible confirmar la pureza o composición de un compuesto [22].

La interpretación integral de un difractograma permite extraer información crítica sobre la arquitectura interna del material. A partir de la posición de las reflexiones, se deducen la geometría y las dimensiones de la celda unitaria, mientras que el análisis de la intensidad de los picos facilita la determinación de la distribución atómica y las proporciones de las fases presentes en mezclas. Asimismo, el estudio detallado de la geometría de dichas reflexiones posibilita el cálculo del tamaño de los cristales y la ejecución de un análisis cualitativo preciso para la identificación de los componentes individuales de la muestra.

Esta técnica no solo facilita la caracterización de estructuras conocidas obtenidas mediante métodos novedosos o más eficientes, sino que también permite establecer la correlación directa entre la estructura cristalina y las propiedades físicas del material.

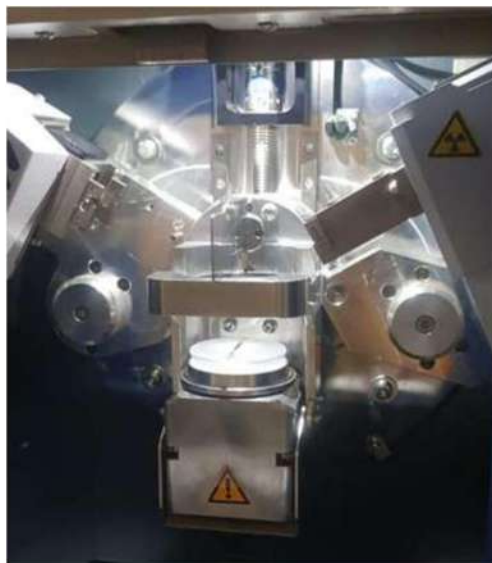


Figura 29 Difractómetro de rayos X del Centro de Investigación de Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) campus Morelia [17]

Caracterización por Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

La Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) constituye una técnica analítica esencial para la obtención de la "huella dactilar molecular" de diversas muestras, fundamentándose en la absorción de radiación infrarroja según la naturaleza de los enlaces químicos y la arquitectura molecular (Figura 30). En el ámbito biológico, esta herramienta permite caracterizar la estructura específica de lípidos, proteínas, carbohidratos y ácidos nucleicos mediante la identificación de bandas correspondientes a grupos funcionales en la región del infrarrojo medio. La versatilidad de la técnica ha facilitado su transición hacia el diagnóstico clínico y estudios citológicos, especialmente cuando se complementa con herramientas estadísticas como el Análisis de Componentes Principales (ACP), el cual permite la discriminación precisa entre distintos linajes celulares [17].

Más allá de los sistemas biológicos, la técnica es crucial para la caracterización de materiales compuestos basados en grafito. En estos sistemas, la FTIR permite monitorear la interacción entre la matriz y el refuerzo de carbono e identificar los cambios en los modos vibracionales de los grupos funcionales tras la síntesis. De acuerdo con J. Song et al. (2020), la espectroscopia infrarroja es determinante para verificar la presencia de grupos oxigenados y la estabilidad de los enlaces en compuestos de grafito, asegurando que las propiedades químicas deseadas se mantengan tras la integración del material. De este modo, la FTIR se consolida como un método robusto tanto para la identificación de biomoléculas como para la validación estructural de materiales avanzados [23].

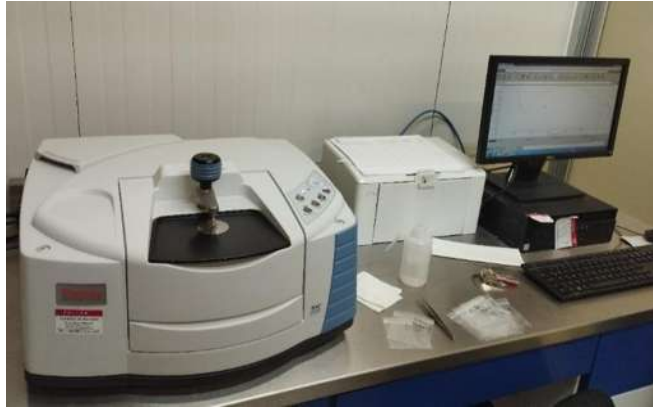


Figura 30. Equipo de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier del Instituto de Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), campus Morelia.

Caracterización eléctrica

Medición por dos puntos (Multímetro en la modalidad de óhmetro)

La medición por 2 puntos es el método más común y sencillo para medir la resistencia eléctrica. Consiste en conectar dos puntas de prueba desde un multímetro a los extremos del componente o material a evaluar. El instrumento aplica una tensión conocida y mide la corriente resultante, o viceversa, para calcular la resistencia. Supone la opción más económica para la caracterización eléctrica, siendo posible desde multímetros de muy bajo costo con la cual por medio de la modalidad óhmetro es capaz de obtener datos como la resistencia eléctrica del material y por ende su conductividad [24] [25].

$$R_{total}=R_{objeto}+R_{cables}+R_{contacto}$$

Aplicaciones:

- Mantenimiento eléctrico: Pruebas de continuidad en circuitos y cableados.
- Electrónica general: Verificación de componentes como resistencias, diodos y bobinas.
- Diagnóstico automotriz: Comprobación de sensores y actuadores de alta impedancia.

Ventajas:

- Simplicidad y rapidez: No requiere configuraciones complejas ni equipos costosos.
- Portabilidad: Los multímetros digitales son herramientas manuales fáciles de transportar.
- Efectivo para altas resistencias: El error de los cables es despreciable cuando se miden valores en el rango del kilo ohm o mega ohm.

Limitaciones:

- Inexactitud en bajas resistencias: No es apto para medir valores cercanos a cero, ya que la resistencia de los cables suele ser de 0.1 a 0.5 ohm

- Sensibilidad al contacto: La presión ejercida sobre las puntas puede variar la lectura significativamente.

Corrientes de Eddy

Las corrientes de Eddy, también conocidas como corrientes parásitas o corrientes inducidas, son corrientes eléctricas que se generan en un material conductor cuando este se encuentra expuesto a un campo magnético variable. Estas corrientes circulan en bucles cerrados dentro del material y pueden ser utilizadas para la detección de defectos y la caracterización de materiales.

Cuando un material conductor se encuentra en un campo magnético variable (por ejemplo, al acercar un imán a una pieza de metal), el campo magnético induce una corriente eléctrica en el material. Esta corriente, a su vez, genera su propio campo magnético, que interactúa con el campo magnético original. Si el material conductor presenta alguna discontinuidad, como una grieta o una falta de material, el flujo de las corrientes de Eddy se ve alterado, lo que puede ser detectado y analizado [26] [27].

Aplicaciones:

- Inspección no destructiva: Las corrientes de Eddy son una técnica de inspección no destructiva ampliamente utilizada para detectar defectos en materiales conductores, como grietas, corrosión, o falta de material.
- Caracterización de materiales: También se pueden utilizar para medir propiedades como la conductividad, permeabilidad magnética, dureza y espesor de recubrimientos.
- Control de calidad en la fabricación: Se utilizan para asegurar que los materiales y componentes cumplan con las especificaciones de calidad deseadas.
- Aplicaciones en diversas industrias: Se utilizan en industrias como la aeroespacial, automotriz, petrolera y de generación de energía.
- Control de Procesos: Clasificación de aleaciones y verificación de tratamientos térmicos en líneas de producción automatizadas.

Ventajas de las corrientes de Eddy:

- Alta Sensibilidad: Capacidad para detectar grietas microscópicas y cambios sutiles en la metalurgia del material.
- Rápidas y eficientes: permiten inspeccionar grandes áreas en poco tiempo.
- Portátiles: Los equipos de inspección pueden ser portátiles y utilizarse en diferentes ubicaciones.
- Pueden inspeccionar a través de recubrimientos: Pueden detectar defectos incluso si hay un recubrimiento no conductor sobre el material.

Limitaciones:

- Profundidad de penetración limitada: La profundidad a la que se pueden detectar defectos es limitada y depende de varios factores, como la frecuencia de la corriente, la conductividad y la permeabilidad magnética del material.
- Sensibilidad a la geometría: La forma y la geometría del componente pueden afectar la detección de defectos.
- Interpretación de señales: Es necesario un experto para interpretar las señales generadas por las corrientes de Eddy y determinar la presencia y la gravedad de los defectos.
- Exclusivo para Conductores: No puede utilizarse en materiales no conductores como plásticos o cerámicas



Figura 31. Detector de corrientes de Eddy y sonda de medición.

El equipo de la Figura 31 es un detector de defectos por corrientes de Foucault (Eddy) perteneciente al Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Su funcionamiento implica una sonda con una bobina que se acerca a un material conductor (metálico). El equipo pasa una corriente alterna a través de la bobina, lo que induce corrientes eléctricas (corrientes de Eddy) en el material.

Potencial Termoeléctrico

El potencial termoeléctrico es la capacidad de convertir gradientes de temperatura directamente en voltaje eléctrico (y viceversa) a través de la unión de conductores o semiconductores disímiles. Este fenómeno físico abarca la interacción entre el flujo de calor y la corriente eléctrica, permitiendo la creación de dispositivos de medición y generación de energía de estado sólido [19] [28].

Fenómenos Principales:

- Efecto Seebeck: Generación de un voltaje proporcional a la diferencia de temperatura entre dos uniones de metales distintos.
- Efecto Peltier: transferencia de calor en una unión cuando circula una corriente eléctrica.

- Efecto Thomson: Producción o absorción de calor en un conductor individual que transporta corriente bajo un gradiente térmico.

Aplicaciones:

- Termometría Industrial: Uso de termopares para la medición precisa de temperaturas en entornos extremos.
- Generación de Energía (RTG): Conversión de calor residual o de radioisótopos en electricidad para misiones espaciales y sensores remotos.
- Refrigeración de Precisión: Microenfriadores para componentes electrónicos y sensores láser basados en celdas Peltier.

Ventajas:

- Estado Sólido: No posee partes móviles, lo que garantiza una larga vida útil y alta confiabilidad.
- Funcionamiento Pasivo: En el caso del efecto Seebeck, los sensores no requieren alimentación externa para generar señal.
- Escalabilidad: Permite diseñar dispositivos desde microchips hasta generadores industriales.

Limitaciones:

- Baja Eficiencia: Los materiales actuales tienen un rendimiento de conversión térmica limitado en comparación con ciclos mecánicos.
- Costo de Materiales: El uso de telururo de bismuto y otros compuestos especializados puede ser elevado.



Figura 32. Gaussmetro/fluxómetro con punta de medición de potencial termoeléctrico.

El dispositivo de la Figura 32 se puede utilizar para medir el potencial termoeléctrico mediante un accesorio especializado llamado Alloy ThermoSorter. La sonda de este accesorio contiene un elemento calefactor que crea deliberadamente un gradiente de temperatura en la superficie del metal bajo prueba. La diferencia de temperatura genera un pequeño voltaje (el potencial termoeléctrico, basado en el efecto Seebeck) que la unidad principal mide.

Medición por cuatro puntos (Método de Kelvin)

La medición por 4 puntos, también conocida como técnica de sonda de cuatro puntas, es un método de precisión utilizado para determinar la resistividad eléctrica de materiales conductores y semiconductores. A diferencia del método convencional, este separa los electrodos que suministran la corriente de los electrodos que miden el potencial, eliminando el error provocado por la resistencia de los cables y la resistencia de contacto.

El principio se basa en aplicar una corriente constante I a través de los dos electrodos externos, mientras que los dos electrodos internos miden la caída de tensión V . Como la impedancia del voltímetro es muy alta, prácticamente no circula corriente por las puntas internas, lo que permite obtener una lectura exacta de la resistencia del material mediante la ley de Ohm [29] [30]:

Aplicaciones:

- Caracterización de semiconductores: medición de la resistividad en obleas de silicio.
- Nanotecnología: determinación de la resistencia de películas delgadas y de grafeno.
- Control de calidad: verificación de la pureza de metales y aleaciones de alta conductividad.
- Células solares: Evaluación de la eficiencia de las capas conductoras transparentes.

Ventajas:

- Alta precisión: Elimina por completo los errores por resistencia de contacto.
- Ideal para bajas resistencias: Es el estándar para medir valores inferiores a 1 ohm
- Versatilidad: Aplicable tanto a muestras pequeñas como a grandes superficies.

Limitaciones:

- Requiere geometría específica: Para obtener la resistividad se deben aplicar factores de corrección basados en el espesor y forma de la muestra.
- Daño superficial: Las puntas de prueba pueden dejar pequeñas marcas en materiales blandos.

Los costos de los equipos especializados de medición por cuatro puntos muchas veces llevan a la búsqueda de alternativas para la replicación de estos. Estos dispositivos suelen tener una sonda de 4 puntas, una fuente de corriente, un voltímetro de alta impedancia y una unidad de control.

Interpretación de señales.

Primeramente y el paso más importante para la interpretación de señales es la determinación de si un material es capaz de conducir la corriente eléctrica, y determinar de igual manera si cumple otras consideraciones como la variación de la conducción eléctrica si el entorno de este material se ve afectado por fuerzas externas.

Para la caracterización eléctrica, se procede, por medio de algún método conocido, a la determinación de la resistencia eléctrica del material. Y considerando esto, se procede con la prueba de deformar el material mientras se toman mediciones para determinar si la resistencia eléctrica variará.

El método más simple y barato para la realización de la caracterización eléctrica es el uso de un multímetro en la modalidad de óhmetro, para esto, utilizan las dos puntas del multímetro en el material a una distancia establecida, por ejemplo, 1cm, y se procede a obtener la resistencia eléctrica en ohm. A este método también se le conoce como caracterización por dos puntos, puesto que el óhmetro (multímetro) utiliza dos puntas de medición. Si se busca más calidad de los resultados, se puede optar por la aplicación de un dispositivo como un Arduino, ESP32, etc. Para la adquisición de datos y gráficas.

La recomendación es, si y solo si, no es lo primordial la calidad de la caracterización eléctrica en el proyecto o investigación, el uso de la técnica de caracterización eléctrica por dos puntos es el más factible debido al bajo costo, facilidad y rapidez en la adquisición de los datos. En casos como el presentado en la tesis, existe un punto clave que es el uso de un diferencial. Esto se aborda más a detalle en la interpretación de las señales.

Electrónica de control.

En el mundo de la electrónica y los materiales, uno de los métodos más usados en cuanto a sensores y detección de señales en materiales conductores es el uso de la medición de la corriente eléctrica y, en casos de mayor precisión, suelen utilizarse técnicas como la medición de la impedancia. Para estos casos, se suele seguir el mismo procedimiento: inyectar una corriente eléctrica y por medio de mínimo dos puntos, hacer la medición de esta sobre el material. De esto han surgido técnicas como la técnica de Van der Pauw, utilizada en caracterizaciones eléctricas, o las técnicas de tomografía por impedancia eléctrica, las cuales se abordarán y desarrollarán más adelante.

Configuración de los electrodos

Hay que tener dos aspectos fundamentales en cuanto a la configuración de los electrodos. Las formas circulares tienden a ser mejores en la adquisición de las señales, ya que estas distribuyen mejor las cargas eléctricas y las mediciones, teniendo una mejor distribución en el centro. En cambio, las configuraciones de formas cuadradas: las esquinas pueden generar zonas diferentes debido a mayor o menor concentración de las propiedades eléctricas y complican los algoritmos de reconstrucción.

Ahora el aspecto más importante a tener en cuenta en los desarrollos de los sistemas EIT en cuanto a precisión y capacidad del dispositivo, es la cantidad de los electrodos utilizados.

Obviamente se sabe que el uso de estas técnicas indica que se ocupan mínimo dos electrodos de inyección y dos electrodos de medición. En este sentido uno de los dispositivos EIT más simples se podría realizar con solo cuatro electrodos. La simpleza del menor uso de electrodos suele llevar a la menor precisión de las mediciones. De la literatura sabemos que, a mayor número de electrodos, la complejidad aumenta al mismo tiempo que la precisión y resolución del sistema. Entre los dispositivos realizados por otras investigaciones se han utilizado arreglos circulares de 8 a 16 electrodos comúnmente, lo que lleva a una resolución decente en sus trabajos.

El número de electrodos también está relacionado con la creación de la malla. Dado que el mayor número de electrodos significa mayor resolución, pero ¿qué es esta resolución? De manera muy resumida, veamos el siguiente ejemplo. Si consideramos un círculo que queremos dividir en figuras de fácil cálculo, como son triángulos (Tria) y cuadriláteros (Quad), a menor número de estas figuras, significará que serán más grandes, con menos cálculos, pero de igual manera, no será tan circular como se quisiera. En sentido contrario, a mayor número de estas figuras, significa que será más parecido a un círculo, pero de igual manera incrementa la complejidad del sistema. Esta forma de dividir el círculo en figuras sencillas para su reconstrucción y análisis sería la malla, mientras que la cantidad de figuras realizadas por la malla sería la resolución. Como conclusión, la resolución y la malla están íntegramente relacionadas entre sí (Figura 33).

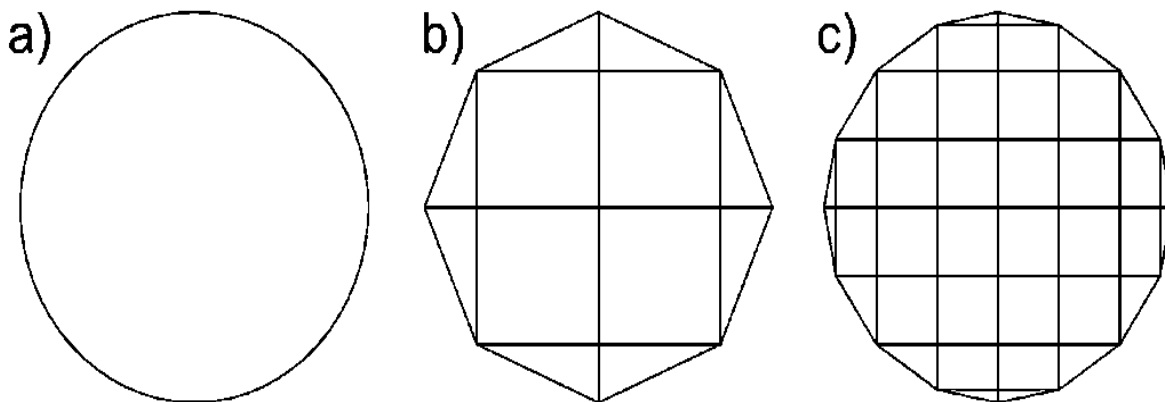


Figura 33. Ejemplo de la variación de resolución para un círculo. a) El círculo a replicar, b) Una baja resolución del círculo, c) Una mayor resolución del círculo.

En este caso se optó por el uso de 16 electrodos en la toma de señales debido a que permite una resolución buena sin llegar a tanta complejidad como la de dispositivos de mayor cantidad de electrodos y permite el uso de hardware comercial como son los multiplexores de 16 canales, los cuales posteriormente abreviaremos como MUX (Figura 34).

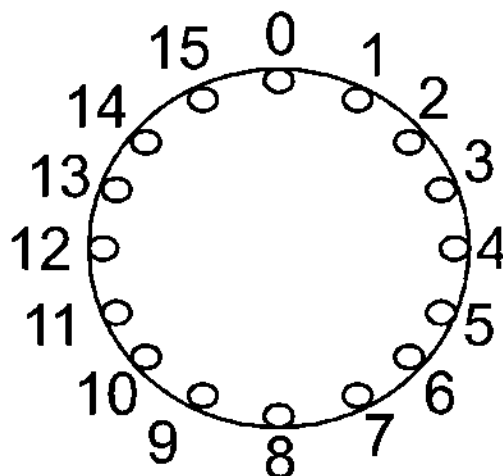


Figura 34. Arreglo de los 16 electrodos en forma circular en la periferia del objeto a medir.

Siguiendo la experimentación, estos 16 electrodos se conectarían por medio de cables en la circunferencia del material.

En el cartel de Krasny et al. (2007) utilizaron salmuera como el medio conductor, con los 16 electrodos en la circunferencia del vaso que lo contenía [13]. El paso anterior antes de la utilización de los 16 electrodos sobre el material compósito, es la replicación de este sistema en un medio ya conocido como el presentado de salmuera. Posteriormente, ya con el sistema funcional, se pasaría a cambiar el medio de la salmuera de los experimentos a la aplicación sobre el material compósito.

Control de la inyección de corriente y medición (protocolo)

Para la inyección de corriente y medición se optó por la utilización de 4 multiplexores CD74HC4067 (Figura 35), los cuales fueron utilizados para la inyección de corriente (I+), la salida de corriente (I-), y el par para la medición de impedancia (V+ y V-). Bajo este hardware y siguiendo el control requerido en los sistemas EIT, el funcionamiento es el siguiente:

Las 16 salidas de los 4 MUX estarán conectadas entre sí, junto con los 16 electrodos siguiendo su numeración: el Electrodo 0 con las salidas C0 de los MUX I+, I-, V+ y V-. Electrodo 1 con las salidas C1 de los MUX I+, I-, V+ y V-, Y así sucesivamente para las 16 salidas de los MUX con los 16 electrodos.

La salida SIG de los MUX se conectará al microcontrolador, al cual, en este caso, nos referiremos como Arduino UNO. Para la conexión de estos, la salida SIG de los MUX I+ y I- estará conectada a puertos digitales (D9 y D10 respectivamente), para recrear una inyección de corriente “alterna”. En cuanto a la salida SID de los MUX V+ y V-, estas van conectadas a puertos analógicos (A0 y A1 respectivamente), para la medición analógica de la impedancia.

Este proceso de decidir cómo se inyectará la corriente y dónde se medirán los voltajes (por ejemplo, el número de electrodos y su disposición) es también conocido como **el protocolo de medición**.

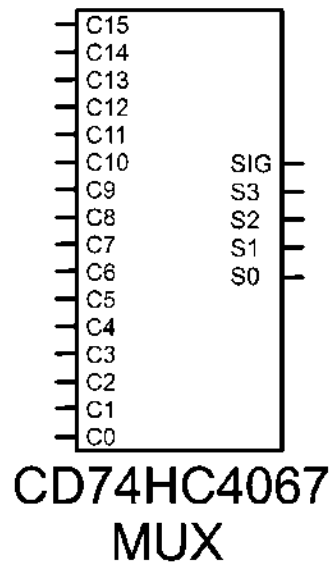


Figura 35. Multiplexor CD74HC4067 comercial para el control del protocolo.

Sistema medición de 16 electrodos

Para la medición e inyección en los electrodos, se debe considerar la cantidad de mediciones a realizar para la toma de una imagen reconstruida.

- Inyección adyacente ($a, a+1$)
- Mediciones diferenciales entre pares (m, n)
- Sin medir electrodos de inyección
- Sin duplicados (son combinaciones no permutaciones)

Donde consideramos a ***a*** y ***b*** como los electrodos de inyección de corriente. Junto con ***m*** y ***n*** como los electrodos de medición. Finalmente, aunque aún no se menciona, se utiliza v , como el diferencial de voltaje de las mediciones. Esto se explica más adelante en cuanto se introduzca el código donde se busca un arreglo de la información (a, b, m, n, v).

Donde el número de inyecciones con inyección adyacente:

$$(0,1), (1,2), (2,3), \dots, (14,15), (15,0) = 16 \text{ inyecciones.}$$

Los electrodos disponibles para la medición son la resta de los electrodos usados menos los de inyección.

$$16 - 2 = 14 \text{ electrodos}$$

Medición diferencial (pares m, n), donde las mediciones no son absolutas, son diferencias de potencial:

$$V(m) - V(n)$$

A partir de este punto, se pueden tener dos opciones para la medición de los electrodos, las cuales son por medio de 1456 mediciones por frame y 208 mediciones por frame.

En el uso de 1456 mediciones para la construcción:

Hay que contar combinaciones únicas de pares:

$$C(14, 2) = \binom{14}{2} = \frac{14 * 13}{2} = 91$$

91 mediciones por inyección

El Total de mediciones por frame

$$16 \text{ inyecciones} \times 91 \text{ mediciones} = 1456$$

Tabla 2. 1456 mediciones para la construcción de una imagen.

Concepto	Valor
Electrodos	16
Inyecciones	16
Electrodos medidos	14
Pares diferenciales	91
Total mediciones	1456

Las principales ventajas de este sistema de medición son la mejor precisión y resolución de las mediciones respecto al cambio en el sistema a medir, además de mayor estabilidad, junto a datos congruentes. Las principales desventajas son el aumento de la complejidad del sistema de cálculo para la reconstrucción y que más mediciones significan mayor tiempo y carga para el microcontrolador-computadora.

En el uso de 208 mediciones para la construcción:

Hay que contar únicamente los pares adyacentes para la medición. Ejemplo, con inyección en (0,1), los pares de medida son: (2,3), (3,4), (4,5) ... hasta (14,15). Esto nos indica que tenemos en total 13 pares de medición, ya que no se usan las orillas que serían (1,2) y (15,0), porque ya son los electrodos de inyección. Por lo cual tenemos:

$$\text{Electrodos de medición} - \text{Electrodo de la orilla} = 14 - 1 = 13 \text{ mediciones}$$

13 mediciones por inyección

El total de mediciones por frame

$$16 \text{ inyecciones} \times 13 \text{ mediciones} = 208$$

Tabla 3. 208 mediciones para la construcción de una imagen.

Concepto	Valor
Electrodos	16
Inyecciones	16
Electrodos medidos	14
Pares diferenciales	13
Total mediciones	208

Las principales ventajas de este sistema son una mayor velocidad del software y una mayor simplicidad del sistema. Las principales desventajas son un mayor error en las imágenes, con una mayor incertidumbre a los cambios en el sistema a medir.

Selección de canales

Para la selección de los canales, se optó por el uso de un Shift Register (74HC595) en cascada. Estos SHIFT REG controlarán qué salidas de los diferentes MUX están activas. Por ejemplo, darán la señal para que el MUX I+ abra el canal C0, Y el MUX I- abra el canal C1, para inyectar una corriente entre los electrodos 0,1. De igual forma de manera paralela, darán la señal para que el MUX V+ abra el canal C2, y el MUX V- abra el canal C3, para la medición entre los electrodos 2,3.

El control de los SHIFT REG se hace mediante los puertos SER_IN, Clock y L_Clock los cuales son controlados mediante los puertos digitales del Arduino. Además de mantener los puertos OE en Low y Reset en High (Figura 36).

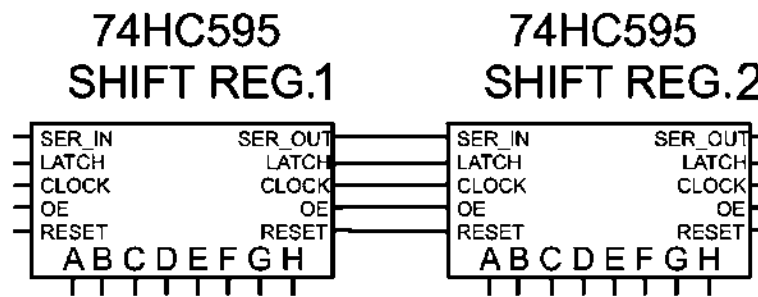


Figura 36. Esquema de los Shift register conectados en forma de cascada para su funcionamiento conjunto, para el control de los multiplexores por medio de un registro de desplazamiento de 16 bits.

La forma de cascada se refiere a la unión de dos shift Register de modo que la salida de uno sea la entrada del siguiente, formando una cadena lineal, esto genera una sincronización entre los tiempos de ambos y un efecto “desborde”, creando así la suma de sus bits totales, de 8bits cada uno a un control por 16 bits. Para esto la conexión del puerto SER_OUT del primer SHIFT REG al segundo, lo que permite una unificación en serie de los dos registradores. De esta manera con sus 8 salidas (A, B, ...H) se combinan para tener el control de 16 necesario para tener la misma cantidad a las entradas de control de los MUX, las cuales son 4 por cada uno (S0, S1, S2, S3). Las conexiones y el mapa completo se observan con más detalle en los anexos.

Microcontrolador para EIT

Es el dispositivo encargado de controlar nuestro sistema de medición. Tanto los multiplexores como los registradores están conectados a este por sus puertos de control. Existen diferentes tipos como lo son los Arduino, Esp32, Raspberry Pi, etc.

En este caso se muestra el uso del Arduino UNO para el control del sistema EIT.

El Arduino tiene tanto puertos digitales a los cuales nos referiremos con la letra D (D0, D1, ...Dn), puertos analógicos A (A0, A1, ...An), tierra o ground GND, voltaje de 5 son los puertos que utilizaremos en este proyecto.

Para la medición de la impedancia, utilizaremos dos puertos analógicos, como lo mencionamos anteriormente. Para la inyección de la corriente se utilizan dos puertos digitales y se controla la salida de corriente mediante resistencias eléctricas. Todos estos puertos van conectados al puerto SIG de los MUX.

Reconocimiento de patrones.

Para el reconocimiento de patrones se optó por el uso del código abierto de PyEIT basado en Python, el cual es un framework (marco de trabajo) Tomografía por Impedancia Eléctrica (EIT).

Se centra en separar las diferentes partes del proceso de EIT (modelado, simulación directa, resolución inversa) en módulos manejables [31].

Estructura y flujo de trabajo principal:

- **Modelado de Malla (Meshing):** Define la geometría del objeto o sujeto (por ejemplo, el tórax humano) como una malla de elementos finitos (FEM) 2D o 3D. Esto se hace típicamente usando funciones en módulos como pyEIT.mesh y esta íntegramente relacionado la resolución con la cantidad de electrodos y protocolo de medición.
- **Definición del Protocolo de Medición:** Especifica cómo se inyectará la corriente y dónde se medirán los voltajes (por ejemplo, el número de electrodos y su disposición).
- **Cálculo Directo (Forward Solve):** Simula la distribución de voltaje para una conductividad (impedancia) inicial dada, utilizando la malla y el protocolo. Esto genera los datos de medición de superficie esperados.
- **Resolución Inversa (Inverse Solve):** Utiliza los datos de medición reales (obtenidos del hardware) y los datos calculados en el paso anterior para estimar la distribución interna de la conductividad (crear la imagen). El código implementa varios algoritmos de imagen dinámicos y estáticos, como la retroproyección (BP), GREIT y NOSER.
- **Visualización:** Muestra los resultados, a menudo utilizando bibliotecas de Python como matplotlib para graficar las mallas y las distribuciones de conductividad.

Conceptos clave en el código

- Modularidad: Diferentes algoritmos y funcionalidades están contenidos en módulos separados (e.g., mesh, forward_solve, inverse_solve), lo que permite a los usuarios elegir y cambiar fácilmente entre diferentes métodos.
- Programación Orientada a Objetos (POO): El código utiliza clases para representar entidades como la malla (mesh), el solucionador directo (fwd_solver) y el solucionador inverso (inv_solver). Los parámetros y la configuración se gestionan dentro de estas clases.
- Uso de Librerías Científicas: pyEIT se basa en gran medida en bibliotecas científicas de Python establecidas, como numpy para operaciones numéricas, scipy para cálculos científicos y matplotlib para visualización.

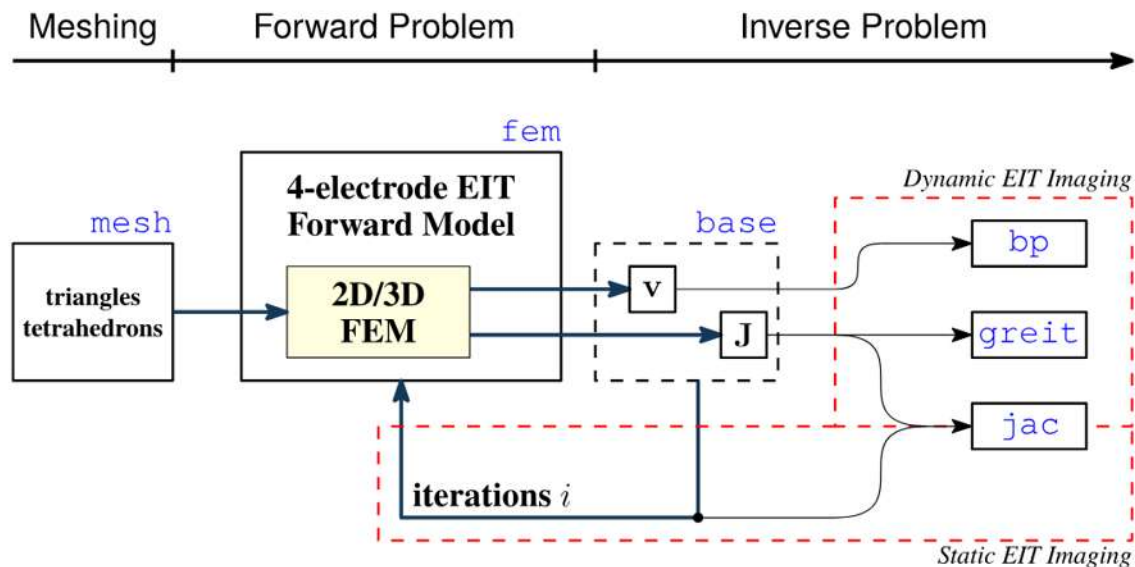


Figura 37 La arquitectura de software de pyEIT consta de tres partes: mallado, resolución de problemas directos e inversos. Los textos en azul indican los módulos de Python correspondientes [31].

Back Projection (BP)

La Idea principal del método de Back Projection es una técnica lineal aproximada que reconstruye la imagen distribuyendo ("proyectando hacia atrás") las mediciones de voltaje desde los electrodos hacia el interior del dominio.

El fundamento se basa en la linealización del problema inverso alrededor de una conductividad homogénea. Este interpreta las mediciones como integrales a lo largo de trayectorias. Y cada medición se “redistribuye” dentro del dominio siguiendo líneas equipotenciales. Matemáticamente, puede verse como una inversión aproximada de una transformada tipo Radon generalizada [31].

La metodología de BP es:

1. Medición diferencial. Se parte de un estado de referencia (sin perturbación) y un estado actual (con cambio de conductividad) donde se calcula:

$$\Delta V = V_{\text{medido}} - V_{\text{referencia}}$$

2. Suposición de linealidad. Se asume que pequeños cambios en conductividad producen cambios lineales en los voltajes:

$$\Delta V \approx J \Delta \sigma$$

Dónde: J: matriz de sensibilidad (implícita en BP, $\Delta \sigma$: cambio de conductividad (En BP no se calcula explícitamente el Jacobiano completo como en GN).

3. Proyección hacia atrás (núcleo del método). Cada medición de voltaje se “proyecta” dentro del dominio:
 - Se consideran las trayectorias de corriente entre electrodos
 - Se asigna la variación de voltaje a las regiones internas atravesadas por esa corriente
 - Se acumulan contribuciones de todas las mediciones
4. Suma de contribuciones La imagen final se obtiene sumando todas las proyecciones:

$$\Delta \sigma \approx \Sigma (\text{pesos} \times \Delta V)$$

Características

- Muy rápido
- Fácil implementación
- Baja resolución espacial
- Sensible a ruido
- Supone cambios pequeños de conductividad

Además, su desempeño es mejor en geometrías simples (por ejemplo, dominios circulares).

Gauss-Newton (GN)

La idea principal del método de Gauss–Newton es un algoritmo iterativo que resuelve el problema inverso como un problema de optimización no lineal [31].

Busca minimizar:

$$||V - f(\sigma)||^2 + \lambda ||\sigma - \sigma_0||^2$$

Dónde: V: voltajes medidos, $f(\sigma)$: modelo directo (FEM), σ : conductividad y λ : regularización

Para esto el método actualiza la solución como:

$$\sigma^{(k+1)} = \sigma^{(k)} + (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T (V - f(\sigma^{(k)}))$$

Dónde: J: matriz Jacobiana (sensibilidad)

La metodología del GN es:

1. Modelo directo (Forward Problem). Se usa un modelo físico (FEM):

$$V = f(\sigma)$$

Dónde: f: simulación de voltajes dada una conductividad

2. Estimación inicial. Se parte de una conductividad inicial:

$$\sigma^{(0)}$$

Usualmente homogénea

3. Cálculo del error Se compara el modelo con las mediciones reales:

$$r = V_{\text{medido}} - f(\sigma^{(k)})$$

4. Cálculo del Jacobiano. Describe la sensibilidad:

$$J = \frac{\partial V}{\partial \sigma}$$

Cada elemento indica: cuánto cambia un voltaje y si cambia la conductividad en una región

5. Actualización (paso de Gauss–Newton)

$$\sigma^{(k+1)} = \sigma^{(k)} + (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T (V_{\text{medido}} - f(\sigma^{(k)}))$$

Dónde: λ : parámetro de regularización (evita inestabilidad)

6. Iteración Se repiten los pasos:

- recalcular $f(\sigma)$
- recalcular J
- actualizar σ

hasta que: el error sea pequeño o se alcance un número de iteraciones

Características

- Mayor precisión que BP
- Permite incorporar regularización (Tikhonov, NOSER, etc.)
- Maneja geometrías complejas (FEM)
- Mayor costo computacional
- Requiere modelo directo preciso

Capítulo 4.- Resultados

En este apartado se presentan los resultados de las distintas etapas del desarrollo del sensor, siguiendo los pasos descritos en la metodología. En este sentido se aborda primeramente al material compuesto estudiado, y de este se ven su caracterización, por diferentes técnicas para determinar su factibilidad para pruebas posteriores. De esto se pasa a los resultados en la aplicación del hardware para la toma de señales, primero en un medio conocido para reducir la cantidad de variables desconocidas, y de ahí a su implementación en el material para comprobar la capacidad de este para la toma de señales de las texturas-formas.

Primeros resultados

Análisis Macroscópico de los Compósitos de Bioplástico y Grafito

Los compósitos sintetizados a partir de las proporciones descritas anteriormente se presentan en la Figura 38. Se evaluaron tres concentraciones de grafito (2.5 g, 1.0 g y 0.5 g) incorporadas a una matriz de biopolímero de 10 g para determinar su viabilidad física y conductiva.

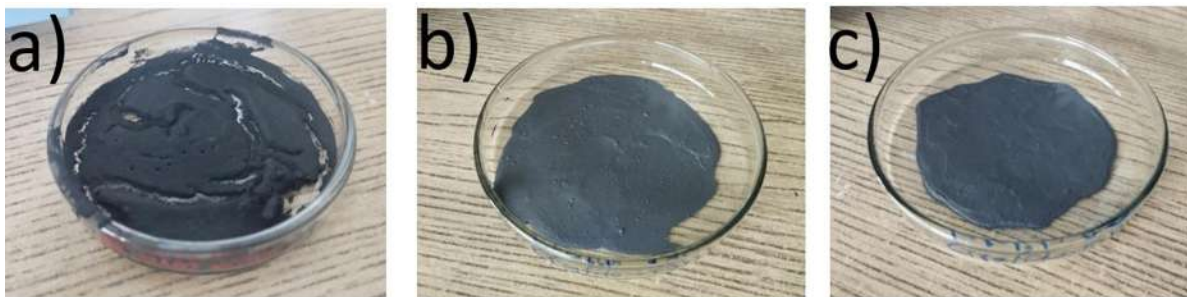


Figura 38. Primeras muestras de la experimentación con el material. Por cada 10 g de biopolímero: a) 2.5 g de grafito, b) 1.0 g de grafito, c) 0.5 g de grafito.

Muestra A (2.5 g de grafito): Esta variante exhibió la coloración más intensa debido a la saturación del material de refuerzo. Si bien su capacidad conductiva superó significativamente a la de las demás formulaciones, el material presentó una elevada fragilidad. Esta característica mecánica limitó su utilidad para el desarrollo del sensor de texturas, ya que la muestra no soportó los esfuerzos de manipulación básicos.

Muestra B (1.0 g de grafito): Aunque la película mostró una apariencia uniforme durante el secado en la caja de Petri, el material evidenció fallas estructurales al momento del desmoldado. La falta de cohesión interna derivó en la fragmentación del compuesto, lo que impidió la obtención de una película continua y funcional.

Muestra C (0.5 g de grafito): Esta formulación, correspondiente al 5% de contenido de grafito, destacó por mantener una flexibilidad óptima sin comprometer sus propiedades conductoras. Debido a su integridad estructural y capacidad de deformación, esta muestra se determinó como la composición idónea para continuar con la fase de experimentación y su posterior integración en el sensor de texturas.

Caracterización por Microscopia electrónica de barrido

Para las primeras muestras se les realizaron algunas pruebas de caracterización de materiales como es el caso de la Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y pruebas de Difracción de Rayos X (DRX).

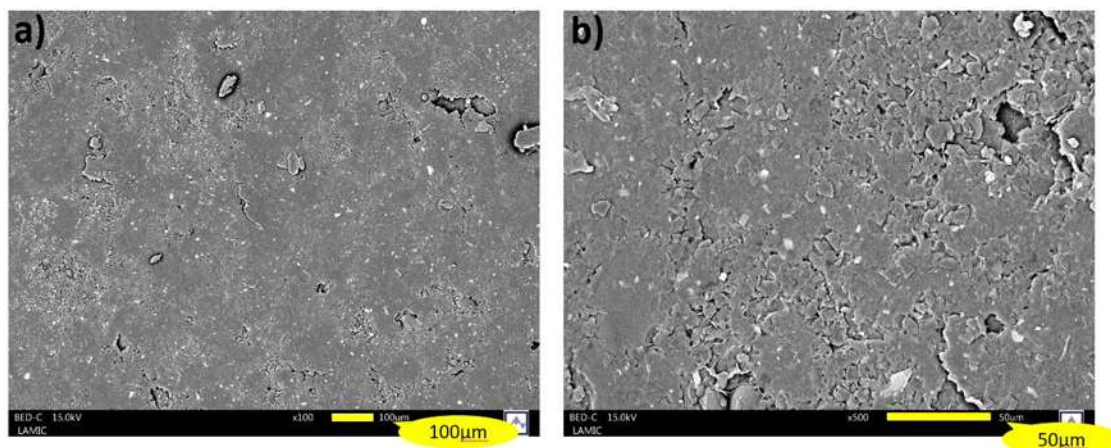


Figura 39. MEB del biopolímero con grafito a 0.5g para a) 100µm, b) 50µm.

Para la caracterización del material por medio de MEB se hicieron pruebas en el microscopio electrónico de barrido para la probeta realizada con menor cantidad de grafito (0.5g). En la Figura 39 se muestra una fotografía tomada en el MEB con una escala de 100 y 50 micrómetros de tamaño de partícula. En ellas se puede observar a más detalle la composición del compuesto. Cabe destacar que se descubrieron puntos de otro color, lo que nos determina la existencia de materiales externos no considerados anteriormente. De igual forma se observa una superficie agrietada no tan uniforme, lo que puede determinarse como un material áspero o frágil

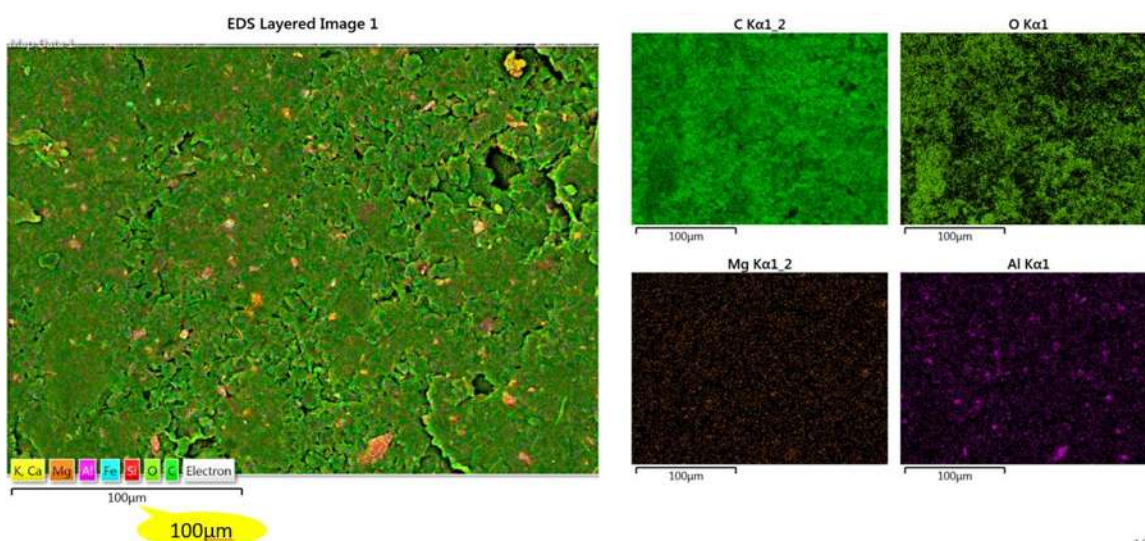


Figura 40. Mapeo de composición química del biopolímero de papa con grafito a 0.5g.

19

Siguiendo el contexto de conocer qué compone nuestro compuesto, así como esos puntos blancos extraños, se optó por la realización de un mapeo de la composición química por medio del MEB (Figura 40). Ciertamente, de esta forma podemos visualizar componentes contaminantes no deseados en nuestra muestra. Esta muestra utilizó un grafito en polvo comercial y, al investigar más al respecto, se descubrió que el grafito común en polvo que se vende en parte se adquiere debido al desecho de los refractarios de los altos hornos u otros tipos de hornos industriales.

Además, también podemos intuir que los puntos blancos vistos en las fotografías del MEB corresponden a los materiales contaminantes como el aluminio.

Debido a estos estudios, se puede llegar a la conclusión de que los grafitos en polvo comerciales contienen cantidades del metal con el cual estuvieron fundiéndose en el horno.

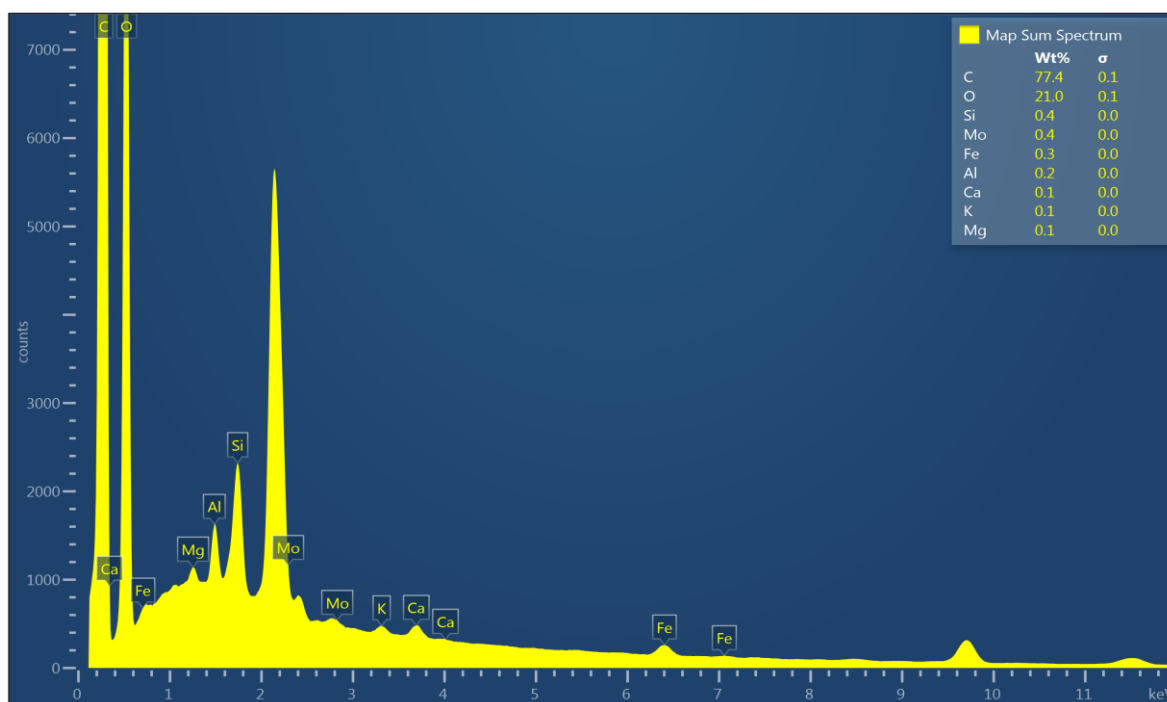


Figura 41. Porcentajes de los elementos químicos obtenidos para la muestra de papa con 0.5 g de grafito.

En la Figura 41 se observan claramente los porcentajes de la composición del compuesto. Como se esperaba, el carbono y el oxígeno son los materiales predominantes, ya que no solo se sabe que el grafito es carbono con cierto arreglo, sino también que la matriz bioplástica se sabe que en su composición predominan las cadenas de carbono, hidrógeno, así como oxígeno.

El pico observado el cual carece de etiqueta es debido al proceso para realizar las mediciones en el MEB. El cual consiste en cubrir el material con una capa conductora, en este caso, de oro, por lo que ese pico le corresponde y no es, en sí, parte del material compuesto.

Igualmente se observan los porcentajes de material contaminante que se cree que vienen en el grafito. Estos contaminantes son el silicio, molibdeno, Magnesio, aluminio, hierro. En

futuras pruebas se buscará la manera de obtener un grafito con mayor pureza para evitar estas contaminaciones del material.

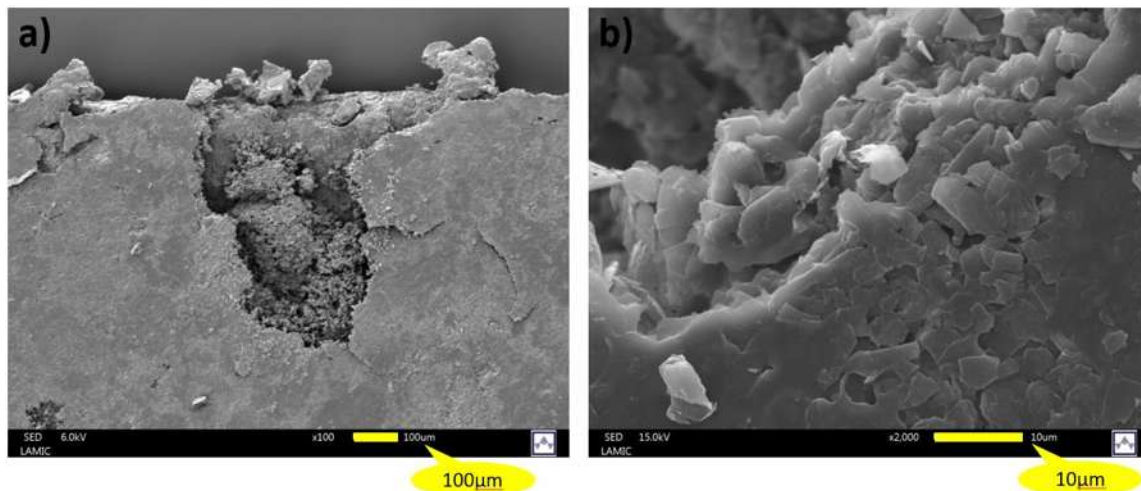


Figura 42. Fotografías tomada en zona de desprendimiento de material en el MEB del biopolímero con grafito 0.5g a) 100µm, b) 10µm.

Se analizó en la Figura 42 una zona con desprendimiento para observar su composición en el interior. Así se pudo observar lo que vienen pareciendo como pequeñas “hojuelas” que intuimos es debido a la aglomeración del polímero sobre el material de refuerzo. De igual forma hasta cierto punto podemos decir que también se aprecia que el material se fragilizó debido a la influencia del grafito en este.

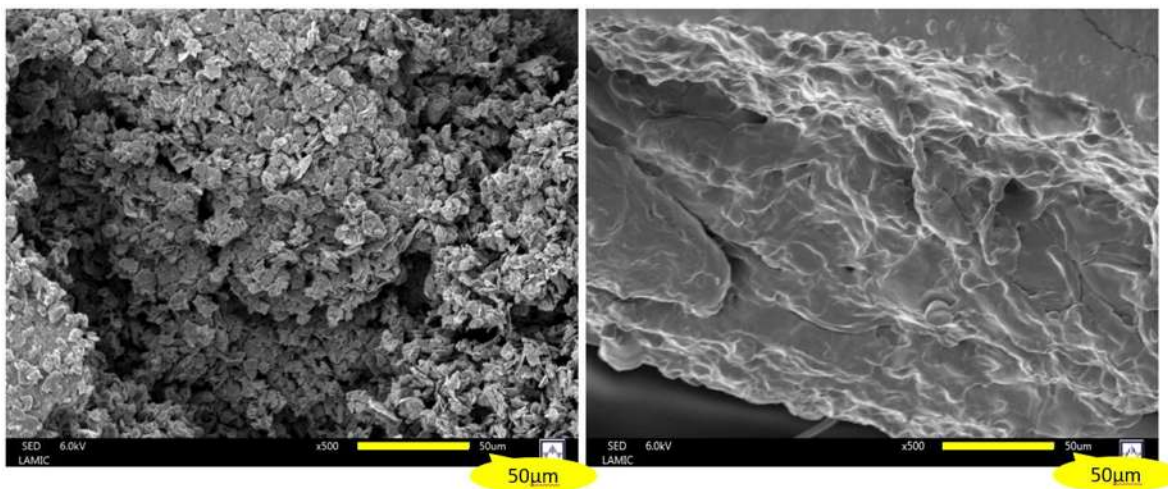


Figura 43. Fotografías en el MEB del a) Biopolímero con grafito 10/0.5, contra b) Biopolímero de almidón de camote blanco [17].

Para determinar de la mejor manera la influencia del grafito en el polímero, la Figura 43 compara una muestra con grafito en un polímero a base de almidón de papa con otra de polímero a base de almidón de camote. De esta manera se ven dos estructuras completamente distintas, donde la Figura 43 b) muestra una configuración más fibrosa, pareciéndose al algodón, caso contrario de la muestra con grafito que parece más áspero, más granulado.

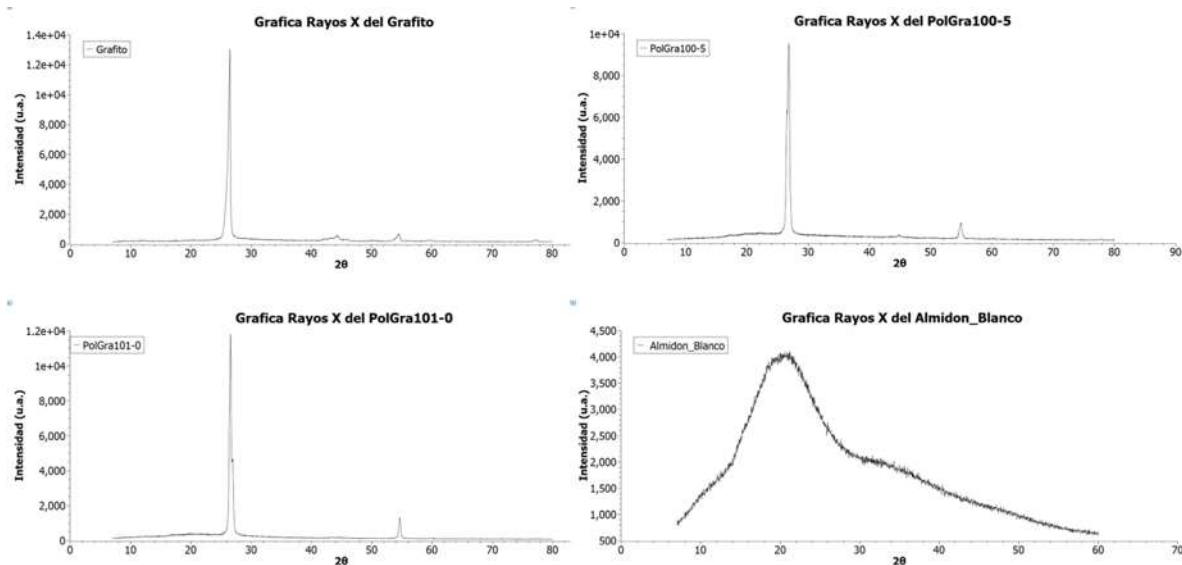


Figura 44. DRX para las muestras, en el orden de izquierda a derecha y de arriba a abajo a) Grafito, b) Compuesto 0.5g, c) Compuesto 1.0g

También se realizaron pruebas de Difracción de rayos x (DRX) para determinar los picos característicos del material. En la Figura 44 a) se muestra la gráfica común de DRX para el grafito y si la comparamos con las gráficas de los compósitos, observamos que a las mismas distancias del eje 2θ estas casi no cambiaron.

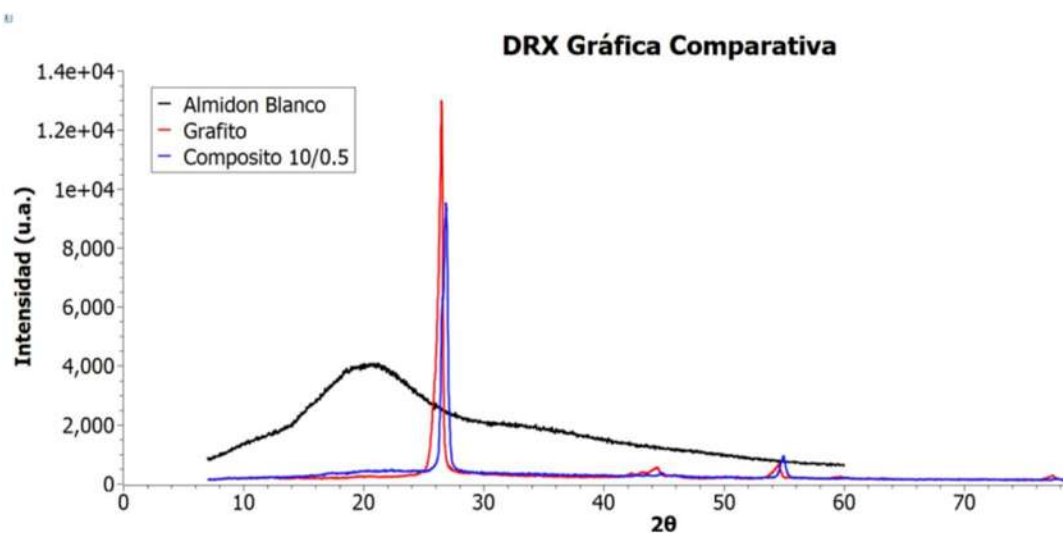


Figura 45. Gráfica comparativa de DRX del compuesto a 5 g contra el grafito y un almidón.

Se esperaba que hubiera un cambio notable entre estas gráficas; sin embargo, la influencia de la matriz casi no afectó a la gráfica del material de refuerzo. En la Figura 45, superpusimos las gráficas para ver con mayor claridad las diferencias. El pico característico del grafito en el caso del compuesto se redujo ligeramente, además de haberse expandido muy ligeramente una pequeña panza en la gráfica del compuesto, debida a la matriz polimérica. Aun así, esta

pequeña pansa no se compara al tamaño común de un bioplástico como es el caso de la gráfica mostrada del almidón blanco.

Esto nos demuestra que los patrones de difracción de rayos X para todas las muestras exhibieron un comportamiento dominado por la estructura cristalina del grafito. El pico característico en el ángulo $2\theta \approx 26.5^\circ$, correspondiente al plano (002), se mantuvo constante en todas las formulaciones. Esta similitud estructural indica que la incorporación de la matriz polimérica no alteró la cristalinidad del material de refuerzo, confirmando que el grafito conserva sus propiedades estructurales dentro del compuesto bioplástico.

Caracterización eléctrica

La conductividad de estas muestras puede apreciarse en las siguientes gráficas. Las primeras mediciones se realizaron por medio de la ayuda de un multímetro en la modalidad de óhmetro a la distancia de 2 cm en cada una de las muestras. Esto es nada más con el fin de mostrar la relación de la conductividad con respecto a la cantidad de grafito en la muestra. Y, como se observa en la gráfica del grafito 0.5/10, hay una gran variabilidad en las mediciones, a pesar de tratarse de la misma muestra. Esto nos ha llevado a buscar técnicas más estandarizadas, y se espera que en las próximas mediciones se puedan aplicar las técnicas de medición de 4 puntos para conductividad.

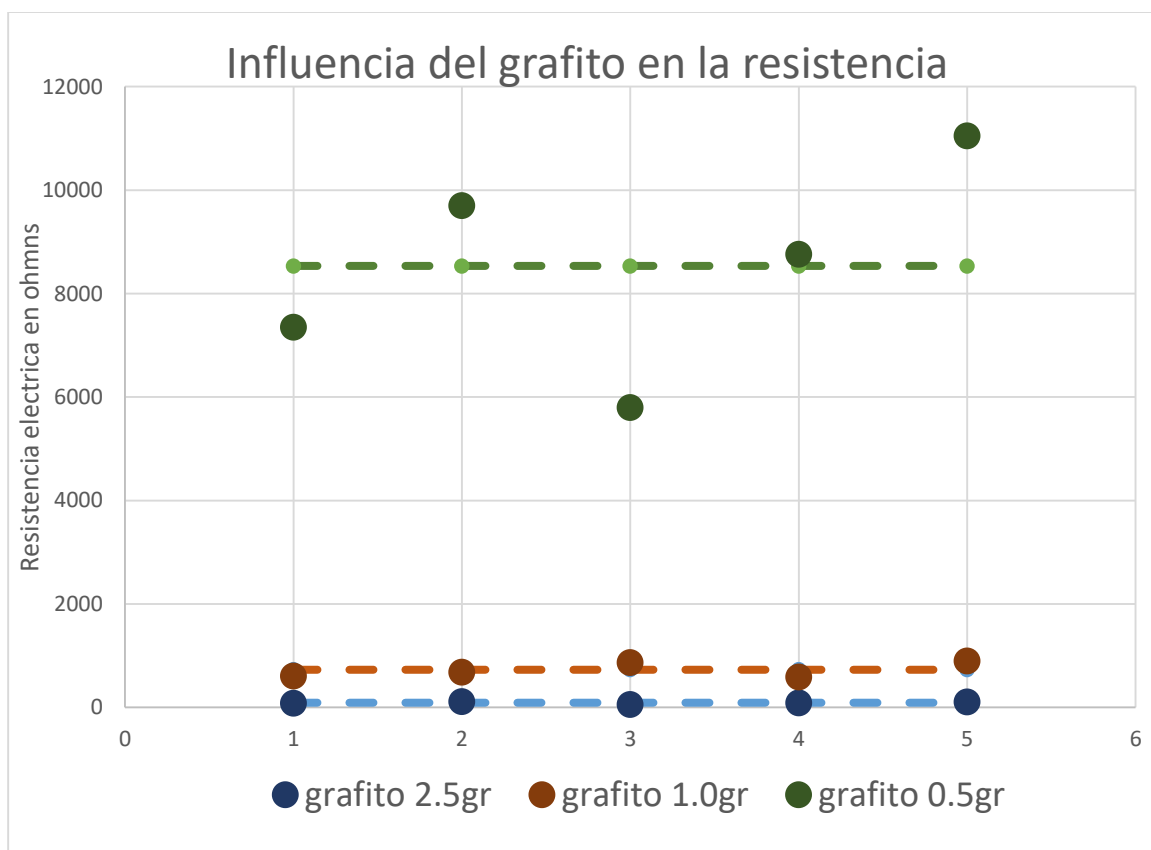


Figura 46. Medidas de la resistencia eléctrica de las muestras de 2.5g (25%), 1.0g (10%) y 0.5g (5%)

Además, sabemos que el inverso de la resistencia eléctrica es la conductividad por lo que podemos tener la siguiente gráfica, para ver una comparativa de conductividad entre muestras

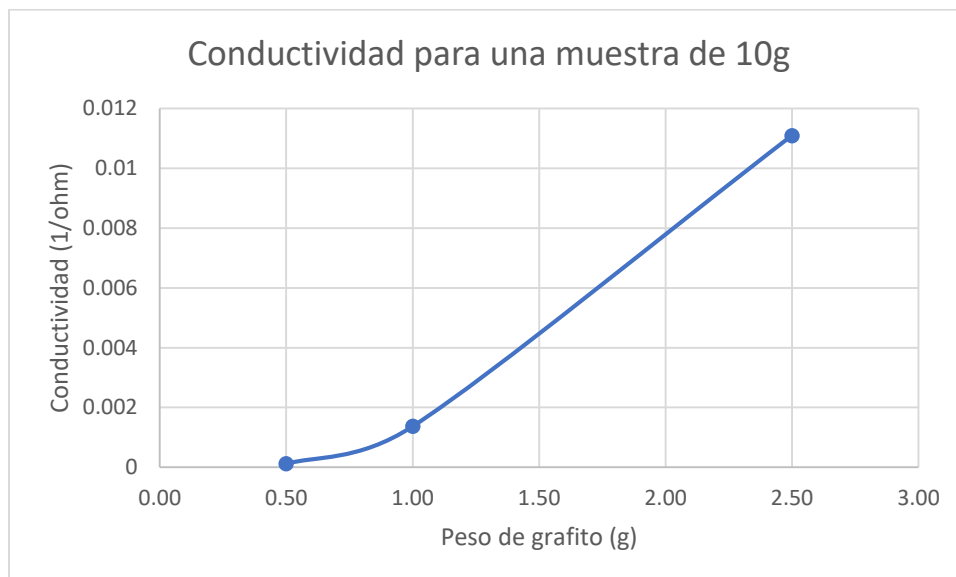


Figura 47. Relación del grafito contra la conductividad con las muestras realizadas.

Para realizar la prueba de caracterización eléctrica, se utilizó un multímetro en la modalidad de óhmetro, a una separación de dos centímetros de punta a punta. Estas fueron pruebas muy burdas, pero el punto era demostrar la influencia directa de la conductividad en función del porcentaje de grafito, lo cual se logró. Se realizaron varias mediciones de la resistencia eléctrica de cada probeta y se obtuvo la media (Figura 47). Sabemos que la conductividad es el inverso de la resistencia, por lo cual pudimos obtener y mostrar la variación de la conductividad en las diferentes muestras, siendo como esperábamos, la muestra con mayor grafito tenía la mejor conductividad. Sin embargo, si tomamos todas las consideraciones, esta muestra careció de otras características deseadas como la flexibilidad del plástico.

De esta forma demostramos cómo la adición del grafito modifica las propiedades del material dependiendo de la cantidad:

- Aumenta la conductividad.
- Se vuelve menos flexible.
- Se torna de color oscuro intenso.

Estas muestras representan las primeras pruebas sobre la manufactura del material en un medio controlado, con técnicas experimentales adquiridas para la creación de hidrogeles a base de almidones.

En búsqueda del material idóneo

Parámetros clave del material.

Se determinó en las primeras pruebas al grafito como el principal componente de las variaciones del compuesto. Por lo que se pasó a probar cuál de los otros componentes tiene un impacto significativo en el material.

El primer componente a cambiar fue el almidón, el cual se cambió de almidón de papa comercial a almidón de arroz comercial. Este almidón es más blanquizo y nos da como resultado un biopolímero de color blanco, el cual al sintetizarse con el grafito le otorga a la muestra una textura más suave.

Sin embargo, esta textura ocasiono que el material no se pudiera mantener continuo entre sí. Provocando las primeras películas del compuesto a fracturarse en pedazos. Aunque a diferencia del efecto de grafito, este almidón no hizo la muestra frágil como un cerámico, sino frágil debido a la falta de cohesión entre las partes del compuesto.



Figura 48. Compósito de almidón de arroz y 5% de grafito, fracturado debido a una deficiente adhesión entre sí.

En la Figura 48 se muestra el resultado de las primeras pruebas del cambio de almidón, con las mismas proporciones de la muestra con almidón de papa a grafito del 5%.

- Glicerol 5%
- Ácido acético glacial 2%
- Agua destilada desionizada 82%
- Almidón 6% (**Papa-> Arroz**)
- Grafito 5%

A pesar de las primeras muestras fallidas, se continuó con el uso del almidón de arroz para comprobar el uso del glicerol como componente de unión y de aumento de flexibilidad en el compuesto.

De esta forma se probó un aumento del 5% de glicerol al 7.5%, y el resultado se muestra en la Figura 49. Esta muestra ya presenta una mejor cohesión, al igual que presenta una buena flexibilidad. Algo que se empieza a notar son las grietas que separan el material. Con esta información nueva se prevé que el almidón de arroz absorba más humedad en comparación con el almidón de papa. Factor por el cual se tiene que tomar precaución con las temperaturas y tiempos del compuesto en la fase de secado.



Figura 49 Compósito Biopolímero Arroz-grafito con glicerol a 7.5%.

El aumento del glicerol presentó cambios esperados y buscados en el material, por lo que pasamos a probar el cambio de la concentración del grafito del 5% al 3.2% con la misma concentración del 7.5% de glicerol.

Se probó el porcentaje del 3.2% debido a otras investigaciones de materiales conductivos con partículas de carbono donde se muestra como un punto de mayor conductividad en sus gráficas. Lo que no se tomó en cuenta fue el hecho de que nuestro material experimental es carbono en forma de grafito, mientras que los estudios donde se demostró el 3.2% de carbono como conductividad óptima utilizaron carbono en nanotubos. Esto presenta diferencias en las características morfológicas del compuesto. Como se revisó en el marco teórico, la forma y el tamaño de las partículas tienen un impacto importante en las características finales del material.

La Figura 50 muestra el resultado de reducir la cantidad de grafito en la muestra anterior. A simple vista, presenta mejores características de textura y forma, así como una mayor resistencia mecánica y una buena ductilidad.



Figura 50. Compósito arroz-grafito a 7.5% de glicerol y 3.2% grafito

Viendo que mejoró significativamente la resistencia mecánica de la película del compuesto, se pasó a aumentar el porcentaje de glicerol para la siguiente muestra a 10%. Esto dio como resultado una película resistente capaz de soportar las ligeras fuerzas aplicadas debidas a la deformación de la textura. La Figura 51 muestra esta película, uniforme, y no presenta los mismos problemas de agrietamiento que las anteriores. Además, a esta muestra se le aplicaron técnicas de caracterización de materiales, por lo que se recortaron cuadros de 5×5 mm.



Figura 51. Compósito Arroz-grafito a 10% de glicerol y 3.2% grafito

Sin embargo, la caracterización eléctrica para estas pruebas con 3.2% de grafito muestra valores de resistencia muy altos. Esto nos da a entender que el punto óptimo que se presenta en algunas investigaciones de nanotubos de carbono no se aplica al grafito. Esto significa que la relación conductividad-grafito, es de manera continua y no tiene picos que demuestren un mejor uso a bajos porcentajes. Debido a esto, se tiene que considerar que muchas veces el

control eléctrico necesitará el uso de amplificadores operacionales para la adquisición de señales que puedan perderse por la baja conductividad.

Finalmente, para las concentraciones de 10% de glicerol y 3.2% de grafito, y pese a la baja conductividad, se optó por probar dichas proporciones en la siguiente muestra debido a sus favorables propiedades mecánicas. En esta etapa, se incrementó el ácido acético del 2% al 4% para determinar si este constituye un factor clave en el desempeño del material.

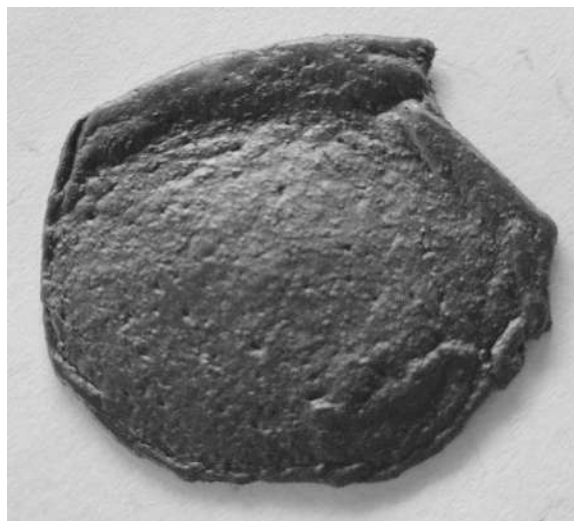


Figura 52. Compósito Arroz-Grafito con 10% de glicerol, 3.2% de grafito y 4% de ácido acético.

Esta muestra presentó las mismas características que una película del compuesto con menor cantidad de ácido, con la ligera diferencia de un olor más fuerte al reactivo.

Por lo que se con esta prueba se determinó que la variación del ácido no es un punto clave principal como es el hecho del glicerol y el grafito.

El resultado de estas pruebas dio pauta para la determinación de la relación de los parámetros deseados conforme a las variaciones de los reactivos. Clasificando de manera simple en alta, mediana y baja la influencia del reactivo en el material, se tiene la siguiente relación:

- Glicerol: incremento o decremento de cantidades, alta influencia.
- Ácido acético glacial: incremento de cantidades, baja influencia
- Almidón: cambio de almidones, influencia variable. Puede llegar a impactar o no cambiar en nada, dependiendo del tipo de almidón y sus características.
- Grafito: incremento o decremento de cantidades, alta influencia.

Si bien existen muchos factores imposibles de cuantificar cuando se trata de la experimentación, como es el caso de la humedad del ambiente, presión atmosférica, flujo del aire o rayos solares, se cuida que se mantengan constante con forme a la experimentación, solo se menciona para tenerlo en cuenta se planea la replicación de estos materiales.

Con estos datos se pasó a la síntesis de un compuesto particulado más “ideal” para su aplicación en el sensor de texturas.



Figura 53. Muestra Arroz-Grafito con 10% glicerol y 5% grafito

Estas muestras presentan una mejor resistencia mecánica, al mismo tiempo que presentan la conductividad necesaria para poder mostrar cambios debidos a la deformación de estas. Los porcentajes para la realización de estas muestras utilizan los mejores valores probados y, como resultado de las pruebas anteriores, estos valores son:

- Glicerol 10%
- Ácido acético glacial 2%
- Agua destilada desionizada 77%
- Almidón 6% (**Arroz**)
- Grafito 5%

En cuanto a las pequeñas grietas mostradas en la Figura 53, se considera que, más que dependientes de los porcentajes, son debidas a la manipulación para esparcir la muestra, al igual que al agua evaporada durante la síntesis y el secado. Estos valores dependen puramente de la habilidad de la persona para realizar los pasos finales de la síntesis. En caso de que el proceso sea automatizado, las muestras podrían realizarse de manera más uniforme.

Caracterizaciones de Muestra con Glicerol 10% y grafito 3.2%.

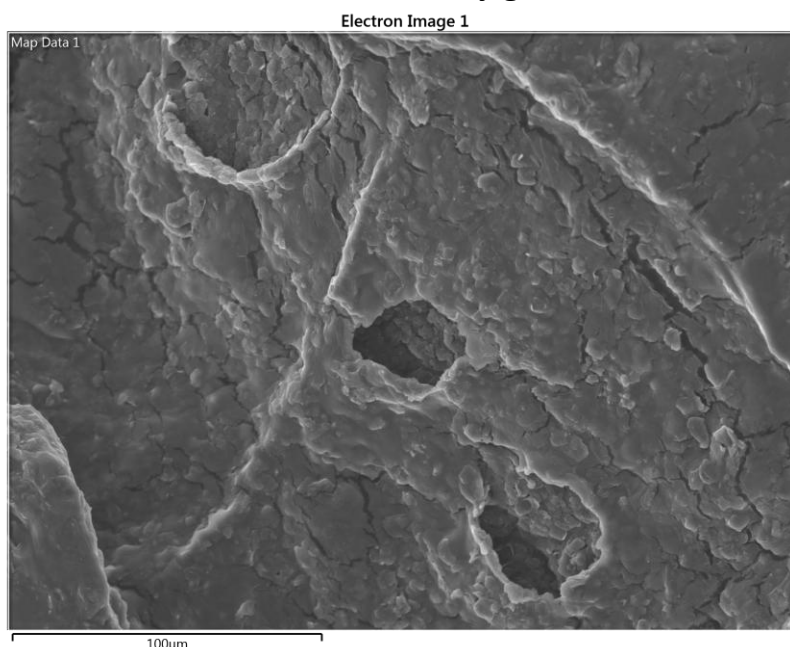


Figura 54. Microscopía Electrónica de Barrido para la muestra de almidón de arroz con 10% de glicerol y 3.2% de grafito.

En las caracterizaciones de la muestra de glicerol 10% con grafito a 3.2%, presento una mayor adhesión al recipiente contenedor, esto provocó que parte del material se quedara pegado y provoco lo que se ve en el MEB como los “pozos”, pero en general la muestra de manera macroscópica presento buen comportamiento. En estos aumentos, además, se puede observar lo que vienen siendo grietas, lo cual suele ser más común en materiales frágiles como el grafito.

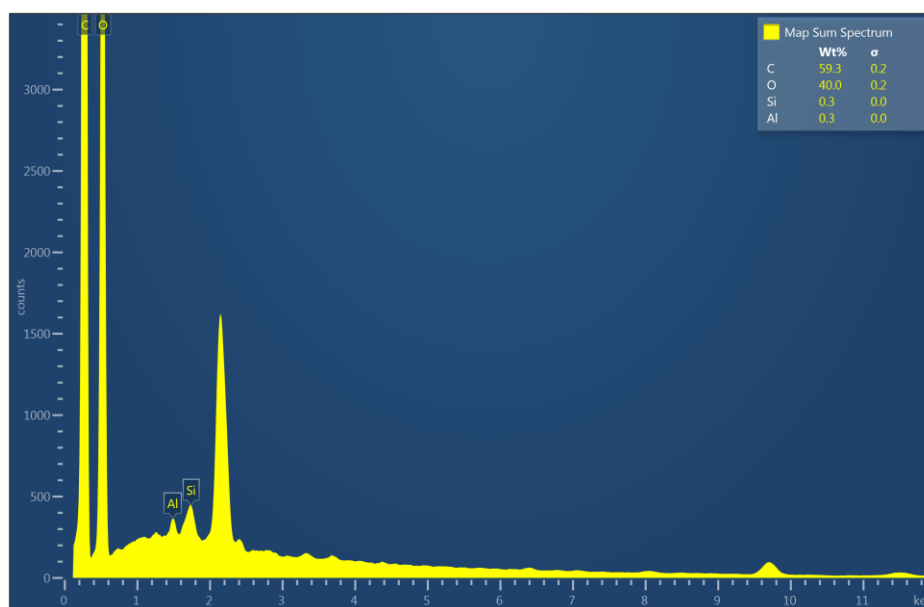


Figura 55 Grafica de composición química para la muestra de Almidón de arroz con 10% de glicerol y 3.2% de grafito.

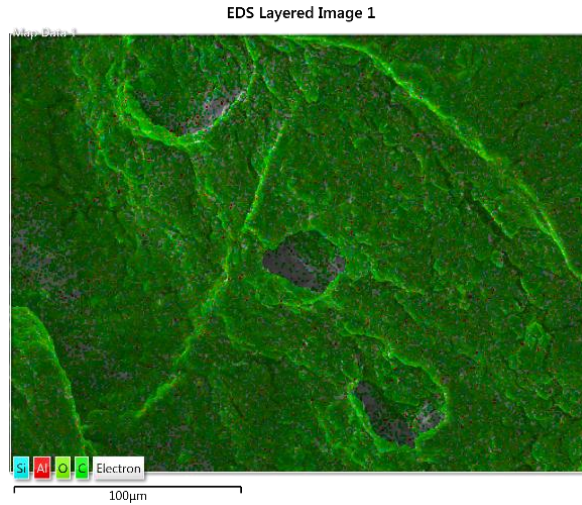


Figura 56. Mapeo de composición química para la muestra de 10% de glicerol y 3.2% de grafito, todos los elementos.

Los mapeos de la muestra glicerol 10%-grafito 3.2% muestran un buen esparcimiento de los elementos, y a comparación de las muestras anteriores, estas presentan menor la presencia de otros elementos indeseados. Ya era conocido que el material estaría constituido principalmente por oxígeno y carbono, características de los biopolímeros a base de almidón, y por grafito, que es una forma de carbono. Aparte del pico de C y O, el siguiente gran pico sin nomenclatura se refiere a la capa de oro añadida para poder realizar las caracterizaciones por MEB y el mapeo de elementos (Figura 57).

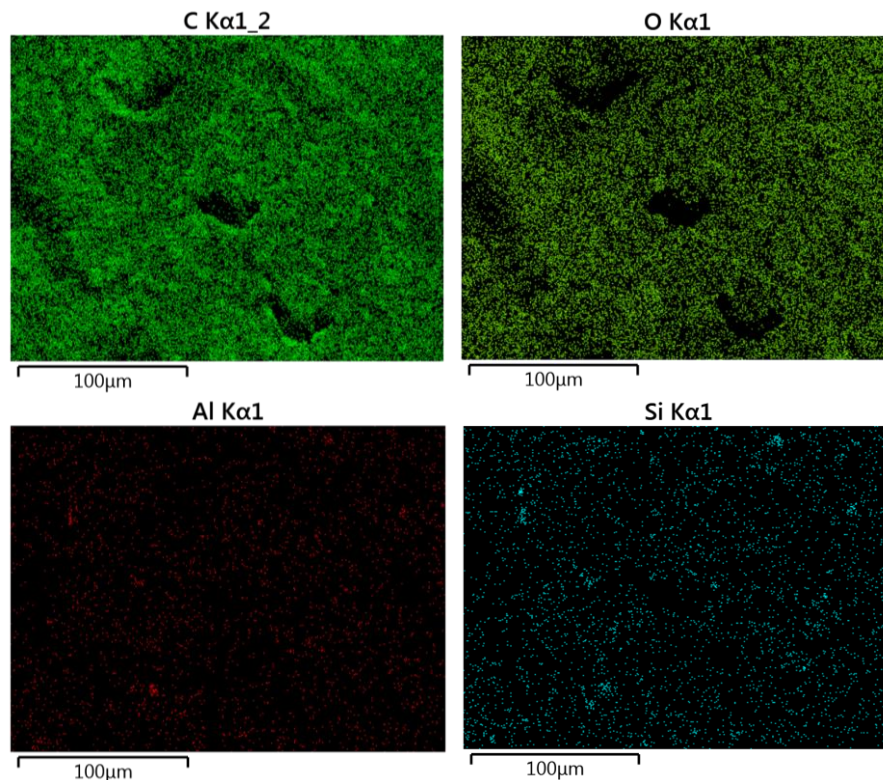


Figura 57. Mapeo de composición química para la muestra de 10% de glicerol y 3.2% de grafito, elementos particulares.

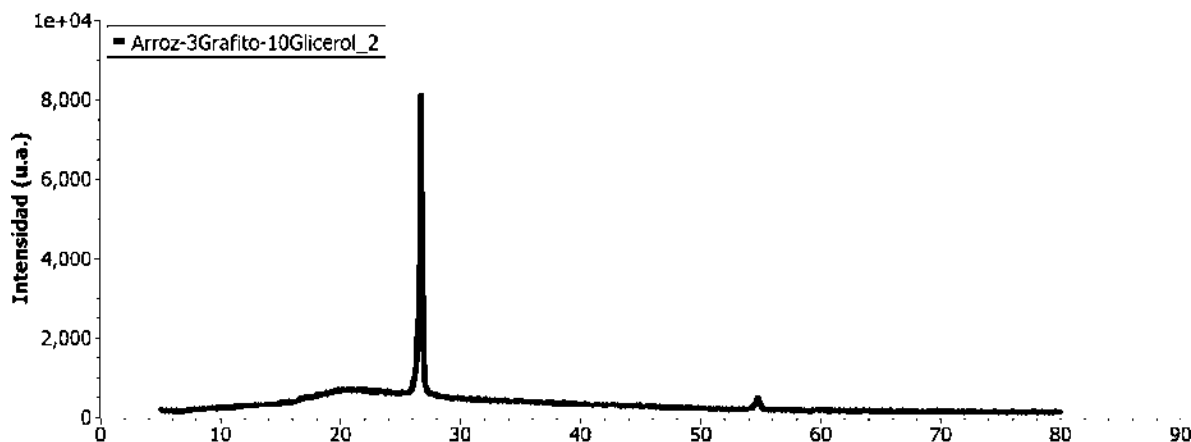
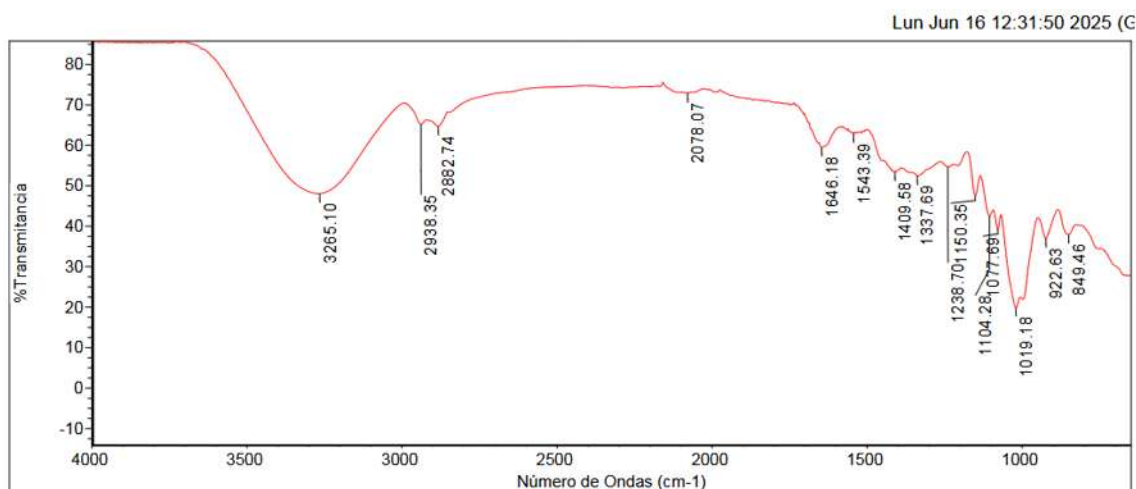


Figura 58 Grafica de Difracción de Rayos X para la muestra de 10% de glicerol y 3.2% de grafito

La caracterización de DRX de la muestra glicerol 10%-grafito 3.2%, al igual que en las muestras anteriores, muestra un comportamiento casi idéntico al del grafito puro, con el pico principal en 2θ a 26.5° y 8000 de intensidad (u.a.).



Tiempo de recogida: Lun Jun 16 12:29:15 2025 (GM)

Lun Jun 16 12:31:25 2025 (GMT-05:00)

BUSCAR PICOS:

Espectro: AGr310

Región: 4000.12 649.89

Umbral absoluto: 77.183

Sensibilidad: 70

Lista de picos:

Posición:	849.46	Intensidad:	37.834
Posición:	922.63	Intensidad:	36.950
Posición:	1019.18	Intensidad:	19.782
Posición:	1077.69	Intensidad:	39.155
Posición:	1104.28	Intensidad:	42.420
Posición:	1150.35	Intensidad:	47.495
Posición:	1238.70	Intensidad:	54.609
Posición:	1337.69	Intensidad:	52.397
Posición:	1409.58	Intensidad:	53.464
Posición:	1543.39	Intensidad:	62.921
Posición:	1646.18	Intensidad:	59.415
Posición:	2078.07	Intensidad:	72.883
Posición:	2882.74	Intensidad:	64.605
Posición:	2938.35	Intensidad:	65.165
Posición:	3265.10	Intensidad:	47.978

Figura 59. Grafica de Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) para la muestra de 10% de glicerol y 3.2% de grafito

Para una mejor explicación de las bandas de FTIR, se presenta un apartado de comparativa de estos resultados después de las caracterizaciones de todas las muestras.

Muestra 7.5% de glicerol con 5% de grafito

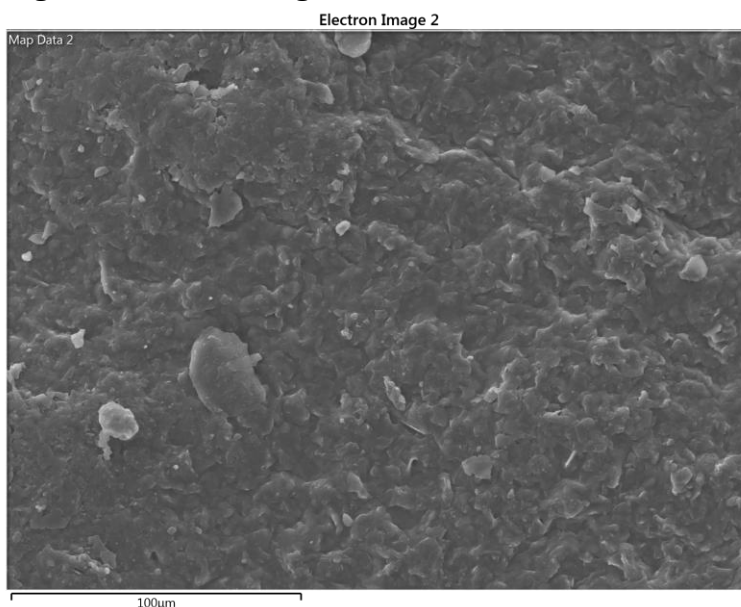


Figura 60. Microscopía Electrónica de Barrido para la muestra de almidón de arroz con 7.5% de glicerol y 5% de grafito

En la caracterización de la muestra de glicerol 7.5% con grafito a 5%, se presentó una muy buena morfología; a pesar de tener mayor cantidad de grafito que la muestra anterior y menor glicerol, no fue suficiente para fragilizar la muestra. En la microscopía (Figura 60), se presenta una muestra muy uniforme en sí y con la suficiente distinción para mostrar que estas siguen presentando ligeramente las características de los materiales frágiles, viéndose “ásperas o rugosas” a simple vista.

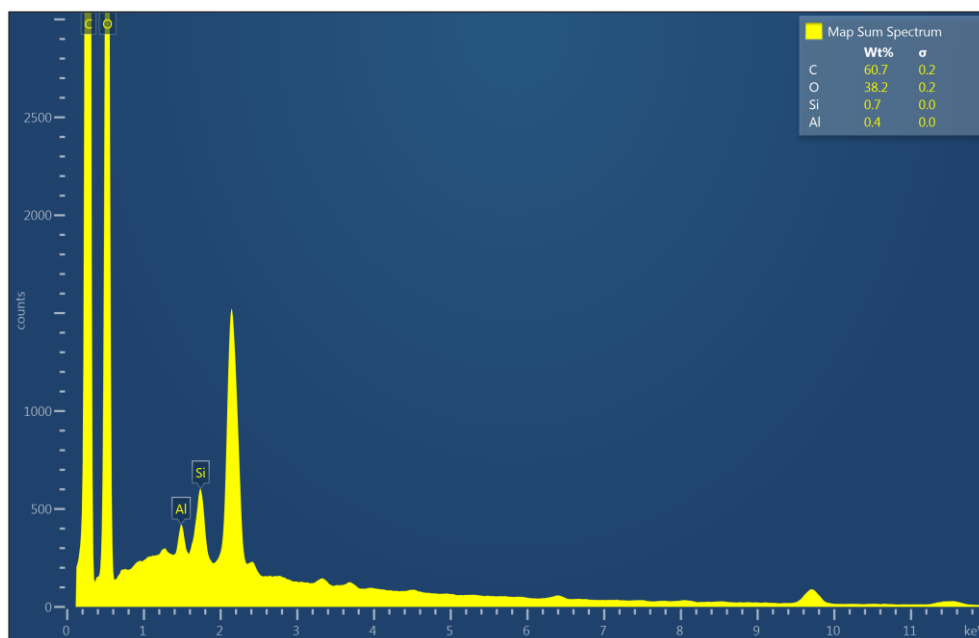


Figura 61. Gráfica de composición química para la muestra de almidón de arroz con 7.5% de glicerol y 5% de grafito

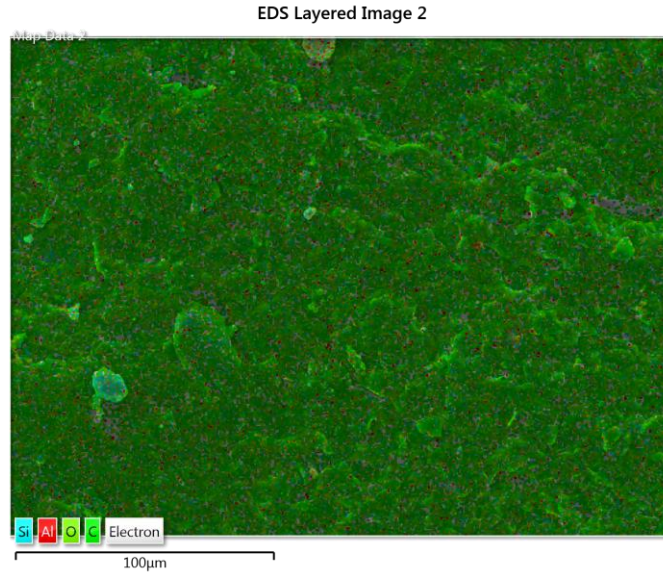


Figura 62. Mapeo de composición química para la muestra de 7.5% de glicerol y 5% de grafito, todos los elementos

De igual manera en los mapeos de la muestra glicerol 7.5%-grafito 5% (Figura 62), se observa un buen esparcimiento, y esta al no tener los “pozos” de la muestra anterior, se ve de manera más uniforme los elementos sobre la muestra. En general, la única diferencia mencionable es que tiene un mayor contenido de carbono y menor de oxígeno, resultado del aumento de grafito, siendo esperado.

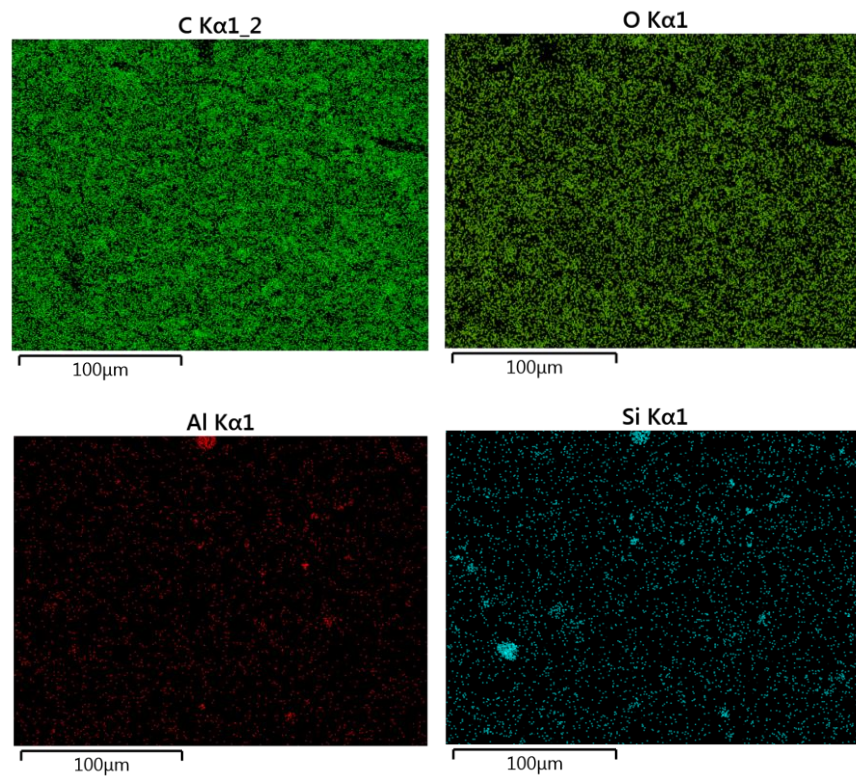


Figura 63. Mapeo de composición química para la muestra de 7.5% de glicerol y 5% de grafito, elementos particulares.

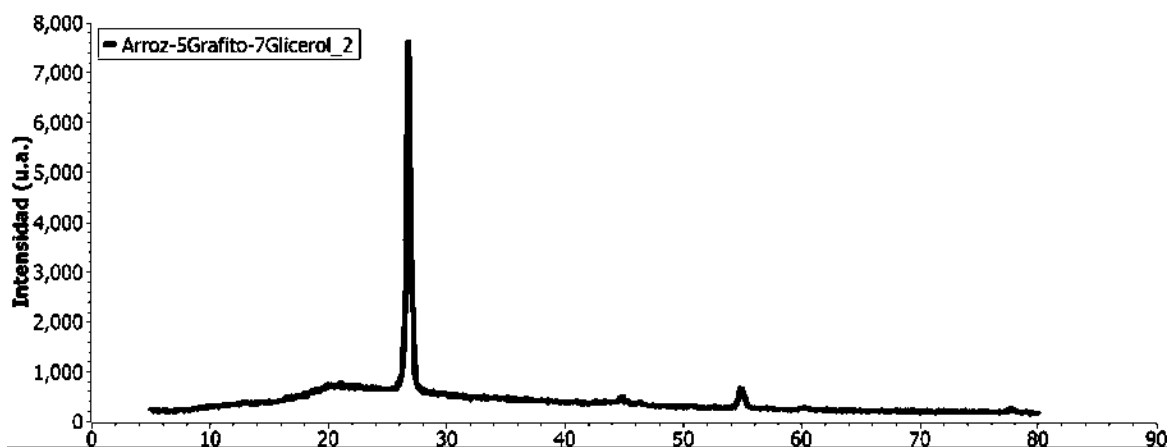


Figura 64. Gráfica de difracción de rayos X para la muestra de 7.5% de glicerol y 5% de grafito.

La caracterización de DRX de la muestra glicerol 7.5%-grafito 5% muestra los resultados esperados con el pico característico del grafito a 26.5°, con valores aproximados a 8000 de intensidad (u.a.).

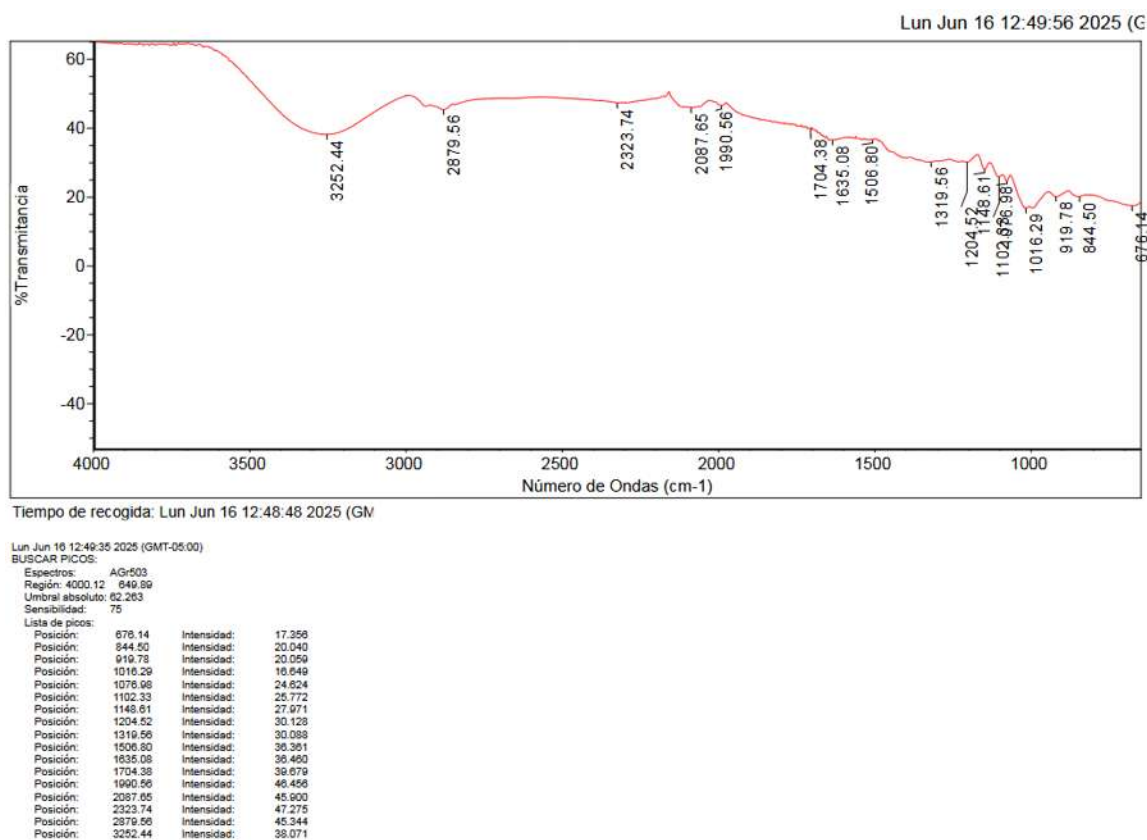


Figura 65. Gráfica de Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) para la muestra de 10% de glicerol y 3.2% de grafito

En la caracterización por FTIR de muestra de 10% de glicerol y 3.2% de grafito, la Figura 65 cambió ligeramente bajando la banda al aumentar la cantidad de grafito. Esto se explica mejor en el apartado comparativo al final de las caracterizaciones de todas las muestras.

Muestra 10% Glicerol con 5% grafito.

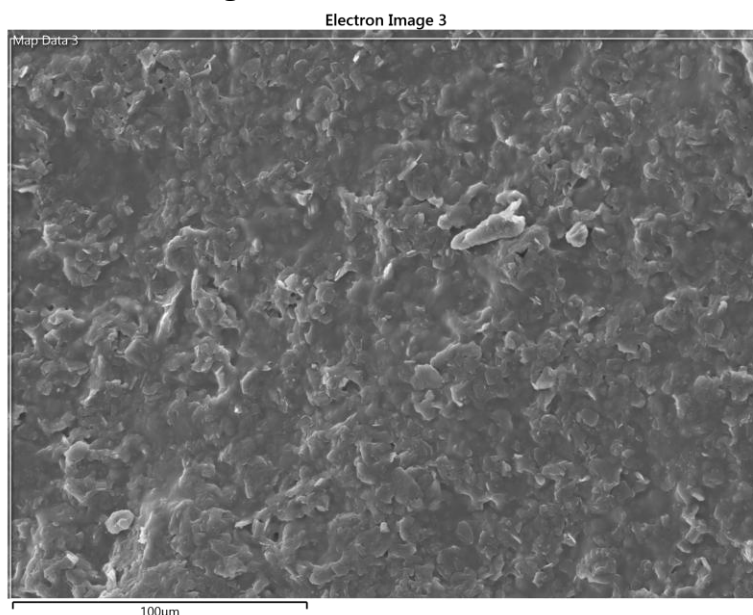


Figura 66. Microscopía Electrónica de Barrido para la muestra de almidón de arroz con 10% de glicerol y 5% de grafito.

Finalmente, con la caracterización de la muestra de glicerol 10% con grafito a 5%, se puede observar una mejor uniformidad, está siendo una muestra menor agrietamiento y una vista que hace parecer al material menos seco. Aunque en general es muy parecido a la muestra anterior, el aumento del glicerol proporciona una mejor matriz polimérica para contener al grafito, conocido por fragilizar los materiales.

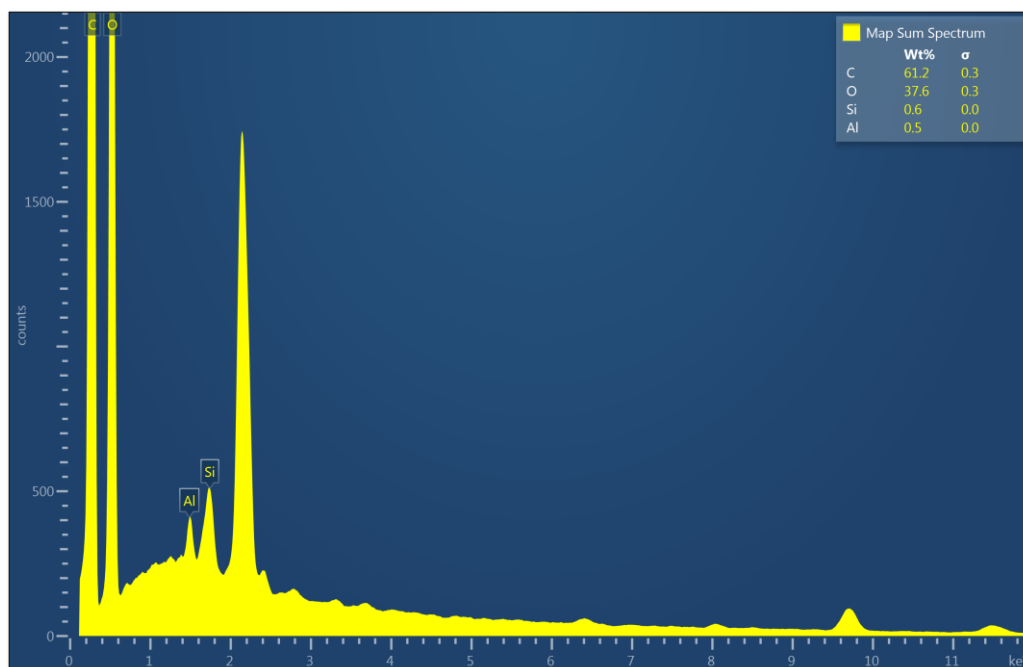


Figura 67. Grafica de composición química para la muestra de Almidón de arroz con 10% de glicerol y 5% de grafito

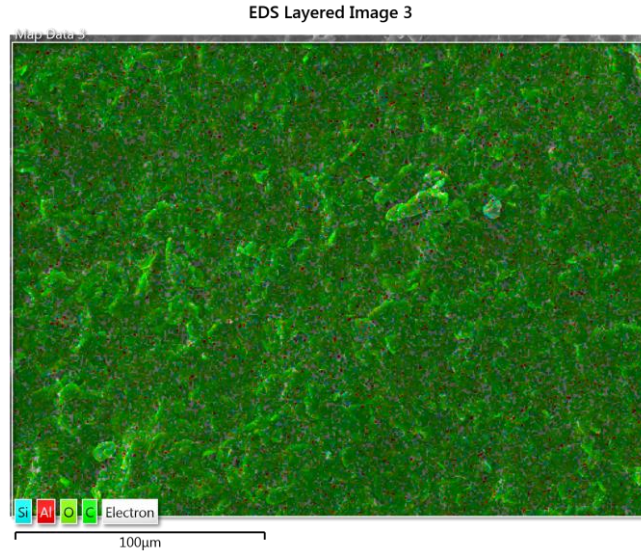


Figura 68. Mapeo de composición química para la muestra de 10% de glicerol y 5% de grafito, todos los elementos

La información de los mapeos (Figura 69) es exactamente la misma, con valores del porcentaje de grafito variando solo por 0.5% que bien podría deberse al momento de el esparcimiento y zona utilizada en las pruebas, pero es mínimo y todo se comporta como lo esperado.

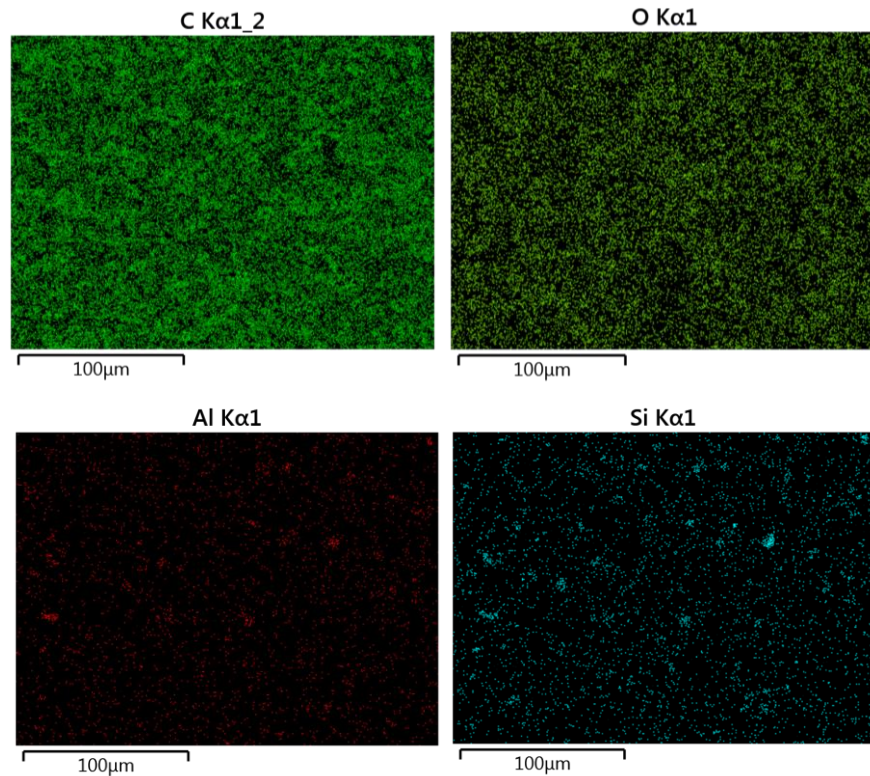


Figura 69. Mapeo de composición química para la muestra de 10% de glicerol y 5% de grafito, elementos particulares.

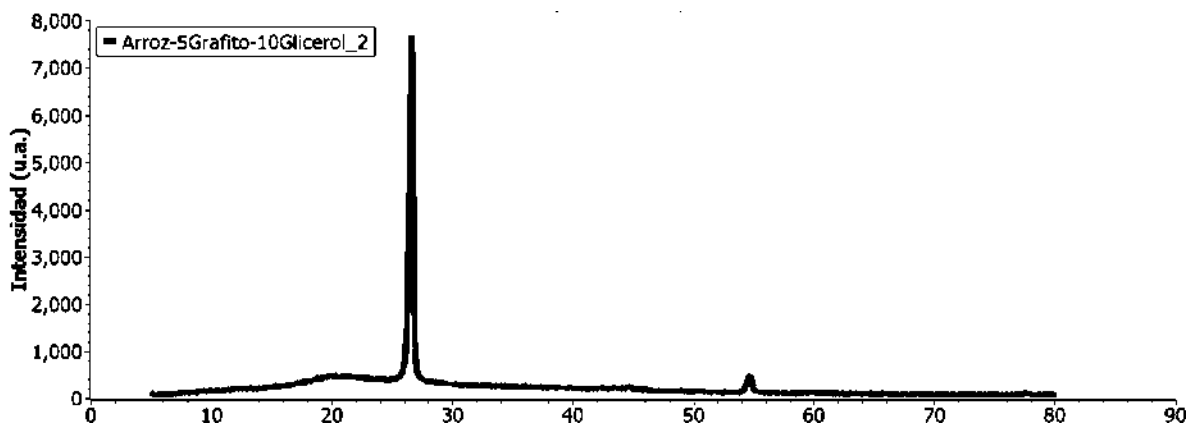
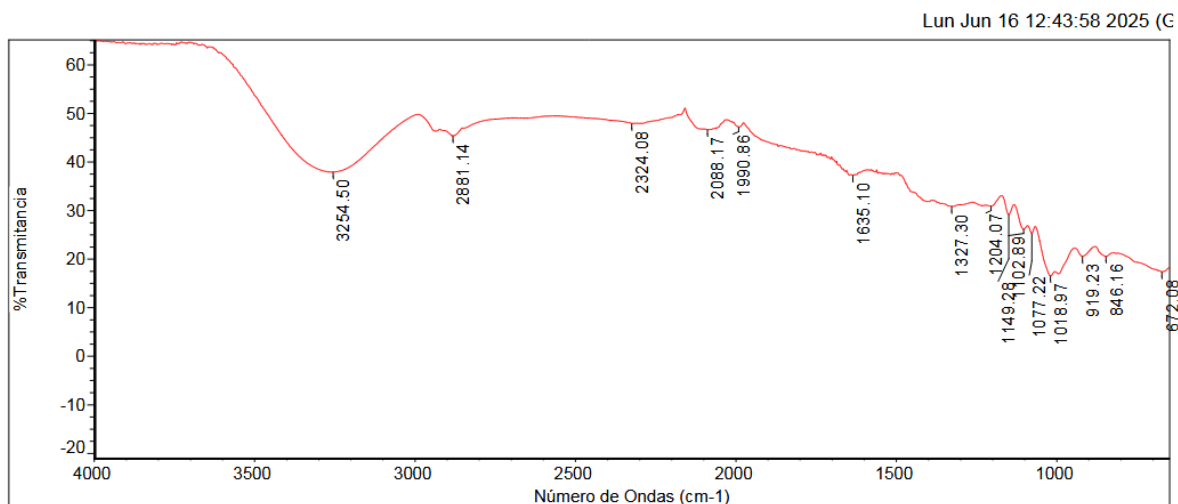


Figura 70. Gráfica de Difracción de Rayos X para la muestra de 10% de glicerol y 5% de grafito.

Con la caracterización de DRX (Figura 70), obtenemos nuevamente la información que ya hemos detectado con otras pruebas, la muestra depende casi en su totalidad de la cantidad de grafito. De la misma forma presenta el pico característico del grafito a 26.5° .



Tiempo de recogida: Lun Jun 16 12:41:09 2025 (GM)

Lun Jun 16 12:43:25 2025 (GMT-05:00)

BUSCAR PICOS:

Espectros: AGr510

Región: 4000.12 649.89

Umbral absoluto: 58.028

Sensibilidad: 70

Lista de picos:

Posición:	672.08	Intensidad:	17.281
Posición:	846.16	Intensidad:	20.485
Posición:	919.23	Intensidad:	20.514
Posición:	1018.97	Intensidad:	16.470
Posición:	1077.22	Intensidad:	25.270
Posición:	1102.89	Intensidad:	26.098
Posición:	1149.28	Intensidad:	29.149
Posición:	1204.07	Intensidad:	30.848
Posición:	1327.30	Intensidad:	30.803
Posición:	1635.10	Intensidad:	37.185
Posición:	1990.86	Intensidad:	47.144
Posición:	2088.17	Intensidad:	46.590
Posición:	2324.08	Intensidad:	47.878
Posición:	2881.14	Intensidad:	45.327
Posición:	3254.50	Intensidad:	37.862

Figura 71. Gráfica de Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) para la muestra de 10% de glicerol y 3.2% de grafito.

La banda para esta muestra de 10% de glicerol es idéntica a la de la muestra de 7.5% glicerol, y al tener el mismo porcentaje de grafito, esta no varío, dato el cual esperábamos (Figura 71).

Comparativa de FTIR para las muestras anteriores.

A continuación, se presenta la información comparativa de FTIR, para estas muestras. Cabe mencionar que no se presenta la comparativa de DRX debido a que al inicio del capítulo ya se mostró una comparativa con otras muestras, que determino las gráficas dependientes del grafito. Y para los mapeos y MEB no se presentan características dignas de compararse entre sí como las gráficas siguientes.

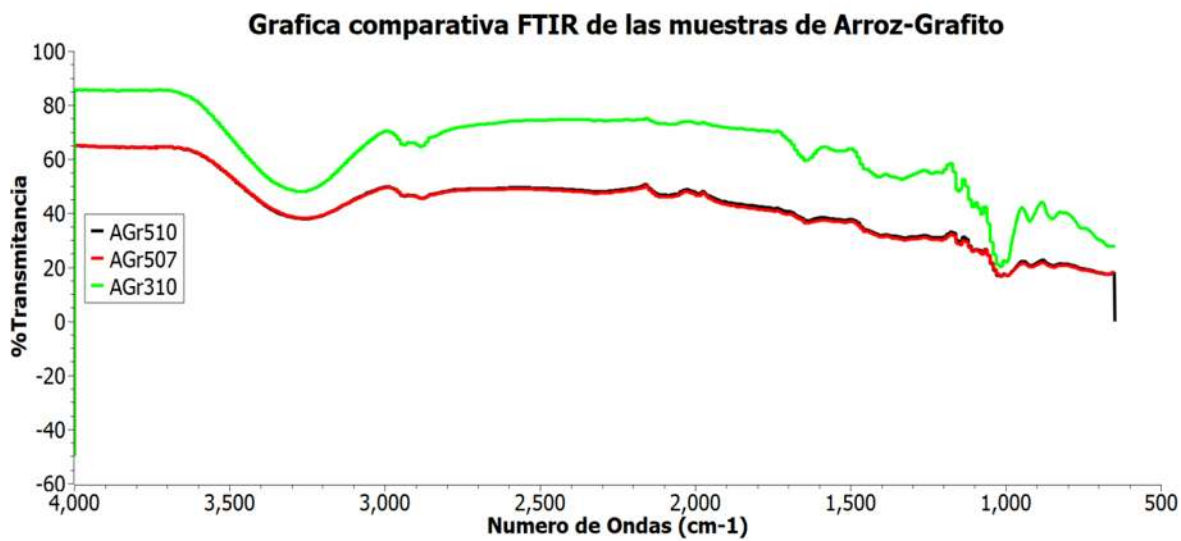


Figura 72. Gráfica comparativa de FTIR de las muestras de Arroz-Grafito.

Los espectros de FTIR mostrados en la Figura 72 revelaron que la huella vibracional del material compuesto está regida predominantemente por las concentraciones de grafito. Se observó que las señales de la matriz polimérica son atenuadas por la presencia del refuerzo de carbono. Los desplazamientos mínimos observados en las bandas de absorción sugieren que la interacción entre la matriz y el grafito es de naturaleza física (fuerzas de Van der Waals) y no química, dado que no se detectó la aparición de nuevos grupos funcionales significativos.

Identificación de los picos base

Las caracterizaciones de las tres muestras proporcionan los picos característicos de una matriz polimérica basada en almidón plastificado donde las bandas más importantes son las siguientes:

~3250 - 3265 cm^{-1} : Esta es una banda ancha y fuerte que corresponde al estiramiento del grupo hidroxilo (-OH). Esta señal es aportada en conjunto por el almidón de arroz, el glicerol (que tiene tres grupos -OH por molécula) y el agua retenida en el material.

~2879 - 2938 cm^{-1} : Corresponde al estiramiento de los enlaces C-H (grupos metilo y metileno alifáticos) presentes en las cadenas de carbono del almidón y el glicerol.

~1635 - 1646 cm^{-1} : Generalmente, en películas de almidón, este pico se asocia con la flexión del enlace O-H del agua fuertemente unida (agua de hidratación) en la matriz polimérica.

También podría indicar trazas residuales de los enlaces C=O del ácido acético, aunque típicamente el ácido acético libre aparece más cerca de 1700 cm^{-1} .

Región de 1150 a 920 cm^{-1} : Esta es la "huella dactilar" de los carbohidratos. Los picos prominentes (como los observados en ~ 1150 , 1077 y 1018 cm^{-1}) corresponden al estiramiento de los enlaces C-O y C-C, así como a la flexión C-O-H de los anillos de glucopiranososa que conforman la amilosa y amilopectina del almidón de arroz.

Efecto de la Variación de Grafito (3% vs. 5%)

Para analizar el material de refuerzo, comparamos la banda verde (3% Grafito, 10% Glicerol) con la banda roja o negra (5% Grafito, 10% Glicerol):

Atenuación general de la señal: El grafito puro está compuesto por carbono con hibridación sp^2 y, a menos que esté fuertemente oxidado (como el óxido de grafeno), no presenta grupos funcionales activos en el infrarrojo medio. Su efecto principal en el FTIR es físico: el grafito absorbe y dispersa fuertemente la radiación IR.

Aplanamiento de picos: Al aumentar la concentración de grafito del 3% al 5%, se puede notar que los picos en el espectro AGr5x se ven un poco más "aplanados" o menos definidos en comparación con el espectro AGr310. Esto se debe a que la mayor cantidad de partículas oscuras de carbono reduce la penetración y reflexión de la señal infrarroja, disminuyendo la resolución general del espectro sin crear nuevos enlaces químicos con la matriz.

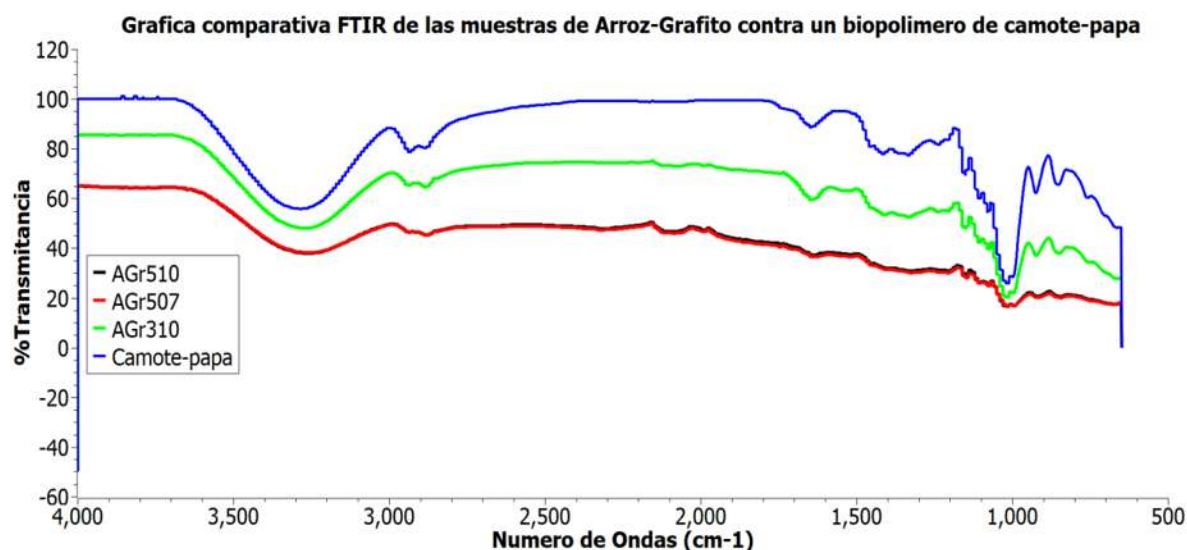


Figura 73. Grafica comparativa de las muestras de Arroz-Grafito contra un biopolímero de camote-papa.

La ausencia de nuevos picos sugiere que el grafito actúa como un refuerzo inerte que no altera la estructura molecular del biopolímero de arroz, manteniendo la estabilidad química necesaria para su uso en dispositivos de EIT.

Se observa que la matriz de arroz-grafito con mayor contenido de grafito presenta una respuesta menos intensa en comparación con los biopolímeros de camote y papa, lo que valida la selección del almidón de arroz como una base adecuada para la conducción eléctrica requerida (Figura 73).

Además, las propiedades mecánicas obtenidas de las muestras con altas concentraciones de glicerol permiten tener un material más adecuado para el manejo, contrarrestando la fragilidad y otras características negativas otorgadas por parte del grafito. Estas tres muestras son aptas para su utilización en las pruebas del sensor.

Aplicación de diferentes caracterizaciones eléctricas.

El método de caracterización eléctrica por corrientes de Eddy fue aplicado en las primeras muestras con ayuda del cuerpo académico de Investigaciones Metalúrgicas de la universidad Michoacana. Sin embargo, después de las pruebas se llegó al hecho de que el dispositivo no era capaz de medir la conductividad de un material delgado y poco conductivo. Por lo que se descartó el uso de esta caracterización en pruebas siguientes.

Para el caso de la caracterización por potencial termoelectrónico, de igual manera se por medio de la ayuda del cuerpo académico de Investigaciones Metalúrgicas de la universidad Michoacana se probó esta técnica en el material compuesto proporcionado. A diferencia del método anterior, este tipo de caracterización si logro dar resultados de potencial termoelectrónico, aunque muy poco. Sin embargo, esto nos da un detalle clave a considerar de nuestra materia como conductor variable el cual es: “Un material compuesto fabricado a base de bioplástico de almidón reforzado con partículas, tendrá una resistencia eléctrica en base a su temperatura”. Solo un pequeño comentario, ya que bien se sabe que la mayoría de los materiales conductores tienen una resistencia eléctrica que varía con la temperatura, generalmente teniendo mejor conductividad cuando son bajas.

Caracterización por 4 puntos y Arduino. Aunque se llegaron a realizar pruebas burdas de una caracterización por medio de 4 puntos y Arduino, los datos obtenidos fueron similares con los resultados de la técnica de la técnica de 2 puntos y el multímetro en la modalidad óhmico. Esto probablemente debido a la falta de calidad o comprensión del dispositivo creado decidiendo que no era necesario seguir con esta técnica, y viendo que con dos puntos se podía comprobar la variación de la resistencia eléctrica del material debido a la deformación, se pasó a descartar los subsiguientes usos de esta técnica

La caracterización por dos puntos se muestra la más viable debido a su facilidad de uso al mismo tiempo del bajo costo de este. Como se puede ver en los resultados de las primeras muestras, el uso de un multímetro es capaz de mostrar la resistencia eléctrica del material y por ende la conductividad. Con las mediciones por dos puntos podemos demostrar la existencia de un material lo suficientemente conductor para su aplicación en sensores.



Figura 74. Grafica de las primeras pruebas de resistencia eléctrica con Arduino y dos conexiones.

Incluso se pueden utilizar sistemas muy sencillos de medición de conductividad por medio de Arduino y una resistencia de referencia. De esta manera como se observa en la Figura 74, podemos obtener la resistencia eléctrica del material. Obviamente se observan picos, debido a las variaciones del sistema de medición improvisado, pero en general las mediciones se mantienen constantes.



Figura 75. Cambio de la resistencia eléctrica en una muestra con 5% de grafito, debido a la deformación de esta.

Así mismo la Figura 75 muestra en vivo el fenómeno estudiado en acción. La grafica muestra un promedio inicial entre los valores de 115 a 120, y luego se observa una bajada hasta los valores de 100. Esto en la experimentación es debido a que, el material estaba conectado a una superficie plana con dos puntas de medición, una a cada extremo, y posteriormente se aplicó una presión con un material no conductor en el centro del material. Esto provocó un pico, que bien puede atribuirse al movimiento del material debido a la fuerza aplicada.

Podemos atribuir que esta es la pauta o el visto bueno para su posterior aplicación en el uso de un hardware electrónico y uso en sensores.

Hardware del sensor con agua como medio de medición

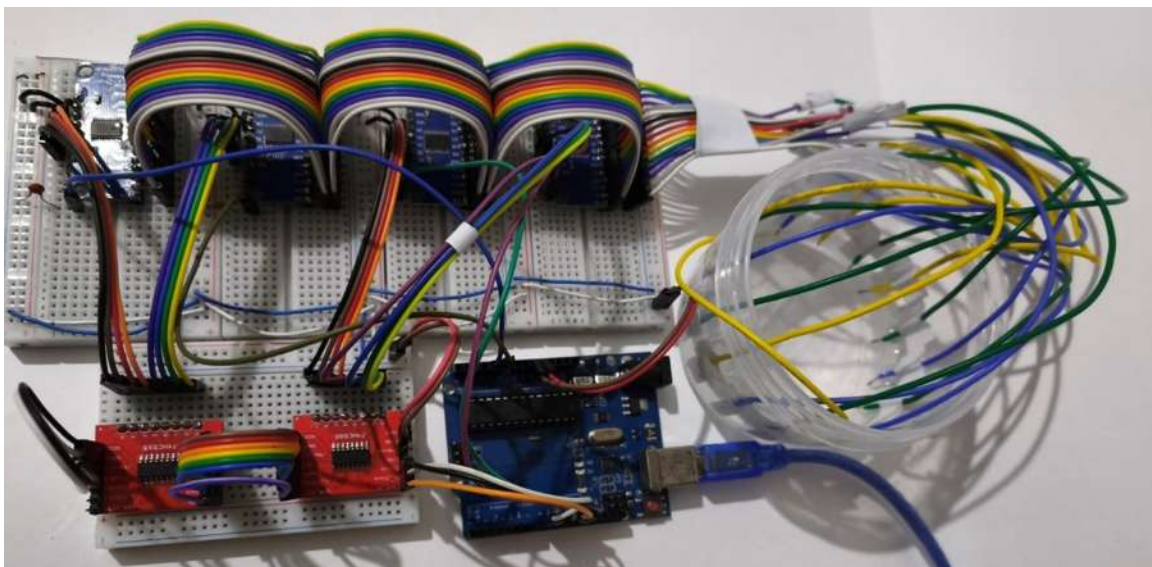


Figura 76. Hardware del sensor con agua como medio de medición.

Para la correcta aplicación del hardware investigado y desarrollado, primeramente, se ocupa su utilización en otro medio para la comprobación que el mismo funcione correctamente. De esta forma se reducen la cantidad de variables desconocidas a probar, quitando al material compuesto de la ecuación, y dejando nada más a la electrónica de precisión relacionada al EIT (Figura 76).

Baseline

Como se explica en la metodología, se probaron los sistemas por medio de la adquisición de datos con 208 mediciones y con 1456 mediciones.

El sistema de 208 mediciones es un sistema más veloz, por lo cual se pueden realizar imágenes reconstruidas de manera más fluida o a “tiempo real”, aunque esta depende enormemente del medio de aplicación por lo que puede ser el punto que determine se es adecuado o no en un sensor con materiales compuestos conductivos experimentales.

Para este sistema de 208 mediciones, se empieza con la realización de un “Baseline”, que en palabras más sencillas puede considerarse como una calibración al equipo para la obtención de mejores resultados.

En la Figura 77 podemos observar la gráfica del Baseline del sistema de 208 mediciones. Según la bibliografía estudiada, los valores y picos tienen en su mayoría la forma esperada, para un sistema que está cambiando constantemente la zona de inyección eléctrica y se está trabajando con ondas high-low (ondas cuadradas alternas) forzadas por medio de Arduino reemplazando las ondas senoidales típicas de la corriente alterna. Lo ideal sería la implementación de otro dispositivo que genere de manera correcta estas ondas, ya que como lo menciona el nombre “Electro Impedance Tomography”, esta utiliza la impedancia, característica de estas.

Además, al analizar esta grafica podemos detectar un par de detalles. El primero y más visible es el pico de gran tamaño que se encuentra casi al final de la gráfica. Este pico es una anomalía, a los resultados esperados, y la información que nos transmite, es el hecho de una falla entre un par de conexiones relacionadas a los electrodos y multiplexores. Esto bien podría ser, por falso contacto o una gran resistencia, debido a factores no controlados como el desgaste, oxido o daño de la protoboard, los multiplexores, los cables, o los electrodos. El segundo, los valores la diferencia de voltaje, es lo suficientemente grande para que Arduino detecte cambio. Esto en si son buenas noticias, porque significa que puede llegar a funcionar el sensor sin el uso de amplificadores.

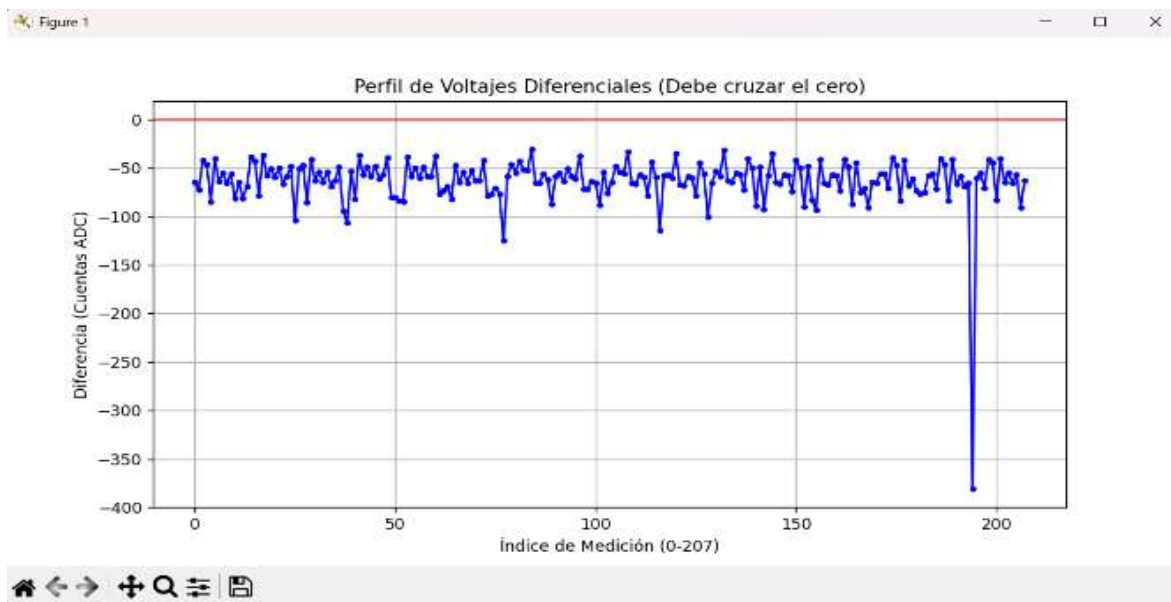


Figura 77. Grafica de valores Diferenciales del sistema de 208 mediciones.

Ahora bien, debido a que el conocimiento de Arduino y Python es hasta cierto punto complejo, la explicación de las unidades de la Figura 77 es la siguiente:

- En cuanto al eje X, se muestran las 208 mediciones realizadas, donde se estaría empezando con el índice 0 y terminando en el índice 207.
- Para el eje Y, los valores que se muestran son valores adimensionales o valores crudos comúnmente llamados como “steps” o escalones. Estos van en Arduino de 0 a 1023, donde se traducen a valores de medición de 0 a 5 voltios. Como se observa la gráfica, la mayoría de estos valores van de poco menos de 50 a la mitad antes de llegar a 100.

Un ejemplo, para su conversión tomaremos los valores de -45 a -75, donde parecen estar la mayoría de los picos. Para su cálculo utilizaríamos la conversión:

$$\text{Voltaje (mV)} = \text{Valor ADC} * \frac{5000\text{mV}}{1024}$$

Donde el Voltaje está en milivolts y el valor ADC son los steps o el número adimensional

Con el valor de -45 de la gráfica, tendríamos -219.6mV, y con el valor -75 se tendría un valor de -366.2 mV. La falta de precisión de Arduino normalmente significa que no puede detectar valores más bajos de 5mv, por lo que muchas veces se considera problemático el tener cambios de valores bajos y muchas veces incluso un cambio de 10 mV bien se puede considerar ruido. Al tener cambios de aproximadamente 100mV significa que está en un rango adecuado para que Arduino trabaje.

Aparte del sistema de 208 mediciones, también se probó con el sistema de 1456 mediciones. Este sistema es más pesado y complejo que el anterior, llegando a ser más lento, pero con la ventaja de que es más susceptible al cambio, por lo que sería más fácilmente obtener mejores imágenes reconstruidas. Como desventaja, a mayores mediciones también significa más puntos donde pueden generarse ruido en la señal.

En la Figura 78 se muestra la gráfica de baseline para el sistema de 1456 mediciones. Esta es hasta cierto punto, muy similar a la del sistema anterior. En esta se muestran dos picos grandes casi al final de la gráfica. Por supuesto que el par de conexiones al estarse midiendo más veces en otros patrones, se esperaba que apareciera más visible en esta gráfica.

En esta el eje X, va desde 0 hasta las 1456 mediciones, y en el eje Y nos proporciona mejores valores diferenciales que la gráfica anterior teniendo picos que van desde 100 a -150, que traduciéndolo a valores de voltajes tendríamos los valores de 488mV a -732mV, lo cual es excelente para la una buena reconstrucción al cambiar la resistencia debido a un cambio en el medio.

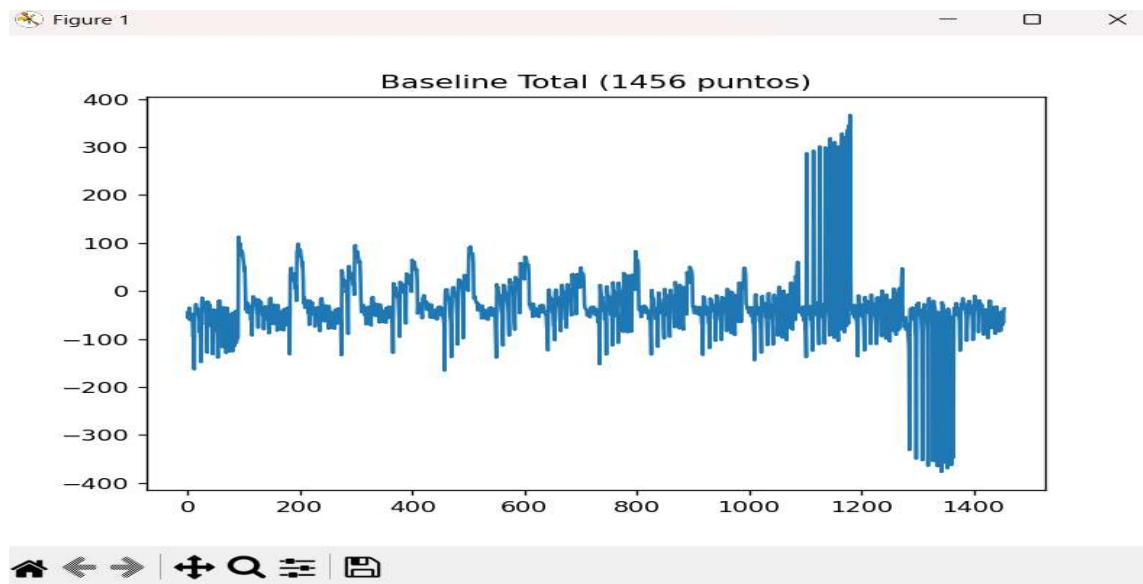


Figura 78 Grafica de valores Diferenciales del sistema de 1456 mediciones.

Back Projection

Para mostrar los resultados del BP se optó por hacerlo en una forma de comparativa de ambos sistemas, esto con tal de determinar cuál de los dos es mejor aplicable con el uso del material compuesto. Por capítulos anteriores, se conoce que a menor número de mediciones es un sistema más simple y veloz, esto considerando que son imágenes reconstruidas en tiempo real. Caso contrario de un sistema con mayor número de mediciones, que es más lento y complejo, pero por ende más exacto.

Primeramente, se muestran los resultados en estado estable, sin cambiar ningún elemento en el sistema, para el caso de 208 mediciones y 1456 mediciones. Idealmente se esperaban tener reconstrucciones con un solo color uniforme, pero como se vio en el caso del baseline con un pico irregularmente grande. Es el mismo ambas reconstrucciones, el único pico del sistema de 208 mediciones se puede traducir como la zona de abajo izquierda de la primera reconstrucción (Figura 79), mientras que, los dos picos observados en el sistema de 1456 se observan en la segunda reconstrucción como una zona brillante a la izquierda, y como opuesto una zona carente de brillo a la derecha, referentes al pico positivo y al negativo.

Cabe destacar que, en este estado, ya se ha aplicado el uso del baseline para una adquisición más uniforme de los datos, he incluso se realizaron pruebas donde se generaba el baseline con un objeto inicial, mostrando una imagen similar a la mostrada, dando a entender que efectivamente funciona hasta cierto punto como medio de calibración inicial.

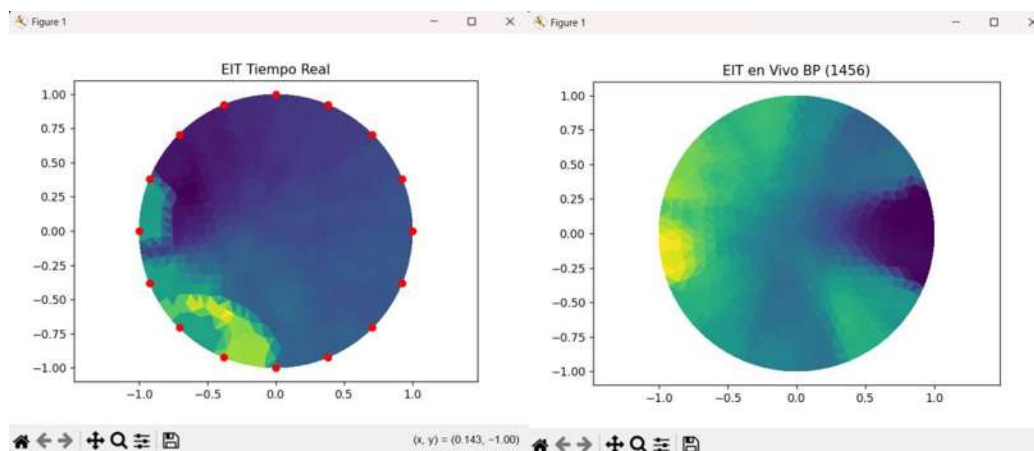


Figura 79. Reconstrucción EIT en BP para un medio de agua, sin interferencia en el sistema para 208 y 1456 mediciones.

Para probar la funcionalidad del dispositivo, con un cambio en el sistema (agua), se añadió un objeto cilíndrico no conductor en las siguientes configuraciones:

En la Figura 80 se está introduciendo el objeto en un costado (a la derecha de la reconstrucción), y como se observa, hay un cambio del estado inicial a un estado donde muestra una zona de mayor intensidad de brillo que corresponde al objeto. Esto es debido al cambio de la conductividad de esta zona. Sabemos por el medio del baseline, que se tiene una calibración de conductividad base, y como se esperaba, cualquier cambio en su conductividad debido al cambio de su morfología, se observan en las imágenes de la reconstrucción.

Si bien, se nota una diferencia de calidad y contraste entre el uso del sistema de 208 mediciones contra el uso de 1456 mediciones, con imágenes más borrosas y menos notables en el de 208, y con imágenes mejores construidas en el de 1456.

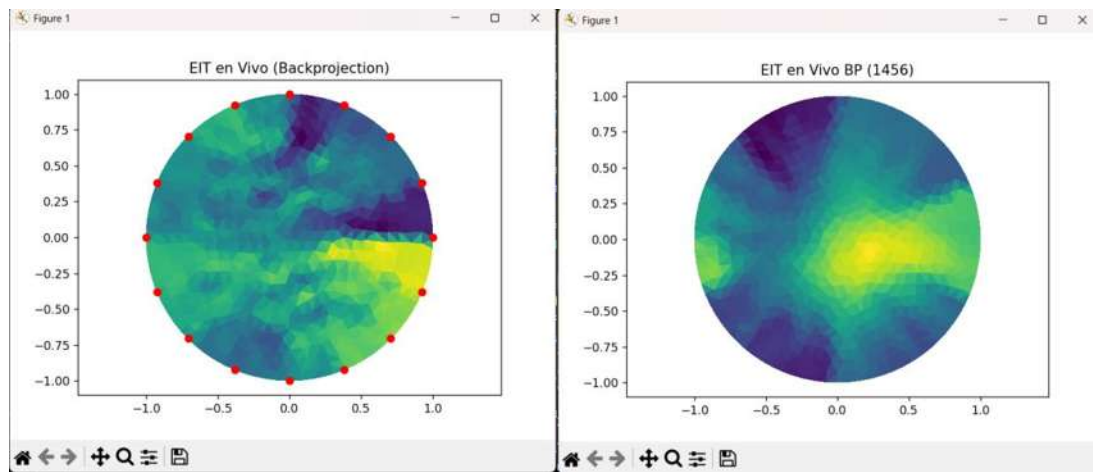


Figura 80. Reconstrucción EIT en BP para un medio de agua, introduciendo un objeto no conductor a su derecha, en el sistema para 208 y 1456 mediciones.

Ahora en la Figura 81, se cambió la posición del objeto al lado contrario del caso anterior. De igual forma se muestra una mejor reconstrucción den el sistema de más mediciones, donde se nota al objeto como el punto más brillante, mientras que, para el caso de menor mediciones, se ve una zona brillante como haciendo un puente en la zona izquierda.

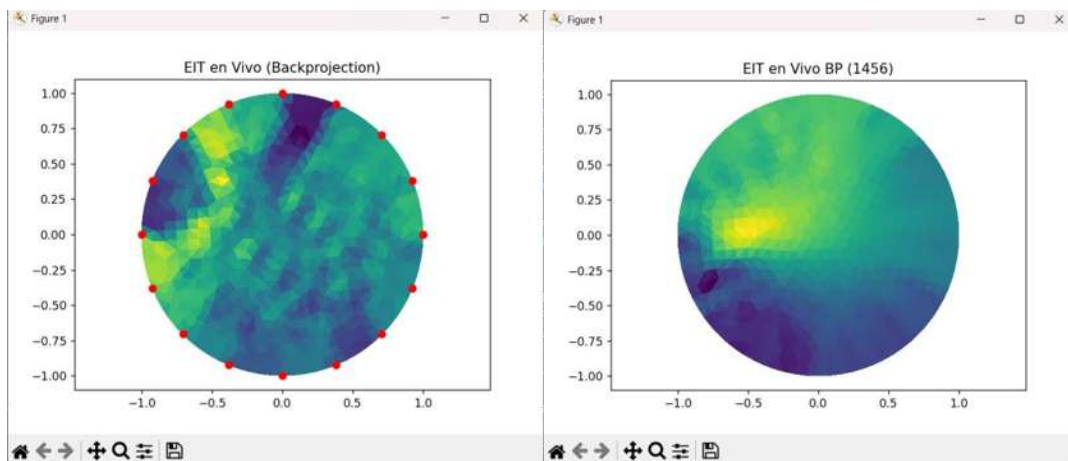


Figura 81 Reconstrucción EIT en BP para un medio de agua, introduciendo un objeto no conductor a su izquierda, en el sistema para 208 y 1456 mediciones

En el caso del Back Projection utilizado para el agua como medio de conducción, podemos observar una mejor reconstrucción en el uso del sistema de 1456 mediciones. A pesar de este ser más lento en cuanto a su ejecución, es capaz de dar la información necesaria que determina un cambio en el sistema debido a un objeto, así como su ubicación. Un punto a destacar, obtenido de las pruebas, es el hecho de que, especialmente en el sistema de menor mediciones, se obtienen mejores reconstrucciones en zonas más pegadas a los electrodos, mientras más borrosas cercas del centro.

Gauss-Newton

De igual forma que los resultados con el PB, se muestran los resultados a la par de ambos sistemas de medición, con el fin de obtener el mejor método para su aplicación en el material compuesto. Si bien, para el BP se utilizan principalmente los colores azul oscuro para valores bajos, mientras verdes brillantes para valores altos, en el caso del GN se utilizan colores como azul para bajos y rojos para altos.

En el caso de estos resultados por GN, a primera vista se alcanzan a notar una mayor variedad en cuanto a la forma y los colores iniciales. En la Figura 82 de la izquierda, como se esperaba, se observa una zona de un color diferente, recordando que el caso del BP, también mostraba este fenómeno en la misma zona, refiriéndose también al baseline que tiene un pico, que atribuimos a un fallo en el hardware. En el caso de la figura de la derecha, con el sistema de 1456 mediciones, se observan más variaciones, que atribuimos al ruido en el sistema. El GN, tiene mayor complejidad, así como una mayor exactitud y susceptibilidad a los cambios, pero por lo mismo se ha determinado que también esta susceptibilidad se aplica al ruido del sistema, creando unas imágenes reconstruidas con mayor cantidad de zonas en movimiento, o figuras raras.

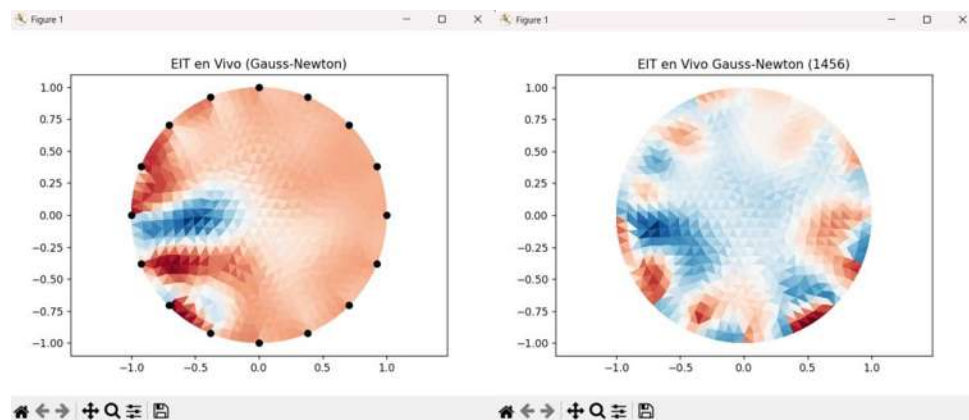


Figura 82. Reconstrucción EIT en GN para un medio de agua, sin interferencia en el sistema para 208 y 1456 mediciones.

De igual manera que el BP, en el GN se utilizó un objeto cilíndrico no conductor para probar la variabilidad de la imagen reconstruida debido al cambio en las conductividades. En la Figura 83, se sumergió el objeto en el agua en la zona de la derecha. Mientras se puede observar en el sistema de la derecha de 1456 mediciones una muy buena reconstrucción de la imagen con el objeto y por ende una muy buena adquisición de los datos pasa todo lo contrario en la imagen de la izquierda referente al sistema de 208 mediciones, donde a pesar de que se ve un “punto azul”, este no es atribuible al objeto, ya que este se introdujo al lado contrario. La imagen de la izquierda, al añadir el objeto, cambio en su mayoría el color de la zona de la derecha por el objeto introducido, mostrando resultados confusos de la zona de aplicación del objeto, o incluso del tamaño del objeto.

Además, se han podido observar que, en el momento de introducir el objeto en el agua, con el sistema de 1456 mediciones, estas imágenes reconstruidas pierden algo del ruido inicial, especialmente las formas de rojo intenso se vuelven más tenues o incluso desaparecen.

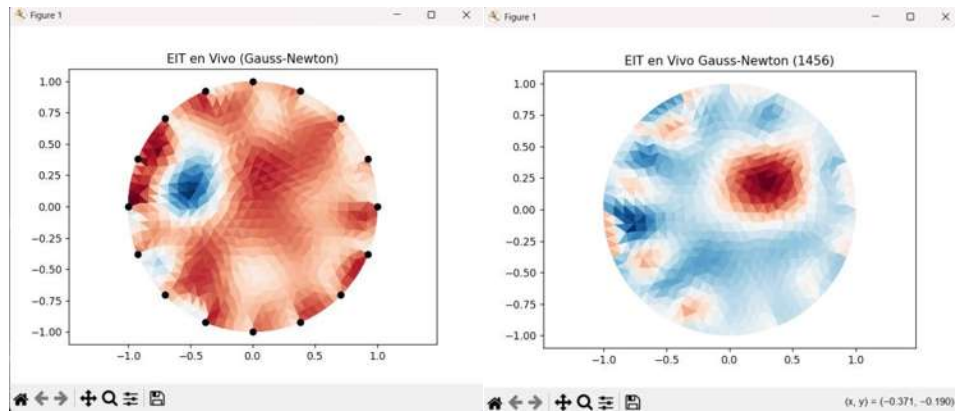


Figura 83. Reconstrucción EIT en GN para un medio de agua, introduciendo un objeto no conductor a su derecha, en el sistema para 208 y 1456 mediciones.

Posteriormente, el objeto se pasó a mover a una ubicación contraria a la mostrada con anterioridad. Aunque por ser un trabajo escrito y de manera estática no se aprecia este cambio tan bien como verlo en vivo o en un video, el movimiento de este objeto no conductor de un extremo a otro fue perfectamente captado en el sistema de 1456, y como se ve en la Figura 84 de la derecha, la imagen reconstruida muestra datos precisos de la nueva ubicación del objeto.

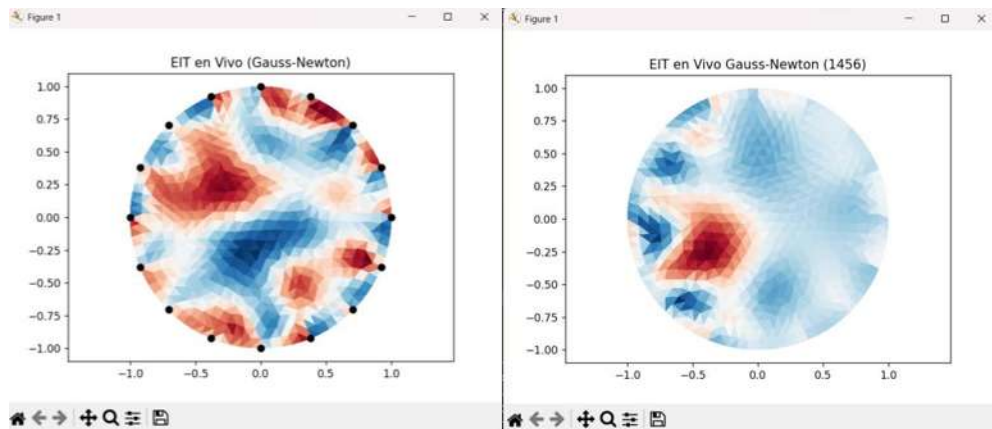


Figura 84. Reconstrucción EIT en GN para un medio de agua, introduciendo un objeto no conductor a su izquierda, en el sistema para 208 y 1456 mediciones.

Caso contrario en la imagen de la izquierda referente al sistema de 208 mediciones, donde se muestra una gran cantidad de ruido, aunque si fue capaz de mostrar la ubicación del objeto, pero con una mayor deformación al del sistema de mayor cantidad de mediciones. Igual que el PB, para el sistema de menor mediciones es indispensable que el objeto se encuentre cercas de las orillas, próximos a los electrodos, donde se tienen mejores mediciones y obtención de resultados.

El uso del hardware en agua como medio de medición ha demostrado su factibilidad para el uso de otros materiales, si bien se sabe que se tienen resistencias diferentes, así como sus propiedades de deformación u otros, esto da buena pauta para hacer las pruebas pertinentes en otros medios.

Sensor de Texturas con un biopolímero conductor

Finalmente, como resultados finales, se probó el uso del hardware de EIT, en el material compuesto desarrollado en este trabajo. Con los resultados anteriores de la electrónica de precisión, se demostró que es factible el uso de este en su aplicación con el material como sensor de texturas. Si se considera de manera similar el fenómeno sucedido en el agua, para el caso del material compuesto, se espera un comportamiento hasta cierto punto similar, si consideramos que ambos trabajan bajo el cambio de la conductividad eléctrica debido al cambio del medio de medición. Por supuesto se sabe que el agua tiene una conductividad diferente al material, así como una deformación diferente lo que causa su cambio de resistencia. En el agua, esta es desplazada por un objeto externo no conductor, teniendo en el sistema dos resistencias. En el caso del material compuesto, este cambia su resistencia al sufrir una deformación, como el uso de presionar el material. Esto puede provocar que no sean dos resistencias, sino una mayor variedad de resistencias y con una diferencia menor al cambio del agua con un material aislante. Esta variedad de resistencia con un cambio menor, representan un reto en la toma de señales, por lo que se muestran los resultados obtenidos con el sistema probado sobre el agua.

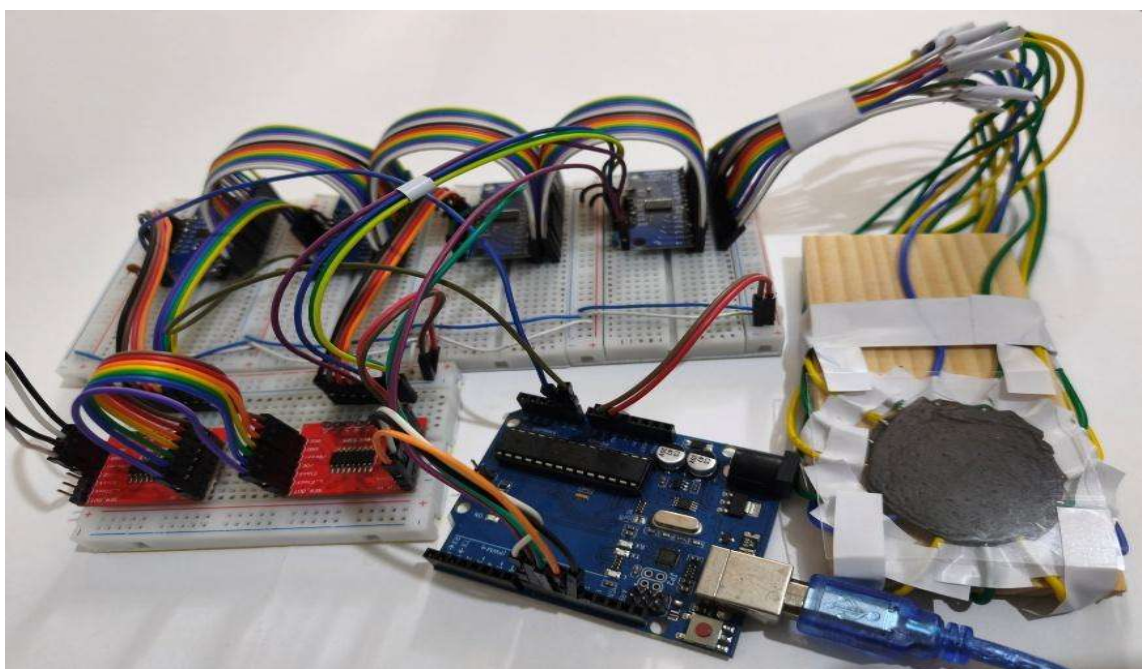


Figura 85. Hardware del sensor con el material compuesto como medio de medición.

Una de las ventajas del diseño del prototipo es su facilidad del cambio del medio, ya que este solo ocupa desconectar los cables referentes a los electrodos de medición, sustituyéndolos por los del otro medio. Como se muestra en la Figura 85, el cambio con respecto a la Figura 76, solo corresponde al contenedor con agua, por el material compuesto encapsulado.

Un factor a tomar en cuenta es la manera de conexión del material compuesto con los electrodos. En el prototipo mostrado están los electrodos cubiertos en un par de capas del material compuesto, de cierta manera como en forma de “sándwich” donde los electrodos, se

encuentran entre ambos. Este es un diseño muy burdo y sencillo, solo con el fin de obtener resultados iniciales de si es factible el uso de material como sensor de texturas. Sería un punto a tratar en prototipos futuros el diseño físico de la conexión de los electrodos con el material.

Baseline

Retomando de los resultados con el agua como medio de medición, se optó por la utilización del sistema de 1456 mediciones que, aunque es más lento en su ejecución, mostraron los mejores resultados si consideramos que se está utilizando un equipo casero realizado a base de Arduino. En este contexto se pasó a la realización del Baseline para el material compuesto.

La gráfica mostrada en la Figura 86, muestra las mediciones captadas del material compuesto en un estado sin perturbaciones, y como se esperaba, mostro de igual manera los dos picos mostrados anteriormente en el baseline de la Figura 78, que se ha concluido es ruido ocasionado por un defecto en el hardware. A parte de estos picos anormales, se pueden comparar ambas gráficas, la del agua contra la del compuesto, y se puede determinar que los valores tienen relación. Aunque debido al pico anormal negativo, que en el material compuesto es un poco mayor, por lo que cambio la escala, la mayoría de los valores oscilan entre 50 a -100, cayendo ligeramente bajo el rango que trabajaba el agua de 100 a -150. Aun así, con una menor variación en relación con el agua, cae dentro del rango de mediciones permitidas por un equipo poco preciso como el agua.

Otra cosa a tomar en cuenta, en la gráfica del agua, muestra una información crucial para el ojo de la persona experta a comparación de esta nueva grafica del material compuesto. El detalle mencionado es el hecho de que la gráfica del agua presenta un patrón que se repite cada cierta zona, que cambia ligeramente debido al ruido, mientras que en esta grafica no hay patrón alguno reconocible, probablemente por la morfología de la película del material compuesto sintetizado. Esta morfología irregular, se traduce de manera electrónica como una falta de repetición en la gráfica, con la mayoría siendo picos irregulares.

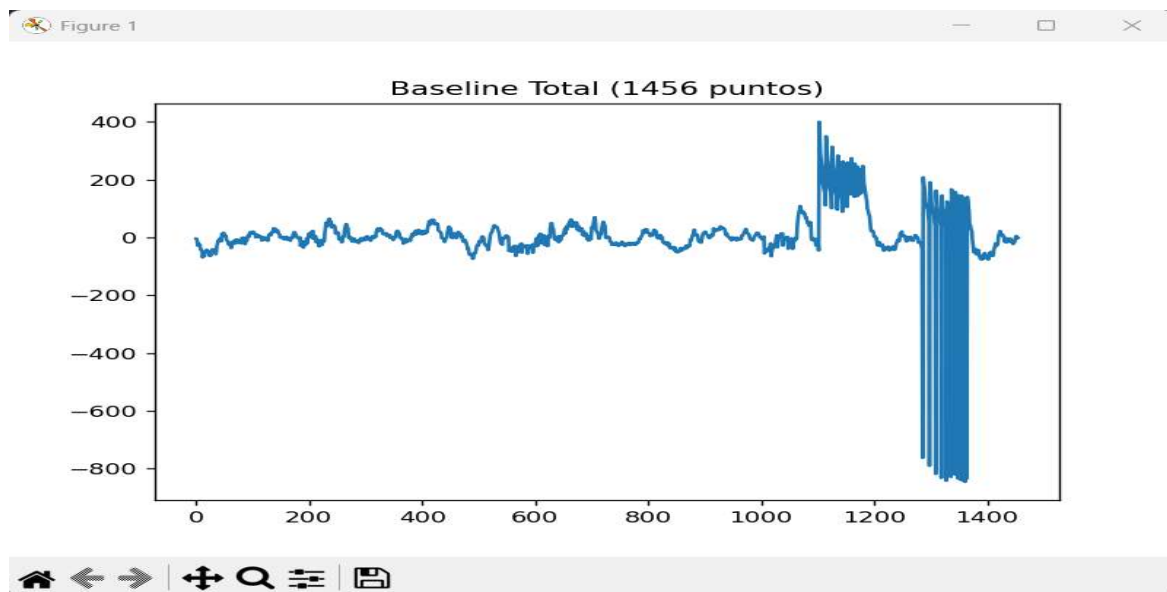


Figura 86 Grafica de valores Diferenciales para el compuesto

Back Projection

Posterior a la realización del baseline, se pasó a la aplicación del método de BP para la reconstrucción de imágenes con el material compuesto como medio de medición. En general, El uso del PB en el agua, no dio los mejores resultados como se mostró con anterioridad, sin embargo, en el caso de su aplicación en el material compuesto desarrollado dio resultados muy interesantes. Primeramente, se presenta la Figura 87, la cual es sobre el material compuesto sin interferencia externa de este. En la figura claramente se muestra una gran cantidad de brillo verde referente a una gran cantidad de ruido. Esto tiene otro significado si se observa la experimentación de manera en vivo o en video lo cual complicado mostrar en un trabajo de este tipo. Resumiendo, en estado “estable”, sin ninguna deformación o interferencia externa, los valores de esta reconstrucción se mantienen variando un tiempo, y con forme pasa este, se va volviendo menos variables los valores.

La búsqueda del porqué de esta anomalía ha llegado a abrir la pauta para una teoría que queda abierta a probar sobre el material compuesto investigado y sintetizado y es: “El material compuesto de matriz polimérica de bioplástico reforzado con partículas de grafito es capaz de almacenar energía eléctrica”. Faltaría una experimentación e investigación más exhaustiva al respecto, pero el hecho de que, el sistema EIT proporcione la inyección de una corriente eléctrica, y los valores de reconstrucción varíen más al inicio de la prueba, junto con el ruido y vayan variando menos con forme al tiempo puede llegar a indicar su capacidad de almacenar carga, de manera similar a cómo funcionan los capacitores eléctricos.

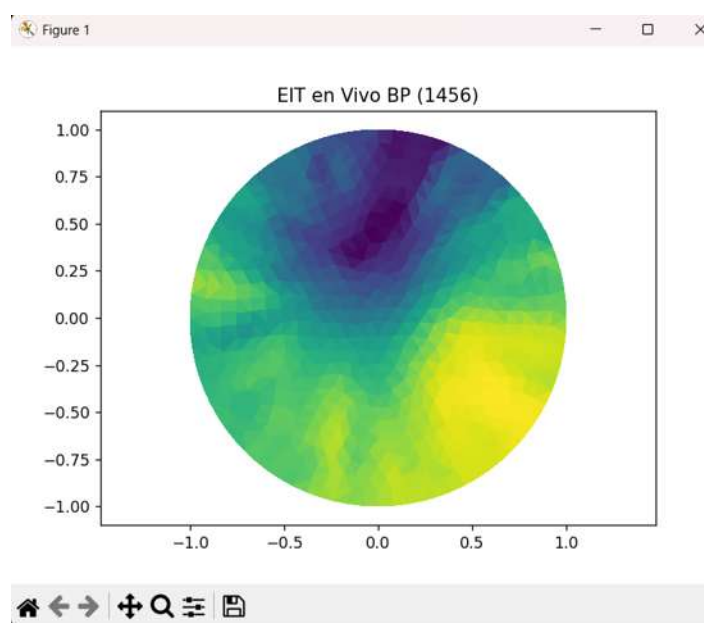


Figura 87. Reconstrucción BP, sin interferencia en el compuesto.

Pasando a la parte de probar la funcionalidad del material compuesto al aplicar una presión sobre su superficie, la Figura 88, muestra los resultados de la aplicación de una fuerza externa sobre el lado derecho de la superficie.

Además, por pruebas con el agua, se ha observado que, al interferir en el medio, ya sea en el agua al insertar un objeto no conductor o en el material compuesto al aplicar una fuerza externa, este ruido desaparece en cierta cantidad al dar una prioridad sobre la mayor variación del medio de medición. Entonces de esta manera es la razón por la que se alcanzan a apreciar mejores imágenes reconstruidas.

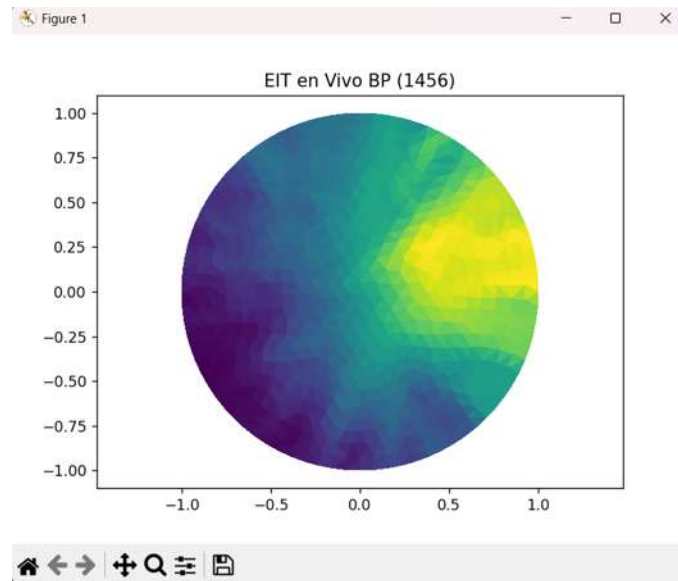


Figura 88. Reconstrucción BP, presionando arriba a la derecha.

Para continuar con las pruebas, se continuo con la presión del material en una zona de más abajo a la derecha mostrando su capacidad de respuesta como se observa en la Figura 89. Esta figura, además muestra más del ruido típico, que se ha estado viendo de gran manera sobre el material.

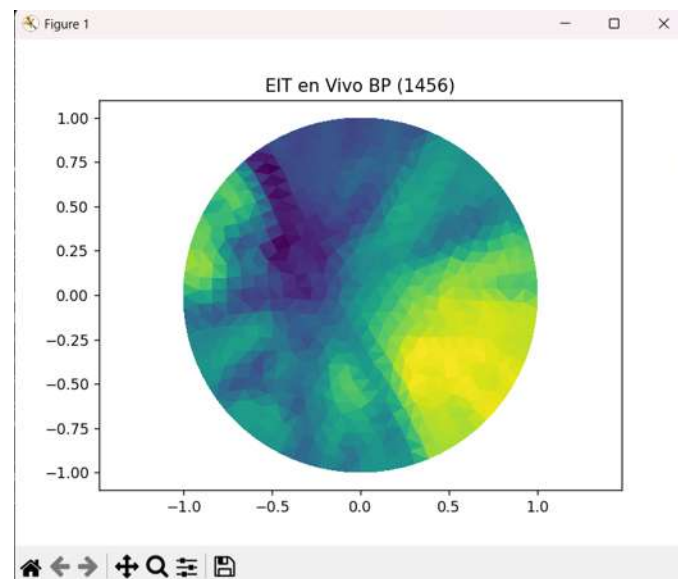


Figura 89 Reconstrucción BP, presionando abajo a la derecha

Si bien se conocía con las pruebas sobre el agua que el BP, funciona de mejor manera cercano a las orillas, se intentó aplicar la fuerza externa en el centro del material, como se muestra en la Figura 90. Si bien, en el agua no daba los mejores resultados, en el caso del material se alcanzaron a notar los cambios referentes a la zona de aplicación de la fuerza incluyendo la zona más complicada que es el centro. En esta se muestra de buena manera el aumento del brillo en el centro, siendo el caso contrario a la Figura 87, donde mostraba el centro con una zona oscura.

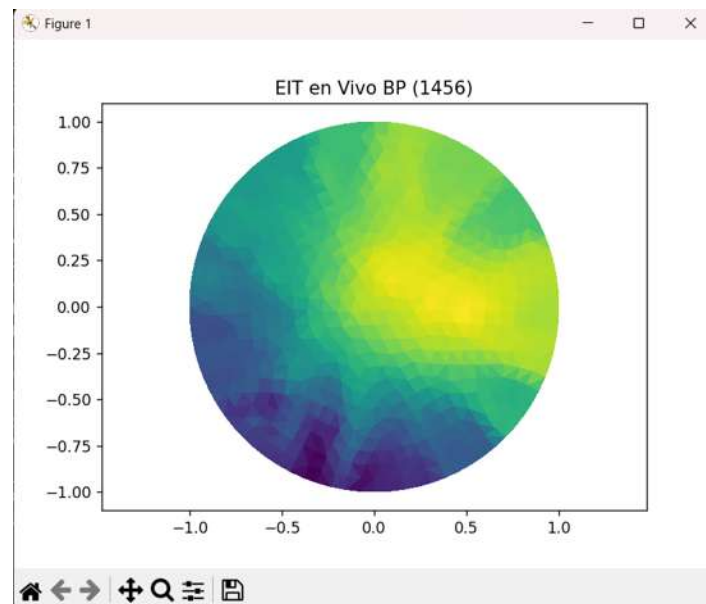


Figura 90. Reconstrucción BP, presionando el centro.

Gauss-Newton

Si bien se vio con anterioridad que el método de GN presentaba los mejores resultados en el agua, mostrando imágenes reconstruidas de gran precisión, en el caso del material compuesto tiene sus complicaciones. De igual manera, como el método de BP demostró, el material muestra una gran cantidad de ruido, lo que dificulta mucho la correcta toma de los datos. Y en el caso de GN que suele ser más preciso, este ruido afecta de una mayor manera que el en el caso del BP que es menos preciso. Esto traducido en las imágenes reconstruidas se muestra en la Figura 91, donde a pesar de no tener el material una interferencia externa, este repite lo mencionado en el BP, de estar variando constantemente, y aparecen tres puntos rojos de gran intensidad.

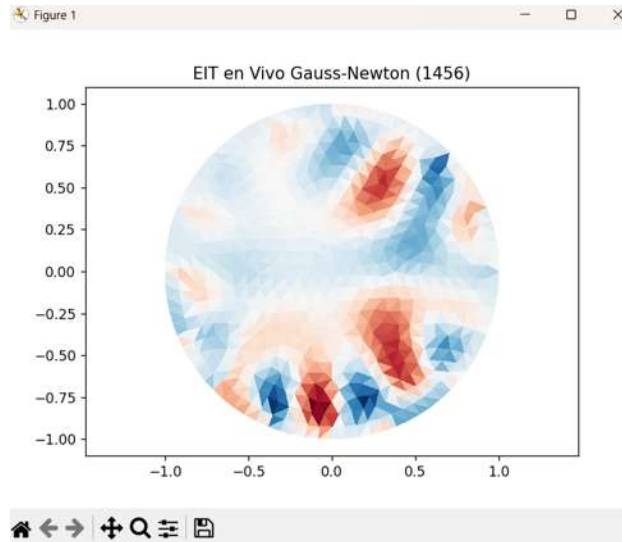


Figura 91. Reconstrucción GN, sin interferencia en el compuesto.

Si bien se ha visto que la interferencia en el medio suele disminuir el ruido, en este caso no es la excepción. Sin embargo, al tener un ruido inicial más raro que en las otras pruebas, estas imágenes reconstruidas son más difíciles de entender. Por ejemplo, en la Figura 92, se aplicó una fuerza externa en la zona de la derecha, y si bien en la imagen se muestra un punto rojo intenso, la zona de aplicación fue ligeramente más abajo. Aun así, mantuvo una predominancia de rojo en zonas diferentes, sin interferencia, y mostro una zona azul oscuro donde se está aplicando la fuerza.

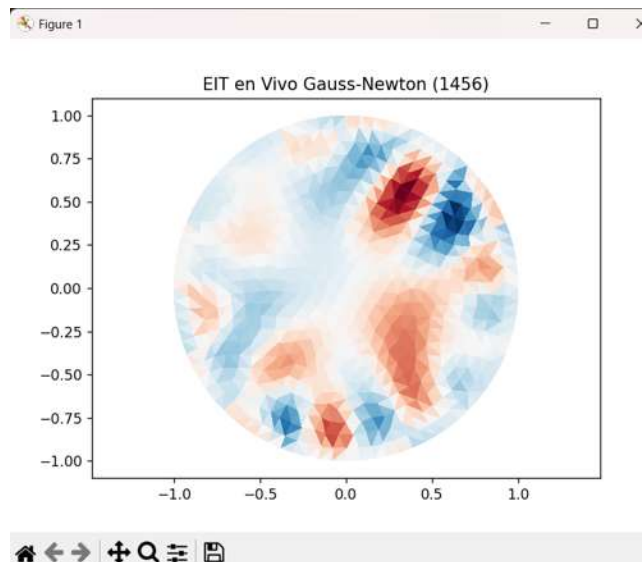


Figura 92. Reconstrucción GN, presionando arriba a la derecha.

De igual manera que el BP, se cambió la zona de la aplicación de la fuerza, a una zona más abajo, donde se muestra ligeramente mejor en la imagen de la Figura 93, donde está el punto rojo intenso. Aun así, en el resto de la muestra, existe una gran cantidad de variaciones de color rojo y azul referentes al ruido.

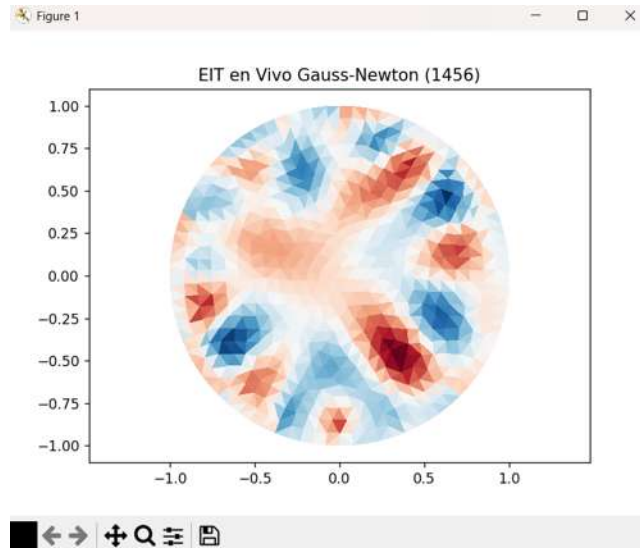


Figura 93. Reconstrucción GN, presionando abajo a la derecha.

Finalmente, como se conocía con anterioridad, la zona del centro suele representar la zona más caótica al estar lejos de los electrodos. En la Figura 94, se probó con la aplicación de la fuerza externa sobre el centro de la muestra del material compuesto, y como se puede observar, existe un punto rojo intenso de gran tamaño, que, aunque no está específicamente en el centro, representa a la zona de presión.

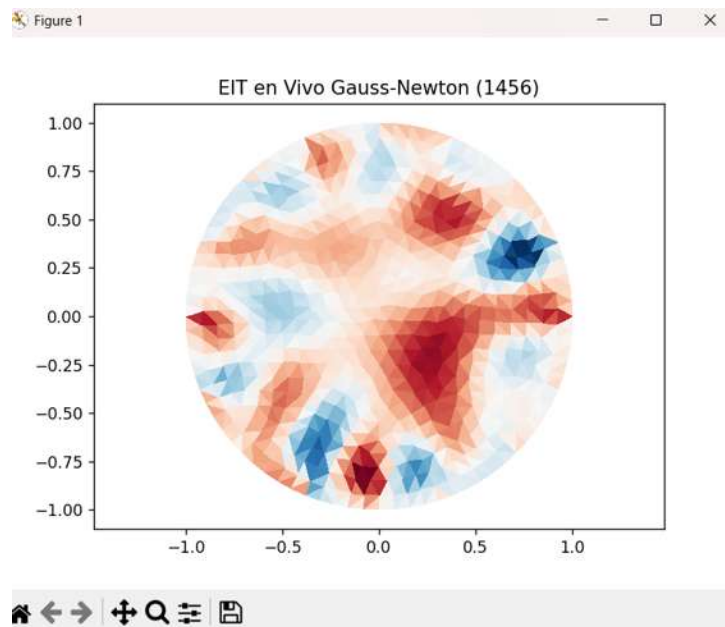


Figura 94. Reconstrucción GN, presionando el centro.

Si bien existe el factor ruido, estos resultados han mostrado una buena capacidad adaptativa del material compuesto con las técnicas de electrónica de precisión referentes a las técnicas de EIT.

Pruebas de reconocimiento de figuras-texturas

Como resultados finales se probó el uso de diferentes formas de plástico (material no conductor), utilizando al agua como medio de medición. Esto debido a que el material aun presenta variables desconocidas que se encuentran en estudio, así como la presencia de un mayor ruido en las mediciones en comparación con el agua.

En este contexto, al demostrar su capacidad para determinar las formas en el agua, significaría que existen buenas probabilidades de que funcione igualmente sobre el material en un futuro, ya que el hardware funciona para ambos y estos trabajan bajo el mismo principio.

Primero se muestran los resultados para una figura triangular, esta fue introducida en el agua cerca del centro. En la Figura 95 primeramente se muestra la figura de plástico introducida, y a continuación se muestra la figura reconstruida. Los resultados muestran una buena reconstrucción del triángulo sobre el medio. Si bien este aun presenta ruido, se ha visto que el dispositivo es capaz de determinar que es una figura triangular, cumpliendo con el objetivo del reconocimiento.

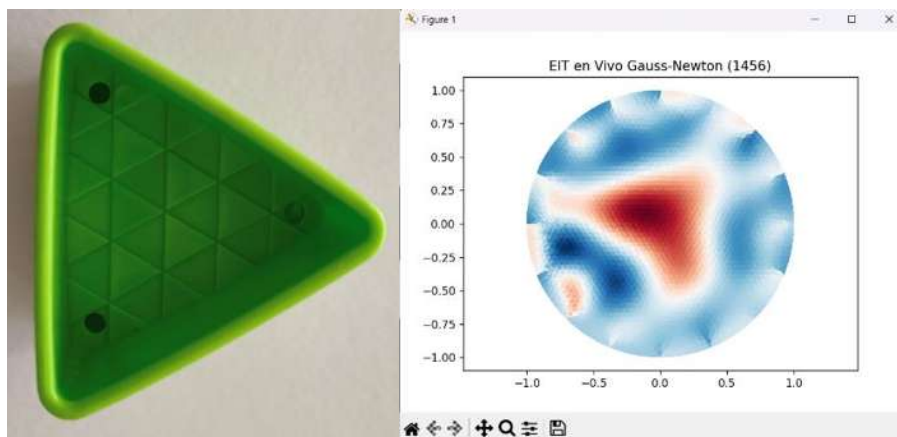


Figura 95. Figura de plástico "Triangulo", con sus imágenes reconstruidas por EIT en agua.

La siguiente figura a probar fue una figura circular, la cual de igual manera se introdujo al agua. Esta figura de plástico no conductor se aprecia en la primera parte de la Figura 97, donde a continuación se muestra su imagen reconstruida por EIT. Como se observa, esta técnica de medición también mostro que se es capaz de reconstruir una imagen decente y suficientemente reconocible, siendo la segunda de exitosa de estas pruebas.

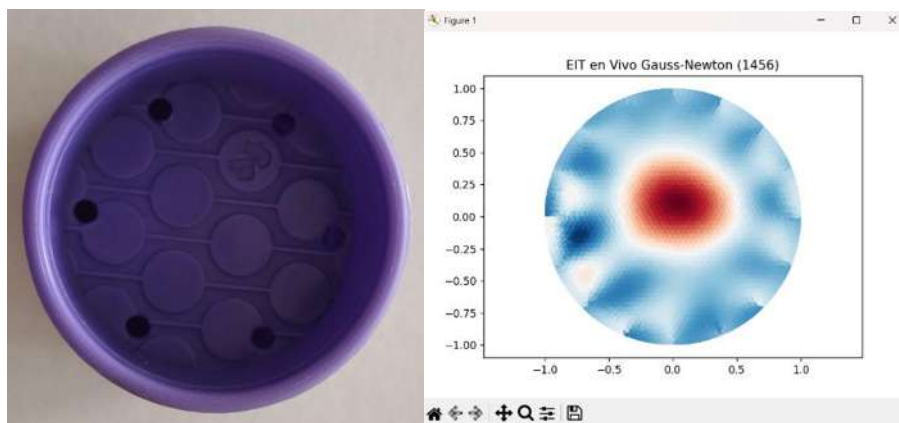


Figura 96. Figura de plástico "Circulo", con sus imágenes reconstruidas por EIT en agua.

La figura final a probar fue una cruz de plástico. Siguiendo el mismo proceso, se introdujo la figura y se procedió a aplicar las técnicas de EIT para la reconstrucción de la imagen. De igual manera se presenta en la Figura 97, la figura de plástico introducida, así como la imagen reconstruida. En este caso, si bien se conocía que los pequeños espacios entre la punta de la cruz no serían bien detectados, hasta cierto punto el dispositivo fue capaz de detectar la forma de la figura. Esta figura se ve en la imagen reconstruida como un cuadrado con unas puntas ligeramente mayores. Aun así, esto representa resultados aceptables en el reconocimiento de la figura aplicada.

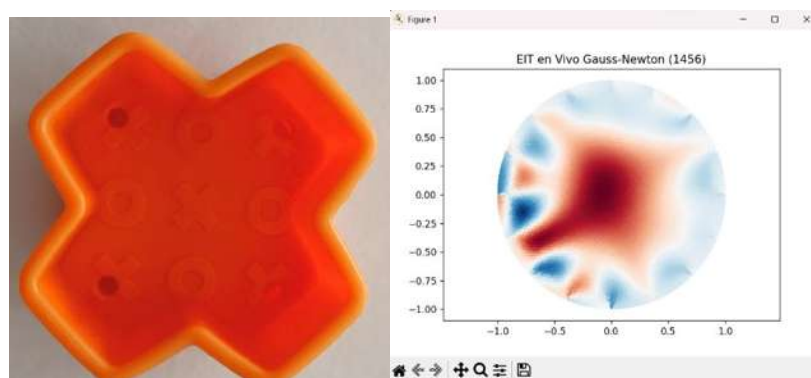


Figura 97. Figura de plástico "Cruz", con sus imágenes reconstruidas por EIT en agua.

Los resultados mostrados por las diferentes figuras demostraron la capacidad del sistema para poder reconocer ciertos patrones mediante pruebas controladas. Esto significa la acertada factibilidad de aplicar estas técnicas para usarse en sensores de texturas-formas. Si bien la definición de texturas puede ser interpretada de diferentes maneras, el reconocimiento de estas figuras de manera macroscópica supondría texturas a gran escala y en algún momento, con una la formulación de un equipo más preciso se podría llegar a aplicar a texturas más pequeñas.

Conclusiones

Un biopolímero no conductor puede llegar a ser conductor por medio de la adición de partículas conductoras de refuerzo en su matriz polimérica.

Se ha determinado la dependencia de la fragilidad y conductividad del compuesto particulado con el porcentaje de grafito añadido al biopolímero.

A mayor porcentaje de partículas de grafito en la matriz polimérica, mayor va a ser su conductividad, así como también incrementa la fragilidad del compuesto.

El uso de otro almidón siempre y cuando sean de características similares para la creación de la película bioplástica no afecta las características principales buscadas para la realización del sensor en cuestión, como es el caso de la conductividad y flexibilidad.

El incremento de glicerol en las muestras provoca un aumento de la flexibilidad de la matriz, y por consiguiente un aumento en la ductilidad del compuesto. Esto a su vez provoca una ligera disminución en la propiedad de conductividad del compuesto. El material idóneo en cuestión busca una relación adecuada Grafito-Glicerol para mantener cierta ductilidad sin sacrificar mucho la conductividad.

El incremento del ácido no tuvo una notable variación en las muestras. siendo un factor que al romper la cadena del almidón crea el biopolímero, para el material compuesto presentado siempre y cuando se mantenga su cantidad necesaria para la polimerización no generara cambios en las características mecánicas o eléctricas.

No todos los métodos de caracterización eléctrica funcionan para todos los materiales. El método de corrientes de Eddy es incapaz de obtener datos de compuestos con baja conductividad y de dimensiones delgadas como son las películas bioplásticas conductoras mencionadas en la tesis. En el caso del potencial termoeléctrico, se considera que su uso en este caso no tiene la suficiente relevancia como la medición por dos puntos, un método tan simple y barato que solo requiere la utilización de un multímetro en la modalidad de óhmetro.

Dominancia del refuerzo: El grafito es el que dicta las propiedades del material.

Sensibilidad de la técnica: El FTIR es sensible a la concentración de grafito, lo cual es bueno, porque sirve para cuantificar, y la matriz es espectroscópicamente "transparente" o queda solapada por la señal del carbono.

Estabilidad: El hecho de que el DRX no cambie según la variación en las concentraciones de los materiales de la matriz y solo dependa la variación del porcentaje de grafito como material de refuerzo significa que el proceso de fabricación (mezclado, secado, etc.) no degrada el grafito, lo cual es un punto positivo para la calidad del sensor.

Con las pruebas de caracterización por DRX se obtuvo el pico característico a 26.5° , de manera similar al grafito.

Un material compuesto a base de una matriz no conductora y dúctil, reforzado con partículas conductoras, cambiará su conductividad conforme su deformación.

La calidad y resolución de la imagen reconstruida en el sensor es determinada por el número de electrodos, la cantidad de mediciones, el material a medir y finalmente las variaciones debidas a la electrónica: fuentes de voltaje, caídas, picos de voltaje, resistencias eléctricas, corriente suministrada y amplificación o no.

Una mejor resolución no siempre es la solución, esto amplifica exponencialmente la complejidad del sistema, así como la carga del procesador y tiempo de obtención de los datos, por lo que se tiene que evaluar la factibilidad de su aumento o reducción.

El uso de las técnicas de EIT son capaces de aplicarse a diferentes medios con muy buenos resultados, manteniendo en cuenta el uso de la variación de resistencia eléctrica. Esto permite su aplicación en medios como el agua o incluso en su aplicación en materiales compuestos y complejos para su aplicación en el uso de sensores inteligentes.

Los resultados mostrados con los métodos de BP y GN, muestran buenas capacidades de aplicación y adaptación de diferentes medios la reconstrucción de imágenes donde se pueden determinar figuras, patrones, formas o texturas. Esto con aplicación de estímulos externos y medidos mediante las técnicas de EIT, han llevado a demostrar que se pueden realizar sensores de texturas por medio de diferentes sistemas que trabajen debido al cambio de la resistencia eléctrica como es el caso de agua o sistemas más complejos como es el uso de materiales compuestos bioplásticos estudiado y desarrollado durante el transcurso del proyecto.

En este contexto, y bajo las técnicas especializadas mostradas se ha podido determinar que se puede diseñar un sensor de texturas mediante materiales compuestos biodegradables capaz de analizar la información de las texturas con técnicas de electrónica de precisión, como es el caso de la tomografía por electro impedancia para su posterior análisis.

Trabajos futuros

Optimización del sistema buscando Incrementar la resolución y exactitud de las reconstrucciones de las Imágenes para la una mejor visualización por medio de:

- Mejoramiento de la síntesis del material compuesto, para obtener una mejora en la morfología, buscando reducir su variabilidad para su mejor aplicación con las técnicas de electrónica de precisión
- Reconstrucción del hardware de medición mediante placas fenólicas reduciendo la cantidad de cables y dando una mejor apariencia, además investigar y añadir elementos que mejoren la adquisición de datos y mejoren el ruido, incluyendo los picos anormales vistos en las gráficas del baseline.
- Variación de los valores introducidos del código, buscando la mejor combinación para mantener una buena relación--tiempo

Productos derivados de la presente tesis.

Cartel “Síntesis y caracterización de un material compuesto biopolímero-grafito”, Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica Aplicada, UMSNH-CA-267, 2024. Véase Anexo 1.

Ponencia “Síntesis y caracterización de un compuesto con matriz polimérica a base de almidón de oryza sativa y grafito”. Congreso Nacional sobre Materiales de Frontera, UNAM Morelia, 2025.

Cartel. “Síntesis de un material compuesto biodegradable para futuras aplicaciones en sensores”, Congreso Multidisciplinario cultural, Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, 2026. Véase Anexo 1.

Bibliografía

- [1] A. Masteller, S. Sankar, H. B. Kim, K. Ding, X. Liu, and A. H. All, "Recent Developments in Prosthesis Sensors, Texture Recognition, and Sensory Stimulation for Upper Limb Prostheses," *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 49, no. 1, pp. 57–74, 2020, doi: 10.1007/s10439-020-02678-8.
- [2] A. Shibata, A. Ikegami, M. Nakauma, and M. Higashimori, "Convolutional Neural Network based Estimation of Gel-like Food Texture by a Robotic Sensing System," *Robotics*, vol. 6, no. 4, 2017, doi: 10.3390/robotics6040037.
- [3] T. S. Ramadoss, Y. Ishii, A. Chinnappan, M. H. Ang, and S. Ramakrishna, "Fabrication of pressure sensor using electrospinning method for robotic tactile sensing application," *Nanomaterials*, vol. 11, no. 5, May 2021, doi: 10.3390/nano11051320.
- [4] S. Chun, Y. Choi, D. I. Suh, G. Y. Bae, S. Hyun, and W. Park, "A tactile sensor using single layer graphene for surface texture recognition," *Nanoscale*, vol. 9, no. 29, pp. 10248–10255, Aug. 2017, doi: 10.1039/c7nr03748a.
- [5] Y. Xin *et al.*, "A biomimetic tactile sensing system based on polyvinylidene fluoride film," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 87, no. 2, Feb. 2016, doi: 10.1063/1.4941736.
- [6] J. Malo, "Spatio-chromatic information available from different neural layers via Gaussianization," *J. Math. Neurosci.*, vol. 10, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1186/s13408-020-00095-8.
- [7] N. Dong, J. A. Prozzi, and F. Ni, "Reconstruction of 3D pavement texture on handling dropouts and spikes using multiple data processing methods," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 2, Jan. 2019, doi: 10.3390/s19020278.
- [8] H. Hu, Y. Han, A. Song, S. Chen, C. Wang, and Z. Wang, "A finger-shaped tactile sensor for fabric surfaces evaluation by 2-dimensional active sliding touch," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 3, pp. 4899–4913, Mar. 2014, doi: 10.3390/s140304899.
- [9] K. Kurşun, F. Güven, and H. Ersoy, "Utilizing Piezo Acoustic Sensors for the Identification of Surface Roughness and Textures," *Sensors*, vol. 22, no. 12, Jun. 2022, doi: 10.3390/s22124381.
- [10] H. Nakamoto, Y. Nagahata, and F. Kobayashi, "A magnetic food texture sensor and comparison of the measurement data of chicken nuggets," *Sensors*, vol. 21, no. 10, May 2021, doi: 10.3390/s21103310.
- [11] S. Yan *et al.*, "Multiwalled Carbon Nanotube/Graphite Powder Film for Wearable Pressure Sensors with High Sensing Performance," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 15, pp. 1–12, 2022, doi: 10.3390/nano12152637.
- [12] F. Visentin, P. Fiorini, and K. Suzuki, "A deformable smart skin for continuous sensing based on electrical impedance tomography," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 11, pp. 1–21, 2016, doi: 10.3390/s16111928.
- [13] N. C. Marcin J. Krasny, Ross Creaven, Ardra Venugopal, Eoghan Dunne, "The Entry-Level Electrical Impedance Tomography (EIT) Device you can Assemble without Soldering!," *Comput. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 21–29, 2007, doi: 10.1109/MCSE.2007.53.

- [14] A. Boyle, "Electrical Impedance Tomography : Tissue Properties to Image Measures," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 64, no. 11, pp. 2494–2504, 2017, doi: 10.1109/TBME.2017.2728323.
- [15] D. Canales Vásquez, "Electrical Impedance Tomography (EIT) Image reconstruction for the Human Forearm," 2016.
- [16] J. Ignacio Ramírez, "Estudio y fabricación de un sensor de vibraciones a partir de materiales compuestos a base de silicona y fibras de carbono," Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2024.
- [17] I. M. Irepan Avilés, "Síntesis y caracterización de un hidrogel a base de almidón de Ipomoea Batatas para su uso en ingeniería tisular," Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2025.
- [18] T. W. F. Smith, and J. Hashemi, *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. México, D.F.: McGRAW-HILL Interamericana Editores, S.A. de C.V., 2006.
- [19] W. D. J. Callister, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Barcelona: Reverté, S. A, 1996.
- [20] Donald R. Askeland, *Ciencia e ingeniería de los materiales*, Tercera ed. México: International Thomson Editores, S. A. de C. V., 2005.
- [21] D. H. Andy Adler, *Electrical Impedance Tomography. Methods, History and Applications*, vol. 11, no. 1. 2022. [Online]. Available: http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- [22] L. M. Perales Gómez, "Cementos ternarios metacaolín-caliza-cemento pórtland; estudio del efecto de proporción de materiales, carbonato alcalino y temperatura," Instituto tecnológico de saltillo, 2022.
- [23] J. Song, X. Wang, and C. T. Chang, "Preparation and characterization of graphene oxide," *J. Nanomater.*, vol. 2014, pp. 1–5, 2014, doi: 10.1155/2014/276143.
- [24] Fluke Corporation, "Manual de fundamentos de la medición con multímetro digital."
- [25] S. A. Nilsson, J. W., & Riedel, "Electric Circuits. Pearson Education."
- [26] ISO 15549:2019, "Non-destructive testing — Eddy current testing — General principles."
- [27] ASTM E309, "Standard Practice for Eddy Current Examination of Steel Tubular Products."
- [28] D. M. Rowe, "Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. CRC Press."
- [29] F. M. Smits, "Measurement of Sheet Resistivities with the Four-Point Probe. Bell System Technical Journal," 1958.
- [30] K. Instruments, "Low Level Measurements Handbook," vol. 7th Editio, 2025.
- [31] B. Liu *et al.*, "SoftwareX pyEIT : A python based framework for Electrical Impedance Tomography," *SoftwareX*, vol. 7, pp. 304–308, 2018, doi: 10.1016/j.softx.2018.09.005.

Anexos

Anexo 1 Carteles derivados de la tesis.

síntesis y caracterización de un material compuesto biopolímero-grafito.



Síntesis y caracterización de un material compuesto biopolímero-grafito

José Alberto Flores Escobedo, Irupán Avilés Irene Monserrat, Ana Beatriz Martínez Valencia, Luis Arthur Cleary Balderas, Miguel Villagómez Galindo

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Av. Gral. Francisco J. Mujica S/N, 58030, Morelia, Mich., México



Resumen

El presente trabajo de investigación muestra la síntesis de un material compuesto cuya matriz es un biopolímero basado en almidones y los agregados son micropartículas de grafito. Una vez obtenidas las muestras, se realizó la caracterización del compuesto con el propósito de determinar la resistividad eléctrica. Esto con el fin de evaluar su potencial uso en sensores que trabajen por medio de la variabilidad de su conductividad.

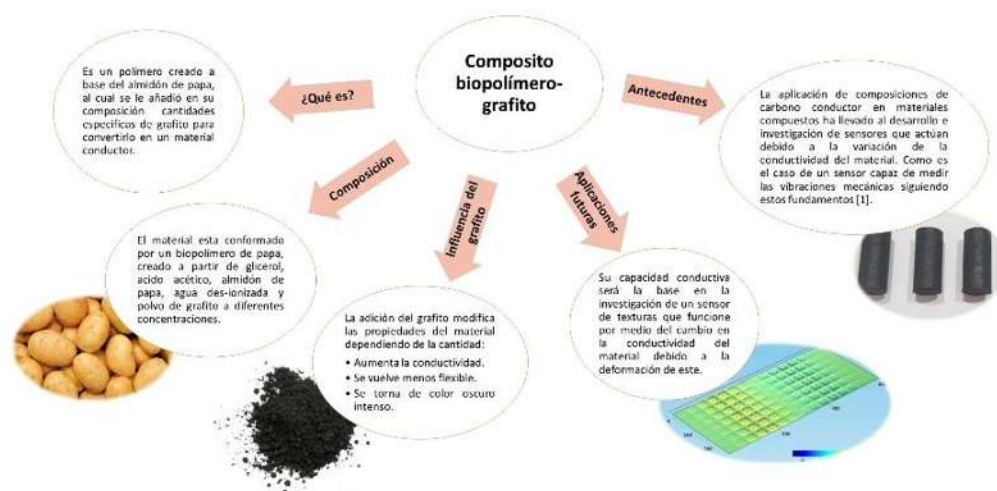


Figura 1.- Mapa mental del Material Compuesto biopolímero-grafito.

Desarrollo experimental y caracterización

Para la fabricación de las películas se utilizaron las concentraciones y procesos estudiados en proyectos de elaboración de películas bioplásticas apoyados por la CIC del cuerpo académico CA-UMSNH-267, añadiendo el polvo de grafito en la fase de gelación del biopolímero para una óptima incorporación en el mezclado.

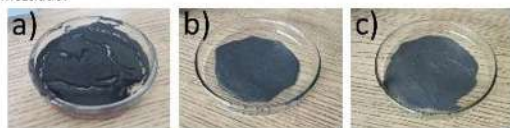


Figura 2.- Composito Biopolímero-grafito a) Relación 10/2.5, b) Relación 10/1, c) Relación 10/0.5

Las pruebas iniciales mostraron que a mayor cantidad de grafito en la mezcla, el compuesto se vuelve más frágil, como se puede observar en la Figura 2 a), donde por cada 10 g de biopolímero se añadió 2.5 g de grafito, provocó que en el proceso de secado la película se fracturara. Lo cual en este caso de estudio provoca problemas ya que se basa en un fenómeno que tiene como fundamento la deflexión, razón por la cual se experimentó con diversas concentraciones de grafito.

Para la caracterización eléctrica se utilizó un multimetro en la modalidad de óhmetro midiendo la resistencia de cada película a diferentes concentraciones.

En la Tabla 1, se muestran los valores obtenidos por medio de la caracterización eléctrica del material. A mayor concentración de grafito, su resistencia eléctrica disminuye, y por consiguiente la conductividad es mayor.

Tabla 1.- Caracterización eléctrica.

Relación polímero-grafito	Medidas de resistencia en ohms a 2cm de separación					Promedio	Desv. Est.	Conductividad (1/ohm)
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5			
10/2.5	80.5	114.4	55.5	90.2	110	90.12	23.85	0.01110
10/1	610	680	870	590	900	730.00	145.77	0.00137
10/0.5	7350	9700	5800	8760	11050	8532.00	2038.23	0.00012

Conclusiones

Con este trabajo se muestra la relación del la conductividad a diferentes concentraciones de grafito, encontrándose que la conductividad eléctrica del compuesto se encuentra en un rango de 0.00012 a 0.01110 1/ohm. Además, se puede concluir que el compuesto obtenido presenta características que indican su potencial uso en el desarrollo de sensores, más específicamente en dispositivos capaces de medir las texturas por medio de la deformación.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por la beca otorgada para la realización de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica-UMSNH. Se agradece además a la Coordinación de Investigación Científica de la UMSNH por su apoyo en los proyectos de investigación.

Bibliografía

- [1] Ramirez, J. I., Tesis: Estudio y fabricación de un sensor de vibraciones a partir de materiales compuestos a base de sílice y fibras de carbono. UMSNH, 2024.
- [2] Chun, S., Choi, Y., Suh, D. I., Bae, G. Y., Hyun, S., & Park, W. A tactile sensor using single layer graphene for surface texture recognition. Nanoscale, vol. 9, núm. 29, pp. 10248–10255, 2017



Síntesis de un material compuesto biodegradable para futuras aplicaciones en sensores.



Universidad
Intercultural
Indígena
de Michoacán

Caminando en la sabiduría



CONGRESO
MULTIDISCIPLINARIO
INTERCULTURAL



Síntesis de un material compuesto biodegradable para futuras aplicaciones en sensores

José Alberto Flores Escobedo¹, Irepan Avilés Irene Monserrat², Ana Beatriz Martínez Valencia, Luis Arthur Cleary Balderas,
Miguel Villagómez Galindo

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 58030, Morelia, Mich., México.

1209695b@umich.mx ; miguel.villagomez@umich.mx



Introducción

Este estudio explora el desarrollo de biopolímeros sostenibles para la industria electrónica mediante la elaboración de un compuesto de almidón de *Oryza sativa* reforzado con grafito. El trabajo se centra en la síntesis y caracterización de esta matriz para obtener un material que combine estabilidad mecánica con una conductividad eléctrica variable.

Resultados

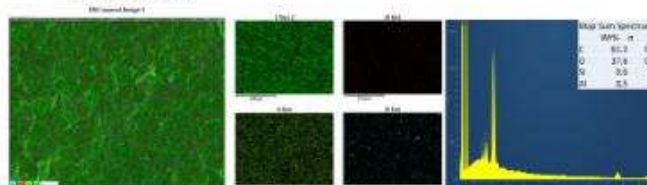


Figura 3. Mapeo de composición del biopolímero de Oryza Sativa 5%Gr 10%Gl.

Experimentación/Metodología



Figura 1. Diagrama de proceso de la síntesis del compuesto.

Objetivo:

Sinterizar y caracterizar un material compuesto particulado conductor, a base de un polímero de almidón de *Oryza sativa* como matriz, y partículas de grafito como refuerzo.

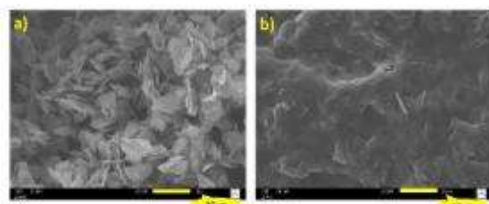


Figura 2. Fotografías MEB del biopolímero de Oryza sativa con grafito a 10 μm a) 5% Gr 7.5% Gl y b) Oryza sativa 5% Gr 10% Gl.

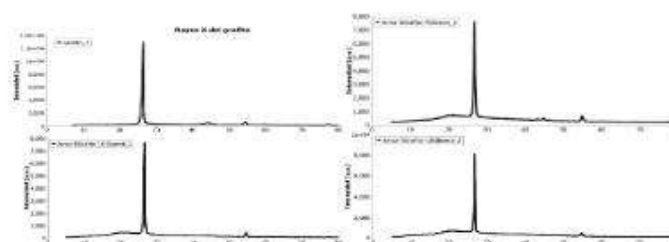


Figura 4. Gráficas de DRX para comparar el grafito contra diferentes muestras del compuesto.

Conclusiones

Los resultados muestran que la incorporación de grafito modifica significativamente la microestructura del biopolímero, generando una distribución particulada que favorece la formación de caminos conductores. Se observó que tanto la cantidad de grafito como la proporción de glicerol influyen de manera determinante en la morfología, la cohesión del material y su respuesta eléctrica. En conjunto, los resultados sugieren que el compuesto sintetizado presenta características físicas y eléctricas que lo convierten en un material factible para aplicaciones electrónicas, particularmente en sensores basados en variación de resistencia.

Bibliografía

- [1] W. D. J. Callister, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Barcelona: Reverté, S. A., 1996.
- [2] I.M. Irepan A., Síntesis y caracterización de un hidrogel a base de almidón *Ipomea batata*. UMSNH, 2025.



Universidad
Intercultural
Indígena
de Michoacán



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



MICHOACÁN ES
MEJOR



Instituto de Educación
Media Superior y Superior
del Estado de Michoacán

Anexo 2 Diagrama de conexiones

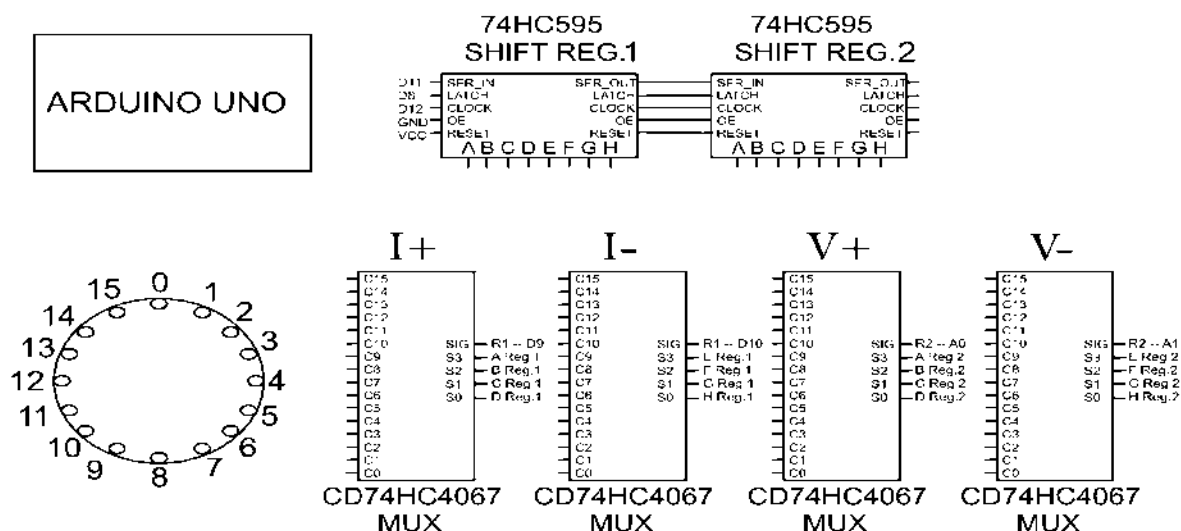


Diagrama de conexiones resumido

MUX CD74HC4067 y SHIFT REG. 74HC595.

MUX I+

- C0...C15 conectado a electrodos
- GND a GND
- VCC a VCC
- EN a GND
- S0 a A del SHIFT REG.1
- S1 a B del SHIFT REG.1
- S2 a C del SHIFT REG.1
- S3 a D del SHIFT REG.1
- SIG a una resistencia de 5100 ohms y de ahí a D9 arduino UNO

MUX I-

- C0...C15 conectado a electrodos
- GND a GND
- VCC a VCC
- EN a GND
- S0 a E del SHIFT REG.1

-S1 a F del SHIFT REG.1

-S2 a G del SHIFT REG.1

-S3 a H del SHIFT REG.1

-SIG a una resistencia de 5100 ohms y de ahí a D10 arduino UNO

MUX V+

-C0...C15 conectado a electrodos

-GND a GND

-VCC a VCC

-EN a GND

-S0 a A del SHIFT REG.2

-S1 a B del SHIFT REG.2

-S2 a C del SHIFT REG.2

-S3 a D del SHIFT REG.2

-SIG a una resistencia de 1000 ohms y de ahí a A0 arduino UNO

-A0 a capacitor de 10 nano faradio y de ahí a GND

MUX V-

-C0...C15 conectado a electrodos

-GND a GND

-VCC a VCC

-EN a GND

-S0 a E del SHIFT REG.2

-S1 a F del SHIFT REG.2

-S2 a G del SHIFT REG.2

-S3 a H del SHIFT REG.2

-SIG a una resistencia de 1000 ohms y de ahí a A1 arduino UNO

-A1 a capacitor de 10 nano faradio y de ahí a GND

SHIFT REG.1

-VCC a VCC

-GND a GND

- Clock a D12 arduino UNO
- L_clock a D8 arduino UNO
- SER_IN a D11 arduino UNO
- SER_OUT a Ser_IN del SHIFT REG.2
- L_clock a L_clock del SHIFT REG.2
- Clock a Clock del SHIFT REG.2
- OE a OE del SHIFT REG.2
- Reset a Reset del SHIFT REG.2
- GND a GND del SHIFT REG.2
- VCC a VCC del SHIFT REG.2

SHIFT REG.2

- OE a GND
- Reset a VCC

Arduino UNO

- VCC de 5V
- GND

Anexo 3 Codigos Utilizados 208 mediciones

Arduino

```
// EIT_Arduino.ino

// 16 Electrodos - Protocolo Adyacente (208 Mediciones)


const int PIN_SER  = 11;
const int PIN_SRCLK = 12;
const int PIN_RCLK  = 8;


const int PIN_SOURCE = 9; // I+
const int PIN_SINK   = 10; // I-
const int PIN_VP     = A0; // V+
const int PIN_VN     = A1; // V-


const int N_EL = 16;


// --- CONTROL DE MODO ---
// true: Muestra datos en el Serial Monitor con texto.
// false: Formato plano (CSV) para comunicarse con Python.
const bool MODO_DEBUG = true;


void setup() {
  Serial.begin(115200);


  pinMode(PIN_SER, OUTPUT);
  pinMode(PIN_SRCLK, OUTPUT);
  pinMode(PIN_RCLK, OUTPUT);
```

```

pinMode(PIN_SOURCE, OUTPUT);
pinMode(PIN_SINK, OUTPUT);

digitalWrite(PIN_SINK, LOW);
digitalWrite(PIN_SOURCE, LOW);
}

void writeSR(uint16_t w) {
    digitalWrite(PIN_RCLK, LOW);
    shiftOut(PIN_SER, PIN_SRCLK, MSBFIRST, highByte(w)); // SR2 (Medición)
    shiftOut(PIN_SER, PIN_SRCLK, MSBFIRST, lowByte(w)); // SR1 (Inyección)
    digitalWrite(PIN_RCLK, HIGH);
}

void setMuxes(int injA, int injB, int measA, int measB) {
    uint16_t word = 0;
    word |= (injA & 0x0F);
    word |= (injB & 0x0F) << 4;
    word |= (measA & 0x0F) << 8;
    word |= (measB & 0x0F) << 12;
    writeSR(word);
}

void loop() {
    if (MODO_DEBUG) {
        Serial.println("--- INICIANDO ESCANEO ---");
        runScan();
        delay(1000); // Esperar 1 segundo para leer en monitor
    }
}

```

```

} else {
    // Esperar comando de Python
    if (Serial.available() > 0) {
        char cmd = Serial.read();
        if (cmd == 'S') {
            runScan();
        }
    }
}

}

// --- Monitor en Arduino ---

bool modoMonitor = true; // true = Texto legible | false = Solo comas para Python

void runScan() {
    for (int i = 0; i < N_EL; i++) {
        int injA = i;
        int injB = (i + 1) % N_EL;

        for (int k = 0; k < 13; k++) {
            int m = (injB + 1 + k) % N_EL;
            int n = (m + 1) % N_EL;

            setMuxes(injA, injB, m, n);
            digitalWrite(PIN_SOURCE, HIGH);
            delayMicroseconds(200);

            float valP = analogRead(PIN_VP);

```

```

float valN = analogRead(PIN_VN);
digitalWrite(PIN_SOURCE, LOW);

float diff = valP - valN; // Diferencial real (con signo)

if (modoMonitor) {
    // Formato para humanos:
    Serial.print("Inyectando: "); Serial.print(injA);
    Serial.print("-"); Serial.print(injB);
    Serial.print(" | Midiendo: "); Serial.print(m);
    Serial.print("-"); Serial.print(n);
    Serial.print(" | Diff: "); Serial.println(diff);
    delay(50); // Pausa pequeña para que alcances a leer
} else {
    // Formato para Python:
    Serial.print(diff);
    if (!(i == 15 && k == 12)) Serial.print(",");
    else Serial.println();
}
}
}
}
}

```

Python baseline

```

# Baseline.py

import serial
import time
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

```

```
PUERTO = 'COM5'
```

```
BAUD = 115200
```

```
MEDICIONES = 20
```

```
def capturar_baseline():
```

```
    ser = serial.Serial(PUERTO, BAUD, timeout=2)
```

```
    time.sleep(3) # Esperar reset
```

```
    ser.reset_input_buffer()
```

```
    print(f"Capturando {MEDICIONES} frames para Baseline...")
```

```
    frames = []
```

```
    for i in range(MEDICIONES):
```

```
        ser.write(b'S')
```

```
        linea = ser.readline().decode('utf-8').strip()
```

```
        if linea:
```

```
            datos = [float(x) for x in linea.split(',') if x]
```

```
            if len(datos) == 208:
```

```
                frames.append(datos)
```

```
                print(f"Frame {i + 1}/{MEDICIONES} capturado.")
```

```
            time.sleep(0.05)
```

```
    ser.close()
```

```
    if frames:
```

```
        baseline = np.mean(frames, axis=0)
```

```

np.save('baseline.npy', baseline)
print("Baseline guardado.")

# Graficar perfil
plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(baseline, marker='o', markersize=3, linestyle='-', color='b')
plt.axhline(0, color='red', linewidth=1)
plt.title("Perfil de Voltajes Diferenciales (Debe cruzar el cero)")
plt.xlabel("Índice de Medición (0-207)")
plt.ylabel("Diferencia (Cuentas ADC)")
plt.grid(True)
plt.show()

if __name__ == "__main__":
    capturar_baseline()

```

Python Back Projection

“”” Este código solo funciona en la versión 3.9 de Python “””

```

# EIT_Back_Projection.py

import serial
import time
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pyeit.eit.protocol as protocol
from pyeit.mesh import create
from pyeit.eit.bp import BP

```

```

PUERTO = 'COM5'
N_EL = 16

p_obj = protocol.create(N_EL, dist_exc=1, step_meas=1, parser_meas="std")
mesh_obj = create(N_EL, h0=0.08)
eit = BP(mesh_obj, p_obj)
eit.setup(weight="none")

f0 = np.load('baseline.npy')

ser = serial.Serial(PUERTO, 115200, timeout=1)
time.sleep(2)
ser.reset_input_buffer()

plt.ion()
fig, ax = plt.subplots()

print("Reconstrucción BP en vivo...")

while True:
    ser.write(b'S')
    line = ser.readline().decode('utf-8').strip()

    if line:
        vals = np.array([float(x) for x in line.split(',') if x])
        if len(vals) == 208:
            # normalize=False para BP suele funcionar mejor si la salinidad no cambia
            ds = eit.solve(vals, f0, normalize=False)

```

```

ax.clear()
ax.tripcolor(mesh_obj.node[:, 0], mesh_obj.node[:, 1], mesh_obj.element,
             np.real(ds), cmap='viridis')
ax.plot(mesh_obj.node[mesh_obj.el_pos, 0], mesh_obj.node[mesh_obj.el_pos, 1],
'ro')

ax.set_title("EIT en Vivo (Backprojection)")
ax.axis('equal')
plt.pause(0.01)

```

Python Gaus Newton

“”” Este código solo funciona en la versión 3.9 de Python “””

EIT_Gauss_Newton.py

import serial

import time

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

import pyeit.eit.protocol as protocol

from pyeit.mesh import create

from pyeit.eit.jac import JAC

PUERTO = 'COM5'

N_EL = 16

p_obj = protocol.create(N_EL, dist_exc=1, step_meas=1, parser_meas="std")

mesh_obj = create(N_EL, h0=0.08)

Inicializar Gauss-Newton (JAC)

eit = JAC(mesh_obj, p_obj)

p=0.5 es el peso de regularización. lamb=0.01 controla qué tan suave es la imagen.

```

eit.setup(p=0.5, lamb=0.01, method="kotre")

f0 = np.load('baseline.npy')

ser = serial.Serial(PUERTO, 115200, timeout=1)
time.sleep(2)
ser.reset_input_buffer()

plt.ion()
fig, ax = plt.subplots()

print("Reconstrucción Gauss-Newton en vivo...")

while True:
    ser.write(b'S')
    line = ser.readline().decode('utf-8').strip()

    if line:
        vals = np.array([float(x) for x in line.split(',') if x])
        if len(vals) == 208:
            ds = eit.solve(vals, f0, normalize=False)

            ax.clear()

            # cmap 'RdBu' (Rojo-Azul) es estándar para GN: Rojo=aislante(plástico),
            Azul=conductor(metal)

            ax.tripcolor(mesh_obj.node[:, 0], mesh_obj.node[:, 1], mesh_obj.element,
                          np.real(ds), cmap='RdBu')

            ax.plot(mesh_obj.node[mesh_obj.el_pos, 0], mesh_obj.node[mesh_obj.el_pos, 1],
                    'ko')

```

```
ax.set_title("EIT en Vivo (Gauss-Newton)")  
ax.axis('equal')  
plt.pause(0.01)
```

Anexo 4 Codigos Utilizados 1456 mediciones

Arduino

```
// EIT_Total_1456.ino  
  
const int PIN_SER = 11;  
const int PIN_SRCLK = 12;  
const int PIN_RCLK = 8;  
const int PIN_SOURCE = 9;  
const int PIN_SINK = 10;  
const int PIN_VP = A0;  
const int PIN_VN = A1;  
  
const int N_EL = 16;  
const bool MODO_DEBUG = false;  
  
void setup() {  
  Serial.begin(115200);  
  pinMode(PIN_SER, OUTPUT);  
  pinMode(PIN_SRCLK, OUTPUT);  
  pinMode(PIN_RCLK, OUTPUT);  
  pinMode(PIN_SOURCE, OUTPUT);  
  pinMode(PIN_SINK, OUTPUT);  
  digitalWrite(PIN_SINK, LOW);  
}
```

```

void writeSR(uint16_t w) {
    digitalWrite(PIN_RCLK, LOW);
    shiftOut(PIN_SER, PIN_SRCLK, MSBFIRST, highByte(w));
    shiftOut(PIN_SER, PIN_SRCLK, MSBFIRST, lowByte(w));
    digitalWrite(PIN_RCLK, HIGH);
}

void setMuxes(int injA, int injB, int measA, int measB) {
    uint16_t word = (injA & 0x0F) | ((injB & 0x0F) << 4) | ((measA & 0x0F) << 8) | ((measB
    & 0x0F) << 12);
    writeSR(word);
}

void loop() {
    if (Serial.available() > 0) {
        if (Serial.read() == 'S') runScan();
    }
}

void runScan() {
    for (int i = 0; i < N_EL; i++) {
        int injA = i;
        int injB = (i + 1) % N_EL;

        // PyEIT parser_meas="all" recorre todos los electrodos
        // en orden ascendente para m y n, saltando los de inyección.
        for (int m = 0; m < N_EL; m++) {
            for (int n = m + 1; n < N_EL; n++) {

```

```

// Saltamos si alguno de los de medición es igual a los de inyección
if (m == injA || m == injB || n == injA || n == injB) continue;

setMuxes(injA, injB, m, n);
digitalWrite(PIN_SOURCE, HIGH);
delayMicroseconds(300);

int diff = analogRead(PIN_VP) - analogRead(PIN_VN);
digitalWrite(PIN_SOURCE, LOW);

Serial.print(diff);

// El último dato es cuando i=15, m=13, n=14
if (i == 15 && m == 13 && n == 14) Serial.println();
else Serial.print(",");
}
}
}
}

```

Python baseline

1_Baseline_1456.py

```

import serial, time
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.signal import medfilt # Filtro de media

```

PUERTO = 'COM5'

N_MEDS = 1456

```

ser = serial.Serial(PUERTO, 115200, timeout=5)
time.sleep(2)
frames = []

print("Capturando Baseline de 1456 puntos...")
for i in range(10):
    ser.write(b'S')
    line = ser.readline().decode('utf-8').strip()
    if line:
        data = [float(x) for x in line.split(',') if x]
        if len(data) == N_MEDS:
            data_filtrada = medfilt(data, 3) #Filtro de media
            frames.append(data_filtrada) #Se cambio de data a data_filtrada para el filtro
            print(f"Frame {i+1} OK")

if frames:
    avg_baseline = np.mean(frames, axis=0)
    np.save('baseline_1456.npy', avg_baseline)
    plt.plot(avg_baseline)
    plt.title("Baseline Total (1456 puntos)")
    plt.show()
ser.close()

```

Python Back Projection

“”” Este código solo funciona en la versión 3.9 de Python “””

EIT_Back_Projection_1456.py

import serial

```

import time

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

import pyeit.eit.protocol as protocol

from pyeit.mesh import create

from pyeit.eit.bp import BP


PUERTO = 'COM5'

N_EL = 16


# 1. Crear Malla
mesh_obj = create(N_EL, h0=0.08)


# 2. CONSTRUCTOR PERFECTO DE PROTOCOLO 1456
def crear_protocolo_1456(n_el=16):
    ex_mat = []
    meas_mat = []
    keep_ba = []

    for i in range(n_el):
        injA = i
        injB = (i + 1) % n_el
        ex_mat.append([injA, injB])

    meas_exc = [] # Mediciones por inyección (91 pares)
    for m in range(n_el):
        if m == injA or m == injB: continue

```

```

        for n in range(m + 1, n_el):
            if n == injA or n == injB: continue
            meas_exc.append([m, n])
            keep_ba.append(True)
        meas_mat.append(meas_exc)

# Convertimos a los tipos y formas exactas que exige tu PyEITProtocol
return np.array(ex_mat), np.array(meas_mat), np.array(keep_ba, dtype=bool)

# Generamos matrices y creamos el objeto inyectando variables por su nombre real
ex_m, meas_m, keep_b = crear_protocolo_1456(N_EL)
p_obj = protocol.PyEITProtocol(ex_mat=ex_m, meas_mat=meas_m, keep_ba=keep_b)

# 3. Configurar BP
eit = BP(mesh_obj, p_obj)
eit.setup(weight="none")

# 4. Cargar Baseline
f0 = np.load('baseline_1456.npy')

# 5. Loop principal
ser = serial.Serial(PUERTO, 115200, timeout=1)
time.sleep(2)
ser.reset_input_buffer()

plt.ion()
fig, ax = plt.subplots()

```

```
print("EIT en Vivo BP (1456 puntos)...")
```

```
while True:
```

```
    ser.write(b'S')
```

```
    line = ser.readline().decode('utf-8').strip()
```

```
    if line:
```

```
        try:
```

```
            vals = np.array([float(x) for x in line.split(',') if x])
```

```
            if len(vals) == 1456:
```

```
                vals_filtrados = medfilt(vals, 9) #Filtro de media
```

```
                ds = eit.solve(vals_filtrados, f0, normalize=False) ##Se cambio vals por  
vals_filtrados, para el filtro de media
```

```
                ax.clear()
```

```
                ax.tripcolor(mesh_obj.node[:, 0], mesh_obj.node[:, 1], mesh_obj.element,
```

```
                             np.real(ds), cmap='viridis')
```

```
                ax.set_title("EIT en Vivo BP (1456)")
```

```
                ax.axis('equal')
```

```
                plt.pause(0.01)
```

```
            except Exception as e:
```

```
                print(f"Error procesando datos: {e}")
```

Python Gauss Newton

```
""" Este código solo funciona en la versión 3.9 de Python """
```

```
# EIT_Gauss_Newton_1456.py
```

```
import serial
```

```
import time
```

```
import numpy as np
```

```

import matplotlib.pyplot as plt
import pyeit.eit.protocol as protocol
from pyeit.mesh import create
from pyeit.eit.jac import JAC

PUERTO = 'COM5'

N_EL = 16

# 1. Crear Malla
mesh_obj = create(N_EL, h0=0.08)

# 2. CONSTRUCTOR PERFECTO DE PROTOCOLO 1456
def crear_protocolo_1456(n_el=16):
    ex_mat = []
    meas_mat = []
    keep_ba = []

    for i in range(n_el):
        injA = i
        injB = (i + 1) % n_el
        ex_mat.append([injA, injB])

    meas_exc = []
    for m in range(n_el):
        if m == injA or m == injB: continue
        for n in range(m + 1, n_el):
            if n == injA or n == injB: continue

```

```

        meas_exc.append([m, n])

        keep_ba.append(True)

    meas_mat.append(meas_exc)

return np.array(ex_mat), np.array(meas_mat), np.array(keep_ba, dtype=bool)

ex_m, meas_m, keep_b = crear_protocolo_1456(N_EL)
p_obj = protocol.PyEITProtocol(ex_mat=ex_m, meas_mat=meas_m, keep_ba=keep_b)

# 3. Configurar JAC
eit = JAC(mesh_obj, p_obj)
eit.setup(p=0.5, lamb=0.01, method="kotre")

# 4. Cargar Baseline
f0 = np.load('baseline_1456.npy')
f0[f0 == 0] = 1e-6 # Evitar división por cero

# 5. Loop principal
ser = serial.Serial(PUERTO, 115200, timeout=1)
time.sleep(2)
ser.reset_input_buffer()

plt.ion()
fig, ax = plt.subplots()
print("EIT en Vivo GN (1456 puntos)...")

while True:

```

```

ser.write(b'S')

line = ser.readline().decode('utf-8').strip()

if line:
    try:
        vals = np.array([float(x) for x in line.split(',') if x])
        if len(vals) == 1456:
            vals_filtrados = medfilt(vals, 3) #Filtro de media
            # normalize=False suele ser mejor si el objeto aislado tiene gran contraste
            ds = eit.solve(vals_filtrados, f0, normalize=False) #Se cambio vals por
            vals_filtrados, para el filtro de media

            ax.clear()
            ax.tripcolor(mesh_obj.node[:, 0], mesh_obj.node[:, 1], mesh_obj.element,
                          np.real(ds), cmap='RdBu')
            ax.set_title("EIT en Vivo Gauss-Newton (1456)")
            ax.axis('equal')
            plt.pause(0.01)
    except Exception as e:
        print(f"Error procesando datos: {e}")

```

José Alberto Flores Escobedo

Diseño de un sensor de texturas para aplicaciones en mecatrónica.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:579746594

Fecha de entrega

17 abr 2026, 8:13 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

17 abr 2026, 8:20 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Diseño de un sensor de texturas para aplicaciones en mecatrónica.pdf

Tamaño del archivo

8.1 MB

133 páginas

31.375 palabras

185.014 caracteres

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
85 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica	
Título del trabajo	Diseño de un sensor de texturas para aplicaciones en mecatrónica	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	José Alberto Flores Escobedo	1209695b@umich.mx
Director	Miguel Villagómez Galindo	miguel.villagomez@umich.mx
Codirector	Luis Arthur Cleary Balderas	arthur.cleary@umich.mx
Coordinador del programa	Pablo Genaro Martínez Torres	mae.cs.ingenieria.mecanica@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	José Alberto Flores Escobedo 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán, México, a 16 de abril de 2026