

**CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE GRAFENO QUÍMICAMENTE REDUCIDO
(GQR) Y EVALUACIÓN DE SU POTENCIAL APLICACIÓN EN CELDAS
SOLARES**

**LUIS FERNANDO ANAYA ROJAS
FABIAN ENRIQUE ACOSTA CORTES**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS ESCUELA DE
INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICIONES
BUCARAMANGA**

2014

**CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE GRAFENO QUÍMICAMENTE REDUCIDO
(GQR) Y EVALUACIÓN DE SU POTENCIAL APLICACIÓN EN CELDAS
SOLARES**

**LUIS FERNANDO ANAYA ROJAS
FABIÁN ENRIQUE ACOSTA CORTES**

Trabajo de grado en la modalidad de investigación
Presentado para obtener el título de Ingenieros Electricistas

Director

JOHANN FARITH PETIT SUAREZ
Ingeniero Electricista, PhD.

Co-director

GILBERTO CARRILLO CAICEDO
Ingeniero Electricista, PhD

Co-director

ENRIQUE MEJÍA OSPINO
Químico, PhD

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS ESCUELA DE
INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICIONES
BUCARAMANGA**

2014

AGRADECIMIENTOS

**A Dios por permitirnos la oportunidad de estudiar y
forjar nuestros caminos,
Por las personas que contribuyeron con nuestra
formación; familia, amigos y profesores
Por los logros alcanzados y por la oportunidad de
emprender un nuevo camino.**

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	24
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	25
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	25
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	25
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	25
2. MARCO TEÓRICO	26
2.1. GRAFENO.....	26
2.2. SEMICONDUCTORES	28
2.3. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN MATERIAL ANTE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA	31
2.4. CELDAS SOLARES	31
2.4.1. Celdas solares a base de silicio.	34
2.4.2. Celdas orgánicas solares.....	36
2.4.3. Celdas solares sensibilizadas por colorantes.....	39
2.5. APLICACIÓN DE GRAFENO COMO ELECTRODO EN CELDAS SOLARES.....	41
2.5.1. Grafeno en celdas orgánicas solares.	43
2.5.2. Grafeno en celdas solares sensibilizadas por colorantes.....	44
2.5.3. Grafeno en celdas solares a base de silicio.....	45
3. MARCO METODOLÓGICO.....	46
3.1. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE.....	46
3.1.1. Modelo Físico.	46
3.1.2. Modelo Matemático.	47
3.1.3. Cuantificación de la Incertidumbre.....	47

3.1.3.1.	Método de Evaluación Tipo A.....	48
3.1.3.2.	Método de Evaluación Tipo B.....	50
3.2.	MÉTODO DE RECUBRIMIENTO POR ROTACIÓN.....	51
3.3.	MÉTODO DE LOS CUATRO PUNTOS PARA CÁLCULO DE RESISTENCIA DE CAPA	53
3.3.1.	Cálculo de resistencia de capa.....	56
3.3.2.	Factor de corrección geométrico.....	59
3.4.	MEDIDA DEL COMPORTAMIENTO DEL GQR ANTE CAMBIOS DE TEMPERATURA.....	60
3.5.	TRANSMITANCIA Y ABSORBANCIA	60
3.5.1.	Transmitancia.....	60
3.5.2.	Absorbancia.....	60
3.6.	ESPECTROSCOPIA ULTRAVIOLETA-VISIBLE (UV-Vis).....	61
4.	DISCUSIÓN Y RESULTADOS.....	63
4.1.	SECCIÓN QUÍMICA EXPERIMENTAL	63
4.1.1.	Acondicionamiento y caracterización del grafito.....	64
4.1.2.	Obtención y caracterización de los óxidos de grafito y grafeno.....	65
4.1.3.	Obtención y caracterización de grafeno químicamente reducido (CRG).....	69
4.2.	SELECCIÓN DE LA MUESTRA BASE Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	70
4.3.	USO DEL MÉTODO DE LOS CUATRO PUNTOS.....	73
4.4.	DATOS OBTENIDOS DE TENSIÓN Y CORRIENTE	74
4.5.	CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE.....	75
4.5.1.	Incertidumbre del ITO.....	76
4.5.2.	Incertidumbre del GQR.	79
4.6.	OBTENCIÓN DE RESISTENCIA DE CAPA.....	79
4.7.	ESPECTRO DE ABSORCIÓN DEL GRAFENO.....	80
4.8.	GRAFENO ANTE CAMBIOS DE TEMPERATURA	82
4.9.	GRAFENO, INDIO Y SILICIO EN CELDAS SOLARES.....	83

5.	CONCLUSIONES	87
6.	TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES.....	89
	BIBLIOGRAFIAS.....	98
	ANEXOS	106

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades del Silicio.....	36
Tabla 2. Factor de corrección para una muestra rectangular.	59
Tabla 3. Valores de tensión y corriente obtenidos.	75
Tabla 4. Especificaciones del multímetro analógico-digital.	76
Tabla 5. Especificaciones del miliamperímetro analógico.....	77
Tabla 6. Incertidumbre del GQR	79
Tabla 7. Características de grafeno, indio y silicio en celdas solares.	86

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Modelo estructural de la red cristalina del grafeno.	26
Figura 2. Grafeno como modelo estructural de los fullerenos, los nanotubos de carbono y el grafito.....	27
Figura 3. Diagrama de bandas de energía de semiconductores.	29
Figura 4. Comportamiento de la conductividad al variar la temperatura de un semiconductor.....	30
Figura 5. Eficiencia en celdas solares.....	33
Figura 6. Estructura de una celda solar de silicio.....	35
Figura 7. Celda orgánica solar de una capa.	37
Figura 8. Estructura de celda solar orgánica plana de heterounión.	38
Figura 9. Estructura de celda solar orgánica voluminosa de heterounión.....	39
Figura 10. Estructura de celda solar sensibilizada por colorante (DSSC).....	40
Figura 11. Proceso de transferencia electrónica.....	41
Figura 12. Esquema de producción rollo a rollo de capas de grafeno.	43
Figura 13. Resultado final de capa de grafeno depositada sobre sustrato de plástico.....	44
Figura 14. Estructura de célula solar sensibilizada por colorantes con grafeno	45
Figura 15. Estructura de celda solar a base de silicio y grafeno.....	45
Figura 16. Etapas de la técnica recubrimiento por rotación.	53
Figura 17. Disposición de la prueba de cuatro puntos sobre una muestra rectangular.	54
Figura 18. Diagrama circuital del método de los cuatro puntos.	55
Figura 19. Arreglo de electrodos de tensión y corriente.....	56
Figura 20. Muestra de un materia de dimensiones L, W, y grosor t.....	58
Figura 21. Imágenes obtenidas durante el procedimiento de síntesis del óxido de grafeno. (a) Mezcla inicial de la reacción. (b) Reducción de las especies oxidantes remanentes. (c) Mezcla después de hidrolizar el	

óxido de grafito. (d) Mezcla ácida del GO decantado. (e) Dispersión acuosa del GO antes y después cada centrifugación. (f) Aplicación de US durante la conversión de óxido de grafito en óxido de grafeno.	67
Figura 22. Imágenes relacionadas con la determinación de la cantidad de óxido de grafeno obtenido. (a) Dispersión acuosa de óxido de grafeno. (b) Alícuota de GO disperso en agua. (c) GO sólido.	68
Figura 23. Imágenes obtenidas durante la síntesis de CRG. (a) Mezcla inicial y (b) final de la reacción.	69
Figura 24. Contenido de la muestra para la toma de datos.	70
Figura 25. Capa no homogénea de GQR.	71
Figura 26. Capa de GQR rasgada por electrodo.	72
Figura 27. Capa homogénea de GQR.	72
Figura 28. Aplicación del método de los cuatro puntos.	74
Figura 29. Espectro UV-VIS del grafeno en la región de 300 a 650 nm.	81
Figura 30. Comportamiento del GQR ante variación de temperatura.	83

LISTA DE ESQUEMAS

	Pág.
Esquema 1. Procedimiento de exfoliación del grafito empleando ultrasonido.	64
Esquema 2. Procedimiento de síntesis para la obtención del óxido de grafito.	65
Esquema 3. Procedimiento para la purificación, dispersión y estabilización del óxido de grafeno.	66
Esquema 4. Procedimiento para la determinación de la cantidad de óxido de grafeno obtenido.	68
Esquema 5. Procedimiento de síntesis para la obtención de grafeno químicamente reducido.	69

ANEXOS

Pág.

Anexo A. Esquema De Circuito Utilizado Como Fuente De Corriente Para El Método De Los Cuatro Puntos.	106
Anexo B. Descripción De Medidas De Tensión Ante Cambio De Temperatura...	108
Anexo C. Materiales Y Equipos Utilizados	109

ABREVIATURAS

CRG	Chemically reduced graphene
CVD	Chemical vapor deposition
CIGS	Copper indium gallium selenide
DSSC	Dye sensitized solar cells
FTO	Fluor tin oxide
FC	Factor de corrección
GO	Graphene oxide
GQR	Grafeno químicamente reducido
ITO	Indium tin oxide
LCD	Liquid cristal display
OPV	Organic photovoltaic
OSC	Organic solar cell
PCBM	[6,6]-fenil-C61-butirato de metilo
PCE	Power conversion efficiency
P3HT	Poly (3-hexylthiophene)
PEDOT	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)
PEDOT:PSS	Poli(3,4-etilenodioxitiofeno) : poli(estireno sulfonato)
PET	Polietileno Tereftalato
UV-Vis	Ultravioleta-Visible
US	Ultrasonido

GLOSARIO

Absortividad: Es la medida de la cantidad de luz absorbida por una disolución, definida como la unidad de absorbancia por unidad de concentración por unidad de longitud de la trayectoria de luz. Y como absortividad molar (E) se conoce a la absortividad definida en términos de concentraciones expresadas en moles por litro.¹

Analito: En química analítica un analito es el componente (elemento, compuesto o ion) de interés analítico de una muestra. Son especies químicas cuya presencia o concentración se desea conocer. El analito es una especie química que puede ser identificado y cuantificado, es decir, determinar su cantidad y concentración en un proceso de medición química, constituye un tipo particular de mensurando en la metrología química.²

Emisores de fósforo: La gran mayoría de las células solares de silicio que se comercializan tienen una base tipo-p, este suele situarse en la cara frontal de la célula solar y son denominados como emisores de fosforo.³

Catalizador: Sustancia que sirve para aumentar la velocidad de una reacción química, conocida como catálisis.⁴

CVD: La Deposición Química de Vapor o CVD (de sus siglas en inglés Chemical Vapor Deposition) es un proceso químico utilizado para producir productos de alta

¹ D. Skoog; J. Holler; T. Nieman. Principios de análisis instrumental. 5 ed., Editorial Mc Graw Hill, España, 2001, pp 322, 353-355 (UV-Vis). 411, 438-441, 450-452 (IR). 291, 297-298, 315 (DRX). 578, 592-593 (Microscopías). 593-596 (SEM).

² <http://quimica.laguia2000.com/general/analito> (Consultado el 2 de Noviembre de 2013)

³ PONCE ALCÁNTARA Salvador. Células solares de silicio: fundamentos y aplicaciones. Málaga, Noviembre de 2008. [en línea] Disponible en: Sitio web: <http://salvaponce.files.wordpress.com/2008/11/celulas-solares-de-silicio.pdf>. Citado en Noviembre de 2013.

⁴ F.Gong, H. Wang, Z. -S. Wang, , "Self-assembled monolayer of graphene/pt as counter electrode for efficient dye-sentitized solar cell", Phys. Chem. Chem. Phys. 13 (2011) 17676–17682.

pureza y de alto rendimiento de materiales sólidos. El proceso se utiliza a menudo en la industria de semiconductores para producir películas delgadas. En un proceso CVD estándar el sustrato (oblea) se expone a uno o más precursores volátiles, que reaccionan o se descomponen en la superficie del sustrato para producir el depósito deseado. Con frecuencia, también se producen subproductos volátiles, que son eliminados por medio de un flujo de gas que pasa a través de la cámara de reacción⁵

CIGS: Es el acrónimo en inglés de Copper indium gallium selenide (CuInGaSe₂), un material semiconductor compuesto de Cobre, Indio, Galio y Selenio. Es utilizado sobre todo por su alta eficiencia fotovoltaica para construir paneles solares, y por su menor coste con respecto del Silicio Metalúrgico.⁶

Excitón: Es una cuasipartícula (o excitación elemental) de los sólidos formada por un electrón y un hueco ligados a través de la interacción coulombiana. Se da únicamente en semiconductores y aislantes.⁷

Fotolitografía: Es un proceso empleado en la fabricación de dispositivos semiconductores o circuitos integrados. El proceso consiste en transferir un patrón desde una fotomáscara (denominada retícula) a la superficie de una oblea. El silicio, en forma cristalina, se procesa en la industria en forma de obleas.⁸

Fullerenos: Los fullerenos son moléculas tridimensionales estables y muy resistentes formadas exclusivamente por átomos de carbono. Los más comunes son C₆₀ y C₇₀. En el caso de los fullerenos C₆₀, sus patrones de hexágonos y

⁵ Smith, Donald (1995). Thin-Film Deposition: Principles and Practice. MacGraw-Hill, 1991.

⁶ http://www1.eere.energy.gov/solar/review_meeting/pdfs/prm2009_contreras_cigs.pdf (Consultado el 2 de Noviembre de 2013)

⁷ <http://www.aip.org/pnu/2006/split/800-1.html> (Consultado el 2 de Noviembre de 2013)

⁸ <http://www.lithoguru.com/scientist/lithobasics.html> (Consultado en noviembre de 2013).

pentágonos los asemejan al diseño de un balón de fútbol, y en el caso de los fullerenos C_{70} , al de una pelota de rugby.⁹

Hibridación sp^2 : En algunas moléculas se presenta el problema de explicar cómo a partir de orbitales atómicos diferentes se pueden formar enlaces idénticos. Hay que suponer que durante la reacción se produce un proceso de hibridación o recombinación de orbitales atómicos puros, resultando unos nuevos orbitales atómicos híbridos.

Dichos orbitales se caracterizan por:

1. Se produce el mismo número de orbitales híbridos que orbitales atómicos de partida.
2. Son todos iguales, energéticamente y formalmente. Sólo se diferencian en su orientación espacial.
3. Para que pueda existir hibridación, la energía de los orbitales atómicos de partida debe ser muy similar.
4. Los ángulos entre ellos son iguales. La hibridación sp^2 significa se combinan un orbital s con dos orbitales p.¹⁰

Hidrofiliidad: Es la tendencia de una superficie de volverse húmeda o de absorber agua. Cuando una superficie muestra hidrofiliidad, las moléculas de agua crean fronteras con las moléculas de la superficie.

Fuente: <http://www.wisegeek.com/what-is-hydrophilicity.htm> (Consultado el 20 de Agosto de 2013).

⁹ <http://www.caosyciencia.com/ideas/articulo.php?id=100112> (Consultado el 20 de Octubre de 2013)

¹⁰ <http://docentes.umss.edu.bo/Bioquimica/jquiroma/temas/estructura%20at%C3%B3mica%20y%20molecular/hibridaciones%20sp3%20sp2%20sp.pdf> (Consultado el 25 de Septiembre de 2013).

Líquido iónico: Es un fluido constituido exclusivamente por iones, considerándose como tales a las sales con una temperatura de fusión por debajo del punto de ebullición del agua (100 °C al nivel del mar, ya que varía de acuerdo a la presión atmosférica) y que a menudo son hidrolíticamente estables.¹¹

P3HT:PCBM: Es una mezcla entre P3HT y PCBM, y se considera una celda orgánica eficiente (5%), algo que es inusual en celdas orgánicas.¹²

PEDOT: PEDOT o Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) es un polímero conductor basado en 3,4-ethylenedioxythiophene. Las ventajas de este polímero son transparencia óptica en su estado de conducción, alta estabilidad, banda prohibida moderada y bajo potencial redox. El PEDOT al ser un conductor transparente y se utilizan para las pantallas LCD y las celdas solares, entre otros.¹³

PEDOT:PSS: Es una mezcla de polímeros utilizado como conductor transparente con alta ductilidad.¹⁴

PET: Polietileno Tereftalato, más conocido como PET, es un poliéster que forma parte de la familia de los plásticos termoformables (o termoplásticos) fácilmente moldeables cuando se le aplica el nivel de temperatura correspondiente. Por este motivo el PET puede adaptarse a cualquier forma y diseño, además de contar con un gran potencial de aplicaciones.¹⁵

¹¹ <http://pubs.rsc.org/en/journals/articlecollectionlanding?themeID=d3759160-edca-4baf-871d-b8873930c974> (Visto el 15 de noviembre de 2013).

¹² http://sces.phys.utk.edu/~dagotto/condensed/HW1_2009/osc.pdf (Consultado el 13 de Noviembre de 2013).

¹³ BELLO, A; Giannetto, M; MORI, G; SEEBER, R; TERZI, F; ZANARDI, C (2007). "Optimization of the DPV potential waveform for determination of ascorbic acid on PEDOT-modified electrodes". *Sensors and Actuators B: Chemical* 121 (2): 430. (Consultado el 2 de Noviembre de 2013).

¹⁴ L. Groenendaal, F. Jonas, D. Freitag, H. Pielartzik, J. R. Reynolds, Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) and Its Derivatives: Past, Present, and Future, *Adv. Mater.* 12 (2000) 481-494. (Consultado el 12 de Noviembre de 2013).

¹⁵ http://www.laseda.es/index2.php?lang=es&ID_cat=&PID_cat=&SID_cat=338&SSID_cat=343 (consultado el 13 de Noviembre de 2013).

Región de deplexión: Es una región aislante dentro de un conductor, un material semiconductor dopado donde los portadores de carga móviles se han difundido, o han visto forzados por un campo eléctrico.¹⁶

Subred triangular: Es una de las dos subredes unitarias triangulares no equivalentes, que conforman la red hexagonal del grafeno.¹⁷

¹⁶ AYERS John E. (2003). Digital Integrated Circuits: Analysis and Design..

¹⁷http://www.fisica.unam.mx/personales/naumis/index_archivos/Tesis/Tesis_Wilant.pdf (Consultado el 2 de Noviembre de 2013)

RESUMEN

Título: CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE GRAFENO QUÍMICAMENTE REDUCIDO (GQR) Y EVALUACIÓN DE SU POTENCIAL APLICACIÓN EN CELDAS SOLARES*

Autores: Luis Fernando Anaya Rojas, Fabian Enrique Acosta Cortes**

Palabras clave: Grafeno, grafeno químicamente reducido (GQR), celda solar, resistencia de capa, espectro de absorción, método de los cuatro puntos.

DESCRIPCIÓN

La comunidad académica y científica ha centrado su atención en el descubrimiento de nuevos materiales, para el desarrollo de tecnología solar a gran escala, económica y eficiente. Una forma de grafeno ha sido sintetizado, en forma de grafeno químicamente reducido (GQR), como posible reemplazo del óxido de indio estaño, conocido particularmente como ITO (por sus iniciales en inglés: indium tin oxide) y usado comúnmente como electrodo transparente en muchas celdas solares. De nuestra investigación hemos podido afianzar que el GQR presenta mejor transparencia que el ITO, además presenta una resistencia de capa considerablemente baja. Es indiscutible que existen otros métodos de obtención de grafeno, y por supuesto, otros electrodos además del GQR o del ITO (como lo son: nanotubos de carbono, óxido de grafeno, entre otros) que presenten características eléctricas y ópticas similares, por ende es sustancial realizar un análisis comparativo de las propiedades que presenta el GQR ante diferentes electrodos convencionales. En las celdas solares es imprescindible la variación de temperatura, puesto que siempre estarán expuestas a la irradiación solar y la intemperie, por consiguiente, se realiza un análisis detallado del comportamiento del GQR expuesto a cambios de temperatura. La entrada al mercado del GQR como electrodo transparente en celdas solares, amenaza en desplazar al ITO en celdas solares orgánicas (OSC), y en sustituir celdas solares de silicio por celdas sensibilizadas por colorantes (DSSC), que presenta bajo costo de producción a gran escala. El grafeno, por ser un alótopo del carbono es abundante y amigable con el medio ambiente.

* Trabajo de grado.

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Johann Farith Petit Suarez, *Ph.D.*

SUMMARY

TITLE: ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF CHEMICALLY REDUCED GRAPHENE (CRG) AND EVALUATION OF THEIR POTENTIAL APPLICATION IN SOLAR CELLS*

Authors: Luis Fernando Anaya Rojas, Fabian Enrique Acosta Cortes**

Keywords: Graphene, chemically reduced graphene (CRG), solar cell, sheet resistance, absorption spectrum, four point probe method

DESCRIPTION

The academic and scientific community has focused on the discovery of new materials, development of economic and efficient large scale solar technology. A form of graphene was synthesized in the form of chemically reduced graphene (CRG) as a possible indium tin oxide (ITO) replacement and commonly used as a transparent electrode in many solar cells. From our research, we could strengthen that CRG has better transparency than ITO, and has a considerably low sheet resistance. It is undisputed that there are other methods for obtaining graphene, and of course, other electrodes besides the CRG or ITO (such as: carbon nanotubes, graphene oxide, etc.) that show similar optical and electrical characteristics, so it is substantial to performed a comparative analysis of the properties presented in the CRG to different conventional electrodes . In solar cells is essential the temperature variation, since they will always be exposed to sunlight and outdoor, therefore, a detailed analysis of the behavior of CRG exposed to temperature changes. The entrance to the market of the CRG as transparent electrode for solar cells, threat to displace ITO in organic solar cell (OSC), and in replacing silicon solar cells by dye-sensitized solar cells (DSSC), which has low cost of mass production. Graphene, being an allotrope of carbon is abundant and environmentally friendly.

* Degree work.

** Physics and Mechanics Engineering Faculty. Electric, Electronics and Telecommunications Engineering. Director: Johann Farith Petit Suarez, *Ph.D.*

INTRODUCCIÓN

Al transcurrir los años, el crecimiento de la demanda eléctrica es cada vez más notable, las fuentes de energía convencionales existentes son limitadas, y por ello, la necesidad de implementar fuentes alternativas de energía es imprescindible. La energía solar puede ser la solución a estos problemas, pues es prácticamente ilimitada y ayuda a solucionar la crisis ambiental.

La tecnología fotovoltaica contribuye, en efecto, a la generación de energía eléctrica por medio de la transformación de la energía solar. Muchos centros de investigación y universidades de prestigio a nivel mundial están dedicados al mejoramiento e innovación de celdas solares, para un aprovechamiento de energía óptimo. Países como China, Alemania, Estados Unidos, Italia y México han contribuido de forma científica y monetaria para la implementación de estas tecnologías.

Diferentes materiales y compuestos se han utilizado para aumentar la eficiencia de las celdas solares, en el año 2004 fue descubierto un nuevo material conocido como grafeno. Éste presenta grandes propiedades como alta conductividad eléctrica y térmica, buena transparencia, gran resistencia mecánica, inherente flexibilidad y gran área de superficie específica [1]; lo cual hace que sea uno de los electrodos más atractivos para implementación en celdas solares. La obtención de este material se puede dar de diversas formas, unas más eficientes y costosas que otras, es por ello que el estudio en la forma de obtención y síntesis aún sigue en pie.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar y determinar las propiedades de grafeno químicamente reducido (GQR) con el fin de determinar su eficiencia como potencial electrodo en celdas solares.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Obtener valores de resistencia de capa y valores de transparencia del GQR.
- Analizar el comportamiento del GQR expuesto a cambios de temperatura.
- Comparar el GQR con electrodos convencionales.

1.3. JUSTIFICACIÓN

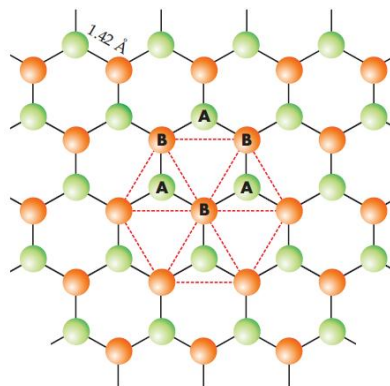
El estudio de nuevos materiales para la aplicación de celdas solares, es motivado principalmente por la disponibilidad y costo de los mismos. Los electrodos comúnmente usados en celdas solares convencionales son de considerable impacto ambiental y materia prima limitada, por tal motivo, el grafeno ha sido foco de estudio e inversión. El grafeno, gracias a sus propiedades eléctricas y ópticas sirve como potencial electrodo en celdas solares. Un tipo de tecnología renovable que cada vez está creciendo y necesita de mayor investigación. Esta indagación sirve de referencia a futuros proyectos relacionados con el tema, y también como puesta en práctica de muchos conocimientos adquiridos dentro del proceso de la ingeniería.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. GRAFENO

El grafeno es una red cristalina bidimensional, formada por átomos de carbono con hibridación sp^2 , los cuales se encuentran densamente empaquetados en una estructura semejante a un panal de abejas, producto de la configuración atómica hexagonal (Figura 1). De este arreglo estructural se desprenden las excepcionales propiedades electrónicas, mecánicas y químicas [2].

Figura 1. Modelo estructural de la red cristalina del grafeno.



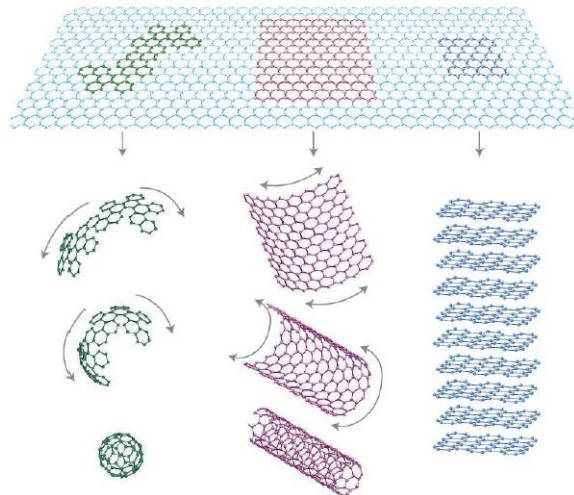
Fuente: Tomada de [2].

En la Figura 1, la red del grafeno consiste de dos subredes trigonales que se superponen: las posiciones atómicas de una subred (verde) corresponden a los centros de los triángulos de la otra subred (naranja). En consecuencia, la celda unidad consta de dos átomos de carbono designados como A y B, permaneciendo invariable al hacer rotaciones de 120° a través de cualquier punto de la red.

El grafeno también puede definirse de una manera más sencilla, como la forma alotrópica y bidimensional del carbono. Es el primer material 2D que se ha descubierto y se considera de esta dimensionalidad porque su espesor es de tan sólo un átomo de carbono [3].

Inicialmente, el grafeno se consideró como un modelo estructural a través del cual era posible describir la formación de las demás formas alotrópicas del carbono (Figura 2).

Figura 2. Grafeno como modelo estructural de los fullerenos, los nanotubos de carbono y el grafito.



Fuente: Tomada de [3].

Al envolver láminas de grafeno de forma esférica o cilíndrica es posible obtener fullerenos ó nanotubos de carbono de pared simple, respectivamente. La superposición de cientos o miles de láminas de grafeno de forma ordenada permite obtener cristales de grafito. De hecho, el grafeno también puede definirse como una lámina aislada de las tantas que conforman a un cristal de grafito [2].

Antes de su descubrimiento, se pensaba que las láminas de grafeno no podían aislarse sin que las vibraciones atómicas a temperatura ambiente las destruyeran.

Ahora es conocido que el material es estable porque sus vibraciones se acomodan en ondulaciones con amplitudes de ~ 1 nm a lo largo de la red. Estas ondulaciones son intrínsecas del grafeno y se originan como resultado de cierta inestabilidad vibracional en su estructura cristalina [4].

Es importante señalar que existen estructuras relacionadas con el grafeno y sus propiedades presentan diferencias notables. Estrictamente hablando, el grafeno es un material constituido por láminas individuales. Sin embargo, también existen estructuras formadas por dos o más láminas de grafeno, conocidas como grafeno bicapa o multicapa, respectivamente. Se considera a un cristal de grafito como producto de la superposición ordenada de más de cien láminas de grafeno [5].

2.2. SEMICONDUCTORES

Un semiconductor es una categoría de la materia en la que un material no es ni conductor ni aislante, aunque puede comportarse como cualquiera de los dos. Una estructura cristalina es formada cuando los átomos se unen y los niveles energéticos de cada uno se desdoblán. Este hecho origina la formación de bandas de energía al tener gran cantidad de átomos. Las propiedades electrónicas de un material se determinan por la distribución de los electrones en las bandas ocupadas de mayor energía (Figura 3), mientras que la banda superior, llamada banda de conducción, se encuentra vacía [6].

Figura 3. Diagrama de bandas de energía de semiconductores.



Fuente: Tomada de [6].

La diferencia de energía que se presenta entre la banda de conducción y la banda de valencia en los semiconductores es pequeña (normalmente menor que 3eV) en comparación con otros materiales, como por ejemplo los aislantes. La conducción puede ser por portadores negativos (electrones) o por portadores positivos (huecos), y es causado por introducir impurezas que crean caminos para la conducción de corriente eléctrica, variando la composición de impurezas. Por tal motivo se dice que la conductividad de los semiconductores es aproximadamente proporcional a la densidad de portadores de carga [6].

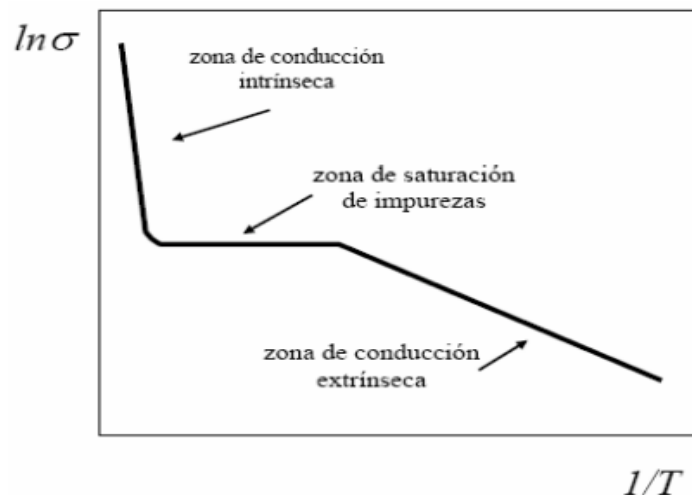
El transporte de carga por un material depende del movimiento de portadores a través del mismo, pasando de unos estados electrónicos a otros. La temperatura es un factor importante para el movimiento de carga, en el cual a mayor temperatura menor transporte de carga. A bajas temperaturas los semiconductores tienden a comportarse como aislantes. Al aumentar la temperatura, aumenta la conductividad (por excitación térmica de los portadores de carga desde las impurezas a la banda más cercana o bien desde la banda de valencia hasta la de conducción). Si el semiconductor contiene una mínima cantidad de impurezas poseerá conductividad apreciable desde temperaturas

relativamente bajas. Un semiconductor en su forma más pura se denomina semiconductor intrínseco, y si se le agregan impurezas es llamado extrínseco, y se dice que está dopado.

La dependencia de la conductividad (σ) de los semiconductores con la temperatura (T) muestra en general un comportamiento similar al mostrado en la Figura 4. Se evidencian tres rangos de temperaturas [7].

- i) La conducción extrínseca se da a temperaturas bajas, y según aumenta la temperatura, aumenta el número de portadores por activación térmica de las impurezas
- ii) A temperatura moderada no se presenta un cambio apreciable en el número de portadores con el cambio de temperatura, debido a que se produce una saturación de la ionización de las impurezas.
- iii) En este rango se transfieren portadores desde la banda de conducción a la banda de valencia y predomina la conducción intrínseca mediante la excitación térmica

Figura 4. Comportamiento de la conductividad al variar la temperatura de un semiconductor.



Fuente: Tomada de [7].

2.3. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN MATERIAL ANTE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA

La resistencia eléctrica (R) de un material es un parámetro de gran importancia para determinar qué tan bien conduce o no un material la energía eléctrica, dicho parámetro varía según la longitud (l), área (S) y resistividad (ρ) propia del material, según la siguiente ecuación:

$$R = \rho l/S \quad (1)$$

No obstante, la variación de la resistencia también depende de la temperatura a la que esté expuesto el material. En la mayoría de los metales, al aumentar la temperatura se produce un aumento en su resistencia; por el contrario, en materiales como el carbono y derivados de éste la resistencia decae sustancialmente. Ciertos materiales especiales presentan una disminución de la resistencia casi en su totalidad al llegar a temperaturas promedio de $-100\text{ }^\circ\text{C}$, estos materiales son conocidos comúnmente como superconductores. Experimentalmente, se puede determinar la resistencia (R_T) a cierta temperatura (T), mediante la ecuación (2).

$$R_T = R_0(1 + \alpha T - T_0) \quad (2)$$

Donde α es el coeficiente de temperatura propio de cada material y T_0 es la temperatura de referencia a la cual se conoce la resistencia R_0 [8].

2.4. CELDAS SOLARES

Las celdas solares son dispositivos diseñados para la conversión de energía luminosa en energía eléctrica, su funcionamiento está basado en la estructura de

unión p-n; cuando la radiación solar incide sobre esta unión de semiconductores genera pares de electrón-hueco (portadores de carga libres), los cuales son capaces de fluir a través de un circuito externo y proporcionan energía eléctrica. Ésta producción de portadores de carga libres es directamente proporcional a la intensidad de irradiación solar [9]. La energía luminosa (fotones) que incide sobre una celda solar, tiene específicamente tres opciones de influencia, las cuales son:

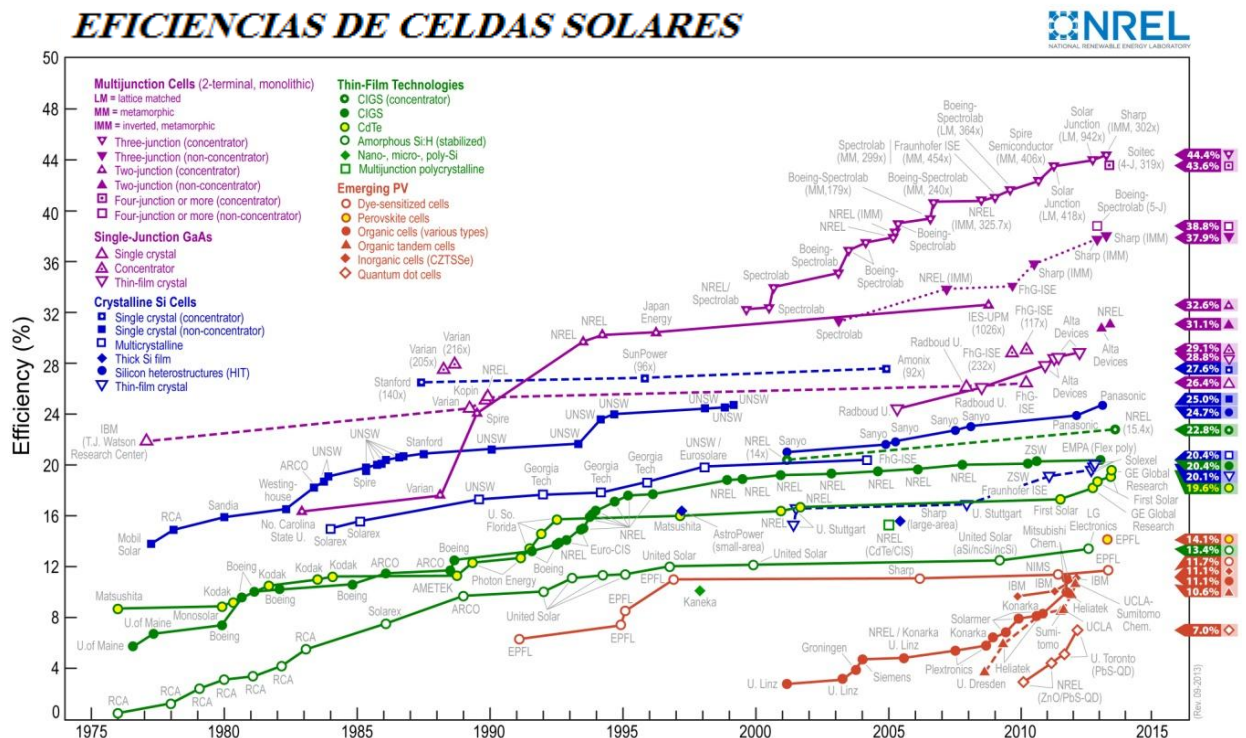
- La energía del fotón es menor que la del ancho de banda prohibido del semiconductor, por lo que no intervendrá en la generación de corriente, se dice entonces que hay transmisión de fotones.
- El fotón posee la energía mínima para que un electrón pase a la banda de conducción generando un par de electrón-hueco, este caso es conocido como reflejo de fotones
- El fotón contiene mucha energía y hace que un electrón pase a la banda de conducción y se disipa el exceso de energía en calor, este suceso es distinguido como absorción de fotones.

En este último caso se debe resaltar un parámetro vital en el estudio de celdas solares conocido como el coeficiente de absorción, esta medida determina cuanto puede penetrar la luz dentro de un material antes de ser absorbida [10]. Dicho coeficiente no es más que el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente. La energía lumínica que incide o absorbe cualquier material depende de muchos factores; propiedades físico-químicas, factores geométricos y orientación respecto a la incidencia de la luz.

Según el catálogo de la multinacional TRITEC año 2013 (Empresa proveedora desde hace más de 26 años de sistemas fotovoltaicos) la energía de fotones se transforma en energía eléctrica aproximadamente en un 15%, según sea la eficiencia de la celda solar. El resto de esta energía calienta la celda solar y por medio de diferentes procesos térmicos vuelve al entorno.

A mediados de los 70's se empezó a implementar el uso de celdas solares con mayor auge debido a la crisis del petróleo. Anteriormente, las celdas solares se implementaban única y exclusivamente en campos espaciales y militares, pero fue en los 90's que países como Estados Unidos y Japón empezaron a tener mayor apogeo en este tema, debido a la creciente presión ecologista de la sociedad y a la reducción de costos de producción de las celdas. En la Figura 5, se encuentra plasmado el mejoramiento de la eficiencia de conversión con el transcurrir de los años [11], en esta figura se contemplan diferentes tecnologías de celdas solares (Celdas basadas en silicio, en CIGS, en polímeros conductores y las tipo tándem o multijuntura) y los centros de investigación que han trabajado en la mejora de éstas.

Figura 5. Eficiencia en celdas solares



Fuente: Modificado de [11].

En Colombia la fabricación de celdas solares ha venido tomando mayor fuerza, debido a que este es uno de los países que ingresó recientemente a la Agencia Internacional de Energías Renovables y pretende posicionarse como el líder en energías renovables en Sur América. En los años 80's se vio la necesidad de fomentar estas tecnologías para suplir necesidades y bajar costos de energía en áreas rurales, estas actividades surgieron con el Programa de Telecomunicaciones Rurales de Telecom con asistencia técnica de la Universidad Nacional [12]. Actualmente Colombia se enfoca en la energía solar para aplicaciones en bases militares, parques ambientales y estaciones remotas entre otras.

A nivel mundial, la fabricación de celdas solares se ha convertido en una lucha por encontrar la innovación y eficiencia de éstas, por ello la utilización de diferentes elementos y materiales en la fabricación de celdas ha sido de gran importancia, algunos de estos son expuestos a continuación.

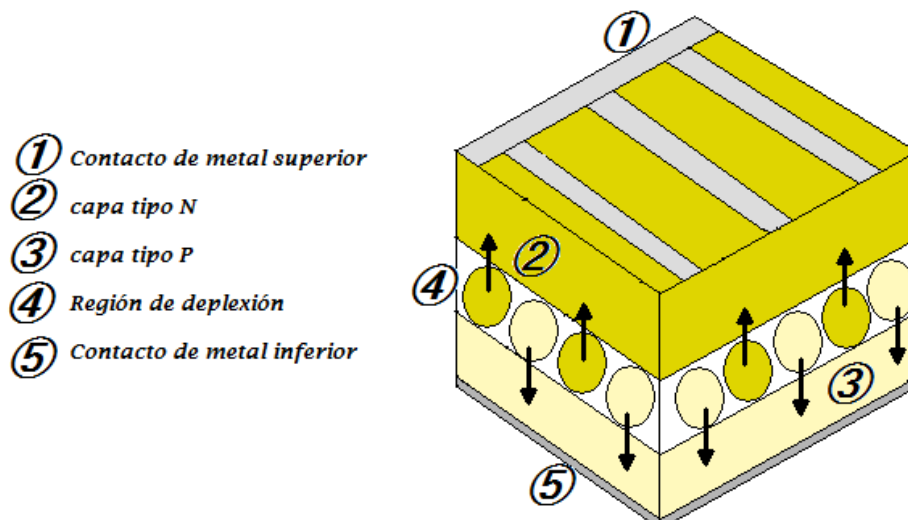
2.4.1. Celdas solares a base de silicio. El silicio (Si) es el elemento más utilizado para la fabricación de celdas solares convencionales y comerciales, debido a sus propiedades semiconductoras (movilidad y corriente de difusión de electrones y huecos) y a que es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno. El silicio se suele encontrar en forma de dióxido de silicio (SiO_2) y de silicatos complejos, pero los más usados y que presentan mayor eficiencia, son el silicio cristalino (c-Si) y el silicio amorfo (a-Si).

El silicio cristalino se puede presentar en varias categorías como: silicio monocristalino, silicio policristalino y silicio de cinta, entre otras. La mayoría de las celdas elaboradas con estos compuestos presentan una eficiencia aproximadamente del 25% [13] (a diferencia del a-Si que sólo presenta una eficiencia de 6 u 8 por ciento). Cabe resaltar que todos estos tipos de celdas, requieren un material absorbente de luz, ya que el silicio por sí solo no es capaz

de realizar esta función. En la Figura 6 se aprecia una celda solar a base de silicio con la estructura p-n anteriormente descrita.

En la región de deplexión se forma el campo eléctrico para mantener la zona libre de portadores en equilibrio, algunos portadores pueden cruzar la unión de difusión y es allí donde se produce la energía de difusión [13]. Hoy en día la gran mayoría de celdas solares suelen colocar el emisor, en la cara frontal de la celda para tener una mayor eficiencia.

Figura 6. Estructura de una celda solar de silicio.



Fuente: Autores.

En la Tabla 1 se puede detallar la cuantificación de las propiedades relevantes del silicio [10]. Dichas propiedades son las que resultan más convenientes a la hora de realizar un estudio para la fabricación de celdas solares.

Tabla 1. Propiedades del Silicio.

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Densidad	2,33 gr/cm^3	Índice de refracción	3,875
Densidad atómica	$5 * 10^{22} atm/cm^3$	Punto de fusión	1415 °C
Concentración intrínseca de portadores a 300 K°	$1,45 * 10^{10} cm^{-3}$	Constante de difusión de huecos a 300 K°	13 cm^2/s
Ancho de banda prohibido a 300 K°	1,1 eV	Constante de difusión de electrones a 300 K°	34 cm^2/s
Movilidad de electrones a 300 K°	1500 cm^2/Vs	Movilidad de huecos a 300 K°	475 cm^2/Vs

Fuente: Tomada de [10].

En un panel solar convencional la celda de silicio representa un 60% del módulo, sin embargo, en costos representa el 28% del valor total, lo cual sigue siendo bastante significativo por lo que a medida que pasa el tiempo se busca reducir los costos y aumentar la eficiencia. Es así como se emplean distintos métodos en la elaboración de celdas solares de Silicio (emisores de fósforo, técnicas de fotolitografía y uso de texturas especiales) para crear nuevas celdas más eficientes y menos costosas, como lo son la tipo PERL (Passivated Emitter with rear locally diffused cell), tipo PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) y tipo CCS (Células de Contacto Superior), entre otras.

2.4.2. Celdas orgánicas solares. Las celdas orgánicas solares (OSC) o también conocidas como celdas plásticas solares son celdas a base de polímeros que utilizan electrónica orgánica, una rama de la electrónica que trabaja con polímeros orgánicos conductores o pequeñas moléculas orgánicas [9], para la absorción y transporte de carga para producir electricidad a partir del efecto fotovoltaico. El proceso de fabricación simple y económico de las OSCs permite una extensa aplicación a gran escala, de esta nueva tecnología. Además, las OSCs tienen únicas propiedades de flexibilidad y bajo peso que pueden resultar en nuevas

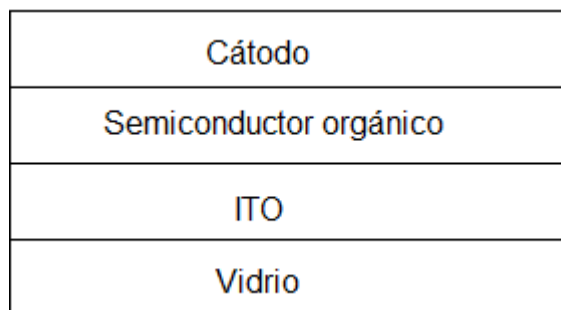
aplicaciones como paneles solares portátiles. El plástico utilizado en OSCs tiene bajo costo de producción en grandes volúmenes.

La absorción de la luz solar a través de un semiconductor molecular orgánico resulta en la formación de una cuasipartícula entre un electrón y un hueco ligados entre sí, conocido también como excitón. El excitón es la clave para poder disociar electrones y huecos, y una vez disociados se produce un flujo de corriente. Se cree que la clave para producir celdas solares orgánicas exitosas está en el diseño de materiales y equipos que faciliten la disociación del excitón [14]. A continuación se describen los tipos de celdas orgánicas solares.

Monocapas

Es la estructura más simple que hay entre las variedades de celdas orgánicas solares y se muestra en la Figura 7. Los fotones que inciden sobre la superficie de la celda crean excitones moleculares en la capa del semiconductor orgánico. La mayoría de excitones generados no se disocian y sólo una pequeña parte de las cargas generadas son transportadas por los electrodos, su eficiencia es menor al 1% y de aquí nace la necesidad de crear multicapas [14].

Figura 7. Celda orgánica solar de una capa.

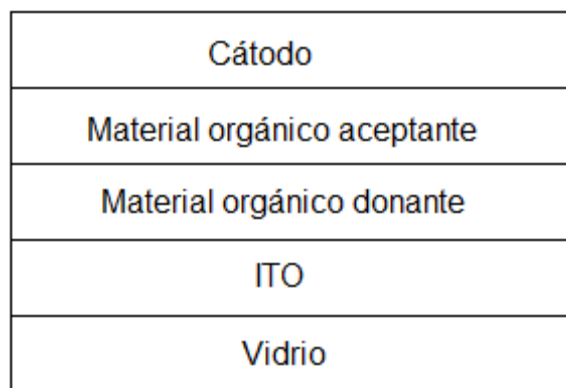


Fuente: Modificado de [14].

Multicapas

El incremento en la carga colectada conlleva a introducir una capa que acepte el transporte de electrones, llamada capa aceptante, y otra capa que done el transporte de huecos, llamada capa donante, entre ambas se crea un campo eléctrico fuerte en la interfaz de la heterounión que mejora en gran medida la disociación de excitones, Figura 8.

Figura 8. Estructura de celda solar orgánica plana de heterounión.



Fuente: Modificado de [14].

Capa de heterounión voluminosa

Para mejorar el rendimiento de las multicapas se dispone de un arreglo de varias interfaces entre el camino de la luz entrante del sol, y hacer que cada capa donante sea lo suficientemente delgada que permita la efectiva extinción de los excitones en la parte más cercana a la interfaz de la heterounión. Una parte de la luz solar es absorbida en cada capa delgada donante y la luz restante puede continuar a las capas posteriores. La estructura del dispositivo se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Estructura de celda solar orgánica voluminosa de heterounión.

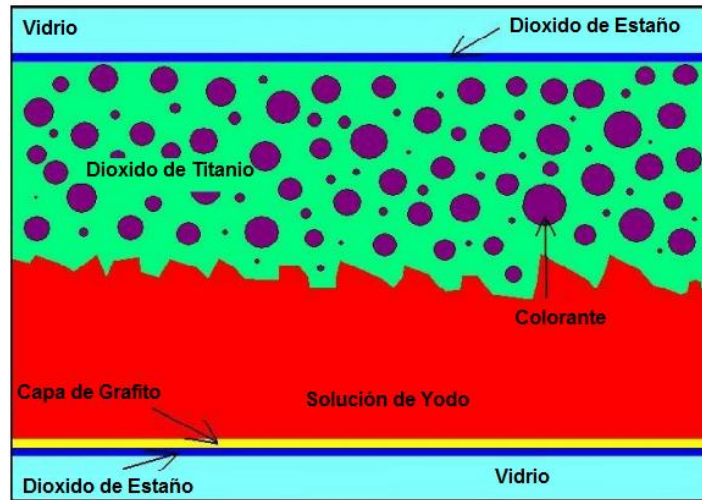


Fuente: Modificado de [14].

2.4.3. Celdas solares sensibilizadas por colorantes. Las celdas sensibilizadas por colorantes (DSSC) fueron inventadas por *Michael Grätzel* y *Brian O'Regan* en 1991 (también conocidas como celdas Grätzel) [15]. Las DSSC son celdas solares innovadoras que simulan la fotosíntesis en las plantas y pertenecen al grupo de celdas solares de capas delgadas. Estas celdas tienen mucho potencial porque pueden ser elaboradas y manufacturadas con materiales de bajo costo, y a diferencia de celdas solares tradicionales, las DSSC pueden trabajar efectivamente en condiciones de baja luminosidad.

Las DSSC consisten de dos electrodos de vidrio, conductores en los extremos, cubriendo las diferentes capas (Figura 10). Los electrodos de vidrio son transparentes, lo cual les permite el paso de la luz a través de la celda solar. El revestimiento de dióxido de estaño (SnO_2), comúnmente utilizado [16], es una capa conductora transparente. Las moléculas del colorante recogen la luz y producen electrones excitados que implican una corriente en la celda. La capa de electrolito de yoduro actúa como una fuente de reemplazo de electrones. Y por último, la capa conductora inferior contiene grafito esparcido a lo largo de su superficie para evitar que la luz entrante se refleje hacia afuera de la celda.

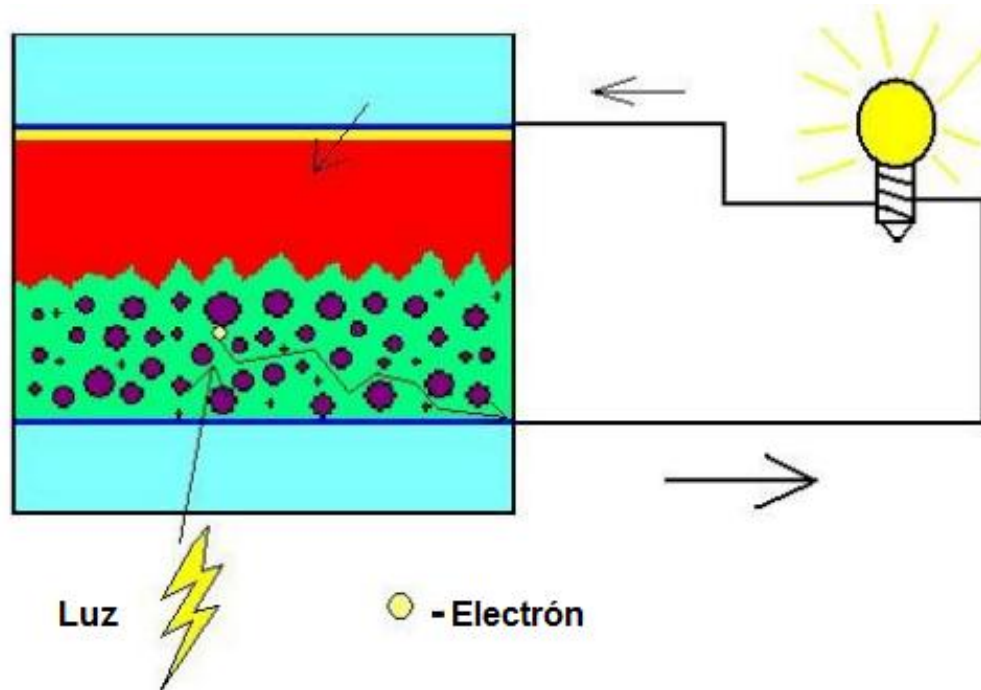
Figura 10. Estructura de celda solar sensibilizada por colorante (DSSC).



Fuente: Modificado de [16].

Las celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC) producen electricidad por medio de transferencia electrónica, y su proceso empieza cuando la luz proveniente del sol pasa a través del electrodo de vidrio conductor. El colorante absorbe el fotón de luz y uno de los electrones del colorante pasa a un estado excitado, llamado fotoexcitación. El electrón excitado salta a la capa de dióxido de titanio en donde se difunde a través de la película delgada. El electrón alcanza el electrodo conductor, viaja por medio del cable, y llega al contraelectrodo (Figura 11). La molécula del colorante que perdió un electrón (viajó hacia el dióxido de titanio), está ahora oxidada, lo que significa que tiene un electrón menos que antes. El colorante quiere recuperar su estado inicial y para ello necesita obtener otro electrón. Lo obtiene del electrolito de yodo, y el colorante retoma su estado fundamental. Esto causa que el yodo quede oxidado. Cuando el electrón perdido alcance el contra electrodo, le da un electrón de vuelta al electrolito.

Figura 11. Proceso de transferencia electrónica.



Fuente: Modificado de [16].

2.5. APLICACIÓN DE GRAFENO COMO ELECTRODO EN CELDAS SOLARES

El grafeno puede ser utilizado como electrodo, cátodo, contra electrodo y sensibilizador en celdas OPV [17,18]. En dispositivos fotovoltaicos, construidos de puntos cuánticos, las capas de grafeno interdispersas pueden reemplazar la colección de carga. También existen registros de capas de grafeno que pueden ser utilizadas para reemplazar PEDOT como transportador de huecos en dispositivos orgánicos fotovoltaicos [19,20].

Los filmes o capas conductoras transparentes más utilizadas son a base de ITO y FTO, las cuales se usan como electrodos frontales en celdas inorgánicas y en celdas sensibilizadas por colorantes. Independientemente del tipo de celda solar, la necesidad de substituir los materiales convencionales ha incrementado debido a

la disponibilidad limitada de materia prima. El grafeno ha sido considerado como un material prometedor para la producción de capas conductoras transparentes, y esto gracias a su alta flexibilidad [21], alta movilidad eléctrica y transparencia óptica [22, 23].

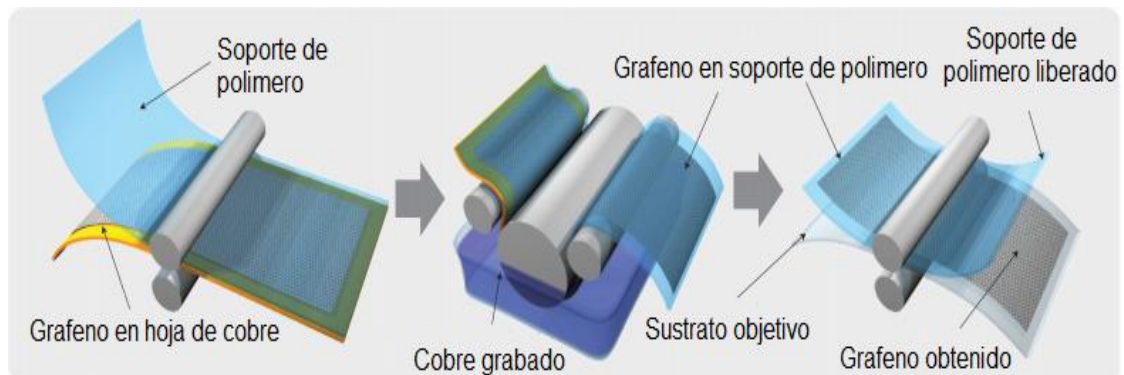
El grafeno también promete reemplazar el ITO en dispositivos orgánicos fotovoltaicos, aunque su principal inconveniente es su baja hidrofiliidad, llevando a efectos negativos en la construcción de dispositivos procesados con soluciones [24]. El grafeno producido por CVD y utilizado como ánodo en celdas orgánicas, superó este inconveniente mediante tratamiento químico de la capa de grafeno [25].

El grafeno también puede ser utilizado como sensibilizador y contraelectrodo en DSSC. Las celdas solares sensibilizadas por colorantes han sido estudiadas extensamente como una alternativa económica ante celdas solares a base de silicio. Soluciones procesables de puntos cuánticos de grafeno fueron sintetizadas usando soluciones químicas para luego ser utilizados como sensibilizadores en celdas solares [26]. La gran solubilidad de los puntos cuánticos del grafeno, junto con el gran espectro de absorción de luz, los hace una clase interesante de material que está en la capacidad de interactuar con otros componentes activos para aplicaciones fotovoltaicas.

El contraelectrodo de una celda solar es parte importante en DSSC. Comúnmente, para la fabricación de DSSC eficientes se ha utilizado platino (Pt), pero grandes cantidades de platino depositado se localiza dentro de la capa y no cumple por completo su función de catalizador, convirtiéndose en un desperdicio de material. A raíz de esto, se ha venido intentando cambiar el platino como contraelectrodo por arquitecturas basadas en grafeno [27]. A continuación se realizará una descripción del grafeno aplicado en las diferentes celdas solares.

2.5.1. Grafeno en celdas orgánicas solares. La mayor incursión del grafeno como electrodo en celdas solares se encuentra en las celdas orgánicas solares (OSC), debido a su alta movilidad electrónica, flexibilidad y transparencia. Para poder llevar a cabo todas las aplicaciones del grafeno es importante el desarrollo de manufactura económica y efectiva, a gran escala. Siendo ésta, la clave principal para desarrollar esta tecnología. Dentro de los intentos por desarrollar una forma práctica de depositar el grafeno se ha desarrollado la producción rollo a rollo (roll to roll, en inglés) como alternativa económica y simple [28]. En la Figura 12 se muestra el esquema de ésta tecnología. Existen tres pasos esenciales en este proceso: (i) adhesión de los soportes del polímero al grafeno sobre la hoja de cobre; (ii) grabado de las capas de cobre; y (iii) liberación de la capa de grafeno y transferencia sobre el sustrato final.

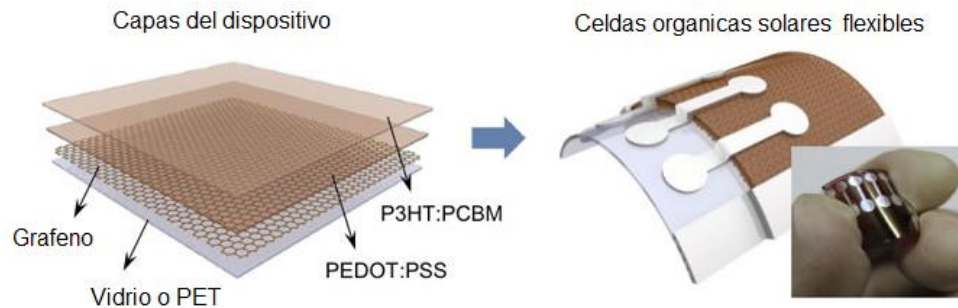
Figura 12. Esquema de producción rollo a rollo de capas de grafeno.



Fuente: Modificado de [29]

El resultado final, se observa en la Figura 13, en donde se evidencia la flexibilidad de la muestra. Diversas aplicaciones se pueden llevar a cabo al disponer de materiales flexibles y que a su vez absorban la luz solar; techos, automóviles, ventanas, etc.

Figura 13. Resultado final de capa de grafeno depositada sobre sustrato de plástico.

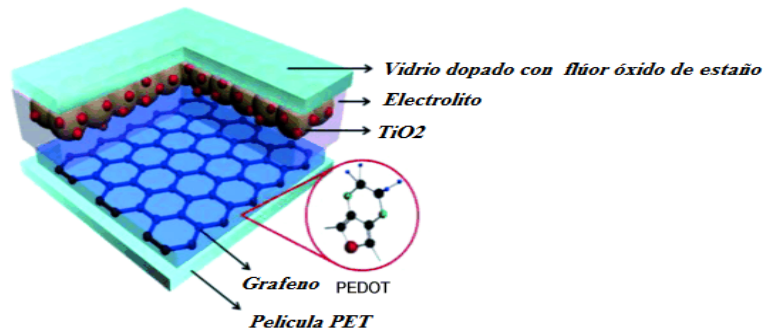


Fuente: Modificado de [30]

2.5.2. Grafeno en celdas solares sensibilizadas por colorantes. El grafeno es un material de gran potencial para la conversión de energía solar en las células solares sensibilizadas por colorantes (DSSC por sus siglas en inglés: Dye Sensitized Solar Cells), se ha visto como un posible sucesor del platino en la mayoría de dispositivos que emplean líquidos iónicos como electrolitos. El transporte de corriente eléctrica se veía afectado en gran parte por la resistencia de capa (sheet resistance), pero la inclusión de grafeno ha dispuesto que esta resistencia se disminuya en gran medida en comparación con las DSSC convencionales, pero para que esto suceda, es necesario tener un área superficial lo suficientemente alta para que la eficiencia no esté por debajo que las celdas tradicionales [31]. Otro parámetro útil en la inclusión de grafeno ha sido la transparencia que presenta este material, debido a que es esencial para la absorción de luz en DSSC de plástico; en las DSSC a base de vidrio no presentan mayor importancia puesto que por sí solas cumplen con una óptima absorción.

La estructura de una célula solar sensibilizada por colorantes se basa en una capa posterior de vidrio dopado con flúor óxido de estaño (FTO), seguido de líquidos iónicos usados como electrolitos, una capa de óxido de titanio (TiO_2) a la cual ésta adherido el grafeno y por último una capa inferior de tereftalato de polietileno (PET) [32]. Dicha estructura de una DSSC con grafeno se presenta en la figura 14.

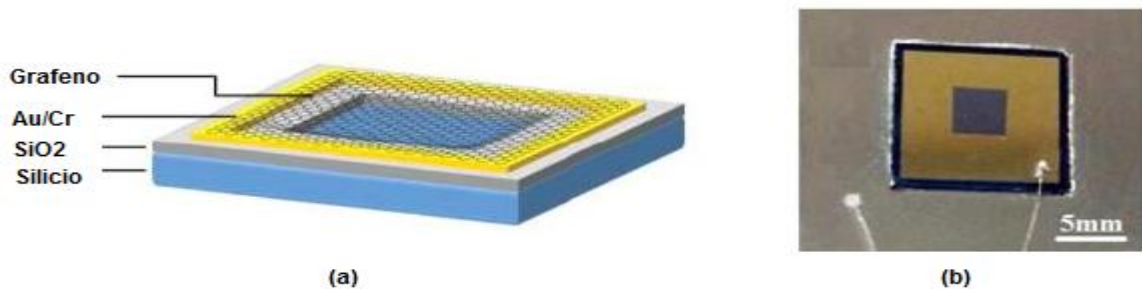
Figura 14. Estructura de célula solar sensibilizada por colorantes con grafeno



Fuente: Modificado de [32]

2.5.3. Grafeno en celdas solares a base de silicio. Las capas de grafeno también pueden ser combinadas con obleas de silicio tipo n (n-Si) para fabricar celdas solares, llamadas celdas de unión Schottky [33]. Además de su aplicación como electrodo semitransparente superior y capa antireflectora (Figura 15a). Éstas celdas solares pueden extenderse a otros materiales semiconductores en el cual el grafeno no solamente puede actuar como electrodo, sino también como capa activa de unión y transportador de carga. El potencial de este tipo de celdas se debe a procesos de manufactura simplificados y de bajo costo (Figura 15b) comparados con las celdas de silicio. A pesar que su eficiencia es baja, muchos autores predicen que puede ser mejorada optimizando la conductividad y transparencia de las capas de grafeno, y mejorando la superficie grafeno/n-Si [34].

Figura 15. Estructura de celda solar a base de silicio y grafeno.



Fuente: Modificado de [34].

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

Dentro del proceso de caracterización es necesario medir valores reales. La determinación de la validez del resultado se acota por la estimación de la incertidumbre, este concepto permite caracterizar la dispersión de los valores que podrían atribuirse razonablemente al mesurando [35].

Los modelos apropiados para el análisis de estos tipos de mediciones son conocidos como el modelo físico y el modelo matemático. Estos se encargan de que las aproximaciones adquiridas a los valores reales sean más contundentes. A continuación se especifican dichos modelos.

3.1.1. Modelo Físico. Consiste en las variables físicas relevantes en cada una de las mediciones efectuadas y las suposiciones sobre el propio mensurando. Algunas de estas suposiciones son: el comportamiento temporal de la muestra, la simetría y homogeneidad de ésta [36]. Es de gran importancia tener en cuenta la dispersión homogénea del grafeno sobre el porta-objetos cubierto de ITO, para esto es necesario aplicar el método de recubrimiento por rotación (En inglés: Spin coating). Bajo estas condiciones de mejorar el diseño de los datos a medir, es posible asegurar que los datos obtenidos serán más próximos a los valores reales de la medición. Cabe resaltar que dichas mejoras realizadas son las más relevantes para evitar errores sistemáticos¹⁸ futuros.

¹⁸ Error sistemático: Se puede presentar como consecuencia de un efecto reconocido de una magnitud de influencia en el resultado de una medición o por defectos de los instrumentos de medida

3.1.2. Modelo Matemático. Este modelo se caracteriza por transformar el conjunto de mediciones repetidas de una misma variable en un solo valor y un rango que dé más aproximación de dichas mediciones del valor real. Este patrón es de gran importancia debido a todas las imperfecciones que existen al realizar la medida de cualquier variable, su evaluación se puede hacer por medio de métodos estadísticos como se presentará a continuación.

En la mayoría de los casos, un mensurando Y no se mide directamente, en vez de esto, se determina a partir de N otras cantidades X_1, X_2, \dots, X_N en una relación funcional f :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (3)$$

Estos valores pueden ser presentados mediante gráficas, tablas o como una relación funcional. El ejemplo más claro será la representación de una resistencia (R) en función de la tensión (V) y la corriente (I).

$$R = f(V_i, I_i) \quad (4)$$

Es de gran importancia entender que la función f no solo depende de los valores de X_1, X_2, \dots, X_N para tener en cuenta su efecto, también se deben aplicar criterios o factores de corrección. Para el propósito de este libro se da por entendido que la función f tal y como aparece, ya está corregida.

3.1.3. Cuantificación de la Incertidumbre. En la estimación de la incertidumbre se tuvieron en cuenta las fuentes que la producen. Las más relevantes que se asumieron son: la incertidumbre del material, la repetibilidad de las lecturas, la reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos y muestras, las características de los instrumentos y el modelo de la medición. Para poder cuantificar dichas estimaciones fue necesario aplicar el Método de

Evaluación tipo A que se presenta a continuación, que está basado en un análisis estadístico sobre las mediciones realizadas. Un segundo método, el Método de Evaluación tipo B abarca las demás formas de estimar la incertidumbre. Enseguida se explicará, detalladamente los dos métodos, teniendo en cuenta la metodología de la *Guía Para La Expresión De La Incertidumbre En La Medición (En inglés: Guide To The Expression Of Uncertainty In Measurement)* [35].

3.1.3.1. Método de Evaluación Tipo A: Este método está basado en mediciones repetidas, efectuadas en la misma muestra y de la misma forma. La serie de valores que se obtiene se denomina q_i (donde i identifica la medición realizada). En seguida, para obtener un mejor estimado, se debe obtener la media aritmética de los datos llamada X_i , por lo tanto se tiene:

$$X_i = q = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n q_i \quad (5)$$

La dispersión de estos resultados puede ser expresada por medio de la desviación estándar establecida como:

$$s_q = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n q_i - q^2} \quad (6)$$

Por lo tanto la incertidumbre estándar, conocida también como la desviación estándar experimental de la media $u(x_i)$ resulta de la siguiente forma:

$$u_{x_i} = s_q = \frac{s(q)}{n} = \frac{1}{n} * \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n q_i - q^2} \quad (7)$$

Es de gran importancia tener en cuenta el número de mediciones que se pretende realizar, si hay que tener claro que es vital según el proceso que se esté realizando. Aumentar el número de repeticiones conlleva una reducción de la

incertidumbre tipo A, como se puede apreciar en la fórmula (7). La incertidumbre es inversamente proporcional al número de repeticiones, esto es:

$$u_{x_i} \propto \frac{1}{n} \quad (8)$$

Es conveniente que en la mayoría de los casos no se realicen más de 10 repeticiones en las mediciones, puesto que se aumentaría a su vez el tiempo en que se realizan y éste junto con las condiciones ambientales, pueden presentar variaciones muy grandes de la primera medida a la última, creando a su vez una incertidumbre mayor.

Si las variaciones aleatorias en las observaciones de una cantidad de entrada están correlacionadas, la incertidumbre estándar (ecuación 7) no será la más conveniente para estos casos, de tal forma que ésta se debe estimar de la siguiente manera:

$$u_{c y} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{df}{dx_i}\right)^2 * u_{x_i}^2 + \sum_{i,j=1}^N \frac{df}{dx_i} * \frac{df}{dx_j} * u_{x_i} * u_{x_j} * r(x_i, x_j)} \quad (9)$$

Donde $r(x_i, x_j)$ es el factor de correlación entre las magnitudes de entrada x_i y x_j . Esta correlación existe cuando hay una tercera magnitud que influye en las mediciones realizadas, ésta podrá darse por el uso del mismo instrumento. Esta correlación es el cociente entre la covarianza de las variables aludidas y la incertidumbre estándar de cada una de ellas, como se tiene a continuación,

$$r_{x_i, x_j} = \frac{u(x_i, x_j)}{u_{x_i} * u_{x_j}} \quad (10)$$

La covarianza de las variables se puede estimar por medio de relaciones funcionales entre ambas variables y la magnitud que influye sobre éstas. Sin embargo, también es posible calcularla teniendo en cuenta que:

$$u_{x_i, x_j} = \frac{1}{n(n-1)} * \sum_{k=1}^n (x_{i_k} - x_i) * (x_{j_k} - x_j) \quad (11)$$

Es conveniente aclarar que si el parámetro $r=0$ esto indica que la correlación entre las variables no existe. En otras palabras, revela la independencia de las variables; si los valores de $r=|1|$ existe una correlación total entre las variables.

3.1.3.2. Método de Evaluación Tipo B: Como se ha explicado previamente, este método se caracteriza por la influencia de variables externas al mensurando usando información externa u obtenida por experiencia. Existen muchas cantidades de influencia pero para la simplificación de este documento se tuvieron en cuenta ciertos parámetros específicos como son: manuales del instrumento de medición, especificaciones del instrumento, normas, valores de medición anterior, conocimiento sobre las características y comportamiento del sistema de medición.

La estimación completa de una incertidumbre debe ser valorada como la asignación de un valor exacto y una distribución adjunta a éste. Estas distribuciones existen de forma normal, rectangular y triangular, entre otras [35]. Para simplificar, en este proyecto se decidió tener una distribución rectangular, debido a que la probabilidad para un valor específico será siempre la misma. Además, gracias al conocimiento de los límites de variabilidad de los datos ofrecidos por el fabricante de los instrumentos, lo más conservador es suponer una distribución rectangular.

Como está definido en los métodos de distribución rectangular, se debe dividir en $\sqrt{3}$ los valores de las incertidumbres para tener en cuenta la exactitud y resolución

de los instrumentos. Por último, se debe proporcionar un valor que represente estas dos incertidumbres, por lo que es conveniente combinar estos valores de forma cuadrática [37], ver ecuación (12):

$$\sigma_B = \sqrt{\sigma_{exct}^2 + \sigma_{resol}^2} \quad (12)$$

σ_{resol} = Incertidumbre de la resolución

σ_B = Incertidumbre combinada

σ_{exct} = Incertidumbre de la exactitud

Por finalizar el cálculo y el valor único de incertidumbre, se formula igual a la operación realizada para el cálculo de combinación de incertidumbres (ecuación 12), pero en esta ocasión las incertidumbres que se desean combinar serán σ_A y σ_B , resultados del método de evaluación tipo A y del método de evaluación tipo B respectivamente, como se muestra en la ecuación (13).

$$\sigma = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} \quad (13)$$

Este valor σ será el definitivo que se le adjuntará a las mediciones realizadas en este documento, se debe ser consciente que este valor depende exclusivamente de los instrumentos utilizados en el estudio. Por ello si se pretende realizar las mismas medidas con otros instrumentos, pueden existir variaciones.

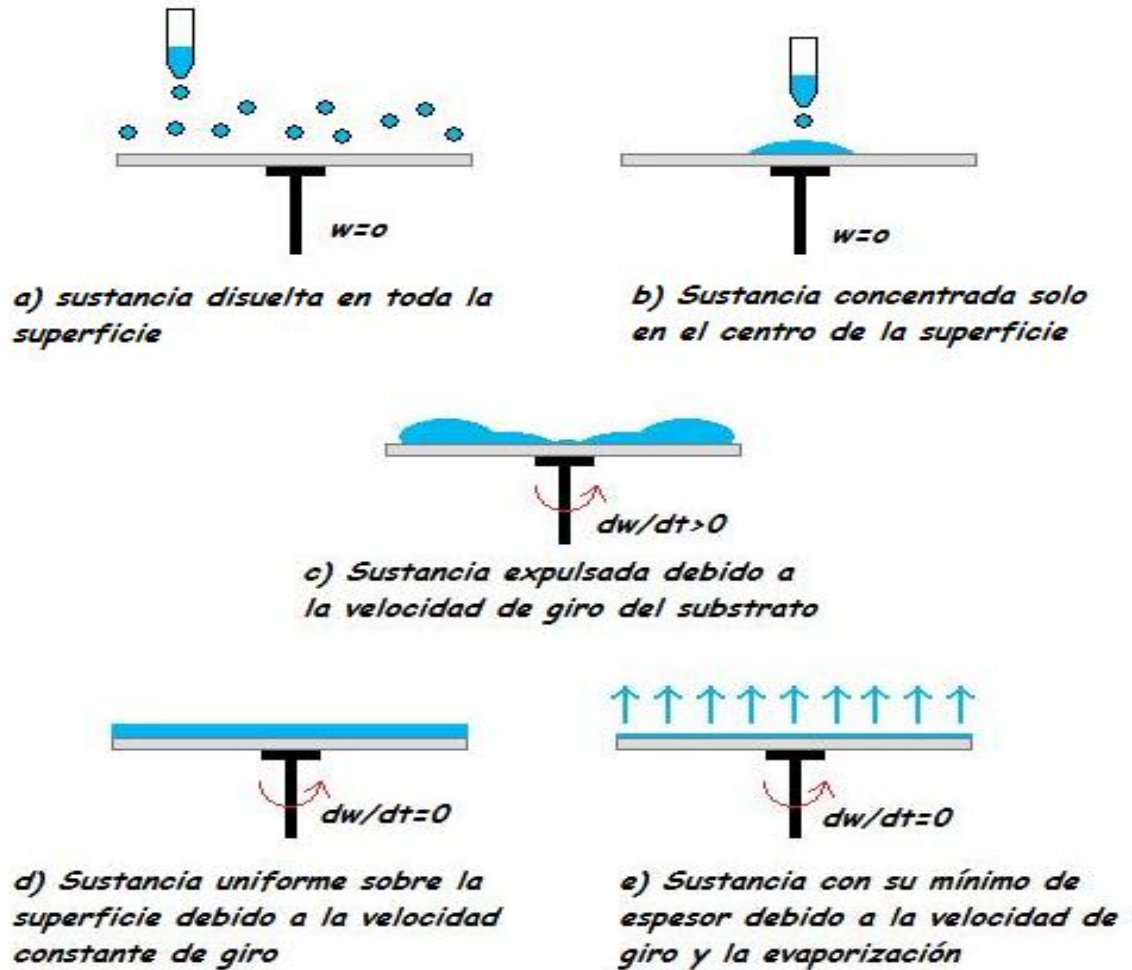
3.2. MÉTODO DE RECUBRIMIENTO POR ROTACIÓN

El método de recubrimiento por rotación (Spin coating) es una técnica que se utiliza por su sencillez y eficacia. Este método permite depositar películas delgadas de alguna sustancia por medio del revestimiento por rotación con el fin

de preparar dichas películas en fracciones de orden de micrómetros y nanómetros de espesor con homogeneidad en toda su concentración [38, 39, 40].

Esta técnica es comúnmente utilizada en sustancias no volátiles. Se puede modelar en 4 etapas como se muestra en la Figura 16. La primera etapa consiste en aplicar una pequeña muestra de la sustancia sobre un sustrato plano. Esta deposición se puede realizar de forma extendida por todo el sustrato (Figura 16a) o de una única concentración en el centro de éste (Figura 16b). La segunda etapa consiste en hacer girar el sustrato a una velocidad alta, lo que conlleva que la sustancia con ayuda de la fuerza centrífuga salga expulsada y se extienda sobre toda la superficie (Figura 16c). En la tercera etapa mientras se hace girar el sustrato a una velocidad constante, la sustancia presenta una reducción gradual, lo cual implica a su vez un esparcimiento homogéneo (Figura 16d). Por último, la cuarta etapa radica en la evaporación, donde finalmente queda una muestra homogénea de la sustancia sobre la superficie del sustrato, Figura 16e.

Figura 16. Etapas de la técnica recubrimiento por rotación.



Fuente: Autores.

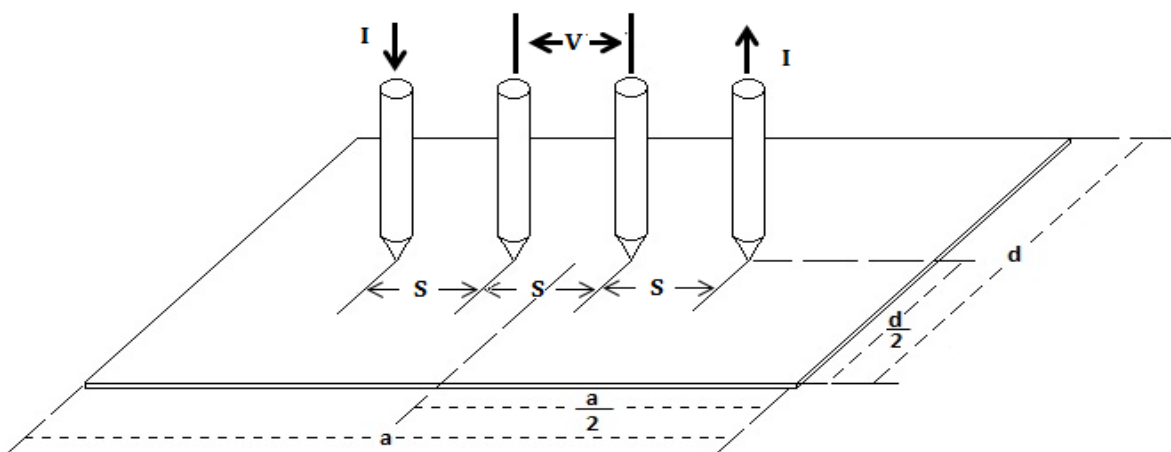
3.3. MÉTODO DE LOS CUATRO PUNTOS PARA CÁLCULO DE RESISTENCIA DE CAPA

El método de los cuatro puntos fue propuesto por primera vez en 1915 por *Wenner* para medir la resistividad del suelo [41], el cual es comunmente llamado método de *Wenner* y es de actual uso en el cálculo de mallas de puesta a tierra. Este método fue adaptado por *Valdes* en 1954 para medir la resistividad en

semiconductores [42], y desde ése momento ha sido el más utilizado para calcular la resistividad y resistencia de capa (sheet resistance) de materiales depositados sobre sustratos de vidrio, plástico u otro material, los cuales forman una capa delgada a través de la superficie. El arreglo de los electrodos es generalmente colineal e igualmente espaciados, pero otras configuraciones son posibles [43]. El método de los cuatro puntos ha sido utilizado para caracterizar materiales, ya sea en pruebas con semiconductores, o como método para determinar las propiedades eléctricas del ITO para aplicación en celdas solares, entre otras [44].

El método establece el uso de dos electrodos de corriente y dos de potencial, que están conectados a sus equipos de medida correspondientes. De acuerdo con el método, los cuatro electrodos deben permanecer alineados y espaciados igualmente entre sí como se observa en la Figura 17, con el fin de aplicar el método de manera correcta [45]. Los electrodos de corriente que están a los extremos, inyectan corriente continua al sustrato de vidrio que contiene la muestra, mientras los electrodos de tensión o potencial miden la caída de tensión mediante de un voltímetro.

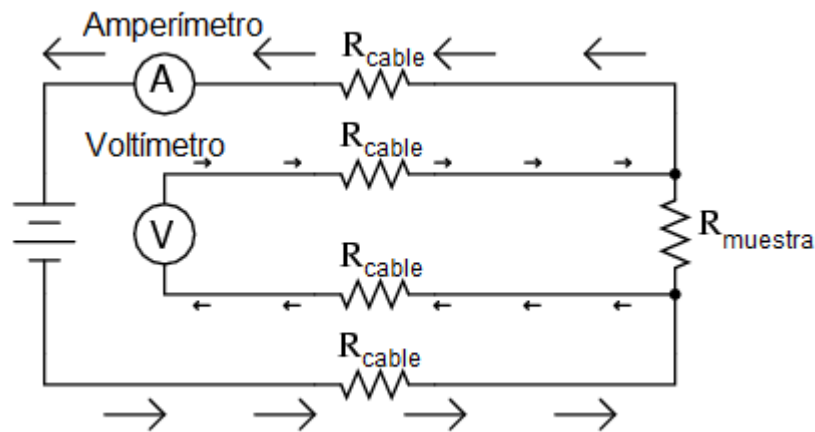
Figura 17. Disposición de la prueba de cuatro puntos sobre una muestra rectangular.



Fuente: Modificado de [45].

El método de los cuatro puntos o método de *Kelvin* se puede modelar circuitalmente como se describe en la Figura 18. Los cables utilizados para realizar las medidas se representan como una resistencia debido a la oposición que hacen ante el paso de corriente. Debido a que se quiere medir una resistencia de bajo valor, la selección de los instrumentos de medida utilizados para la toma de datos de tensión y corriente, y el circuito deben satisfacer las condiciones de precisión requeridos.

Figura 18. Diagrama circuital del método de los cuatro puntos.



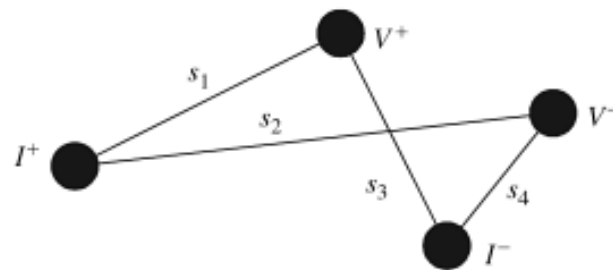
Fuente: Modificado de [43].

El voltímetro debe ser de alta impedancia ($>10M \Omega$) para que así atraviere por él una corriente muy pequeña. De esta manera, el uso del método de los cuatro puntos elimina errores de medida debidos a la resistencia del cable, resistencia de dispersión presente directamente debajo de cada electrodo y resistencia de contacto entre cada electrodo de medida y la periferia del material. Debido a esta baja corriente, la caída de tensión en la resistencia del cable, la resistencia de dispersión y la resistencia de contacto son muy pequeñas. Adicional a esto, los cables de medida de tensión se utilizan más largos que los de corriente, los cuales

pueden ser muy cortos, para limitar el paso de corriente hacia el voltímetro (presentando menor caída de tensión en los cables y una mejor medida) [43].

3.3.1. Cálculo de resistencia de capa. Para llegar a la expresión para el cálculo de resistencia de capa se considera una muestra de grosor t y resistividad ρ . Los cuatro electrodos tienen la configuración que se muestra en la Figura 19. Una corriente se inyecta por el electrodo I^+ y es dispersada simétricamente.

Figura 19. Arreglo de electrodos de tensión y corriente.



Fuente: Tomado de [45].

Por simetría y conversión de corriente, la densidad de corriente a una distancia r desde el electrodo se presenta en la ecuación (14).

$$J = \frac{I}{2\pi r t} \quad (14)$$

El campo eléctrico se muestra en la ecuación (15).

$$J\rho = \frac{I\rho}{2\pi r t} = - \frac{dV}{dr} \quad (15)$$

La caída de tensión entre los electrodos V^+ y V^- , localizados a distancias s_1 y s_2 desde I^+ (ecuación 16), es calculada al integrar (15)

$$\int_{V_{s_1}}^{V_{s_2}} dV = - \frac{I\rho}{2\pi r t} \int_{s_1}^{s_2} \frac{dr}{r} \Rightarrow V_{s_2} - V_{s_1} = V_{12} = \frac{I\rho}{2\pi r t} \text{Ln} \frac{s_2}{s_1} \quad (16)$$

Mediante el principio de superposición, la caída de tensión debido a la corriente inyectada en I^- se muestra en la ecuación (17)

$$V_{34} = \frac{I\rho}{2\pi r t} \text{Ln} \frac{s_3}{s_4} \quad (17)$$

Por lo que se obtiene la tensión presentada en la ecuación (18).

$$V = V_{12} - V_{34} = \frac{I\rho}{2\pi r t} \text{Ln} \frac{s_2 s_3}{s_1 s_4} \quad (18)$$

Para una configuración de electrodos lineales con $s_1 = s_4 = s$ y $s_2 = s_3 = 2s$ se obtienen finalmente, las expresiones para el cálculo de la resistividad y resistencia de capa [46], mostradas en las ecuaciones (19) y (20), respectivamente.

$$\rho = \frac{\pi t}{\text{Ln}(2)} \frac{V}{I} \quad (19)$$

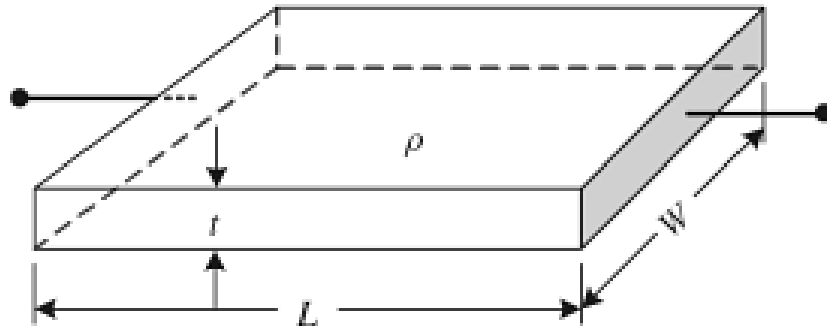
$$R_{sh} = \frac{\pi}{\text{Ln}(2)} \frac{V}{I} \quad (20)$$

En las ecuaciones (19) y (20) el termino $\pi/\text{Ln}(2) = 4,5324$ es el factor de corrección para configuraciones en donde el espaciamiento de los electrodos es

muy pequeño en comparación con las dimensiones de la muestra, tal como se observa en la Tabla 2, en donde d/s tiende a infinito.

Para entender mejor el concepto de resistencia de capa y sus unidades, se considera una muestra como en la Figura 20 de largo L , ancho W , grosor t y resistividad ρ . La resistencia de un material se define como se presenta en la ecuación (21).

Figura 20. Muestra de un materia de dimensiones L , W , y grosor t .



Fuente: Tomado de [45].

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{Wt} = \frac{\rho}{t} \frac{L}{W} \Omega \quad (21)$$

La expresión L/W no tiene unidades, por lo que ρ/t tiene unidades de ohms. Pero no quiere decir que ésta sea la resistencia de la muestra. Para poder distinguir entre R y ρ/t se expresa la relación ρ/t en unidades de $\Omega/\text{cuadrado}$ u Ω/\square y es llamada resistencia de capa (sheet resistance). Por lo tanto, la resistencia puede escribirse como en la ecuación (22).

$$R = R_c \frac{L}{W} \Omega \quad (22)$$

El valor de la resistencia de capa de un material uniforme con sus dimensiones correspondientes y su respectivo factor de corrección se expresa de forma general como en la ecuación (23) [36].

$$R_c = FC \frac{V}{I} \quad (23)$$

Allí FC es el factor de corrección debido a la geometría de la muestra, que es obtenido de la Tabla 1, I es la corriente que pasa a través de los electrodos exteriores y V es la diferencia de potencial medida por medio de los electrodos interiores.

3.3.2. Factor de corrección geométrico. De acuerdo con la geometría de la muestra, se debe aplicar un factor de corrección para calcular su verdadero valor de resistencia. Para el caso rectangular, con las distancias del largo y ancho de la muestra, y la separación entre electrodos se calculan las relaciones d/s y a/d expuestas en la Tabla 2 [45], y así se obtiene el factor de corrección con el cual se corregirá el resultado obtenido a través de las medidas de tensión y corriente.

Tabla 2. Factor de corrección para una muestra rectangular.

d/s	a/d = 1	a/d = 2	a/d = 3	a/d ≥ 4
1,0			0,9988	0,9994
1,25			1,2467	1,2248
1,5		1,4788	1,4893	1,4893
1,75		1,7196	1,7238	1,7238
2,0		1,9454	1,9475	1,9475
2,5		2,3532	2,3541	2,3541
3,0	2,3575	2,7000	2,7005	2,7005
4,0	3,1137	3,2246	3,2248	3,2248
5,0	3,5098	3,5749	3,5750	3,5750
7,5	4,0095	4,0361	4,0362	4,0362
10,0	4,2209	4,2357	4,2357	4,2357
15,0	4,3882	4,3947	4,3947	4,3947
20,0	4,4516	4,4553	4,4553	4,4553
40,0	4,5120	4,5129	4,5129	4,5129
∞	4,5324	4,5324	4,5325	4,5325

Fuente: Modificado de [45].

3.4. MEDIDA DEL COMPORTAMIENTO DEL GQR ANTE CAMBIOS DE TEMPERATURA.

Se realizaron las mismas medidas del numeral anterior para el cálculo de la resistencia de capa. La única diferencia es que para este caso se varió la temperatura por medio de una placa calefactora, a la cual se le conectó un sensor de temperatura (ANEXO B) que hace contacto directamente sobre el porta-objetos. A esta placa calefactora se le varió la temperatura en intervalos de 5°C y se tomaron los valores correspondientes de tensión y corriente presentados en la muestra de GQR.

3.5. TRANSMITANCIA Y ABSORBANCIA

La transmitancia y absorbancia se relacionan de forma inversa.

3.5.1. Transmitancia. La transmitancia T de una superficie u objeto se refiere a la fracción de la radiación incidente transmitida, y generalmente se expresa como en la ecuación (24).

$$T = \frac{I}{I_0} \times 100\% \quad (24)$$

en donde I es la intensidad de radiación que pasó a través del material e I_0 la intensidad de luz antes de pasar a través del material.

3.5.2. Absorbancia. El espectro de absorción de un material es la fracción de radiación incidente absorbida por el material en función de su longitud de onda. El espectro de absorción y transmisión representan información equivalente y uno puede ser calculado a partir del otro, por medio de la expresión matemática dada

en la ecuación (25), en donde A_λ es la absorción expresada en u.a. (unidades de absorción) [47].

$$A_\lambda = -\log_{10} \frac{I}{I_0} \quad 25$$

3.6. ESPECTROSCOPIA ULTRAVIOLETA-VISIBLE (UV-Vis)

La espectroscopía UV-Vis es una técnica que permite analizar las transiciones electrónicas de compuestos iónicos o moleculares que ocurren en la región ultravioleta y región visible del espectro electromagnético (180-800 nm). A través de esta técnica es posible determinar las longitudes de onda de máxima absorbancia de cada sustancia que pueda excitarse electrónicamente en dicha región. Las medidas de absorción de la radiación ultravioleta y visible, encuentran una enorme aplicación en la identificación de una gran variedad de especies tanto inorgánicas como orgánicas [48].

Generalmente, la espectroscopía de absorción molecular se basa en la medida de la transmitancia T o de la absorbancia A de disoluciones que se encuentran en celdas transparentes que tienen un camino óptico de b cm. Bajo determinados parámetros, la concentración c de un analito absorbente está relacionada linealmente con la absorbancia de acuerdo a la expresión dada en la ecuación (26).

$$A = -\log T = \epsilon bc \quad (26)$$

Esta ecuación es una representación matemática de la ley de *Beer*. El coeficiente de absortividad molar (ϵ) es característico de cada sustancia y su determinación proporciona información sobre la identidad de la misma [48].

La absorción de radiación ultravioleta o visible resulta, generalmente, de la excitación de los electrones de enlace. Como consecuencia, los picos de absorción pueden correlacionarse con los tipos de enlaces de las especies objeto de estudio. Los electrones no enlazantes también contribuyen a la absorción de la radiación UV-Vis. La espectroscopia de absorción molecular es, por tanto, válida para identificar los grupos funcionales en una molécula [48].

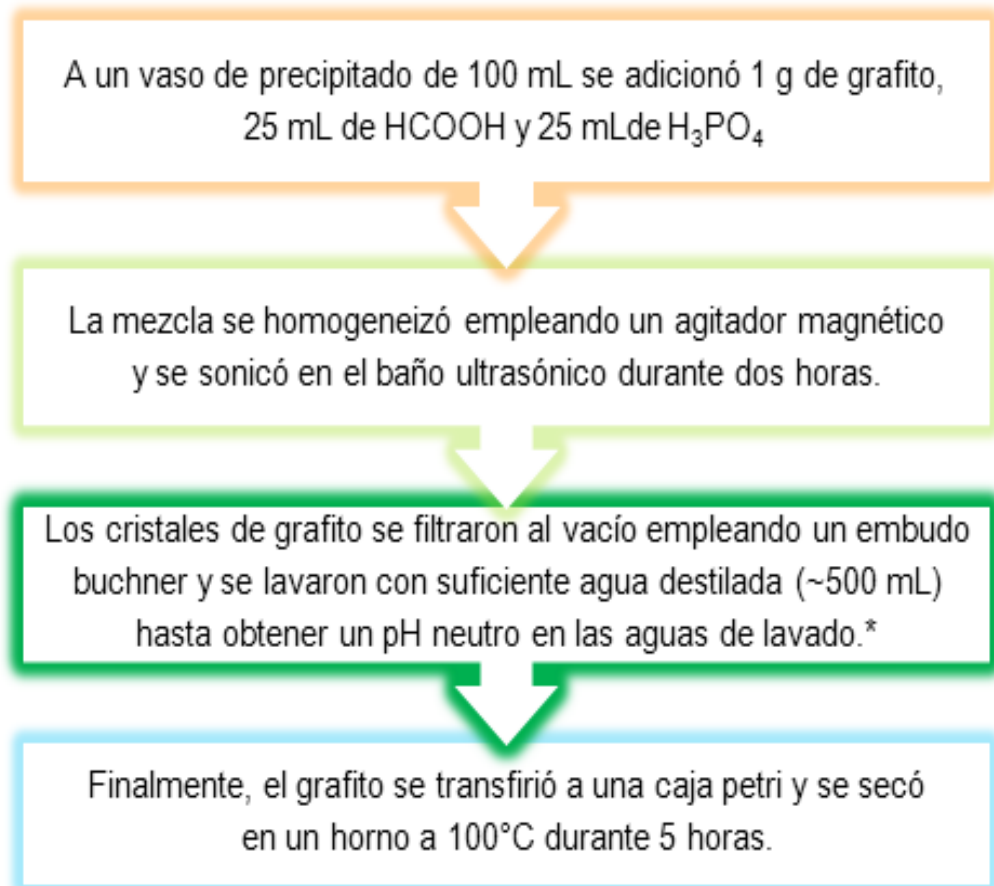
4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

4.1. SECCIÓN QUÍMICA EXPERIMENTAL

La obtención del grafeno químicamente reducido (GQR) se efectuó en la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, bajo el procedimiento descrito en la tesis de grado, “SÍNTESIS, IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GRAFENO POR TÉCNICAS ESPECTROSCÓPICAS Y MICROSCOPIAS DE ALTA RESOLUCIÓN”, por el estudiante IVÁN DARÍO GÓMEZ ROBAYO, con la dirección de ENRIQUE MEJÍA OSPINO, en el año 2011 [49]. Con la finalidad de suministrar fácil acceso a la información referente al grafeno se toma parte de esta tesis y se expone a manera de información. Tomado del numeral 2. SECCIÓN EXPERIMENTAL.

4.1.1. Acondicionamiento y caracterización del grafito

Esquema 1. Procedimiento de exfoliación del grafito empleando ultrasonido.

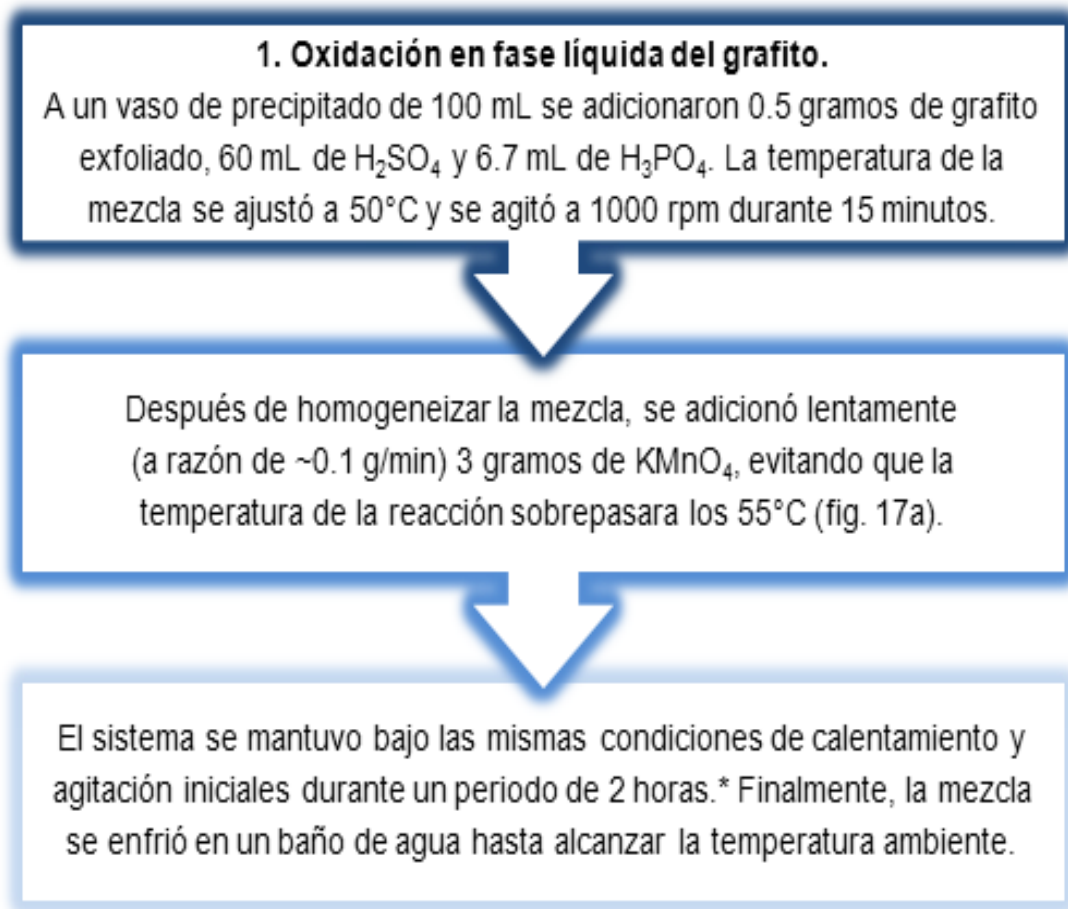


Fuente: Modificado de [49].

***Advertencia:** es muy importante remover el ácido fórmico en su totalidad, debido a que al mezclarse con ácido sulfúrico y permanganato de potasio, puede generarse una reacción violenta durante el proceso oxidativo a través del cual se obtiene el óxido de grafeno.

4.1.2. Obtención y caracterización de los óxidos de grafito y grafeno

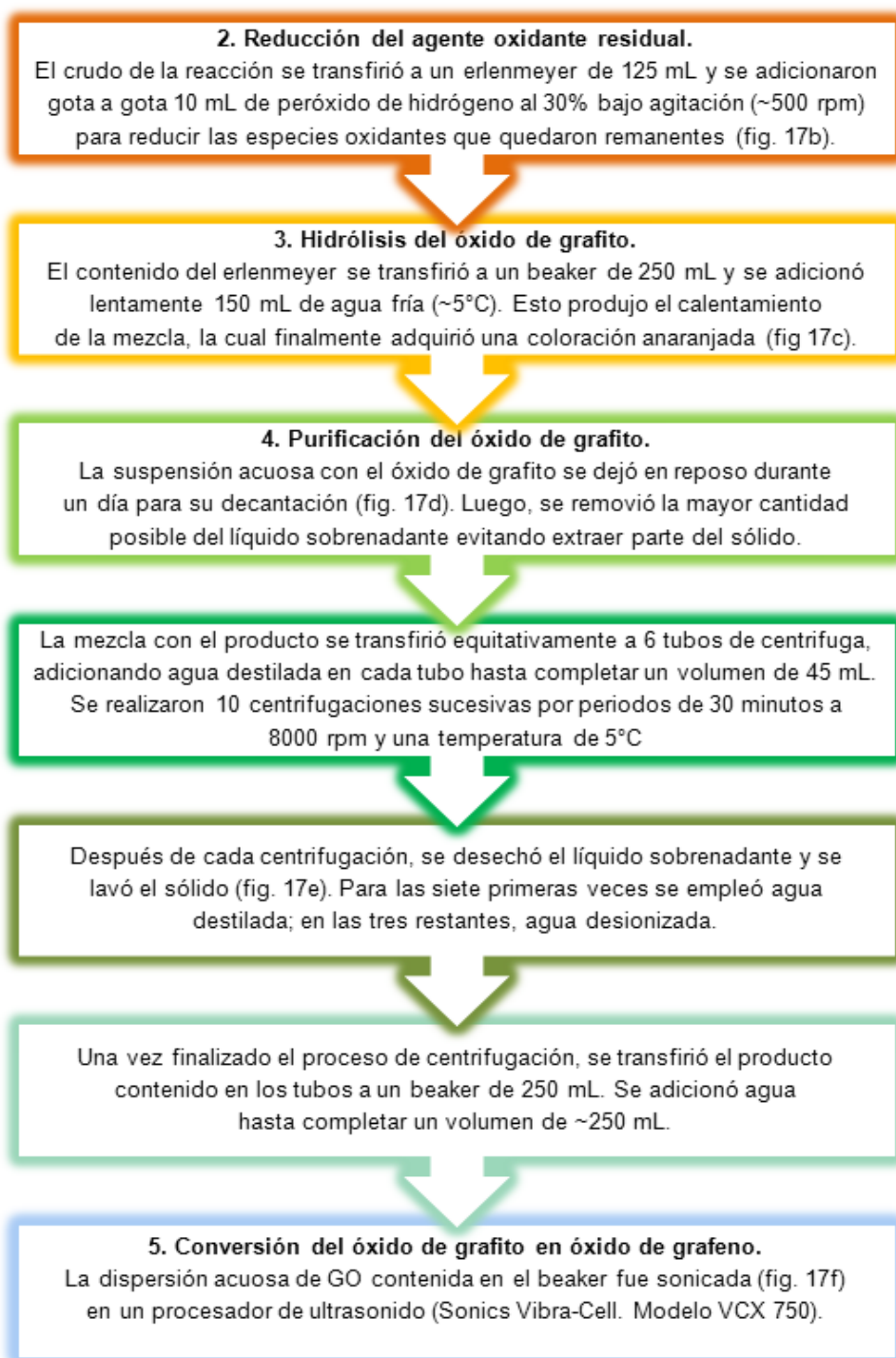
Esquema 2. Procedimiento de síntesis para la obtención del óxido de grafito.



Fuente: Modificado de [49].

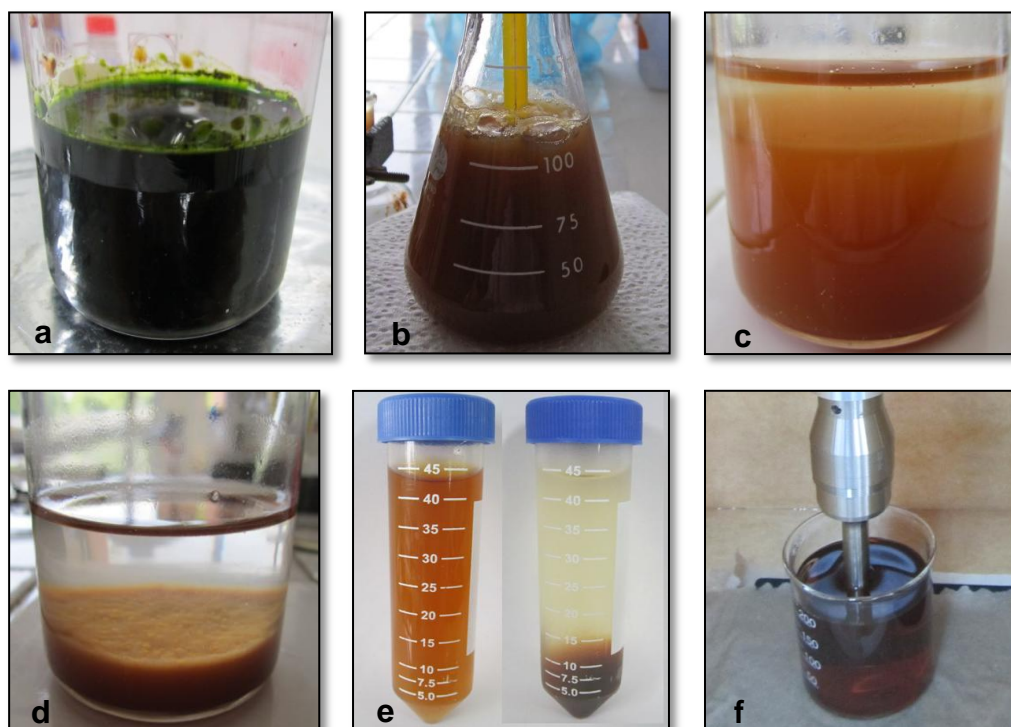
*El tiempo se registró a partir del momento en que se empezó a adicionar el KMnO₄.

Esquema 3. Procedimiento para la purificación, dispersión y estabilización del óxido de grafeno.



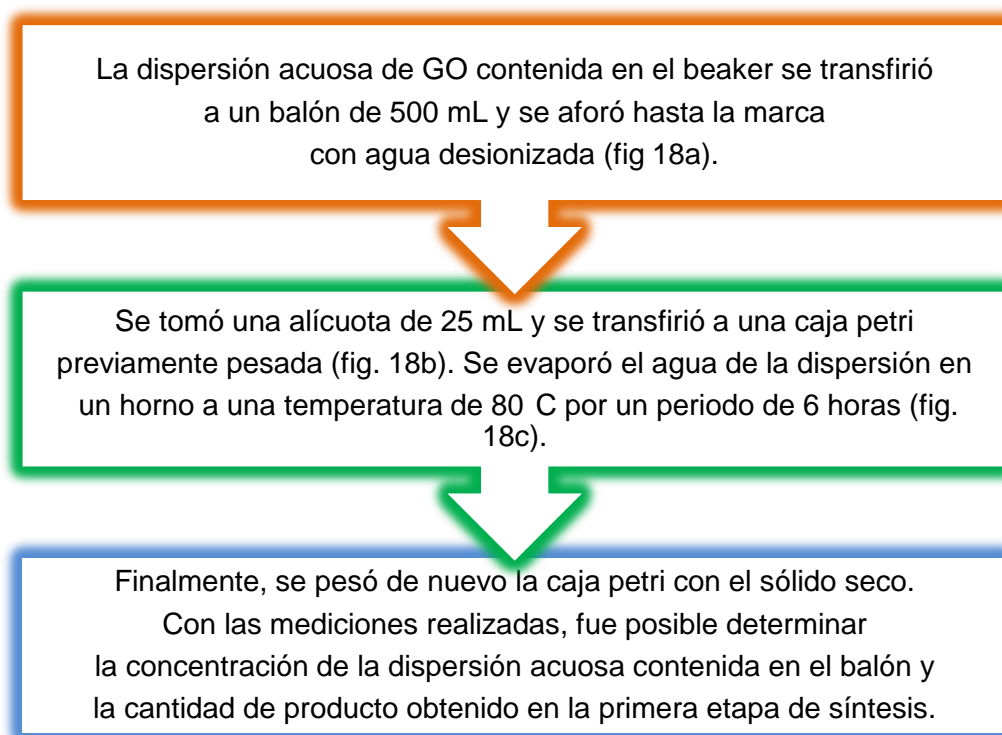
Fuente: Modificado de [49].

Figura 21. Imágenes obtenidas durante el procedimiento de síntesis del óxido de grafeno. (a) Mezcla inicial de la reacción. (b) Reducción de las especies oxidantes remanentes. (c) Mezcla después de hidrolizar el óxido de grafito. (d) Mezcla ácida del GO decantado. (e) Dispersión acuosa del GO antes y después cada centrifugación. (f) Aplicación de US durante la conversión de óxido de grafito en óxido de grafeno.



Fuente: Modificado de [49].

Esquema 4. Procedimiento para la determinación de la cantidad de óxido de grafeno obtenido.



Fuente: Modificado de [49].

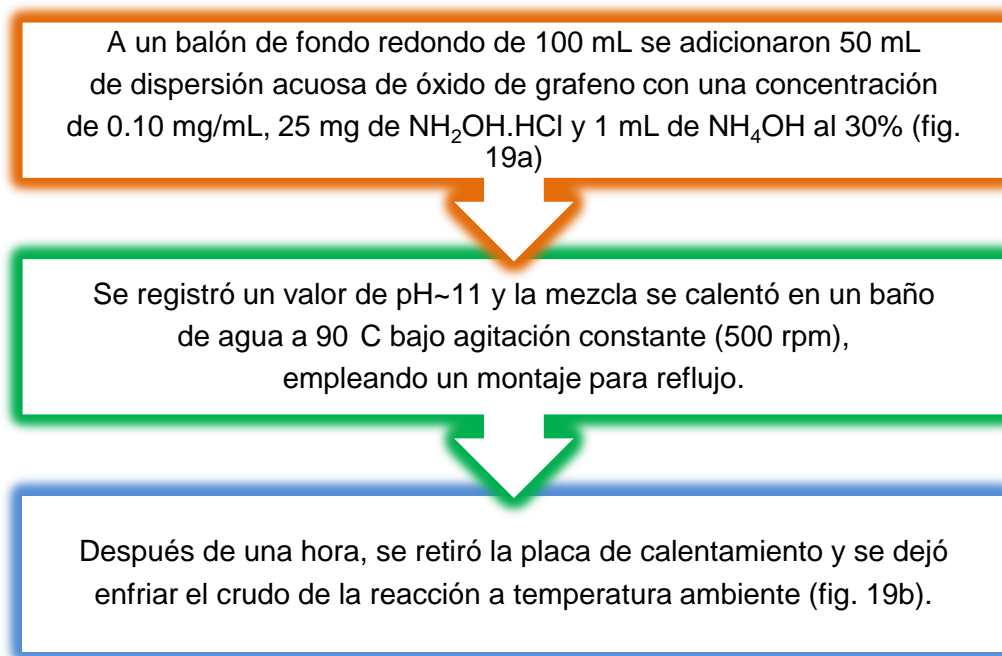
Figura 22. Imágenes relacionadas con la determinación de la cantidad de óxido de grafeno obtenido. (a) Dispersión acuosa de óxido de grafeno. (b) Alícuota de GO disperso en agua. (c) GO sólido.



Fuente: Modificado de [49].

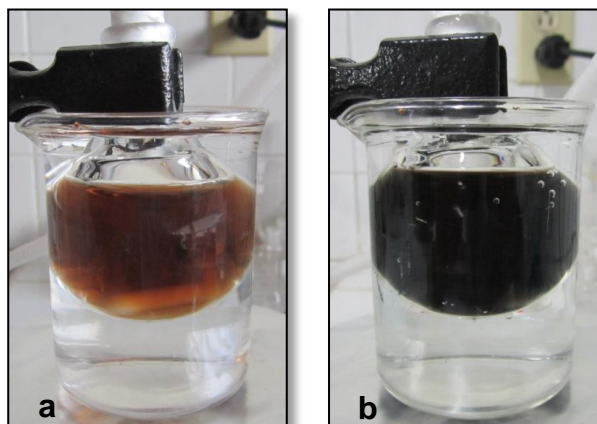
4.1.3. Obtención y caracterización de grafeno químicamente reducido (CRG)

Esquema 5. Procedimiento de síntesis para la obtención de grafeno químicamente reducido.



Fuente: Modificado de [49].

Figura 23. Imágenes obtenidas durante la síntesis de CRG. (a) Mezcla inicial y (b) final de la reacción.

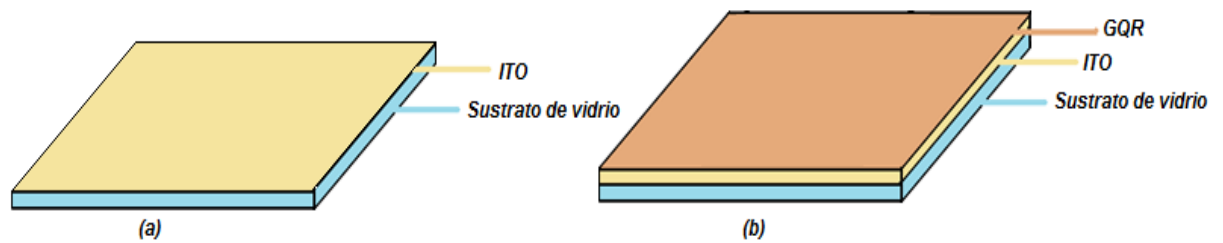


Fuente: Modificado de [49].

4.2. SELECCIÓN DE LA MUESTRA BASE Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Para la selección de la muestra a trabajar se tomó como base un porta-objetos con ITO depositado sobre su superficie. Se tomó como base el ITO (Figura 24a) gracias a la adherencia que le puede proporcionar al grafeno al momento de ser depositado sobre el sustrato de vidrio (Figura 24b), de lo contrario no hay forma de realizar las pertinentes pruebas y la aplicación del método de los cuatro puntos para obtener su resistencia de capa. Sin embargo, el ITO tuvo tratamiento previo para poder adherirse al vidrio. Por tal motivo es importante la selección de aquella muestra que presente mayor homogeneidad, así las propiedades eléctricas y ópticas que son de nuestro interés, pueden presentar un mejor comportamiento y datos de mediciones más exactos.

Figura 24. Contenido de la muestra para la toma de datos.

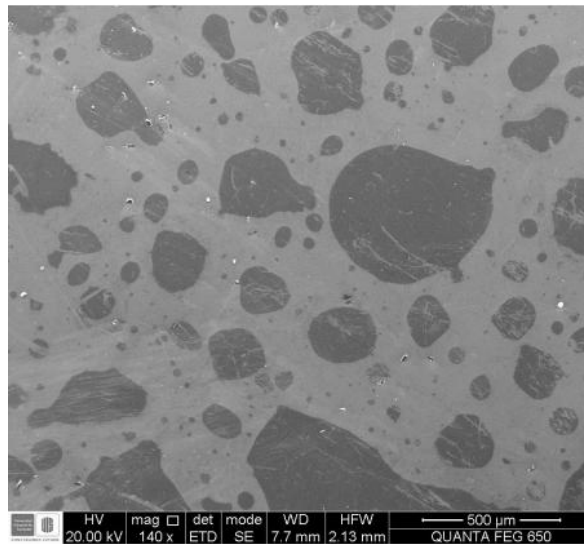


Fuente: Autores.

La selección del mejor ejemplar, se llevó a cabo, teniendo en cuenta el valor de corriente continua que pasaba a través del ITO, utilizando el método de los cuatro puntos. Se tomaron como parámetros para esta selección los dos siguientes; valor de corriente diferente de cero en la mayor área posible a lo largo de la superficie y además, que midiera un valor de corriente de 12,5mA que fueron ajustados en el circuito montado. Es decir, en pequeñas áreas cercanas a la orilla del porta-objetos en donde no alcanzó a quedar bien esparcido el ITO se presentó una

corriente de valor nulo (Figura 25). Se tomaron 5 muestras con ITO depositado, del cual se seleccionaron aquellos que presentaron mayor continuidad a lo largo y ancho de su superficie. Posterior a esto, se utilizó la técnica de recubrimiento por rotación para esparcir el GQR sobre la superficie del porta-objetos en las muestras base ya seleccionadas. La selección de la muestra con grafeno con mejor continuidad se repitió así como se hizo con los que tenían ITO. Para el sustrato de vidrio con GQR esparcido sobre su superficie que mostró mayor homogeneidad fue elegido para obtener la resistencia de capa por medio del método de los cuatro puntos.

Figura 25. Capa no homogénea de GQR

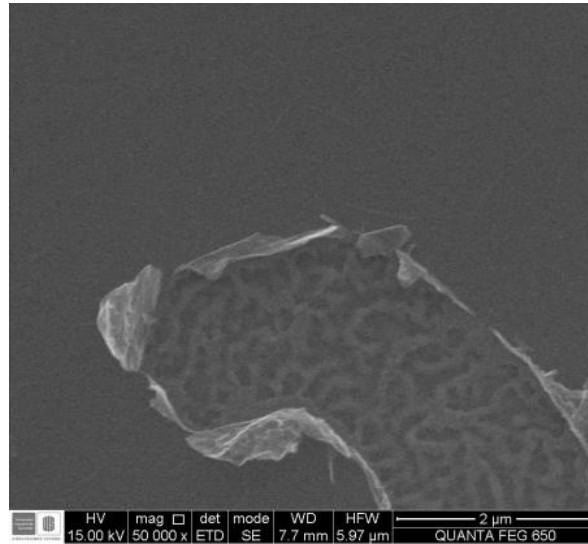


Fuente: Autores.

Algunas muestras como la que se observa en la Figura 26 fueron descartadas, en donde se aprecia la no continuidad de la capa de grafeno y por ende el no paso de corriente para cerrar el circuito y poder registrar un valor de corriente diferente a cero. Capa de grafeno rasgada al tomar las medidas con los electrodos. Contrario a esto, en la Figura 27 se observa una región en donde la capa de grafeno quedó

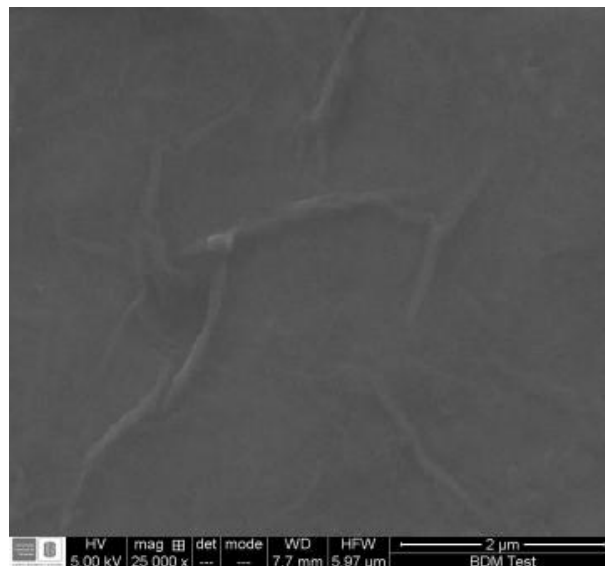
perfectamente homogénea. Ésta región es de las partes no pertenecientes a los extremos del porta-objetos.

Figura 26. Capa de GQR rasgada por electrodo.



Fuente: Autores.

Figura 27. Capa homogénea de GQR.

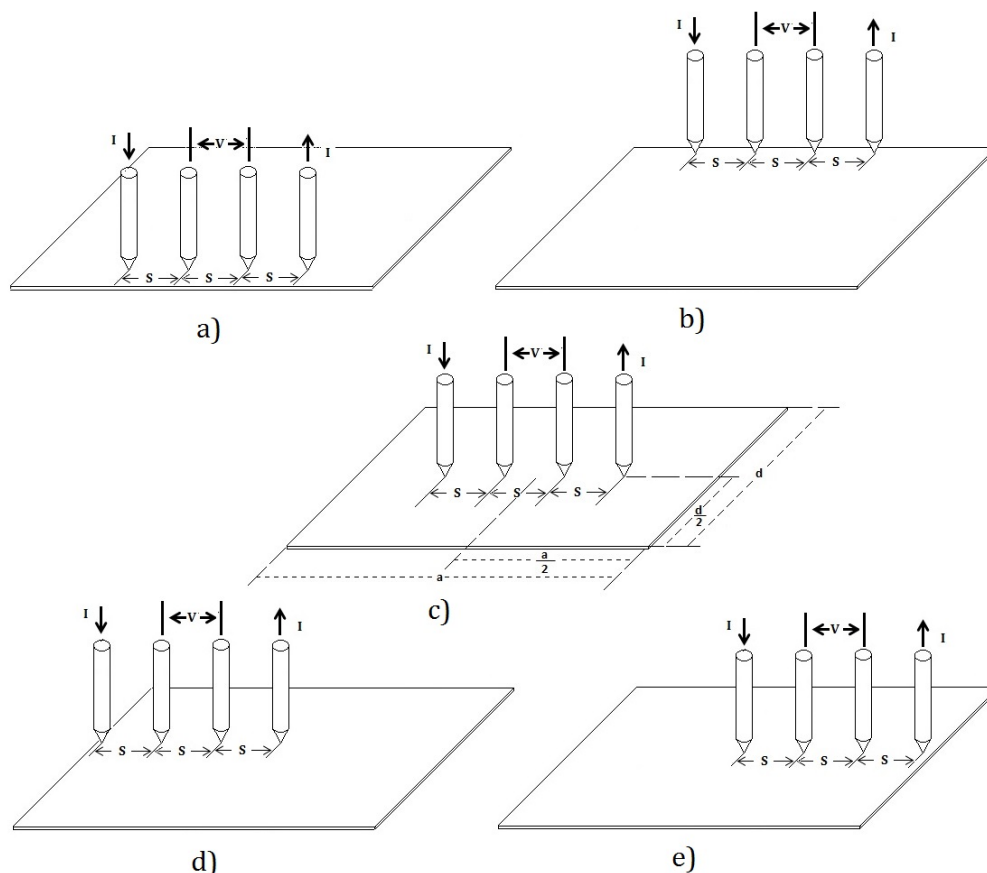


Fuente: Autores.

4.3. USO DEL MÉTODO DE LOS CUATRO PUNTOS

Se utilizó el método de los cuatro puntos para determinar la resistencia de capa de la muestra de grafeno depositado sobre un sustrato de vidrio de forma rectangular de dimensiones a y d , largo 7,5cm y ancho 2,5cm respectivamente. A partir de la lectura de corriente del miliamperímetro utilizado se confirmó con las diferentes medidas la uniformidad de la capa de grafeno esparcida sobre el porta objetos. La corriente constante inyectada a la muestra se ajustó a un valor de 12,5mA en donde dicho valor se evidenció en las diferentes pruebas realizadas Figura (28a), (28b), (28d) y (28e). Luego de confirmar el mismo valor de corriente de 12,5mA en las diferentes medidas se realizaron las medidas de acuerdo al método de los cuatro puntos, Figura (28c). De esta última configuración se tabularon los datos obtenidos de tensión. Las terminales de los instrumentos de medida hicieron contacto con la superficie durante todas las pruebas realizadas, nunca llegaron a enterrarse.

Figura 28. Aplicación del método de los cuatro puntos.



Fuente: Modificado de [45].

4.4. DATOS OBTENIDOS DE TENSIÓN Y CORRIENTE

En la Tabla 3 se muestran los valores obtenidos de corriente y tensión para cada toma de datos correspondientes al ITO y GQR. La corriente continua no se vio afectada al cambiar de muestra; al tomar los datos del ITO y luego de depositado el grafeno sobre el sustrato de vidrio, por lo que fue necesario concentrarse sólo en los valores de tensión. Un cambio de tensión representa proporcionalmente un cambio de la resistencia de la muestra. Cabe resaltar que con el cambio de

dirección de la inyección de corriente, no se vieron afectados los valores de tensión ni de corriente.

Tabla 3. Valores de tensión y corriente obtenidos.

Prueba	Corriente [mA]	Tensión [V]	
		ITO	ITO+GQR
1	12,5	0,400	0,313
2	12,5	0,383	0,325
3	12,5	0,385	0,319
4	12,5	0,384	0,326
5	12,5	0,383	0,295
6	12,5	0,399	0,313
7	12,5	0,383	0,316
8	12,5	0,388	0,311
9	12,5	0,382	0,327
10	12,5	0,380	0,327
Promedio	12,5	0,3867	0,3172

Fuente: Autores.

4.5. CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE

Previamente se aclaró que para este tipo de pruebas es conveniente realizar varias mediciones repetitivas con el fin de obtener un valor más cercano al real. Por consiguiente se procedió a efectuar 10 mediciones de corriente y tensión para el caso del porta-objetos recubierto de ITO y otro recubierto de ITO más GQR; los datos respectivos se muestran en la Tabla 3. A continuación se desarrollará el cálculo de la incertidumbre para los dos casos, cabe resaltar que la incertidumbre Tipo A de la corriente no es necesario calcularla, debido a que se diseñó una fuente de corriente constante (ver Anexo A) que no presentará variación alguna, por tanto, dicha incertidumbre tiene un valor nulo en los cálculos presentados.

4.5.1. Incertidumbre del ITO. Se procede a realizar el Método de Evaluación Tipo A descrito anteriormente, el cual consiste en calcular la desviación estándar de los datos, en ese aspecto se tiene:

$$s_q = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n q_i - q^2} = 0,002352 \quad (27)$$

Donde n es el número de mediciones realizadas, para nuestro caso 10, q_i es el valor de las tensiones y q es el promedio. La incertidumbre de este método, también conocida como la desviación estándar experimental, se describe en la fórmula (7) y se calcula, en este caso, en la ecuaciones (28):

$$\sigma_A = u_{x_i} = s_q = \frac{s(q)}{n} = \frac{0,5645}{10} = 0,0007438 \quad (28)$$

Posteriormente se emplea el Método de Evaluación Tipo B, el cual consiste en tener en cuenta las especificaciones de los instrumentos utilizados (el multímetro analógico-digital y el miliamperímetro analógico). Estas especificaciones son la escala en la que fueron realizadas las mediciones, la exactitud, la resolución y el número de dígitos del instrumento. Estos valores se presentan en las Tablas 4 y 5 para los dos aparatos, respectivamente.

Tabla 4. Especificaciones del multímetro analógico-digital.

VOLTÍMETRO	
Escala [V]	2
Resolución [V]	0,001
Exactitud (% + #dig)	0,5 (+2)

Tabla 5. Especificaciones del miliamperímetro analógico.

MILIAMPÉRIMETRO	
Escala [A]	0,02
Resolución [A]	1E-05
Exactitud (% + #dig)	0,25 (+1)

Como se ha propuesto con anticipación, resulta conveniente tener en cuenta una distribución rectangular, en ese caso, los valores de la incertidumbre de la resolución y exactitud son divididos en $\sqrt{3}$. En las ecuaciones (29) a (34) se muestra el cálculo de la incertidumbre de resolución y exactitud para cada instrumento:

Multímetro (Tensión)

$$\sigma_{exactitud-V} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{Exactitud\% * V}{100} + \#dig * Res = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{0,5 * 0,3867}{100} + 2 * 0,001 \quad (29)$$

$$\sigma_{exactitud-V} = 0,002271 \quad (30)$$

$$\sigma_{resolución-V} = \frac{Resolución}{\sqrt{12}} = \frac{0,001}{\sqrt{12}} = 0,0002887 \quad (31)$$

Miliamperímetro (Corriente)

$$\sigma_{exactitud-I} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{Exactitud\% * V}{100} + \#dig * Res = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{0,25 * 0,0125}{100} + 1 * 1E - 5 \quad (32)$$

$$\sigma_{exactitud-I} = 2,382E-05 \quad (33)$$

$$\sigma_{resolución-I} = \frac{Resolución}{\sqrt{12}} = \frac{0,00001}{\sqrt{12}} = 2,887E - 06 \quad (34)$$

Se procede luego a obtener una incertidumbre única de exactitud y resolución para los dos instrumentos,

$$\sigma_{exactitud} = \sqrt{\sigma_{exactitud-V}^2 * \frac{dR}{dV}^2 + \sigma_{exactitud-I}^2 * \frac{dR}{dI}^2} \quad (35)$$

$$\sigma_{exactitud} = \sqrt{0,002271^2 * 80^2 + 2,382E-05^2 * -2474,88^2} \quad (36)$$

$$\sigma_{exactitud} = 0,1910 \quad (37)$$

$$\sigma_{resolución} = \sqrt{\sigma_{resolución-V}^2 * \frac{dR}{dV}^2 + \sigma_{resolución-I}^2 * \frac{dR}{dI}^2} \quad (38)$$

$$\sigma_{resolución} = \sqrt{0,0002887^2 * 80^2 + 2,887E-06^2 * -2474,88^2} \quad (39)$$

$$\sigma_{resolución} = 0,02417 \quad (40)$$

Para sacar una incertidumbre definitiva del método Tipo B, se deben combinar las incertidumbres de resolución y exactitud como en las ecuaciones (41) y (42).

$$\sigma_B = \sqrt{\sigma_{exactitud}^2 + \sigma_{resolución}^2} = \sqrt{0,1910^2 + 0,02417^2} \quad (41)$$

$$\sigma_B = 0,1925 \quad (42)$$

Y para finalizar se deben combinar las incertidumbres Tipo A y Tipo B con el método visto, de similar forma se tiene:

$$\sigma_{Total} = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} = \sqrt{0,0007438^2 + 0,1925^2} \quad (43)$$

$$\sigma_{Total} = \pm 0,1925[\Omega/\square] \quad (44)$$

Este último valor de incertidumbre es el definitivo que se adjuntará al valor de la resistencia de capa para el porta-objetos cubierto de ITO.

4.5.2. Incertidumbre del GQR. Para el cálculo de esta incertidumbre se procede con el mismo método recién descrito para el ITO, por consiguiente en la Tabla 6 se mostrarán los valores finales de dichos cálculos.

Tabla 6. Incertidumbre del GQR

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
s(q)	0,003336	$\sigma_{\text{(resolución-I)}}$	2,89E-06 [A]
σ_A	0,00106	$\sigma_{\text{exactitud}}$	0,9556
$\sigma_{\text{(exactitud-V)}}$	0,002070 [V]	$\sigma_{\text{resolución}}$	0,02382
$\sigma_{\text{(resolución-V)}}$	0,0002887 [V]	σ_B	0,9559
$\sigma_{\text{(exactitud-I)}}$	0,0004636 [A]	σ_{Total}	$\pm 0,9559$ [Ω/\square]

Fuente: Autores.

Este último valor de incertidumbre es el definitivo que se adjuntará al valor de la resistencia de capa para el porta-objetos cubierto con GQR.

4.6. OBTENCIÓN DE RESISTENCIA DE CAPA

Para el cálculo de resistencia de capa, denotado como R_c , se obtuvo un factor de corrección, FC, para muestras rectangulares el cual depende de las dimensiones del sustrato de vidrio utilizado y la separación entre electrodos que se dispuso. De acuerdo con las dimensiones; largo ($a=7,5\text{cm}$), ancho ($d=2,5$) y separación entre electrodos ($s=0,5\text{cm}$) se obtuvieron las relaciones $a/d=3$ y $d/s=5$ y un $FC=3,575$ obtenido directamente de la Tabla 2. Mediante la Fórmula (20) se calculó la resistencia de capa para cada caso:

$$R_c = 3,575 \frac{0,3867V}{12,5mA} = 110,60 \pm 0,19 [\Omega/\square] \text{ para el ITO} \quad (45)$$

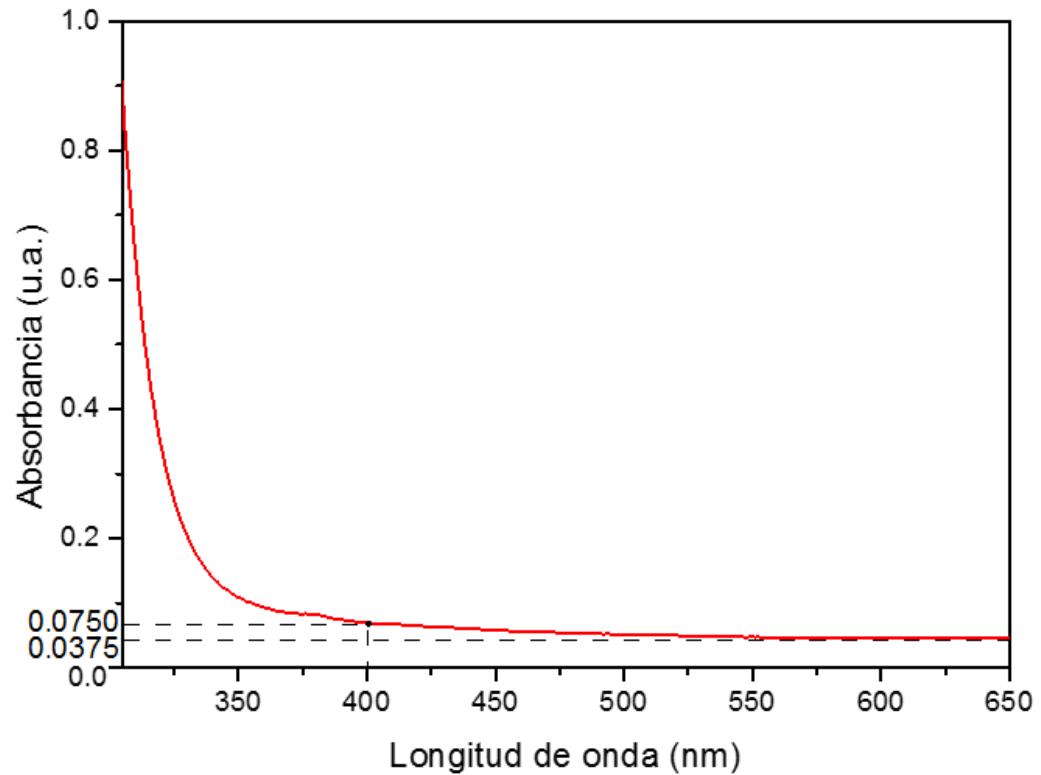
$$R_c = 3,575 \frac{0,3172V}{12,5mA} = 90,72 \pm 0,96 [\Omega/\square] \text{ para el GQR} \quad (46)$$

Estos valores muestran claramente un cambio del valor de resistencia de capa. En este caso se presenta una disminución de 21,91% del valor de resistencia de capa del ITO con respecto al del GQR, lo que representa una mayor conductividad del GQR al disminuir su oposición al flujo corriente.

4.7. ESPECTRO DE ABSORCIÓN DEL GRAFENO

El espectro de absorción que presenta el grafeno se muestra en la Figura 29, en donde se evidencia la absorbancia en el eje de las ordenadas y la longitud de onda en el eje de las abscisas. Se observa que en la región correspondiente al espectro visible (400-700 nm), el grafeno no presenta ningún tipo de absorción. Por tanto su uso en celdas solares requiere de tratamiento previo que puede incluir la utilización de un sistema sensibilizador, tales como colorantes o pigmentos, que presenten, además una fuerte absorción en la región del espectro visible, facilidad para la transferencia electrónica. El espectro que se muestra en la Figura 29 fue obtenido sobre una película de grafeno dispuesta sobre un porta-objetos. Se utilizó para ello un espectrómetro de absorción ultravioleta-visible.

Figura 29. Espectro UV-VIS del grafeno en la región de 300 a 650 nm.



Fuente: Autores.

Se evidencia una baja absorbancia para la región visible. Esto se interpreta como alta transparencia. Tomando como referencia la región del espectro visible (longitud de onda ente 400 y 700nm), y la absorbancia presente en esta región, tomada directamente sobre la gráfica, de 0,0750 u.a. y 0,0375 u.a. respectivamente, se calculan sus debidas transmitancias a partir de la Fórmula (47).

$$A_{\lambda} = -\log_{10} T = -\frac{\ln T}{\ln 10} \Rightarrow T = e^{-\frac{A_{\lambda}}{\ln 10}} \quad (47)$$

$$\text{Para } A_{\lambda} = 0,0750 \quad T = e^{-\frac{0,0750}{\ln 10}} = 84,14\% \quad (48)$$

$$\text{Para } A_{\lambda} = 0,0375 \quad T = e^{-\frac{0,0375}{\ln 10}} = 91,73\% \quad (49)$$

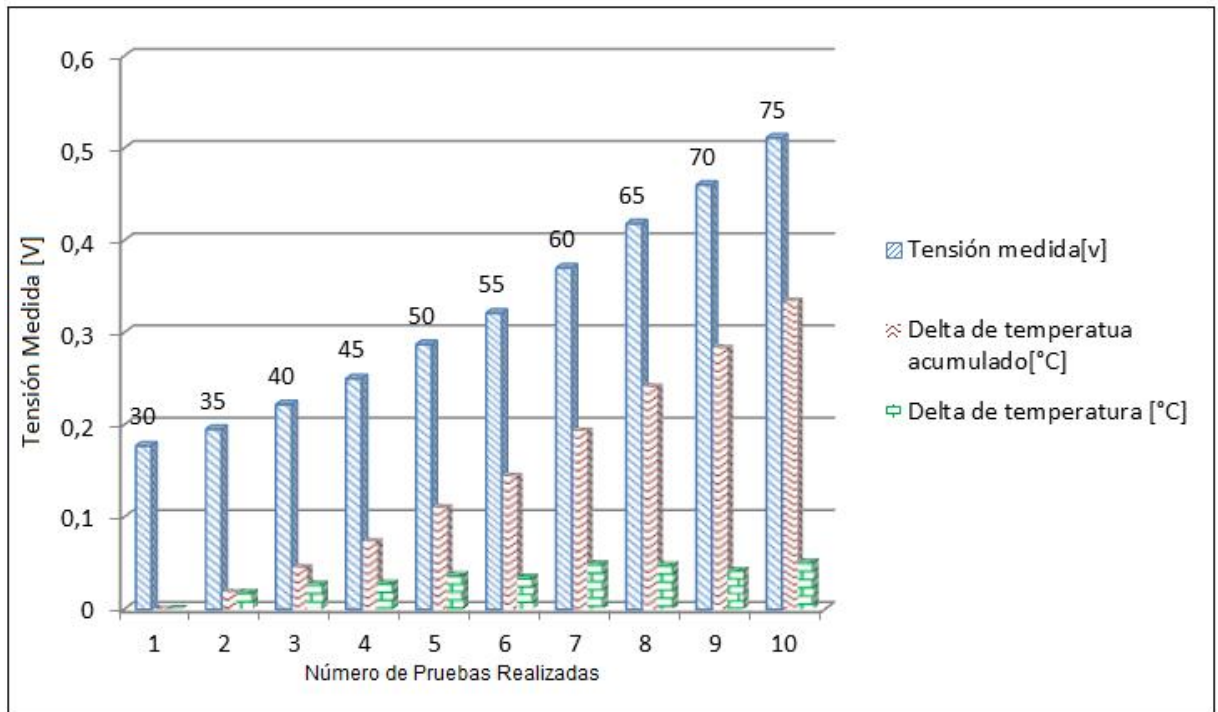
La transparencia del GQR comprendida para el espectro visible está en el rango de 84,14 y 91,73%, magnitudes de transmitancias de alto interés para el estudio en celdas solares. Esta transmitancia calculada corresponde solamente a la capa de grafeno. El interés en querer reemplazar los electrodos convencionales ha dirigido la atención en investigaciones de materiales que tengan las características principales para ser un electrodo transparente; poseer buenas propiedades ópticas y eléctricas. Además de esto, la necesidad también se centra en la disponibilidad de materia prima y en los costos de producción de celdas solares.

4.8. GRAFENO ANTE CAMBIOS DE TEMPERATURA

En la Figura 30 se muestra el comportamiento del GQR al variar la temperatura. Se tomaron diez datos de tensión empleando el método de los cuatro puntos. Se empezó con una temperatura de 30°C para la primera medida de tensión, y se fue aumentando a intervalos de 5°C hasta llegar a los 75°C (barras color azul, líneas diagonales). Las barras de color rojo (líneas onduladas), muestran el cambio de tensión a lo largo de todo el registro de datos de temperatura, a medida que ésta aumentaba. Y las barras de color verde (enladrilladas) revelan el cambio de tensión del GQR para cada medida, con respecto a la anterior.

La corriente medida, en la prueba de los cuatro puntos se mantuvo constante para las medidas realizadas, por lo que un cambio de tensión indica directamente un cambio en la resistencia de capa del GQR. Se evidencia en el diagrama de barras, el aumento proporcional de la resistencia de capa con el aumento de la temperatura.

Figura 30. Comportamiento del GQR ante variación de temperatura.



Fuente: Autores.

También se evidencia un aumento en el delta de temperatura, es decir, el cambio de tensión presente cada 5°C. A mayor temperatura, aumenta más rápido el cambio de tensión. Este aumento de temperatura, afecta negativamente al GQR, debido a que no contribuye con el transporte de carga de la capa del GQR, como electrodo en celdas solares. Por tal motivo, es imprescindible elaborar capas de GQR con resistencias de capa, lo más bajo posible.

4.9. GRAFENO, INDIO Y SILICIO EN CELDAS SOLARES

En el mundo de la energía solar existen diversos tipos de tecnologías, las cuales han venido evolucionando en las últimas décadas gracias al avance tecnológico y

de nuevos materiales. Estos avances resultan en una gran variedad de celdas solares con diferentes características, aplicaciones y costos, entre otros. Dentro de los diversos materiales utilizados, realizamos un análisis comparativo entre el grafeno y dos de los celdas convencionales más utilizados, celdas solares a base de óxido de indio estaño (ITO) y de silicio.

El indio, utilizado como electrodo transparente en celdas solares, es un material con disponibilidad limitada y de elevado costo, al igual que los cristales y policristales de silicio [50]. Estos son aspectos importantes que motivan la búsqueda de nuevos materiales que puedan servir de reemplazo como electrodos en celdas solares. El grafeno, por ser un alótropo del carbono, tiene disponibilidad ilimitada y es amigable con el medio ambiente. También es indispensable saber los efectos ambientales con el tipo de tecnología que se quiere desarrollar. El silicio, para poder satisfacer una alta demanda de sistemas fotovoltaicos requiere de una alta producción, y por ende, una gran carga ambiental en la elaboración a gran escala de paneles solares, convirtiéndolo así en un material con impacto ambiental.

Mediante las pruebas realizadas, por medio del método de los cuatro puntos, se obtuvo un valor de resistencia de capa del GQR de $90,72 \Omega/\square$, con una transparencia de 91,73%. Es un valor bajo si se compara con publicaciones en donde presentan una resistencia de capa de grafeno de $1150 \Omega/\square$ (una sola capa de grafeno) y $220 \Omega/\square$ (siete capas de grafeno). A las cuales se les asocia una transparencia de 97% y 84%, respectivamente [51]. El ITO tiene una resistencia de capa típica de $40 \Omega/\square$, y una transparencia de 80% [52]. Aunque el GQR tiene una mayor transparencia que el ITO, este último, posee menor resistencia de capa. Diferentes valores de resistencia de capa para el ITO y grafeno se pueden encontrar en la literatura, dependiendo estos de las técnicas utilizadas para depositar la muestra en el sustrato de vidrio o plástico.

El proceso térmico, durante la fabricación de celdas solares a base ITO, influye en la búsqueda de características ópticas y eléctricas en sustratos flexibles de plástico, conocidos como celdas solares orgánicas [53]. Los procesos a altas temperaturas para depositar el ITO sobre la superficie de las celdas solares son los encargados de proveer una alta transparencia y conductividad eléctrica a este material. Por otro lado, los procesos a bajas temperaturas necesarios en celdas solares flexibles disminuyen su rendimiento como conductores [24]. Contrario a esto, el grafeno posee mayor transparencia, sin presentar pérdidas de transporte electrónico como el caso del ITO. Un valor de transparencia del GQR obtenido en laboratorio, de 91,73%, contra una transparencia registrada de 80% del ITO [53], posiciona al grafeno como material sustituto como electrodo conductor transparente en OSC. El silicio, a pesar de tener buena eficiencia (aproximadamente 15 %), mayor que las celdas solares a base de ITO y grafeno, y durabilidad (aproximadamente 25 años) es un semiconductor que por sus características físicas y químicas, se opone al paso de luz a través de él.

La tecnología solar a base de silicio se utiliza en forma de paneles fotovoltaicos, rígidos y pesados. Por tal motivo, no está dentro de la categoría de celdas solares flexibles, OSC. El grafeno, por el contrario, gracias a su propiedades físicas puede ser utilizado en celdas solares orgánicas. Éstas han demostrado capacidades excepcionales para operar bajo condiciones de flexibilidad de hasta 138° de inclinación, mientras celdas con electrodos a base de ITO muestran grietas y fallas irreversibles [24]. El grafeno lidera este tipo de tecnología y se aplicaría en condiciones donde nunca antes se había utilizado, como orillas u esquinas de grandes edificaciones donde se pueda aprovechar al máximo la energía solar.

En la Tabla 7, se muestra un resumen que expone las ventajas y desventajas del grafeno ante las celdas a base de ITO y silicio. El grafeno además de tener las características ópticas y eléctricas mencionadas, también puede ser utilizado como sensibilizador y contraelectrodo en DSSC. De acuerdo con estudios

obtenidos [24], las capas de grafeno pueden satisfacer el mayor criterio de abundancia, bajo costo, conductividad, estabilidad, compatibilidad orgánica de las capas, y flexibilidad que es necesaria para reemplazar al ITO en celdas OPV. Todo esto, junto con los procesos industriales a gran escala para lograr depositar el grafeno en sustratos de vidrio o plástico, y con el uso de colorantes o pigmentos que absorban en la región correspondiente al visible, harán del grafeno el material predominante en la aplicación de celdas solares

Tabla 7. Características de grafeno, indio y silicio en celdas solares.

	GRAFENO	ITO	SILICIO
Flexibilidad	Elevada	Media	Ninguna
Transparencia	Elevada	Media	Ninguna
Peso	Liviano	Liviano	Pesado
Versatilidad	DSSC, OSC, Celdas de puntos Cuánticos	DSSC, OSC	Módulos Solares
Costo	Económico	Costoso	Costoso
Disponibilidad de material	Abundante	Limitada	Limitada

Fuente: Autores.

5. CONCLUSIONES

- El método de los cuatro puntos, mostró ser práctico para realizar las medidas de resistencia de capa del GQR depositado en un sustrato de vidrio. No obstante, la manipulación de los terminales de medida para la toma de datos de tensión y corriente, son de extremo cuidado. Puesto que, al desplazarse involuntariamente sobre la superficie, éstos rompen la capa de GQR impidiendo la correcta toma de datos.
- La resistencia de capa del GQR, es un parámetro importante para determinar si el método químico utilizado es el adecuado, para lograr obtener celdas solares eficientes con valores de resistencia de capa bajos.
- El espectro de absorción del GQR, en el espectro visible, mostró no poseer características como absorbente. Por lo tanto, en la celda solar se necesita la presencia de colorantes o pigmentos para poder desarrollar la absorción de energía solar. De esta manera, se puede implementar al GQR como electrodo transparente en celdas solares. Sus propiedades ópticas exhiben una transparencia elevada, mayor a la del ITO.
- El grafeno promete ser un potencial electrodo en OSC y DSSC, previéndose como futuro reemplazo del ITO. Dicho material posee características eléctricas, ópticas, de liviano peso y gran flexibilidad que lo diferencian de los electrodos convencionales. Una alternativa económica e innovadora de producir energía a bajo costo. Este material será líder en sistemas de tecnología solar y reemplazará celdas solares convencionales, como lo son, en la actualidad, a base de indio y silicio, ambas son nocivas para el medio ambiente y su costo es elevado.

- El grafeno, como derivado del carbono posee gran disponibilidad en la naturaleza, siendo un material amigable con el medio ambiente y de bajo costo. Sin embargo, requiere un proceso de manufactura apropiado para producir tecnología solar a gran escala, la cual hasta el momento es un tema de estudio y continúa investigación a nivel mundial ya que presenta inconvenientes al depositar el grafeno sobre una superficie determinada.
- La resistencia de capa del GQR aumenta a medida que se incrementa la temperatura a la cual se encuentra expuesto. Parámetro que nos obliga a obtener resistencias de capa de la menor magnitud posible, para su uso como electrodo en celdas solares.

6. TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES

- ✓ Para mejorar la exactitud de las pruebas, es importante utilizar electrodos de potencial y de corriente con un área de contacto menor, así como la distancia entre ellos, la cual se recomienda utilizar la menor posible. Por lo tanto se recomienda contar con equipos sofisticados que mantenga la simetría de las pruebas.
- ✓ Los instrumentos de medida utilizados, como el amperímetro y voltímetro, en lo posible que sean de mayor precisión, además de poseer los certificados y parámetros de calibración.
- ✓ Es importante el trabajo previo que se le hace al sustrato de vidrio para que se pueda adherir al grafeno, entre mayor sea su homogeneidad mejores resultados se obtendrán.
- ✓ La elaboración de celdas solares a base de grafeno es prometedora, sin embargo, deben superarse los inconvenientes del proceso de producción a gran escala y el control de número de capas.
- ✓ Calcular la resistencia de capa únicamente del GQR sobre el sustrato de vidrio, en donde el tratamiento previo para adherirlo no sea por medio del ITO.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Nobel de Física para dos científicos rusos por sus trabajos sobre el grafeno - El País de España. Consultado el 5 de octubre de 2013. Sitio web: http://sociedad.elpais.com/sociedad/2010/10/05/actualidad/1286229601_850215.html

[2] M. Terrones; A. Botello; J. Campos; F. López; Y. Vega; J. Rodríguez; A. Elías; E. Muñoz; A. Cano; J. Charlier; H. Terrones. Graphene and graphite nanoribbons: Morphology, properties, synthesis, defects and applications. Elsevier, Nano Today, 2010, 5, pp 351-372.

[3] 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). [acceso el 3 noviembre de 2013]. Sitio web: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/advanced-physicsprize2010.pdf.

[4] E. Martínez; M. Cifuentes; R. de Coss. Grafeno: un paso hacia el futuro. Mundo Nano, UNAM, 2009, 1 (2), pp 15-16.

[5] W. Choi; I. Lahiri; R. Seelaboyina; Y. Kang. Synthesis of graphene and its applications: a review. Critical reviews in solid state and materials sciences, 2010, 35 (1), pp. 53-71

[6] Caracterización de las propiedades electrónicas de un semiconductor, Departamento de Física de Materiales - Facultad de Ciencias Físicas – Universidad Complutense de Madrid.

<http://www.yumpu.com/es/document/view/14068783/caracterizacion-de-las-propiedades-electronicas-de-un-semiconductor> (Visitado en Noviembre de 2013)

[7] Charles Kittel Hoboken , “Introduction to solid state physics “,John Wiley & Sons, cop. 2005.

[27] J.L. Galán García. Sistemas de Unidades Físicas. Editorial reverté, s.a. Encarnacion 86, 08024 Barcelona.

[9] Adrian Kitai. 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.

[10] Salvador P. Alcántara. Celulas Solares de Silicio: fundamentos y aplicaciones. Malaga, noviembre de 2008. Sitio web: <http://salvaponce.files.wordpress.com/2008/11/celulas-solares-de-silicio.pdf>

[11] National Renewable Energy Laboratory (NRE). octubre 2013. URL: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg.

[12] Rodríguez M. Humberto. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Físico, M.Sc., Dr.rer.nat. Consultor Independiente. Bogotá D.C., Colombia.

[13] Saïdou Madougou, Mohamadou Kaka and Gregoire Sissoko. Silicon Solar Cells: Recombination and Electrical Parameters. University Abdou Moumouni of Niamey, BP 10 963 – Niamey.

[14] WALLACE C.H. CHOY. Organic Solar Cells: Materials and Device Physics. Ed Springer.

[15] O'Regan, B & Grätzel, M. (1991) A low cost, high-efficiency solar cell base on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, 353 (6346), 737-740.

[16] Michael Cass, "Dye-Sensitized Solar Cells. Using organic dyes to generate electricity from light" Univeristy of Bath.

http://www.camse.org/scienceonthemove/documents/DSSC_manual.pdf

[17] Y. H. Hu, H. Wang, B. Hu, "Thinnest-dimensional nanomaterial—graphene for solar energy", *ChemSusChem* 3 (2010) 782–796.

[18] P. V. Kamat, *J. Phys.* "Graphene based nanoarchitectures, anchoring semiconductor and metal nanoparticles on a 2-dimensional carbon support", *Chem. Lett.* 1 (2010) 520–527.

[19] J.-M.Yun,J.-S. Yeo,J.Kim,H.-G.Jeong,D.-Y.Kim,Y.-J.Noh, S.-S.Kim, B.-C. Ku,S.-I.Na, " "Solution-processable reduced graphene oxide as a novel alternative to PEDOT:PSS hole transport layers for highly efficient and stable polymer solar cells" " *Adv.Mater.*23(2011)4923–4928.

[20] J.-M.Yun,J.-S.Yeo,J.Kim,H.-G.Jeong,D.-Y.Kim,Y.-J.Noh,S.-S.Kim,B.-C. Ku,S.-I.Na, "Solution-processable reduced graphene oxide as a novel alternative to PEDOT:PSS hole transport layers for highly efficient and stable polymer solar cells", *Adv.Mater.*23(2011)4819.

[21] 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.

[22] 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* 306(2004)666–669.

[23] 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.

[24] Galina V. Dubacheva, Chih-Kai Liang, Dario M. Bassani. “Functional monolayers from carbon nanostructures fullerenes, carbon nanotubes, and graphene as novel materials for solar energy conversion”, Elsevier April 2012.

[25] Y. Wang, , “Large area, continuous, few-layered graphene as anodes in organic photovoltaic devices” *Appl. Phys. Lett.* 95 (2009) 063302.

[26] 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.

[27] F. Gong, H. Wang, Z. -S. Wang, , “Self-assembled monolayer of graphene/pt as counter electrode for efficient dye-sensitized solar cell”, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 13 (2011) 17676–17682.

[28] Bae, S., Kim, H., Lee, Y., Xu, X., Park, J.-S., Zheng, Y., et al. (2010). Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. *Nature Nanotechnology*, 5(8), 574–578.

[29] Sukang Bae, Hyeongkeun Kim, Youngbin Lee, Xiangfan Xu, Jae-Sung Park, Yi Zheng, Jayakumar Balakrishnan, Tian Lei, Hye Ri Kim, Young Il Song, Young-Jin Kim, Kwang S. Kim, Barbaros Özyilmaz, Jong-Hyun Ahn, Byung Hee Hong

and Sumio Iijima, "Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes" NATURE NANOTECHNOLOGY, 2010.

[30] <http://nanotechweb.org/cws/article/lab/50835> (Consultado el 13 de Noviembre de 2013)

[31] Ladislav Kavan, Jun Ho Yum and Michael Gratzel. Optically Transparent Cathode for Dye Sensitized Solar Cells Based on Graphene Nanoplatelets. Heyrovsky Institute of Physical Chemistry. 2011.

[32] Kun Seok Lee, Youngbin Lee. Flexible and Platinum-Free Dye-Sensitized Solar Cells with Conducting-Polymer-Coated Graphene Counter Electrodes. 13 de enero de 2012.

[33] Enzheng Shi, Hongbian 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 Cells". Nano Lett, MARzo (2013), 1776-1781.

[34] "Graphene-On-Silicon Schottky Junction Solar Cells", Xinming Li¹, Hongwei Zhu^{1,*}, Kunlin Wang^{1,*}, Anyuan Cao², Jinqun Wei¹, Chunyan Li¹, Yi Jia¹, Zhen Li¹, Xiao Li¹, Dehai Wu¹, Advanced Materials, Julio (2010), 2743-2748.

[35] Evaluation of measurement data- Guide to the expression of uncertainty in measurement. Document produced by Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1). First edition September 2008 .

[36] Wolfgang A. Schmid y Ruben J. Lazos Martínez. Guía para estimar la incertidumbre de la medición. El Marqués, Qro., México, abril de 2004.

[37] Daniel Slomovitz . Ejemplo de cálculo de incertidumbre. UTE, Montevideo, Uruguay. 2005.

[38] Niranjan Sahu, B. Parija and S. Panigrahi. Fundamental understanding and modeling of spin coating process : A review. Department of physics, National Institute of technology, Rourkela-769 008, Orissa, India.

[39] Zhenghui Wang, Jun Ma, Panpan Wang, “Optimization of membrane structure using the spin-coating method”. Harbin Institute of Technology, State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, National Engineering Research Center of Urban Water Resources, Harbin 150090, PR China.

[40] Ramón Gómez Aguilar, Jaime Ortiz López. Low cost instrumentation for spin-coating deposition of thin films in an undergraduate laboratory. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Física y Matemáticas, Edificio 9, U.P.A.L.M. de Zacatenco, 07738 México D.F.

[41] F. Wenner, “A method of measuring earth resistivity,” Bulletin of Bureau of Standards 12, 469-478. 1915.

[42] L.B. Valdes, “Resistivity measurements on germanium for Transistors,” Proc. IRE 42, 420-427, Feb. 1954.

[43] H.H. Wieder, “Four terminal nondestructive electrical and galvanomagnetic measurements,” nondestructive evaluation of semiconductor materials and device (J.N. Zemel, ed.), Plenum Press, New York, 1979, 67-104.

[44] Michal Mazur, Danuta Kaczmarek, Jaroslaw Domaradzki, Damian Wojcieszak, Shigene Song, Frank Placido. “Influence of thickness on transparency and sheet resistance of ito thin films” 2010, 65-68.

[45] F.M. Smits, "Measurement of sheet resistivities with the four-point probe," Bell Syst. Tech. J.,37,711(1958).

[46] Dieter K. Schroder, "Semiconductor Material and Device Characterization," Third Ed .

[47] J. Michael Hollas , Modern Spectroscopy, 4 ed., John Wiley & Sons, 2004 http://optdesign.narod.ru/book/Hollas_Modern_spectroscopy.pdf (Visitado en Noviembre de 2013)

[48] D. Skoog; J. Holler; T. Nieman. Principios de análisis instrumental. 5 ed., Editorial Mc Graw Hill, España, 2001, pp 322, 353-355 (UV-Vis). 411, 438-441, 450-452 (IR). 291, 297-298, 315 (DRX). 578, 592-593 (Microscopías). 593-596 (SEM).

[49] Iván Darío Gómez Robayo, "Síntesis, Identificación y Caracterización de Grafeno por Técnicas Espectroscópicas y Microscopías de Alta Resolución", trabajo de grado para químico, dirigido por Enrique Mejía Ospino, Universidad Industrial de Santander, 2011.

[50] Weiran Cao, Ying Zheng, Zhifeng Li, Edward Wrzesniewski, William T. Hammond, Jiangeng Xue., "Flexible organic solar cells using an oxide/metal/oxide trilayer as transparent electrode", Elseiver, Junio 2012.

[51] H. Bi, F. Huang, J. Liang, X. Xie, M. Jiang, , "Transparent conductive graphene films synthesized by ambient pressure chemical vapor deposition used as the front electrode of CdTe solar cells", Adv. Mater. 23 (2011) 3202–3206.

[52] Caterina Soldano, Ather Mahmood, Erik Dujardin, "Production, Properties and potential of graphene", Elsevier February (2010).

[53] J.-Y. Lee, S. T. Connor, Y. Cui, P. Peumans "Solution-processed metal nanowire mesh electrodes" Nano Lett. 8, 689-692 (2008).

BIBLIOGRAFIAS

Adrian Kitai. 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.

Bae, S., Kim, H., Lee, Y., Xu, X., Park, J.-S., Zheng, Y., et al.(2010). Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. Nature Nanotechnology, 5(8), 574–578.

Caracterización de las propiedades electrónicas de un semiconductor, Departamento de Física de Materiales - Facultad de Ciencias Físicas – Universidad Complutense de Madrid.
<http://www.yumpu.com/es/document/view/14068783/caracterizacion-de-las-propiedades-electronicas-de-un-semiconductor> (Visitado en Noviembre de 2013)
Caterina Soldano, Ather Mahmood, Erik Dujardin, “Production, Properties and potential of graphene”, Elsevier February (2010).

Charles Kittel Hoboken , “Introduction to solid state physics “,John Wiley & Sons, cop. 2005.

D. Skoog; J. Holler; T. Nieman. Principios de análisis instrumental. 5 ed., Editorial Mc Graw Hill, España, 2001, pp 322, 353-355 (UV-Vis). 411, 438-441, 450-452 (IR). 291, 297-298, 315 (DRX). 578, 592-593 (Microscopías). 593-596 (SEM).

Daniel Slomovitz . Ejemplo de cálculo de incertidumbre. UTE, Montevideo, Uruguay. 2005.

Dieter K. Schroder, "Semiconductor Material and Device Characterization," Third Ed .

E. Martínez; M. Cifuentes; R. de Coss. Grafeno: un paso hacia el futuro. Mundo Nano, UNAM, 2009, 1 (2), pp 15-16.

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 Cells". Nano let, MArzo (2013),1776-1781.

Evaluation of measurement data- Guide to the expression of uncertainty in measurement. Document produced by Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1). First edition September 2008 .

F. Wenner, "A method of measuring earth resistivity," Bulletin of Bureau of Standars 12, 469-478. 1915.

F.Gong, H. Wang, Z. -S. Wang, , "Self-assembled monolayer of graphene/pt as counter electrode for efficient dye-sentitized solar cell", Phys. Chem. Chem. Phys. 13 (2011) 17676–17682.

F.M. Smits, "Measurement of sheet resistivities with the four-point probe," Bell Syst. Tech. J.,37,711(1958).

Galina V. Dubacheva, Chih-Kai Liang, Dario M. Bassani. "Functional monolayers from carbon nanostructures fullerenes, carbon nanotubes, and graphene as novel materials for solar energy conversion", Elseiver Abril 2012.

Graphene-On-Silicon Schottky Junction Solar Cells”, Xinming Li¹, Hongwei Zhu^{1,*}, Kunlin Wang^{1,*}, Anyuan Cao², Jinquan Wei¹, Chunyan Li¹, Yi Jia¹, Zhen Li¹, Xiao Li¹, Dehai Wu¹, *Advanced Materials*, Julio (2010), 2743-2748.

H. Bi, F. Huang, J. Liang, X. Xie, M. Jiang, , “Transparent conductive graphene films synthesized by ambient pressure chemical vapor deposition used as the front electrode of CdTe solar cells”, *Adv. Mater.* 23 (2011) 3202–3206.

H.H. Wieder, “Four terminal nondestructive electrical and galvanomagnetic measurements,” *nondestructive evaluation of semiconductor materials and device* (J.N. Zemel, ed.), Plenum Press, New York, 1979, 67-104.

<http://nanotechweb.org/cws/article/lab/50835> (Consultado el 13 de Noviembre de 2013)

Iván Darío Gómez Robayo, “Síntesis, Identificación y Caracterización de Grafeno por Técnicas Espectroscópicas y Microscopías de Alta Resolución”, trabajo de grado para químico, dirigido por Enrique Mejía Ospino, Universidad Industrial de Santander, 2011.

J. Michael Hollas , *Modern Spectroscopy*, 4 ed., John Wiley & Sons, 2004
http://optdesign.narod.ru/book/Hollas_Modern_spectroscopy.pdf (Visitado en Noviembre de 2013)

J.L. Galán García. *Sistemas de Unidades Físicas*. Editorial reverté, s.a. Encarnacion 86, 08024 Barcelona.

J.-M.Yun,J.-S. Yeo,J.Kim,H.-G.Jeong,D.-Y.Kim,Y.-J.Noh, S.-S.Kim, B.-C. Ku,S.-I.Na, “, “Solution-processable reduced graphene oxide as a novel alternative to

PEDOT:PSS hole transport layers for highly efficient and stable polymer solar cells””Adv.Mater.23(2011)4923–4928.

J.-M.Yun,J.-S.Yeo,J.Kim,H.-G.Jeong,D.-Y.Kim,Y.-J.Noh,S.-S.Kim,B.-C. Ku,S.-I.Na, “Solution-processable reduced graphene oxide as a novel alternative to PEDOT:PSS hole transport layers for highly efficient and stable polymer solar cells”, Adv.Mater.23(2011)4819.

J.-Y. Lee, S. T. Connor, Y. Cui, P. Peumans "Solution-processed metal nanowire mesh electrodes" Nano Lett. 8, 689-692 (2008).

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 carbón films”, Science306(2004)666–669.

Kun Seok Lee, Youngbin Lee. Flexible and Platinum-Free Dye-Sensitized Solar Cells with Conducting-Polymer-Coated Graphene Counter Electrodes. 13 de enero de 2012.

L.B. Valdes, “Resistivity measurements on germanium for Transistors,” Proc. IRE 42, 420-427, Feb. 1954.

Ladislav Kavan, Jun Ho Yum and Michael Gratzel. Optically Transparent Cathode for Dye Sensitized Solar Cells Based on Graphene Nanoplatelets. Heyrovsky Institute of Physical Chemistry. 2011.

M. Terrones; A. Botello; J. Campos; F. López; Y. Vega; J. Rodríguez; A. Elías; E. Muñoz; A. Cano; J. Charlier; H. Terrones. Graphene and graphite nanoribbons: Morphology, properties, synthesis, defects and applications. Elsevier, Nano Today, 2010, 5, pp 351-372.

Michael Cass, "Dye-Sensitized Solar Cells. Using organic dyes to generate electricity from light" Univeristy of Bath.http://www.camse.org/scienceonthemove/documents/DSSC_manual.pdf

Michal Mazur, Danuta Kaczmarek, Jaroslaw Domaradzki, Damian Wojcieszak, Shigene Song, Frank Placido. "Influence of thickness on transparency and sheet resistance of ito thin films" 2010, 65-68.

National Renewable Energy Laboratory (NRE). octubre 2013. URL: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg.

Niranjan Sahu, B. Parija and S. Panigraphi. Fundamental understanding and modeling of spin coating process : A review. Department of physics, National Institute of technology, Rourkela-769 008, Orissa, India.

Nobel de Física para dos científicos rusos por sus trabajos sobre el grafeno - El País de España. Consultado el 5 de octubre de 2013. Sitio web: http://sociedad.elpais.com/sociedad/2010/10/05/actualidad/1286229601_850215.html

O'Regan, B & Grätzel, M. (1991) A low cost, high-efficiency solar cell base on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, 353 (6346), 737-740.

P. V. Kamat, J. Phys. "Graphene based nanoarchitectures, anchoring semiconductor and metal nanoparticles on a 2-dimensional carbon support", *Chem. Lett.* 1 (2010) 520–527.

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.

Ramón Gómez Aguilar, Jaime Ortiz López. Low cost instrumentation for spin-coating deposition of thin films in an undergraduate laboratory. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Física y Matemáticas, Edificio 9, U.P.A.L.M. de Zacatenco, 07738 México D.F.

Rodríguez M. Humberto. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Físico, M.Sc., Dr.rer.nat. Consultor Independiente. Bogotá D.C., Colombia.

Saïdou Madougou, Mohamadou Kaka and Gregoire Sissoko. Silicon Solar Cells: Recombination and Electrical Parameters. University Abdou Moumouni of Niamey, BP 10 963 – Niamey.

Salvador P. Alcántara. Celulas Solares de Silicio: fundamentos y aplicaciones. Malaga, noviembre de 2008. Sitio web: <http://salvaponce.files.wordpress.com/2008/11/celulas-solares-de-silicio.pdf>

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). [acceso el 3 noviembre de 2013]. Sitio web: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/advanced-physicsprize2010.pdf.

Sukang Bae, Hyeongkeun Kim, Youngbin Lee, Xiangfan Xu, Jae-Sung Park, Yi Zheng, Jayakumar Balakrishnan, Tian Lei, Hye Ri Kim, Young Il Song, Young-Jin Kim, Kwang S. Kim, Barbaros Ozyilmaz, Jong-Hyun Ahn, Byung Hee Hong and Sumio Iijima, "Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes" NATURE NANOTECHNOLOGY, 2010.

W. Choi; I. Lahiri; R. Seelaboyina; Y. Kang. Synthesis of graphene and its applications: a review. *Critical reviews in solid state and materials sciences*, 2010, 35 (1), pp. 53-71

WALLACE C.H. CHOY. *Organic Solar Cells: Materials and Device Physics*. Ed Springer.

Weiran Cao, Ying Zheng, Zhifeng Li, Edward Wrzesniewski, William T. Hammond, Jiangeng Xue., "Flexible organic solar cells using an oxide/metal/oxide trilayer as transparent electrode", Elsevier, Junio 2012.

Wolfgang A. Schmid y Ruben J. Lazos Martínez. *Guía para estimar la incertidumbre de la medición*. El Marqués, Qro., México, abril de 2004.

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.

Y. H. Hu, H. Wang, B. Hu, "Thinnest-dimensional nanomaterial—graphene for solar energy", *ChemSusChem* 3 (2010) 782–796.

Y. Wang, , "Large área, continuos, few-layered graphene as anodes in organic photovoltaic devices" *Appl. Phys. Lett.* 95 (2009) 063302.

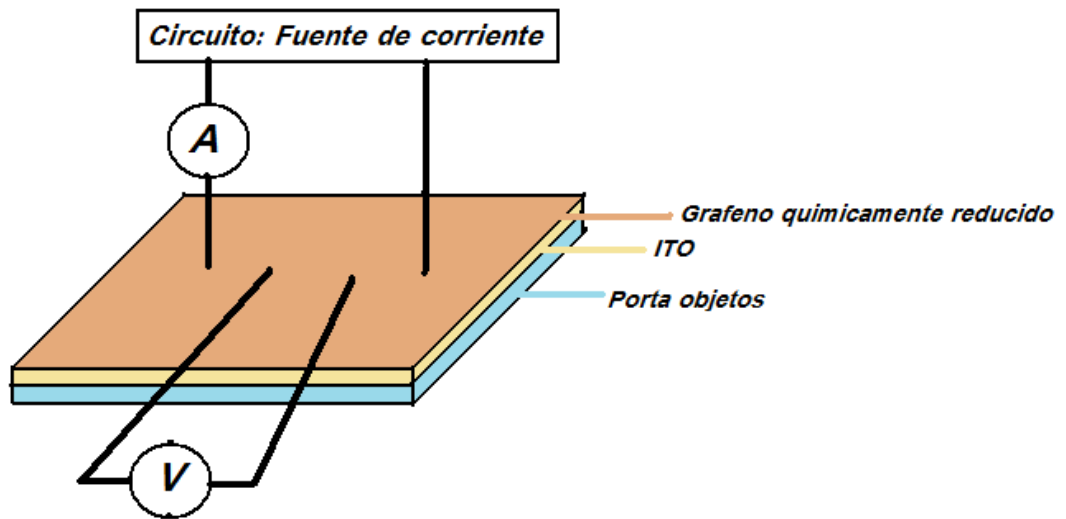
Z. Yin, S. Sun, T. Salim, S. Wu, X. Huang, Q. He, Y. M. Lam, H. Zhang, " Organic photovoltaic devices using highly flexible reduced graphene oxide films as transparent electrodes ", *ACS Nano* 4 (2010) 5263–5268.

Zhenghui Wang, Jun Ma, Panpan Wang, "Optimization of membrane structure using the spin-coating method". Harbin Institute of Technology, State Key

Laboratory of Urban Water Resource and Environment, National Engineering.
Research Center of Urban Water Resources, Harbin 150090, PR China.

La carga es el sustrato de vidrio que contiene una capa de Iridio tin oxide (ITO) y adherida a ésta, el grafeno químicamente reducido (GQR) como se muestra en la figura A2.¹⁹

Figura A2. Esquema de la carga de prueba.



Fuente: Elaborada por los autores.

¹⁹ <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/xtr110.pdf>

Anexo C. Materiales Y Equipos Utilizados

- Multímetro analógico-digital AX-7030, LCD 3,5 cifras 15mm.
- Mili-amperímetro analógico, hasta 600 mA.
- Puntas de prueba para multímetro analógico-digital AX-7030
- Puntas de prueba echas en cobre
- Motor DC 12V, 0,11A, 150 revoluciones por minuto.
- Circuito Integrado XTR 110KP
- Fuente de poder DC triple. Dos salidas de 0-30V, 0-3A. Una salida de 5V, 3A; 207 watts; 0.1%. Modelo BK Precisión 1672.
- Agitador magnético con placa calefactor MSH-20DSET. Máxima temperatura 350°C.
- Protoboard²¹

²¹ Catalog wiseStir MSH-D Hotplate Stirrer. Operation Manual. Witeg Germany Home of Innovations. Version 1.5.0108.