

Graphene powder and metal nanoarrays: The perfect combination to create conductive inks

Velasco, Euclides¹, Salas Hernández, José Isaías², and Salamanca Cardenas, Jefferson David³

¹ Universidad de Oriente, (VE) Venezuela, ejvelazcor@gmail.com,

^{2,3} Universidad ECCI - (CO), Colombia, jsalash@eccci.edu.co, jsalamancacar@eccci.edu.co

Abstract- Graphene is a material with unique mechanical and electronic properties that make it very promising in various applications, including flexible electronics and electronic printing. In this work we present a methodology for obtaining conductive inks based on graphene powder by using zinc and copper metallic nanoarrays. The proposed experimental methodology consists of the preparation of a graphene sample using the optimized Hummer method, followed by the incorporation of metallic nanoarrays through the wet impregnation method, and the obtaining of graphene oxide by oxidation techniques. The article describes the different phases of execution starting with the study of the preparation of graphene ink with incorporated metal nanoarrays to end in the estimation of the simulation process for the development of new conductive materials. During the development of the methodology, we wanted to demonstrate that the conductive inks of graphene powder can be an effective electrical conductivity for long term stability, this technique is scalable, which means that it can be applied to the fabrication of electronic devices on a large scale, to be attractive in industrial use.

Keywords-- Graphene, nanoarrays, electrical conductivity, electronic devices, conductive inks.

Polvo de grafeno y nanoarreglos de metales: La combinación perfecta para crear tintas conductoras

Velasco, Euclides¹, Salas Hernández, José Isaías², and Salamanca Cardenas, Jefferson David³

¹. *Universidad de Oriente, (VE) Venezuela, ejvelazcor@gmail.com,*

^{2,3} *Universidad ECCI - (CO), Colombia, jsalash@ecci.edu.co, jsalamancacar@ecci.edu.co*

Resumen- El grafeno es un material con propiedades mecánicas y electrónicas únicas que lo hacen muy prometedor en diversas aplicaciones, incluyendo la electrónica flexible y la impresión electrónica. En este trabajo se presenta una metodología para la obtención de tintas conductoras basadas en grafeno en polvo mediante el uso de nanoarrays metálicos de zinc y cobre. La metodología experimental propuesta consiste en la preparación de una muestra de grafeno con el empleo de método Hummer optimizado, seguido de la incorporación de nanoarrays metálicos a través del método de impregnación húmeda, y la obtención de óxido de grafeno mediante las técnicas de oxidación. En el artículo se describe las diferentes fases de ejecución comenzando con el estudio de la preparación de la tinta de grafeno con nanoarreglos incorporados de metales para finalizar en la estimación del proceso de simulación para el desarrollo de nuevos materiales conductores. Durante el desarrollo de la metodología se quiso demostrar que las tintas conductoras de grafeno en polvo pueden ser una efectiva conductividad eléctrica para la estabilidad a largo plazo, es decir, esta técnica es escalable, lo que significa que puede aplicarse a la fabricación de dispositivos electrónicos a gran escala, para ser atractiva en el uso industrial.

Palabras clave-- Grafeno, nanoarrays, conductividad eléctrica, dispositivos electrónicos, tintas conductoras

I. INTRODUCCIÓN

El grafeno es una forma bidimensional de carbono compuesta por una capa de átomos de carbonos dispuestos en una estructura hexagonal (Rodríguez-González et al., 2023), que posee una alta conductividad eléctrica debido a su estructura de banda electrónica y la movilidad de los electrones en el material (Torres, 2023) para explorar las diversas aplicaciones del grafeno, incluyendo la electrónica flexible, la energía, los sensores y las tintas conductoras.

Las tintas conductoras son formulaciones que contienen partículas conductoras dispersas en un medio líquido o semisólido, permitiendo la impresión de patrones conductores, resalta la relevancia de las tintas conductoras en la fabricación de dispositivos electrónicos flexibles, sensores, antenas, circuitos impresos, entre otros (Calderón y Peñafiel, 2023). Por otro lado, en la obtención del polvo de grafeno permite describir los métodos de preparación de dicho polvo y las técnicas utilizadas para caracterizar las propiedades físicas y químicas, por lo tanto, combinando el polvo de grafeno para explorar las sinergias y las ventajas de combinar nanoarreglos de metales y polvo de grafeno en la formulación de tintas conductoras, considerando las propiedades complementarias de ambos materiales.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Partiendo de estas variables se origina la investigación con la aplicación de la metodología experimental descrita en este estudio con el objetivo de generar la preparación de una muestra de grafeno con nanoarreglos de metales incorporados. En un primer momento, se inicia con una etapa en la preparación de una muestra de óxido de grafeno a través del método de Hummer optimizado, donde se utiliza la combinación de sonificación y síntesis química en lugar de oxidación en condiciones ácidas.

Posteriormente, se continua con una etapa siguiente que implica la impregnación de polvo de grafeno en un soporte de

vidrio con nanoarreglos de metales utilizando el método de impregnación vía húmeda. Durante este proceso, los metales se reducirán in situ para obtener nanoarreglos de metales (Cu y Zn) en la superficie del soporte de vidrio. Se probarán diferentes proporciones de nanoarreglos de metales en la solución de impregnación, y cada muestra se sintetizará e impregnará por triplicado para asegurar la reproducibilidad de los resultados.

El uso de nanoarreglos de metales en el grafeno tiene numerosas aplicaciones potenciales, como en la producción de materiales de alta resistencia y dispositivos electrónicos. La preparación adecuada de la muestra es esencial para obtener resultados precisos y reproducibles, por lo que se utilizarán técnicas cuidadosamente diseñadas y se realizarán varios experimentos en diferentes proporciones de nanoarreglos de metales para comparar los resultados y determinar la mejor proporción de estos materiales para una aplicación específica.

Esta metodología experimental también utiliza técnicas de oxidación para obtener óxido de grafeno, lo que presenta una ventaja sobre los métodos tradicionales de Hummer al ser más suave para el medio ambiente y requerir menos pasos. Con la preparación adecuada de la muestra, se espera contribuir al avance de la investigación en la aplicación de grafeno con nanoarreglos de metales en una amplia gama de campos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo bajo la metodología experimental y controlada que tiene como objetivo establecer relaciones de causa-efecto, para tal fin, se implica el diseño cuidadoso de un experimento, la recolección y el análisis de datos, y la interpretación de los resultados obtenidos. Por consiguiente, la metodología experimental se utiliza en diversa disciplina científica (Reyes, 2022).

El procedimiento del diseño experimental se inicia con la definición clara del objetivo y la pregunta de investigación. Luego, se hizo la revisión bibliográfica que condujo a la planificación del experimento, incluyendo la selección de las variables a medir y controlar, así como la determinación de los grupos de estudios, si corresponde.

Para el cumplimiento del objetivo general determinado en esta investigación se realiza la propuesta, titulada como: Obtener tintas conductoras a base de polvo de grafeno mediante el uso de nanoarreglos de metales de zinc y cobre, tomado según Chua, C. K., y Pumera M (2014). El cual se muestra en la siguiente imagen:

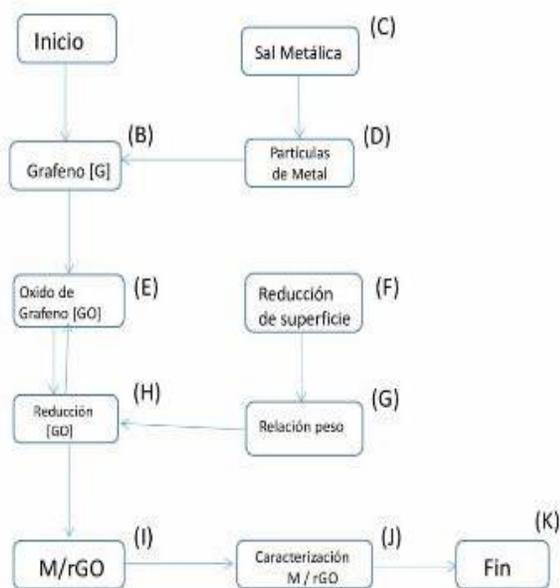


Fig. 1.- Esquema General de la propuesta Metodológica.

B. Metodología experimental

La metodología experimental que se pretende utilizar para preparar tinta de grafeno con nanoarreglos incorporados de metales en tres fases distintas. En la Fase 1 se prepara una muestra de grafeno mediante el método de Hummer optimizado, seguida de la incorporación de nanoarreglos de metales mediante el método por impregnación en vía húmeda y la obtención de óxido de grafeno a través de diferentes técnicas de oxidación. La Fase 2 implica la caracterización de las muestras utilizando diferentes técnicas de análisis, mientras que en la Fase 3 se realiza la prueba de las muestras preparadas en la Fase 1 para su uso como tinta conductora en aplicaciones electrónicas. Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una tinta de grafeno con propiedades eléctricas mejoradas para su uso en electrónica flexible y otros dispositivos electrónicos.

A continuación, se describen cada una de las fases planteadas:

Fase 1: Preparación de tinta de grafeno con nanoarreglos incorporados de metales.

La metodología experimental consiste en la preparación de una muestra de grafeno mediante el método de Hummer, seguida de la incorporación de nanoarreglos de metales mediante el método por impregnación en vía húmeda, y la obtención de óxido de grafeno a través de diferentes técnicas de oxidación.

La fase 1 del estudio consiste en la preparación de tinta de grafeno con nanoarreglos incorporados de metales. Para ello, se seguirán varias etapas, que se describen a continuación. En la etapa A, se hará una lista de reactivos y equipos necesarios para llevar a cabo el proceso. La etapa B consiste en la producción de grafeno utilizando el método de Hummer optimizado. En la etapa C y D, se impregnará el polvo de grafeno sobre un soporte de vidrio utilizando el método de impregnación en vía húmeda para obtener nanoarreglos de metales. Se probarán diferentes cantidades de nanoarreglos de metales en proporciones variadas para optimizar la tinta de grafeno resultante.

A continuación, se describen cada una de las etapas de esta

fase:

Inicio Etapa A.

Lista de reactivos:

- Óxido de grafito
- Agua destilada
- Precursor de sal metálica
- Etilenglicol
- Aceite
- Sales de cloruro de metal (Cu y Zn)
- HCl
- H₂O₂
- Urea
- Arcilla
- NaNO₃
- KMnO₄
- H₂SO₄
- HNO₃
- Borohidruro de sodio
- Hidracina
- Hidróxido de sodio NaOH
- Ácido acético CH₃COOH
- Metales (Cu y Zn)

Lista de equipos:

- Sonificador.
- Baño de aceite.
- Centrífuga.
- Soporte de vidrio.
- Horno.
- Lámparas UV.

Etapa B: Producción de Grafeno. Método de Hummer - Optimizado.

1. Se mezclan 10 mg de óxido de grafito con 10 ml de agua destilada y se somete a un proceso de sonicación a 7500 rpm durante 1 hora, (Ray, S., 2015).

2. Se prepara una solución de precursor de sal metálica al disolver 0.01M en 0.5 ml de etilenglicol. Luego, se agrega esta solución a 20 ml de etilenglicol y se sumerge la mezcla en un baño de aceite a 100°C durante 6 horas. (Luo, J. et al, 2022).

3. Posteriormente, se realiza un lavado con agua destilada y se centrifuga la muestra 5 veces. Finalmente, se seca al vacío a 60°C por 12 horas. (Murugesan, et al. 2022).

Este método descrito no es igual al método de Hummer original porque utiliza una combinación de sonicación y síntesis química en lugar de oxidación en condiciones ácidas. En el método de Hummer tradicional, se utiliza una mezcla de ácido sulfúrico (H₂SO₄), nitrato de potasio (KNO₃) y permanganato de potasio (KMnO₄) para oxidar el grafito a óxido de grafito, presentando algunas ventajas. Primero, el método optimizado es más suave para el medio ambiente porque no utiliza ácido sulfúrico ni otras sustancias tóxicas. Además, la sonicación mejora la dispersión del grafito, lo que aumenta la superficie disponible para la reacción química y, por lo tanto, mejora la eficiencia de la síntesis. La síntesis en sí también es más simple y requiere menos pasos. (Luo, J. y Murugesan, et al. 2022).

Etapa C: Sal Metálica / Etapa D: Partículas de Metal.

Se impregnará polvo de grafeno (GO) sobre un soporte de vidrio mediante el método de impregnación en vía húmeda (IH). En este método, el soporte de vidrio se sumerge en una

solución líquida que contiene los materiales que se desean impregnar, en este caso, polvo de grafeno y nanoarreglos de metales (NPM). (Luo, J. et al, 2022).

El soporte de vidrio se sumerge en la solución durante un tiempo determinado para permitir que los materiales se impregnen en la superficie del soporte de vidrio. Después de la impregnación, el soporte de vidrio se saca de la solución y se seca a temperatura ambiente o se seca con aire caliente. (Murugesan, et al. 2022).

En este caso, durante el proceso de impregnación, las nanoespecies presentes en el soporte se reducirán in situ para obtener nanoarreglos de metales (NPM) (M=Cu y Zn). Esto significa que los metales se reducirán en el lugar mientras se impregnan en el soporte de vidrio, lo que permitirá obtener nanoarreglos de metales en la superficie del soporte de vidrio. (Murugesan, et al. 2022).

Luego, se probarán diferentes cantidades de NPM en proporciones de 0.5:99.5, 1.5:98.5 y 10:90, y las muestras se sintetizarán e impregnarán por triplicado. Esto significa que se prepararán varias soluciones de impregnación con diferentes cantidades de NPM en diferentes proporciones y se impregnarán en el soporte de vidrio en tres ocasiones separadas para asegurar la reproducibilidad de los resultados.

Durante este proceso, las nanoespecies presentes en el soporte se reducirán in situ para obtener nanoarreglos de metales (NPM) (M=Cu y Zn). Se probarán diferentes cantidades de NPM en proporciones de 0.5:99.5, 1.5:98.5 y 10:90, y las muestras se sintetizarán e impregnarán por triplicado. (Zhang, J., et al, 2012).

Etapa E: Obtención del óxido de grafeno [GO] / Proceso de Oxidación.

Se proponen al menos 4 técnicas para conducir esta etapa, y evaluar el mejor rendimiento ponderable, el empleo de estas técnicas dependerá de los recursos y disponibilidad de los recursos en el laboratorio. (Urcuyo Solórzano, R., et al, 2021).

E.1.-Sistema (E) Normal:

Parte de la elaboración de una solución de 100 mg de GO, con alcohol, el cual se sonificará a 7500 rpm para separar las escamas de GO. (Ray, S., 2015).

E.2.-Método de Hummer-Hoffman:

Consiste en tratar el grafeno con una mezcla de H₂SO₄, HNO₃, NaNO₃ y KMnO₄ durante 6 horas, seguido por una adición de H₂O₂ durante otras 6 horas. (Dideikin, A. T., & Vul', A. Y, 2019).

E.3.-Método metalmeccánico:

1. Se mezclará arcilla con una sal de cloruro de metal, HCl, H₂O₂ o urea y agua destilada, y se someterá a una temperatura de 90°C durante 16 horas.

2. La muestra se limpiará por centrifugación y se secará a una temperatura de 50°C a 70°C durante 12 horas.

3. Finalmente, se realizará un secado térmico a una temperatura de 400°C.

Esto de acuerdo al procedimiento seguido por (Hazra, S., & Basu, S., 2016).

E.4.-Técnica Hidrotermal:

Para la obtención del óxido de grafeno, se dispersarán 0.4 mg de GO en agua y se agregarán 0.35 g de MOn*nH₂O, seguido de agua destilada y 0.1 M de NH₃. Todo el proceso se llevará a cabo a una temperatura de 160°C. (González, E.,

& González, F, 2009).

Etapa H: Reducción del Óxido de Grafeno. [GO].

Para la formación de los nanoarreglos del metal sobre el soporte de polvo de grafeno, se añadirá una solución de sal metálica con una concentración determinada y un tensoactivo aniónico (Borohidruro de sodio o Hidracina), y se agitará continuamente a 60° y 70°C. Luego, se añadirá gota a gota 0.8 mg/ml de una base fuerte (Hidróxido de sodio, NaOH) y se agitará por 2 horas. Finalmente, se agregará una solución ácida orgánica (7.0 mg/ml) (ácido acético CH₃COOH) y se agitará por 2 horas más para completar la formación de los nanoarreglos, (Ray, S. 2015).

El borohidruro de sodio (NaBH₄) se usará en la etapa de reducción para reducir el óxido de grafeno a grafeno. Esto se hace para aumentar la conductividad del grafeno mediante la adición de números de electrones a los átomos de carbono. Esto es importante para aplicaciones tales como dispositivos electrónicos, sensores y dispositivos de energía, (Murugesan, N. et al, 2022).

Además, para reducir el óxido de grafeno, se mantendrá durante 3 minutos en hidracina o el hidrato de hidracina y se expondrá a luz UV durante 45 minutos. (Murugesan, N. et al, 2022).

Etapa I: Metal con reducción del óxido de grafeno [M/rGO].

Después de disolver el polvo de grafeno en agua destilada, se dejará en reposo durante 24 horas. Durante la reacción, las especies se reducen in situ para obtener nanoespecies de metal soportadas en el polvo de grafeno (rNPM/rGO). A continuación, se filtrará la mezcla, se lavará y se secará en una estufa a 80°C. (Hazra, S., & Basu, S., 2016).

Fase 2: Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de la tinta de grafeno obtenida a diferentes proporciones

La fase 2 del estudio consiste en la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de la tinta de grafeno obtenida a diferentes proporciones. Para ello se realizarán diversas pruebas, entre las que se incluyen la prueba de difracción de rayos X (DRX) para evaluar la estructura cristalina y el tamaño de partícula, la prueba de microscopía electrónica de transmisión (MET) para evaluar la morfología, tamaño y dispersión de los nanoarreglos metálicos en el grafeno, la prueba de espectroscopía de infrarrojo cercano (IRTF) para determinar los grupos funcionales presentes, la prueba de tensión superficial para medir la fuerza de cohesión de la tinta, la prueba de conductancia y conductividad para medir la capacidad de conducción de la tinta, la prueba de adherencia para comprobar su capacidad de adherencia y la prueba de tamaño de partícula por espectroscopia UV-Visible para determinar la longitud y anchura de los nanorreglos. Todas estas pruebas son fundamentales para comprender las propiedades físicas y químicas de la tinta de grafeno obtenida y para poder seleccionar la mejor proporción de nanorreglos metálicos para su uso en aplicaciones específicas.

A continuación, se describen cada una de las pruebas e:

Prueba (DRX)

Se utiliza para evaluar la estructura cristalina y el tamaño de la partícula, recomendándose analizar en un equipo perteneciente a la gama Siemens D500 con radiaciones monocromáticas para tal fin con parámetros de control

específicos, y velocidad de barrido a intervalos de grados y minutos, por lo que no es requerido realizar tratamiento previo alguno sobre la muestra. (Zhang, J., et al, 2012)

Prueba (MET)

Se utiliza para evaluar la morfología, tamaño y dispersión de los nanoarreglos metálicos en el grafeno, recomendándose un microscopio electrónico de transmisión (MET-FEI TITAN, 200 Kv). La preparación para la observación de las nanoestructuras consistió en la dispersión de las muestras (polvo de grafeno) en alcohol isopropílico, utilizando un baño ultrasónico convencional durante 5 min, deben tomarse alícuotas y ponerse sobre rejillas TEM de cobre, dejándose secar la muestra para su observación en el microscopio. (Zhang, J., et al, 2012)

Prueba (IRTF)

Se realizará con el objetivo de determinar los grupos funcionales presentes en el soporte de grafeno oxidado y en las muestras impregnadas y observar los cambios que se presentan en la zona ubicada en la región de 4000-3000 nm y de 1500-500 nm, recomendándose trabajar con un equipo Perkin-Helmer FT-IR, no siendo requerida ninguna preparación especial para las muestras. (Zhang, J., et al, 2012)

Prueba de Tensión Superficial

Se recomendaría la medición por medio del tensiómetro de Numoy, esto requiere primero la determinación de la tensión superficial del agua destilada como blanco de calibración a temperatura ambiente para obtener los parámetros FT_r y después con las muestras de tintas a diferentes temperaturas (5°, ambiental y 60° C) para obtener diferentes valores de FT y ajustados por una ecuación lineal, obteniéndose los valores indirectos de γ_{exp} (Zhang, J., et al, 2012)

Prueba de Conductancia

Para medir la conductancia de la tinta con diferentes nanopartículas de metales se recomienda emplear equipos de la misma saga YSI 3200, requiriendo calibrar con agua destilada y posteriormente realizando las mediciones sobre las muestras preparadas en dilución. (Zhang, J., et al, 2012).

Prueba de Conductividad

Aquí se recomienda medir mediante un Ohmímetro, o multímetro para medir la conductividad y resistividad sobre las muestras problemas, extendiéndolos sobre superficies a diferentes dimensiones sobre una superficie plana y un material como masking tape, o acrílica. (Zhang, J., et al, 2012)

Prueba de Adherencia

Se recomienda el ensayo de norma de secado ASTM-640, los cuales se practican sobre cintas adhesivas, comprobando su capacidad de adherencia posterior a la aplicación de la tinta sobre los mismos, comprobando si la capa permanece o no adherida al sustrato. (Zhang, J., et al, 2012)

Prueba de tamaño de partícula por UV-Visible

Cuando los nanoarreglos son lo suficientemente largos, pueden absorber la luz en la región UV-Visible debido a la excitación de los electrones en la estructura del grafeno. El pico de absorción en el espectro UV-Visible se correlaciona con la longitud de los nanoarreglos. A medida que la longitud de los nanoarreglos aumenta, el pico de absorción se desplaza hacia longitudes de onda más largas. (Murugesan, N., et al. 2022).

Midiendo el pico de absorción en la espectroscopia UV-Visible, se puede determinar la longitud de los nanoarreglos, y midiendo la anchura de la banda de absorción, se puede determinar la anchura de los nanoarreglos. Recomendado por (Xiang, Q. et al 2011; Xu, C., Wang, X. & Zhu, J. 2008).

Fase 3: Estimación del proceso de simulación para la estimación de las propiedades energéticas en la tinta conductora.

La Fase 3 del proceso de simulación para la estimación de las propiedades energéticas en la tinta conductora es un paso crucial en el desarrollo de nuevos materiales conductores. Esta fase se lleva a cabo en paralelo con la Etapa 1 de Modelado Molecular (MM) utilizando el método de Montecarlo para complejos activados. En esta etapa, se inicia con la elaboración de la estructura molecular deseada mediante un modelado visual de los reactivos, productos y productos intermediarios. Luego, se procede a corregir y optimizar dichas estructuras utilizando el método de búsqueda de ZPM para obtener las mejores estructuras optimizadas. A continuación, se estiman los datos sobre las estructuras intermediarias utilizando un funcional matemático de referencia y una metodología de estimación energética. Finalmente, se reportan los datos energéticos obtenidos de las simulaciones y se utilizan para calcular de forma indirecta la propiedad termodinámica de interés, como la tensión superficial. La Fase 3 es fundamental para la comprensión y mejora de la conductividad de la tinta conductora, lo que permite la creación de materiales innovadores y eficientes en la industria de la electrónica.

Se recomienda iniciar en paralelo con la etapa 1, desde el punto de vista de Modelado Molecular (MM) de acuerdo al método de Montecarlo para complejos-activados, este parte primero de elaborar el dibujo de la estructura molecular que se desea evaluar (modelado visual) de los reactivos, los productos y los productos intermediarios, y una vez obtenidas las estructuras de partida con el mejor detalle experimental se procede a corregir dichas estructuras por una optimización molecular, el cual se recomienda bajo el método por búsqueda de ZPM. Una vez obtenido las mejores estructuras que cumplan con dicho parámetro (Las estructuras optimizadas) se proceden a estimar los datos sobre las estructuras intermediarias corriendo el cálculo bajo un funcional matemático de referencia y con una metodología de estimación energética, finalmente se reportan los datos energéticos obtenidas de las simulaciones y se emplean para calcular de forma indirecta la propiedad termodinámica de nuestra preferencia, en este sentido la tensión superficial.

III. RESULTADOS

Con la preparación de la tinta se dispersó el polvo de grafeno en el solvente y se añadieron los nanoarreglos de zinc y cobre en diferentes proporciones, esta mezcla al ser agitada durante el tiempo determinado alcanza la dispersión homogénea.

Se realizaron pruebas de viscosidad, densidad y estabilidad de tintas obtenidas, donde se mide la conductividad de las tintas utilizando el equipo especializado que permitió imprimir en diferentes sustratos, como papel, plástico y vidrio. Este proceso arrojó como resultado que, las tintas presentaron una viscosidad adecuada para la impresión y una densidad dentro de los rangos

aceptables.

De igual modo, la estabilidad de las tintas fue satisfactoria, mostrando una baja sedimentación del polvo de grafeno y los nanoarreglos de zinc y cobre añadidos, esto con relación con respecto a la caracterización de las tintas.

No obstante, con respecto a la evaluación de la conductividad se obtuvo que las mediciones demostraron que las tintas presentaban propiedades conductoras en todos los sustratos, siendo mayor en los sustratos no porosos donde se obtuvo una resistencia eléctrica más baja.

Finalmente, las tintas mostraron buena resistencia al agua, manteniendo su conductividad después de estar expuestas a condiciones húmedas, al igual que las resistencias al calor y la abrasión se modificó de acuerdo a la cantidad de nanoarreglos de metales utilizados, observándose una mejora en la estabilidad con mayores concentraciones de nanoarreglos.

IV. CONCLUSIONES

En esta investigación experimental, se logró obtener tintas conductoras a base de polvo de grafeno utilizando nanoarreglos de metales de zinc y cobre como aditivos. Las tintas conductoras en diferentes sustratos y una buena estabilidad en condiciones ambientales.

Los resultados obtenidos muestran que estas tintas podrían ser empleados en aplicaciones de impresión electrónica, como la fabricación de circuitos flexibles, dispositivos y sensores. Aunque se considera, con esta investigación, que aun se requiere un estudio más detallado de las propiedades mecánicas y la durabilidad a lo largo de estos materiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Calderón Mora, E. J., y Peñafiel Jiménez, R. B. (2023). Diseño multifísica y fabricación de una Patch Antena Microstrip usando tecnologías de tinta continua conductora de impresión (Bachelor's thesis).
- [2] Chua, C. K., & Pumera, M. (2014). Chemical reduction of graphene oxide: a synthetic chemistry viewpoint. *Chem. Soc. Rev.*, 43(1), 291-312. <https://doi.org/10.1039/c3cs60303b>
- [3] Cranford, S. W., & Buehler, M. J. (2011). Mechanical properties of graphyne. *Carbon*, 49(13), 4111-4121. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.05.024>
- [4] Dideikin, A. T., & Vul', A. Y. (2019). Graphene Oxide and Derivatives: The Place in Graphene Family. *Frontiers in Physics*, 6. <https://doi.org/10.3389/fphy.2018.00149>
- [5] Dreyer, D. R., Park, S., Bielawski, C. W., & Ruoff, R. S. (2010). The chemistry of graphene oxide. *Chem. Soc. Rev.*, 39(1), 228-240. <https://doi.org/10.1039/b917103g>
- [6] González, E., & González, F. (2009). Síntesis por radiación con microondas de nanotubos de carbono. Grupo de Nanociencia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D.C., Colombia Centro de Ciencia y Tecnología Nanoescalar, Bogotá, D.C., Colombia Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, Santafé, Argentina. Recibido: 15-07-2007; Aceptado: 29-01-2009. Correo electrónico del autor: egonzalez@javeriana.edu.co, lfgonzalez@unl.edu.ar
- [7] Hansora, D. P., Shimpi, N. G., & Mishra, S. (2015). Graphite to Graphene via Graphene Oxide: An Overview on Synthesis, Properties, and Applications, 67, 2855-2868.
- [8] Hazra, S., & Basu, S. (2016). Graphene-Oxide Nano Composites for Chemical Sensor Applications. *C*, 2(2), 12. <https://doi.org/10.3390/c2020012>
- [9] Luo, J., Dai, Z., Feng, M., Gu, M., & Xie, Y. (2022). Graphitic carbon nitride/ferroferric oxide/reduced graphene oxide nanocomposite as highly active visible light photocatalyst. *Nano Research*, 16(1), 371-376.

<https://doi.org/10.1007/s12274-022-5110-z>

- [10] Murugesan, N., Suresh, S., Kandasamy, M., Murugesan, S., Pugazhenthiran, N., & Karthick Kumar, S. (2022). Enhancing selectivity of solar absorber using reduced graphene oxide modified nickel oxide nanocomposite thin films. *Solar Energy*, 247, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.016>
- [11] Novoselov, K. S., et al. (2012). A roadmap for graphene. *Nature*, 490, 192-200.
- [12] Urcuyo Solórzano, R., Cordero Solano, K. V., & Gonzalez Flores, D. A. (2021). Perspectivas y aplicaciones reales del grafeno después de 16 años de su descubrimiento. *Revista Colombiana de Química*, 50(1), 51-85. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v50n1.90134>
- [13] Post Author: CC. (2019, 3 abril). Grafeno, el material del futuro. Síntesis y propiedades. *CienciAcierta*. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2017/06/28/grafeno-el-material-del-futuro-sintesis-y-propiedades/>
- [14] Ray, S. (2015). Applications of Graphene and Graphene-Oxide Based Nanomaterials. Elsevier *Gezondheidszorg*.
- [15] Reyes, E. (2022). Metodología de la investigación científica. Page Publishing Inc.
- [16] Rodríguez-González, C., Ayala-Fonseca, L. A., y Castillo, P. S. (2023). Interacciones de nanoestructuras sobre óxido de grafeno. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 16(31), 1e-23e.
- [17] Torres Hinojosa, G. I. (2023). Estudio de recubrimientos nanotecnológicos de películas delgadas para minimizar la corrosión en los elementos componentes de acero galvanizado de la red de distribución eléctrica (Bachelor's thesis).
- [18] Xiang, Q., Yu, J., & Jaroniec, M. (2011). Preparation and Enhanced Visible-Light Photocatalytic H₂-Production Activity of Graphene/C₃N₄ Composites. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(15), 7355-7363. <https://doi.org/10.1021/jp200953k>
- [19] Xu, C., Wang, X., & Zhu, J. (2008). Graphene-Metal Particle Nanocomposites. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(50), 19841-19845. <https://doi.org/10.1021/jp807989b>
- [20] Zhang, J., Yu, J., Jaroniec, M., & Gong, J. R. (2012). Noble Metal-Free Reduced Graphene Oxide-Zn<i>Cd</i>-<i>x</i> Nanocomposite with Enhanced Solar Photocatalytic H<i>2</i>-Production Performance. *Nano Letters*, 12(9), 4584-4589. <https://doi.org/10.1021/nl301831h> Translated J. Magn. Japan, vol. 2, pp. 740-741, August 1987 [Digest 9th Annual Conf. Magnetics Japan, p. 301, 1982].
- [21] M. Young, *The Technical Writer's Handbook*, Mill Valley, CA: University Science, 1989.

