

**CARACTERIZACIÓN DEL GRAFENO QUÍMICAMENTE REDUCIDO (GQR) Y  
SU EMPLEO COMO CONTACTO SUPERIOR EN CELDAS FOTOVOLTAICAS**

**ERICK SALOMÓN GÓMEZ JIMÉNEZ  
YAIR SANTIAGO MOJICA GÓMEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

**CARACTERIZACIÓN DEL GRAFENO QUÍMICAMENTE REDUCIDO (GQR) Y  
SU EMPLEO COMO CONTACTO SUPERIOR EN CELDAS FOTOVOLTAICAS**

**ERICK SALOMÓN GÓMEZ JIMÉNEZ  
YAIR SANTIAGO MOJICA GÓMEZ**

**Trabajo de grado en la modalidad de investigación presentado para obtener  
el título de  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**Director  
ÁLVARO ALYAMANI TRIANA  
Ingeniero electricista. M.Sc.**

**Codirectora  
MÓNICA ANDREA BOTERO LONDOÑO  
Ingeniera electricista. Dra.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, que nos guio y nos direcciono en este camino tan hermoso del conocimiento y aprendizaje.

A la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones por la oportunidad de forjarnos como hombres de ciencia y de mejorar como seres humanos.

Al Magister Álvaro Alyamani Triana y la Doctora Mónica Andrea Botero Londoño, por sus consejos y por la confianza depositada para nuestro proyecto.

A la Magister Sol Esmeralda Castellano Jerez y el Doctor Jaime Enrique Mejía por sus consejos y por permitirnos trabajar con las películas delgadas que sintetizaron, muchas gracias por todo lo que nos brindaron.

A todas aquellas personas que estuvieron presentes en este proceso académico, sus consejos y apoyo construyeron un camino más ameno y productivo, momentos inolvidables en nuestras vidas.

A nuestras familias, por su apoyo incondicional y por estar en los malos y buenos momentos, ustedes son la fuente de inspiración y la energía constante que nos motivan a conseguir cosas grandes. Para ustedes este triunfo.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	14
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	15
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo General	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 JUSTIFICACIÓN	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 CELDAS SOLARES	17
2.1.1 Celdas Solares a Base de Silicio	19
2.1.2 Celdas Solares Tipo Película Delgada o de Segunda Generación	20
2.2 GRAFENO APLICADO EN CELDAS SOLARES FOTOVOLTAICAS	23
2.2.1 Grafeno	23
2.3 PROPIEDADES ÓPTICAS	26
2.3.1 Coeficientes o Constantes Ópticas	26
2.3.2 Transmitancia	27
2.4 ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN	27
2.4.1 Espectroscopia RAMAN	27
2.4.2 Espectroscopia Ultravioleta-Visible (UV-VIS)	28
2.5 MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DE LAS CONSTANTES ÓPTICAS O CONSTANTES DE FRESNEL	30
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	32
3.1 SÍNTESIS DEL GRAFENO QUÍMICAMENTE REDUCIDO (GQR)	32
3.1.1 Limpieza del Sustrato	33

3.1.2 Proceso de Deposición del Oxido de Grafeno (OG) en Sustratos de Cuarzo	33
3.1.3 Reducción de las Películas de Óxido de Grafeno para la Obtención de Grafeno Químicamente Reducido (GQR)	34
3.2 CARACTERIZACIÓN RAMAN	34
3.3 CARACTERIZACIÓN UV-VIS	37
3.3.1 Películas Delgadas Reducidas con Borohidruro de Sodio	37
3.3.2 Películas delgadas reducidas con Ácido Ascórbico	42
3.3.3 Constantes Ópticas del Oxido de Grafeno Reducido	44
3.4 ANÁLISIS Y DATOS TÉCNICOS DEL MATERIAL	47
3.5 CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE	48
3.5.1 Incertidumbre del Oxido de Grafeno Reducido GQR	48
3.5.2 Valor del Mensurando o Incertidumbre Total	49
4. CONCLUSIONES	50
5. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	52
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS	66

## LISTADO DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Evolución de las eficiencias para diferentes tecnologías en Celdas solares	18
Figura 2. Modelo estructural de una celda solar de Silicio Cristalino.	20
Figura 3. Estructura de una celda solar de película delgada, señalando las capas que la conforman	21
Figura 4. Modelo estructural del grafeno.	23
Figura 5. Grafeno como bloque constructivo de los fullerenos, los nanotubos de carbono y el grafito	24
Figura 6. Espectro electromagnético	29
Figura 7. Espectro típico de una película delgada de grafeno utilizando como agente reductor el borohidruro de sodio.	35
Figura 8. Espectro típico de una película delgada de grafeno utilizando como agente reductor el ácido ascórbico	36
Figura 9. Espectro típico de Absorbancia de Películas delgadas de Oxido de Grafeno Reducido con Borohidruro de Sodio	38
Figura 10. Espectro de transmitancia típico de películas delgadas reducidas de Oxido de Grafeno Reducido con borohidruro de sodio	39
Figura 11. Absorbancia De la Película delgada de Oxido de Grafeno Reducido con Borohidruro de Sodio	40
Figura 12. Transmitancia De la Película delgada de Oxido de Grafeno Reducido con Borohidruro de Sodio	41
Figura 13. Absorbancia de la Película delgada de Oxido de Grafeno Reducdo con Ácido Ascórbico	42
Figura 14. Transmitancia De la Película delgada de Oxido de Grafeno Reducido con Ácido Ascórbico	43

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Datos técnicos de las láminas de Oxido de Grafeno Reducido	47
Tabla 2. Datos técnicos de las láminas de Oxido de Grafeno Reducido.	48

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Perfil de absorbancia y transmitancia con Borohidruro de Sodio (ver archivo Excel adjunto)	66
Anexo B. Perfil de absorbancia y transmitancia con Ácido Ascórbico (ver archivo Excel adjunto)	66
Anexo C. Espectroscopía RAMAN (ver archivo Excel adjunto)	66
Anexo D. Incertidumbre	67

## RESUMEN

**TÍTULO:** CARACTERIZACIÓN DEL GRAFENO QUÍMICAMENTE REDUCIDO (GQR) Y SU EMPLEO COMO CONTACTO SUPERIOR EN CELDAS FOTOVOLTAICAS.\*

**AUTORES:** ERICK SALOMÓN GÓMEZ JIMÉNEZ, YAIR SANTIAGO MOJICA GÓMEZ.\*\*

**PALABRAS CLAVE:** óxido de grafeno reducido, grafeno químicamente reducido (GQR), espectroscopia ultravioleta visible.

### DESCRIPCIÓN:

En la actualidad las sociedades científicas y académicas han direccionado su interés en el descubrimiento de nuevos materiales ya que muchas investigaciones se están llevando a cabo en el desarrollo de la tecnología fotovoltaica con el objetivo de mejorar la eficiencia en la generación de energía solar. Por tal motivo se están investigando nuevos materiales y compuestos que mejoren la eficiencia de las celdas solares y por tanto en sus diferentes capas constitutivas. Un nuevo material de gran interés es el grafeno, en este trabajo se sintetizó en una de sus formas químicamente reducido (GQR), para evaluar su aplicación en las celdas solares fotovoltaicas como posible reemplazo de los contactos transparentes utilizados convencionalmente tales como Óxido de Estaño  $\text{SnO}_2$ , Óxido de indio  $\text{In}_2\text{O}_3$ , ITO y entre otros materiales que son escasos en la naturaleza y más contaminantes que el Grafeno. El estudio de las películas delgadas de Oxido de Grafeno se llevara a cabo por medio de una caracterización estructural y óptica para concluir que el material cumple con los parámetros para ser utilizado como contacto superior en la celda fotovoltaica; los diferentes procesos y propiedades se analizaran por modelamientos matemáticos y graficas espectrales de la absorbancia y transmitancia de las películas delgadas.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Director: M.Sc. Alyamani Triana, Álvaro, Codirectora: Ph.D. Botero Londoño, Mónica Andrea

## ABSTRACT

**TITLE:** CHARACTERIZATION OF CHEMICALLY REDUCED GRAPHENE (GQR) AND THEIR USE AS CONTACT PHOTOVOLTAIC CELLS SUPERIOR.\*

**AUTHORS:** ERICK SALOMÓN GÓMEZ JIMÉNEZ, YAIR SANTIAGO MOJICA GÓMEZ.\*\*

**KEY WORD:** Oxide de graphene reduced, graphene quimicly reducted (GQR), spectroscopy ultraviolet visible.

### DESCRIPTION:

At present the scientific and academic companies there is showed his interest in the discovery of new materials since many investigations are carried out in the development of the photovoltaic technology by the aim to improve the efficiency in the generation of solar power. For such a motive there are investigated new materials and compounds that improve the efficiency of the solar cells and therefore in his different constitutive caps. A new material of great interest is the graphene, in this work chemically limited (GQR) was synthesized in one of his forms, to evaluate his application in the solar photovoltaic cells as possible replacement of the conventional such transparent used contacts as is the Oxide of Tin  $\text{SnO}_2$ , Oxide of Indian  $\text{In}_2\text{O}_3$ , ITO And between other materials that are scanty in the nature and more pollutants that the graphene. The study of the film thin of graphene Oxide was carried out by means of a structural and optical characterization to conclude that the material expires with the parameters to be used as top contact in the photovoltaic cell; the different processes and properties were analyzing for methods mathematicians and spectral graphs of the absorbance and transmittance of the film thin.

---

\* Work Degree

\*\* Faculty of Engineering Physics and Mechanical , School of Electrical Engineering , Electronics and Telecommunications Director: M.Sc. Alyamani Triana, Alvaro , Co-Director : Ph.D. Botero Londoño , Monica Andrea

## INTRODUCCIÓN

Debido a que las fuentes de energías convencionales son limitadas e impactan negativamente el ambiente, es indispensable optar por la implementación de sistemas alternativos a los tradicionales, que complementen los sistemas de generación actuales. La energía solar por ser una fuente de generación renovable es una solución factible.

Muchas investigaciones se están llevando a cabo en el desarrollo de la tecnología fotovoltaica con el objetivo de mejorar la eficiencia en la generación de energía solar. Por tal motivo se están investigando nuevos materiales y compuestos que mejoren la eficiencia de las celdas solares y por tanto en sus capas constitutivas.

Dentro de estas capas existen materiales de comportamiento asombroso, entre estos un material que ha causado un gran interés por sus propiedades fisicoquímicas es el grafeno, descubierto en 2004 y que hoy día se muestra como poseedor de grandes propiedades tales como alta conductividad eléctrica y térmica, buena transparencia, alta resistencia mecánica, inherente flexibilidad y gran área de superficie especificada [1]; además el grafeno se presenta como un candidato ideal para la fabricación de electrodos conductores transparentes, empleados por ejemplo en pantallas táctiles [2], celdas fotovoltaicas orgánicas[3] y LEDs orgánicos [4]. Pero lo principal es su capacidad como material transparente, lo que conlleva a ser un candidato atractivo para la implementación como contacto superior transparente en las celdas solares fotovoltaicas.

## 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

En esta primera parte se describen los objetivos que se tendrán en cuenta para desarrollar y poder concluir este proyecto.

### 1.1 OBJETIVOS

A continuación se mencionan el objetivo general y los específicos.

**1.1.1 Objetivo General.** Realizar la caracterización óptica de las películas delgadas de grafeno químicamente reducido (GQR) y análisis de los resultados para determinar su potencial aplicación como contacto superior en celdas fotovoltaicas.

#### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las películas delgadas de GQR mediante el método de espectroscopia ultravioleta visible (UV-VIS).
- Analizar los datos obtenidos y determinar las constantes ópticas de la película delgada de GQR.
- Determinar la aplicación del GQR como contacto superior en las celdas fotovoltaicas.
- Documentar la información establecida en el proceso de investigación, los datos parciales, las conclusiones y recomendaciones pertinentes del proyecto en su totalidad.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

Observando el interés que ha despertado el grafeno, no solo dentro de la comunidad científica sino además en sectores industriales, se cree que este gran material llegará a ser en muy poco tiempo indispensable en el mundo tecnológico. Una de sus ventajas es que se puede sintetizar a través de métodos económicos y de fácil acceso [5].

Las posibilidades de investigar las aplicaciones que posee el grafeno incentiva a buscar nuevas soluciones en el área de la energía solar. La prometedora aplicación que tiene este material en las celdas solares, sobresale ante las investigaciones realizadas por diferentes comunidades científicas [6]. Esto implica condiciones particulares en las cuales el grafeno podrían utilizarse en la absorción de energía solar, puesto que es capaz de responder a un intervalo amplio de longitudes de onda, comparado con los materiales habituales que responden sólo a ciertas longitudes de onda.

Gracias a las posibles aplicaciones del grafeno, es indispensable proyectar sus aportes a la tecnología, incluso definir nuevas perspectivas en las cuales el grafeno sea el centro del desarrollo.

## **2. MARCO TEÓRICO**

En este apartado se recopila la información importante que se definió para poder desarrollar el proyecto, entre estas se encuentran las celdas solares, el grafeno, métodos y caracterizaciones aplicados, entre otras.

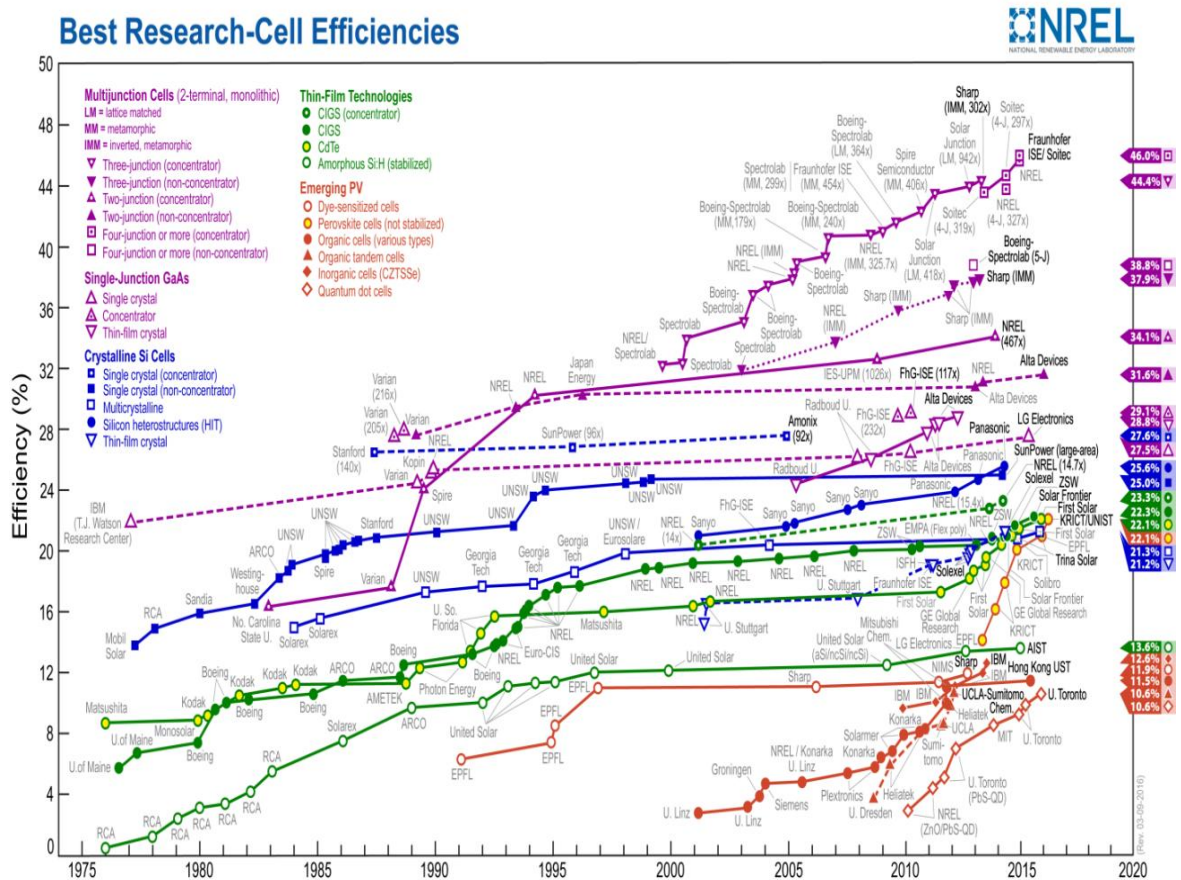
### **2.1 CELDAS SOLARES**

Las celdas solares son diseñadas para la conversión directa de energía solar en energía eléctrica. Esta conversión se realiza debido al efecto fotovoltaico; este fenómeno genera una fuerza electromotriz debido a la absorción de cualquier tipo de radiación ionizante en un material logrando la transformación de energía solar directamente en energía eléctrica.

Su funcionamiento radica en la estructura de unión p-n; cuando un fotón incide sobre esta unión de semiconductores genera portadores de carga libre (electrón-hueco) los cuales son capaces de fluir por un circuito externo y proporcionar energía. Esta generación de electrón-hueco es directamente proporcional a la intensidad de radiación solar [7].

En la Figura 1 se encuentra plasmada la evolución en el tiempo de la eficiencia de conversión de los diferentes tipos de celdas solares implementadas con tecnologías de primera y segunda generación [8], además se muestran los tipos de celdas solares a base de materiales emergentes, puntos cuánticos, entre otras, y los distintos centros de investigación que contribuyen en la fabricación de las mismas, como por ejemplo: IBM, MIT, Stanford.

Figura 1. Evolución de las eficiencias para diferentes tecnologías en Celdas solares



Fuente: L. L. Kazmerski. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2010.

En la figura 1 Se observan las celdas de primera generación, celdas de alta calidad estructural, gran superficie y fácil manufactura, están compuestas de estructuras cristalinas de silicio. Las celdas de segunda generación o comúnmente llamadas tecnología de película delgada se implementaron en pro de la disminución de los costos y las más comunes son los de telurio de cadmio (CdTe) y las CIGS. Las celdas de tercera generación buscan la disminución de los costos y aumento del rendimiento. Entre estas se destacan las celdas Grätzel y las sensibilizadas por colorantes.

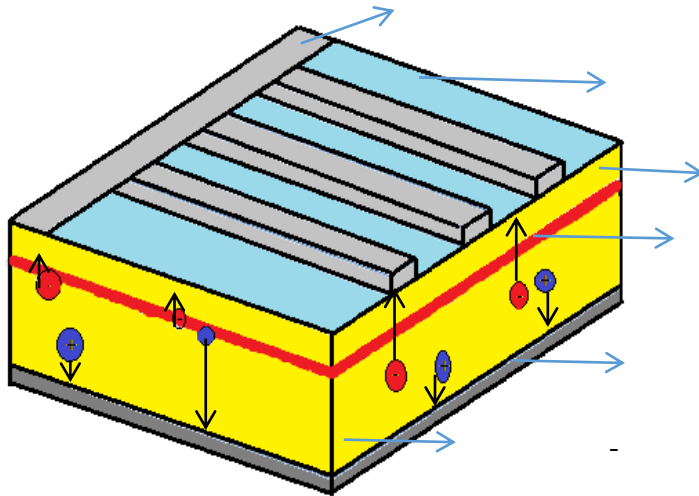
En la actualidad, muchas empresas y centros de investigación han evolucionado sus ideas e implementado la innovación de nuevos materiales para la aplicación de las celdas solares, buscando la mejora de eficiencia, la disminución de los costos de producción y la disminución de agentes contaminantes. A continuación se citan algunos de estos tipos de celdas.

**2.1.1 Celdas Solares a Base de Silicio.** Este tipo de celdas solares son las denominadas de primera generación, sus características son gran superficie, alta calidad y fácil unión. El silicio (Si) es el material predominante para la fabricación de celdas debido a su abundancia en la tierra y sus propiedades semiconductoras. Las estructuras más utilizadas y que presentan mejores eficiencias son las de silicio cristalino (c-Si) y silicio amorfo (a-Si) [9].

Las celdas solares de materiales basadas en c-Si han alcanzado valores de eficiencia de aproximadamente 26% [10], las de silicio amorfo, poseen una menor calidad estructural y sus eficiencias están en rangos de 5 a 10%.

En la Figura 2 se aprecia la estructura de una celda solar de silicio; la capa de antirreflexión que sirve para la absorción de la radiación solar, la capa tipo N, la capa tipo P y la zona de carga espacial (ZCE) que se genera al realizar la unión PN [11].

Figura 2. Modelo estructural de una celda solar de Silicio Cristalino.



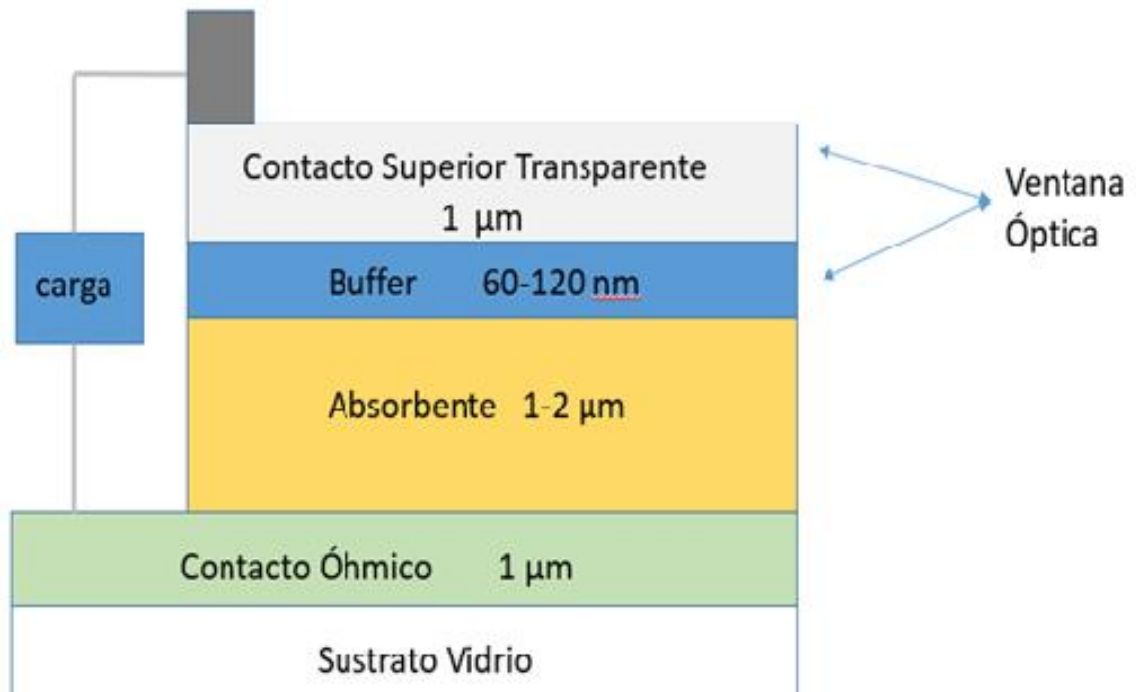
Debido a los altos costos de producción y bajos rendimientos de conversión que presentaban dichas celdas, las investigaciones se centraron en la búsqueda de nuevos materiales y nuevos procesos de síntesis [12].

**2.1.2 Celdas Solares Tipo Película Delgada o de Segunda Generación.** En la década de los 70 se iniciaron nuevos estudios en tecnologías de módulos solares con el objetivo de reducir costos en la generación fotovoltaica de energía eléctrica. Este tipo de celdas solares están conformadas por capas de diferentes materiales semiconductores, cuyos espesores varían entre 20 nm y 5  $\mu\text{m}$ ; logrando así un área activa de máximo 7 a 8  $\mu\text{m}$ ; es por tal motivo que reciben el nombre de película delgada [13].

La fabricación de este tipo de celdas se logra por medio de un proceso de crecimiento de las capas una encima de la otra, este es un proceso de forma estratificada. La celda solar tipo película delgada se conforma de un sustrato de vidrio, dos contactos eléctricos, una capa absorbente y la ventana óptica; esta última conformada por la capa buffer y el óxido conductor transparente TCO.

En la siguiente figura se ilustra una celda solar de película delgada, denotando cada una de sus capas.

Figura 3. Estructura de una celda solar de película delgada, señalando las capas que la conforman



Como se observa en la figura anterior, se muestran cada una de sus capas con los rangos de valores que se encuentran su área. Las características de los componentes de las celdas de película delgada son: El contacto superior transparente y la capa buffer conforman la ventana óptica; su principal función es permitir que la mayor cantidad de radiación solar llegue a la capa absorbente, además la capa buffer favorece la creación de un campo eléctrico intenso en la zona de carga espacial de la juntura y reduce procesos interdifusivos desde o hacia la capa absorbente [14].

Los materiales utilizados para conformar la ventana óptica deben cumplir con algunas características; los materiales usados para conformar la capa buffer deben presentar un gap superior a 2.4 eV, además su espesor no debe pasar del orden de 150nm con el fin de disminuir la absorción de radiación. Por otra parte la capa TCO deben ser altamente transparentes a la radiación incidente con un rango de transmitancia superior al 80% y presentar altos valores de conducción eléctrica [15].

La función principal de la capa absorbente, como su nombre lo indica es captar la mayor cantidad de fotones y lograr que se produzca el efecto fotovoltaico para la generación de una corriente eléctrica. Adicional a esta contribuya con la reducción de pérdidas asociadas con procesos de recombinación en estado de interfase [16].

Hablaremos un poco más a fondo de la TCO ya que es en esta capa en la cual se pretende aplicar el grafeno. Los TCOs son semiconductores tipo n que posee una alta conductividad cercana a la de los metales y una elevada transmitancia en el rango visible para dejar pasar la mayor cantidad de radiación incidente, presenta una alta estabilidad química y térmica y una amplia banda de brecha prohibida (mayor o igual a 3eV), además favorece a la generación de un campo eléctrico intenso en la zona de carga espacial (ZCE) [17], [18].

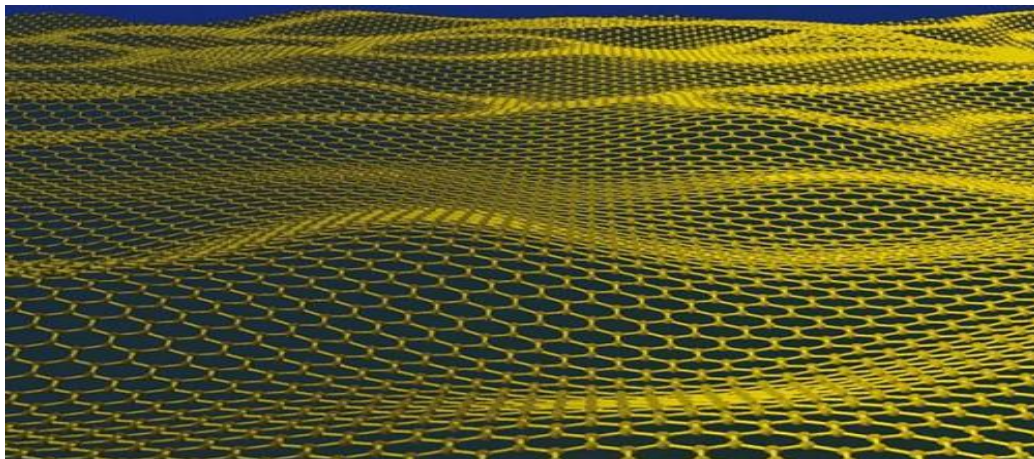
Estos TCOs se emplean como electrodo transparente en las celdas solares y forman parte de la ventana óptica en las celdas tipo película delgada, en las OSC el óxido transparente actúa como canal para facilitar la llegada de los electrones al circuito exterior. Estas capas son comúnmente elaboradas a base de óxidos de indio y estaño (ITO), óxido de estaño ( $\text{SnO}_2$ ), Óxido de indio ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ); muchos de estos materiales son escasos en nuestro entorno y algunos tóxicos, es por esto que surge la necesidad de buscar nuevos materiales abundantes en la naturaleza, amigables con el ambiente y de menor toxicidad. Un material que ha despertado el interés para ser aplicado en este tipo de capa es el grafeno, esto debido a que

el material posee propiedades de alta flexibilidad [19], alta transparencia óptica y gran movilidad eléctrica [20], [21].

## 2.2 GRAFENO APLICADO EN CELDAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

**2.2.1 Grafeno.** El grafeno es una forma bidimensional del carbono, conformado por átomos fuertemente cohesionados entre sí con enlaces covalentes basados en la hibridación  $Sp^2$  que forman una red hexagonal (Figura 4). De esta estructura bidimensional ondulada se desprenden fascinantes propiedades electrónicas, mecánicas, térmicas y químicas [22].

Figura 4. Modelo estructural del grafeno.



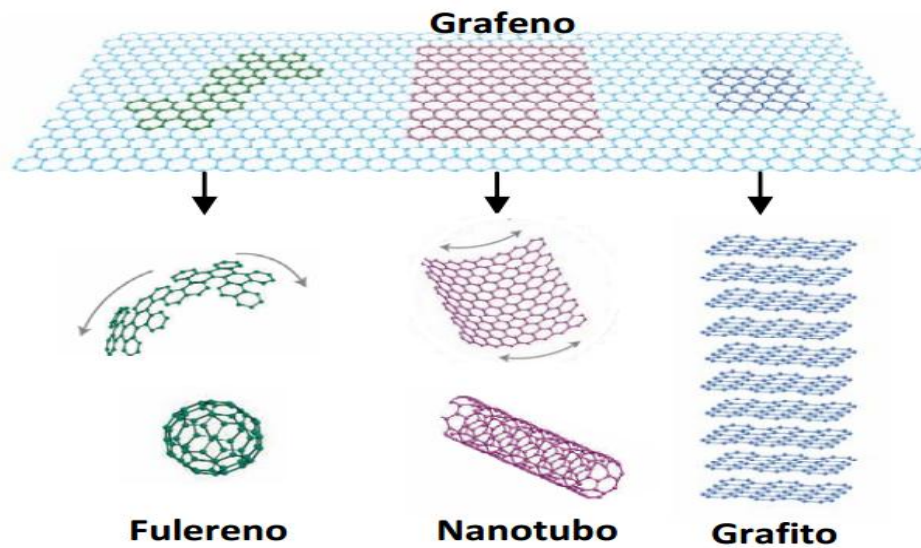
Fuente: Vallejo Lozada William Andres. Síntesis de capa buffer para celdas solares de película delgada. Universidad América. Bogotá. Mayo 3 de 2012.

Los primeros reportes del grafeno se remontan a la década de 1960, cuando se pensaba que su obtención experimental no era posible debido a la suposición de que los cristales bidimensionales de cualquier material no eran termodinámicamente estables a temperaturas finitas [23], [24].

Sin embargo, en el año 2004 se puso en duda esta hipótesis debido a un grupo de científicos encabezado por Andre Geim y Konstantin Novoselov que fueron

capaces de obtener e identificar por primera vez láminas individuales de grafeno [25]. Ahora es conocido que el material es estable porque sus vibraciones atómicas se acomodan en ondulaciones con amplitud de 1 nm aproximadamente a lo largo de la red cristalina. En la figura 5 se representa el grafeno como la base estructural de los demás alotrópicos del carbono.

Figura 5. Grafeno como bloque constructivo de los fullerenos, los nanotubos de carbono y el grafito



Fuente: Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2010: Graphene, compiled by the class physics of the royal swedish academy of sciences, 5 October 2010. (En línea). Sitio web:[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2010/advanced-physicsprize2010.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/advanced-physicsprize2010.pdf).

En la gráfica anterior se observa que al tomar una lámina de grafeno y enrollarla en forma de esfera o tubular, obtendríamos fullerenos o nanotubos de carbón de estructura simple, respectivamente. La aglomeración de cientos de láminas de grafeno de forma ordenada permite la obtención de cristales de grafito [26].

El grafeno puede ser utilizado en celdas OSC (Organic Solar Cell) [27,28]. En la actualidad se estudia para reemplazar el PEDOT:PSS ya que con este se aumenta la eficiencia del transporte de los huecos en este tipo de celdas.

El grafeno promete reemplazar el ITO en celdas orgánicas fotovoltaicas, proporcionando mejores resultados en el dispositivo y favoreciendo el cuidado con el ambiente, aunque posee algunos impedimentos como baja hidrofiliidad a cuando se sintetiza mediante algunos métodos [29]. Aunque hay algunos métodos de síntesis como la deposición química en fase de vapor (CVD siglas en inglés) basados en un tratamiento químico de la capa de grafeno que garantizarían una solución al problema presentado [30].

Otra aplicación del grafeno se extiende a las celdas solares sensibilizadas por colorantes, ya que se puede utilizar como contra-electrodo y sensibilizador. La síntesis de puntos cuánticos de grafeno se produce usando soluciones químicas y el resultado es la utilización como sensibilizador en celdas solares [31].

El grafeno al combinarse con obleas de silicio tipo n (n-Si) es utilizado en la fabricación en celdas solares de unión Schottky. El grafeno puede ser integrado en la celda de silicio como capa antirrefleitora o electrodo [32].

El grafeno ha despertado el interés de los ingenieros que intentan hacer nuevos, ligeros y flexibles paneles solares que se podrían utilizar para cubrir la superficie exterior de cualquier edificación. El grafeno es transparente a la luz y no sólo a la luz visible sino también a otras formas de radiación electromagnética, como la luz ultravioleta e infrarroja. El grafeno absorbe sólo el 2% de la luz incidente, incluso ultravioleta o infrarroja. Al combinar estas radiaciones solares con la capacidad del grafeno para conducir la electricidad se obtienen conductores eléctricos muy eficientes, transparentes, delgados, flexibles y económicos [33].

Cuando una celda fotovoltaica es intercalada entre dos hojas de grafeno, la luz incidente atraviesa las hojas de grafeno y choca contra la celda fotovoltaica. Como resultado, la celda fotovoltaica genera electricidad, la cual es conducida por las hojas de grafeno. Estos paneles solares ligeros y flexibles podrían ser moldeados para encajar un cuerpo de automóvil. Cuando son añadidos a cualquier superficie, podrían recoger la luz y producir la electricidad [34].

## **2.3 PROPIEDADES ÓPTICAS**

La luz tiene propiedades de onda y de partícula formadas por la radiación electromagnética y los fotones incidentes de la luz. Cuando la luz pasa de un medio a otro ocurren varios fenómenos ópticos, parte de la luz se transmite por el medio, parte se absorbe y parte se refleja. La refracción hace que las ondas de luz se propaguen con una velocidad menor en el espacio libre, esta interfaz de luz no afecta a la intensidad de luz incidente propagada a través del material. La absorción y transmisión son dos factores que aparecen al momento en que la luz incidente cohesiona con el material, dependiendo de la opacidad y transparencia del material el valor porcentual de ambos factores varían.

De acuerdo a las propiedades ópticas los materiales se clasifican en vidrios, metales, materiales moleculares, vidrios dopados, aislantes y semiconductores. Estos tipos de materiales ópticos tienen diferentes propiedades ya que actúan con variaciones diferentes al momento de incidir con la luz y otros medios [35].

**2.3.1 Coeficientes o Constantes Ópticas.** Las propiedades ópticas de un material describen un número de parámetros que determinan los coeficientes ópticos de estos mismos. La reflexión en la superficie describe los coeficientes de reflexión o reflectividad. El coeficiente de transmisión y el de absorción ( $\alpha$ ) lo determina la propagación de luz en el medio, estos coeficientes conservan la energía del material.

La propagación del haz de luz al cruzar por un medio transparente se describe con el índice de refracción ( $n$ ), esto se define mediante la relación entre el valor de la velocidad de luz en el espacio libre ( $c$ ) y la velocidad de luz incidente en el medio ( $v$ ); el índice de refracción depende de la frecuencia de la luz. Este efecto es llamado dispersión.

El coeficiente de extinción se calcula en el proceso del análisis de estos diferentes coeficientes que al momento de ser hallado queda en función del índice de refracción y la longitud de onda. Estos parámetros hacen que los materiales ópticos tomen diferentes resultados en las variaciones de las longitudes de onda y diferentes medios de propagación. [35]

**2.3.2 Transmitancia.** La transmitancia es la fracción de la radiación incidente transmitida por un objeto cuando este es atravesado por un haz de luz. Se expresa normalmente como se ilustra en la ecuación (1):

$$T = \frac{I}{I_0} * 100\% \quad (1)$$

Dónde:

$I$ : Es la intensidad de radiación que pasa a través del material

$I_0$ : Es la intensidad de luz incidente.

## 2.4 ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN

A continuación se comentan los métodos de caracterización utilizados.

**2.4.1 Espectroscopia RAMAN.** La espectroscopia Raman es una técnica que permite observar la parte estructural y morfológica de un material. Se caracteriza

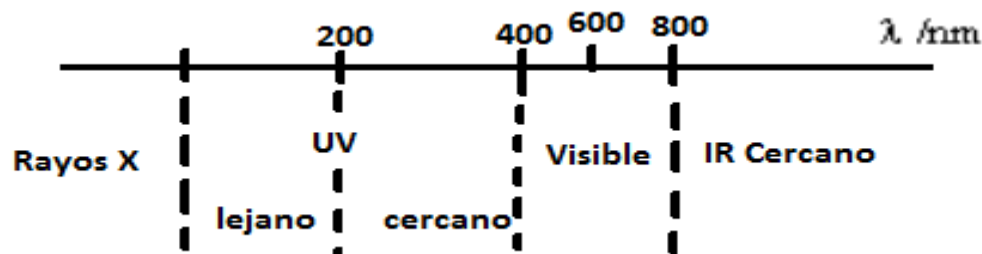
por ser eficaz, rápida, no destructiva, de alta resolución. A partir de esta técnica se puede confirmar si el material está depositado sobre un sustrato, esta información se confirma mediante los picos identificados en el espectro, diferentes análisis serán comparados para la observación de la gráfica superficial del estudio Raman [36].

**2.4.2 Espectroscopia Ultravioleta-Visible (UV-VIS).** La espectroscopia UV-VIS es una técnica basada en el análisis de la cantidad de radiación electromagnética que puede absorber o transmitir un material o sustancia. La región UV-VIS se extiende a longitudes de onda de 100 a 1000 nm; a continuación se describen las regiones del espectro ultravioleta-visible:

- **Región Ultravioleta lejana (región por debajo de 200nm):** Presenta varias características como la absorción de moléculas compuestas por aire, por tanto se debe trabajar con aparatos en sitios aislados o cuartos cerrados. Los materiales ópticos como celdas solares, películas delgadas semiconductoras, vidrio, cuarzo absorben fuertemente en esta zona. Casi todos los componentes presentan absorción en esta región.
- **Región Ultravioleta cercana (región entre 200 y 400nm):** Para trabajar con longitudes de onda menores a 350nm se debe utilizar el cuarzo, mientras que el vidrio absorbe en la región restante de la ultravioleta cercana y toda la región visible.
- **Región Visible (Región entre 400 y 800nm):** Presenta transiciones electrónicas de muy baja energía en compuestos conjugados y metales complejos que absorben significativamente en esta región. Es la única región del espectro electromagnético detectable por el ojo humano [37].

En la Figura 6 se muestra la región ultravioleta-visible del espectro electromagnético con sus diferentes longitudes y divisiones

Figura 6. Espectro electromagnético



Para que un material absorba la energía de los fotones debe coincidir con la diferencia de energía entre dos de los estados moleculares del material. Generalmente la espectroscopia de absorción molecular se basa en la medida de la transmitancia (T) o de la absorbancia (A) del material, la representación del cálculo de la absorbancia es basada en el modelo matemático de la Ley de Lamber-beer, este método se utiliza con un choque de haz de luz hacia el material para obtener resultados de absorbancia o transmitancia teniendo en cuenta la concentración del material, el rango y la región del espectro y el coeficiente de extinción molar. [38]

$$\log \frac{I_0}{I} = \epsilon l c \quad (2)$$

Donde

$\log \frac{I_0}{I}$  : Absorbancia

$\epsilon$ : Coeficiente de extinción molar

$l$ : Espesor del material

$c$ : Concentración del material

## 2.5 MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DE LAS CONSTANTES ÓPTICAS O CONSTANTES DE FRESNEL

Cuando la luz solar o radiación electromagnética incide sobre un material una fracción transmite, otra absorbe y otra parte refleja. Todo este comportamiento de conservación de la energía y tomando como variable cualquier longitud de onda se lleva a cabo por esta ecuación:

$$T_{\lambda} + R_{\lambda} + A_{\lambda} = 1 \quad (3)$$

Donde T, R y A son transmitancia, reflectancia y absorbancia en función de la longitud de onda  $\lambda$ . Las constantes ópticas del grafeno en el rango ultravioleta-visible [200-800 nm] se estiman por medio de conductividad óptica universal y medidas experimentales con espectros ópticos. El estudio complejo de estas variables hacen que de las constantes fundamentales podamos obtener los parámetros y propiedades ópticas del material [39]

Teniendo el espectro de la transmitancia y la definición del coeficiente de absorción del material se puede hallar el nivel energético y la banda prohibida (gap) para saber qué tipo de conducción posee el RGO.

Partimos de la ecuación general que viene de la definición del coeficiente de absorción para la propagación de luz a través de un medio absorbente en el rango ultravioleta-visible.

$$\frac{4\pi kd}{\lambda} = -\frac{1}{nd} \ln\left[\frac{I}{I_0} \left(\frac{1}{1-R}\right)\right] \quad (4)$$

Dónde:

$n$ : Corresponde al índice de refracción del material

$k$ : El coeficiente de extinción

$d$ : El espesor de la película delgada

$R$ : La intensidad de la luz reflejada

$I_0$ : La intensidad de la luz incidente

$I$ : Intensidad de la luz transmitida por el material

$\lambda$ : La longitud de onda [40].

Basados en los coeficientes de Fresnel se emplean varios parámetros para predecir el contraste óptico de la capa TCO, esto se determina mediante la repetibilidad de los procesos de las películas delgadas, variando los índices de refracción y depositando el material en diferentes tipos de sustrato o variando los reactivos [41].

### **3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Para cumplir con los objetivos del proyecto se planteó una metodología experimental que consta de cuatro etapas, las cuales son: Síntesis de la película delgada de GQR, Caracterización Raman, Caracterización mediante espectroscopia UV-VIS y Análisis de resultados.

Estos procesos serán llevados a cabo por modelos de estandarización que hacen contextualizar un análisis más preciso y obtener diferentes tipos de soportes para que los resultados finales sean confiables y coherentes.

#### **3.1 SÍNTESIS DEL GRAFENO QUÍMICAMENTE REDUCIDO (GQR)**

La obtención del grafeno químicamente reducido (GQR) se efectuó en la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, en el Laboratorio de Espectroscopia Atómica y Molecular (LEAM), bajo la dirección del profesor Enrique Mejía y el apoyo de la estudiante de Maestría en Química Sol Esmeralda Castellano Jerez.

Se realizó un acompañamiento al proceso de síntesis del GQR, el cual se ejecutó por el método de procesado químico de óxido de grafito; este método consiste en tomar una muestra de grafito y por medio del proceso modificado de Hummers hacer reaccionar los cristales de la muestra con oxidantes fuertes, ocasionando una estructura con numerosos grupos funcionales. El paso siguiente consiste en hacer una purificación y dispersión del óxido de grafito seguido de una exfoliación suave a través un sonificador para lograr separar las láminas en monocapas, bicapas o multicapas de óxido de grafeno, el cual se puede almacenar en grandes cantidades en solución acuosa debido a su estabilidad electrostática.

Para la obtención del Grafeno Químicamente Reducido (GQR), se toma una porción de la muestra en solución acuosa de óxido de grafeno y se deposita en laminillas de cuarzo por medio del proceso de crecimiento en baño químico de capas alternadas; después de esto se sumergen en dos diferentes agentes reductores para así obtener las películas delgadas de Oxido de Grafeno Reducido (RGO) o grafeno químicamente reducido.

**3.1.1 Limpieza del Sustrato.** En este proceso se tomaron como sustratos (laminillas de cuarzo), las cuales se sumergieron en solución piraña 3:1 (60 ml de Ácido sulfúrico (y 20 ml de Peróxido de Hidrogeno) por 15 minutos a 125 °C, después de esto se enjuagaron con agua y etanol; luego se procedió a realizar el secado con una corriente de nitrógeno. Posteriormente se toman los sustratos y se sumergen en una solución de 10 ml de Tolueno y 24,7 ml de APTES por 30 minutos, transcurrido los 30 minutos se pasa por ultrasonido con tolueno por un minuto, después se enjuagan con agua y etanol; y por último es secado por corriente de nitrógeno. Este proceso se lleva a cabo para hacer la limpieza superficial y mejorar la adherencia sobre los sustratos.

**3.1.2 Proceso de Deposición del Oxido de Grafeno (OG) en Sustratos de Cuarzo.** Existen varios métodos para la deposición del material en el sustrato, en nuestro caso las deposiciones de las películas delgadas se hicieron por el método Dip coating que consiste en la inmersión del sustrato sobre la suspensión con velocidades y temperatura controladas, esto con el fin de obtener películas delgadas con buena calidad estructural y de gran tamaño [42].

A continuación, con los sustratos limpiados anteriormente, se procede a realizar el proceso de deposición que consiste en sumergir los sustratos en OG líquido por una hora, después se enjuaga con agua y etanol y se realiza un secado bajo una corriente de nitrógeno y posterior un cocido a 150 ° C bajo una atmosfera de nitrógeno.

**3.1.3 Reducción de las Películas de Óxido de Grafeno para la Obtención de Grafeno Químicamente Reducido (GQR).** Ya obtenidas las películas de OG se sumergen en un agente reductor, en este trabajo se usaron dos agentes reductores Ácido Ascórbico y Borohidruro de Sodio.

Las películas delgadas se sumergieron en 0.0052 gr de Ácido Ascórbico en etanol (diluido) y en 0.0037 gr de Borohidruro de Sodio en etanol (diluido) durante 24 horas a 80 °C. Después las películas se enjuagaron con agua y etanol; y se secaron con una corriente de nitrógeno. Para finalizar las películas delgadas de RGO son recocidas a 500 °C en atmosfera de nitrógeno y después se dejaron enfriar a temperatura ambiente.

### **3.2 CARACTERIZACIÓN RAMAN**

Luego de sintetizar las películas delgadas de RGO comprobamos por medio de espectroscopia Raman que el material depositado sobre los sustratos de cuarzo fuera el mencionado. En la figura 7 se presenta un espectro Raman de las películas demuestran que el material ha sido depositado exitosamente en el sustrato ya que la gráfica denota picos entre  $1225.99\text{ cm}^{-1}$  y  $1681.4\text{ cm}^{-1}$  de GQR; los picos muestran el análisis de superficies del material como tal pero en este caso nos interesa que el análisis Raman nos muestre que el material este depositado exitosamente para las demás caracterizaciones.

Figura 7. Espectro típico de una película delgada de grafeno utilizando como agente reductor el borohidruro de sodio.

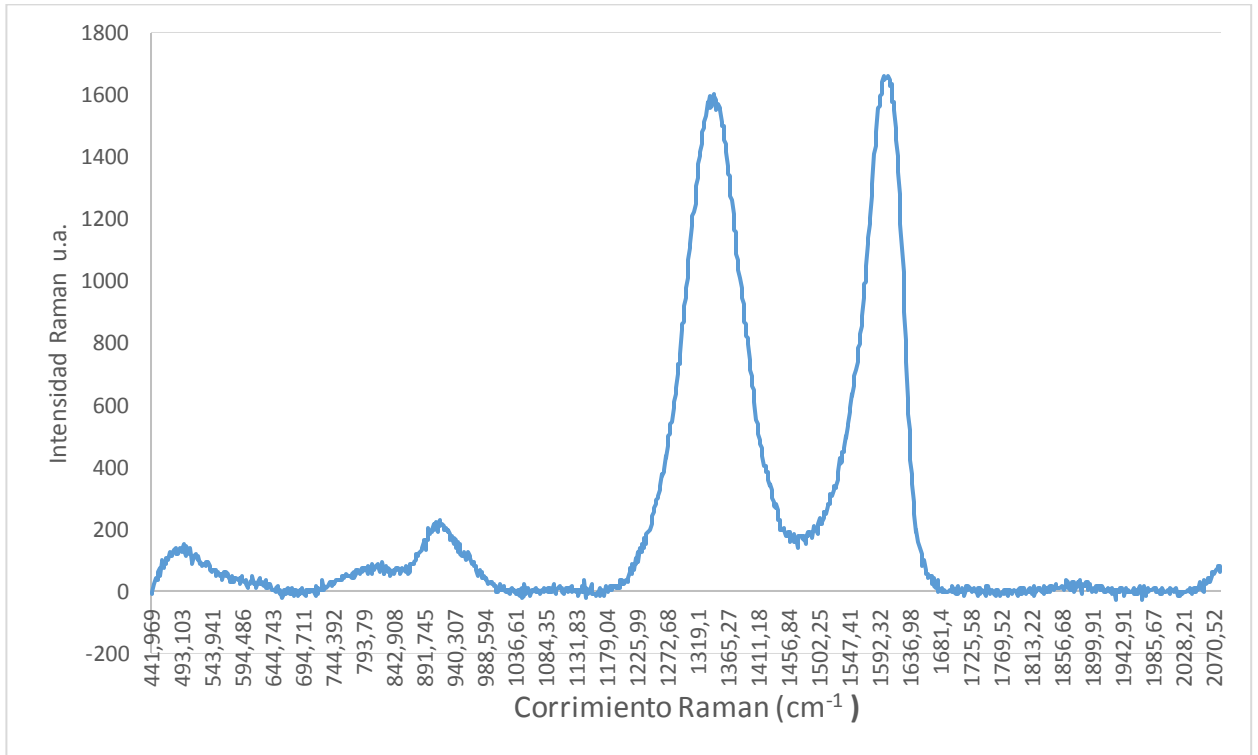
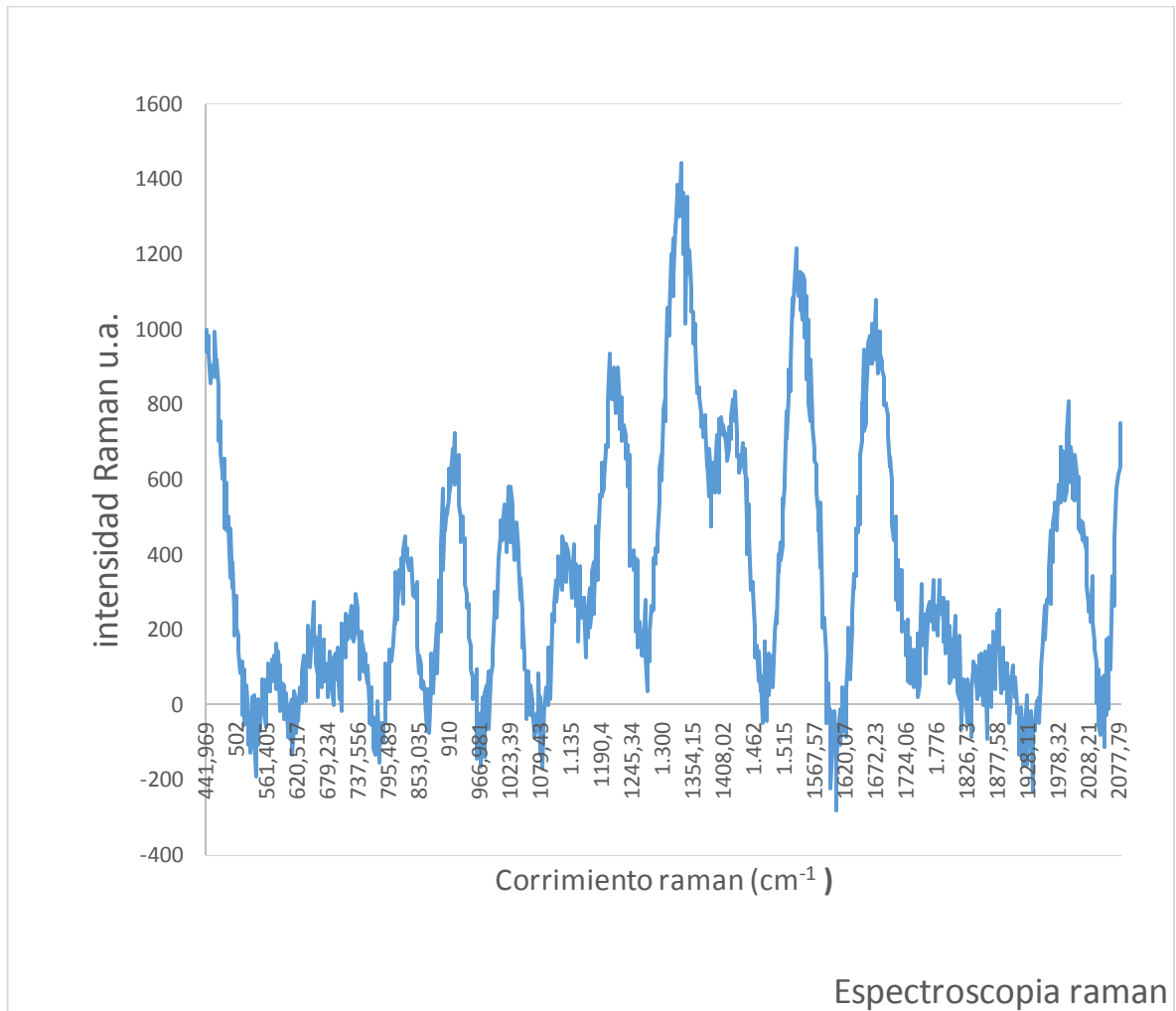


Figura 8. Espectro típico de una película delgada de grafeno utilizando como agente reductor el ácido ascórbico



El espectro de la figura 8 muestra que la deposición del material no ha sido exitosa porque se observa detalladamente que los valores de los picos son muy diferentes y tienen perturbaciones que afectan los corrimientos e intensidad raman.

Los resultados obtenidos de la deposición en los sustratos de cuarzo fueron películas delgadas de RGO utilizando como reductor el Boro hidruro de Sodio y a su vez se reflejó una buena homogeneidad en la deposición del material en el

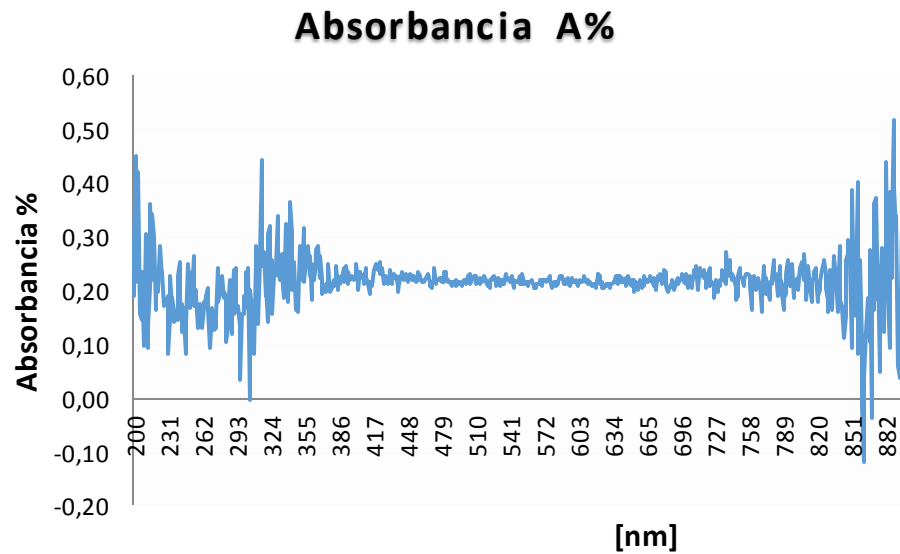
sustrato. Por otra parte las películas delgadas de RGO utilizando como reductor Ácido Ascórbico se obtuvieron resultados de muy baja homogeneidad debido a que el proceso de deposición en el sustrato fue muy pobre y fue muy poca su adhesión.

### **3.3 CARACTERIZACIÓN UV-VIS**

A continuación se ilustran algunos resultados de espectros de absorbancia y transmitancia obtenidos en la investigación variando los reductores químicos.

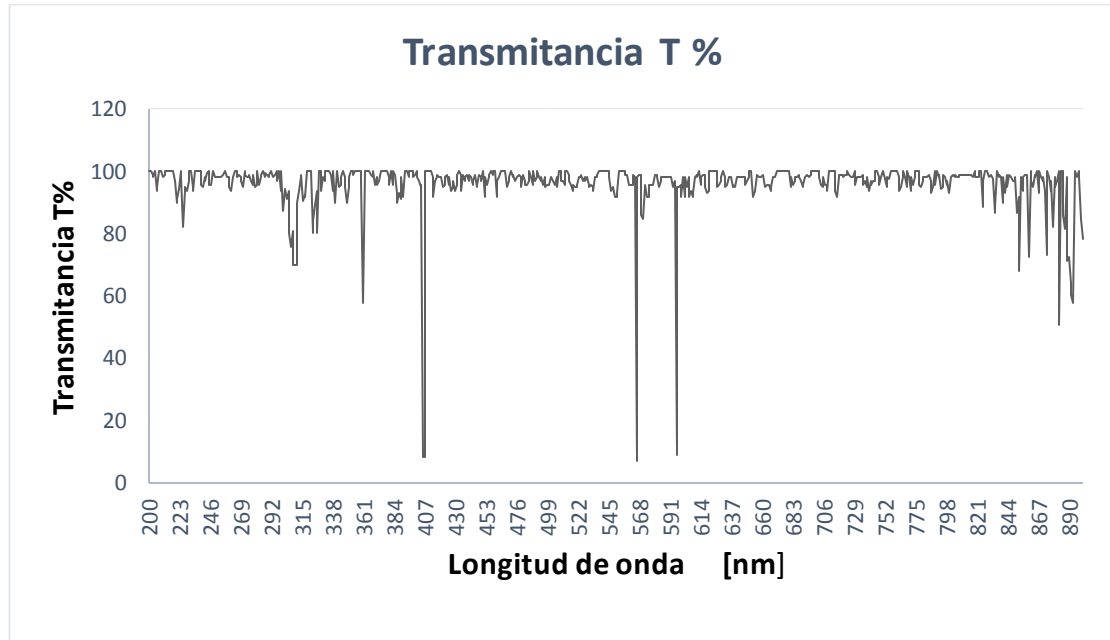
**3.3.1 Películas Delgadas Reducidas con Borohidruro de Sodio.** El proceso de caracterización UV-VIS se llevó a cabo por el método de reflectancia difusa y se utilizó el espectrofotómetro UV-2401 PC SHIMADUZA. El rango de longitudes de onda seleccionado fue entre 200 nm y 900 nm.

Figura 9. Espectro típico de Absorbancia de Películas delgadas de Oxido de Grafeno Reducido con Borohidruro de Sodio



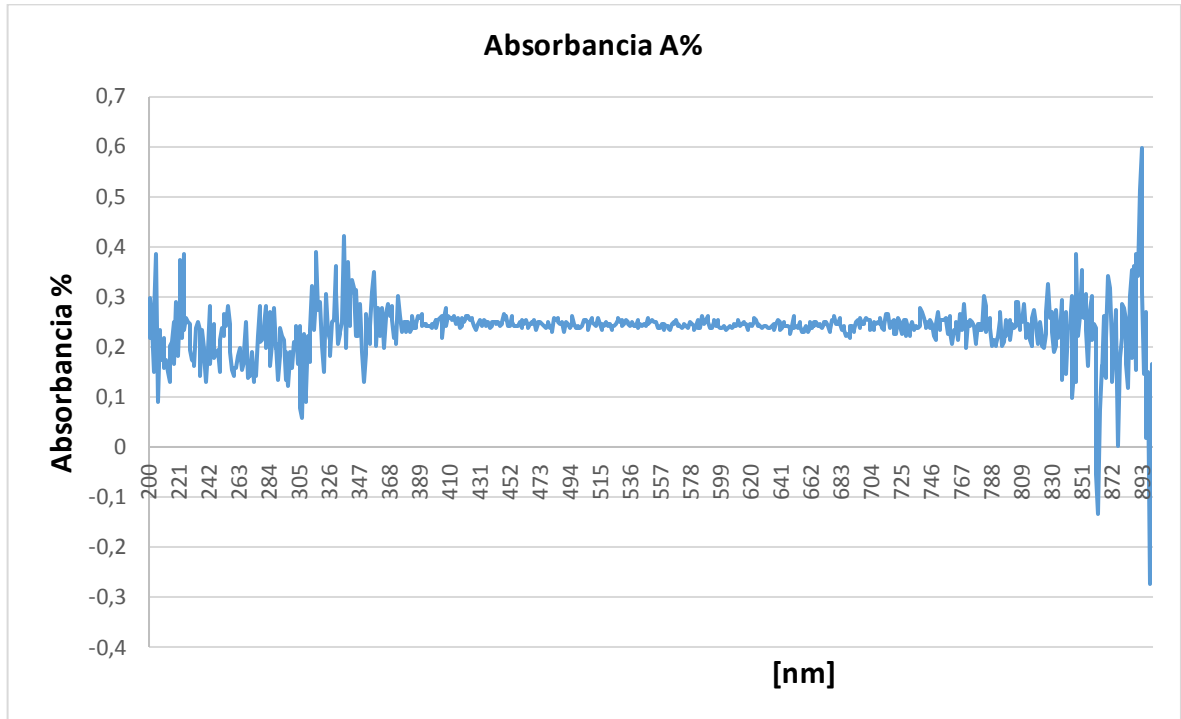
La Figura 9 nos muestra la absorbancia del óxido de grafeno reducido depositado en un sustrato de cuarzo tomando como agente reductor el borohidruro de sodio. El rango de longitudes de onda fue de 200 nm a 900 nm y nos brindó una absorbancia del 0.2114 %; lo cual nos indica que el material tiene una baja absorbancia y cumple con los parámetros necesarios para ser aplicado como contacto superior en la celda fotovoltaica, ya que la propiedad del material es dejar pasar la mayor parte de luz incidente en el rango ultravioleta-visible.

Figura 10. Espectro de transmitancia típico de películas delgadas reducidas de Oxido de Grafeno Reducido con borohidruro de sodio



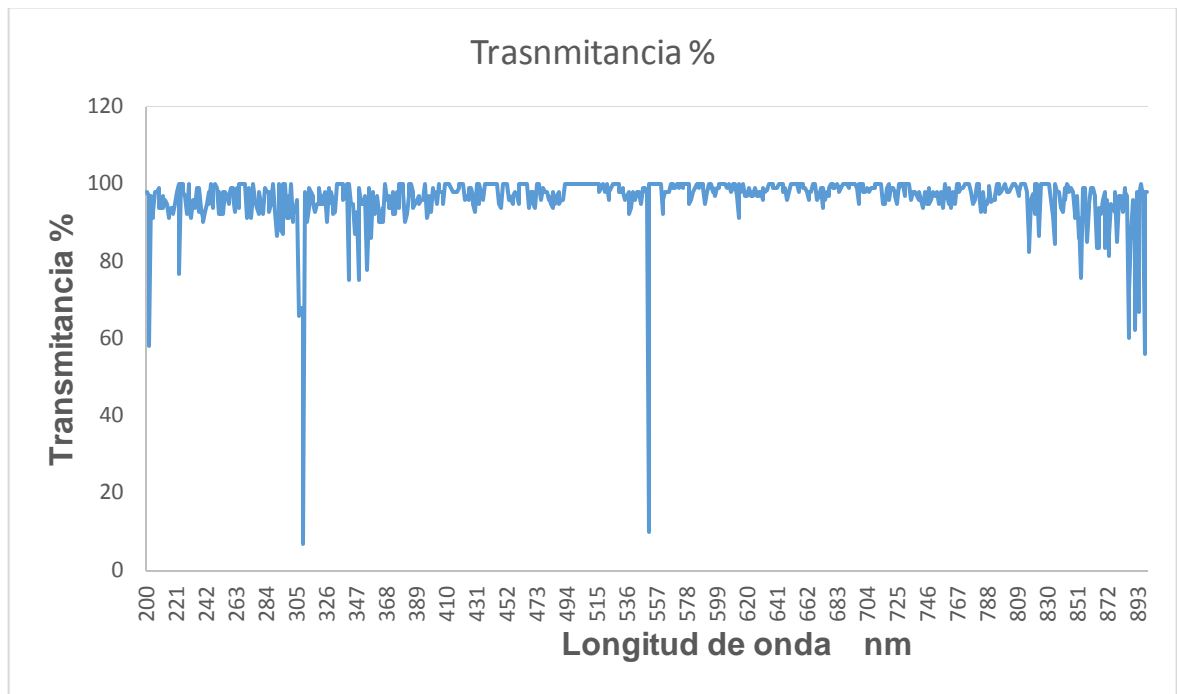
La figura 10 presenta una alta transparencia en el rango visible, además se puede observar que en el rango de los 200 a 300 y 750 a 900 [nm] el material presenta un grado de Transmitancia que se puede reflejar como una zona desfavorable hablando de la propiedad de alta transparencia que deben presentar los TCO en las celdas solares fotovoltaicas. La transmitancia en este caso es de 96.58% este valor indica que el material cumple con los parámetros para ser aplicado como TCs

Figura 11. Absorbancia De la Película delgada de Oxido de Grafeno Reducido con Borohidruro de Sodio



En la Figura 11 se observa la Absorbancia del Oxido de Grafeno Reducido depositado en un sustrato de cuarzo tomando como agente reductor el Borohidruro de Sodio y con un blanco de sustrato de cuarzo; nos brindó una absorbancia del 0.2357%; esto nos implica que el comportamiento del material con la luz incidente hace que en el rango ultravioleta-visible tenga baja absorbancia y el RGO cumpla con los parámetros para ser utilizado como contacto superior en la celda solar fotovoltaica. A continuación se refleja el perfil de absorbancia de la película delgada reducida con borohidruro de sodio.

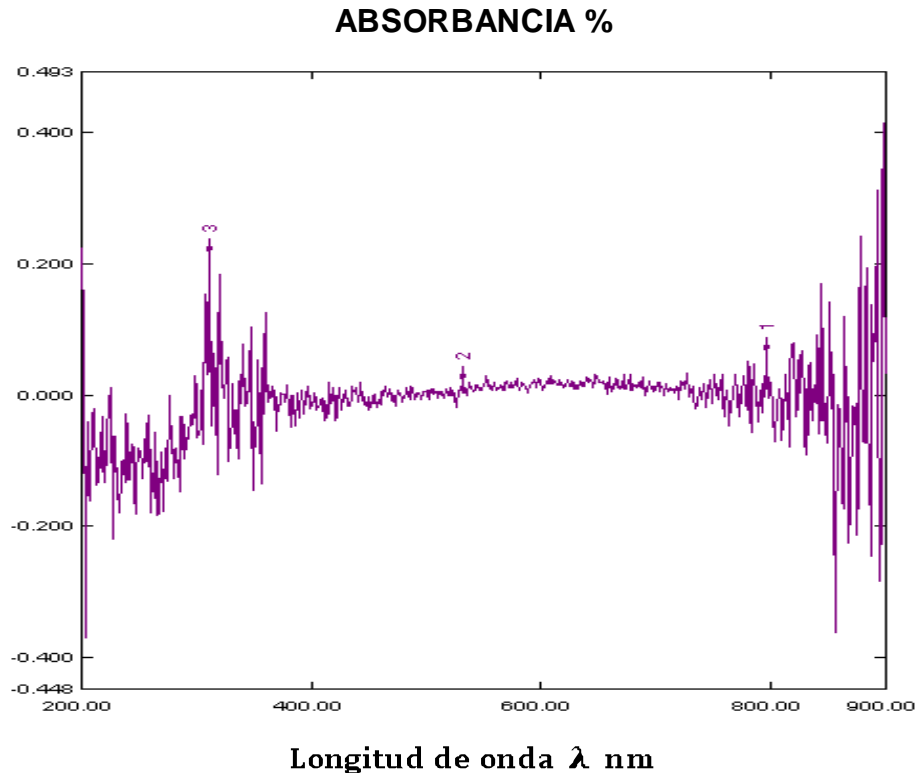
Figura 12. Transmitancia De la Película delgada de Oxido de Grafeno Reducido con Borohidruro de Sodio



En la figura 12 se muestra la transmitancia del óxido de grafeno reducido depositado en un sustrato de cuarzo tomando como agente reductor el borohidruro de sodio y con un blanco de sustrato de cuarzo. Nos brindó una absorbancia del 96.31 %; lo cual nos indica que el material tiene una alta transmitancia y cumple con los parámetros para ser aplicado como contacto superior en la celda fotovoltaica, ya que uno de sus fundamentos es que el material deje pasar la mayor parte de luz incidente y en este caso en el rango UV-VIS; los valores más pequeños que se muestran entre 300-325 nm y 550-575 nm quieren referirse a puntos de transmisión que pasan por el cuarzo ya que el material no quedó depositado en el mismo.

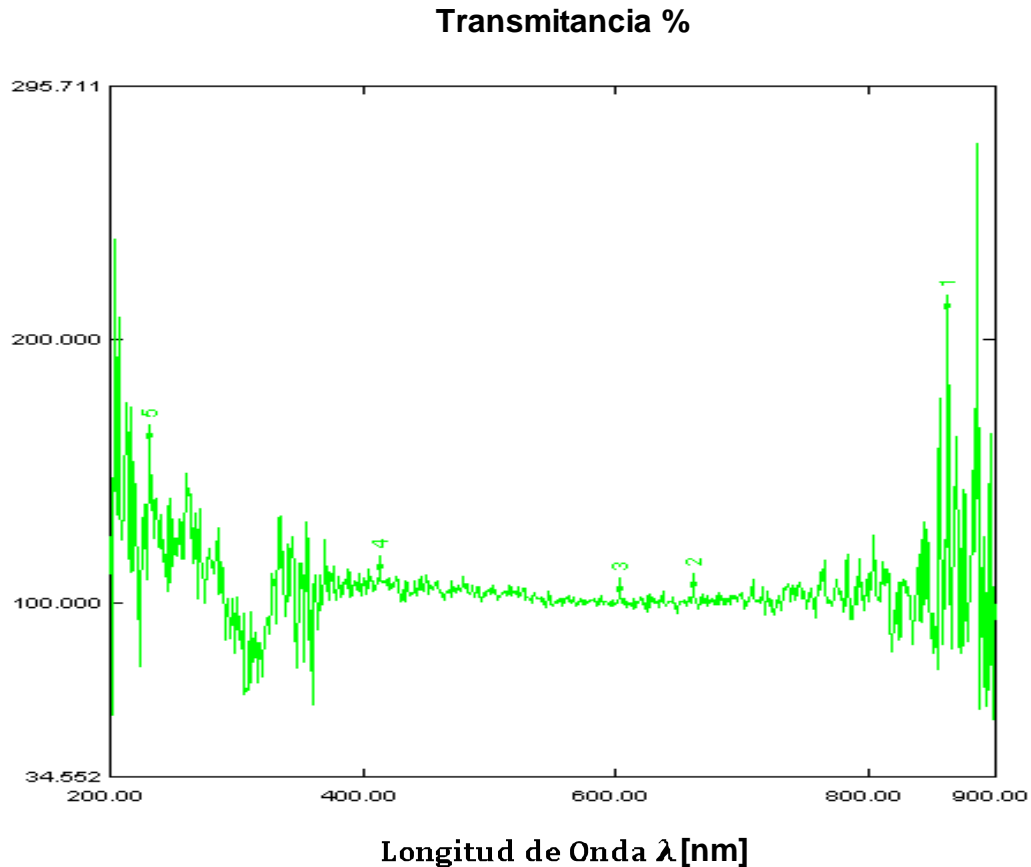
### 3.3.2 Películas delgadas reducidas con Ácido Ascórbico

Figura 13. Absorbancia de la Película delgada de Oxido de Grafeno Reducido con Ácido Ascórbico



En la Figura 13 se observa la Absorbancia del óxido de grafeno reducido depositado en un sustrato de cuarzo tomando como agente reductor el ácido ascórbico y con un blanco de cuarzo. Este resultado nos brindó un espectro pero por medio del análisis de la espectroscopia Raman nos indicó que el material no quedo depositado sobre el cuarzo por lo tanto este tipo de absorción tiene un resultado porcentual no muy acertado; por lo tanto el material no cumple con los parámetros para ser aplicado en la celda fotovoltaica como contacto superior.

Figura 14. Transmitancia De la Película delgada de Oxido de Grafeno Reducido con Ácido Ascórbico



En la figura 14 se muestra la transmitancia de la película de óxido de grafeno reducido depositado en un sustrato de cuarzo tomando como agente reductor el ácido ascórbico y con un blanco de cuarzo. Los resultados nos muestran una transmitancia del 115.85 %; lo cual nos indica que el material tiene una alta transmitancia pero en este caso no cumple con lo deseado debido a que la espectroscopia Raman nos reflejó que el material no se depositó de una forma homogénea; por consiguiente el perfil y resultado que se ilustra a continuación es una gráfica con puntos de transmitancias por fuera del porcentaje y valor real.

**3.3.3 Constantes Ópticas del Oxido de Grafeno Reducido.** Los valores de longitud de onda, transmitancia y absorbancia fueron tomados de los datos obtenidos por la caracterización UV-VIS (Anexo 1) y (Anexo 2).

Longitud de Onda entre un rango de  $\lambda = 200 \text{ nm a } 900 \text{ nm}$

**Transmitancia**      **T=96.58 %**

**Absorbancia**        **A=0.2114%**

**Reflectancia**        **R=3.208 %**

**Índice de refracción n=2.6.** Este valor fue tomado de referencia según artículos científicos que soportan dicho valor como referencia para el índice de refracción del grafito, este índice es constante y se tendrá en cuenta solamente al momento de darle otro valor cercano para mirar las alteraciones que causa en las propiedades ópticas del RGO. [43,44]

**Espesor del material d=0.34 [nm]**

Basándonos en la ecuación del coeficiente de absorción hallamos los valores del coeficiente de extinción en función de la longitud de onda al igual que la reflectancia del material con la ecuación óptica universal.

Reemplazando de la ecuación (3) vista anteriormente se obtiene:

$$R\% = 3.208\%$$

Reemplazando de la ecuación (4) vista anteriormente se obtiene el valor de la transmitancia siendo equivalente al valor de la luz transmitida sobre la luz incidente, tomando valores aproximados en la ecuación se lleva a cabo que

$$I/I_0 = (1 - \pi\alpha) \text{ y } \frac{1}{1-R} = 1.$$

Haciendo una aproximación de la ecuación con estos nuevos valores tenemos que

$$k = -\frac{\lambda}{4\pi n d} \ln[1 - \pi\alpha] \quad (5)$$

Según las referencias bibliográficas, se obtiene un valor aproximado del coeficiente de extinción del material en función de la longitud de onda y el índice de refracción del material.

$$k = C1 * \frac{\lambda}{n} \quad (6)$$

Donde el valor de C1 es aproximadamente  $8.144638 \mu\text{m}^{-1}$ .

El coeficiente de extinción queda en función del rango  $\lambda = 200 \text{ nm a } 900 \text{ nm}$  y del índice de refracción indicado  $n=2.6$ . Además los valores hallados son comparados con otros resultados teóricos que indican que la energía de brecha prohibida es aproximadamente mínima; **Egap= 0 a 250 meV**. Estos valores típicos son comparados con la ficha técnica del material, por lo tanto, se puede deducir que el valor es un dato válido para la experimentación. [45 , 46]

Otro valor que proporcione múltiples resultados es el expuesto a continuación.

Longitud de Onda entre un rango de  $\lambda = 200 \text{ nm a } 900 \text{ nm}$

**Transmitancia**      **T=96.31%**

**Absorbancia**        **A=0.2357 %**

**Reflectancia**       **R=3.4543 %**

**Índice de refracción n=2.6**. Este valor fue tomado de una referencia del índice de refracción del grafito visto en la literatura y experimentaciones realizadas; este

índice es un valor constante, al momento de analizar las propiedades con otro índice de refracción podemos observar las alteraciones en las propiedades ópticas del material.

### **Espesor del material $d=0.39$ [nm]**

Basándonos en la ecuación del coeficiente de absorción hallamos los valores del coeficiente de extinción en función de la longitud de onda al igual que la reflectancia del material con la ecuación óptica universal.

Reemplazando de la ecuación (3) vista anteriormente se obtiene:

$$R\% = 3.4543 \%$$

Reemplazando de la ecuación (4) vista anteriormente se obtiene el valor de la transmitancia siendo equivalente al valor de la luz transmitida sobre la luz incidente, tomando valores aproximados en la ecuación se lleva a cabo que  $I/I_0 = (1 - \pi\alpha)$  y  $\frac{1}{1-R} = 1$ .

Haciendo una aproximación de la ecuación con estos nuevos valores tenemos que

$$k = -\frac{\lambda}{4\pi n d} \ln[1 - \pi\alpha]$$

Según las referencias bibliográficas, se obtiene un valor aproximado del coeficiente de extinción del material.

$$k = C1 * \frac{\lambda}{n}$$

Donde el valor de C1 es aproximadamente  $9,1456 \mu\text{m}^{-1}$ .

El coeficiente de extinción queda en función del rango  $\lambda = 200 \text{ nm a } 900 \text{ nm}$  y del índice de refracción indicado  $n=2.6$ . Además los valores hallados son comparados con otros resultados teóricos que indican que la energía de brecha prohibida es aproximadamente mínima; **Egap= 0 a 250 meV**. Estos valores típicos son comparados con la ficha técnica del material, por lo tanto, se puede deducir que el valor es un dato valido para la experimentación.

### 3.4 ANÁLISIS Y DATOS TÉCNICOS DEL MATERIAL

A continuación se muestran los resultados obtenidos teóricamente según las constantes de Fresnel, como referencia se muestra una tabla con los datos técnicos y los coeficientes ópticos del RGO.

Tabla 1. Datos técnicos de las láminas de Oxido de Grafeno Reducido

NOMBRE COMPLETO DEL MATERIAL	AGENTE REDUCTOR	SUSTRATO E ÍNDICE DEL SUSTRATO	ÍNDICE DE REFRACCIÓN DEL MATERIAL	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN	COEFICIENTE DE EXTINCIÓN
Grafeno Químicamente Reducido GQR	Borohidruro de sodio	Cuarzo S=1,5	n=2,6	$\alpha = 0.000108$	$k = C1 * \frac{\lambda}{n}$
Grafeno Químicamente Reducido GQR	Borohidruro de sodio	Cuarzo S=1,5	n=2,6	$\alpha = 0.000117$	$k = C1 * \frac{\lambda}{n}$
Grafeno Químicamente Reducido GQR	Ácido Ascórbico	Cuarzo S=1,5	n=2,6	$A = -0.00177$	$k = C1 * \frac{\lambda}{n}$

Tabla 2. Datos técnicos de las láminas de Oxido de Grafeno Reducido.

ESPEJOR DEL MATERIAL	TRANSMITANCIA %	ABSORBANCIA	REFLECTANCIA	BANDA GAP EGAP
d=0.34 [nm]	T=96,58%	A=0,002114	R= 0.003208	E= 0 A 250 meV
d=0.39[nm]	T=96,31%	A=0,002357	R= 0.0034543	E= 0 A 250 meV
d=0.34 [nm]	T=115,85 %	A= 0,00005	R= -0.1585	E= 0

Donde el valor de **C1** es aproximadamente  $[nm^{-1} - \mu m^{-1}]$ . El coeficiente de extinción queda en función del rango  $\lambda = 200 \text{ nm a } 900 \text{ nm}$  y del índice de refracción indicado **n=2.6**.

### 3.5 CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE

Con el fin de obtener un valor más cercano al real. A continuación se desarrollara el cálculo de la incertidumbre, cabe resaltar que los valores fueron tomados y efectuados tras diferentes mediciones de transmisión y absorción. Los datos se muestran en los anexos.

**3.5.1 Incertidumbre del Oxido de Grafeno Reducido GQR.** Para obtener la incertidumbre de las muestras de RGO se tiene en cuenta las mediciones hechas en el espectrofotómetro, el modelo matemático, el número de veces que se realizó la caracterización y las variaciones que causa el aparato de medida con el mensurando o valor medido. En el (Anexo 3) se muestra teóricamente los tipos de incertidumbre y los diferentes tipos de error porcentual.

**Características del espectrofotómetro:** espectrofotómetro UV-2401 PC SHIMADUZA

**Rango:** 190 a 900 nm.

**Resolución:** 0.1 nm.

**Exactitud:** 0.3 nm.

En este caso los valores de la incertidumbre se llevaran a cabo por las características del aparato de medida, esta incertidumbre es conocida como la tipo B.

**3.5.2 Valor del Mensurando o Incertidumbre Total.** En la siguiente tabla se mostrarán los valores finales de dichos cálculos.

Tabla 3. Incertidumbre de las películas delgada de RGO

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Incertidumbre General absorbancia	$96.58 \pm 0.325$ nm
Incertidumbre General Transmitancia	$0.2114 \pm 0.325$ nm
Incertidumbre General Absorbancia	$0.2357 \pm 0.325$ nm
Incertidumbre General Transmitancia	$96.31 \pm 0.325$ nm

#### 4. CONCLUSIONES

- Los perfiles de transmitancia que se presentaron en las muestras indican que el proceso de reducción con el borohidruro de sodio presenta menos impurezas en la estructura del óxido de grafeno reducido, mayor será la transmitancia, por lo tanto, el borohidruro de sodio es un buen agente reductor que puede reemplazar la hidracina y al ácido ascórbico para el proceso de reducción y posterior obtención del GQM.
- La caracterización ultravioleta-visible es un método muy práctico que sirve para analizar la transparencia del grafeno y poder deducir las constantes ópticas del material. Aunque en el proceso de ubicación de las películas delgadas en el portaobjetos del espectrofotómetro hay que ser muy cuidadoso ya que con cualquier movimiento involuntario se puede romper o causar una imperfección en la homogeneidad de la muestra, ocasionando una incorrecta lectura de datos.
- El perfil de absorbancia del GQR, en el rango ultravioleta muestra el mayor porcentaje de absorbancia del material, mientras que en el espectro visible, manifestó no poseer características como absorbente. Por lo tanto el espectro visible es altamente transparente y nos indica que el GQR se puede implementar como contacto transparente en celdas solares fotovoltaicas.
- El grafeno promete ser un potencial sustituto del ITO,  $\text{SnO}_2$  y el  $\text{TiO}_2$  como contacto transparente en celdas solares fotovoltaicas tipo película delgada, las sensibilizadas por colorantes y las OSC. Dicho material posee características ópticas, alta flexibilidad y ligero peso que lo diferencian de los electrodos convencionales. Además es un material de innovación, abundante en la naturaleza y económico que puede generar energía eléctrica a bajo costo.

- El grafeno, aunque ya lleva más de una década de su descubrimiento, la mayoría de los avances se encuentran en etapas de experimentación. Las investigaciones siguen demostrando su atracción por este innovador material y se encaminan en la implementación apropiada para producir tecnología solar fotovoltaica a gran escala ya que hasta ahora sigue siendo tema de estudio y continúa investigación.
- Se obtuvieron las propiedades ópticas adecuadas para que el RGO cumpla con los parámetros para ser utilizado como contacto superior en la celda fotovoltaica; este tipo de clasificación del material hace que el RGO muestra sus características ópticas y eléctricas para ser aplicados. El estudio y análisis de los parámetros corroboran los resultados de los coeficientes de Fresnel.

## 5. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- El grafeno es un material que desde su descubrimiento en 2004 ha sido de interés investigativo y tecnológico; por medio de análisis y procesos este gran material está siendo aplicado y comercializado para empresas e industrias de nanoestructuras y nanotecnología. El grafeno además de tener las propiedades ópticas mencionadas, también puede ser utilizado para dispositivos electrónicos, almacenadores de energía, sensibilizadores y contraelectrodo en DSSC.
- Al obtener la película delgada se tiene en cuenta las cantidades de soluciones químicas utilizadas, ya que la proporción usada en el proceso de reducción hace que el material sea más puro, homogéneo y electroestáticamente estable. Se recomienda trabajar con diferentes tipos de reductores, variación de sustratos y por último deferir en la deposición del Óxido de Grafeno (OG) al sustrato tomado.
- Para mejorar la exactitud de las pruebas, es importante trabajar con diferentes tipos de sustratos y variación de reductores químicos así las diferentes muestras tendrán un proceso diferente y nuestras películas delgadas futuras sean más puras y homogéneas al momento de ser caracterizadas y aplicadas.
- Los instrumentos de medida utilizados, como el espectrofotómetro, en lo posible que sea de mayor precisión ya que nuestras medidas son unidades nano, además debe poseer los certificados y parámetros de calibración en buen régimen.
- Al ser comparado el grafeno con otros materiales de iguales características, se verifico que el grafeno posee un gran porcentaje de transparencia sin presentar pérdidas de transporte, más flexible y además es un material con alta

rigidez; en los últimos se han trabajado proyectos con arquitectura moderna utilizando este material tanto en paneles fotovoltaicos, como en estructuras (fachadas, edificios, ventanas). Este material es amigable con el medio ambiente y está causando un modelo de innovación tanto en la tecnología como en otras aplicaciones, por lo tanto, es recomendable seguir investigando y analizando los procesos aplicativos de este gran material.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pablo Solís Fernández. Modificación Superficial de Materiales de Carbono: Grafito y Grafeno. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Oviedo. 2011.
- [2] Bae S., Kim H., Lee Y., Xu X., Park J.-S., Zheng Y., Balakrishnan J., Lei T., Ri Kim H., Song Y.I., Kim Y.-J., Kim K.S., Ozyilmaz B., AhnJ.-H., Hong B.H. and Iijima S., "Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes," *Nat.Nanotechnol.* 5,574-578 (2010).
- [3] Wang X., Zhi L. and Mullen K., "Transparent. Conductive Graphene Electrodes for Dye-Sensitized Solar Cells," *Nano Lett.* 8, 323-327 (2007)
- [4] Matyba P., Yamaguchi H., Eda G., Chhowalla M., Edman L. and Robinson N.D., "Graphene and Mobile Ions: The Key to All-Plastic, Solution-Processed Light-Emitting Devices," *ACS Nano* 4, 637-642 (2010).
- [5] Sistema de Observación y prospectiva tecnológica (SOPT), Propiedades y aplicaciones del grafeno. España, Julio 2013, monografías de SPOT, 41h-63h
- [6] ANAYA ROJAS, Luis Fernando y ACOSTA CORTÉS, Fabian Enrique. Caracterización eléctrica de grafeno químicamente reducido y evaluación de su potencial de aplicación en celdas solares.Trabajo de investigación UIS Dirigido por Johan FarithPetit Suárez y Gilberto Carrillo Caicedo - E3T – 2014.
- [7] Adrian Kital. Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes . Ed Wiley. Departments of Engineering Physics and Materials Science and Engineering, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, First published 2011.

- [8] L. L. Kazmerski. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2010.
- [9] M. Green, Solar Cells. Australia: University of New South Wales Press, 1998. Especially see sections 9.4 and 9.6.
- [10] National Renewable Energy Laboratory (NRE). Agosto 2015. URL: [http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg).
- [11] X.M. li, H.W. Zhu, K .L. Whong, J. Q. Wei, C. Y. Li and D. H. Wu. Schottky solar cells Based on Graphene and Silicon. Key laboratory for advanced manufacturing by Material Processing Technology and Department of Mechanical Engineering. Tsinghua University. Beijing R.P China.
- [12] SaïdouMadougou, Mohamadou Kaka and GregoireSissoko. Silicon Solar Cells: Recombination and Electrical Parameters. UniversityAbdouMoumouni of Niamey, BP 10 963- Niamey.
- [13] Vallejo Lozada William Andres. Síntesis de capa buffer para celdas solares de película delgada. Universidad América. Bogotá. Mayo 3 de 2012.
- [14] Conibeer, G.: Mater. Today. 10. 42-50. 2007.
- [15] Vallejo Lozada William Andres. Síntesis de capa buffer para celdas solares de película delgada. Universidad América. Bogotá. Mayo 3 de 2012.
- [16] Ben Nasr, T., Kamoun, N., Kanzari, M., Bennaceur, R.: Thin Solid Films 500, 4–8.2006.
- [17] J. Löffler. Transparent Conductive Oxides for Thin- Film Silicon Solar Cells. September 1971.

- [18] Timothy J. Coutts, Thomas O. Mason, John D. Perkins, David S. Ginley. "TRANSPARENT CONDUCTING OXIDES: STATUS AND OPPORTUNITIES IN BASIC RESEARCH". Presented at the 195th Meeting of the Electrochemical Society Seattle, Washington May 2-6, 1999.
- [19] Z. Yin, S. Sun, T. Salim, S. Wu, X. Huang, Q. He, Y. M. Lam, H. Zhang, "Organic photovoltaic devices using highly flexible reduced graphene oxide films as transparent electrodes", ACS Nano 4 (2010) 5263-5268.
- [20] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, " Electric field effect in atomically thin carbon films", Science 360 (2004) 666-669.
- [21] R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres, A. K. Geim, "Fine structure constant defines visual transparency of graphene", Science 320 (2008) 1308
- [22] Almanza-Nuñez, M. G., A. Almendárez-Camarillo, G.M. Martínez-González. J. F. Louvier-Herandez y J. C. Fierro-Gonzalez. "Síntesis, caracterización y aplicaciones de nanomateriales en catálisis y polímeros", *Revista de la Unión Científica Interamericana de Química*, G(72), (2011), 693-713
- [23] Peierls RE. Quelques propriétés typiques des corps solides. Ann. I. H. Poincaré Mayo (1935), 177-222.
- [24] Landau LD. Zur Theorie der Phasenumwandlungen II. Phys. Z. der Sowjetunion. Noviembre (1937), 26-35.

- [25] Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV, Jiang D, Zhang Y, Dubonos SV, Grigorieva IV, Firsov AA. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science* 306 (2004), 666-669.
- [26] Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2010: Graphene, compiled by the class physics of the royal swedish academy of sciences, 5 October 2010. (En línea). Sitio web:  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2010/advanced-physicsprize2010.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/advanced-physicsprize2010.pdf).
- [27] Y. H. Hu, H. Wang, B. Hu, “Thinnest-dimensional nanomaterial-graphene for solar energy”, *ChemSusChem*, (2010), 782-796
- [28] P. V. Kamat, *J. Phys.* “Graphene based nanoarchitectures, anchoring semiconductor and metal nanoparticles on a 2-dimensinal carbon support”, *Chem. Lett.* 1 (2010) 520-527.
- [29] Galina V. Dubacheva, Chin-KaiLiang, Dario M. Bassani. “ Functional monolayers from carbón nanostructures fullerenes, carbón nanotubes, and graphene as n novel materials for solar energy conversión”, ElseiverAbril 2012
- [30] Y. Wang, “Large area, continuos, few-layered graphene as anodes in organic photovoltaic devices” *Appl. Phys. Lett.* 95 (2009) 063302.
- [31] X. Yan, X. Cui, B. Li, L-s.Li, “Large solution-processable graphene quantum dots as light absorbers for photovoltaics”, *Nano Lett* 10 (2010) 1869-1873.

- [32] Enzheng Shi, Hongbhan Li, Long Yang, Luhui Zhang, Zhen Li, Peixu Li, Yuanyuan Shang, Shiting Wu, Xinming Li, Jinqun Wei, Kunlin Wang, Hongwei Zhu, Dehai Wu, Ying Fang and Anyuan Cao. "Colloidal Antireflection Coating Improves Graphene-Silicon Solar Cell". Nano Lett, Marzo, 2013, 1776-1781.
- [33] Brody, H. "Graphene," Nature Outlook, Supplement to Nature, March 15, 2012, 483 (7389), March 15, 2012.
- [34] Geim, A. K.; Kim, P. Carbon Wonderland, Scientific American, April 2008, 299, pag90–97.
- [35] Fox, M. Optical Properties of Solids. Department of Physics and Astronomy. University of Sheffield. Oxford. United States.2001.
- [36] Marquina J, Power Ch, Gonzalez J, Espectroscopia Raman del Grafeno monocapa y el grafito: acoplamiento electrón fonon y efectos no adiabáticos, Revista Tumbaga, 2010.
- [37] Espectroscopia Ultravioleta-visible. Pag 14-15. Sitio web:  
[http://www.fq.uh.cu/dpto/%23qf/docencia/pregrado/estruc\\_2/uv/descargas/uv\\_1.pdf](http://www.fq.uh.cu/dpto/%23qf/docencia/pregrado/estruc_2/uv/descargas/uv_1.pdf). (Consultado 20 de junio de 2015)
- [38] Anexo I: espectroscopia ultravioleta-visible pag3. URL:  
<http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/quimica-ii/practicas-1/PR-F-Anexos.pdf>.
- [39] Bruna, M. Borini, S. Optical constants of graphene layers in the visible range. Electromagnetic Division, INRIM. APPLIED PHYSICS LETTERS 94. Torino, Italy. 21 January 2009.

- [40] Nair, R.R. Blake P. Grigorenko,N,A. Novoselov,K,S. Booth, T, J. Stauber, T. Peres, N, M, R. and Geim,A, H. Science 320,1308 (2008).
- [41] Blake, P. Hill, E, W. Castro Neto, A, H. Novoselov, K, S. Jiang, D. Yang, R. Booth, T, J. and Geim, A, K.
- [42] Yañez Zamora Cynthia Edit. Sintesis y caracterización de películas delgadas del sistema  $ZrO_2:8\%Y_2O_3$  mediante la técnica sol-gel. Instituto Politecnico Nacional. Altamira. Junio 2008.
- [43] Marta Rosel Pérez Morales. “Películas Orgánicas Delgadas Preparadas Mediante Diversos Métodos. Propiedades Ópticas, Morfológicas y eléctricas.” Departamento de Química Física y Termodinámica Aplicada. Universidad de Córdoba. Mayo 2005.
- [44] Bruna,M. Borini, S. Optical constants of graphene layers in the visible range. Electromagnetic Division, INRIM. APPLIED PHYSICS LETTERS 94. Torino, Italy. 21 January 2009.
- [45] Nair, R,R. Blake P. Grigorenko,N,A. Novoselov,K,S. Booth, T, J. Stauber, T. Peres, N, M, R. and Geim,A, H. Science 320,1308 (2008).
- [46] Blake, P. Hill, E, W. Castro Neto, A, H. Novoselov, K, S. Jiang, D. Yang, R. Booth, T, J. and Geim, A, K.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adrian Kital. Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes . Ed Wiley. Departments of Engineering Physics and Materials Science and Engineering, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, First published 2011.
- Almanza-Nuñez, M. G., A. Almendárez-Camarillo, G.M. Martinez-González. J. F. Louvier-Herandez y J. C. Fierro-Gonzalez. "Síntesis, caracterización y aplicaciones de nanomateriales en catálisis y polímeros", *ide@s CONCYTEG*, G(72), (2011), 693-713
- ANAYA ROJAS, Luis Fernando y ACOSTA CORTÉS, Fabian Enrique. Caracterización eléctrica de grafeno químicamente reducido y evaluación de su potencial de aplicación en celdas solares. Trabajo de investigación UIS Dirigido por Johan FarithPetit Suárez y Gilberto Carrillo Caicedo - E3T – 2014.
- Anexo I: espectroscopia ultravioleta-visible pag3. URL:  
<http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/quimica-ii/practicas-1/PR-F-Anexos.pdf>.
- Bae S., Kim H., Lee Y., Xu X., Park J.-S., Zheng Y., Balakrishnan J., Lei T., Ri Kim H., Song Y.I., Kim Y.-J., Kim K.S., Ozyilmaz B., AhnJ.-H., Hong B.H. and Iijima S., "Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes," *Nat.Nanotechnol.* 5,574-578 (2010).
- Ben Nasr, T., Kamoun, N., Kanzari, M., Bennaceur, R.: *Thin Solid Films* 500, 4–8.2006.
- Blake, P. Hill, E, W. Castro Neto, A, H. Novoselov, K, S. Jiang, D. Yang, R. Booth, T, J. and Geim, A, K.

- Blake, P. Hill, E, W. Castro Neto, A, H. Novoselov, K, S. Jiang, D. Yang, R. Booth, T, J. and Geim, A, K.
- Brody, H. "Graphene," Nature Outlook, Supplement to Nature, March 15, 2012, 483 (7389), March 15, 2012.
- Bruna, M. Borini, S. Optical constants of graphene layers in the visible range. Electromagnetic Division, INRIM. APPLIED PHYSICS LETTERS 94. Torino, Italy. 21 January 2009.
- Bruna, M. Borini, S. Optical constants of graphene layers in the visible range. Electromagnetic Division, INRIM. APPLIED PHYSICS LETTERS 94. Torino, Italy. 21 January 2009.
- Conibeer, G.: Mater. Today. 10. 42-50. 2007.
- Enzheng Shi, Hongbian Li, Long Yang, Luhui Zhang, Zhen Li, Peixu Li, Yuanyuan Shang, Shiting Wu, Xinming Li, Jinquan Wei, Kunlin Wang, Hongwei Zhu, Dehai Wu, Ying Fang and Anyuan Cao. "Colloidal Antireflection Coating Improves Graphene-Silicon Solar Cell". Nano let, Marzo, 2013, 1776-1781.
- Espectroscopia Ultravioleta-visible. Pag 14-15. Sitio web: [http://www.fq.uh.cu/dpto/%23qf/docencia/pregrado/estruc\\_2/uv/descargas/uv\\_1.pdf](http://www.fq.uh.cu/dpto/%23qf/docencia/pregrado/estruc_2/uv/descargas/uv_1.pdf). (Consultado 20 de junio de 2015)
- Fox, M. Optical Properties of Solids. Department of Physics and Astronomy. University of Sheffield. Oxford. United States. 2001.

- Galina V. Dubacheva, Chin-KaiLiang, Dario M. Bassani. “ Functional monolayers from carbón nanostructures fullerenes, carbón nanotubes, and graphene as n novel materials for solar energy conversión”, ElseiverAbril 2012
- Geim, A. K.; Kim, P. Carbon Wonderland, Scientific American, April 2008, 299, pag90–97.
- J. Löffler. Transparent Conductive Oxides for Thin- Film Silicon Solar Cells. September 1971.
- K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, “ Electric field effect in atomically thin carbon films”, Science 360 (2004) 666-669.
- L. L. Kazmerski. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2010.
- Landau LD. ZurTheorie der phasenumwandlungen II. Phys. Z. der Sowjetunion. Noviembre (1937), 26-35.
- M. Green, Solar Cells. Australia: University of New South Wales Press, 1998. Especially see sections 9.4 and 9.6.
- Marquina J, Power Ch, Gonzalez J, Espectroscopia Raman del Grafeno monocapa y el grafito: acoplamiento electrón fonon y efectos no adiabáticos, Revista Tumbaga, 2010.
- Marta Rosel Pérez Morales. “Películas Orgánicas Delgadas Preparadas Mediante Diversos Métodos. Propiedades Ópticas, Morfológicas y eléctricas.” Departamento de Química Física y Termodinámica Aplicada. Universidad de Córdoba. Mayo 2005.

- Matyba P., Yamaguchi H., Eda G., Chhowalla M., Edman L. and Robinson N.D., "Graphene and Mobile Ions: The Key to All-Plastic, Solution-Processed Light-Emitting Devices," ACS Nano 4, 637-642 (2010).
- Nair, R.R. Blake P. Grigorenko,N,A. Novoselov,K,S. Booth, T, J. Stauber, T. Peres, N, M, R. and Geim,A, H. Science 320,1308 (2008).
- Nair, R.R. Blake P. Grigorenko,N,A. Novoselov,K,S. Booth, T, J. Stauber, T. Peres, N, M, R. and Geim,A, H. Science 320,1308 (2008).
- National Renewable Energy Laboratory (NRE). Agosto 2015. URL: [http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg).
- Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV, Jiang D, Zhang Y, Dubonos SV, Grigorieva IV, Firsov AA. Electric field effect in atomically thin carbon films. Science 306 (2004), 666-669.
- P. V. Kamat, J. Phys. "Graphene based nanoarchitectures, anchoring semiconductor and metal nanoparticles on a 2-dimensinal carbon support", Chem. Lett. 1 (2010) 520-527.
- Pablo Solís Fernández. Modificación Superficial de Materiales de Carbono: Grafito y Grafeno. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Oviedo. 2011.
- Peierls RE. Quelques proprietes typiques des corps solides. Ann. I. H. Poincaré Mayo (1935), 177-222.

- R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres, A. K. Geim, "Fine structure constant defines visual transparency of graphene", *Science* 320 (2008) 1308
- SaïdouMadougou, Mohamadou Kaka and GregoireSissoko. Silicon Solar Cells: Recombination and Electrical Parameters. UniversityAbdouMoumouni of Niamey, BP 10 963- Niamey.
- Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2010: Graphene, compiled by the class physics of the royal swedish academy of sciences, 5 October 2010. (En línea). Sitio web:  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2010/advanced-physicsprize2010.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/advanced-physicsprize2010.pdf).
- Sistema de Observación y prospectiva tecnológica (SOPT), Propiedades y aplicaciones del grafeno. España, Julio 2013, monografías de SPOT, 41h-63h
- Timothy J. Coutts, Thomas O. Mason, John D. Perkins, David S. Ginley. "TRANSPARENT CONDUCTING OXIDES: STATUS AND OPPORTUNITIES IN BASIC RESEARCH". Presented at the 195th Meeting of the Electrochemical Society Seattle, Washington May 2-6, 1999.
- Vallejo Lozada William Andres. Síntesis de capa buffer para celdas solares de película delgada. Universidad América. Bogotá. Mayo 3 de 2012.
- Vallejo Lozada William Andres. Síntesis de capa buffer para celdas solares de película delgada. Universidad América. Bogotá. Mayo 3 de 2012.
- Wang X., Zhi L. and Mullen K., "Transparent. Conductive Graphene Electrodes for Dye-Sensitized Solar Cells," *Nano Lett.* 8, 323-327 (2007)

- X. Yan, X. Cui, B. Li, L-s.Li, "Large solution-processable graphene quantum dots as light absorbers for photovoltaics", *Nano Lett* 10 (2010) 1869-1873.
- X.M. li, H.W. Zhu, K .L. Whong, J. Q. Wei, C. Y. Li and D. H. Wu. Schottky solar cells Based on Graphene and Silicon. Key laboratory for advanced manufacturing by Material Processing Technology and Department of Mechanical Engineering. Tsinghua University. Beijing R.P China.
- Y. H. Hu, H. Wang, B. Hu, "Thinnest-dimensional nanomaterial-graphene for solar energy", *ChemSusChem*, (2010), 782-796
- Y. Wang, "Large area, continuous, few-layered graphene as anodes in organic photovoltaic devices" *Appl. Phys. Lett.* 95 (2009) 063302.
- Yañez Zamora Cynthia Edit. Síntesis y caracterización de películas delgadas del sistema  $ZrO_2:8\%Y_2O_3$  mediante la técnica sol-gel. Instituto Politecnico Nacional. Altamira. Junio 2008.
- Z. Yin, S. Sun, T. Salim, S. Wu, X. Huang, Q. He, Y. M. Lam, H. Zhang, "Organic photovoltaic devices using highly flexible reduced graphene oxide films as transparent electrodes", *ACS Nano* 4 (2010) 5263-5268.

## **ANEXOS**

Anexo A. Perfil de absorbancia y transmitancia con Borohidruro de Sodio (ver archivo Excel adjunto)

Anexo B. Perfil de absorbancia y transmitancia con Ácido Ascórbico (ver archivo Excel adjunto)

Anexo C. Espectroscopía RAMAN (ver archivo Excel adjunto)

### 3.1 ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

Al momento de hacer el proceso de caracterización del material se deben que medir valores reales y confiables. La validez y confiabilidad del resultado se lleva a cabo por medio del análisis de la estimación de la incertidumbre, es necesario establecer un procedimiento fácilmente comprensible y aceptado universalmente para caracterizar la calidad del resultado de la medición.

A continuación se nombraran los modelos y tipos de proceso que deben ser necesarios para que las aproximaciones de los valores reales sean más terminantes y precisas.

**3.1.1 Modelo Matemático.** Un modelo matemático es aquel que transforma mediciones repetidas de un mismo mensurando en un solo valor y un rango de incertidumbre de dicha medida. El modelo matemático tiene como referencia que el mensurando  $Y$  no es una medida directa ya que es una relación funcional  $f$  a partir de  $N$  magnitudes  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ .

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (1)$$

Se debe tener en cuenta que la función  $f$  no solo depende de los valores de  $X_i$  siendo  $i=0, 1, 2, \dots, n$ ; también se debe aplicar los factores o criterios de corrección [43].

**3.1.2 Modelo Físico.** Es una representación que se hace del mensurando con el régimen de estudiar detalladamente las variables físicas obtenidas de las distintas mediciones.

Un ejemplo muy conciso es la deposición del material en el sustrato de vidrio, esta deposición es aplicada utilizando el método de recubrimiento; este método tiene variables físicas importantes al diseñar la película delgada. Algunas de estas variables son el comportamiento temporal de la muestra, la homogeneidad y simetría. Estas características son de gran importancia al momento de medir la incertidumbre ya que estos factores influyen en el instante de hacer la medida [42]

**3.1.3 Cuantificación de la Incertidumbre.** El método de cuantificación para estimar la incertidumbre se basa en la evaluación de incertidumbre tipo A, este método de incertidumbre se basa en un análisis de probabilidad y estadística. Un segundo método es la evaluación de incertidumbre tipo B, este tipo de evaluación se basa en métodos distintos al proceso estadístico.

Estos métodos de cuantificación se basan en la incertidumbre del material, la repetitividad de las lecturas, tipo de instrumento de medida, modelo de medición, características del instrumento de reproducibilidad. Todas estas características se tienen en cuenta para el análisis completo de la estimación de la incertidumbre

A continuación se mostrara detalladamente los tipos de evaluación de incertidumbre:

**3.1.3.1 Evaluación de Incertidumbre Tipo A.** La evaluación de la incertidumbre tipo A (UA) generalmente se basa en distribuciones de frecuencia y mediciones repetidas. Es utilizada cuando se han realizado N observaciones independientes bajo las mismas condiciones de medida, cuando una medida se repite en las mismas condiciones puede observarse una dispersión o fluctuación dependiendo de la resolución adecuada.

El método general de este tipo de evaluación es basado en la repetitividad compuesta de n medidas independientes, el valor adecuado del mensurando viene dado por la media aritmética de los valores medidos [42].

$$q_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (2)$$

Los valores de  $q_i$  difieren por las variaciones y variables aleatorias. La desviación estándar experimental está basada en la varianza de la distribución de  $q$  y me brinda la variabilidad de los observados  $q_k$ , es decir su dispersión alrededor de la media de  $q$ .

$$s^2_{qk} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - q)^2 \quad (3)$$

La varianza experimental de la media, junto con su raíz cuadrada se denomina desviación estándar experimental, esta deduce el valor de la incertidumbre de los valores medidos. Si las diferentes variaciones aleatorias están correlacionadas, la incertidumbre está basada en el factor de correlación  $r$  ( $q_i, q_j$ ). Esta correlación se debe al equipo de medida que interfiere con las entradas del mensurando, su cálculo es mostrado en la siguiente ecuación.

$$U_a y = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{df}{dx_i}\right)^2 u(x_i)^2 + \sum_{i,j=1}^N \frac{df}{dx_i} \frac{df}{dx_j} u(x_i) u(x_j) r_{x_i, x_j}} \quad (4)$$

En la mayoría de los casos se recomienda realizar más de 20 medidas así se deduce que la incertidumbre es confiable, según normatividad se debe que tener al menos 30 muestras para poder analizarla por el método tipo A y obtener un valor real de la incertidumbre. La evaluación tipo A en general es un proceso

estadístico de una serie de medidas  $X_k$  que se tienen en cuenta como variables aleatorias del mensurando y se calcula por la siguiente ecuación general [43].

$$u_{Xi} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2}}{n(n-1)} \quad (5)$$

**3.1.3.2 Evaluación de Incertidumbre Tipo B.** Al tener una medida que no se ha obtenido de observaciones y mediciones repetidas, la incertidumbre se calcula por un método basado en la información disponible de la variabilidad del mensurando. Este tipo de método cuenta con ciertos parámetros específicos al momento de brindar la incertidumbre. Estos parámetros son:

1. Especificaciones y Manuales de los instrumentos de medida
2. Normatividad
3. Comportamiento del Sistema de Medición
4. Medidas anteriores

En este proyecto se decidió tener una distribución rectangular debido a que la estimación completa de la incertidumbre debe ser tomada como un valor exacto y una distribución consistente. Esta distribución define algunos valores de la incertidumbre como la exactitud y resolución del instrumento de medida que debe ser combinada para obtener UB [43].

$$UB = \sqrt{\mu_{res}^2 + \mu_{exac}^2} \quad (6)$$

Por finalizar ya teniendo los resultados de las incertidumbres tipo A y tipo B se elevan al cuadrado y se combinan entre sí para obtener la incertidumbre real. Este valor  $U_c$  es conocido como la tolerancia del valor medido o incertidumbre combinada, esta incertidumbre será la definitiva que se le adjuntará al valor del mensurando.

$$U_c = \sqrt{U_a^2 + U_B^2} \quad (7)$$

En nuestro caso este valor de  $U_c$  será el denotado en las medidas realizadas en este documento, teniendo en cuenta que los valores medidos y seleccionados son los referentes a los instrumentos de medida que se establecen en el documento. Cabe aclarar que las mediciones y resultados varían según los instrumentos utilizados

### **Referencia**

Comité Conjunto de Guías de Metrología (JCGM): Evaluación de Datos de Medición, Guía para la Expresión de la Incertidumbre Medida, Centro Español De Metrología, España, Septiembre 2008.

Javier Miranda Martin Del Campo: Evaluación de la incertidumbre, Datos experimentales, pag 3-4-5-6-7-8.