



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Cali

**Facultad de Ingeniería  
y Ciencias**  
Ingeniería Electrónica

TRABAJO DE GRADO

Estudio de tintas conductoras a base de carbono para la  
fabricación de sensores flexibles a bajo costo

Isabella Pizarro Perdomo

*Director*

Dr. Jhonattan De la Roche

*Codirector*

Dr. Juan Manuel Marmolejo

30 de mayo de 2024



Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana para optar al título de Ingeniero Electrónico.

---

Dr. Hernán Camilo Rocha Niño  
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

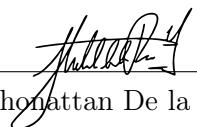
---

Dr. Luis Eduardo Tobón  
Director Carrera Ingeniería Electrónica

---


Dra. Adriana Gomez  
Directora Carrera Ingeniería Mecánica

---



Dr. Jhonattan De la Roche  
Director Trabajo de Grado

---



Dr. Juan Manuel Marmolejo  
Co-Director Trabajo de Grado

---

Dr. Mario Fernando Muñoz Velez  
Jurado

---

Dr. Luis Eduardo Tobon Llano  
Jurado

Santiago de Cali, 28 de mayo de 2024

Señores  
Pontificia Universidad Javeriana – Cali  
Dr. Hernán Camilo Rocha Niño  
Decano  
Facultad de Ingeniería y Ciencias  
Cali

Cordial Saludo.

Por medio de la presente me permito presentarle el Trabajo de Grado titulado “Estudio de tintas conductoras a base de carbono para la fabricación de sensores flexibles a bajo costo”.

Espero que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la materia.

Atentamente,

  
\_\_\_\_\_  
Isabella Pizarro Perdomo

Santiago de Cali, 28 de mayo de 2024

Señores

**Pontificia Universidad Javeriana – Cali**

Dr. Hernán Camilo Rocha Niño

Decano

Facultad de Ingeniería y Ciencias

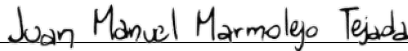
Cali

Cordial Saludo.

Certificamos que el presente Trabajo de Grado titulado “Estudio de tintas conductoras a base de carbono para la fabricación de sensores flexibles a bajo costo”, realizado por Isabella Pizarro Perdomo, estudiante de Ingeniería Electrónica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Jhonattan De la Roche  
Director Trabajo de Grado

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Juan Manuel Marmolejo  
Co-Director Trabajo de Grado

# Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a mi mamá, que siempre estuvo a mi lado apoyándome y dándome fuerzas para seguir adelante, y a mi abuelo, que está en el cielo, que fue mi inspiración para estudiar estas maravillosas carreras.

# Agradecimientos

Agradezco a todos los que hicieron parte de mi proceso académico, a mis profesores por compartir todo su conocimiento, a mis compañeros por siempre estar conmigo en esta etapa y ser una familia, a mi familia que siempre me apoyo en mis sueños, a mi mamá por darme todo lo que siempre necesite para cumplir esta meta y finalmente a Organización Carvajal por apoyarme en mis estudios.

# Resumen

Los sensores flexibles son dispositivos electrónicos que se basan en tintas conductoras aplicadas sobre sustratos como papel o plástico, lo que les permite adaptarse a superficies irregulares y doblarse sin perder funcionalidad. Estas tintas suelen estar compuestas de materiales conductores, como metales o carbono, junto con un aglutinante y un solvente.

Sin embargo, estas tintas suelen ser costosas o difíciles de adquirir, al igual que las técnicas de impresión, que requieren de equipos sofisticados. Dadas esas circunstancias, en el desarrollo de esta investigación se diseñaron unas tintas conductoras a base de carbono para el desarrollo de sensores flexibles a bajo costo haciendo uso de materiales de fácil acceso. Estas tintas se fabricaron a base de grafito en polvo para cerradura y negro de humo, usando barniz vitral como aglutinante. Además, se imprimieron sobre poliéster haciendo uso de la técnica de serigrafía, una de las técnicas más económicas y sencillas de impresión.

Para evaluar las tintas conductoras, se llevaron a cabo diversas pruebas. Se realizaron pruebas eléctricas haciendo uso de la técnica de cuatro puntas para medir su resistividad y de la medición de la resistencia usando un multímetro; se caracterizaron las propiedades de su estructura cristalina y morfológica mediante espectroscopia Raman y microscopia electrónica de barrido (SEM), y se realizó una prueba de adhesión siguiendo la norma ASTM F1842. Adicionalmente, se probó su rendimiento en una aplicación específica, particularmente en un sensor electroquímico, donde se obtuvo resultados dentro de los parámetros de funcionamiento. Finalmente, se validó su funcionamiento comparando los resultados con los obtenidos mediante una tinta comercial, con el objetivo de lograr valores similares y un comportamiento equiparable al de un sensor comercial.

**Palabras Claves:** Sensor flexible, Tintas conductoras, Grafito, Bajo costo, Serigrafía, Electrónica de barrido (SEM), Espectroscopia Raman.

# Abstract

Flexible sensors are electronic devices based on conductive inks applied to substrates such as paper or plastic, allowing them to conform to irregular surfaces and bend without losing functionality. These inks are usually composed of conductive materials, such as metals or carbon, along with a binder and a solvent.

However, these inks are often expensive or difficult to acquire, as are the printing techniques, which require sophisticated equipment. Given these circumstances, in the development of this research, carbon-based conductive inks were designed for the development of low-cost flexible sensors using readily available materials. These inks were manufactured based on graphite lock powder and carbon black, using stained glass varnish as a binder. In addition, they were printed on polyester using the screen printing technique, one of the cheapest and simplest printing techniques.

To evaluate the conductive inks, several tests were carried out. Electrical tests were performed using the four-prong technique to measure their resistivity and resistance measurement using a multimeter; the properties of their crystalline and morphological structure were characterized by Raman spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM), and an adhesion test was performed following the ASTM F1842 standard. Additionally, its performance was tested in a specific application, particularly in an electrochemical sensor, where results were obtained within the operating parameters. Finally, its performance was validated by comparing the results with those obtained with a commercial ink, with the aim of achieving similar values and a behavior comparable to that of a commercial sensor.

**Keywords:** Flexible sensor, Conductive inks, Graphite, Low cost, Screen printing, Scanning Electron Microscopy (SEM), Raman spectroscopy.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Planteamiento del Problema</b>	<b>3</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>5</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>6</b>
4.1. Objetivo General . . . . .	6
4.2. Objetivos Específicos . . . . .	6
<b>5. Marco de referencias</b>	<b>7</b>
5.1. Áreas temáticas . . . . .	7
5.2. Marco Teórico . . . . .	7
5.2.1. Tintas . . . . .	7
5.2.2. Técnicas de impresión . . . . .	8
5.2.3. Sensor Flexible . . . . .	9
5.2.4. Electroquímica . . . . .	10
5.2.5. Técnicas de caracterización de materiales . . . . .	13
5.3. Trabajos Relacionados . . . . .	16
<b>6. Criterios de Diseño</b>	<b>22</b>
<b>7. Metodología</b>	<b>23</b>
7.1. Selección de materiales. . . . .	23
7.1.1. Aglutinante . . . . .	23
7.1.2. Solvente . . . . .	24
7.1.3. Material conductor . . . . .	25
7.2. Composiciones . . . . .	27
7.2.1. Formulaciones . . . . .	27
7.2.2. Proceso de fabricación de tintas . . . . .	28
7.3. Fabricación de moldes . . . . .	30
7.3.1. Molde del electrodo de prueba . . . . .	30
7.3.2. Moldes del electrodo sensor electroquímico . . . . .	31
7.4. Serigrafía . . . . .	32
7.5. Pruebas eléctricas y prueba de adhesión. . . . .	32
7.5.1. Método de cuatro puntas. . . . .	32
7.6. Pruebas de adhesión . . . . .	33
7.7. Caracterización de estructura cristalina y propiedades morfológicas. . . . .	35

7.7.1. Espectroscopia Raman . . . . .	35
7.7.2. Microscopio electrónico de barrido (SEM) . . . . .	36
7.8. Voltametría Cíclica . . . . .	36
<b>8. Resultados</b>	<b>38</b>
8.1. Caracterización de estructura cristalina y propiedades morfológicas de la materia prima.	38
8.2. Pruebas eléctricas . . . . .	40
8.2.1. Resistencia . . . . .	40
8.2.2. Resistividad . . . . .	46
8.3. Resultados prueba adhesión . . . . .	47
8.4. Caracterización de estructura cristalina y propiedades morfológicas de las tintas. . .	48
8.4.1. Espectroscopia Raman . . . . .	48
8.4.2. Microscopio electrónico de barrido (SEM) . . . . .	50
<b>9. Validaciones</b>	<b>52</b>
9.1. Funcionamiento de las tintas en un sensor electroquímico . . . . .	52
9.2. Costos de fabricación . . . . .	53
9.2.1. Costo materiales usados . . . . .	54
9.2.2. Costo de fabricación tinta T6040 . . . . .	54
9.3. Comparación con valores de tintas comerciales . . . . .	55
9.3.1. Resistividad . . . . .	55
9.3.2. Precio . . . . .	56
<b>10. Dificultades</b>	<b>57</b>
<b>11. Conclusiones y Trabajos futuros</b>	<b>58</b>
11.1. Conclusiones . . . . .	58
11.2. Trabajos futuros . . . . .	59
<b>12. Anexos</b>	<b>60</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>63</b>

# Índice de figuras

5.1.	Componentes de una tinta conductora. Modificado de Pradela-Filho [1] . . . . .	8
5.2.	A) Método Inkjet. Tomado de: [2] B) Representación general del método recubrimiento por inmersión. Tomado de: [3] . . . . .	9
5.3.	A) Proceso de impresión, esparciendo la tinta sobre el molde. B) Sensor final. Modificado de: [4] . . . . .	9
5.4.	Comparación de sensores rígidos convencionales y sensores flexibles emergentes. Tomado de Luo [5] . . . . .	10
5.5.	Oxidación y Reducción. Tomado de: [6] . . . . .	11
5.6.	1) Electrodo de trabajo. 2) Electrodo auxiliar. 3) Electrodo de referencia. (Elaboración propia) . . . . .	12
5.7.	1) Pico catódico. 2) Pico anódico. Modificado de:[7] . . . . .	13
5.8.	a) Medición de pico catódico y anódico. b) Medición de potenciales de los picos. . . . .	13
5.9.	Barra conductora de longitud L y sección transversal con área $A = W * t$ sometida a un potencial eléctrico externo. Tomado de:[8] . . . . .	14
5.10.	Ejemplo de una imagen SEM. Tomado de:[1] . . . . .	15
5.11.	Ejemplo de una espectroscopía raman. . . . .	16
5.12.	Fabricación del PE. A) Aplicación de la tinta sobre el sustrato de papel. B) Prueba de conductividad y batería. C) Electrodo construido con dimensiones de 0.51 cm y la conexión eléctrica realizada mediante placa de cobre. Tomado de L.A. Pradela-Filho [9] . . . . .	17
5.13.	Voltamogramas cíclicos de electrodos a base de papel registrado en 1.0 mol L-1KCl. a) ausencia de ferrocianuro. b) presencia de ferrocianuro. Tomado de L.A. Pradela-Filho [9] . . . . .	18
5.14.	A) voltamperometría cíclica B) Imagen SEM. Tomado de Araujo [10] . . . . .	19
5.15.	A) Representación esquemática del proceso de montaje. B) Imagen del electrodo de papel. C) Representación de las dimensiones del electrodo propuesto. (1) Longitud del electrodo y área geométrica del electrodo de trabajo. (2) Imagen del electrodo serigrafiado y el dispositivo doblado que demuestra la flexibilidad del electrodo. Tomado de Janegitz [1] . . . . .	20
5.16.	100 voltamperogramas cíclicos de electrodos de papel preparados con diferentes contenidos de barniz de vidrio (Negro) 20 %; (Rojo) 40 %; (Verde) 50 %; y (Azul) 60 %. Modificado de Pradela-Filho [1] . . . . .	20
5.17.	Voltamogramas cíclicos registrados para el electrodo serigrafiado en PET a diferentes velocidades de barrido. Modificado de Pradela-Filho [1] . . . . .	21
7.1.	A) Esmalte de uñas transparente Marca Admiss. B) Barniz de vitral marca Franco. Tomado de [11] y [12] . . . . .	24

---

7.2. A) Grafito en Polvo para cerraduras. B) Polvo de grafito para dibujo marca Icopel. Tomado de [13] . . . . .	26
7.3. Diseño del molde para lote de electrodos de prueba. . . . .	31
7.4. Diseño para el molde de electrodo para el sensor electroquímico. . . . .	31
7.5. A. Sustrato con el molde antes de la impresión. B. Resultado final de la impresión. . . . .	32
7.6. Representación método de cuatro puntas. Tomado de:[14] . . . . .	33
7.7. Diseño del patrón cortado sobre la tinta. . . . .	34
7.8. Clasificación de los resultados de la prueba de adhesión. Tomado de [15]. . . . .	35
8.1. Espectroscopia Raman del grafito y del negro de humo. . . . .	38
8.2. A) Imagen SEM del negro de humo. B) Imagen SEM del grafito. . . . .	39
8.3. A) Tinta en su estado original con puntos marcados con azul para realizar las mediciones. B) Tinta montada en soporte. . . . .	40
8.4. Tinta T4060 al realizar dobles. Después de los dobles no fue posible medir la resistencia nuevamente. . . . .	41
8.5. A) Tinta T5050. B) Tinta T6040. C) Tinta T7030. D)Tinta T8020. E) Tinta TN6020. F) Tinta TN7015. G) Tinta TN8010. . . . .	42
8.6. Aplicación de la técnica de cuatro puntas. . . . .	44
8.7. Espectroscopia raman de tintas de grafito. . . . .	49
8.8. Espectroscopia raman de tintas combinadas (grafito y negro de humo). . . . .	50
8.9. a) Imagen SEM de tinta T7030. b) Imagen SEM de tinta de negro de humo 70 % barniz y 30 % negro de humo. c)Imagen SEM de tinta TN7015. . . . .	51
9.1. Voltametría cíclica de los sensores fabricados con las tintas T5050, T6040 y TN7015. . . . .	52
12.1. Tinta T5050. . . . .	60
12.2. Tinta T6040. . . . .	60
12.3. Tinta T7030. . . . .	61
12.4. Tinta T8020. . . . .	61
12.5. Tinta TN7015. . . . .	62
12.6. Tinta TN8010. . . . .	62

# Índice de cuadros

5.1. formulación de tintas conductoras para dispositivos electrónicos y electroquímicos. Modificado de J. R. Camargo [16] . . . . .	17
7.1. Proporciones de materiales para la fabricación de las tintas . . . . .	28
7.2. Proporciones de materiales para la fabricación de las tintas compuestas . . . . .	28
7.3. Peso de componentes por lote. . . . .	30
8.1. Resultado de medición de resistencia, promedio y desviación estándar antes y después de la flexión. . . . .	43
8.2. Resultado de medición de resistencia en porcentaje. . . . .	44
8.3. Resultado de medición de resistencia técnica cuatro puntas. . . . .	45
8.4. Valores y resultados de cálculo de resistividad. . . . .	46
8.5. Resultados prueba adhesión. . . . .	47
9.1. Resultados volúmenes cíclicas. . . . .	53
9.2. Resumen evaluación de criterios para reversibilidad. . . . .	53
9.3. Precio de materiales usados . . . . .	54
9.4. Costo de fabricación de la tinta conductora T6040. . . . .	55
9.5. Valores de resistividad de tintas comerciales. Tomados de [17] . . . . .	55
9.6. Precio y tiempos de envíos de tintas comerciales. Tomado de [18] y [19]. . . . .	56

# Introducción

---

Obtener señales de la naturaleza para transformarla en información con el objetivo de ser controlada o monitoreada ha sido y será un factor constante. Lo cual ha traído consigo a lo largo de la historia desarrollos tecnológicos con los cuales, por medio de sistemas integrados, se observa, cuantifica y modifica las variables y los atributos físicos presentes en la naturaleza [20]. Para ello, se hace uso de sistemas, los cuales requieren de un transductor para comunicarse con el mundo exterior donde se pueda acceder a un dato, medir una variable física y realizar una cierta acción [20]. Por lo tanto, la importancia del desarrollo en sensores no solo en la ingeniería, si no en diferentes campos ha sido fundamental para la implementación de diferentes sistemas [21]. Sin embargo, debido a la gran demanda de sensores, la producción de estos dispositivos genera muchos desechos y contaminación, por el uso de diferentes elementos tóxicos como mercurio y plomo, que al no eliminarse de forma correcta pueden producir daños irreparables para el medio ambiente [22][23]. Además, presentan limitaciones en algunas aplicaciones como monitorio médico [24][25] y ambiental [26] debido a su rigidez.

Con el fin de aumentar la versatilidad y dar solución a estos problemas, se han desarrollado sensores flexibles, haciendo uso de tintas conductoras y sustratos que se adapten a la aplicación [27][28]. Los cuales, al igual que los sensores tradicionales, pueden medir y cuantificar señales eléctricas provenientes del entorno. El rápido avance en nuevos materiales [29] [30], procesos de fabricación [31] y detección eléctrica ha contribuido en el desarrollo de estos dispositivos, logrando que tengan propiedades altamente llamativas como alta sensibilidad, bajo peso y que sean ajustables al entorno [28] [32]. Entre estos avances se destacan la fabricación de tintas conductoras a base de carbono [33] [34] y a base de plata y cobre [35]. Estas tienen problemas en países del tercer mundo en cuanto a su importación, altos costos y tiempos de envíos, lo que los hace difícil de adquirir. Por lo tanto, en Colombia es necesario explorar materiales y procedimientos con el fin de obtener tintas de bajo costo, fácil acceso y amigables con el medio ambiente para que, en un futuro cercano, se pueda dar origen a una nueva industria [36].

Con base a lo anterior, en este estudio se tiene como objetivo diseñar una tinta a bajo costo a base de carbono para la fabricación de sensores flexibles. Para ello, como punto de partida, se seleccionan diferentes formulaciones de los principales componentes (Solvente, aglutinante y material conductor) planteadas de documentación, trabajos relacionados y pruebas previas.

Con la ayuda de ensayos eléctricos (resistencia y resistividad), ensayos de adhesión y pruebas de caracterización (Raman y SEM), se excluyeron las formulaciones que no satisfacían los criterios de diseño establecidos. Como resultado, se identificaron tres tintas, las cuales fueron sometidas a

pruebas de impresión y funcionamiento para un sensor electroquímico. La tinta T6040 emergió como la única funcional para la aplicación. Posteriormente, la tinta resultante fue comparada con tintas comerciales en términos de costo de fabricación y resistividad.

# Planteamiento del Problema

---

La electrónica está presente en la mayoría de los aspectos de la vida cotidiana; pero no sería posible sin la implementación de sensores, ya que la capacidad de medir variables del entorno ha permitido muchos de los desarrollos tecnológicos que se tienen hoy en día [37]. Por tal razón, el desarrollo de estos componentes (principalmente a base de silicio) tiene gran influencia en áreas en las cuales se requiere medir variables para llevar a cabo diferentes tareas, tomar decisiones o realizar monitoreo [36]. Lo cual causa un aumento constante en la producción de estos componentes electrónicos debido a su alta demanda, generando gran cantidad de desechos y, por lo tanto, gran cantidad de contaminación, ya que la gran mayoría están compuestos por elementos tóxicos como cobre, mercurio y plomo, que al no ser adecuadamente tratados en su eliminación producen daños irreparables al medio ambiente [22] [23]. Además, al ser rígidos se tiene limitaciones en aplicaciones tales como monitoreo corporal [24] monitoreo ambiental [26], puesto que no pueden adaptarse a diferentes superficies y son más propensos a romperse.

Como alternativa a los sensores a base de silicio, desde el año 1990 se han desarrollado dispositivos de sensado flexibles [27], los cuales han tenido un gran auge debido a su fácil fabricación, bajo costo y flexibilidad (sustrato plástico), permitiendo su uso en aplicaciones como medicina [38] [24], cuidado ambiental [38] [26] y aplicaciones industriales tales como monitoreo en estaciones meteorológicas o la determinación de humedad del suelo en agricultura [39]. Dentro de los sensores flexibles más destacados se encuentran los que están fabricados a base de tintas de carbono, debido a su costo, disponibilidad del material, su buena conductividad eléctrica y su adaptabilidad, ya que se pueden imprimir en cualquier superficie sin importar la geometría [33] [34].

Estos y los demás sensores flexibles, que son fabricados con tintas conductoras de plata o cobre, presentan problemas en países tercermundistas (como Colombia) en cuanto su importación, debido a los tiempos de envío, disponibilidad, restricciones, etc. Aumentando los costos de envío y a su vez encareciendo el desarrollo de dispositivos en el país debido a la dependencia de las importaciones que pueden causar que la economía sea vulnerable. Adicionalmente, en la búsqueda de independencia tecnológica como objetivo clave para sobrevivir en un mundo cada vez más interconectado y también para prosperar de forma autónoma [40], se requiere de conocimiento y una educación basada en la investigación y desarrollo. Este enfoque servirá como el inicio para el surgimiento de nuevas empresas y tecnologías; así mismo contribuirá en el desarrollo económico y social. Ya que hoy, Colombia se limita a la exportación de productos naturales o materia prima, producto de poco valor agregado y que requiere de mucho capital [41].

Por todas estas razones, en Colombia se requiere el desarrollo de base de conocimiento para explorar materiales y procedimientos con el fin de elaborar tintas de bajo costo, fácil acceso y amigables con el medio ambiente para que, en un futuro cercano, se pueda dar origen a una nueva industria [36]. A partir de esto, en el desarrollo de este trabajo se desea estudiar la fabricación de tintas conductoras para el desarrollo de sensores flexibles. Con eso en mente, este proyecto tiene como propósito dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: **¿Como crear una tinta de bajo costo a base de carbono para la fabricación de sensores como alternativa a las tintas comerciales importadas?** Esto con el objetivo de generar plataformas de sensado locales, de fácil fabricación y adquisición. Además, se busca generar un impacto en la institución para que este proyecto sea la base de nuevos desarrollos y de la creación de dispositivos de sensado.

# Justificación

---

Desde la antigüedad, el hombre ha tratado de captar las señales de la naturaleza, tales como las geológicas o biológicas, para transformarlas en información útil que pueda ser analizada. Esta búsqueda ha dado lugar a muchos avances tecnológicos que han permitido el desarrollo de la vida tal como la conocemos hoy. Actualmente, estos sistemas funcionan a través de sistemas integrados que facilitan el seguimiento, cuantificación y manipulación de diversas variables y propiedades físicas presentes en la naturaleza o en diversos procesos [20]. Para lograrlo, es necesario una interfaz con el entorno, que permita el uso de los datos obtenidos. Por lo tanto, el desarrollo de sensores juega un papel fundamental no solo en la tecnología, sino también en muchos campos que son esenciales para la implementación de sistemas en la actualidad [21].

Entre estos desarrollos se encuentra los sensores físicos flexibles [28] los cuales han sido utilizados para desarrollar dispositivos como: sensores de temperatura [42], electroquímicos [43], resistivo [44] que permiten medir y cuantificar señales eléctricas provenientes del entorno. El rápido avance en nuevos materiales, procesos de fabricación y detección eléctrica ha contribuido en el desarrollo de estos dispositivos, logrando que tengan propiedades como transparencia, alta sensibilidad, delgadez, bajo peso, bajo costo, alta flexibilidad y estiramiento [28].

Lo anterior con el fin de combinar la simplicidad y bajo costo con la alta sensibilidad para detectar sustancias o señales sin la necesidad de instrumentación sofisticada [45], pasos de pretratamiento, reactivos y grandes volúmenes de muestras. Lo cual es un beneficio desde el ámbito ambiental y económico [46]. Además, el desarrollo de sensores desechables ha llamado la atención de la comunidad científica por la cantidad de métodos de fabricación sencillos, de bajo costo y producción a gran escala, [31] haciendo uso de materiales tales como grafito, [29] nanotubos de carbono, [30] grafeno [30], los cuales en la actualidad están siendo estudiados para su uso en el desarrollo de sensores. Por esta razón, en países tercermundistas (como Colombia), la industria sensórica, debe fortalecer su investigación en el área de la medición y fabricación de instrumentos, y así apropiarse la tecnología de fabricación e innovar constantemente de acuerdo con las características particulares de nuestro mercado [41]. Este como primer paso para la independencia tecnológica y autonomía económica.

Para contribuir a la adquisición del conocimiento necesario, en este trabajo se diseña una tinta conductora para la fabricación de sensores flexibles. Donde se hace uso de materiales de fácil adquisición y una técnica de impresión simple y económica con el fin de ilustrar de que es posible innovar y desarrollar teniendo presente las condiciones del entorno y así encaminar en la búsqueda de la independencia tecnológica y económica.

# Objetivos

---

## 4.1. Objetivo General

Diseñar una tinta a bajo costo a base de carbono para la fabricación de sensores flexibles.

## 4.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar una metodología de laboratorio para la fabricación de tintas conductoras a base de carbono.
- Evaluar la influencia de los principales componentes (Solvente, aglutinante y material conductor) en las propiedades eléctricas y de adhesión de la tinta mediante la norma ASTM F1842.
- Realizar la caracterización de la estructura cristalina y propiedades morfológicas de las diferentes formulaciones de tintas.

# Marco de referencias

---

## 5.1. Áreas temáticas

Las áreas temáticas del proyecto son:

- Circuitos - Circuitos impresos - Circuitos impresos flexibles.
- Sistemas de montaje - Electrónica flexible.
- Materiales, elementos y componentes - Elementos químicos - Carbón - Grafito

Estas temáticas fueron tomadas del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [47].

## 5.2. Marco Teórico

En el contexto de esta investigación, el marco teórico pretende establecer los límites conceptuales de la temática tratada en esta tesis.

### 5.2.1. Tintas

Las tintas han sido utilizadas por miles de años para escribir y pintar. En un principio, el hombre utilizó óxidos e hidróxidos metálicos para hacer las pinturas rupestres relacionadas con actividades cotidianas [48]. Más adelante, con las primeras civilizaciones, se desarrollaron las pinturas Acuarela, Gouache, Tinta China y Témpera, que junto a nuevos pigmentos sintéticos dieron base a las tintas que se tiene hoy en día [48].

Una tinta se podría definir como una sustancia que contiene algún tipo de partícula que le caracterice. Por lo tanto, se encuentra las más conocidas, que son las tintas con partículas de color o más conocidos como pigmentos, las cuales se utilizan en impresión de documentos [49], textiles [50], cerámicas [51] entre otras aplicaciones. Por otro lado, se encuentran otro tipo de tintas como las conductoras, las cuales se diferencian por tener como partícula característica un material conductor, lo que le brinda propiedades de conductividad. Dichas tintas están conformadas por un material conductor, un aglutinante y un solvente como se muestra en la Figura 5.1.



Figura 5.1: Componentes de una tinta conductora. Modificado de Pradela-Filho [1]

Dentro de los materiales conductores más utilizados y comercializados para la fabricación de tintas conductoras para producción de sensores, se encuentran los metales y el carbono [34] [35]. Los materiales a base carbono son componentes que se consideran excelentes materiales conductores para la fabricación de tintas, que se le puede atribuir a su alta conductividad eléctrica y térmica [52]. Entre los derivados del carbono, el grafito es el material que más se usa en las tintas conductoras, debido a su simplicidad y bajo costo [9].

Mientras que el material conductor da propiedades eléctricas, el agente aglutinante determinará la procesabilidad de la tinta y la adhesión que tendrá al sustrato. Debido a los altos costos, se han planteado aglutinantes alternativos como esmalte de uñas [9] [53], barniz de vidrio [54] entre otros, los cuales están disponibles comercialmente a bajo costo.

### 5.2.2. Técnicas de impresión

Para la fabricación de los componentes con las tintas conductoras se debe implementar alguna técnica de impresión con la cual se pueda traer al mundo físico el diseño planteado. El principio fundamental de todas las técnicas de impresión es el mismo; depositar la cantidad de tinta necesaria al sustrato con un patrón y espesor controlado [55]. Entre todas las técnicas de impresión existentes, las que más destacan son inkjet, dip coating o también conocido como recubrimiento de inmersión y serigrafía.

En la técnica inkjet se hace uso de un cabezal de impresión como se ven en la Figura 5.2.A. La capa impresa queda como resultado del depósito de gotas que se inyectan desde el cabezal, donde está el depósito de tinta transfiriendo, de forma directa pero sin tocar el sustrato y manteniendo el flujo de tinta constante y controlado [56]. Esta técnica se caracteriza por su alta precisión y compatibilidad con diferentes sustratos. Caso contrario a la técnica de recubrimiento por inmersión, la cual designa la deposición de una película líquida mediante la retirada de sustrato del medio de recubrimiento, como se muestra en la Figura 5.2.B inicialmente, se realiza la inmersión del sustrato en la tinta, al retirarlo del líquido de recubrimiento o tinta se forma una película líquida coherente que se consolida mediante el secado y las reacciones químicas que lo acompañan [57]. Sus ventajas

principales son la simplicidad y facilidad de implementación y costos bajos; pero lastimosamente no tiene control sobre los detalles finos de la impresión

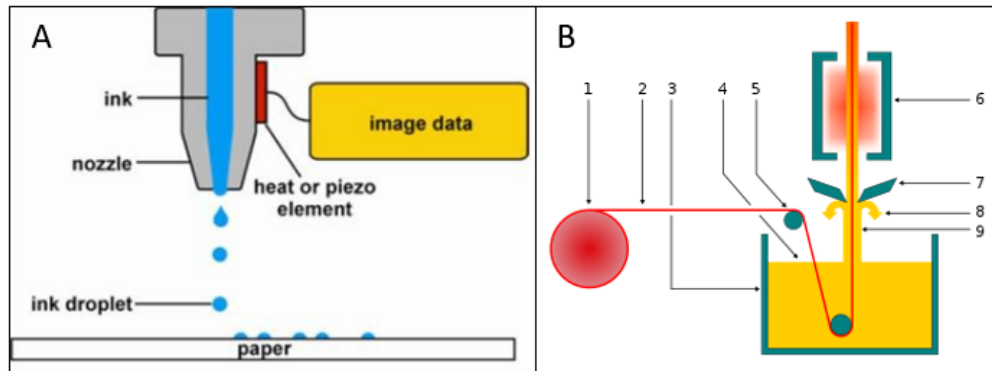


Figura 5.2: A) Método Inkjet. Tomado de: [2] B) Representación general del método recubrimiento por inmersión. Tomado de: [3]

Finalmente, la serigrafía es una técnica que permite la reproducción de una imagen o texto sobre un soporte tantas veces como se quiera. A grandes rasgos, este método consiste en transferir un diseño a través de una malla, denominada pantalla de serigrafía, que deja pasar la tinta por aquellas zonas que no han sido bloqueadas. Además, es uno de los métodos más fácil de implementar y rentable en cuanto a costos [58]. Este se puede ver en la Figura 7.5.



Figura 5.3: A) Proceso de impresión, esparciendo la tinta sobre el molde. B) Sensor final. Modificado de: [4]

### 5.2.3. Sensor Flexible

Los sensores cumplen un papel muy importante, ya que estos traducen el mundo físico a datos que van a ser utilizados para la toma de decisiones. Por lo tanto, es esencial desarrollar sensores que puedan medir datos precisos y confiables sin limitaciones. Lo anterior hace que los sensores flexibles estén bien posicionados para aplicaciones como la medicina [59], la industria de alimentos [60], interacción con equipos [61], entre otras; que tienen requisitos exigentes en cumplimiento mecánico,

densidad y escala de integración, capacidad de fabricación y costo [5]. Según eso, un sensor flexible se define como un dispositivo de medición que, además de detectar y servir como interfaz con su entorno, posibilita la captación de datos en objetos en movimiento o que experimentan cambios de forma. Esto se logra mediante su adaptabilidad a superficies no planas[62].

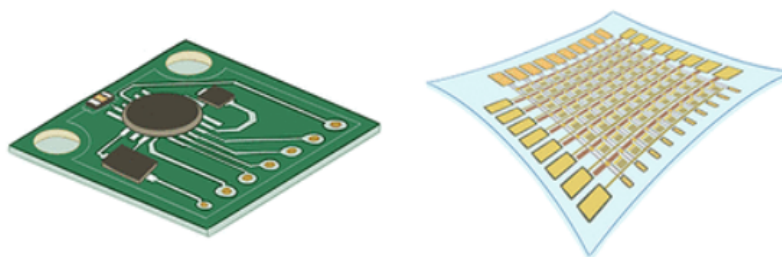


Figura 5.4: Comparación de sensores rígidos convencionales y sensores flexibles emergentes. Tomado de Luo [5]

Así, este dispositivo tiene la habilidad de ajustarse a diversas superficies irregulares o curvas, logrando enrollarse, plegarse, estirarse o adecuarse sin perjudicar su funcionalidad [63] [5]. A lo largo de su desarrollo, los sensores flexibles han experimentado una notoria evolución, alcanzando un punto en el cual pueden abordar un amplio espectro de modalidades de detección de señales, tales como temperatura, tensión, iones y muchas otras [5]. Estos suelen fabricarse con tintas conductoras, a base de diferentes materiales como metales, entre los cuales destaca el cobre y la plata por su alta conductividad y durabilidad. Y, por otro lado, los derivados del carbono, tales como grafeno o grafito [33] por su conductividad, ligereza, flexibilidad, disponibilidad y sostenibilidad; haciendo que estos sean livianos, gracias al uso de factores de película delgada, lo que a su vez facilita la integración, distribución y aplicación [5]. Finalmente, son impresas sobre sustratos como mallas de polímero poroso [64], papel [9] [1] entre otros, que se caracterizan por ser flexibles; mediante diferentes técnicas tales como inkjet, screen printing, escritura directa basada en gotas, entre otras [64].

Algunos de los sensores flexibles que se pueden fabricar haciendo uso de tintas conductoras son: Termistores flexibles, sensores de resistencia térmica, sensores de carga, piezoresistivos flexibles, sensores de tensión, entre otros.

#### 5.2.4. Electroquímica

La electroquímica es una rama de la química que estudia los cambios químicos producidos por la corriente eléctrica y la producción de electricidad mediante la energía de reacciones químicas [65]. En otras palabras, se puede decir que son las reacciones químicas que se dan en la interfase de un conductor eléctrico y un conductor iónico [66]. Estos procesos electroquímicos son reacciones redox, en las cuales, la energía que se libera por una reacción espontánea (reacción que libera energía) se transforma en electricidad o viceversa, donde la electricidad se aprovecha para provocar una reac-

ción no espontánea (reacción que requiere energía) [67]. Las reacciones redox (reducción - oxidación Figura 5.5) son procesos que se caracterizan por el intercambio de electrones. Por lo tanto, cuando una sustancia gana electrones se da la reducción y cuando esta pierde electrones se da la oxidación [68].

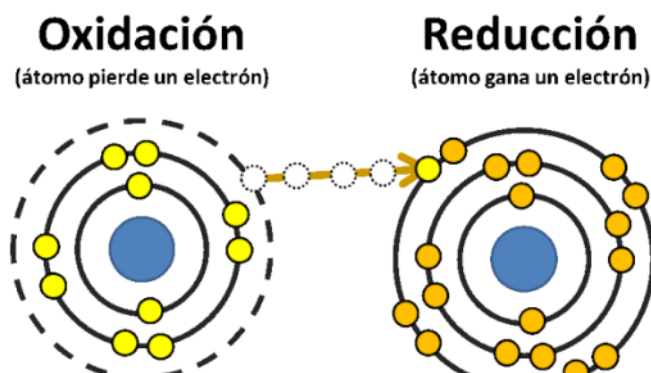


Figura 5.5: Oxidación y Reducción. Tomado de: [6]

Llevando la electroquímica a la aplicación, es común verla presente en sensores electroquímicos, el cual responde a cambios específicos en el potencial o en la corriente eléctrica como consecuencia de la presencia de una especie química que interactúa con él. El transductor electroquímico convierte las reacciones redox producidas en el sensor en un cambio de impedancia [69]. Este se selecciona de tal forma que únicamente interactúa con la especie a analizar [70].

En general, un sensor electroquímico está compuesto por tres electrodos, como se muestra en la Figura 5.6; el primero es el electrodo de trabajo, en el cual, con ayuda de algún elemento bioquímico o biológico, ocurren las reacciones electroquímicas de interés. El segundo electrodo es el auxiliar, el cual se encarga de completar el circuito eléctrico y permite el flujo de corriente entre el electrodo de trabajo y el de referencia. Y el tercer electrodo es el de referencia, el cual aporta un potencial eléctrico conocido y sirve como referencia para medir el potencial en el electrodo de trabajo [71].

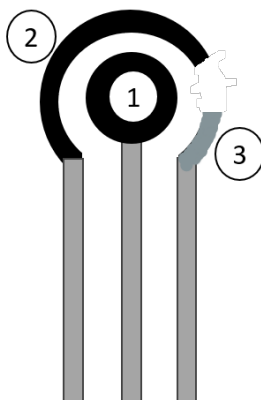


Figura 5.6: 1) Electrodo de trabajo. 2) Electrodo auxiliar. 3) Electrodo de referencia. (Elaboración propia)

Una vez se haya dado la reacción se hace uso de las técnicas electroquímicas, las cuales miden la actividad. Además, se caracterizan por su alta sensibilidad, gran selectividad y precisión [72]. Algunas de las técnicas electroquímicas son la voltametría cíclica y la amperometría [73]. Pero se aplicará la voltametría cíclica debido a su versatilidad para el estudio [7]. Al aplicar esta técnica se espera obtener una gráfica similar a la que se muestra en La Figura 5.7, donde inicialmente, a medida que aumenta el potencial, la corriente crece hasta llegar a un punto máximo llamado pico catódico, el cual indica una reacción de reducción y una ganancia de electrones en el electrodo de trabajo; Alcanzado el pico catódico, la corriente disminuye a medida que el potencial sigue creciendo hasta llegar al potencial máximo. Cuando esto sucede, el sentido del potencial se invierte y la sustancia reducida comienza a oxidarse y a perder electrones, dando como resultado la onda anódica y que la corriente vuelva a su valor inicial [7].

Al obtener la gráfica de la voltametría cíclica, se busca evaluar la reversibilidad de la sustancia a la cual se le aplique; por lo tanto, debe cumplir con los criterios de reversibilidad, los cuales son:

1. Poseer una diferencia entre 50-70 mV entre el potencial de pico anódico y el potencial de pico catódico.
2. Poseer una razón de intensidad de pico ( $I_{pa}/I_{pc}$ ) igual o cercano a 1.

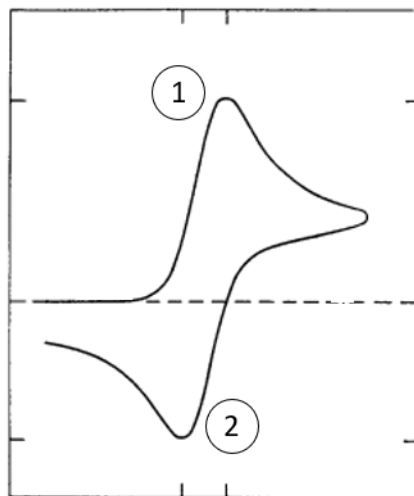


Figura 5.7: 1) Pico catódico. 2) Pico anódico. Modificado de:[7]

Para realizar las mediciones se realiza el procedimiento que se muestra en la Figura 5.8.

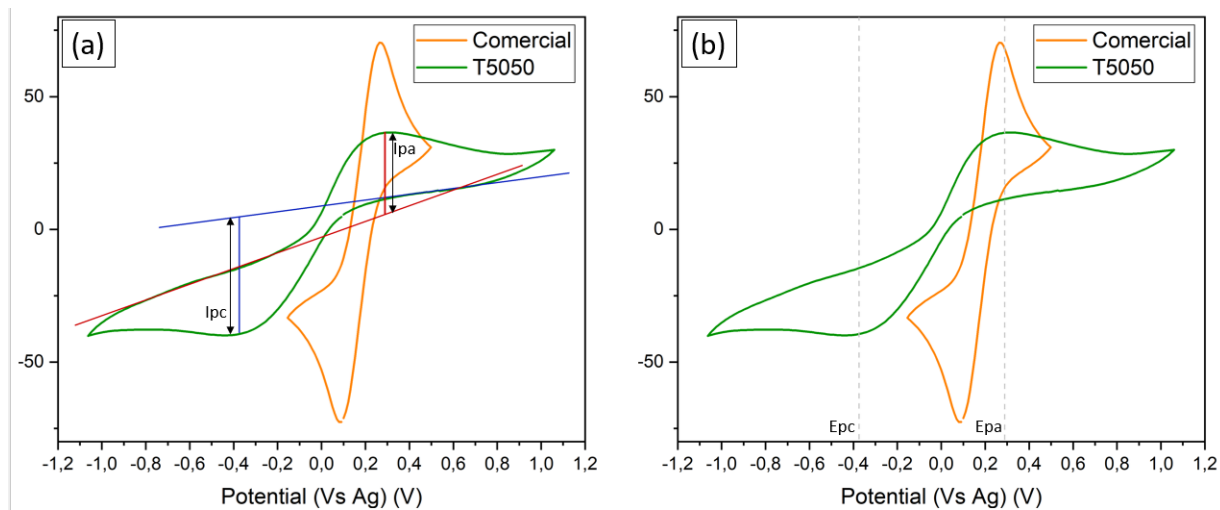


Figura 5.8: a) Medición de pico catódico y anódico. b) Medición de potenciales de los picos.

### 5.2.5. Técnicas de caracterización de materiales

La caracterización de materiales es una herramienta fundamental para asegurar la máxima calidad en materia prima y fabricación de nuevos productos. La caracterización de materiales es un procedimiento mediante el cual se estudian las propiedades morfológicas y funcionales de estos. Con este se pretende conocer la información importante sobre el compuesto que forma el material

o sustancia [74]. Pero hoy en día, uno de los retos más importantes es entender la relación entre la composición inicial o materia prima, la cual puede controlarse, con la estructura resultante [75]. Por lo tanto, a continuación se describen las técnicas de caracterización utilizadas en este estudio.

### 5.2.5.1. Resistividad

La resistividad eléctrica de un material es una propiedad física intrínseca que no depende de su tamaño o forma, que brinda información acerca de cómo se comporta el material al paso de la corriente eléctrica. Se le representa por la letra griega rho ( $\rho$ ) y su unidad es ohm centímetro ( $\Omega.cm$ ) [8]. Por ejemplo, se pasa una corriente eléctrica "I" por una barra como la que se muestra en la Figura 5.9, y el potencial se reduce "V" voltios, la resistencia con valor R" de la barra se podrá calcular haciendo uso de la ley de OHM que se muestra en la Fórmula 5.1.

$$R = \frac{V}{I} \quad (5.1)$$

La resistencia es la característica del tamaño, forma y propiedades de los materiales que componen el circuito u objeto, en este caso la barra de material conductor. Si la barra posee una longitud "L", una sección transversal "A" y una resistencia "R", la resistividad se calcula con la Fórmula 5.2 [76].

$$\rho = R * \frac{A}{L} \quad (5.2)$$

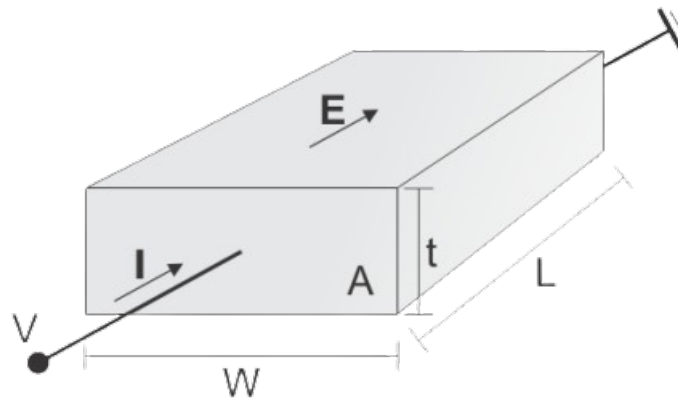


Figura 5.9: Barra conductora de longitud L y sección transversal con área  $A = W * t$  sometida a un potencial eléctrico externo. Tomado de:[8]

En otras palabras, la resistividad eléctrica es una propiedad que describe la capacidad de un material para oponerse al flujo de la energía eléctrica. Si la electricidad puede fluir fácilmente a través del material, este tiene baja resistividad. Si la electricidad tiene gran dificultad de fluir a

través del material, entonces tiene alta resistividad [77].

### 5.2.5.2. Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido (SEM) es una técnica de análisis topográfico, estructura cristalina (estructura y orientación de grano) y composicional, la cual se ha usado en el estudio de temas como semiconductores, nanopartículas, películas delgadas entre otros, por sus posibilidades de resolución, magnificación. En términos generales, el SEM es capaz de tomar una “imagen” de la muestra, pero realmente lo que se detecta es la respuesta del material al impacto de un haz de electrones. Al impactar se produce una serie de señales que ofrece información acerca de la topografía, composición y hasta conductividad eléctrica de la muestra [78].

En la Figura 5.10 se muestra un ejemplo de una imagen SEM de una tinta conductora de carbón.

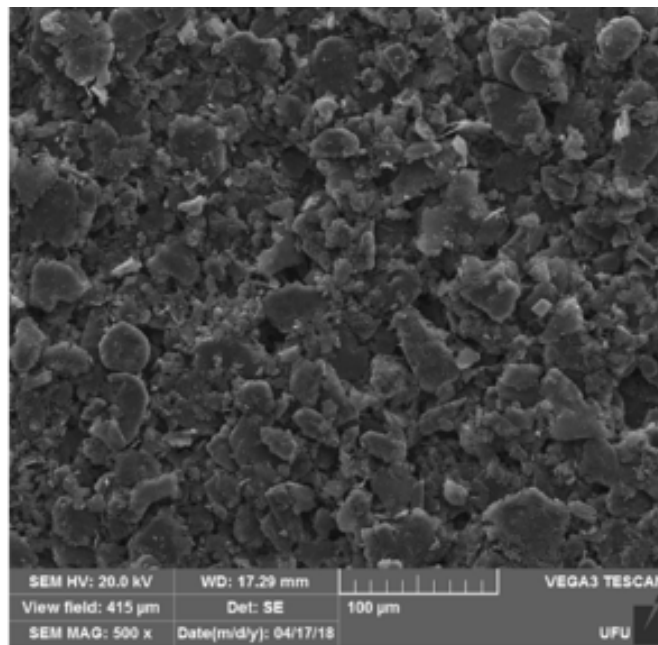


Figura 5.10: Ejemplo de una imagen SEM. Tomado de:[1]

### 5.2.5.3. Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman debido a su versatilidad, su sencillez en la preparación de muestra y la gran cantidad de información que brinda es una de las técnicas de caracterización más utilizada en diferentes aplicaciones[79]. En el caso de la caracterización de semiconductores, las posiciones de la

banda en el espectro medido contienen información sobre la composición del material y la estructura. La capacidad de analizar partículas de tamaño micrométrico, puede proporcionar la información relativa a los contaminantes y las posibles fuentes de contaminación [79].

En la Figura 5.11 se muestra un ejemplo de una espectroscopía raman de grafito para cerraduras.

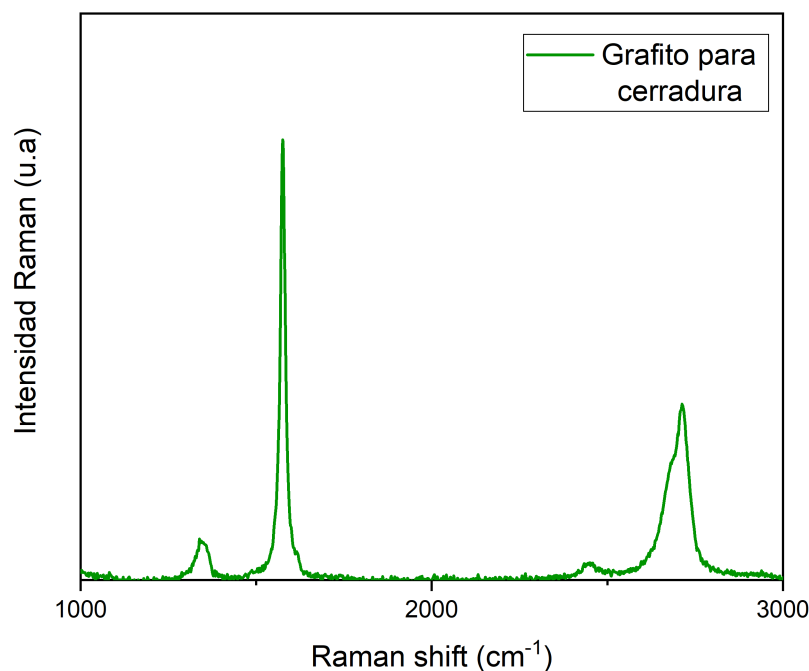


Figura 5.11: Ejemplo de una espectroscopía raman.

### 5.3. Trabajos Relacionados

Una cantidad creciente de investigaciones relacionada con el desarrollo de tintas se basa en la búsqueda de métodos de producción sencillos, baratos, más conservadores en el uso de recursos, producidos en masa y respetuosos con el medio ambiente. Dichas investigaciones se presentan en el Cuadro 5.1 donde se muestran algunas tintas conductoras alternativas, además de sus composiciones, sustratos y aglutinantes, tales como barnices, resinas naturales y compuestos de polímeros naturales.

En este apartado, se presta mucha atención a los materiales conductores, destacando los materiales a base de carbono como el grafito [9] [80] [81], los nanotubos de carbono [82] [83], el negro

de humo[83] y el grafeno[84]. También se analiza la biocompatibilidad de estos materiales, que es esencial para los sensores portátiles. Finalmente, presentan nuevas perspectivas para el desarrollo de sensores y biosensores utilizando tintas conductoras.

Tipo de tinta	Material conductor	Aglutinante	Solvente	Sustrato	Autor
Tinta serigrafía epoxico	Grafito	Epoxico	tolueno yisoforona	Vidrio	H. Cankurtaran [85]
Tinta de pluma carbónica	Grafito	Glicerol	Agua destilada	Fibra de carbon, papel	Siyi Bi [86]
Tinta conductora de carbono a base de barniz de vidrio	Grafito	Barniz de vidrio	Barniz de vidrio	Papel, pet	L.A. Pradela-Filho [9]
Tinta conductora de carbono	Grafito	Esmalte de uñas	Acetona	Papel	Araujo [10]
Tinta roller enzimática	Grafito	Solución de PEG y quitosano (proporción 2:1)	Agua	Alúmina, epidermis y hojas de plantas.	A.J. Bandodkar [87]
Tinta conductora a base de carbono	Grafito en polvo	Esmalte de uñas	Acetato de butilo (composición de esmalte de uñas)	Lámina PET (botella de refresco desechada)	I.A. de Araujo Andreotti [88]

Cuadro 5.1: formulación de tintas conductoras para dispositivos electrónicos y electroquímicos. Modificado de J. R. Camargo [16]

Entre los trabajos recopilados en el Cuadro 5.1, se puede destacar el trabajo desarrollado por Pradela-Filho y colaboradores [9], donde se presenta un procedimiento sencillo y económico para fabricar electrodos a base de papel utilizando papel de oficina, esmalte de uñas y polvo de carbón como se muestra en la Figura 5.12. El dispositivo se fabricó aplicando tinta de carbón conductiva directamente sobre un sustrato de papel igual que Kubota y colaboradores [89] y Lewis y colaboradores [90], con un pincel, como se aprecia en la Figura 5.12(A). El dispositivo propuesto representa un avance interesante en el campo de la fabricación de electrodos porque combina una estabilidad electroquímica y un rendimiento satisfactorio con simplicidad y materiales a bajo precio ampliamente disponibles[91].

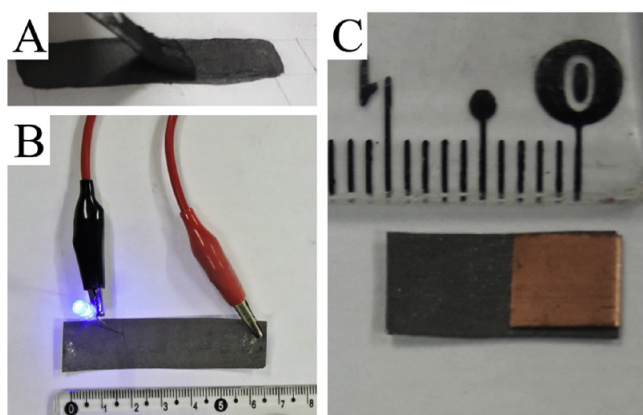


Figura 5.12: Fabricación del PE. A) Aplicación de la tinta sobre el sustrato de papel. B) Prueba de conductividad y batería. C) Electrodo construido con dimensiones de 0.51 cm y la conexión eléctrica realizada mediante placa de cobre. Tomado de L.A. Pradela-Filho [9]

Lo mencionado anteriormente se puede observar en la Voltametría de la Figura 5.13 donde muestra una corriente de fondo baja y no se observó un pico voltamperímetro en ausencia de ferrocianuro 5.13(a), lo que indica que la tinta de carbón presenta una conductividad eléctrica satisfactoria y sus componentes no son electro activo en este rango de potencial. Adicionalmente, se pueden observar picos bien definidos en presencia de ferrocianuro en 5.13(b) indicando que la tinta tiene un gran potencial como material para desarrollar los electrodos a base de papel y ofrece interesantes posibilidades para futuras aplicaciones, principalmente para aquellas que requieren dispositivos pequeños y/o flexibles, como la detección amperométrica en sistemas microfluídicos[92].

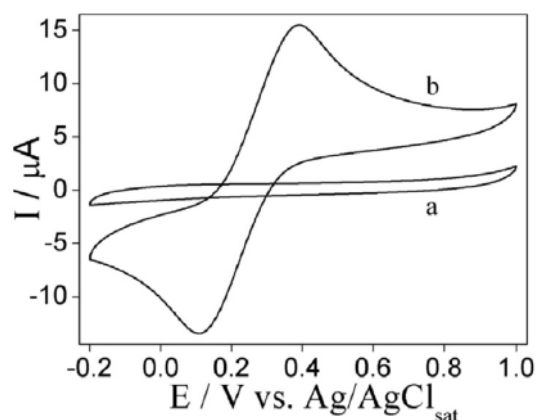


Figura 5.13: Voltamogramas cíclicos de electrodos a base de papel registrado en 1.0 mol L-1KCl. a) ausencia de ferrocianuro. b) presencia de ferrocianuro. Tomado de L.A. Pradela-Filho [9]

Sumado a eso, en el trabajo desarrollado por Araujo y colaboradores [10] se plantea un nuevo método para la detección de tartrazina para la fabricación de dispositivos electroquímicos a base de película de grafito y esmalte de uñas incoloro. La microscopía electrónica de barrido (SEM) de la Figura 5.14(B) muestra que el compuesto tiene una estructura de carbono altamente porosa y la presencia de cavidades en la superficie del sustrato ocasionadas por las láminas de grafito, que causan una morfología irregular, contribuyendo a sitios activos que aumentan el área electro activa.

Por otro lado, en la Figura 5.14(A), se utilizaron voltamperometría cíclica para caracterizar electroquímicamente el material del electrodo. Estas se obtuvieron variando los valores de scan rate de 10 a 200 mV dando como resultado una separación de potencial de pico cercana a  $(59,5 \pm 4,5)$  mV y la relación de corriente de pico de  $0,97 \pm 0,10$  cuando se escaneó a 20 mV. El sensor desarrollado se aplicó al análisis de tartrazina en bebidas deportivas, y el resultado obtenido con el dispositivo se comparó estadísticamente con el método espectrofotométrico, el cual mostró buena compatibilidad y precisión del método propuesto. Con base en estos resultados, se cree que este nuevo método de fabricación de bajo costo de dispositivos electroquímicos desechables puede ser un método alternativo para el análisis de campo de colorantes en bebidas deportivas comerciales y otras aplicaciones relevantes.

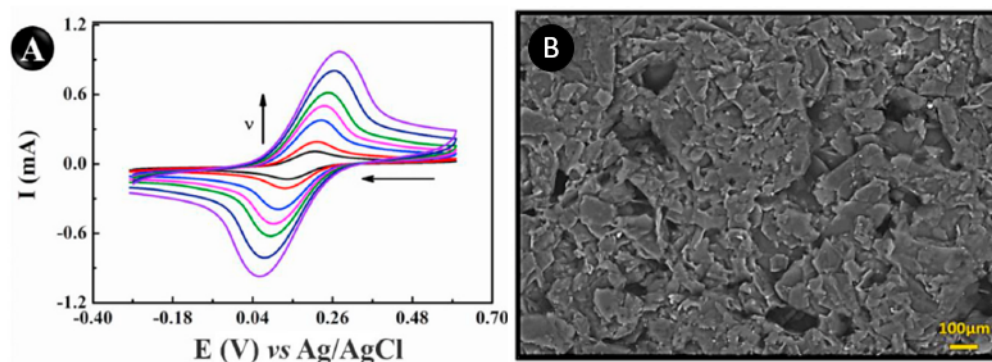


Figura 5.14: A) voltamperometría cíclica B) Imagen SEM. Tomado de Araujo [10]

Finalmente, en el estudio de Janegitz y colaboradores [1], se evaluó las características de las tintas conductoras de carbono formuladas mediante la mezcla de polvo de grafito y de barniz de vidrio, el cual es una resina alquídica ampliamente utilizada como aglutinante para la fabricación de diferentes tipos de tintas debido a que presenta propiedades tales como dureza de película, durabilidad, resistencia a la abrasión, curado auto oxidativo y compatibilidad con diversos polímeros; además de flexibilidad, secado rápido y buena adherencia [93]. En este estudio, para la producción de los sensores electroquímicos desechables, se estudiaron dos procesos (Impresión en papel con pincel en Figura 5.15 (A) e impresión en PET con técnica de serigrafía en Figura 5.15 (B)) y diferentes formulaciones de fabricación de tinta para producir distintos electrodos desechables, cada uno de los cuales proporciona una alta conductividad eléctrica y adhesión sobre sustratos de papel y tereftalato de polietileno (PET).

De acuerdo con eso, para el sensor impreso en papel, se evidencia que la formulación de la tinta afecta de forma significativa el desempeño electroquímico de los electrodos; esto se puede apreciar en las voltametrías cíclicas para las diferentes formulaciones que se muestran en la Figura 5.16. Donde el electrodo de papel con un 60 % de barniz de vidrio se vio pobre en picos de corriente bajos. Este comportamiento indica un electrodo con alta resistencia eléctrica, lo que era de esperarse, considerando la cantidad aglutinante utilizada para prepararlo, que a su vez es un aislante eléctrico. Los electrodos que contenían 20 y 40 % de barniz de vidrio mostraron picos de corriente más altos, pero exhibieron alguna variación en su carga voltamperométrica superior al 10 % después de 100 ciclos de potencial sucesivos, lo que quiere decir que los electrodos fueron menos estables que los otros obtenidos de las demás composiciones. Este comportamiento se atribuye a un efecto de hinchamiento, que aumenta el área electroquímica y, por tanto, la carga voltamperométrica. El efecto de hinchamiento se presenta cuando el sustrato de papel no está cubierto de manera eficiente con la tinta, lo que permite la penetración del electrolito de soporte en el papel por acción de la capilaridad.

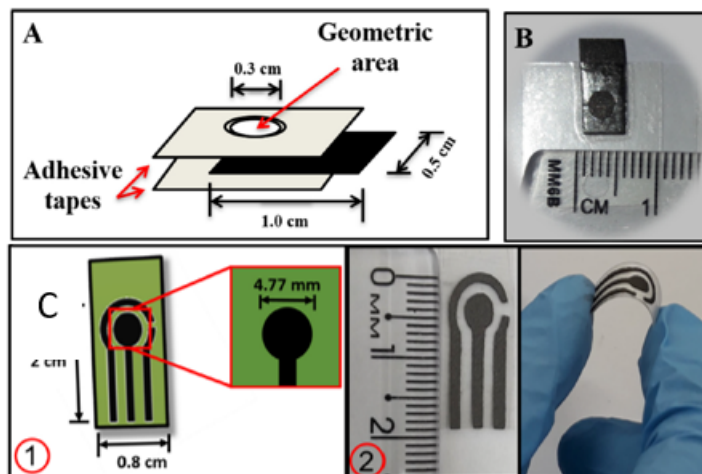


Figura 5.15: A) Representación esquemática del proceso de montaje. B) Imagen del electrodo de papel. C) Representación de las dimensiones del electrodo propuesto. (1) Longitud del electrodo y área geométrica del electrodo de trabajo. (2) Imagen del electrodo serigrafiado y el dispositivo doblado que demuestra la flexibilidad del electrodo. Tomado de Janegitz [1]

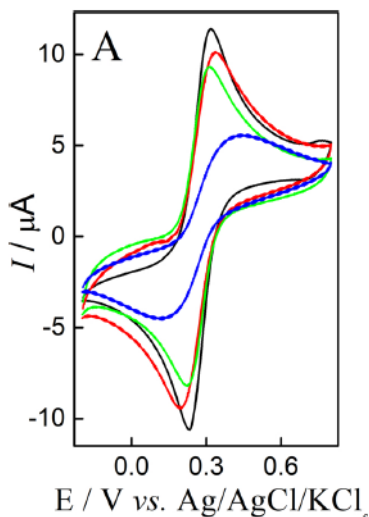


Figura 5.16: 100 voltamperogramas cíclicos de electrodos de papel preparados con diferentes contenidos de barniz de vidrio (Negro) 20%; (Rojo) 40%; (Verde) 50%; y (Azul) 60%. Modificado de Pradela-Filho [1]

Para el sensor impreso en PET, la pendiente del diagrama de los voltamperogramas cíclicos registrados a diferentes velocidades de barrido en presencia de la sonda electroquímica que se puede apreciar en la Figura 5.17, se utilizó para estimar el coeficiente de difusión. El área electroquímica

activa obtenida fue superior a la obtenida para los electrodos de papel, lo que indica que el uso de la doble centrífuga asimétrica promueve una dispersión más eficiente del grafito, dando lugar a una mayor área electroquímica. Ya que el sensor en el papel fue mezclado a mano, mientras que el utilizado en el PET fue centrifugado con 2 ciclos repetidos a 3500 rpm durante 180 s.

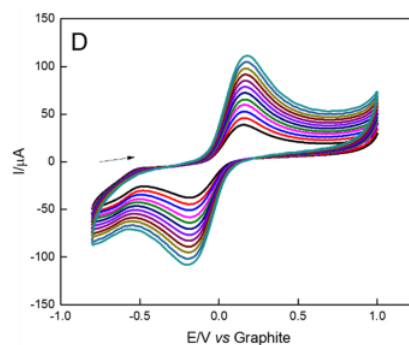


Figura 5.17: Voltamogramas cíclicos registrados para el electrodo serigrafiado en PET a diferentes velocidades de barrido. Modificado de Pradela-Filho [1]

# Criterios de Diseño

---

Teniendo presente la revisión de la documentación y la investigación realizada, se logró establecer unos requerimientos para llevar a cabo la formulación de las tintas.

1. La tinta se debe realizar con materiales de fácil acceso para garantizar que sea de bajo costo.
  - a) El aglutinante debe conseguirse en el mercado local, debe tener un precio accesible y adicionalmente debe ser funcional al fabricar la tinta y brindar buen acabo final.
  - b) El material conductor debe conseguirse localmente, poseer buena conductividad y no se requiere que posea una alta pureza.
2. La técnica que se debe usar para realizar la impresión tanto de las muestras como de los electrodos debe ser fácil de implementar, sin necesidad de equipos robustos, y haciendo uso de materiales de bajo costo.
  - a) La tinta debe tener una consistencia apropiada que permita realizar la impresión sin inconvenientes.
  - b) La tinta al secarse debe presentar un acabado homogéneo y sin grietas.
3. La tinta debe tener reproducibilidad y garantizar que al seguir la formulación se obtendrán tintas similares en cada mezcla.
4. La tinta se debe adherir al sustrato flexible, en este caso poliéster.
  - a) Al doblar la muestra, la tinta no debe despegarse.
  - b) Al doblarse la muestra, la tinta no debe agrietarse.
5. Al realizar las muestras con los moldes estandarizados, su resistencia de punta a punta debe ser menor a  $500 \Omega$ .
  - a) La muestra al doblarse  $90^\circ$  debe mantener una resistencia menor a  $500 \Omega$ .
6. La resistividad de las tintas debe estar entre  $0.05 \text{ ohm-cm}$  y  $0.1 \text{ ohm-cm}$ .

# Metodología

---

## 7.1. Selección de materiales.

En el contexto de la fabricación de tintas conductoras, la apropiada selección de los materiales a utilizar cumple un papel crucial que interfiere directamente con la aplicabilidad y su funcionalidad. Los materiales base para la fabricación de estas tintas conductoras son el aglutinante, el solvente y la partícula conductora, los cuales influyen fuertemente en las propiedades eléctricas y mecánicas de la tinta resultante. Inciden directamente en la conductividad, la adherencia al sustrato y la durabilidad de la impresión final. A continuación, se hablará de los materiales usados para la fabricación de las tintas conductoras.

Para hacer la selección de los materiales, inicialmente se revisó la documentación y los antecedentes, y se hizo una recopilación de estos en el Cuadro 5.1 donde todas las formulaciones tenían en común la partícula conductora, el grafito.

### 7.1.1. Aglutinante

En las tintas conductoras, el aglutinante tiene un papel muy importante, pues da cohesión y estabilizada a la mezcla. Su función principal es unir y adherir las partículas conductoras al sustrato, permitiendo así, que al secarse quede como resultado la impresión, procurando que sea lo más homogénea posible para garantizar conductividad eléctrica. Finalmente, la elección del aglutinante influye en la compatibilidad y afinidad con las diferentes técnicas de impresión, permitiendo tener una aplicación e impresión correcta. [94]

En ese orden de ideas, de la lista de materiales registrada en el Cuadro 5.1, se propusieron para la formulación de las tintas conductoras los siguientes aglutinantes (Ver Figura 7.1):

- Barniz de vitral marca Franco [12].
- Esmalte de uñas transparente Marca Admiss [11].

Se propusieron estos, debido a que en un principio son materiales de fácil acceso, ya que se pueden encontrar en cualquier supermercado, papelería, miscelánea, entre otros establecimientos de comercio a lo largo de todo el territorio. Adicionalmente, no se requiere de permisos para adquirirlos y manejarlos.

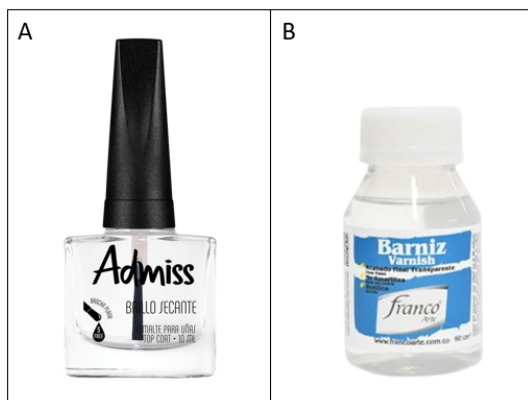


Figura 7.1: A) Esmalte de uñas transparente Marca Admiss. B) Barniz de vitral marca Franco. Tomado de [11] y [12]

Por otro lado, en cuanto a la funcionalidad al momento de la fabricación de las tintas, se pudo evidenciar, al hacer las primeras mezclas con las formulaciones planteadas en la bibliografía, que el barniz de vidrio tuvo mejor comportamiento, ya que no se requería agregar tanto material conductor en comparación al esmalte de uñas para obtener la consistencia deseada de pasta. Además, la adhesión brindada por el barniz de vidrio era mucho más evidente, pues las tintas fabricadas con esmalte de uñas se despegaba al manipular la muestra, levantándose del sustrato y siendo propensa a fracturarse.

En cuanto a los costos, los dos aglutinantes presentas precios igualmente asequibles a la población. Estos se muestran a continuación:

- Barniz de vitral marca Franco con un precio de siete mil setecientos pesos colombianos (7700 COP) por 60 ml y ciento veintinueve pesos colombianos (129 COP) por ml.
- Esmalte de uñas transparente Marca Admiss con un precio de tres mil novecientos cincuenta pesos colombianos (3950 COP) por 10 ml y trescientos noventa y cinco pesos colombianos (395 COP) por ml.

Finalmente, se decidió para la fabricación de las tintas conductoras, trabajar con el Barniz vitral de la marca Franco, ya que este cumple con ser de fácil acceso, tener un valor de igual manera asequible, ser funcional al fabricar las tintas y brindar mejor acabado.

### 7.1.2. Solvente

En las tintas conductoras, el solvente tiene un papel crucial en la formulación y fabricación, ya que permite la disolución de los componentes principales tales como la partícula conductora y el aglutinante. Su función principal es ajustar la consistencia de la mezcla para facilitar la aplicación sobre el sustrato, buscando que esta sea uniforme [94]. Además, el solvente actúa en la evaporación

controlada, ya que permite determinar la velocidad de secado y acabado final.

Entre los solventes propuestos en el Cuadro 5.1, se seleccionó un solvente que no afectara la composición esperada y/o final de la tinta conductora. Por lo tanto, se seleccionaron los solventes que presentaran un comportamiento volátil, asegurando que al secarse la tinta, se evaporará por completo, minimizando los residuos no deseados. También la rápida evaporación del solvente brinda un secado rápido de la tinta, optimizando el proceso de fabricación y los tiempos de espera [95]. Adicionalmente, la rápida evaporación disminuye la probabilidad de agrietamiento en la capa conductora, ya que las partículas conductoras y los demás componentes que forman la tinta, tiene menos tiempo para reorganizarse antes de que la tinta se solidifique; minimizando la probabilidad de formación de grietas. Con base en lo anterior, los solventes propuestos fueron:

- Acetona.
- Tolueno e Isoforona.
- Butanol.

Los tres solventes, al ser volátiles, son sustancias que son consideradas riesgosas, por lo tanto, no se adquieren fácilmente en el mercado y no son asequibles a todos, pues se requieren permisos especiales para adquirirlos. Entre los solventes propuestos, el Tolueno e Isoforona, y el Butanol, son los más difíciles de adquirir, ya que estos son de uso industrial. Por otro lado, para adquirir la acetona, presente en diferentes productos y compuestos del mercado como esmalte de uñas o productos de aseo, se requiere de permisos como el registro y Autorización para el Manejo de Sustancias Químicas Controladas, el cual lo otorga la dirección de Política contra las Drogas para adquirirlo en su estado puro.

Por lo tanto, el solvente utilizado para la fabricación de las tintas fue la acetona, ya que es el de más fácil acceso debido a que se adquirió por medio de la Universidad Javeriana y la Universidad Nacional.

### 7.1.3. Material conductor

En las tintas conductoras, la partícula o material conductor desempeña el papel más importante, el cual es proporcionar la conductividad eléctrica al recubrimiento final. Este material comúnmente está formado por nanopartículas metálicas o derivados del carbono como grafito, grafeno, negro de humo, entre otros; que al dispersarse en la tinta forman una red sobre el sustrato, facilitando la movilidad eléctrica. Además del papel conductor, contribuyen a la adhesión de la tinta al sustrato, formando una capa continua y funcional.

Para el desarrollo de las tintas conductoras de este trabajo, se propuso usar derivados del carbono, específicamente grafito; puesto que es un material que en comparación con los metales, es más económico, contribuyendo a que sea una tinta bajo costo. A pesar de que el grafito no tiene

la conductividad que puede tener un metal, este ofrece niveles eléctricos suficientes para diferentes aplicaciones, entre esas la fabricación de sensores.

Por lo tanto, entre los tipos de grafito presentes en el mercado, se propusieron los siguientes (Ver Figura 7.2):

- Grafito en polvo para cerraduras [96].
- Polvo de grafito para dibujo marca Icopel [13].



Figura 7.2: A) Grafito en Polvo para cerraduras. B) Polvo de grafito para dibujo marca Icopel. Tomado de [13]

Se usaron estos dos tipos de grafito debido a que inicialmente son materiales que se encuentran en el comercio, con ninguna limitación; el primero (Figura A de Figura 7.2) Se puede adquirir en cualquier ferretería o tienda de herramientas, como Homecenter. El segundo (Figura B de la Figura 7.2) se puede obtener en papelerías o tiendas de materiales escolares o de arte, como Panamericana. Es importante tener presente, que estos grafitos están destinados a fines diferentes a la fabricación de tintas conductoras, esto quiere decir que la pureza de los dos grafitos es baja.

En cuanto a la funcionalidad, en pruebas pre-eliminarias, fue posible evidenciar que el grafito en polvo para cerradura presentó mejor comportamiento, puesto que al secarse la tinta, mostró mejor acabado y menos grietas, las cuales se eliminaron aumentando en pequeños valores el porcentaje de aglutinante. Por otro lado, el polvo de grafito para dibujo, no contribuía a obtener la consistencia de pasta deseada para la tinta conductora, lo que obligaba a duplicar casi el porcentaje de material conductor. Adicionalmente, al secarse se obtuvo un acabado con porosidad y rugosidad.

En cuanto a los costos, el grafito en polvo para cerradura tiene un valor más elevado que el polvo de grafito para dibujo.

- Grafito en polvo para cerraduras con un valor de veintisiete mil novecientos pesos colombianos (21900 COP) por 1000g y mil trescientos noventa y cinco pesos (1395 COP) por gramo.

- Polvo de grafito para dibujo marca Icopel con un valor de diecisiete mil cien pesos colombianos (17100 COP) por 50g y trescientos cuarenta y dos pesos (342 COP) por gramo.

Finalmente, se decide que para la fabricación de las tintas conductoras se usara el grafito en polvo para cerraduras. Debido a que este a diferencias del polvo de grafito para dibujo, presenta mejor comportamiento al realizar las mezclas y brinda mejores acabados al hacer la impresión; factor importante para el funcionamiento de las tintas.

Adicionalmente, se adquirió negro de humo, material compuesto por carbono en forma de partículas finas de dimensiones micrométricas y geometría esférica, que se genera a partir de la combustión incompleta de hidrocarburos [97]. Su estructura microscópica y la alta presencia de carbono en partículas final son los que brindan la conductividad eléctrica que caracteriza a este material. El carbono se distribuye en una red cristalina, y las partículas de negro de humo tienen una alta movilidad de electrones dentro de esta estructura [98].

El negro de humo, se descartó como partícula conductora principal para la tinta porque no cumple con algunos de los criterios de diseño. Inicialmente, no es de fácil acceso, ya que debe adquirirse por medio de empresas y estas deben importarlo al país. También es un material que puede presentar costos altos debido a que debe importarse, transportarse y comprarse en grandes volúmenes y finalmente, en cuanto a funcionamiento, al realizar las mezclas con las formulaciones propuestas, este no presentó buen comportamiento, ya que se requiere de mucho solvente para alcanzar la consistencia deseada y adicionalmente, presentó muchas grietas y poca adhesión al secarse la impresión. Sin embargo, se planteó usarlo como material conductor de relleno.

## 7.2. Composiciones

En el proceso del desarrollo de las tintas para la investigación, se llevó a cabo una metodología previa a la selección de los materiales. Se hizo una revisión a la documentación que permitió la formulación de porcentajes para asegurar la coherencia y funcionalidad de las tintas. Adicionalmente, mediante pasos sistemáticos y accesibles, se estructuró un proceso de fabricación que combina la sencillez con la reproducibilidad; todo con el fin de obtener un método sencillo y eficiente.

### 7.2.1. Formulaciones

Posterior a la selección de la materia prima entre todos los componentes propuestos; con ayuda de la documentación y los trabajos relacionados, se plantearon las formulaciones presentes en el Cuadro 7.1 con el objetivo de limitar la investigación y evaluar el comportamiento de las tintas conductoras en función de los componentes que la conforman. Con las formulaciones planteadas y los materiales propuestos, se realizaron las primeras mezclas que a su vez sirvieron para caracterizar la funcionalidad de los materiales y realizar la selección final de estos.

Tinta	% Barniz	% Grafito
T4060	40	60
T5050	50	50
T6040	60	40
T7030	70	30
T8020	80	20

Cuadro 7.1: Proporciones de materiales para la fabricación de las tintas

El negro de humo no se utilizó como material conductor principal, ya que no cumple con los criterios de diseño, no era funcional y no presentaba los acabados deseados al realizar la impresión. Sin embargo, Chris Phillips y colaboradores en [99] reportan que el negro de humo se puede usar como material conductor de relleno. Por lo tanto, para este estudio, se utilizaron las formulaciones con negro de humo que se presentan en el Cuadro 7.2, donde el porcentaje total de material conductor se dividió equitativamente entre grafito y negro de humo.

Tinta	% Barniz	% Grafito	% Negro de humo
TN5025	50	25	25
TN6020	60	20	20
TN7015	70	15	15
TN8010	80	10	10

Cuadro 7.2: Proporciones de materiales para la fabricación de las tintas compuestas

En cuanto a la acetona, se llevó un registro de la cantidad utilizada por formulación. Por lo que su uso se realizó con el objetivo de obtener una contextura de pasta, la cual facilitara su aplicación.

### 7.2.2. Proceso de fabricación de tintas

La fabricación de tintas a base de derivados del carbono, tales como grafito o negro de humo haciendo uso de aglutinantes tales como barniz, es un proceso que se puede realizar de forma sencilla, ya que no se requiere de técnicas complejas o que requiera de equipos difíciles de adquirir o de alto valor. Adicionalmente, se requiere de los instrumentos básicos de protección que son necesarios para hacer uso de los laboratorios.

A continuación se enlistarán la materia prima, los equipos de medición, los instrumentos de laboratorio e instrumentos de protección básicos para la fabricación de las tintas conductoras.

#### ■ Materia prima.

- Grafito en polvo para cerraduras.
- Negro de Humo.
- Barniz de vidrio.

- Acetona.
- **Equipos de medición**
  - Bascula de precisión (Marca Shimadzu, modelo TX3202L).
- **Instrumentos de laboratorio**
  - Varita de agitación.
  - Recipientes para mezclar.
  - Gotero para la aplicación de la acetona.
- **Implementos de protección.**
  - Bata de laboratorio.
  - Guantes quirúrgicos.
  - Tapa bocas.
  - Gafas de protección.

Antes de empezar con la fabricación de las tintas, es importante usar los implementos de protección. Estos se deben usar, ya que se está manejando sustancias muy volátiles como la acetona, que al inhalarse puede generar diversos riesgos para la salud, como irritación de las vías respiratorias, ojos o piel, entre otras afecciones que deben evitarse. Adicionalmente, al trabajar con material particulado, en este caso el negro de humo conlleva ciertos riesgos como irritación de las vías respiratorias, tos y dificultades para respirar, todas las anteriores por inhalación; además de irritación de ojos y piel por contacto.

Para iniciar con la fabricación de las tintas conductoras, fue crucial pesar la materia prima, asegurando que se cumplieran las proporciones registradas en los Cuadros 7.1 y 7.2. Por esta razón, se recomienda utilizar una báscula de alta precisión para que el peso de cada material sea lo más exacto posible y no afecte el proceso de fabricación.

En este estudio, se realizaron mezclas de tres gramos (3 g) para cada uno de los lotes de muestras fabricadas solo con grafito, y de dos gramos (2 g) para cada uno de los lotes de muestras fabricadas con grafito y negro de humo. En el Cuadro 7.3 se muestra el peso de cada uno de los componentes para cada muestra.

Tinta	Barniz (g)	Grafito (g)	Negro de humo(g)	Acetona(g)
T4060	1.2	1.8	0	0.2765
T5050	1.5	1.5	0	0.237
T6040	1.8	1.2	0	0.237
T7030	2.1	0.9	0	0.158
T8020	2.4	0.6	0	0
TN5025	1	0.5	0.5	1.02
TN6020	1.2	0.4	0.4	0.869
TN7015	1.4	0.3	0.3	0.474
TN8010	1.6	0.2	0.2	0.395

Cuadro 7.3: Peso de componentes por lote.

Con la materia prima, pesada y lista, en el recipiente para mezclar se incorporó el material conductor; para este estudio, el grafito, o en el caso de la tinta compuesta, el grafito y el negro de humo. Para la tinta compuesta, es importante mezclar el grafito y el negro de humo para obtener una mezcla homogénea y evitar que al agregar el barniz se creen grumos que alteren las propiedades eléctricas y físicas de la tinta final.

Se agregó el material conductor y barniz; y con ayuda de la varita de agitación se mezclaron los componentes de forma manual. Al mezclar se debe procurar hacerlo de tal forma que la mezcla quede homogénea. En caso de no obtener la consistencia de pasta, se le agrega acetona en pocas cantidades (La cantidad registrada en el Cuadro 7.3 es un aproximado de la cantidad usada en este estudio) hasta obtener la consistencia de pasta deseada. Este procedimiento se debe realizar para todas las muestras.

### 7.3. Fabricación de moldes

Para este estudio se fabricaron dos tipos de muestras. El primero, de tipo rectangular, con el cual se realizaron las pruebas eléctricas y de caracterización; y el segundo, fue el electrodo para los sensores electroquímicos, utilizado para hacer las validaciones del funcionamiento de las tintas. Por lo tanto, fue necesario realizar dos diseños diferentes para los moldes, que fueron cortados en un material adhesivo (Vinilo adhesivo) que se pegó sobre el sustrato (Poliéster) para facilitar su impresión.

#### 7.3.1. Molde del electrodo de prueba

El primer diseño que se muestra en la Figura 7.3 corresponde al molde con el cual se imprimieron los electrodos de muestra para los estudios eléctricos y de caracterización. Cada molde cuenta con tres líneas de impresión, buscando que cada lote cuente con tres muestras de las tintas a imprimir. Todas las tintas fueron impresas sobre el sustrato con el mismo diseño para que de esa forma fueran

evaluadas bajo las mismas condiciones y estandarizar la evaluación sin que la geometría pudiera afectar los resultados.

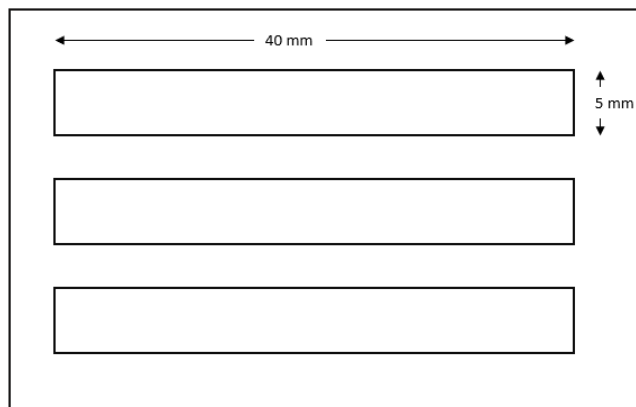


Figura 7.3: Diseño del molde para lote de electrodos de prueba.

### 7.3.2. Moldes del electrodo sensor electroquímico

El segundo diseño que se muestra en la Figura 7.4 corresponde al molde con el cual se imprimieron los electrodos para el sensor electroquímico con el fin de realizar la validación del funcionamiento de la tinta para una aplicación en específico. Así mismo, el diseño del electrodo es el de un sensor comercial sin ninguna variación.

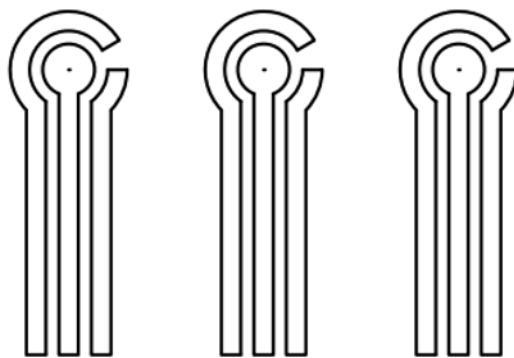


Figura 7.4: Diseño para el molde de electrodo para el sensor electroquímico.

Al igual que el diseño del electrodo de prueba, cada molde cuenta con tres muestras del electrodo; por lo tanto, por cada tinta se imprimieron tres electrodos. Sin embargo, a diferencia del diseño anterior, en este caso solo se imprimieron las tres mejores tintas que dieron como resultado de las pruebas eléctricas y de caracterización, dando un total de nueve muestras impresas.

## 7.4. Serigrafía

En el contexto de este estudio, los elementos necesarios para realizar la impresión con la técnica de serigrafía fueron:

- Tintas conductoras.
- Moldes con los diseños de los electrodos a imprimir (Electrodo de prueba y electrodo de sensor).
- Espátula para esparcir.
- Sustrato (Poliéster).
- Guantes.

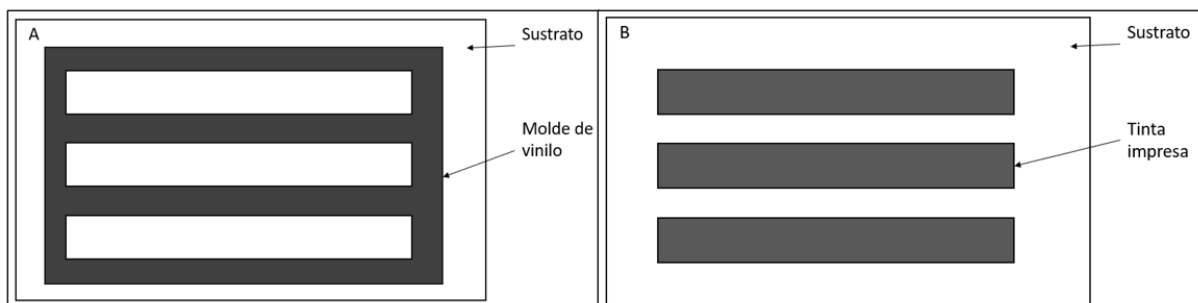


Figura 7.5: A. Sustrato con el molde antes de la impresión. B. Resultado final de la impresión.

Para la impresión de los electrodos para los sensores electroquímicos se lleva a cabo exactamente el mismo procedimiento.

## 7.5. Pruebas eléctricas y prueba de adhesión.

### 7.5.1. Método de cuatro puntas.

Para realizar la medición de la resistividad eléctrica, se suelen usar diferentes técnicas, entre las cuales destaca el método de cuatro puntas, considerado una de las mejores técnicas y un método estándar, ampliamente aceptada y utilizada para medir las propiedades eléctricas de los sólidos y las películas delgadas. La disposición típica consiste en cuatro puntas conductoras colocadas en fila, como se muestra en la Figura 7.6. La corriente pasa a través de la muestra mediante dos electrodos (puntas externas), y la diferencia de potencial se mide a través de los otros dos electrodos (puntas internas), lo que permite determinar la resistividad o resistencia de la lámina con una influencia mínima de la resistencia de contacto [100].

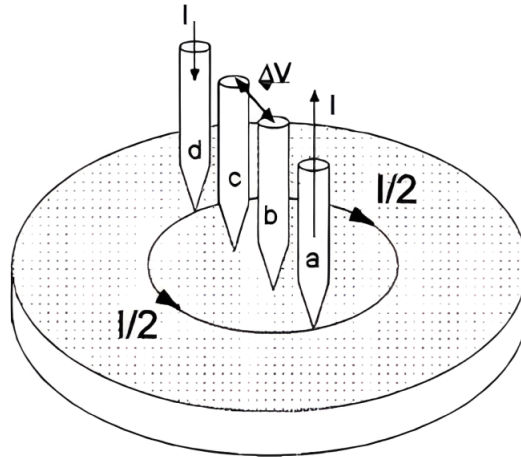


Figura 7.6: Representación método de cuatro puntas. Tomado de:[14]

Para el cálculo de la resistividad, se tomaron tres mediciones de las impresiones: el ancho, el largo de la zona que se quiere caracterizar y el espesor. Con estos tres valores, junto con la corriente aplicada en los terminales externos y la diferencia de potencial medida en los terminales internos, se calcula la resistividad aplicando la siguiente fórmula.

$$\rho = \left(\frac{V}{I}\right) * \left(\frac{w * h}{L}\right) \quad (7.1)$$

En las mediciones, se estableció un montaje acorde a la Figura 7.6 y se realizó la medición variando la frecuencia entre 100 y 1 M Hz.

## 7.6. Pruebas de adhesión

Las pruebas de adhesión en tintas conductoras son esenciales para optimizar y válidas los procesos usados en la fabricación. Estas ofrecen información importante sobre los materiales usados en la formulación, ya que permite conocer la compatibilidad del material conductor, el aglutinante con el sustrato en el que se está imprimiendo y las propiedades mecánicas de las tintas resultantes.

La norma que se usó en este estudio fue la ASTM F1842-15 [15], la cual describe un método de prueba estándar para determinar la adherencia de tinta o recubrimiento sobre sustratos flexibles para un interruptor de membrana o un dispositivo electrónico impreso.

Para llevarla a cabo, primero se realiza un patrón con seis cortes en cada dirección en la tinta a la que se le va a realizar la prueba, como se ve en la Figura 7.7. Se usó cinta sensible para realizar la prueba; donde se pegó sobre la red, luego se retira y se evalúa evaluando el patrón resultante sobre la cinta. Finalmente, se comparó con las descripciones e ilustraciones presentes en la norma, que se pueden ver en la Figura 7.8 siendo la 4B o 5B las mas deseables.

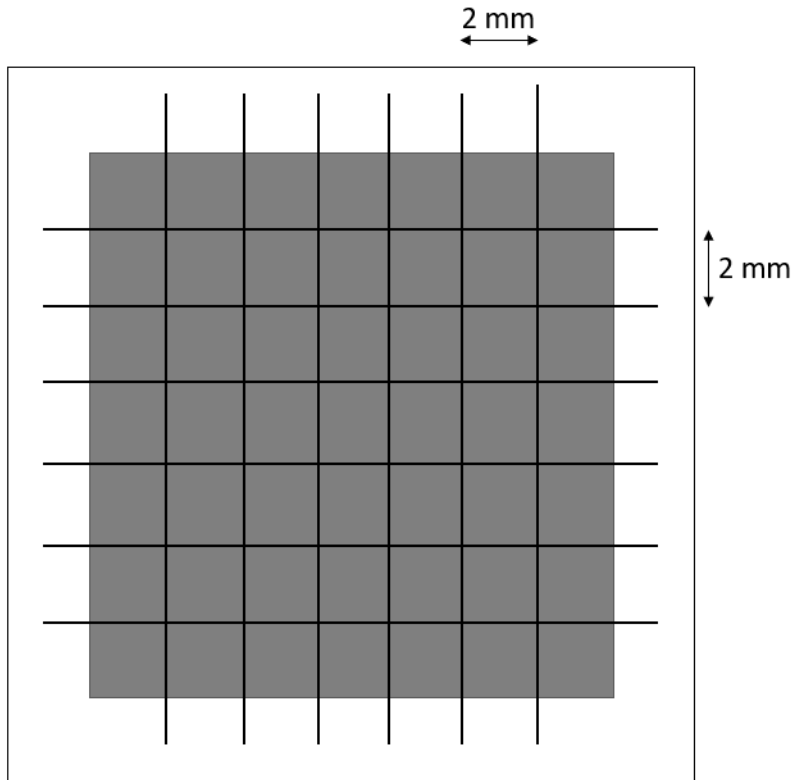


Figura 7.7: Diseño del patrón cortado sobre la tinta.





Classification	Surface of cross-cut area from which flaking has occurred. (Example for six parallel cuts)
5B	None
4B	
3B	
2B	
1B	
0B	Greater than 65%

Figura 7.8: Clasificación de los resultados de la prueba de adhesión. Tomado de [15].

Los materiales empleados para la realización de la prueba fueron: un bisturí o herramienta de corte para cortar el patrón sobre la tinta, procurando siempre una fuerza homogénea en cada línea cortada sin cortar el sustrato, y cinta adhesiva, lo ideal es que se conozca la fuerza de adhesión de la cinta a utilizar para facilitar la evaluación; para este estudio fue de 3kg/cm de la marca tesa [101].

## 7.7. Caracterización de estructura cristalina y propiedades morfológicas.

### 7.7.1. Espectroscopia Raman

Se realizó espectroscopía Raman en el Tecnoparque Sena nodo Cali, utilizando un equipo con un láser de 532 nm, realizando un barrido entre 0 y  $cm^{-1}$  para analizar la materia prima, la composición final de la tinta y la dispersión del material conductor.

La espectroscopía Raman es una técnica de análisis utilizada para estudiar las vibraciones moleculares. Se basa en la dispersión inelástica de la luz: cuando una muestra es irradiada con luz láser, una pequeña fracción de esta luz es dispersada inelásticamente, cambiando su frecuencia debido a interacciones con las vibraciones moleculares del material. Esta luz dispersada inelásticamente es la

que se analiza en la espectroscopía Raman.

El proceso comienza con un láser monocromático que ilumina la muestra. Los fotones del láser interactúan con las moléculas de la muestra, transfiriendo energía y provocando cambios en sus vibraciones. La luz dispersada, que tiene una frecuencia diferente a la del láser inicial debido a la ganancia o pérdida de energía, se analiza para determinar las frecuencias de las vibraciones moleculares. Esta luz dispersada mide la intensidad a distintas frecuencias, resultando en un espectro Raman con picos que corresponden a diferentes vibraciones moleculares del material.

### 7.7.2. Microscopio electrónico de barrido (SEM)

Se realizó una microscopía electrónica de barrido (SEM) para caracterizar las propiedades morfológicas de la tinta conductora. El ensayo se llevó a cabo en la Universidad Nacional, sede Manizales, utilizando el equipo SEM Helios 5 PFIB CXe con detector EDS Ultradry 100 mm<sup>2</sup>, 129 eV. Con este equipo, se visualizó la porosidad y la distribución del material conductor a lo largo de la tinta.

La microscopía electrónica de barrido (SEM) utiliza un haz de electrones para crear imágenes detalladas de la superficie de una muestra. Un cañón de electrones genera un haz que se acelera a alta velocidad y se enfoca en un punto fino mediante lentes electromagnéticas. Este haz enfocado se dirige hacia la superficie de la muestra, escaneándola punto por punto. Cuando los electrones golpean la muestra, interactúan con sus átomos, produciendo varias señales, entre ellas electrones secundarios. Estos electrones secundarios, emitidos por la muestra debido a la interacción con el haz primario, son detectados y utilizados para formar una imagen de alta resolución de la superficie. Las señales detectadas se convierten en una imagen visual que muestra la topografía y composición de la muestra con gran detalle, proporcionando una apariencia tridimensional gracias a su gran profundidad de campo.

## 7.8. Voltametría Cíclica

El ferricianuro de potasio se utiliza como sustancia patrón, ya que presenta una reacción redox reversible en las pruebas a sensores electroquímicos en voltametría cíclica, principalmente por su reacción redox altamente reversible. Esta característica permite una evaluación precisa de la eficiencia y el comportamiento electroquímico del sensor [102].

Además, las reacciones del ferricianuro son químicamente estables, asegurando que no haya reacciones secundarias durante el experimento y su comportamiento electroquímico bien documentado proporciona una referencia confiable para calibrar y validar sensores. Los potenciales de oxidación y reducción definidos permiten evaluar con precisión la capacidad del sensor para detectar y medir cambios en el potencial y la corriente [103].

Al realizar una voltametría cíclica a una sustancia como el ferricianuro (reversible) se deben cumplir con dos criterios de reversibilidad [104] los cuales son:

1. Debe poseer una diferencia entre 50 y 70 mV entre el potencial de pico anódico ( $E_{pa}$ ) y el potencial de pico catódico ( $E_{pc}$ ).
2. Debe poseer una razón de intensidad de pico ( $I_{pa}/I_{pc}$ ) igual o cercano a uno.

Por lo tanto, el electrodo fabricado con las tintas finales se evaluaron bajo esos dos criterios; que al cumplirlos validaran que las tintas conductoras fabricadas, sirven para realizar mediciones electroquímicas.

Los parámetros utilizados para la voltametría cíclica fueron:

- Tiempo de equilibrio: 0 s
- Ventana de potencial de -1,06 a 1,06 V
- Paso de potencial: 0,01 V
- Scan rate: 0,1 V/s
- 4 ciclos

### 8.1. Caracterización de estructura cristalina y propiedades morfológicas de la materia prima.

Para la caracterización de la materia prima se realizaron las pruebas al grafito y al negro de humo. El primer estudio fue la espectroscopia Raman que se muestra en la Figura 8.1.

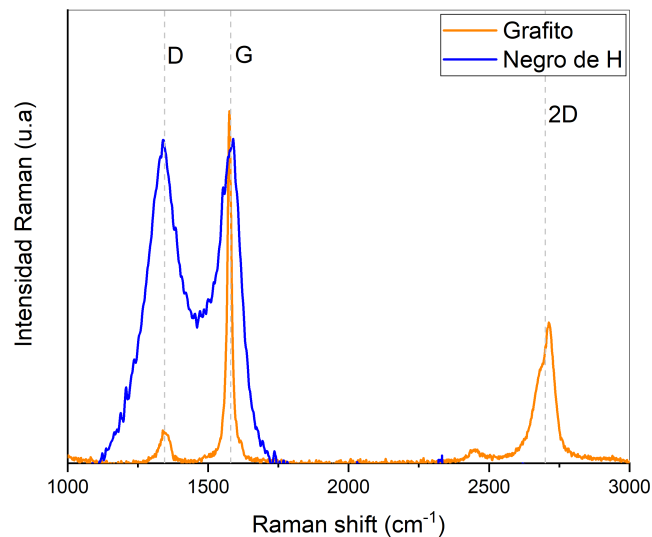


Figura 8.1: Espectroscopia Raman del grafito y del negro de humo.

En esta, el espectro del grafito muestra presencia de picos en las bandas D, G y 2D los cuales son características del material. El pico en la banda G es característico de materiales con alta presencia de carbono en su estructura. Además, la banda G en el espectro Raman del grafito, indica la cristalinidad, lo cual caracteriza al grafito como un mineral, disminuyendo en estructuras poco grafitizadas [105]. Para el pico en la banda D, el cual está asociado a la presencia de defectos estructurales en el material; al ser de baja intensidad, sugiere que hay baja concentración de defectos estructurales en el material carbonoso. Esto quiere decir que la estructura del material es relativamente ordenada y

tiene alta calidad estructural [105]. En la Tercera banda, la 2D, al no ser de alta intensidad, indica la presencia de grafito de múltiples capas (estructura cristalina bien definida). Además, señala una baja concentración de defectos estructurales en el grafito o impurezas, lo que sugiere una estructura más pura y ordenada.

En cuanto al espectro del negro de humo, se puede observar que el pico en la banda D y en la banda G son muy similares en la intensidad y forma, lo cual puede significar que el negro de humo tiene una estructura desordenada, ya que la similitud en la intensidad alta de las dos bandas sugiere que la estructura cristalina no está definida; lo que explica la ausencia de la banda 2D. Además, la intensidad de la banda D sugiere una alta concentración de defectos estructurales en el material [106] [107]. Es importante aclarar que los resultados obtenidos en la Figura 8.1 para el negro de humo muestran un comportamiento normal de este material.

La segunda prueba a realizar para la caracterización fue el SEM (Scanning Electron Microscopy) que se muestra en la Figura 8.2.

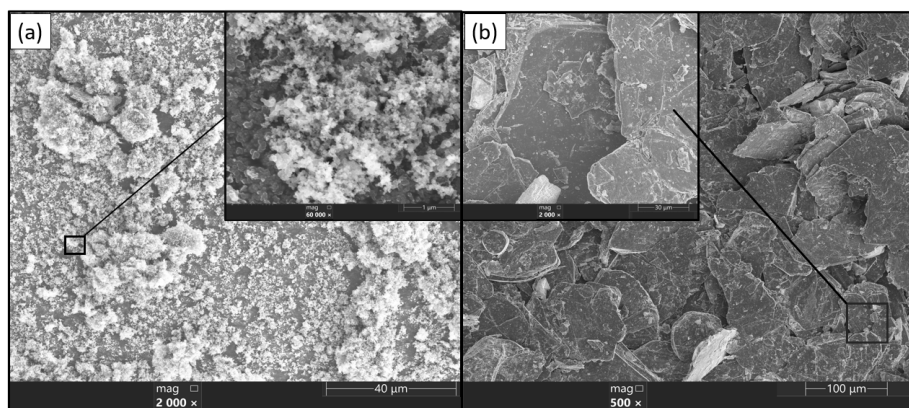


Figura 8.2: A) Imagen SEM del negro de humo. B) Imagen SEM del grafito.

En la Figura A se muestra la imagen SEM del negro de humo a una magnitud de 2000x y un acercamiento con una magnitud de 60000x. Esta imagen muestra que el negro de humo al ser un material a escala nanométrica tiende a aglomerarse, que podría afectar en las propiedades mecánicas de las tintas, aumentando su fragilidad, haciéndolas más propensas a romperse.

En la Figura 8.2B se muestra la imagen SEM del grafito con una magnitud de 500x. En esta se puede apreciar el aspecto natural del grafito; láminas. Este se caracteriza por estar compuesto por átomos de carbono en capas que al apilarse una sobre otra forman lámina.

## 8.2. Pruebas eléctricas

Realizar pruebas eléctricas a las tintas conductoras formuladas es fundamental, permitiendo verificar la calidad de los materiales conductores y asegurando que hay una correcta distribución de las partículas en la matriz. Adicionalmente, las pruebas permiten optimizar la formulación de las tintas, ajustando las proporciones para disminuir la resistividad y garantizar el funcionamiento correcto de los dispositivos impresos, contribuyendo al control de calidad.

### 8.2.1. Resistencia

La medición de la resistencia consta dos etapas. El primer momento consta de una medición inicial de la resistencia de las impresiones con los moldes estandarizados de punta a punta de cada una de las líneas, seguido se dobla el sustrato a noventa grados ( $90^\circ$ ), se vuelve a su estado original y se vuelve a medir la resistencia de punta a punta; esto con el propósito de ver cuanto aumenta la resistencia de las tintas después de realizar una flexión. Para el segundo momento, se mide la resistencia en una zona de la línea impresa haciendo uso del método de cuatro puntas; este con el objetivo de obtener una resistividad más exacta.

Para llevar a cabo la primera etapa, se usó un multímetro convencional para realizar las mediciones. Las puntas del multímetro se ubicaron en los extremos de las líneas impresas, como se muestra en la Figura 8.3.A. Después de registrar la resistencia obtenida se montó el sustrato con las muestras (Por lote de cada tinta) en un soporte impreso en 3D que se ve en la Figura 8.3.B, el cual cumple la función de garantizar que todas las tintas fueron probadas bajo las mismas condiciones de flexión. Finalmente, se retiró el sustrato con las tintas impresas, se devolvió a su estado inicial y nuevamente se midió la resistencia en los mismos puntos marcados.

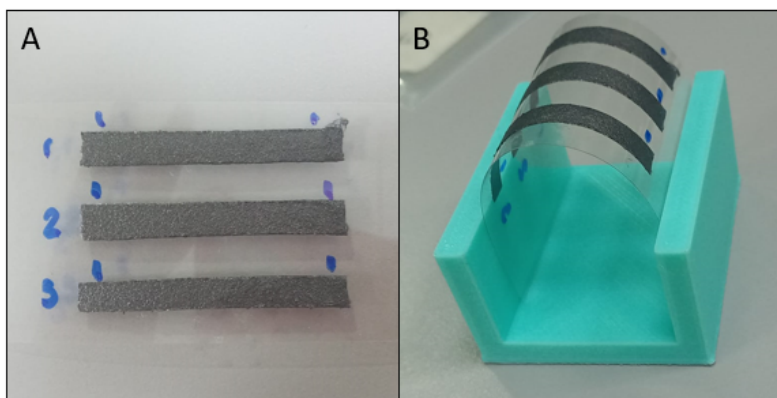


Figura 8.3: A) Tinta en su estado original con puntos marcados con azul para realizar las mediciones. B) Tinta montada en soporte.

A algunas de las formulaciones no fue posible medirle la resistencia debida a que no se obtuvo

una muestra en condiciones. Dichas formulaciones fueron la tinta T4060 y la tinta TN5025 (las tintas con menor porcentajes de barniz). En el caso de la tinta T4060 (Figura 8.4), sus propiedades mecanizas no eran las apropiadas y al secarse la tinta se fracturó desprendiéndose por completo del sustrato. Y en el caso de la tinta TN5025, no fue posible realizar la mezcla y, por lo tanto, tampoco la impresión, ya que era necesario aplicar gran cantidad de solvente, lo cual al final afectaría en sus propiedades mecanizas y adicionalmente no daría los acabados deseados generando grietas.

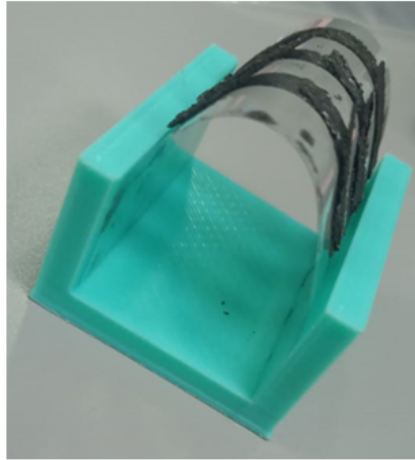


Figura 8.4: Tinta T4060 al realizar dobles. Después de los dobles no fue posible medir la resistencia nuevamente.

En la Figura 8.5 se muestra todas las tintas impresas en su posición inicial y en la posición de flexión. Las tintas TN6020 y T4060, después de realizar las mediciones, presentaron fracturas, ocasionando desprendimiento de la tinta. Este comportamiento se puede atribuir a la presencia del negro de humo; en el caso de las tintas TN6020 y T4060, fue posible realizar la mezcla de la tinta en comparación de la tinta TN5025, sin embargo, el porcentaje de negro de humo sigue siendo alto, lo cual afecta sus propiedades mecánicas. Esto se debe al tamaño de las partículas, ocasiona que esta tenga una área superficial alta en relación con el volumen, lo que puede aumentar la cohesión entre partículas y a su vez la rigidez del material [108].

El registro de los resultados de la medición de las resistencias de la primera etapa, antes y después de la flexión, se encuentra en el Cuadro 8.1. De los valores de resistencia obtenidos antes de realizar la flexión se pudo concluir que en las tintas de grafito, entre mayor sea el porcentaje de aglutinante, mayor va a ser la resistencia eléctrica de la tinta, debido a que disminuye la cantidad de partícula conductora y adicionalmente, esta queda mucho más dispersa en la matriz. Un ejemplo es la tinta T7030 y la T8020, que fueron las tintas con mayor resistencia superando los 500 ohm, el cual es un criterio de diseño importante. Sin embargo, fueron las que presentaron mejor comportamiento en la flexión, ya que no presentaron grietas ni desprendimiento de la tinta.

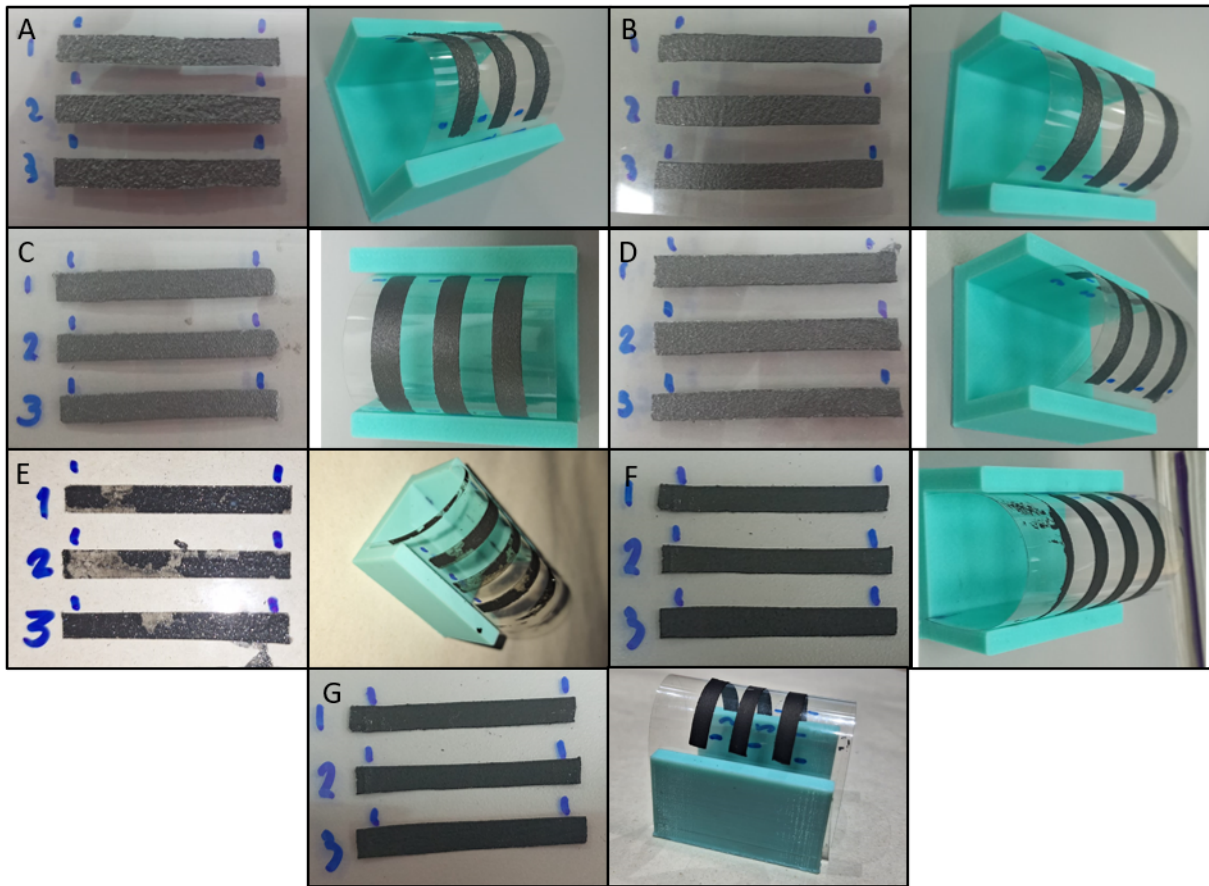


Figura 8.5: A) Tinta T5050. B) Tinta T6040. C) Tinta T7030. D) Tinta T8020. E) Tinta TN6020. F) Tinta TN7015. G) Tinta TN8010.

En cuanto a los resultados de las mediciones después de la flexión, se observó que los valores de resistencia de todas las tintas aumentaron. Un caso particular es el de la tinta TN6020, que en el Cuadro 8.1 mostraba valores de resistencia menores a 500 ohm (criterio de diseño), pero después de la flexión, los valores superaron los 500 ohm. Este comportamiento puede deberse al contenido de negro de humo, ya que, aunque es un material con buena conductividad, tiende a aumentar la fragilidad de las muestras. Esto provoca que, al realizar la flexión, se generen grietas que incrementan la resistencia.

Tinta	Resistencia Pre-doblez (ohm)	Promedio	Resistencia Post-doblez (ohm)	Promedio
T4060	No aplica			
T5050	138.50	131,87 ± 10,644	132.10	139,13 ± 8,66
	119.6		136.50	
	137.5		148.80	
T6040	181.40	190,73 ± 20,56	225.00	228,67 ± 4,04
	176.50		228.00	
	214.30		233.00	
T7030	634,00	535,97 ± 86,86	831.00	916,67 ± 157,12
	468.60		1098.00	
	505.30		821.00	
T8020	1640.00	1319,33 ± 312,82	725.00	1353,67 ± 597,03
	1015.00		1913.00	
	1303.00		1423.00	
TN5025	No aplica			
TN6020	151.20	204,93 ± 98,05	924.00	875,33 ± 250,57
	318.10		604.00	
	145.50		1098.00	
TN7015	64.70	65,40 ± 9,57	77.00	75,67 ± 8,08
	56.20		67.00	
	75.30		83.00	
TN8010	349.90	334,14 ± 14,58	396.90	394,20 ± 7,99
	331.50		400.50	
	321.10		385.20	

Cuadro 8.1: Resultado de medición de resistencia, promedio y desviación estándar antes y después de la flexión.

Tras comparar los valores de resistencia antes y después de la flexión, se llevó a cabo un análisis para determinar el aumento porcentual en la resistencia como resultado de la flexión del sustrato. Los resultados de este análisis se registraron en el Cuadro 8.2.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el Cuadro 8.2, se observa que un alto porcentaje de negro de humo en la formulación de las tintas puede afectar significativamente sus propiedades mecánicas, incluso hasta el punto de comprometer su funcionamiento. Por ejemplo, en el caso de la tinta TN6020, se registró un aumento del 327.13 % en la resistencia.

Por otro lado, se puede inferir que a medida que aumenta el porcentaje de aglutinante en la formulación de la tinta, el incremento en la resistencia es menor. Esto se debe a que el aglutinante proporciona mayor flexibilidad a la tinta.

Tinta	Promedio resistencia Pre-dobleza (ohm)	Promedio resistencia Post-dobleza (ohm)	Incremento de Resistencia (%)
T4060	No aplica		
T5050	131.13	139.13	5.51
T6040	190.73	228.67	19.89
T7030	535.97	916.67	71.03
T8020	1319.33	1353.67	2.60
TN5025	No aplica		
TN6020	204,93	875.33	327.13
TN7015	65.40	75.67	15.70
TN8010	334.17	394.2	17.97

Cuadro 8.2: Resultado de medición de resistencia en porcentaje.

Para la medición de la resistencia en la segunda etapa se hizo uso de la técnica de cuatro puntas. En esta etapa se midió la resistencia en una zona en específico de la tinta impresa, como se muestra en la Figura 8.6. Para realizar esta técnica se decide descartar las tintas T8020 y TN6020. La tinta T8020 se descarta de la prueba porque a pesar de que presenta el aumento de resistencia más bajo, es la tinta que presenta la resistencia más alta, pasando desde un principio los 500 ohm. En el caso de la tinta TN6020, se descartó de la prueba porque es la tinta que presentó el incremento de resistencia mas alto, debido a sus propiedades mecánicas.

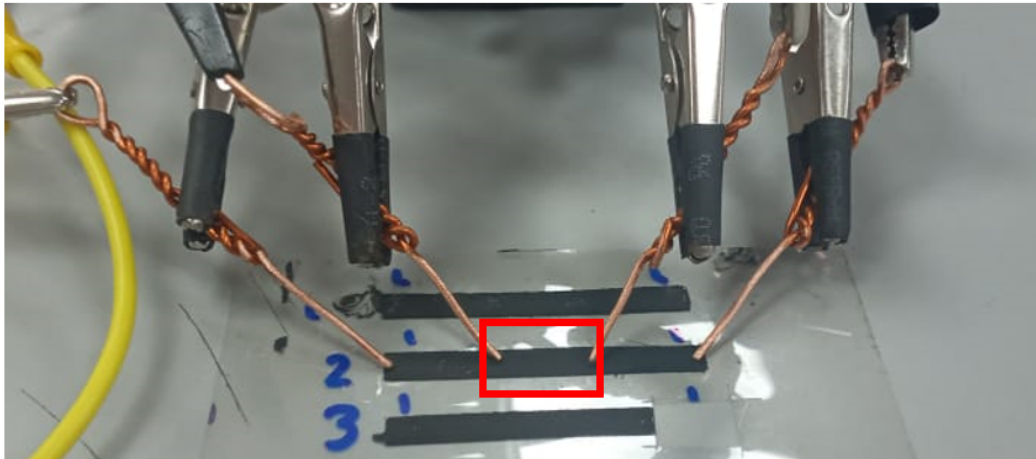


Figura 8.6: Aplicación de la técnica de cuatro puntas.

Tinta	Frecuencia (Hz)	Promedio resistencia (ohm)
T4060	No aplica.	
T5050	100	11,08
	1k	11.32
	100k	11.37
	1M	10.81
T6040	100	12.25
	1k	12.16
	100k	12.38
	1M	12.89
T7030	100	10,93
	1k	11.33
	100k	11.63
	1M	12.03
T8020	No aplica	
TN5025	No aplica	
TN6020	No aplica	
TN7015	100	11.68
	1k	11.62
	100k	11.58
	1M	11.64
TN8010	100	11,47
	1k	11.28
	100k	11.41
	1M	11.79

Cuadro 8.3: Resultado de medición de resistencia técnica cuatro puntas.

La prueba de cuatro puntas se realizó aplicando diferentes frecuencias debido a que se utilizó un generador de onda seno (Fuente AC) en vez de usar una fuente de alimentación DC. Fue necesario hacer este procedimiento debido a que con la fuente DC el voltaje se caía a cero. En el Cuadro 8.3 se muestra las frecuencias utilizadas y los valores de resistencia obtenidos.

### 8.2.2. Resistividad

En el Cuadro 8.4 se puede apreciar que los valores de resistividad de las tintas conductoras no están muy alejadas del criterio de diseño planteado, el cual es que la resistividad de la tinta debe mantenerse entre 0.05 y 0.1 ohm.cm. Como excepción está la tinta TN8010 la cual presenta, en las diferentes frecuencias, valores mayores a 0.2 ohm.cm. Lo cual se debe a la gran cantidad de aglutinante y el poco material conductor. Eso quiere decir que las demás tintas ofrecen una conductividad eléctrica más eficiente y es capaz de permitir el flujo fácil de corriente eléctrica a través de ella.

Tinta	Frecuencia (Hz)	Promedio resistencia (ohm)	W (cm)	L (cm)	h (cm)	Resistividad (ohm.cm)
T4060	No aplica.					
T5050	100	11.08	0.5	1.2	0.03	0.131
	1k	11.32				0.134
	100k	11.37				0.134
	1M	10.81				0.128
T6040	100	12.25	0.5	1.2	0.02	0.103
	1k	12.16				0.102
	100k	12.38				0.104
	1M	12.89				0.109
T7030	100	10.93	0.5	1.2	0.01	0.054
	1k	11.33				0.056
	100k	11.63				0.057
	1M	12.03				0.059
T8020	No aplica					
TN5025	No aplica					
TN6020	No aplica					
TN7015	100	11.68	0,5	1.2	0.02	0.122
	1k	11.62				0.121
	100k	11.58				0.121
	1M	11.64				0.122
TN8010	100	11,47	0,5	1.2	0.03	0.243
	1k	11.28				0.239
	100k	11.41				0.242
	1M	11.79				0.249

Cuadro 8.4: Valores y resultados de cálculo de resistividad.

### 8.3. Resultados prueba adhesión

La prueba de adhesión se realizó por triplicado a cada una de las nueve tintas formuladas, sumando un total de veintisiete pruebas. El material que permanece adherido a la cinta se comparó con las ilustraciones de la Figura 7.8, descritas en la metodología. La ilustración que presente las mayores similitudes determinará el nivel de adhesión. Tras completar la prueba, los resultados se registraron en el Cuadro 8.5.

Tinta	Muestra	Resultado	Anexo
T4060	1	No aplica	No aplica
	2		
	3		
T5050	1	1B	Anexo 1 (Figura 12.1)
	2	2B	
	3	2B	
T6040	1	3B	Anexo 2 (Figura 12.2)
	2	3B	
	3	3B	
T7030	1	4B	Anexo 3 (Figura 12.3)
	2	3B	
	3	3B	
T8020	1	4B	Anexo 4 (Figura 12.4)
	2	3B	
	3	3B	
TN5025	1	No aplica	No aplica
	2		
	3		
TN6020	1	No aplica	No aplica
	2		
	3		
TN7015	1	1B	Anexo 5 (Figura 12.5)
	2	1B	
	3	1B	
TN8010	1	2B	Anexo 6 (Figura 12.6)
	2	2B	
	3	2B	

Cuadro 8.5: Resultados prueba adhesión.

En el cuadro mencionado, se observa que las tintas T4060 y TN5025 (las que contienen un menor porcentaje de barniz) no arrojaron resultados. Esto se atribuye a dos condiciones distintas:

en el caso de la tinta T4060, sus propiedades mecánicas no eran adecuadas, lo que provocó que, al secarse, se fracturara y se despegara por completo del sustrato, evidenciando una deficiente adhesión.

Adicionalmente, al igual que con la tinta T4060, la prueba de adhesión no pudo llevarse a cabo con la tinta TN6020 debido su fragilidad. Por lo tanto, al realizar el corte en la rejilla, la tinta se fracturó y se despegó del sustrato.

En el caso contrario, donde las tintas contenían mayor porcentaje de barniz (T7030, T8020 y TN8010,) presentaron mejor clasificación en la prueba, lo cual permitiría concluir que entre mayor es el porcentaje de aglutinante, más adhesión va a tener la tinta al sustrato. Esto se puede atribuir a la función del aglutinante de dar consistencia a la tinta y unión a los componentes presentes en ella (Partículas conductoras). Por lo tanto, a medida que aumenta el aglutinante, la tinta tiende a tener mejor consistencia y adhesión, favoreciendo la interacción entre las partículas de la tinta y facilitando así una unión entre ellas. Asimismo, este proceso también lleva a la formación de una capa continua y homogénea sobre el sustrato, mejorando la calidad de la adherencia al eliminar posibles áreas baja adherencia.

Por otro lado, entre las tintas de grafito y las tintas compuestas (grafito y negro de humo), la tinta compuesta obtuvo menor calificación, lo cual se puede atribuir al negro de humo.

## 8.4. Caracterización de estructura cristalina y propiedades morfológicas de las tintas.

Realizar la caracterización de la estructura cristalina y las propiedades morfológicas en una tinta conductora es importante porque proporciona información clave que permite optimizar las propiedades eléctricas al entender la disposición de las capas del material conductor. Además, la relación entre la morfología del grafito y las propiedades mecánicas es esencial para diseñar tintas que mantengan la conductividad eléctrica bajo deformaciones. Esto permite evaluar la uniformidad de la impresión, asegurando una buena adherencia a los sustratos y buenos acabados al secarse. En términos de calidad, brinda herramientas para verificar las propiedades del material durante la producción. Además, comprender la estructura y morfología puede inspirar nuevas formulaciones para mejorar las propiedades eléctricas y mecánicas de las tintas conductoras.

### 8.4.1. Espectroscopia Raman

Después de caracterizar la materia prima, se procede a realizar lo mismo con las tintas conductoras. Inicialmente, se realizó la espectroscopia Raman a las tintas conductoras impresas con los moldes de prueba. Estas se dividieron en dos categorías; la primera fue las tintas de grafito, en donde se les realizó el estudio a las tres tintas a las que se aplicó la técnica de cuatro puntas. La

## 8.4. Caracterización de estructura cristalina y propiedades morfológicas de las tintas

segunda categoría fue el de las tintas combinadas que, al igual que la categoría uno, se les aplicó la técnica de cuatro puntas.

### 8.4.1.1. Tintas de grafito

En la Figura 8.7 se muestran los resultados de la espectroscopia de las tintas T5050, T6040 y T7030. En esta se puede apreciar que inicialmente la tinta T5050 presenta un comportamiento similar al del grafito en la Figura 8.1. A medida que disminuye el porcentaje de grafito en la mezcla, el pico presente en la banda D se va modificando, posiblemente debido al aumento en los defectos. Adicionalmente, se aprecia que a medida que aumenta el porcentaje de barniz en la mezcla, aumenta la presencia de dos picos alrededor de la banda G y de un pico al final del espectro. Estos picos, al no ser característicos del grafito, se pueden atribuir al barniz, haciendo más evidentes cada vez que este aumenta en porcentaje y disminuye el del grafito.

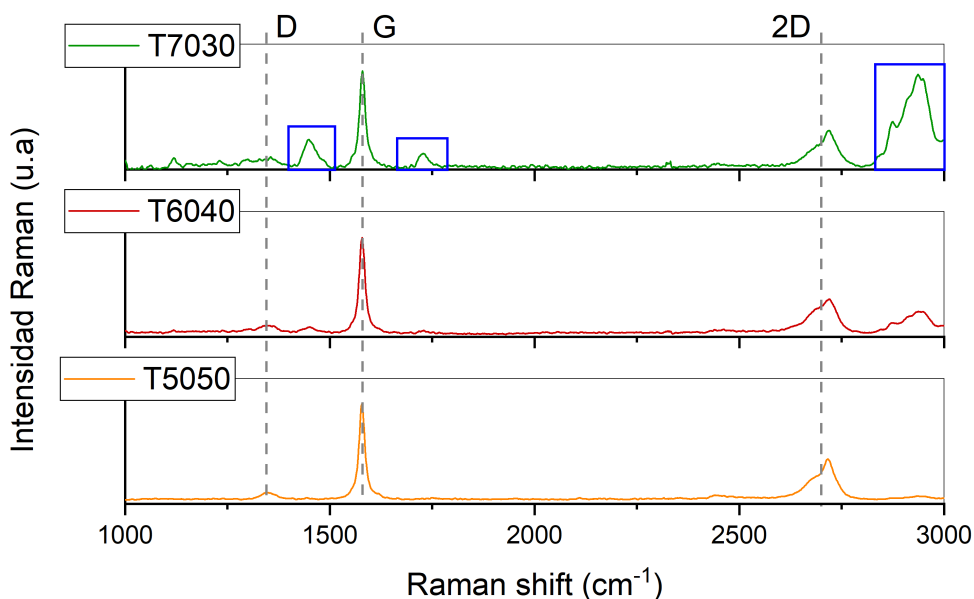


Figura 8.7: Espectroscopia raman de tintas de grafito.

### 8.4.1.2. Tintas combinadas(Negro de humo y Grafito)

En la Figura 8.8 se muestra la espectroscopia de las tintas TN7015 y TN8010. En estas se aprecia un comportamiento similar al obtenido por el negro de humo en la Figura 8.1, ya que hay presencia de picos en las bandas D y G. Adicionalmente hay presencia de un pico poco pronunciado pero ancho en la banda 2D. Este comportamiento se puede deber a la presencia de grafito que añade múltiples capas de grafito en la muestra. Por otro lado, puede deberse a la interacción

entre los componentes presentes en la tinta, ya que la interacción entre estos y la dispersión desigual de los componentes en la muestra podrían contribuir a la ampliación y disminución de la intensidad.

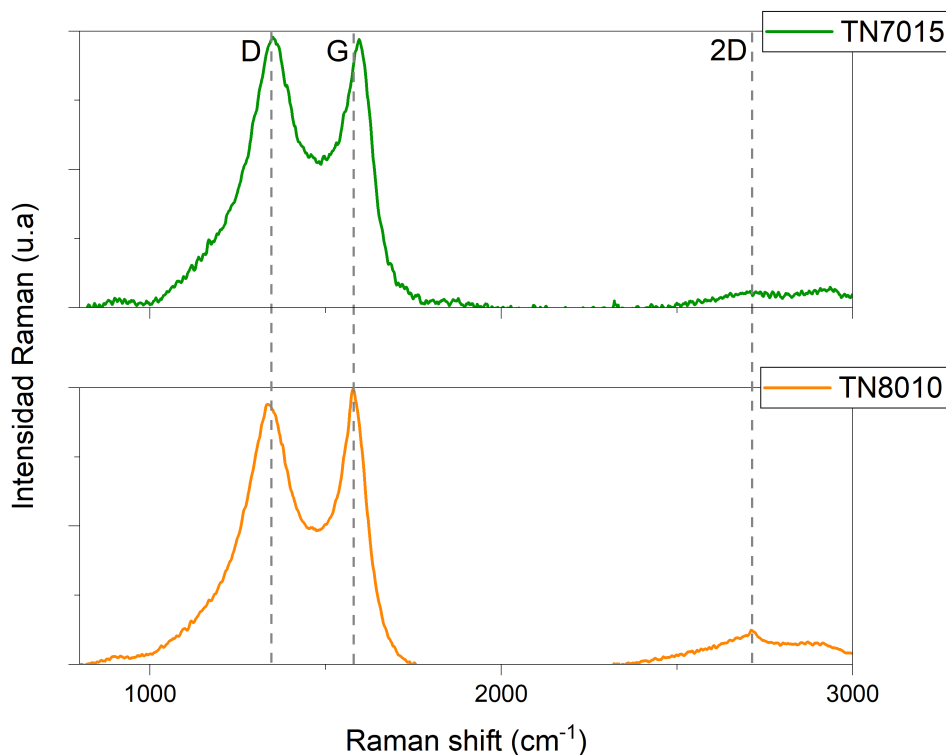


Figura 8.8: Espectroscopia raman de tintas combinadas (grafito y negro de humo).

#### 8.4.2. Microscopio electrónico de barrido (SEM)

El estudio SEM se realizó con el objetivo de analizar las propiedades morfológicas de las tintas impresas. Para ello, las imágenes se tomaron del área transversal de la impresión en donde se puede ver la distribución de las partículas conductoras. Es importante mencionar que los cortes realizados se hicieron con bisturí, por lo tanto, al ejercer presión y cortar, es posible que el área transversal se vea afectada alterando las imágenes.

En la Figura 8.9 se muestran tres tintas diferentes con formulaciones diferentes, pero que a pesar de ello, manejan los mismos porcentajes de material conductor y de aglutinante. En la Figura 8.9.a se muestra la imagen SEM de la tinta T7030; donde se observa la sobre posición de las escamas de grafito y la presencia de orificios y/o espacios al interior de la tinta. Esto puede ser consecuencia del corte para la realización de la prueba o puede deberse a errores humanos al realizar la impresión.

#### 8.4. Caracterización de estructura cristalina y propiedades morfológicas de las tintas

La figura SEM resultante del estudio de la tinta conductora compuesta por 70% de barniz y 30% de negro de humo se muestra en la Figura 8.9.b. Estas tintas fueron descartadas inicialmente debido a que no cumplían con los criterios de diseño establecidos; sin embargo, se incluye con el propósito de visualizar la distribución de las partículas conductoras. La observación revela una tinta compacta, sin presencia de agujeros ni espacios. Además, debido al tamaño de las partículas conductoras, es posible que se formen grumos que aumentan la fragilidad y facilitan la fractura, como se observa en la imagen donde no se encuentran deformaciones, lo que indica una fractura.

La Figura 8.9.c muestra la imagen SEM de la tinta TN7015. En la parte inferior, se observa todo el material de la tinta comprimido, posiblemente debido al corte realizado para la prueba. Además, en esa misma área, se notan unas manchas claras que pueden ser burbujas de aire en el interior de la tinta o aglutinante que no se mezcló correctamente con las partículas conductoras. Finalmente, en la parte superior de la Figura 8.9.c, se observa cómo el negro de humo y el grafito se agrupan, con el negro de humo cubriendo al grafito y rellenando los espacios entre las láminas de grafito.

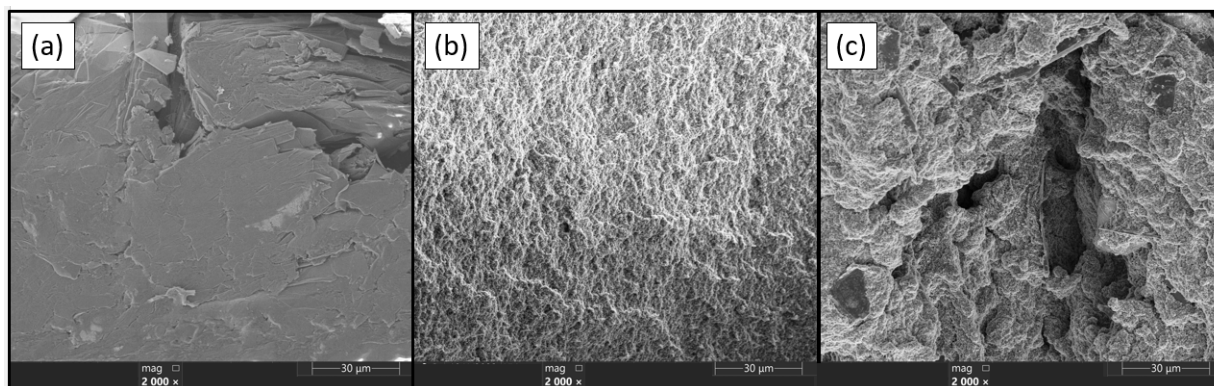


Figura 8.9: a) Imagen SEM de tinta T7030. b) Imagen SEM de tinta de negro de humo 70% barniz y 30% negro de humo. c) Imagen SEM de tinta TN7015.

# Validaciones

## 9.1. Funcionamiento de las tintas en un sensor electroquímico

De las tintas resultantes de la prueba de resistividad, se les realizó la voltametría cíclica con ferricianuro, tal como se muestra en el Capítulo 7.8, a las tintas T5050, T6040 y TN7015. Las Tintas T7030 y TN8010 se descartaron, respectivamente, por presentar un incremento de resistencia del 71,03 % después del doblez y por presentar una resistividad mayor a la establecida en el criterio de diseño. Por lo tanto, en la Figura 9.1 se muestra la voltametría cíclica de los sensores fabricados con las tres tintas resultantes junto a la del sensor comercial PalmSens IS-C.

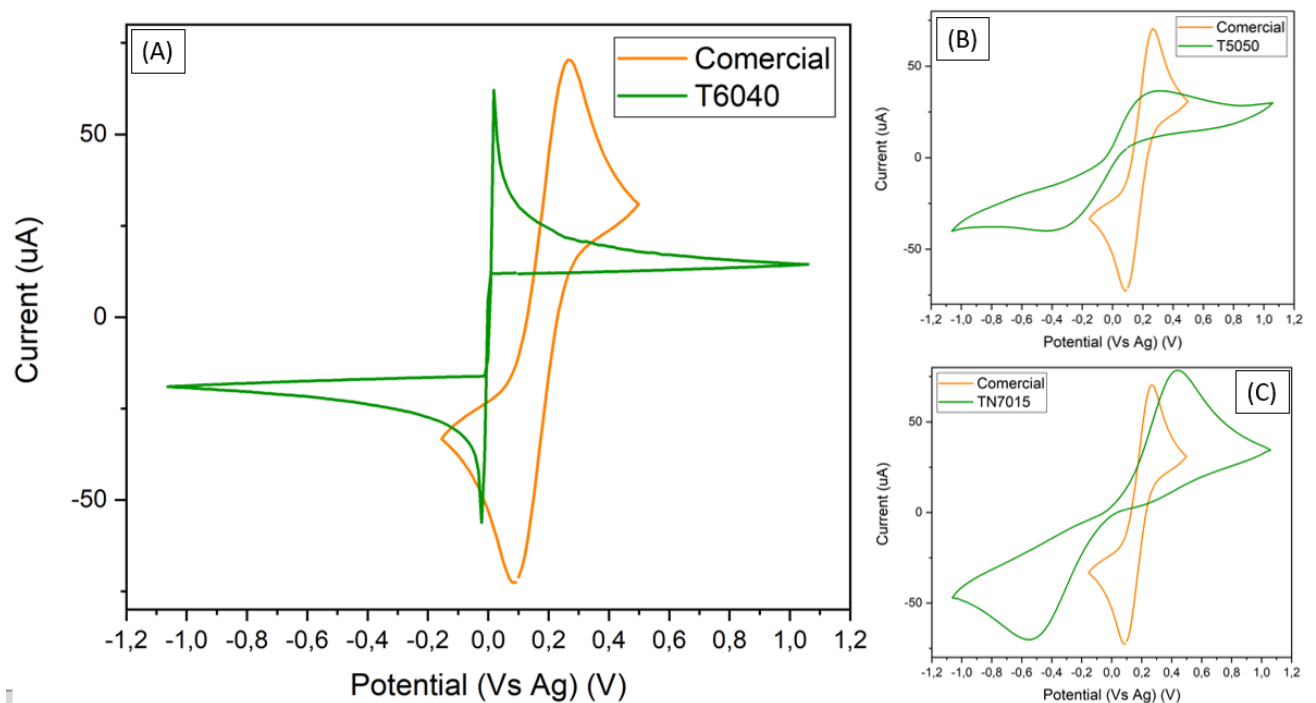


Figura 9.1: Voltametría cíclica de los sensores fabricados con las tintas T5050, T6040 y TN7015.

Con los criterios de evaluación de los sensores establecidos en la metodología, se procedió a evaluar los tres sensores. Para medir las corrientes de pico ( $I_{pa}$  e  $I_{pc}$ ), fue necesario identificar el

inicio de cada reacción (reducción y oxidación). Para medir la diferencia de potencial ( $E_{pa} - E_{pc}$ ), se evaluó la distancia en el eje x entre los picos. Los resultados se muestran en el Cuadro 9.1.

Tinta	$I_{pc}$ $I_{pa}$	$(I_{pa}/I_{pc})$	$\Delta E_p$
T5050	$I_{pc} = 44 \mu A$ . $I_{pa} = 29.99 \mu A$	0.68	0.658 V
T6040	$I_{pc} = 77.040 \mu A$ . $I_{pa} = 77.237 \mu V$	1.002	0.024 V
TN7015	$I_{pc} = 67.46 \mu A$ . $I_{pa} = 76.92 \mu A$	1.14	0.99 V

Cuadro 9.1: Resultados volúmenes cíclicas.

Con los diferenciales de potencial y las corrientes de pico medidos, se realizó la evaluación de los criterios de reversibilidad. El resumen de la evaluación se muestra en el Cuadro 9.2.

Criterio	T5050	T6040	TN7015
Diferencia entre 50 y 70 mV entre el potencial de pico anódico ( $E_{pa}$ ) y el potencial de pico catódico ( $E_{pc}$ ).		x	
Razón de intensidad de pico ( $I_{pa}/I_{pc}$ ) igual o cercano a uno.		x	

Cuadro 9.2: Resumen evaluación de criterios para reversibilidad.

Se puede observar que las tintas T5050 y TN7015 (Figura b y c de la Figura 9.2) no cumplen con los criterios de reversibilidad debido a que, inicialmente el diferencial de potenciales de los picos se salen del rango establecido, indicando que los picos están muy separados y la razón de identidad de pico se alejan de cero. Esto puede ser debido a que a resistividad obtenida es muy alta para la aplicación de sensores electroquímicos. Adicionalmente, en cuanto a propiedades mecánicas, la tinta T5050 al ser una de las que menos barniz requería, es propensa a grietas o fracturarse.

Por otro lado, la Tinta T6040 (la figura c de la Figura 9.2) presenta buen comportamiento de reversibilidad debido a que fue la única tinta que cumplió con los criterios de reversibilidad. Teniendo mejores resultados a simple vista que el sensor comercial en cuanto al diferencial de potencial.

Es importante aclarar que el hecho de que la voltametría cíclica del electrodo comercial y las voltametrías cíclicas de los sensores fabricados con las tintas no estén alineadas no implica que estos últimos no funcionen correctamente. Esto se debe a la naturaleza específica de los sensores.

## 9.2. Costos de fabricación

Para llevar a cabo el proyecto fue necesario adquirir y usar algunas herramientas como materiales, equipos electrónicos, equipos de laboratorio, entre otros; que se deben tener en cuenta para estimar el valor que obtendrá el producto final. La descripción de cada uno de los recursos se presenta a continuación. Muchos de los valores son en especie debido a que se hizo uso de entidades públicas

como el Tecnoparque SENA Cali o se obtuvo apoyo con préstamo de quipos e insumos como la Universidad Nacional o la Universidad Javeriana.

### 9.2.1. Costo materiales usados

Los materiales utilizados en el desarrollo del proyecto hace referencia a la materia prima usada para la fabricación de las tintas. A continuación se presentan los materiales finales usados en la fabricación, ya que a lo largo del proyecto se fueron descartando algunos materiales debido a que no cumplieran con las expectativas. La descripción de estos se presenta en la Tabla 9.3.

Nombre	Valor	Cantidad	Javeriana		Recursos propios		Total
			Especie	Efectivo	Especie	Efectivo	
Poliéster *	\$12,000	1	\$0	\$0	\$0	\$0	\$12,000
Grafito en polvo para cerraduras 20g	\$34,990	1	\$0	\$0	\$0	\$34,990	\$34,990
Barniz de vidrio 60 ml	\$26,223	1	\$0	\$0	\$0	\$26,223	\$26,223
Acetona 120 ml**	\$26,000	1	\$26,000	\$0	\$0	\$0	\$26,000
TOTAL			\$26,000	\$0	\$0	\$61,213	\$99,213

\* Donación de 3M.

\*\* Donación Universidad Javeriana y Universidad Nacional.

Cuadro 9.3: Precio de materiales usados

El valor final obtenido en el Cuadro 9.3 hace referencia al costo total de materia prima. Para obtener el costo final de las formulaciones se debe tener presente el precio por gramo de cada material, el cual se mencionó anteriormente en el capítulo de formulación.

### 9.2.2. Costo de fabricación tinta T6040

En el Cuadro 9.4 se muestra el costo total de los materiales utilizados en la fabricación de la tinta conductora T6040, la cual fue la tinta con mejores resultados en cuanto en las diferentes pruebas realizadas. En la prueba de resistencia, obtuvo resistencia menor a 500 ohm antes y después de la flexión; adicionalmente, el incremento de la resistencia después del doblez no fue significativo en comparación con las demás tintas.

El valor de la resistividad obtenida no sobrepasa drásticamente los límites descritos en los criterios de diseño. Finalmente, su comportamiento en la prueba electroquímica fue adecuado para la fabricación de sensores electroquímicos, teniendo en cuenta los materiales y métodos utilizados para realizar la tinta y la impresión del sensor.

Material	Valor x gramo	Cantidad (g)	Total
Grafito en polvo para cerraduras [109]	\$ 21.9 COP	1.2	\$ 26.28
Barniz de vidrio	\$128 COP	1.8	\$ 212.56
Acetona	\$ 274.26 COP	0.237	\$ 64.94
TOTAL			\$ 304
PRECIO POR GRAMO			\$ 106.35

Cuadro 9.4: Costo de fabricación de la tinta conductora T6040.

Es esencial tener en cuenta que el bajo costo de la tinta también se atribuye al uso de técnicas manuales. Tanto la mezcla de los materiales para fabricar la tinta como la serigrafía para la impresión se llevaron a cabo manualmente. Aunque estas técnicas ayudan a mantener el costo bajo, también pueden influir en los resultados, debido a que aumenta la probabilidad de incurrir en el error humano. Por ende, se realizará una comparación con tintas comerciales para evaluar la eficacia y calidad de la tinta desarrollada.

### 9.3. Comparación con valores de tintas comerciales

La comparación entre las tintas conductoras a bajo costo realizadas en este estudio y las tintas conductoras comerciales ofrece una perspectiva valiosa sobre la efectividad y viabilidad de los materiales y técnicas usadas, en contraste con las soluciones comerciales establecidas. En este apartado, se comparan los valores de resistividad y el precio de adquisición entre las tintas comerciales y la tinta T6040.

#### 9.3.1. Resistividad

A continuación, en el Cuadro 9.5 se muestra la recolección de diferentes tintas conductoras comerciales a base de carbono para imprimir con técnica de screen-print y sus valores de resistividad.

Marca	Producto	Descripción	Resistividad ohm.cm
Creative material	126-28	Tinta de carbono de baja resistencia	0.02
Creative material	128-07	Tinta elastomérica conductiva	0.075
Creative material	112-48A	Tinta conductora	0.05
Creative material	126-48	Tinta conductora de carbón	0.05
Creative material	127-48LR	Tinta conductora lavable a máquina	0.1

Cuadro 9.5: Valores de resistividad de tintas comerciales. Tomados de [17]

En el cuadro anterior se puede observar que la resistividad de la mayoría de las tintas conducto-

ras mantienen sus valores entre el intervalo de 0.05 a 0.1 ohm.cm; por esa razón se tomó ese intervalo como criterio de diseño.

La tinta seleccionada para realizar la validación fue la tinta T6040 con una resistividad máxima de 0.109 ohm.cm a una frecuencia de 1MHz. A pesar de que la resistividad se sale por muy poco del rango planteado de 0.1 ohm.cm en los criterios de diseño, es la tinta que mejor se acopla a estos. Por otro lado, la tinta T7030 mantenía su resistividad entre el intervalo establecido, pero fue descartada debido al gran incremento de resistencia al realizarse la flexión (ver Cuadro 8.2).

### 9.3.2. Precio

Los precios de adquisición para tintas conductoras comerciales se encuentran en el siguiente cuadro; en donde se presenta el precio total de la tinta, el cual incluye el precio, los tiempos de envío y el precio por gramo para realizar la comparación con la tinta T6040.

Marca	Descripción	Cantidad (g)	Tiempo de envío	Precio final (COP)	Precio gramo (COP)
1.Ceres Ink Store	Serigrafía de tinta de carbono de alta conductividad eléctrica, de alta conductividad.	1000	13 a 24 días	449.319	449
2.Ceres Ink Store	Tinta de carbón conductora de serigrafía	1000	13 a 24 días	494.431	494

Cuadro 9.6: Precio y tiempos de envíos de tintas comerciales. Tomado de [18] y [19].

El precio por gramo de cada tinta comercial, presentado en el Cuadro 9.6, es mayor en comparación con el precio calculado para la tinta T6040 (Cuadro 9.4). Por lo tanto, la tinta T6040 es más rentable y muestra que existe una oportunidad para desarrollar sensores de fácil acceso y bajo costo, que sean funcionales en aplicaciones específicas como los sensores electroquímicos. Además, esta tinta es una buena alternativa para la fabricación de sensores de prueba o prácticas de laboratorio, sirviendo como punto de partida para diferentes proyectos o prototipos.

# Dificultades

---

La validación del proyecto de grado enfrentó un problema con la adquisición de una tinta comercial. Se deseaba adquirirla para realizar una comparación más efectiva en términos de resistencia, utilizando moldes estandarizados, cálculo de resistividad y prueba de adhesión. Sin embargo, no se pudo comprar debido a su alto costo, ya que era necesario adquirir una cantidad mínima de 1000 g, lo cual superaba el presupuesto del proyecto.

Además, el tiempo de entrega fue otro factor a considerar, ya que las tintas debían ser importadas. Por lo tanto, el único factor de comparación disponible es la resistividad extraída de las datasheets de tintas conductoras comerciales y su comportamiento en una aplicación específica (sensor electroquímico). El resultado obtenido con el sensor se comparará con el resultado obtenido con un sensor comercial.

# Conclusiones y Trabajos futuros

---

## 11.1. Conclusiones

Este trabajo de grado ha alcanzado los objetivos establecidos, presentando la oportunidad de fabricar tintas conductoras a bajo costo haciendo uso de materiales y técnicas alternativas, conservando y/o acercándose a las características de tintas comerciales.

Por lo tanto, desarrollar estas tintas conductoras a bajo costo no solo busca generar un impacto en la institución, sirviendo como base para nuevos desarrollos y la creación de dispositivos de sentido, sino también ser el primer paso hacia la formación de una nueva industria nacional y la búsqueda de la independencia tecnológica.

En ese orden de ideas, las principales conclusiones de este proyecto son las siguientes:

1. Las formulaciones de las tintas, es decir, los porcentajes de cada componente que las conforman, influyen en sus propiedades mecánicas y eléctricas. A medida que aumenta el porcentaje de aglutinante y disminuye el porcentaje de material conductor, la flexibilidad y la resistencia aumentan. Esto da como resultado un sensor flexible que puede ser utilizado en aplicaciones donde no se requiera una precisión extrema.
2. Usar el material conductor de relleno en una proporción 50% negro de humo y 50% grafito, no garantiza que el comportamiento eléctrico de la tinta vaya a ser más eficiente, al igual que sus propiedades mecánicas. Pues las tintas fabricadas con negro de humo fueron las que presentaron mayor incremento de resistencia después del doblez.
3. La formulación de la tinta y la clase del material de relleno son factores que influyen en el comportamiento que esta pueda tener con el sustrato. Ya que la tinta, al tener más o menos aglutinante, igual será su adhesión al sustrato; y al usar un material con partícula diminuta, influye en la adhesión, dando como resultado que las tintas en las cuales se incorporó el negro de humo presentaron menor adhesión.
4. La elección de un material conductor como base o relleno, con partículas diminutas, afecta las propiedades mecánicas del material, haciéndolo más frágil y susceptible a la ruptura.

5. El sensor fabricado con la tinta conductora final (T6040) tuvo un buen comportamiento al aplicar el ferricianuro de potasio, sustancia que se caracteriza por su reversibilidad. Demuestra que la tinta es apta para la realización de sensores electroquímicos y realizar mediciones.
6. El sensor electroquímico fabricado en el estudio presento menor precio que la tinta importada.

## 11.2. Trabajos futuros

A pesar de finalizar con éxito este trabajo de grado, hay algunas áreas con posibilidad de mejora para explorar en trabajos futuros. Las áreas de mejora identificadas para la expansión y mejoramiento de las tintas son las siguientes:

- **Prueba en otras aplicaciones.** La implementación y el uso de tintas conductoras tiene muchas aplicaciones tales como prototipado rápido de circuitos electrónicos, investigación en electrónica impresa y dispositivos flexibles, desarrollo de componentes electrónicos para aplicaciones específicas, sensores médicos impresos para monitoreo de salud, electrodos impresos para aplicaciones de electrocardiografía, además de la fabricación de sensores electroquímicos. Por lo tanto, sería interesante implementar las tintas conductoras en otro tipo de aplicaciones para así experimentar otro tipo de condiciones y necesidades.
- **Prueba en otros sustratos.** Las tintas conductoras tienen la capacidad de imprimirse en diversos sustratos flexibles, como telas, papel e incluso la piel. Sin embargo, la elección del sustrato influye significativamente en la formulación de la tinta para garantizar el acabado deseado. Por lo tanto, resultaría interesante experimentar con otros tipos de sustratos para observar el comportamiento de la tinta, con el fin de mejorar las formulaciones propuestas y ampliar las opciones de sustratos disponibles.
- **Explorar nuevas técnicas y materiales.** Las técnicas de mezcla e impresión empleadas en este trabajo de grado fueron principalmente manuales, con el objetivo de mantener un bajo costo. Sin embargo, estas metodologías conllevan la posibilidad de errores humanos, como la formación de grumos o la solidificación no deseada de las tintas durante la mezcla. Además, la técnica de impresión manual puede resultar en capas de tinta demasiado gruesas o distribuciones no uniformes, lo que puede provocar problemas de resistencia y afectar las propiedades mecánicas del material.

En cuanto a los materiales utilizados, se exploraron principalmente el negro de humo y el grafito, ambos derivados del carbono. Sería interesante considerar la exploración de otros materiales, como polvos metálicos (virutas) como aluminio, cobre o hierro en forma de partículas finas. Estos metales podrían ofrecer alternativas viables, ya que se pueden adquirir a precios razonables.

- Anexo 1: Resultado prueba de adhesión tinta T5050.



Figura 12.1: Tinta T5050.

- Anexo 2: Resultado prueba de adhesión tinta T6040.

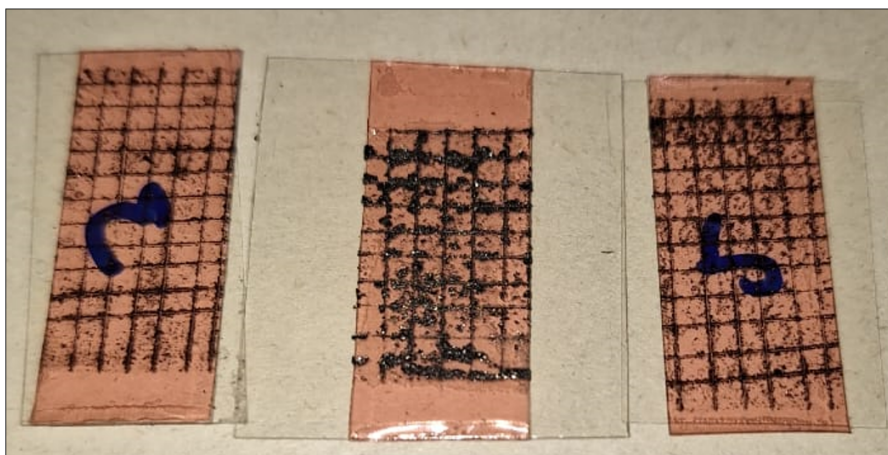


Figura 12.2: Tinta T6040.

- Anexo 3: Resultado prueba de adhesión tinta T7030.

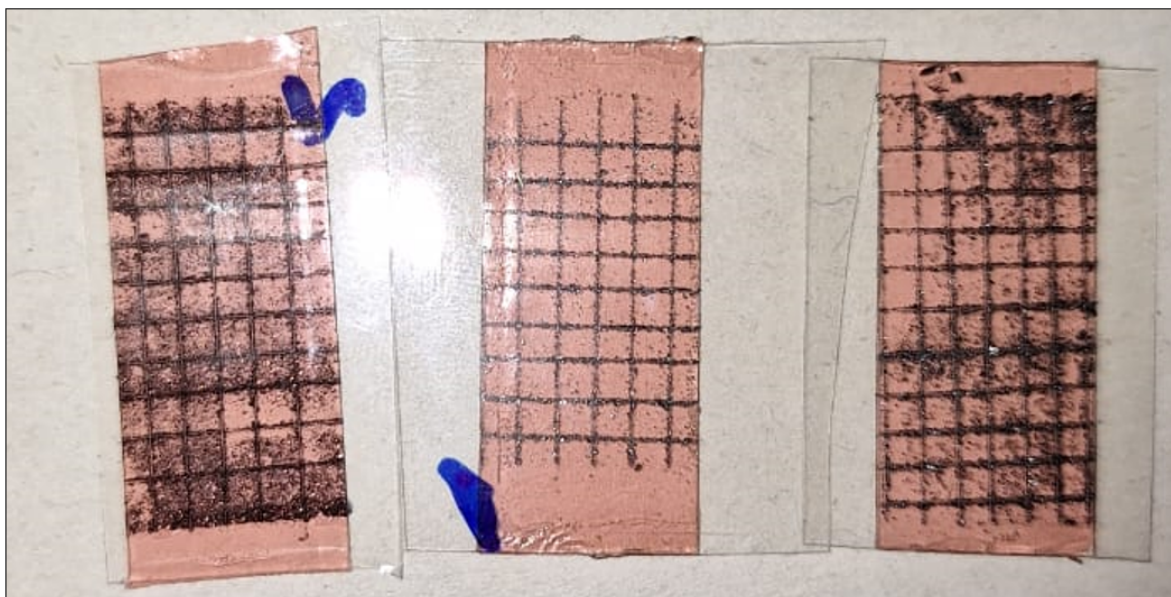


Figura 12.3: Tinta T7030.

- Anexo 4: Resultado prueba de adhesión tinta T8020.



Figura 12.4: Tinta T8020.

- Anexo 5: Resultado prueba de adhesión tinta TN7015.



Figura 12.5: Tinta TN7015.

- Anexo 6: Resultado prueba de adhesión tinta TN8010.

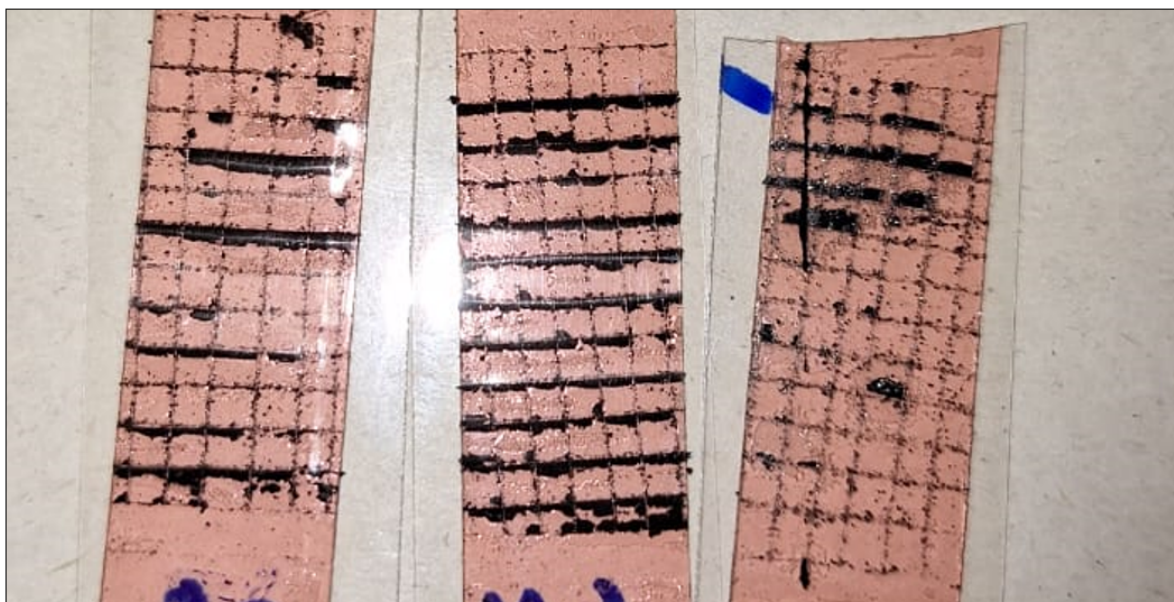


Figura 12.6: Tinta TN8010.

# Bibliografía

- [1] L. A. Pradela-Filho, I. A. Andreotti, J. H. Carvalho, D. A. Araujo, L. O. Orzari, A. Gatti, R. M. Takeuchi, A. L. Santos, and B. C. Janegitz, “Glass varnish-based carbon conductive ink: A new way to produce disposable electrochemical sensors,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 305, p. 127433, 2020.
- [2] “(a) procesos continuos de impresión (cij) y (b) procesos drop-on-demand... | download scientific diagram,” <https://twtr.to/YJAFH>, (Accessed on 07/25/2023).
- [3] “Recubrimiento por inmersión - wikipedia, la enciclopedia libre,” [https://es.wikipedia.org/wiki/Recubrimiento\\_por\\_inmersi%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Recubrimiento_por_inmersi%C3%B3n), (Accessed on 07/25/2023).
- [4] “Serigrafía y pintura conductora de electricidad – prototipadolab,” <https://prototipadolab.com/2017/08/01/pantalla-de-serigr/>, (Accessed on 07/25/2023).
- [5] Y. Luo, M. R. Abidian, J.-H. Ahn, D. Akinwande, A. M. Andrews, M. Antonietti, Z. Bao, M. Berggren, C. A. Berkey, C. J. Bettinger *et al.*, “Technology roadmap for flexible sensors,” *ACS nano*, vol. 17, no. 6, pp. 5211–5295, 2023.
- [6] “Reacciones de Óxido-reducción - curso para la unam,” <https://cursoparalaunam.com/reacciones-de-oxido-reduccion>, (Accessed on 07/27/2023).
- [7] E. Flores, “Voltametría cíclica: la espectroscopía electroquímica. parte i,” *Revista de Química*, vol. 9, no. 2, pp. 165–172, 1995.
- [8] L. A. C. Mendoza, “Implementación de un sistema de medición de resistividad eléctrica en películas delgadas semiconductoras por el método de van der pauw,” Ph.D. dissertation, Pontificia Universidad Católica del Perú (Peru), 2017.
- [9] L. Pradela-Filho, D. Araújo, R. Takeuchi, and A. Santos, “Nail polish and carbon powder: An attractive mixture to prepare paper-based electrodes,” *Electrochimica Acta*, vol. 258, pp. 786–792, 2017.
- [10] L. F. de Lima, A. L. Ferreira, C. C. Maciel, M. Ferreira, and W. R. de Araujo, “Disposable and low-cost electrochemical sensor based on the colorless nail polish and graphite composite material for tartrazine detection,” *Talanta*, vol. 227, p. 122200, 2021.
- [11] “Brillo secante 10ml | brillos para uñas | admis colombia – admis,” [https://admiss.com.co/products/brillo-secante-para-unas-10ml?\\_pos=2&\\_sid=aa8f6e3e0&\\_ss=r](https://admiss.com.co/products/brillo-secante-para-unas-10ml?_pos=2&_sid=aa8f6e3e0&_ss=r), (Accessed on 12/14/2023).
- [12] “Barniz - franco química,” <https://francoquimica.com/tienda/barniz/>, (Accessed on 12/14/2023).

- [13] “Polvo de grafito por 50 g,” <https://www.panamericana.com.co/polvo-de-grafito-por-50-g/p>, (Accessed on 12/21/2023).
- [14] P. F. Neira Salgado *et al.*, “Caracterización de conductividad de hidrogeles utilizando el método de 4 puntas.” 2022.
- [15] “F1842 standard test method for determining ink or coating adhesion on flexible substrates for a membrane switch or printed electronic device,” <https://www.astm.org/standards/f1842>, (Accessed on 08/12/2023).
- [16] J. R. Camargo, L. O. Orzari, D. A. G. Araujo, P. R. de Oliveira, C. Kalinke, D. P. Rocha, A. L. dos Santos, R. M. Takeuchi, R. A. A. Munoz, J. A. Bonacin *et al.*, “Development of conductive inks for electrochemical sensors and biosensors,” *Microchemical Journal*, vol. 164, p. 105998, 2021.
- [17] “Carbon inks – creative materials,” <https://www.creativematerials.com/products/carbon-inks/>, (Accessed on 01/30/2024).
- [18] “Tinta de carbono conductora eléctricamente, impresión de pantalla de yt-581, alta conductividad, 1 kg - aliexpress,” <https://es.aliexpress.com/i/2038313790.html>, (Accessed on 01/31/2024).
- [19] “Tinta conductora de impresión de pvc, tinta de carbono conductora de serigrafía, negro, 35ohm, 1 kg/can - aliexpress,” <https://es.aliexpress.com/i/32816826316.html>, (Accessed on 01/31/2024).
- [20] I. Chopra, “Review of state of art of smart structures and integrated systems,” *AIAA journal*, vol. 40, no. 11, pp. 2145–2187, 2002.
- [21] L. G. C. Ramírez, G. S. A. Jiménez, and J. M. Carreño, *Sensores y actuadores*. Grupo Editorial Patria, 2014.
- [22] L. H. Aguilera, “La basura electrónica y la contaminación ambiental,” *Enfoque UTE*, vol. 1, no. 1, pp. 46–61, 2010.
- [23] N. U. Rubilar, “Desechos electrónicos,” Ph.D. dissertation, Universidad Nacional de La Plata, 2014.
- [24] S. Honda, H. Hara, T. Arie, S. Akita, and K. Takei, “A wearable, flexible sensor for real-time, home monitoring of sleep apnea,” *iScience*, vol. 25, no. 4, p. 104163, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004222004333>
- [25] L. Benages Pardo and J. D. Buldain Pérez, “Detección de actividades humanas con sensores portables.”

- [26] F. Wang, S. Liu, L. Shu, and X.-M. Tao, “Low-dimensional carbon based sensors and sensing network for wearable health and environmental monitoring,” *Carbon*, vol. 121, pp. 353–367, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622317305730>
- [27] K. Takei, “History of flexible and stretchable devices,” *Flexible and Stretchable Medical Devices*, pp. 1–6, 2018.
- [28] S.-T. Han, H. Peng, Q. Sun, S. Venkatesh, K.-S. Chung, S. C. Lau, Y. Zhou, and V. Roy, “An overview of the development of flexible sensors,” *Advanced materials*, vol. 29, no. 33, p. 1700375, 2017.
- [29] I. Corb, F. Manea, C. Radovan, A. Pop, G. Burtica, P. Malchev, S. Picken, and J. Schoonman, “Carbon-based composite electrodes: Preparation, characterization and application in electroanalysis,” *Sensors*, vol. 7, no. 11, pp. 2626–2635, 2007. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/7/11/2626>
- [30] I. A. Kinloch, J. Suhr, J. Lou, R. J. Young, and P. M. Ajayan, “Composites with carbon nanotubes and graphene: An outlook,” *Science*, vol. 362, no. 6414, pp. 547–553, 2018. [Online]. Available: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.aat7439>
- [31] N. Thiagarajan, J.-L. Chang, K. Senthilkumar, and J.-M. Zen, “Disposable electrochemical sensors: A mini review,” *Electrochemistry Communications*, vol. 38, pp. 86–90, 2014. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1388248113004451>
- [32] O. Lavrentovich, P. Pasini, C. Zannoni, and S. Zumer, *Defects in liquid crystals: Computer simulations, theory and experiments*. Springer Science & Business Media, 2001, vol. 43.
- [33] J. C. Costa, F. Spina, P. Lugoda, L. Garcia-Garcia, D. Roggen, and N. Münzenrieder, “Flexible sensors—from materials to applications,” *Technologies*, vol. 7, no. 2, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7080/7/2/35>
- [34] W. Yang and C. Wang, “Graphene and the related conductive inks for flexible electronics,” *J. Mater. Chem. C*, vol. 4, pp. 7193–7207, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/C6TC01625A>
- [35] L. Wang and J. Liu, “Advances in the development of liquid metal-based printed electronic inks,” *Frontiers in materials*, vol. 6, p. 303, 2019.
- [36] A. M. N. Vargas and I. Jaramillo, “La industria de sensores en colombia,” *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmado el Conocimiento*, vol. 22, no. 57, pp. 44–54, 2018.
- [37] R. P. Areny, *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo, 2004.
- [38] Y.-T. Wu, T. Yan, and Z.-J. Pan, “Wearable carbon-based resistive sensors for strain detection: A review,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 4, pp. 4030–4043, 2021.

- [39] J.-M. Tulliani, B. Inserra, and D. Ziegler, “Carbon-based materials for humidity sensing: A short review,” *Micromachines*, vol. 10, no. 4, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-666X/10/4/232>
- [40] F. E. H. Monzón, “(5) la independencia tecnológica y su impacto en el desarrollo nacional y la defensa. | linkedin,” [https://www.linkedin.com/pulse/la-independencia-tecnol%C3%B3gica-y-su-impacto-en-el-huay%C3%A1n-monz%C3%B3n-e20tf/?trk=public\\_profile\\_article\\_view](https://www.linkedin.com/pulse/la-independencia-tecnol%C3%B3gica-y-su-impacto-en-el-huay%C3%A1n-monz%C3%B3n-e20tf/?trk=public_profile_article_view), October 2023, (Accessed on 11/28/2023).
- [41] A. M. Nivia Vargas and I. Jaramillo Jaramillo, “The sensors industry in colombia.”
- [42] B. Arman Kuzubasoglu and S. Kursun Bahadir, “Flexible temperature sensors: A review,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 315, p. 112282, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424720308116>
- [43] M. Santhiago, M. Strauss, M. P. Pereira, A. S. Chagas, and C. C. Bufon, “Direct drawing method of graphite onto paper for high-performance flexible electrochemical sensors,” *ACS applied materials & interfaces*, vol. 9, no. 13, pp. 11 959–11 966, 2017.
- [44] P.-G. Su and C.-S. Wang, “Novel flexible resistive-type humidity sensor,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 123, no. 2, pp. 1071–1076, 2007. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400506007635>
- [45] D. A. Araújo, J. R. Camargo, L. A. Pradela-Filho, A. P. Lima, R. A. Muñoz, R. M. Takeuchi, B. C. Janegitz, and A. L. Santos, “A lab-made screen-printed electrode as a platform to study the effect of the size and functionalization of carbon nanotubes on the voltammetric determination of caffeic acid,” *Microchemical Journal*, vol. 158, p. 105297, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026265X2031626X>
- [46] J. P. Metters, R. O. Kadara, and C. E. Banks, “New directions in screen printed electroanalytical sensors: an overview of recent developments,” *Analyst*, vol. 136, pp. 1067–1076, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/C0AN00894J>
- [47] “2009 ieee taxonomy,” <https://www.ieee.org/content/dam/ieee-org/ieee/web/org/pubs/ieee-taxonomy.pdf>, (Accessed on 08/07/2023).
- [48] V. M. Mello and P. A. Suarez, “As formulações de tintas expressivas através da história,” *Revista virtual de química*, vol. 4, no. 1, pp. 2–12, 2012.
- [49] E. Cosoi, “Guía para las impresoras de inyección de tinta,” *Revista chilena de pediatría*, vol. 77, no. 3, pp. 304–305, 2006.
- [50] A. M. Gallegos Cordovilla, “Estampado de textiles naturales en el ecuador,” B.S. thesis, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato, 2008.

- [51] M. Dondi, M. Blosi, D. Gardini, C. Zanelli, and P. Zannini, “Tecnología de la tinta para la decoración digital cerámica: una visión de conjunto,” *CNR-ISTEC, Faenza y Universidad de Módena y Reggio Emilia, Italia, Qualicer*, 2014.
- [52] S. Bi, W. Dong, B. Lan, H. Zhao, L. Hou, L. Zhu, Y. Xu, and Y. Lu, “Flexible carbonic pen ink/carbon fiber paper composites for multifunctional switch-type sensors,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 124, p. 105452, 2019.
- [53] I. A. de Araujo Andreotti, L. O. Orzari, J. R. Camargo, R. C. Faria, L. H. Marcolino-Junior, M. F. Bergamini, A. Gatti, and B. C. Janegitz, “Disposable and flexible electrochemical sensor made by recyclable material and low cost conductive ink,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 840, pp. 109–116, 2019.
- [54] L. A. Pradela-Filho, I. A. Andreotti, J. H. Carvalho, D. A. Araujo, L. O. Orzari, A. Gatti, R. M. Takeuchi, A. L. Santos, and B. C. Janegitz, “Glass varnish-based carbon conductive ink: A new way to produce disposable electrochemical sensors,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 305, p. 127433, 2020.
- [55] B. M. Rodríguez, “Inkjet and screen printing for electronic applications,” Ph.D. dissertation, Universitat de Barcelona, 2016.
- [56] M. Aresti Bartolomé, “Materiales funcionales imprimibles para aplicaciones electrónicas,” 2017.
- [57] J. Puetz and M. Aegerter, “Dip coating technique,” *Sol-gel technologies for glass producers and users*, pp. 37–48, 2004.
- [58] A. L. Riesco, M. P. Cimadevilla, and O. L. Studio, “Una aproximación técnica a la serigrafía: historia, proceso y aplicaciones.”
- [59] S. Chen, J. Qi, S. Fan, Z. Qiao, J. C. Yeo, and C. T. Lim, “Flexible wearable sensors for cardiovascular health monitoring,” *Advanced Healthcare Materials*, vol. 10, no. 17, p. 2100116, 2021.
- [60] H. Yousefi, H.-M. Su, S. M. Imani, K. Alkhaldi, C. D. M. Filipe, and T. F. Didar, “Intelligent food packaging: A review of smart sensing technologies for monitoring food quality,” *ACS sensors*, vol. 4, no. 4, pp. 808–821, 2019.
- [61] W. Heng, S. Solomon, and W. Gao, “Flexible electronics and devices as human–machine interfaces for medical robotics,” *Advanced Materials*, vol. 34, no. 16, p. 2107902, 2022.
- [62] Y. Wang, L. Yin, Y. Bai, S. Liu, L. Wang, Y. Zhou, C. Hou, Z. Yang, H. Wu, J. Ma *et al.*, “Electrically compensated, tattoo-like electrodes for epidermal electrophysiology at scale,” *Science advances*, vol. 6, no. 43, p. eabd0996, 2020.

- [63] S. Bauer, S. Bauer-Gogonea, I. Graz, M. Kaltenbrunner, C. Keplinger, and R. Schwödiauer, “25th anniversary article: A soft future: From robots and sensor skin to energy harvesters,” *Advanced Materials*, vol. 26, no. 1, pp. 149–162, 2014. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201303349>
- [64] E. Dimitriou and N. Michailidis, “Printable conductive inks used for the fabrication of electronics: an overview,” *Nanotechnology*, vol. 32, no. 50, p. 502009, oct 2021. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6528/abeff>
- [65] C. L. Mantell, *Ingeniería electro-química*. Reverté, 2021.
- [66] “Electroquímica (read-only),” <https://www.ministeriodeeducacion.gob.do/docs/espacio-virtual-de-soporte-para-educacion-no-presencial/SN4E-electroquimicapdf.pdf>, (Accessed on 07/27/2023).
- [67] “Microsoft word - unidad\_10\_electroquimica2007.doc,” [https://exa.unne.edu.ar/quimica/quimgeneral/temas\\_parciales/unidad\\_10\\_Electroquimica2007.pdf](https://exa.unne.edu.ar/quimica/quimgeneral/temas_parciales/unidad_10_Electroquimica2007.pdf), (Accessed on 07/27/2023).
- [68] R. Lapuente Aragón, “Reacciones redox,” *Química*, 2008.
- [69] S. A. Perdomo, V. Ortega, A. Jaramillo-Botero, N. Mancilla, J. H. Mosquera-DeLaCruz, D. P. Valencia, M. Quimbaya, J. D. Contreras, G. E. Velez, O. A. Loaiza *et al.*, “Sensars: A low-cost portable electrochemical system for ultra-sensitive, near real-time, diagnostics of sars-cov-2 infections,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–10, 2021.
- [70] A. Baeza *et al.*, “Sensores y biosensores electroquímicos,” *Facultad de Química, Departamento de química analítica*, p. 2009, 2015.
- [71] —, “Sensores y biosensores electroquímicos,” *Facultad de Química UNM*, pp. 1–15, 2015.
- [72] S. Gómez-Biedma, E. Soria, and M. Vivó, “Análisis electroquímico,” *Revista de Diagnóstico Biológico*, vol. 51, no. 1, pp. 18–27, 2002.
- [73] M. Cano, *Diseño y aplicación de sensores electroquímicos basados en moléculas orgánicas conductoras*. Universidad de Córdoba, Servicio de Publicaciones, 2009.
- [74] “Caracterización de materiales,” <https://www.infinitiaresearch.com/laboratorio-ingenieria-industrial/caracterizacion-materiales/#:~:text=Sirven%20para%20elegir%20las%20mejores,recursos%20disponibles%20en%20las%20empresas.>, (Accessed on 12/12/2023).
- [75] N. TRUCTURADOS, “Análisis de métodos y técnicas de caracterización de materiales,” Ph.D. dissertation, CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA, 2009.
- [76] N. Gallipoli and E. Audry, “Cambio de resistividad en la aleación comercial de aluminio 3003 h14 durante la recristalización,” Ph.D. dissertation, 2004.

- [77] M. T. D. J. Perez Figueroa *et al.*, “Desarrollo de un sistema de medición por efecto hall con el método de van der pauw,” Master’s thesis, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, 2020.
- [78] J. I. C. Penagos, “Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (sem),” *Elementos*, vol. 3, no. 3, pp. 133–146, 2013.
- [79] J. C. Ramos, A. E. V. Luna, and C. M. O. Lima, “Espectroscopia raman y sus aplicaciones,” *Opt. Pura. Apl*, pp. 83–95, 2013.
- [80] G. P. Ciniciato, C. Lau, A. Cochrane, S. S. Sibbett, E. R. Gonzalez, and P. Atanassov, “Development of paper based electrodes: From air-breathing to paintable enzymatic cathodes,” *Electrochimica Acta*, vol. 82, pp. 208–213, 2012.
- [81] M. Santhiago, C. S. Henry, and L. T. Kubota, “Low cost, simple three dimensional electrochemical paper-based analytical device for determination of p-nitrophenol,” *Electrochimica Acta*, vol. 130, pp. 771–777, 2014.
- [82] X. Liang, H. Li, J. Dou, Q. Wang, W. He, C. Wang, D. Li, J.-M. Lin, and Y. Zhang, “Stable and biocompatible carbon nanotube ink mediated by silk protein for printed electronics,” *Advanced Materials*, vol. 32, no. 31, p. 2000165, 2020.
- [83] S. Cinti, N. Colozza, I. Cacciotti, D. Moscone, M. Polomoshnov, E. Sowade, R. R. Baumann, and F. Arduini, “Electroanalysis moves towards paper-based printed electronics: Carbon black nanomodified inkjet-printed sensor for ascorbic acid detection as a case study,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 265, pp. 155–160, 2018.
- [84] J. Mohanraj, D. Durgalakshmi, R. A. Rakkesh, S. Balakumar, S. Rajendran, and H. Karimi-Maleh, “Facile synthesis of paper based graphene electrodes for point of care devices: A double stranded dna (dsdna) biosensor,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 566, pp. 463–472, 2020.
- [85] H. Cankurtaran, E. B. Karadayi, and S. Sungur, “Conductive composites of serigraphic inks and their usage in heavy metal sensor and biosensor,” *Progress in Organic Coatings*, vol. 98, pp. 6–9, 2016.
- [86] S. Bi, L. Hou, H. Zhao, L. Zhu, and Y. Lu, “Ultrasensitive and highly repeatable pen ink decorated cuprammonium rayon (cupra) fabrics for multifunctional sensors,” *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 6, no. 34, pp. 16 556–16 565, 2018.
- [87] A. J. Bandodkar, W. Jia, J. Ramírez, and J. Wang, “Biocompatible enzymatic roller pens for direct writing of biocatalytic materials: “do-it-yourself” electrochemical biosensors,” *Advanced healthcare materials*, vol. 4, no. 8, pp. 1215–1224, 2015.
- [88] I. A. de Araujo Andreotti, L. O. Orzari, J. R. Camargo, R. C. Faria, L. H. Marcolino-Junior, M. F. Bergamini, A. Gatti, and B. C. Janegitz, “Disposable and flexible electrochemical sensor made by recyclable material and low cost conductive ink,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 840, pp. 109–116, 2019.

- [89] E. W. Nery and L. T. Kubota, "Sensing approaches on paper-based devices: a review," *Analytical and bioanalytical chemistry*, vol. 405, pp. 7573–7595, 2013.
- [90] A. Russo, B. Y. Ahn, J. J. Adams, E. B. Duoss, J. T. Bernhard, and J. A. Lewis, "Pen-on-paper flexible electronics," *Advanced materials*, vol. 23, no. 30, pp. 3426–3430, 2011.
- [91] T. Nurak, N. Praphairaksit, and O. Chailapakul, "Fabrication of paper-based devices by lacquer spraying method for the determination of nickel (ii) ion in waste water," *Talanta*, vol. 114, pp. 291–296, 2013.
- [92] W. Dungchai, O. Chailapakul, and C. S. Henry, "Electrochemical detection for paper-based microfluidics," *Analytical chemistry*, vol. 81, no. 14, pp. 5821–5826, 2009.
- [93] A. Hofland, "Alkyd resins: From down and out to alive and kicking," *Progress in Organic Coatings*, vol. 73, no. 4, pp. 274–282, 2012.
- [94] V. J. Quispe León *et al.*, "Aplicación de pintura conductora a base de grafito/znc, para electrodeposición de cobre en sustrato no conductor." Ph.D. dissertation.
- [95] M. Rodrigo Edo *et al.*, "Estudio de la adsorción de tensoactivos poliméricos sobre pigmentos cerámicos en medios orgánicos." 2014.
- [96] "Grafito polvo 18gr - homecenter.com.co," <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/253550/grafito-polvo-18gr/253550/>, (Accessed on 12/21/2023).
- [97] L. Zhang, T. Liu, L. Liu, M. Hu, Y. Yang, A. Mei, and H. Han, "The effect of carbon counter electrodes on fully printable mesoscopic perovskite solar cells," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 3, no. 17, pp. 9165–9170, 2015.
- [98] N. Hauptman, A. Vesel, V. Ivanovski, and M. K. Gunde, "Electrical conductivity of carbon black pigments," *Dyes and Pigments*, vol. 95, no. 1, pp. 1–7, 2012.
- [99] C. Phillips, A. Al-Ahmadi, S.-J. Potts, T. Claypole, and D. Deganello, "The effect of graphite and carbon black ratios on conductive ink performance," *Journal of materials science*, vol. 52, no. 16, pp. 9520–9530, 2017.
- [100] M. M. Ley Samos *et al.*, "Determinación de resistividad eléctrica mediante un robot de manipulación micrométrica." Master's thesis, Universidad de Quintana Roo, 2021.
- [101] "tesa® 4965 original - tesa," <https://www.tesa.com/es-co/industria/tesa-4965-original.html>, (Accessed on 01/11/2024).
- [102] A. J. Bard, L. R. Faulkner, and H. S. White, *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, 2022.
- [103] C. M. Brett and O. Brett, "Principles, methods, and applications," *Electrochemistry*, vol. 67, no. 2, p. 444, 1993.

- 
- [104] P. A. Briso Contreras, “Síntesis y caracterización electroquímica de 4-nitroimidazoles sustituidos en posición uno,” 2009.
- [105] J. R. ARAGÓN GUAJARDO, “Espectroscopia micro raman de segundo orden del grafito mineral,” 2013.
- [106] “Caracterización de materiales de carbono con espectroscopía raman. | metrohm,” [https://www.metrohm.com/es\\_es/applications/bw-tek-applikationen/410000059-B.html](https://www.metrohm.com/es_es/applications/bw-tek-applikationen/410000059-B.html), (Accessed on 02/04/2024).
- [107] “Capítulo 1,” [https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/792/3/TMIP\\_ICYTM3S52011.pdf](https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/792/3/TMIP_ICYTM3S52011.pdf), (Accessed on 02/04/2024).
- [108] J.-B. Donnet, *Carbon black: science and technology*. Routledge, 2018.
- [109] “Grafito en polvo (1 kilo) | ferretería levallejo az,” <https://ferreteriaonlinelevallejoaz.com/grafito-en-polvo-1-kilo/>, (Accessed on 05/27/2024).