

# Caracterización eléctrica de óxido de grafeno expuesto a la luz UV

Alondra Itzel Hernández-Gutierrez, Jessica Paola Córdova-Fraga, Gonzalo Páez-Padilla, Carlos Villaseñor-Mora, Francisco Miguel Vargas-Luna, Svetlana Kashina, Jose Marco Balleza-Ordaz, Modesto Antonio Sosa-Aquino

**Abstract**—La capacidad que posee un material para absorber radiación depende fundamentalmente de su composición química y, de los defectos estructurales inducidos. El óxido de grafeno (GO) recientemente se ha utilizado en la determinación de dosis absorbida para altas y bajas energías. Al tratar radiación ionizante existen dos técnicas para la de determinación de dosis absorbida, una de ellas es la termoluminiscencia (TL) y la otra la luminiscencia ópticamente estimulada (LOE). A fin de proponer una técnica más accesible, en el presente trabajo propone la caracterización eléctrica de óxido de grafeno expuesto a una fuente de luz UV. Se empleó tinta conductiva de óxido de grafeno depositada por Drop cast sobre una placa fenólica de cobre, la cual fue tomada como una carga resistiva en un circuito divisor de voltaje. Se desarrollaron dos configuraciones sujetas a un rango de frecuencias (1 Hz a 12 MHz) empleando una fuente de voltaje (GwINSTEK, Taiwán) y un osciloscopio (Tektronix, China). En la primera configuración la tinta fue expuesta a una fuente ultravioleta con una longitud de onda de 365 nm y la otra sin la presencia de la fuente. Los resultados muestran cambios de potencial eléctrico en el óxido de grafeno ante la radiación UV. Es necesario realizar estudios adicionales para establecer el óxido de grafeno como un sensor de radiación ionizante en tiempo real.

**Index Terms**—Óxido de grafeno, luz UV, voltaje.

## I. INTRODUCTION

Uno de los principales objetivos de la dosimetría es el prevenir efectos o daños nocivos a la salud ocasionados por la radiación, especialmente en aquellos lugares u instalaciones que hacen uso de ella; la industria de los alimentos y los hospitales son un claro ejemplo. particularmente, en los hospitales cuentan con un servicio de braquiterapia, radioterapia y el área de imágenes en las que, todas ellas poseen un contacto directo con fuentes naturales u artificiales de radiación (cobalto 60, generador de rayos x, acelerador lineal, tomografía, pet, etc.). Independientemente del servicio u área en el hospital (oncología, medicina nuclear, imágenes) el paciente es sometido a un campo de radiación y colateralmente los médicos, enfermeras y técnicos titulares del tratamiento son también propensos a ser afectados por la radiación así, la manera de cuantificar en aproximación cuanta dosis absorbe o recibe el paciente o poe (personal ocupacionalmente expuesto) consiste en el uso de dosímetros y en su posterior lectura en una institución aprobada por la comisión nacional de seguridad nuclear y salvaguardias (cnsns).

Los dosímetros se clasifican en dos categorías dependiendo de sí cuentan o no con un sistema de alimentación. los que no poseen baterías o un sistema de alimentación se conocen como

dosímetros pasivos siendo los más comunes los dosímetros termoluminiscentes y los dosímetros de película. los dosímetros que tienen un sistema de alimentación se conocen como dosímetros activos, los cuales, son fundamentalmente de dosímetros electrónicos basados en diodos de si o en tubos Geiger–Muler [1].

La principal desventaja reportada en los dosímetros pasivos es el desvanecimiento de la señal conforme pasan los días, esto, implica que, para una medición más realista o confiable, la lectura debe de realizarse minutos después de exponer el dosímetro a un campo de radiación. otra desventaja es la saturación del dosímetro en una alta dosis de radiación, es decir, el dosímetro se vuelve incapaz de almacenar más energía en un valor límite de radiación, otro de los problemas vistos es la sensibilidad de los materiales ante factores ambientales como la luz, humedad y temperatura, asimismo, se incluye que para obtener una lectura o dato del dosímetro pasivo, se necesitan equipos especializados de alto costo, por mencionar un ejemplo, en los dosímetros termoluminiscentes la clínica necesita adquirir un equipo harshaw tld 3500 para facilitar la obtención de datos en el menor tiempo posible. cabe mencionar, un hospital no cuenta con tales equipos especializados, los dosímetros termoluminiscentes son enviados a una institución externa avalada por la cnsns. en el caso de los dosímetros electrónicos se re- portan fallos o imprecisión en las mediciones arrojadas, poca duración de las baterías, peso y precios elevados [1].

El objetivo del presente trabajo es evaluar los cambios estructurales que experimenta el óxido de grafeno ante la radiación para establecer o definir si dicho material puede ser una alternativa a los materiales convencionales o estándar en dosimetría. se analiza la viabilidad de una técnica de caracterización eléctrica basada en medir el cambio de una variable eléctrica (resistencia y voltaje) del óxido de grafeno tras ser excitado con luz ultravioleta.

## II. MARCO TEÓRICO

### A. Óxido de grafeno

El óxido de grafeno (GO) es una lámina de grafeno funcionalizada con diferentes grupos oxigenados que se puede emplear como precursor del grafeno o como un material grafénico en sí mismo [2].

Síntesis del óxido de grafeno La ruta más común para sintetizar óxido de grafeno consiste en la oxidación de grafito en un medio acuoso utilizando grandes cantidades de agentes oxidantes. Los tres principales métodos para la oxidación del

Manuscript received on 12/02/2023, accepted for publication on 14/05/2023.

A.I. Hernández Gutiérrez, J.P. Córdova Fraga, G. Páez Padilla, C. Villaseñor Mora, F.M. Vargas Luna, S. Kashina, J.M. Balleza Ordaz, and M.A. Sosa

Aquino are with the Universidad de Guanajuato, División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, México. Autor de correspondencia es J.P. Córdova Fraga (tcordova@ugto.mx).

TABLA I  
PRINCIPALES MÉTODOS DE OXIDACIÓN DEL GRAFITO

Método	Oxidantes	Solventes	Tiempo de oxidación	Comentarios
Brodie	$KClO_3$	$HNO_3$	3 - 4 días	Estable, poco contaminante, poca distancia entre capas, lento.
Staudenmaier	$KClO_3$	$HNO_3$ , $H_2SO_4$	4 días	Lento.
Hummer & Offeman	$NaNO_3$ , $KMnO_4$	$H_2SO_4$	1 hora	Muy contaminante. Reacción rápida.



Fig. 1. Pasos generales para la síntesis de óxido de grafeno

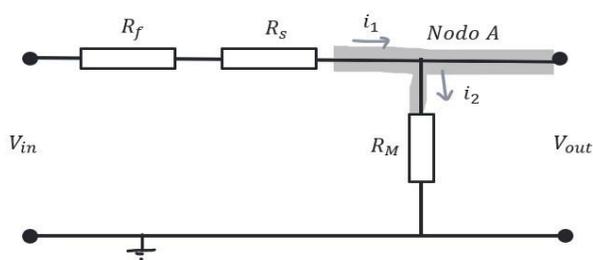


Fig. 2. Circuito eléctrico divisor de voltaje

grafito son: Hummer & Offeman, Staudenmaier y Brodie. En la Tabla 1 se coloca la comparación de éstos tres métodos [3].

Tras oxidar el grafito con alguno de los métodos enlistados en la Tabla 1 el producto resultante es óxido de grafito. El óxido de grafito se somete a un proceso de exfoliación para dar obtener finalmente el óxido de grafeno. En el proceso de exfoliación, el óxido de grafito se disuelve en agua destilada y se somete a un baño de ultrasonidos durante al menos 4.5 horas. El producto sólido final se obtiene usando un equipo de centrifugación [4]. En la Figura 1 se muestran los pasos generales para el tratamiento y obtención de óxido de grafeno.

No existe una fórmula u estequiometría específica para el óxido de grafeno ya que, ésta depende tanto del grafito del que proviene como de las condiciones en el proceso de oxidación al que se somete [2].

### B. Circuito eléctrico de referencia

En la Figura 2 se muestra el circuito base o circuito de referencia que se replicó en el presente trabajo.  $R_f$  es la resistencia asociada a la fuente de alimentación,  $R_s$  es la resistencia arbitraria que el usuario introduce en el circuito y  $R_M$  es la resistencia del material. Se desarrolla a continuación una serie de cálculos en los que se obtiene una relación matemática entre el voltaje de entrada  $V_{in}$  y el voltaje de salida  $V_{out}$ . De la Figura 2, en el nodo A inciden dos corrientes tales que, al aplicar la ley de corrientes de Kirchhoff se tiene:

$$-i_1 + i_2 = 0A. \quad (1)$$

Sustituyendo las corrientes en términos de resistencias y diferencia de voltajes por medio de la ley de Ohm, la ecuación anterior se reescribe a:

$$-\frac{V_{in} - V_{out}}{R_f + R_s} + \frac{V_{out} - 0V}{R_m} = 0A, \quad (2)$$

$$-\frac{V_{in}}{R_f + R_s} + \frac{V_{out}}{R_f + R_s} + \frac{V_{out}}{R_m} = 0A. \quad (3)$$

Agrupando términos:

$$V_{out} \left( \frac{1}{R_f + R_s} + \frac{1}{R_m} \right) = V_{in} \frac{1}{R_f + R_s}. \quad (4)$$

Simplificando:

$$V_{out} \left( \frac{R_f + R_s + R_m}{R_m(R_f + R_s)} \right) = V_{in} \frac{1}{R_f + R_s}, \quad (5)$$

$$V_{out} \left( \frac{R_f + R_s + R_m}{R_m} \right) = V_{in}. \quad (6)$$

Despejando  $V_{out}$  en términos de  $V_{in}$  queda:

$$V_{out} \left( \frac{R_f + R_s + R_m}{R_m} \right) = V_{in}. \quad (7)$$

También es posible determinar la resistencia variable del material de interés al despejar  $R_M$  de la ecuación (3).

### III. MATERIALES Y MÉTODO

Se enlistan a continuación los materiales empleados:

1. óxido de grafeno,
2. Isopropanol,
3. Nafión,
4. Placas fenólicas,
5. Multímetro,
6. Generador de funciones GWInstek modelo AFG – 2112,
7. Resistencia de 220  $\Omega$  y 1 M $\Omega$ ,
8. Protoboard,
9. Cables caimán,
10. Osciloscopio Tektronix, modelo TDS 1002C – EDU,
11. Fuente de luz ultravioleta,
12. Inyector de corriente.

A manera general, el procedimiento fue dividido en 6 etapas, las cuales fueron:

- Preparación de la tinta conductiva de óxido de grafeno,
- Adhesión de la tinta conductiva de óxido de grafeno en una pista o depósito,
- Montaje o configuración del circuito eléctrico,
- Alimentación del circuito eléctrico,
- Excitación del material,
- Monitorización u obtención de una señal eléctrica.

El óxido de grafeno (GO) fue proporcionado por la División de Ciencias Naturales Exactas, Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato. Se recibió un contenedor con el óxido de grafeno en polvo y de dicho polvo se tomaron 351 mg. A los 351 mg de óxido de grafeno el polvo se le añadieron 1200  $\mu$ L de isopropanol actuando éste como solvente. Luego, a la mezcla

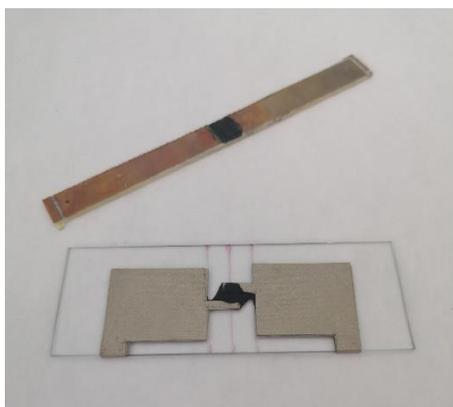


Fig. 3. Diseños de pista para la colocación de la tinta conductiva de óxido de grafeno

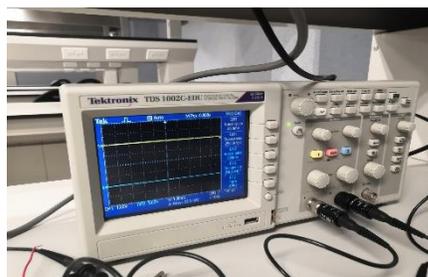


Fig. 4. Osciloscopio Tektronix, modelo TDS 1002C - EDU.

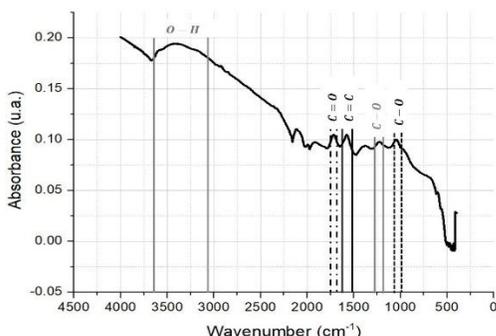


Fig. 5. Identificación de grupos funcionales en el espectro FTIR del óxido de grafeno.

TABLA II

RANGOS DE NÚMERO DE ONDA IDENTIFICADOS PARA GRUPOS FUNCIONALES ESPECÍFICOS. INFORMACIÓN EXTRAÍDA DE [5]

Absorción (cm <sup>-1</sup> )	Apariencia	Grupo	Clase de compuesto
3550-3200	Fuerte, Amplia	O-H	Alcohol
1720-1706	Fuerte	C=O	Ácido Carboxílico
1650-1566	Media	C=C	Alqueno Cíclico
1210-1163	Fuerte	C-O	Eter
1085-1050	Fuerte	C-O	Alcohol primario

óxido de grafeno con isopropanol se le agregaron 200µL de nafión así, la solución con las tres componentes fue agitada con el uso de un sonicador de 50 W durante media hora.

Al producto resultante se le asignó el nombre de tinta conductiva de óxido de grafeno, es decir:

$$\text{Tinta conductiva de GO} = \text{GO} + \text{Isopropanol} + \text{Nafión.}$$

Al tener preparada la tinta conductiva de óxido de grafeno se realizó el diseño de un depósito o un contenedor para colocarla, esto con el fin de asegurar su introducción e uso en el circuito eléctrico. Los dos diseños implementados se muestran en la Figura 3. Uno de los diseños fue bosquejado e impreso en una placa fenólica con máquina CNC; el segundo diseño está compuesto por un portaobjetos y láminas de cinta de cobre. En ambos diseños la tinta conductiva de óxido de grafeno se colocó en el centro de la pista.

Para la toma de lecturas, se utilizó un circuito eléctrico divisor de voltaje.

El circuito fue alimentado con corriente alterna en un rango de frecuencias de 1 Hz a 12 MHz considerando que los 12 MHz es el valor máximo entregado por el generador de funciones GWInstec AFG - 2112. Para cada frecuencia, la tinta conductiva de óxido de grafeno fue medida con y sin la presencia de luz ultravioleta; la muestra era irradiada con lámpara UV durante 1 minuto, dicho tiempo es el valor mínimo encontrado para estabilizar u observar una señal de salida en el osciloscopio.

De la señal visualizada en el osciloscopio, se extraían del canal 1 el voltaje de entrada ( $V_{in}$ ) o bien, el voltaje suministrado por el generador de funciones y del canal 2, el voltaje de salida ( $V_{out}$ ) que representa el voltaje medido en la tinta conductiva de óxido de grafeno. En la Figura 4 los canales se identifican en las puntas o cables color negro localizados bajo 3 perillas. El inyector de corriente se empleó como un circuito eléctrico complemento al circuito divisor de voltaje. Con tal configuración se usó un rango de frecuencias de 30 kHz a 12 MHz puesto que, por debajo de los 30 kHz la señal presentaba mucho ruido tal que, dificultaba una obtención confiable de las mediciones.

En este montaje se analizó en edición un posible cambio de la composición química de la tinta sintetizada, para ello, se usaron dos de las pistas impresas en la máquina CNC impregnándolas con la tinta conductiva en dos instantes de tiempo diferentes. En la primera pista o placa 1 la tinta fue depositada al término de su elaboración, por otro lado, en la segunda placa la tinta fue colocada 4 días después de su síntesis.

#### IV. RESULTADOS

Una de las técnicas de caracterización efectuada en el óxido de grafeno para observar los grupos funcionales que posee, fue obtener un espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier o bien, FTIR. El espectro FTIR de la muestra en polvo se evaluó en el rango de 4000 cm<sup>-1</sup> a 400 cm<sup>-1</sup> con una resolución de 4 cm<sup>-1</sup> y un registro de 36 barridos para cada lectura. En la Figura 5 se muestra el espectro obtenido y los intervalos aproximados en el número de onda que, corresponden a enlaces químicos específicos.

Una vez identificados los grupos funcionales en la gráfica, se realizó una comparación con tablas definidas en la literatura en las que se otorgan rangos para designar qué tipo de enlace y qué elementos químicos están asociados a determinados números de onda. Los grupos funcionales encontrados en la muestra de óxido de grafeno en polvo se observan en la Tabla 2.

Asimismo, se realizó un espectro FTIR de grafito proveniente de un lápiz 2B, éste último espectro se elaboró para hacer una comparación entre los materiales para evidenciar la

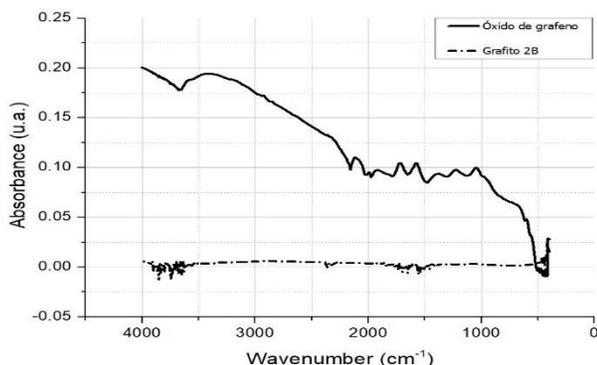


Fig. 6. Comparación del espectro FTIR del óxido de grafeno y el grafito proveniente de un lápiz 2B

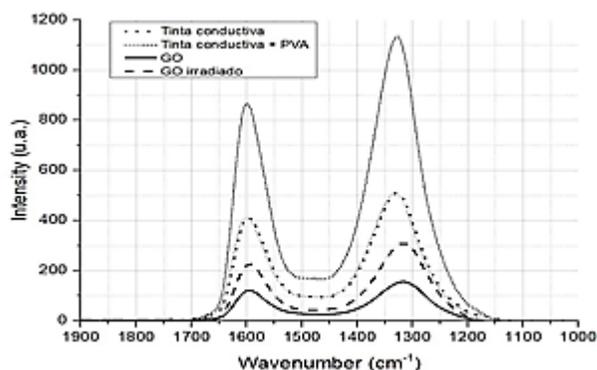


Fig. 7. Espectro Raman de diferentes muestras elaboradas con óxido de grafeno.

TABLA III  
NÚMEROS DE ONDA PARA LOS PICOS G, D Y RELACIÓN DE ÁREAS G/D DE ACUERDO AL MATERIAL

Material	Pico G $cm^{-1}$	Pico D $cm^{-1}$	Relacion de áreas G/D (%)
Tinta conductiva de GO	1599.7±3	1327.6±2.2	56±6
Tinta conductiva de GO+PVA	1061.2±1.5	1326.6±1.9	72±7
GO	1594.7±4	1319±5.1	61±8
GO irradiado	1596.1±3.8	1314.4±4.3	46±2
GO (S. Muhammad, 2013)	1590	1343	-

absorbancia originada por la presencia de grupos funcionales que contienen oxígeno en el óxido de grafeno. Vea la Figura 6.

De la Figura 6 es posible apreciar la absorbancia aproximadamente cero en el grafito del lápiz 2B debido a que éste último no cuenta con los grupos funcionales con oxígeno que el óxido de grafeno sí posee. El grafito consta esencialmente de enlaces C - C formando estructuras hexagonales.

Otra de las técnicas de caracterización elaborada en cuanto al análisis estructural del óxido de grafeno fue la espectroscopía Raman. Se utilizó el láser con longitud de onda de 780 nm y con potencia de 10 mW, luego, el tiempo de exposición o collect exposure time fue de 12 segundos. En el espectro Raman

se buscó analizar la posición de los picos D y G omitiendo los picos 2D y el D + D'. Cabe mencionar, el pico G da información sobre los enlaces C - C con hibridación sp<sup>2</sup>, por su parte, la banda D está relacionada con el grado de desorden estructural o presencia de defectos.

El motivo por el cual se analizaron únicamente los picos D y G (además de aproximar su posición) fue obtener el área bajo los picos pues, la relación de área G/D proporciona información sobre la cristalinidad del material. En la Figura 7 se colocan los diferentes espectros Raman generados según la sustancia examinada. Para este estudio no solo se evaluó el óxido de grafeno sintetizado, sino que se incluye la tinta conductiva de óxido de grafeno preparada.

La altura de los picos, entre mayor sea, se puede entender como la colocación del objetivo del microscopio en una zona del óxido de grafeno en la que se encontraba más concentrado, o bien, con más material.

Dos variantes que se realizaron en la toma del espectro Raman fueron: la mezcla de la tinta conductiva de óxido de grafeno con el polímero PVA (acetato de polivinilo) considerando que el PVA es transparente a la luz UV y, la segunda variante es la irradiación del polvo de óxido de grafeno en un campo de 10 cm × 10 cm con una dosis de 20 Gy en un acelerador lineal de uso médico (LINAC) que operó en el modo de rayos X con energía de 6 MeV. En la Tabla 3 se colocan los valores localizados para las posiciones de los picos G y D respectivamente en función del material analizado. Tomando como ejemplo la tinta conductiva de óxido de grafeno, de la relación de áreas se establece la siguiente relación:

$$G = 56\% D, \quad (8)$$

$$G = (56\%)D. \quad (9)$$

Es posible decir que, la cantidad de enlaces en el material que presentan hibridación sp<sup>2</sup> equivale a un 56% de la proporción que existe de defectos en el material. En el caso de la mezcla tinta conductiva de óxido de grafeno más PVA, el PVA es el agente que contribuye a que existan más enlaces con hibridación sp<sup>2</sup>. Por otro lado, el resultado del óxido de grafeno refleja el aumento del área bajo el pico D, es decir, la irradiación indujo mayor cantidad de desorden estructural que, pueden interpretarse como rupturas de enlaces más que defectos; los grupos funcionales con oxígeno se ven como defectos en la estructura hexagonal de C - C precursora.

En cuanto a la ubicación en el número de onda de los picos G y D, el resultado en el pico G fue el que tuvo mayor exactitud al compararlo con otros trabajos ya realizados (en la Tabla 3 se compara con S. Muhammad, 2013), por otro lado, el pico D se aleja 15  $cm^{-1}$  como mínimo del valor reportado tomado como referencia (1343  $cm^{-1}$ ). Cabe señalar que, la diferencia de 15  $cm^{-1}$  sigue siendo una diferencia tolerable.

#### A. Caracterización eléctrica

Como se ha mencionado en la sección de Metodología, la caracterización eléctrica en cuanto al procedimiento, fue dividido en 6 etapas señaladas a continuación:

1. Preparación de la tinta conductiva de óxido de grafeno
2. Adhesión de la tinta conductiva de óxido de grafeno en una pista o depósito

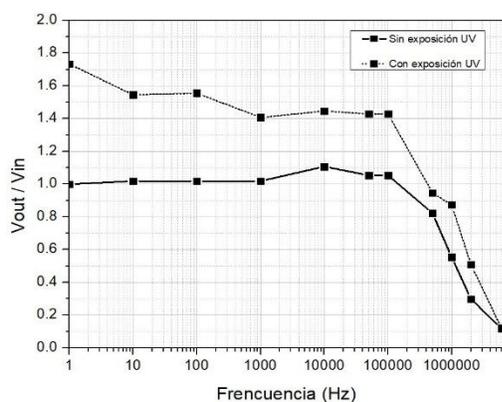


Fig. 8. Respuesta de la tinta conductiva de óxido de grafeno en las mediciones efectuadas con la resistencia de 220 Ω

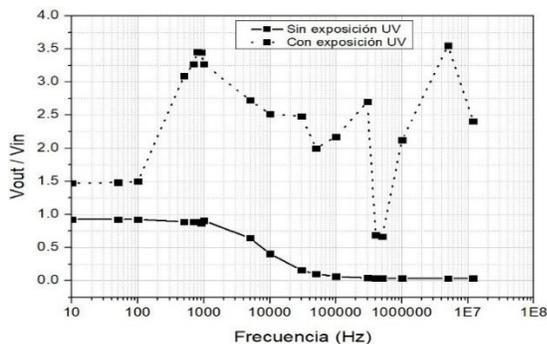


Fig. 9. Respuesta de la tinta conductiva de óxido de grafeno en las mediciones efectuadas con la resistencia de 1 MΩ

TABLE IV

ESPECIFICACIONES GENERALES DE LA FUENTE DE EXCITACIÓN QUE SE EMPLEÓ EN LA IRRADIACIÓN DE LA TINTA CONDUCTIVA DE ÓXIDO DE GRAFENO

Longitud de onda	365nm
Potencia	3.06mW
Tiempo de irradiación	1 min.

3. Montaje o configuración del circuito eléctrico
4. Alimentación del circuito
5. Excitación del material
6. Obtención de una señal eléctrica

Cabe aclarar, en la adhesión de tinta conductiva de óxido de grafeno se seleccionó para la toma de mediciones la pista impresa en la placa fenólica, al contener el material, ésta se conectó al circuito eléctrico con cables caimán.

El modelo teórico del circuito eléctrico para la obtención de mediciones es el que se muestra en la Figura 8, éste se basa esencialmente en la idea de un divisor de voltaje. La resistencia de 50 Ω señalada en el esquema corresponde a la resistencia que proporciona el equipo o fuente de alimentación, en este caso el generador de funciones. La resistencia de 221.23 Ω representa una resistencia de 220 Ω introducida en el circuito con 1.23 Ω sumados por el uso de cables caimán. Se midió el voltaje de entrada  $V_{in}$  modulado en el generador de funciones y, se midió

el voltaje de salida  $V_{out}$  perteneciente al voltaje en el material, es decir, en la tinta conductiva de óxido de grafeno.

Montando el circuito de la Figura 8 con la resistencia de 220 Ω variando la frecuencia en el generador de funciones en el rango de 1 Hz-6 MHz (con la obtención de un total de 11 mediciones) se obtuvo el gráfico colocado en la Figura 9. En el eje horizontal se empleó el logaritmo base 10 de la frecuencia y en el eje vertical se tomó el cociente de voltajes  $V_{out}/V_{in}$ . La exposición de la tinta conductiva de óxido de grafeno se llevó a cabo con una fuente de luz UV cuyas especificaciones se resumen en la Tabla 4. En adición, tomando nuevamente como referencia o base el circuito dibujado en la Figura 8, se realizó una segunda configuración en la que, la resistencia de 220 Ω fue sustituida por una resistencia de 1MΩ. El barrido frecuencial se realizó en el rango de 10 Hz-12 MHz generando 20 mediciones. La gráfica de resultados se muestra en la Figura 10.

Con la idea de divisor de voltaje, el segundo circuito en el que la resistencia utilizada fue de 1 MΩ, el voltaje medido en la tinta conductiva de óxido de grafeno debe de ser menor al voltaje  $V_{out}$  medido en la configuración 1 en la que se empleó la resistencia de 220 Ω considerando que se administre el mismo voltaje de entrada  $V_{in}$  en ambos casos. Esto se sigue de las ecuaciones (10) y Fig. 9. Respuesta de la tinta conductiva de óxido de grafeno en las mediciones efectuadas con la resistencia de 1 MΩ. (11) determinadas a partir de la ecuación (7):

$$Conf._{1 \rightarrow V_{out}} = \frac{R_M}{R_M + 271.23\Omega} V_{in}' \quad (10)$$

$$Conf._{1 \rightarrow V_{out}} = \frac{R_M}{R_M + 1000M\Omega} V_{in}' \quad (11)$$

En la Tabla 5 se resumen las frecuencias en las que se observó mayor sensibilidad en la respuesta de la tinta conductiva de óxido de grafeno para los resultados bosquejados en las Figuras 9 y 10 respectivamente. Es importante destacar que, en la configuración con la resistencia de 1 MΩ fueron más evidentes los cambios en la respuesta de la tinta conductiva al ser irradiada con la luz UV.

Fue armada una tercera configuración en la que se utilizó un inyector de corriente. La implementación del inyector de corriente estuvo orientada al análisis de la vida útil de la tinta conductiva de óxido de grafeno preparada, es decir, buscar comparar la atenuación de la sensibilidad conforme se va empleando la misma tinta de una medición a otra. En la Figura 11 es posible observar que, por debajo de los 200,000 Hz la respuesta de la tinta conductiva de óxido de grafeno de una medición 1 a una medición 2 se atenúa más del 10 %.

El menor cambio en tu cociente  $V_{out}/V_{in}$  de la medición 1 a la medición 2 ocurre en la frecuencia de 500,000 Hz donde la respuesta en la medición 2 cae al 94% del valor dado en la medición 1.

Una conclusión importante del gráfico en la Figura 11 es la atenuación en la sensibilidad de la respuesta en la tinta conductiva de óxido de grafeno a bajas frecuencias y una mayor estabilidad (menor atenuación) a altas frecuencias. Con el circuito de inyector de corriente se realizó una segunda prueba para evaluar el posible cambio estructural (provocado por las condiciones ambientales) de la tinta conductiva de óxido de grafeno de una muestra a otra. Se tomaron dos placas fenólicas

TABLE V  
FRECUENCIAS O RANGOS DE FRECUENCIA DONDE SE OBSERVÓ  
MAYOR SENSIBILIDAD EN EL VOLTAJE  $V_{OUT}$  DEL MATERIAL

Resistencia en el circuito	Frecuencia	
	Sin exposición	Con exposición
220 $\Omega$	100,000	1
1 $\Omega$	10-100	800 y 5,000,000

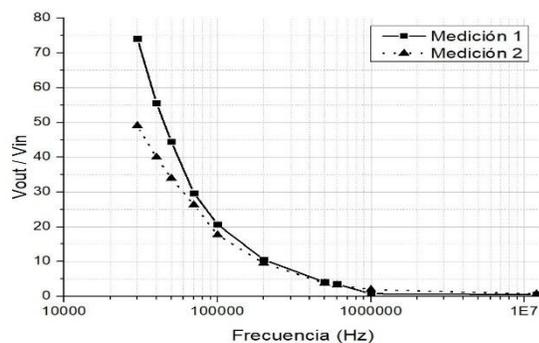


Fig. 11. Comparación de mediciones en la tinta conductiva de óxido de grafeno en usos consecutivos

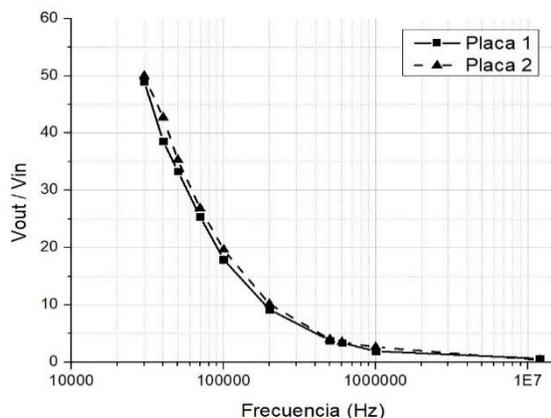


Fig. 12. Comparación de mediciones en la tinta conductiva de óxido de grafeno depositada en la placa 1 y en la placa 2 respectivamente

donde, en la primera placa se añaden un par de gotas de material en el día uno y, en la segunda placa se añaden similarmente un par de gotas del material en el día cuatro. Se empleó un rango de frecuencias de 30 kHz a 12 MHz exponiendo respectivamente las placas a luz UV. En la Figura 12 se colocan las curvas de  $V_{out}/V_{in}$  contra la frecuencia registradas en la placa 1 y en la placa 2 tras ser expuestas a la luz UV. Cabe señalar, dichas curvas corresponden a la respuesta de la tinta conductiva de óxido de grafeno en una segunda medición o uso, con la diferencia de tiempo de 4 días de haber sido extraídas del contenedor o tubo Eppendorf.

De la Figura 12 se pudo observar que, en un lapso de diferencia de 4 días de haber extraído la tinta, en esos 4 días la tinta conductiva de óxido de grafeno no cambió su composición química aun cuando dicha tinta conductiva no fue aislada perfectamente del medio circundante.

## V. CONCLUSIONES

Las técnicas de caracterización efectuadas (el FTIR y el espectro Raman) concuerdan con los resultados reportados por

otros autores, incluso en el Raman hay autores que dan rangos más amplios en la localización de los picos, para el pico D, éste se reporta de 1200 – 1400  $\text{cm}^{-1}$  y el pico G de 1500 – 1600  $\text{cm}^{-1}$  (Viegas, 2017). Asimismo, en el Raman, se pudo observar que la adición de un polímero al óxido de grafeno (sea el nafión en la tinta conductiva o el PVA) influye en el aumento de la cristalinidad del material. Luego, el hecho de que el área bajo la curva del pico D sea mayor al área bajo la curva del pico G indica una mayor proporción de defectos en la red cristalina respecto a la cantidad de enlaces C - C con hibridación  $sp^2$ .

En cuanto a la caracterización eléctrica en el circuito divisor de voltaje, la ecuación (10-11) muestran que, si la resistencia de la tinta conductiva de óxido de grafeno RM es constante, el voltaje de salida  $V_{out}$  siempre debió ser menor al voltaje suministrado en el circuito, es decir a  $V_{in}$ , sin embargo, eso no ocurrió pues, de la Figura 8 y 9 se observa que al hacer el barrido frecuencial hay frecuencias en las que el cociente  $V_{out}/V_{in}$  es mayor a 1 de modo, las ecuaciones (10-11) no se cumplen, lo cual quiere decir que la tinta conductiva de óxido de grafeno no puede interpretarse simplemente como un elemento resistivo constante sino que, tal la resistividad (que permite calcular la resistencia) propia del material se ve modificada por la frecuencia programada en la señal de entrada. Un capacitor o un inductor son componentes eléctricos cuya reactancia se ve alterada por la frecuencia, en el caso de los capacitores la reactancia disminuye conforme aumenta la frecuencia y para los inductores, la reactancia aumenta a medida que aumenta la frecuencia por ende, el siguiente paso para trabajo futuro es determinar si la tinta conductiva de óxido de grafeno puede representarse como un capacitor, o como un inductor.

El inyector de corriente permitió analizar la atenuación en la respuesta de la tinta conductiva de óxido de grafeno de una medición a otra obteniendo atenuaciones del más del 10 % para frecuencias menores a 200,000 Hz.

## REFERENCIAS

- [1] Consejo de Seguridad Nuclear, *Detección y dosimetría de la radiación*, IRD-OP- GR-T06, España, pp. 8–14, 2009.
- [2] V. García Martínez, *Estudio de la estabilidad del óxido de grafeno con el tiempo*, Trabajo final de maestría, Universidad de Oviedo, 2013.
- [3] L. Farías, J. Flores, and L. Rosales, "Grafeno, el material del futuro. Síntesis y propiedades," *Revista Científica, Tecnológica y Humanística*, vol. 50, pp. 3–6, 2017.
- [4] T. Vázquez-Ulua, *Electrochemical detection of sugar alcohols using graphitic materials*, Tesis, Universidad de Guanajuato, Chapter 3, pp. 23–25, 2017.
- [5] Merck, *Tabla y gráfico de espectros infrarrojos*, <https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry/photometry-and-reflectometry/ir-spectrum-table>, 2023.