



**UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO**

---

---

**CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS**

**“CELDA FOTOVOLTAICA DE  
ÓXIDO DE GRAFENO”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**PRESENTA:**

**ALDO ELIZARRARAZ PEREZ**

**DIRECTORES:**

**DRA. BÁRBARA GONZÁLEZ ROLÓN**

**DR. ROGELIO CASTRO SÁNCHEZ**

**SALAMANCA, GUANAJUATO**

**JUNIO 2023**

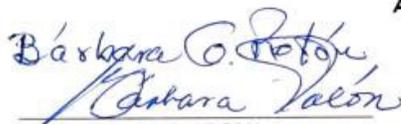
Sabanauca, Gto., a 04 de Junio del 2023.

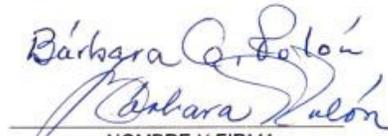
M. en I. HERIBERTO GUTIÉRREZ MARTIN  
COORDINADOR DE ASUNTOS ESCOLARES  
PRESENTE.-

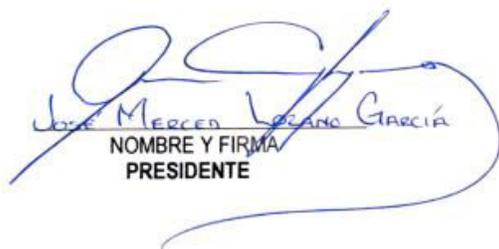
Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno(a) Aldo Elizarraraz Perez del Programa de Licenciatura en Ingeniería en Mecatrónica y cuyo número de NUA es: 278390 del cual soy director. El título de la tesis es: Celda Fotovoltaica de Óxido de Grafeno

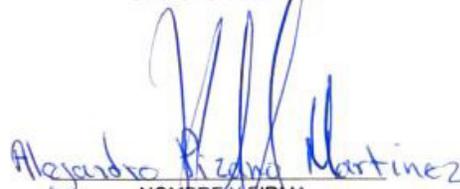
Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

ATENTAMENTE

  
NOMBRE Y FIRMA  
DIRECTOR DE TESIS  
SECRETARIO

  
NOMBRE Y FIRMA  
DIRECTOR DE TESIS

  
NOMBRE Y FIRMA  
PRESIDENTE

  
NOMBRE Y FIRMA  
VOCAL

## **DEDICATORIA**

**A mis padres y hermanos que siempre me han apoyado.**

**A mis mentores que me forjaron para poder hacer esto posible.**

**A mi familia.**

## **AGRADECIMIENTOS**

**A la Dra. Bárbara González Rolón por ayudarme a culminar este trabajo y enseñarme las bases para hacer investigación.**

**Al Dr. Rogelio Castro Sánchez por ayudarme a culminar esta investigación, así como enseñarme a realizar trabajos con mejor calidad.**

**Al Dr. Iván Abel Hernández Robles por apoyar este proyecto.**

**A CINERGIA-UG por prestar sus instalaciones para empezar el proyecto.**

**A mi amigo Alberto Yair Ruvalcaba Acosta quien me ayudo a iniciar el proyecto del Grafeno y sus derivados.**

**A la Dra. June Simpson y la ingeniera Luisa Fernanda Cendejas Gutiérrez de CINVESTAV Irapuato**

## ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
	1.1. Antecedentes	1
	1.2. Aplicaciones	2
	1.3. Objetivos de la investigación	4
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>TEORIA DE CELDAS FOTOVOLTAICAS</b>	<b>5</b>
	2.1. Historia de las celdas fotovoltaicas	5
	2.2. Funcionamiento de las celdas fotovoltaicas	5
	2.3. Tipos de celdas fotovoltaicas	7
	2.3.1. Celda solar de silicio	7
	2.3.2. Celda solar de película delgada	8
	2.3.3. Celda solar multicapa	10
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>FABRICACIÓN DE LA CELDA FOTOVOLTAICA</b>	<b>11</b>
	3.1. Fabricación del OG	11
	3.2. Preparación de electrodos para la celda fotovoltaica	12
	3.3. Técnicas de caracterización físicas	13
	3.3.1. Espectroscopia UV-visible	13
	3.3.2. Caracterización por infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR)	14
	3.3.3. Obtención de las propiedades eléctricas por efecto hall	15
	3.3.3.1. Comportamiento eléctrico	16
	3.3.3.2. Concentración volumétrica de portadores de carga en la película de OG	17
	3.3.3.3. Grafica de concentración volumétrica del OG contra la temperatura	17
	3.3.3.4. Concentración de portadores de carga sobre la superficie en la película de OG	17
	3.3.3.5. Resistencia de la película de OG sobre la superficie	18
	3.3.3.6. Curva resistencia de la lámina de OG sobre la superficie contra temperatura	18
	3.3.3.7. Resistividad de la película de OG	19
	3.3.3.8. Curva resistividad del OG contra temperatura	19
	3.3.3.9. Conductividad de la película de OG	19



## ÍNDICE DE FIGURAS

No. Fig.	Título	Pág.
Figura 1	Celda fotovoltaica (a) vista transversal, (b) vista superior.	6
Figura 2	Curvas típicas de una Celda solar. (a) Corrientes en cortocircuito $I_{cc1}$ e $I_{cc2}$ ( $V = 0$ ) contra $V$ . b) Comportamiento logarítmico del Voltaje a circuito abierto (ca) y la Corriente lineal en corto circuito (cc) contra la intensidad de luz.	6
Figura 3	Recombinación de portadores de carga en una unión de 2 semiconductores uno tipo $n$ y otro tipo $p$ .	8
Figura 4	Esquema de distribución de capas en una celda solar de película delgada.	9
Figura 5	Elaboración de OG a partir de grafito en polvo (a) grafito en polvo, (b) Ataque químico sobre el grafito.	11
Figura 6	Lavado del OG (a) primer lavado del OG, (b) Ultimo lavado del OG, (c) Muestra final después de centrifugar.	11
Figura 7	Esquema de los electrodos para la celda fotovoltaica con cintas de cobre y aluminio sobre vidrio como aislante, (a) Vista superior, (b) Vista Frontal.	12
Figura 8	(a), (b) y (c) Electrodo de la celda fotovoltaica de cintas de aluminio y cobre de diferentes espesores y distancias montadas sobre vidrio.	12
Figura 9	Muestras de OG vistas con el microscopio a 40x, (a) OG de baja concentración, (b) OG de alta concentración.	13
Figura 10	Celdas Fotovoltaicas de OG sobre electrodos de cintas metálicas de cobre y aluminio, (a) Celda Fotovoltaica de OG con baja concentración. (b) Celda Fotovoltaica de OG con alta concentración.	13
Figura 11	Espectro UV Vis del OG obtenido equipo marca Perkin Elmer Lambda modelo 650 UV/VIS	14
Figura 12	Resultados de la prueba de FTIR del OG.	15
Figura 13	(a) Base para soporte de prueba de 4 puntos. (b) Papel de OG sobre el soporte de 4 puntas.	16
Figura 14	Resultados obtenidos con el equipo Ecopia HSM-5000.	16
Figura 15	Grafica de concentración volumétrica contra temperatura del OG, en el rango de temperaturas de 160 a 300 kelvin.	17
Figura 16	Grafica de resistencia sobre la superficie de la lámina de OG en el rango de temperaturas de 160 a 300 kelvin.	18
Figura 17	Grafica de resistividad del OG en el rango de temperaturas de 160 a 300 grados kelvin.	19
Figura 18	Grafica de conductividad del OG en el rango de temperaturas de 160 a 300 grados kelvin.	20
Figura 19	Grafica de movilidad del OG en el rango de temperaturas de 160 a 300 grados kelvin.	21
Figura 20	Grafica de coeficiente promedio del OG en el rango de temperaturas de 160 a 300 grados kelvin.	22
Figura 21	Imagen esquemática de la cinta de OG para la conexión en 4 puntos del equipo marca Ecopia modelo HSM-5000.	22
Figura 22	Parámetros para la medición de corriente contra resistencia con el equipo marca Ecopia modelo HSM-5000	23

## ÍNDICE DE FIGURAS (continuación)

Figura 23	Curvas resistencia contra corriente, del papel de OG.	23
Figura 24	Parámetros de medición para obtener curvas de Voltaje contra Corriente con el equipo marca Ecopia modelo HSM-5000.	24
Figura 25	Grafica de la prueba de 4 puntos del papel de OG.	24
Figura 26	Circuito utilizado para medir la potencia de celda fotovoltaica de OG.	25
Figura 27	Equipos para medición de la potencia de celda de OG (a) Fluke 3000FC, (b) Fluke 117, (c) EXTECH Solar Power Meter.	26
Figura 28	Circuito sobre una mesa de laboratorio, para medir la potencia en luz difusa.	26
Figura 29	Grafica de corriente contra voltaje con luz difusa iluminando la celda y con en una resistencia variable como carga	28
Figura 30	Medición de la celda de OG con luz solar Directa.	28
Figura 31	Gráfica de corriente contra voltaje con luz directa del sol iluminando la celda y con en resistencia variable como carga.	30
Figura 32	Grafica $I$ (V) de una celda fotovoltaica para calcular su potencia.	31
Figura 33	Celdas Fotovoltaicas de OG conectadas en serie para aumentar la tensión de salida.	34
Figura 34	Celda de OG Alimentando una calculadora que consume $0.025 mA$ .	34
Figura 35	Celda fotovoltaica de OG de $2.2V$ alimentado una calculadora Con la celda iluminada con luz difusa.	35
Figura 36	Circuito utilizado para simular una corriente constante $I_d$ en una carga ( $R_2$ ó batería recargable).	36
Figura 37	Circuito regulador para la celda de carga de OG.	36
Figura 38	(a) y (b) Circuito para regular el voltaje para alimentar diferentes cargas a baja corriente ( $3 mA$ ).	37
Figura 39	Circuito con Celda fotovoltaica de OG, circuito regulador de voltaje, calculadora y 2 multímetros para medición de corriente y voltaje.	38
Figura 40	(a) y (b) Celda Fotovoltaica de OG iluminada con luz difusa para encender un led de forma directa.	39
Figura 41	Papel en forma circular de OG de aproximadamente $4 cm$ de diámetro, (a) Papel de OG, (b) Midiendo el diámetro aproximado del papel de OG, (c) Papel de OG a contra luz para comprobar que no tenga huecos.	39
Figura 42	Celdas Fotovoltaicas de OG encapsuladas con electrodos cortos.	40
Figura 43	Celdas Fotovoltaicas de OG encapsuladas con electrodos largos.	40
Figura 44	Película semitransparente de OG sobre vidrio.	41
Figura 45	Celda semitransparente de OG, (a) la celda esta sobre un espejo el cual se ve de manera difusa sobre la misma, (b) voltaje de la celda en circuito abierto, (c) corriente de la celda en corto circuito.	42
Figura 46	(a) Celdas fotovoltaicas de OG transparentes, (b) Celda derecha entrega $684 mV$ en circuito abierto, (c) Celda izquierda entrega $598 mV$ en circuito abierto.	42

## **CAPÍTULO 1      INTRODUCCIÓN.**

En la actualidad la electricidad es una de las energías más versátiles, puras y fáciles de trasladar la usamos todos los días y está presente en casi todas las poblaciones a nivel mundial, también existen innumerables fuentes de donde transformarlas como son energías térmicas, geotérmicas, eólicas, solares, nucleares, entre otras, dado que cada día se requiere más energía eléctrica a nivel global, una de las fuentes para obtenerla de manera renovable es la energía solar usando las celdas fotovoltaicas ya que gracias a ellas se puede obtener energía eléctrica con solo tener luz solar directa o indirecta.[1].

Dado que existen muchos tipos de celdas solares como son las de silicio, tándem, película delgada, entre otras [2], no se puede ignorar el problema de que para su fabricación se requiere de mucha energía generando así más huella de carbono y materiales preciosos como son la plata por mencionar alguno.

En este trabajo se presenta una celda fotovoltaica usando de base un nano material el cual es Óxido de Grafeno (OG), que es derivado de un nano material llamado Grafeno que está conformado por átomos de carbono de un solo átomo de espesor con forma hexagonal parecida a un panal de abejas [3].

El OG utilizado para fabricar la celda fotovoltaica fue hecho con materia prima reciclada y no requiere una instalación especial para su fabricación así como tampoco de electrodos de metales preciosos, con esto se da un paso a opciones de celdas fotovoltaicas mas baratas y amigables con el medio ambiente.

### **1.1. ANTECEDENTES.**

La primer celda fotovoltaica data del año 1941 con tan solo el 1% de

eficiencia, pero su comercialización fue hasta 1955 y eran usadas en satélites para resolver el problema de obtención de energía eléctrica fuera de la tierra [1], desde entonces han surgidos nuevos récords de eficiencias así como los tipos de celdas fotovoltaicas y los materiales utilizados, como lo son las celdas solares de película delgada, de silicio monocristalino, silicio policristalino, orgánicas, transparentes entre otras.

Las celdas solares se manufacturan de manera muy similar a los microchips y transistores, utilizando una oblea de silicio que después es dopada y grabada químicamente [2].

El consumo mundial de energía alcanzó los 16 Tera watts en 2006 y se prevé que aumente a ~30 Tera watts para 2050 [4], dado el creciente aumento de la demanda energética a nivel mundial, usar fuentes de energía que no dejen huella de carbono es esencial para reducir el efecto invernadero que las fuentes de energía no renovables producen al emitir grandes cantidades de carbono a la atmósfera.

En el año 2004 los científicos Novoselov y Geim lograron aislar una mono capa de Grafeno, por exfoliación mecánica usando cinta adhesiva en el proceso, esta clase de estructura a base de carbono es de dos dimensiones con forma hexagonal similar al panal de abejas, esto los hizo acreedores al premio Nobel de física en el 2010 [5].

## **1.2. APLICACIONES.**

Como se mencionó con anterioridad la primera aplicación de las celdas fotovoltaicas fueron para obtener energía en el espacio usada en los satélites principalmente, conforme se fue perfeccionando y abaratando la fabricación de celdas fotovoltaicas, se crearon paneles solares para su uso en la tierra por medio del encapsulado de paquetes de celdas fotovoltaicas conectadas en serie y en paralelo, con suficiente tolerancia a la intemperie y con un mínimo de vida útil de 20

años o más sin perder más allá del 20% de su potencia máxima.

Dado que los paneles solares no tienen partes móviles, esto es una ventaja en cuanto a otras fuentes como lo son las eólicas e hidráulicas, con la única limitante que es la luz solar, que dependiendo de la ubicación y época del año varía la potencia máxima disponible.

También hay que mencionar su uso en dispositivos más pequeños como pueden ser relojes deportivos, ventanas solares, mochilas, baterías de respaldo, calculadoras, haciendo la función de una pequeña fuente de energía de DC.

Cabe mencionar que las celdas fotovoltaicas de película delgada a pesar de contar con una eficiencia menor a las de silicio monocristalino y policristalino, estas requieren de menor materia prima y algunas de ellas pueden llegar a ser flexibles dándoles una mayor adaptabilidad a los espacios sin requerir de estructuras rígidas y pesadas como son el vidrio templado y perfil de aluminio y en algunas ocasiones se requieren estructuras en su mayoría metálicas para orientar el panel y que la mayor cantidad de luz solar llegue de manera perpendicular a este para una mayor eficiencia, al contrario de algunas celdas de película delgada que se pueden usar como impermeabilizante que también aprovecha la luz directa y difusa del sol, sin necesidad de estructuras extras para su instalación.

A partir del descubrimiento del Grafeno en 2004 [5], se han encontrado innumerables aplicaciones en muchos campos como lo son la medicina, construcción, metalurgia, electrónica, transporte, energética entre muchas otras, así como el derivado del Grafeno, el Óxido de Grafeno (OG), se ha abierto camino prácticamente en las mismas áreas que el Grafeno.

El papel del OG en las celdas fotovoltaicas es principalmente el transportar portadores de carga como son el hueco/electrón a través de la barrera de potencial formada en una unión  $p-n$  iluminada por energía solar. [6]



### 1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

- Fabricación de una Celda Fotovoltaica simple y de bajo costo.
- Para la fabricación de la Celda Fotovoltaica utilizar óxido de grafeno.
- La fabricación del óxido de grafeno será utilizando materia prima reciclada (grafito).
- Se medirá la eficiencia de la celda en diferentes condiciones de luz solar (directa y difusa).
- Se aplicará la celda solar para alimentar un circuito usando un convertidor CD-CD

## **CAPÍTULO 2. TEORIA DE CELDAS FOTOVOLTAICAS**

### **2.1. HISTORIA DE LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS**

Edmond Becquerel, científico francés, en 1839 descubrió que al colocar y exponer a la luz dos electrodos metálicos entre una solución conductora se generaba electricidad definiéndose experimentalmente como el efecto fotovoltaico [1] [7].

En 1873 el ingeniero eléctrico Willoughbt Smith descubrió que el selenio tiene propiedades fotoconductoras lo que implicaba que un material se vuelve mejor conductor debido a la radiación electromagnética visible, años después se demostró que el efecto fotoconductor solo era originado por la luz sin la intervención de calor u otra fuente de energía [1] [7].

Para el año de 1883 se le acredita al inventor norteamericano Charles Fritts la creación de la primera celda fotovoltaica con selenio y electrodos de oro, con una eficiencia de conversión del 1% [1] [7].

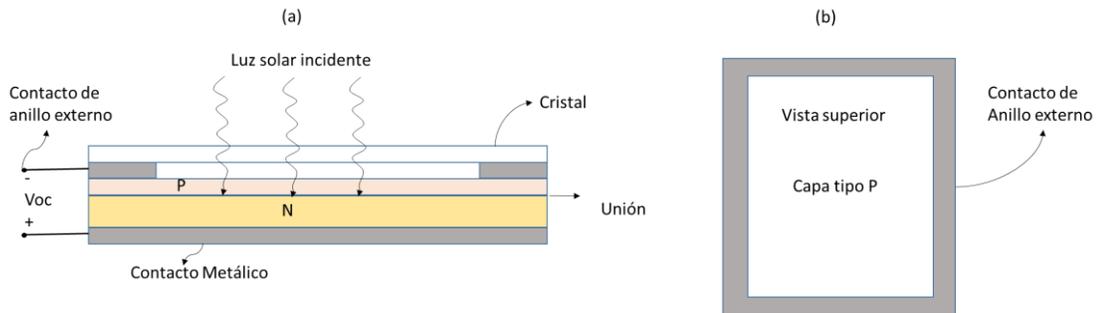
Posteriormente en 1887 el alemán Heinrich Hertz, observó el efecto de la luz que tiene sobre superficies sólidas y metálicas de crear energía y cuyo efecto se potenciaba con la utilización de la luz ultravioleta. Años después, en 1921 Albert Einstein recibió el premio nobel por explicar matemáticamente el efecto [1].

La primera celda funcional de silicio de unión *p-n* se hizo en los laboratorios Bell con una eficiencia del 6% en el año de 1954 al mismo tiempo que la fuerza aérea la obtuvo con una eficiencia también del 6% de Sulfuro de Cobre (CuS)/Sulfuro de Cadmio (CdS). [8].

### **2.2. FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS.**

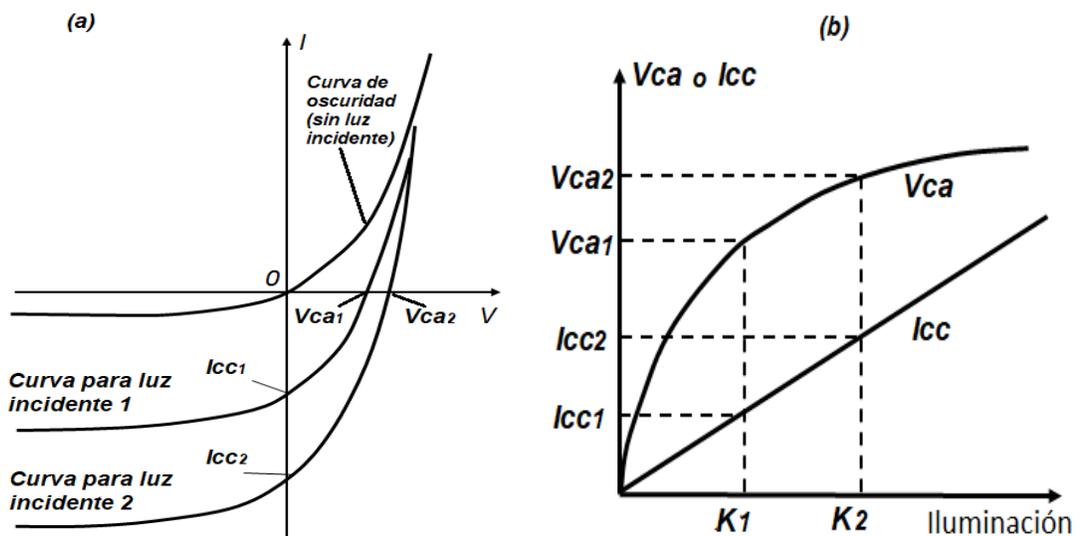
Una celda solar de unión *p-n* es un dispositivo diseñado para convertir los fotones de una fuente de luz en una corriente eléctrica a través de la unión *p-n* y asociado a esto un voltaje entre sus terminales.

Una estructura típica de la celda solar se construye de tal manera que el espesor del material semiconductor tipo *p* debe de garantizar que los fotones de luz lleguen a la unión e impacten con los electrones de valencia de las impurezas donadora yceptoras de los materiales *p-n*. Estos fotones al golpear los electrones de valencia generan pares electrón-hueco a cada lado de la unión. Tanto los electrones en el material *p* como los huecos generados en el material *n* son portadores minoritarios y se moverán con relativa libertad en el campo eléctrico formado en la barrera de potencial sin polarización aplicada externamente [9].



**Figura 1** Celda fotovoltaica (a) vista transversal, (b) vista superior.

El resultado es un incremento del flujo de portadores minoritarios en dirección opuesta a la corriente convencional o de huecos como se muestra en las curvas típicas  $I-V$  (tercer cuadrante) y  $V-I$  Iluminación de una unión  $p-n$  mostradas en la figura 2 [17].



**Figura 2** Curvas típicas de una celda solar. (a) corrientes en cortocircuito  $I_{cc1}$  e  $I_{cc2}$  ( $V = 0$ ) contra  $V$ . b) Comportamiento logarítmico del voltaje a circuito abierto ( $V_{ca}$ ) y la corriente lineal en corto circuito ( $I_{cc}$ ) contra la intensidad de luz.

Las gráficas típicas de la figura anterior, de una celda fotovoltaica, nos muestran en la figura 2 a) la corriente de cortocircuito  $I_{cc}$  a lo largo del eje vertical ( $V = 0$ ) cuyo incremento es lineal con respecto a la intensidad de luz y en la figura 2 b) el comportamiento logarítmico del voltaje de salida en circuito abierto  $V_{ca}$ . Estos dos parámetros nos permiten pensar en la dependencia de la intensidad de luz y del

arreglo en serie de las celdas fotovoltaicas para la conversión de la energía lumínica a voltaje y así poderse usar para cargar una batería.

## **2.3. TIPOS DE CELDAS FOTOVOLTAICAS.**

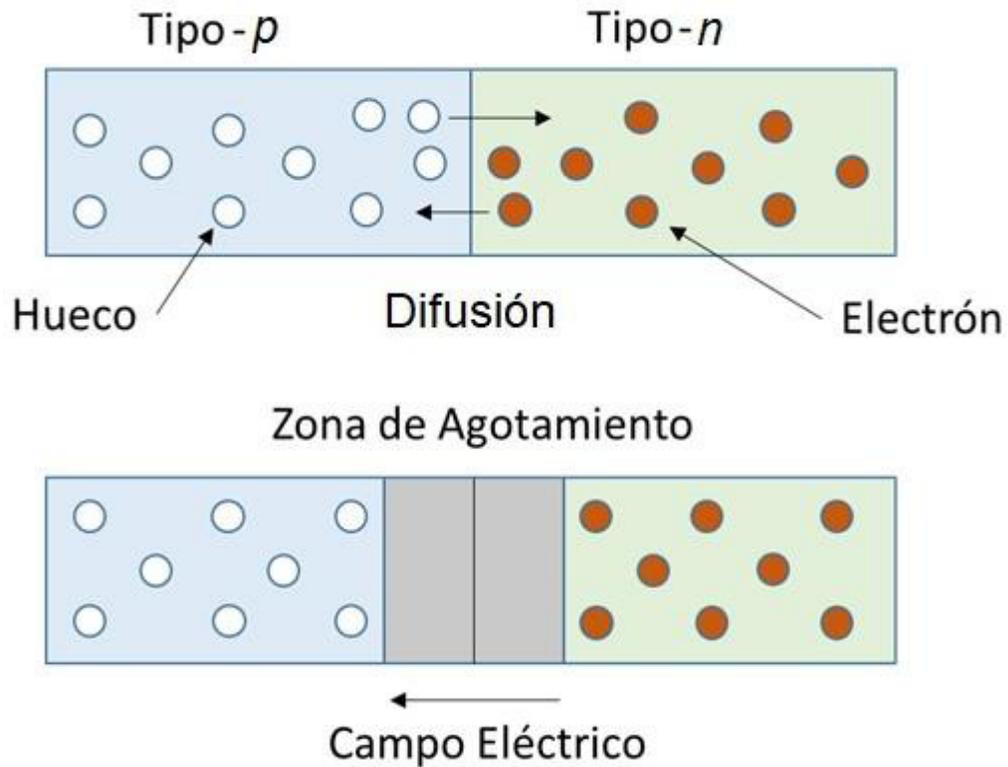
### **2.3.1. Celda solar de Silicio.**

Si bien hay una gran gama de celdas solares construidas con diferentes materiales, entre unas 80% y 90% de las más comúnmente producidas mundialmente, son las realizadas con silicio policristalino monocristalino o amorfo, desde alrededor de 1992.

Los dos tipos dominantes son las de silicio monocristalino y silicio policristalino, cada uno representando alrededor del 40%. El material monocristalino está hecho de silicio de alta pureza utilizando el proceso Czochralski, en el que un solo cristal se extrae lentamente de un crisol de silicio fundido. El silicio policristalino se compone de una multitud de diminutos cristales individuales. Y es mucho más simple de hacer, aunque al inicio también requiere silicio de alta pureza.

La estructura clave de la celda solar es una unión  $p-n$ . El material de silicio puro se contamina por la técnica del dopado con materiales trivalentes y pentavalentes para formar los materiales  $p$  y  $n$  respectivamente. En la unión se produce una zona de recombinación donde se tiene átomos neutros también denominada zona de agotamiento. En el material  $p$  los portadores mayoritarios son los huecos y los minoritarios son los electrones y en el material  $n$  los portadores mayoritarios son los electrones y los minoritarios son los huecos.

Al unirse los materiales  $p$  y  $n$  se produce un proceso natural de difusión. Los huecos en el material  $p$  se difunden hacia el material  $n$  y los electrones en el material  $n$  se difunden hacia el material  $p$ . Los huecos difundidos dejan en el material  $p$  iones negativos y los electrones difundidos dejan en el material  $n$  iones positivos.



**Figura 3** Recombinación de portadores de carga en una unión de dos semiconductores uno tipo  $n$  y otro tipo  $p$ .

Este proceso de difusión forma en el material  $p$  iones negativos y en el material  $n$  iones positivos que al paso del tiempo forman un campo eléctrico y por lo tanto una barrera de potencial lo cual frena la difusión como se muestra en la figura 3 [2] [9].

### 2.3.2. Celda solar de película delgada.

La fabricación de celdas solares de película delgada es mucho más fácil que hacerlas a partir de semiconductores sólidos porque pueden ser producidas por técnicas de deposición de vapor, por pulverización o en algunos casos, por impresión. La película es depositada sobre un sustrato que a menudo es de vidrio, pero también puede ser de plástico.

La naturaleza de la técnica de fabricación significa que se pueden hacer celdas de áreas más grandes que no son posibles con silicio cristalino. Este tipo de celdas también tiene ventajas económicas porque se deben interconectar menos celdas, lo que simplifica la producción de módulos. Además, es posible producir celdas solares de película delgada sobre materiales flexibles, incluidos los tejidos que pueden ser utilizado para la ropa.

Hay varios semiconductores de película delgada que se han desarrollado para celdas solares. El silicio amorfo es una forma de silicio sin ninguna estructura cristalina que se produce utilizando técnicas de película delgada. La principal alternativa es Telurio de Cadmio (CdTe). Este silicio amorfo también es más barato que el silicio cristalino, y las células solares hechas de este se pueden depositar en una variedad de sustratos.

La fabricación de una celda solar de CdTe de película delgada típica comienza con un sustrato de vidrio perfectamente limpio. Sobre esto se rocía primero una capa transparente de óxido conductor (TCO). La capa conductora puede estar hecha de una variedad de materiales, incluyendo óxido de zinc, óxido de indio, óxido de indio y estaño (ITO) y óxido de estroncio. La capa conductora permite que la luz que atraviesa el vidrio llegue al semiconductor, mientras que también proporciona un contacto superior para extraer energía de la celda Figura 1b.

Encima de la capa conductora, la siguiente capa a depositarse es uno de sulfuro de cadmio tipo n que forma la primera parte de la unión *p-n*. Esto generalmente se conoce como la capa de ventana, porque la luz tiene que pasar a través de él para llegar al semiconductor de abajo, luego se agrega una capa de CdTe tipo p, para después se deposita un contacto posterior conductor sobre la capa de CdTe. Esta suele ser una capa metálica como el níquel aluminio. Finalmente, la celda solar de área grande tiene un respaldo aplicado para crear un módulo. Una sección transversal de una celda solar de CdTe es se muestra en la figura 4.



**Figura 4** Esquema de distribución de capas en una celda solar de película delgada.

Aunque habrá variaciones en las técnicas para depositar varias capas, y en la composición de las propias capas, el proceso para fabricar celdas de película delgada a partir de cualquier semiconductor adecuado implicará etapas similares. Mientras tanto, la investigación continúa para optimizar las distintas capas, en particular la capa de la ventana, con el fin de lograr la mayor eficiencia posible. [2] [9]

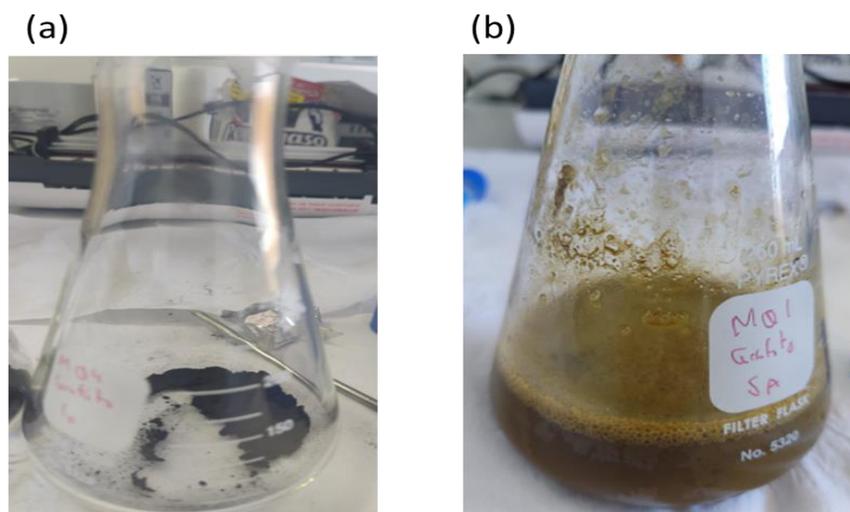
### **2.3.3. Celda Solar Multicapa.**

Una forma de mejorar la eficiencia de la producción de electricidad basada en las celdas solares es usar múltiples capas de celdas solares, Para que esto sea efectivo, las diferentes celdas solares deben operar en conjunto, estos dispositivos son a veces llamadas celdas en tándem, los componentes de una celda en tándem son normalmente construidos uno encima del siguiente. Como ya se señaló en el funcionamiento de la celda fotovoltaica, la absorción de luz por una celda solar se controla por la banda prohibida del semiconductor del que está hecho, cada semiconductor absorbe fotones de luz con energía mayor que su banda prohibida, pero permanece transparente a los fotones con energía inferior que su ancho de banda. Estos simplemente pasan a través de la célula [2] [9].

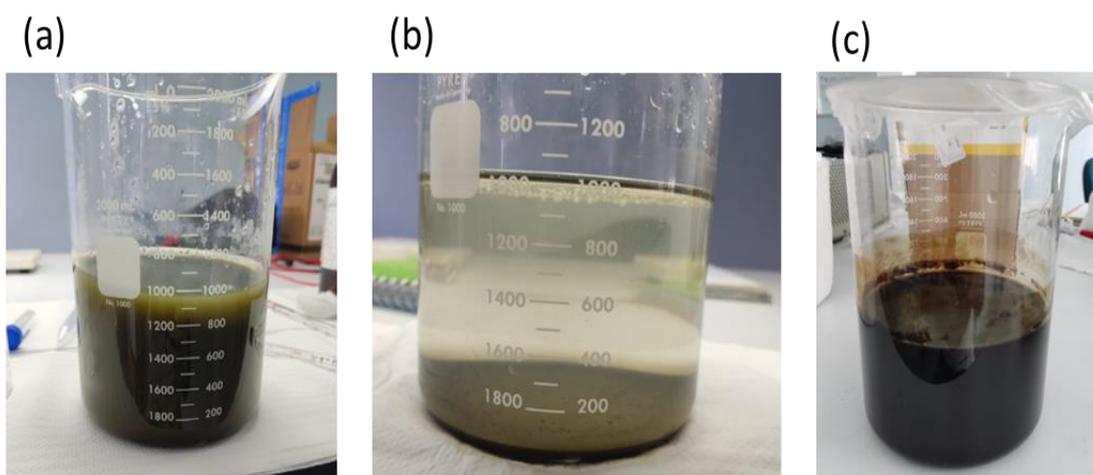
## CAPÍTULO 3. FABRICACIÓN DE LA CELDA FOTOVOLTAICA.

### 3.1. FABRICACIÓN DEL OG.

La síntesis del OG se realizó utilizando la técnica de método de Hummers [10], el cual se logró aplicando una nueva modificación al método de síntesis dentro del laboratorio de materiales de DICIS sugerida por la asesora de este trabajo y mostrado en las figuras 5 y 6.



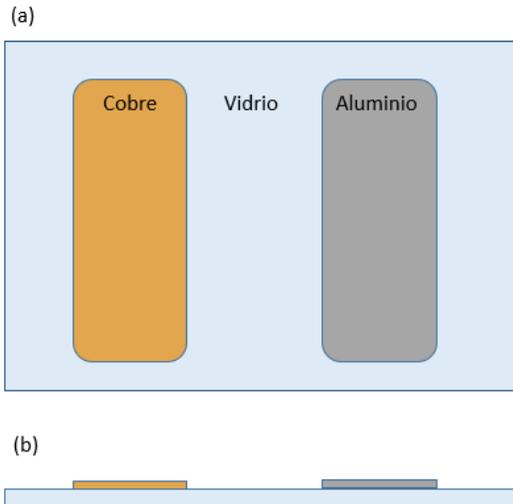
**Figura 5** Elaboración de OG a partir de grafito en polvo (a) grafito en polvo, (b) Ataque químico sobre el grafito.



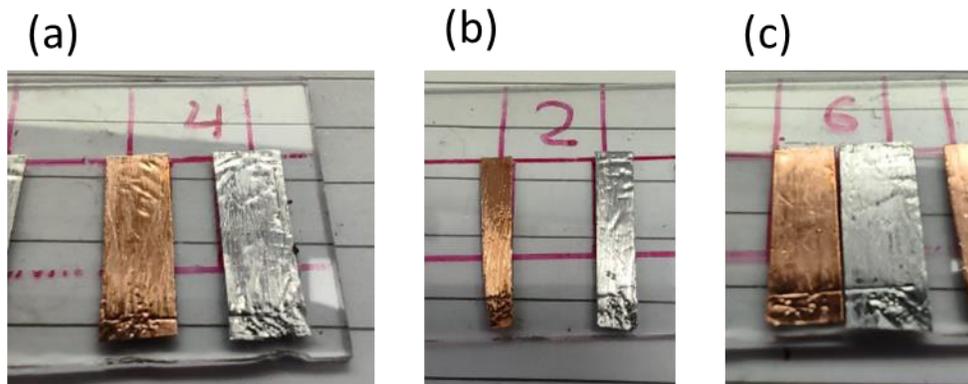
**Figura 6** Lavado del OG (a) primer lavado del OG, (b) Ultimo lavado del OG, (c) Muestra final después de centrifugar.

### 3.2. PREPARACIÓN DE LOS ELECTRODOS PARA LA CELDA FOTOVOLTAICA.

Para hacer los electrodos se usó cinta de cobre de 2.5 mm, al igual que cinta de aluminio de 2.5mm, ambas cintas con un espesor de 0.5 mm la cual se puso sobre vidrio con una separación de 4 mm entre cada una, como se aprecia en las figuras 7 y 8.

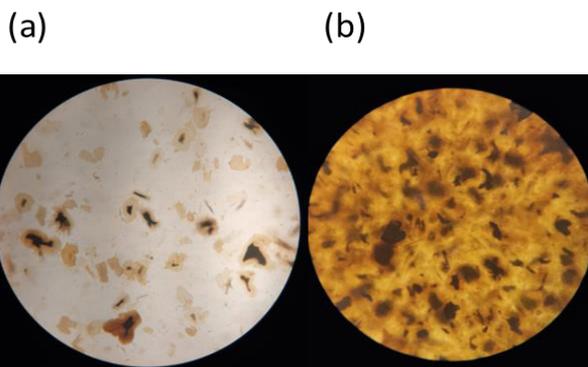


**Figura 7** Esquema de los electrodos para la celda fotovoltaica con cintas de cobre y aluminio sobre vidrio como aislante, (a) Vista superior, (b) Vista Frontal.

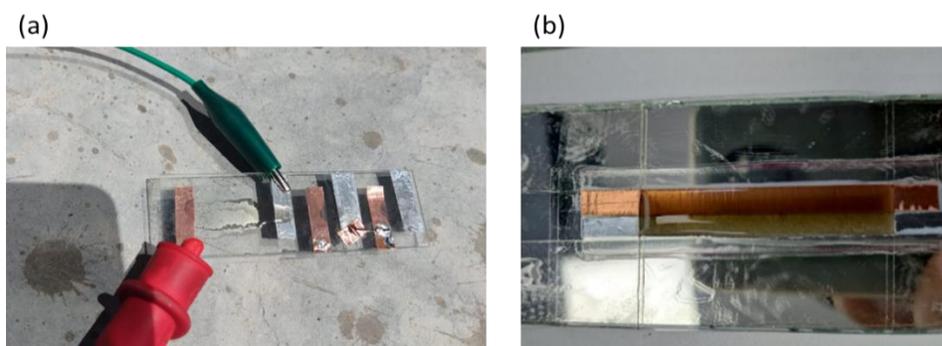


**Figura 8** (a), (b) y (c) Electrodos de la celda fotovoltaica de cintas de aluminio y cobre de diferentes espesores y distancias montadas sobre vidrio.

Posteriormente se agregan una o dos gotas de OG de diferentes concentraciones como se muestra en la figura 9, entre los dos electrodos cuidando que no se derrame sobre ellos, como se muestra en la figura 10.



**Figura 9** Muestras de OG vistas con el microscopio a 40x, (a) OG de baja concentración, (b) OG de alta concentración.



**Figura 10** Celdas Fotovoltaicas de OG sobre electrodos de cintas metálicas de cobre y aluminio, (a) Celda Fotovoltaica de OG con baja concentración. (b) Celda Fotovoltaica de OG con alta concentración.

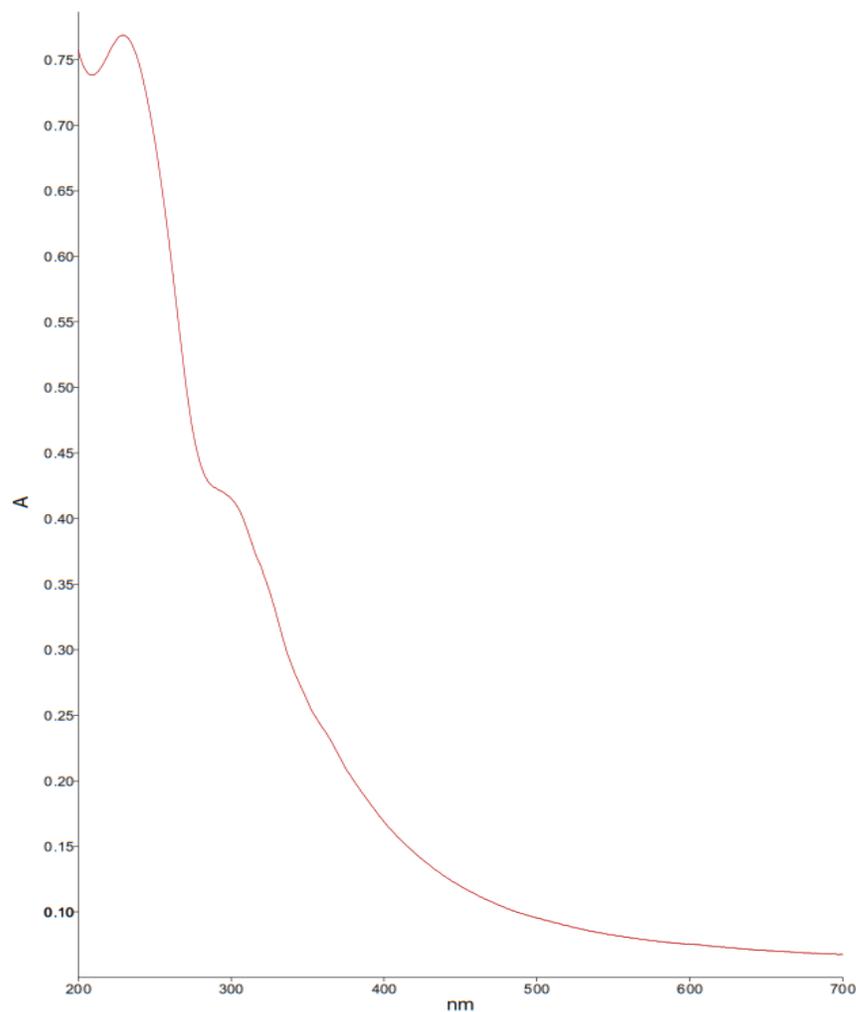
### 3.3. TECNICAS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICAS.

#### 3.3.1. ESPECTROSCOPIA UV-VISIBLE.

Esta técnica se basa en el proceso de absorción de las longitudes de onda de entre 200 nm a 700 nm sobre el material, la cual al ser absorbida causa que un electrón pase a un estado excitado. La excitación de los electrones al absorber la radiación de esta frecuencia son los electrones de enlace de las moléculas. Por lo que con los picos de absorción se puede obtener una correlación con los distintos tipos de enlaces presentes en el compuesto, la espectroscopia Ultravioleta Visible (UV-Vis) puede identificar los grupos funcionales presentes en la molécula.

Con esta técnica se obtiene el grado de reducción del material, en la figura 11 se muestra la banda de absorción en aproximadamente 225 nm en el espectro UV-Vis, que corresponden a transiciones  $\pi$ - $\pi^*$  de los enlaces  $sp^2$  C=C [5] [10]. Para esta técnica se usa un equipo Perkin Elmer Lambda modelo 650 UV/VIS, en cristales de

cuarzo en solución acuosa, en absorbancia en un rango de 400 a 700 nm el espectro Figura 11.

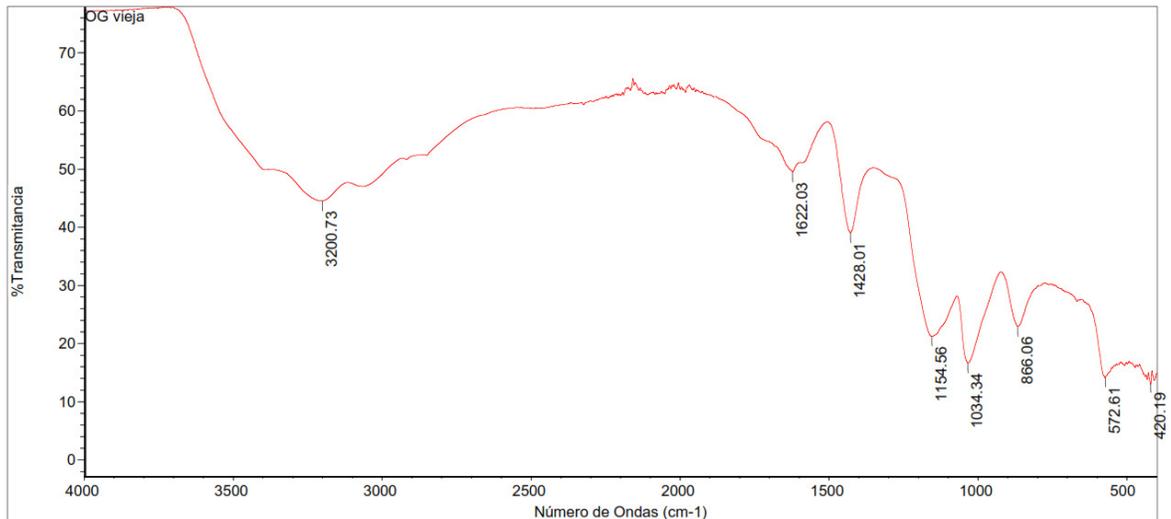


**Figura 11** Espectro UV Vis del OG obtenido equipo marca Perkin Elmer Lambda modelo 650 UV/VIS

### 3.3.2. CARACTERIZACIÓN POR INFRARROJOS POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).

La técnica IR identifica los grupos funcionales presentes en el OG, los espectros de la figura 12, en los cuales se muestran bandas de grupos funcionales en el  $3200\text{ cm}^{-1}$  que pertenecen a los grupos carboxílicos, carbonilo y agua ( $C - OH$ ,  $COOH$ ,  $H_2O$ ), en el  $1622\text{ cm}^{-1}$  se pueden apreciar bandas asociadas a los grupos funcionales de los extremos de las láminas carbonilo y carboxilo ( $C = O$ ), junto con enlaces armónicos ( $C = C$ ) de la estructura laminar, en  $1428\text{ cm}^{-1}$  corresponde a

los grupos éter ( $C - O - C$ ) junto con los grupos  $1034\text{ cm}^{-1}$  y  $572\text{ cm}^{-1}$ , por último en el grupo funcional tenemos hidróxido ( $C - OH$ ), los cuales se ubican en el plano basal del OG [5] [10] [11]. Para realizar esta caracterización se usó el equipo NICOLET iS50 FT-IR



**Figura 12** Espectro IR del OG.

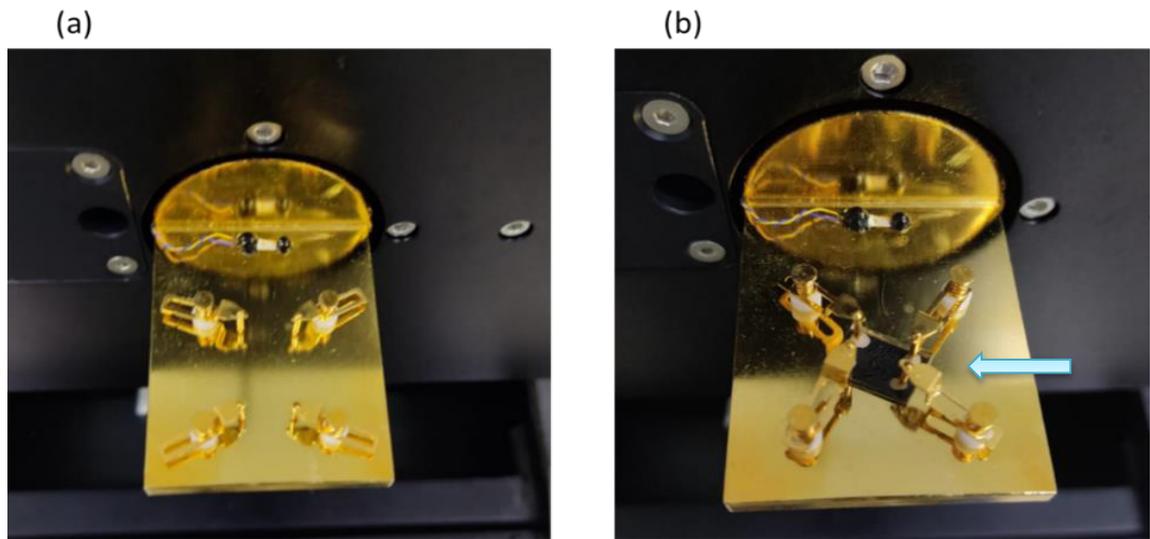
### 3.3.3. OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES ELECTRICAS POR EFECTO HALL.

El efecto Hall es un principio físico [12] en el que se genera un campo eléctrico a través de un conductor por el que circula una corriente eléctrica en presencia de un campo magnético perpendicular al flujo de corriente. Con este principio se puede determinar el tipo de material semiconductor tipo  $n$  o tipo  $p$  o ambos.

Para determinar el tipo de material eléctrico que es el OG se utilizó el equipo marca Ecopia modelo HSM-5000 laboratorio de Ciencia de Materiales DICIS.

Una vez que se incluyeron los contactos en la celda con soldadura fría de plata, entonces se colocó en la muestra una película de OG como se muestra en la figura 13.

Se usó una película de OG, con dimensiones de 3 x3 mm con 25 micras de espesor, que a simple vista su coloración es una combinación de colores café con negro, figura 14.



**Figura 13** (a) Base para soporte de prueba de 4 puntos. (b) Papel de OG sobre el soporte de 4 puntas.

Para determinar las propiedades eléctricas del OG se utilizó una película de 25 micras y se montó en el equipo como se muestra en la figura 13, se cargó con nitrógeno líquido para alcanzar la temperatura de 160°K a 300°K, y se corrió la prueba.

### 3.3.3.1. COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO.

La caracterización eléctrica del material se realizó con el equipo Ecopia modelo HSM-5000. Para investigar las propiedades eléctricas del material elaborado, se realizaron las mediciones de: resistencia, movilidad, resistividad, conductividad, coeficiente Hall todas contra temperatura. También se realizaron mediciones a la película de OG de voltaje contra temperatura y de resistencia contra corriente. El resultado se muestra a continuación.

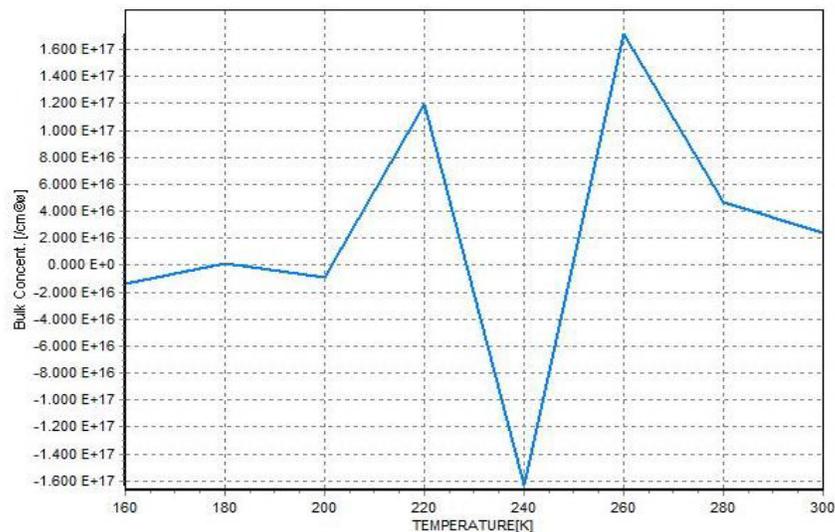
Electrical Parameters			
Bulk Concentration=	-8.9565E+13 [1/cm <sup>3</sup> ]	Mobility=	1.7221E+00 [cm <sup>2</sup> /Vs]
Sheet Concentration=	-2.2391E+11 [1/cm <sup>2</sup> ]	Average Hall Coefficient=	-6.9694E+04 [cm <sup>2</sup> /C]
Sheet Resistance=	1.6188E+07 [Ω/□]	A-C Hall Coefficient=	-1.5063E+05 [cm <sup>2</sup> /C]
Resistivity=	4.0469E+04 [Ω cm]	B-D Hall Coefficient=	1.1241E+04 [cm <sup>2</sup> /C]
Conductivity=	2.4710E-05 [1/Ω cm]	Ratio of Vertical/Horizontal=	2.0493E-01
Magneto-Resistance=	2.5085E+05 [Ω]		

**Figura 14** Resultados obtenidos con el equipo Ecopia HSM-5000.

### 3.3.3.2. CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA DE PORTADORES DE CARGA EN LA PELÍCULA DE OG.

Esta medición nos proporciona la cantidad de portadores que hay en el material que son huecos y/o electrones, sobre todo el volumen del material que para la película de OG fue de:  $-8.9565 \times 10^{13} \left[ \frac{1}{\text{cm}^3} \right]$  lo que con el signo negativo nos indica que en su mayoría los portadores de carga son electrones.

### 3.3.3.3. GRAFICA DE CONCENTRACIÓN EN BULTO DE PORTADORES DE CARGA DEL OG CONTRA TEMPERATURA.



**Figura 15** Grafica de concentración en bulto de portadores de carga contra temperatura del OG, en el rango de temperaturas de 160°K a 300°K.

La gráfica de la fig. 15 muestra un aumento de los portadores de carga positivos (huecos) hasta  $1.2 \times 10^{17}$  huecos/cm<sup>3</sup> y 220°K, entre los 220°K y los 240°K se produce una fuerte disminución de los portadores de carga (huecos y electrones), se observa que entre los 240°K y 280°K hay un aumento de los portadores de carga hasta los 260°K, de los 260°K a 280°K la concentración de portadores de carga positivos los cuales se encuentran en exceso inician una reducción hasta los 280°K, manteniéndose casi constantes hasta los 300°K

### 3.3.3.4. CONCENTRACIÓN DE PORTADORES DE CARGA SOBRE LA SUPERFICIE EN LA PELÍCULA DE OG.

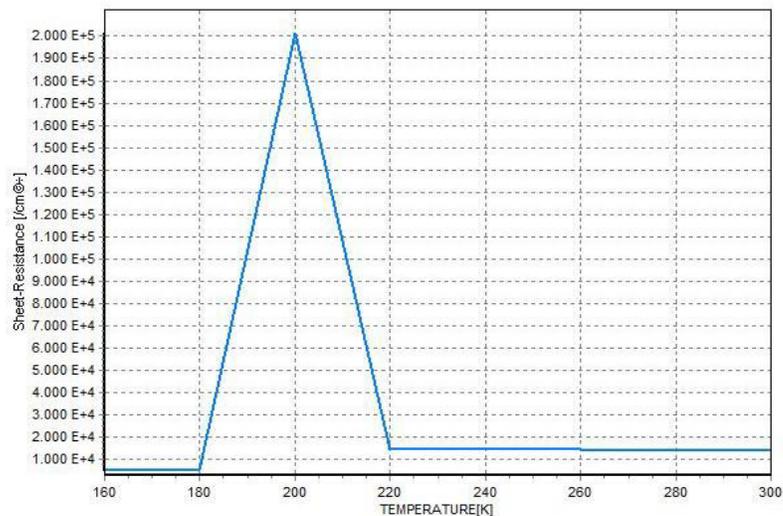
Esta medición se utiliza para investigar la cantidad de portadores de carga y el tipo de portador que es hueco y/o electrón solo sobre la superficie del material, para el

OG fue de:  $-2.2391 \times 10^{11} \left[ \frac{1}{cm^2} \right]$  lo que nos indica que son electrones los portadores de carga en su superficie.

### 3.3.3.5. RESISTENCIA DE LA PELÍCULA DE OG SOBRE LA SUPERFICIE.

La unidad de resistencia eléctrica sobre la superficie, para el papel de OG es de  $1.6188 \times 10^7 [\Omega]$  lo que es una orden de magnitud mayor que la del Grafeno químicamente reducido de un solo átomo de espesor ( $5 \times 10^6 [\Omega]$ ), pero muy alta comparada con el papel de Grafeno químicamente reducido de 5 y 10  $\mu m$  (13.89/6.35  $[\Omega]$ ). [15]

### 3.3.3.6. CURVA DE RESISTENCIA ELÉCTRICA SOBRE LA SUPERFICIE DE LA LAMINA DE OG CONTRA TEMPERATURA.



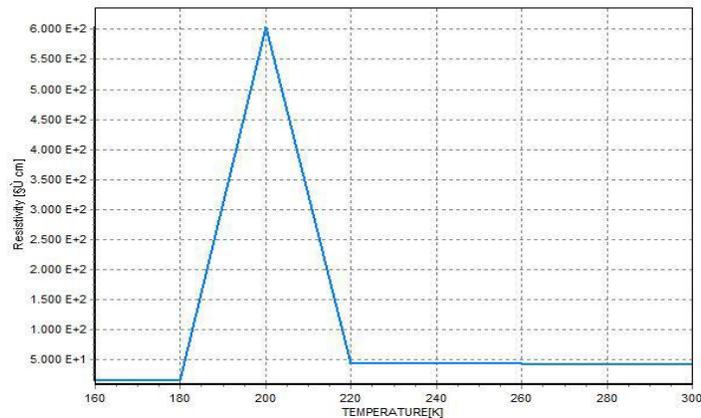
**Figura 16** Gráfica de resistencia eléctrica sobre la superficie de la lámina de OG en el rango de temperaturas de 160°K a 300°K.

En la figura 16 se muestra la gráfica de resistencia eléctrica de la lámina de OG contra temperatura, y se aprecia un aumento de la resistencia en forma lineal hasta  $2 \times 10^5 \Omega cm$  y  $200^\circ K$ . En los  $220^\circ K$  se da el cambio y empieza a descender la resistencia eléctrica hasta  $1.5 \times 10^4 \Omega cm$  y  $300^\circ K$  manteniéndose constante hasta los  $300^\circ K$ .

### 3.3.3.7. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA PELÍCULA DE OG.

Resistividad es la oposición del paso de la corriente eléctrica a través del material, para el OG  $\rho = 4.0469 \times 10^4 [\Omega \cdot cm]$  se aprecia una resistividad muy similar a la del silicio ( $2.5 \times 10^5 [\Omega \cdot cm]$ ), que está en el rango de los semiconductores [16].

### 3.3.3.8. CURVA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN BULTO DEL OG CONTRA TEMPERATURA.



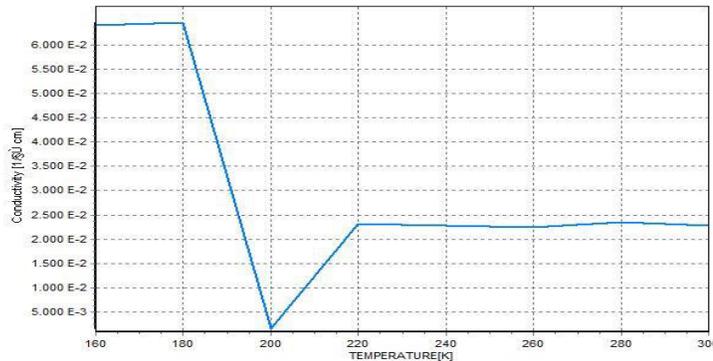
**Figura 17** Gráfica de resistividad del OG en el rango de temperaturas de 160°K a 300°K.

En la figura 17 se muestra la resistividad contra temperatura en bulto para el OG, la cual observamos que a 160°K, está por debajo de ( $5 \times 10^1 [\Omega \cdot cm]$ ), al aumentar hasta 180°K la temperatura, se observa el aumento de la resistencia eléctrica, teniendo un máximo en 200°K y ( $6 \times 10^2 [\Omega \cdot cm]$ ), en este máximo se inicia la disminución hasta aproximadamente ( $5 \times 10^1 [\Omega \cdot cm]$ ) y 220°K manteniéndose un comportamiento asintótico desde 220°K hasta los 300°K.

### 3.3.3.9. CONDUCTIVIDAD DE LA PELÍCULA DE OG.

Conductividad es la capacidad que tiene un material para permitir el paso de la corriente a través de él y es el inverso de la resistividad la cual nos indica que el OG  $\sigma = 2.4710 \times 10^{-5} \left[ \frac{1}{\Omega cm} \right]$  está en el rango de los semiconductores [16].

### 3.3.3.10. CURVA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL OG CONTRA TEMPERATURA.



**Figura 18** Grafica de conductividad del OG en el rango de temperaturas de 160°K a 300°K.

La fig. 18 muestra que a 180°K la conductividad eléctrica al aumentar la temperatura hasta 200°K baja, de esta temperatura hasta los 220°K tenemos al vuelve aumentar la conductividad eléctrica hasta  $2.3 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}^{-1}$  donde se mantiene en forma asintótica hasta los 300°K.

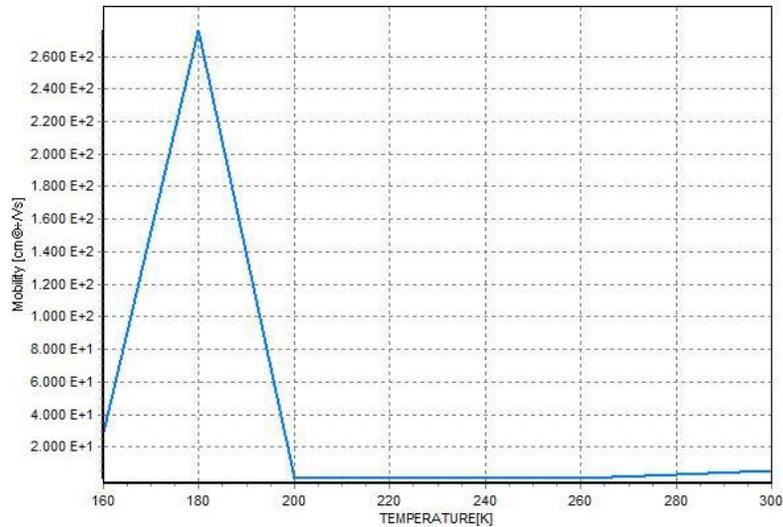
### 3.3.3.11. MAGNETO-RESISTENCIA DE LA PELÍCULA DE OG.

Es la oposición que tiene en bulto un material al flujo del campo magnético el valor encontrado para el OG =  $2.5085 \times 10^5 [\Omega]$  para este valor de magneto resistencia, se le considera como un aislante magnético.

### 3.3.3.12. MOVILIDAD EN LA PELÍCULA DE OG.

En el OG la movilidad obtenida es baja si se compara con otros semiconductores como el silicio cristalino sin embargo es mayor que el silicio amorfo [16],  $\mu = 1.7221 \times 10^0 \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \right]$ .

### 3.3.3.13. CURVA MOVILIDAD EN EL OG CONTRA TEMPERATURA.



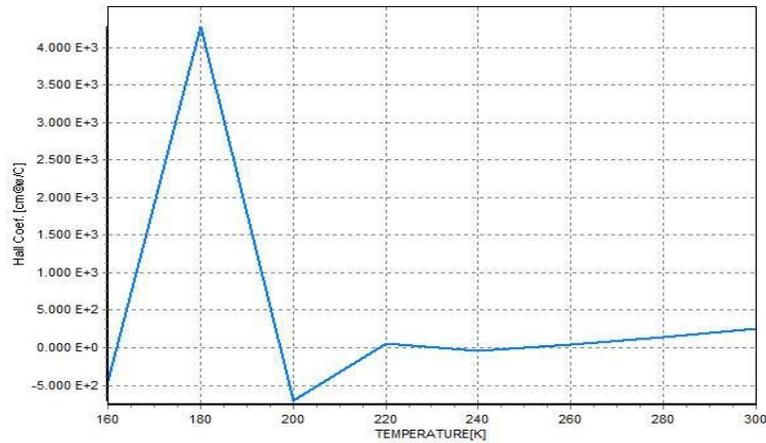
**Figura 19** Gráfica de movilidad del OG en el rango de temperaturas de 160°K a 300°K.

La gráfica de la fig. 19 se confirma el comportamiento de los portadores de carga huecos y electrones, la aportación de ellos a la conductividad eléctrica ya que los cambios de portadores de carga y temperaturas coinciden con la gráfica de la figura 18.

### 3.3.3.14. COEFICIENTE HALL PROMEDIO EN LA PELÍCULA DE OG

La medida del Coeficiente de Hall en promedio permite determinar el tipo de semiconductor N o P los valores encontrados del Coeficiente de Hall indica que el material es de tipo P  $R_h$  y tipo N  $R_h$ .

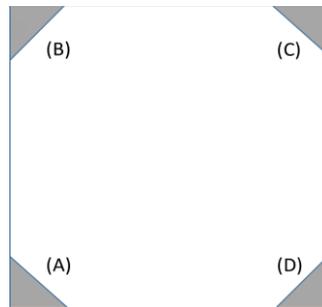
### 3.3.3.15. CURVA COEFICIENTE HALL DEL OG CONTRA TEMPERATURA



**Figura 20** Gráfica del coeficiente de Hall del OG en el rango de temperaturas de 160°K a 300°K grados kelvin.

En la figura 20 se observa que el OG cambia en el tipo de semiconductor pasando de tipo *n* a tipo *p* conforme aumenta la temperatura.

En la figura 21 se muestra la distribución de los puntos A-B-C-D para realizar las mediciones de Efecto Hall en el papel de OG colocado sobre los soportes, mostrados en la figura 13b del equipo.



**Figura 21** Imagen esquemática de la cinta de OG para la conexión en 4 puntos del equipo Ecopia modelo HSM-5000.

### 3.3.3.16. COEFICIENTE HALL A-C = $-1.5063 \times 10^5 \left[ \frac{cm^3}{C} \right]$ .

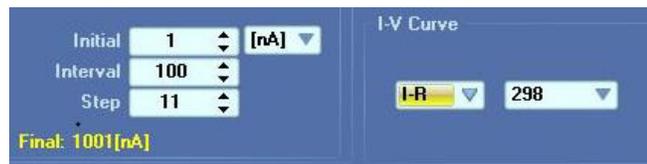
En este coeficiente Hall que va del punto A al punto C Fig. 21 se aprecia que los portadores de carga mayoritarios son los electrones.

### 3.3.3.17. COEFICIENTE HALL B-D = $1.1241 \times 10^4 \left[ \frac{cm^3}{C} \right]$ .

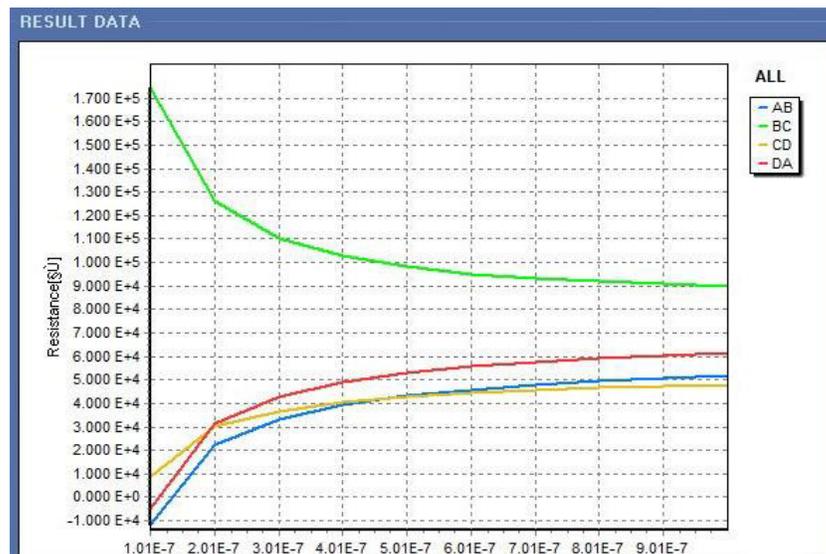
En este coeficiente Hall que va del punto B al punto D Fig. 21 se aprecia que los portadores de carga mayoritarios son huecos.

Los portadores mayoritarios para los puntos B al punto D son huecos, casi con la misma magnitud que los portadores del punto A al punto C, que son electrones.

### 3.3.4. CURVAS I-R DE PAPEL DE OG.



**Figura 22** Parámetros para la medición de corriente contra resistencia eléctrica con el equipo Ecopia modelo HSM-5000.

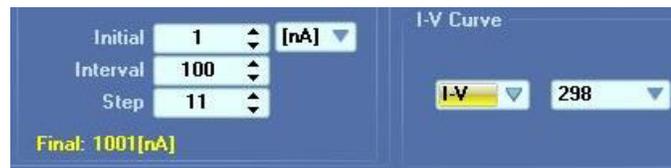


**Figura 23** Curvas resistencia eléctrica contra corriente eléctrica, del papel de OG.

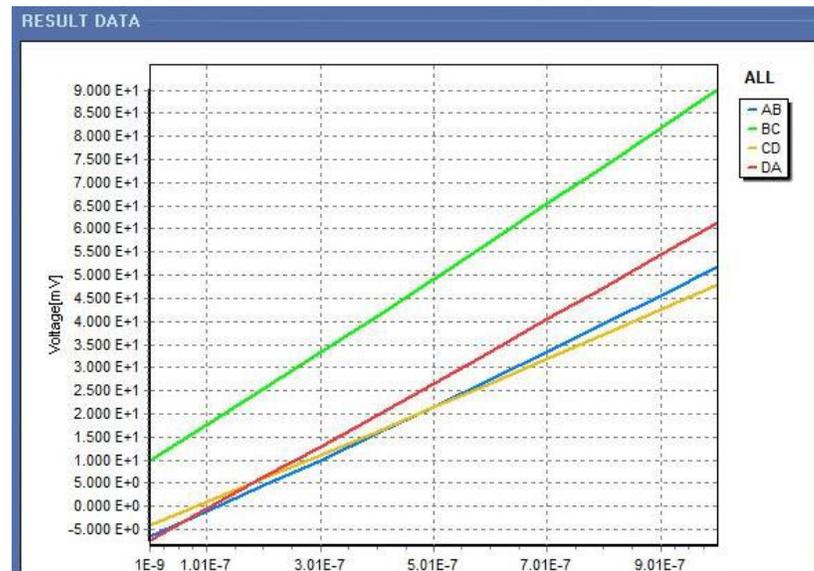
La figura 23, muestra 4 gráficas correspondientes a las mediciones entre los puntos A-B, B-C, CD y DA (figura 21). En la gráfica B-C del papel de OG su resistencia decrece conforme aumenta el flujo de corriente llegando casi a ser constante. En los puntos de prueba C-D se ve el efecto contrario aumentado la resistencia conforme aumenta el flujo de corriente llegando casi a ser constante, para los puntos

de prueba A-B y D-A la resistencia empieza con valores resistivos negativos después aumenta a valores positivos pasando por resistividad 0, y manteniendo casi un valor constante similar a la curva C-D.

### 3.3.5. CURVAS I-V DE PAPEL DE OG.



**Figura 24** Parámetros de medición para obtener curvas de Voltaje contra Corriente con el equipo Ecopia modelo HSM-5000.

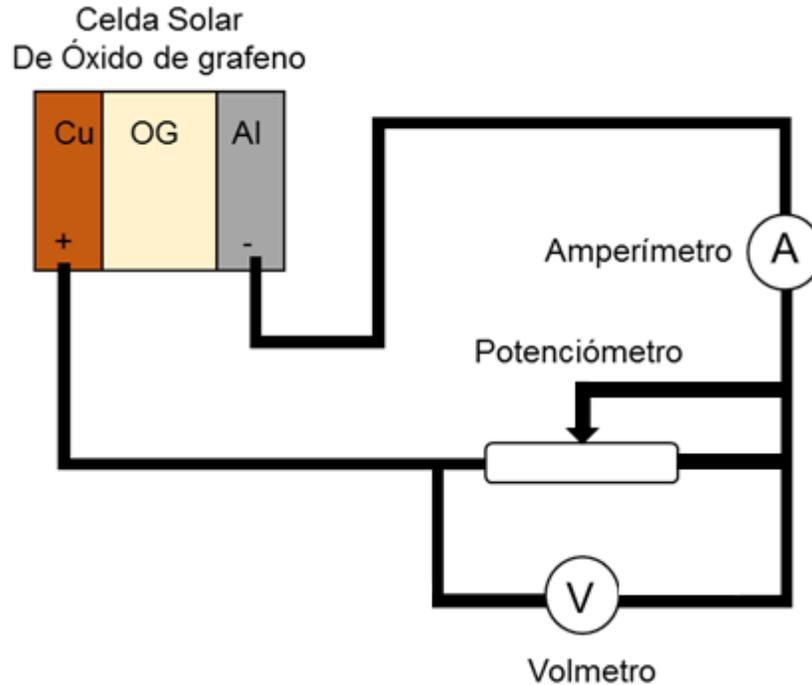


**Figura 25** Gráfica de V-I de la prueba de 4 puntos del papel de OG.

En la figura 25 observamos que las 4 pruebas tienen un comportamiento lineal lo que indica que su relación obedece a la Ley de Ohm. En los puntos B-C, está en cuadrante I que es generador de energía eléctrica positiva y el cuadrante II la energía es absorbida, los puntos A-B, D-A y CD pasan por el cuadrante I y III que son generadores de energía eléctrica.

## CAPITULO 4. MEDICIÓN ELÉCTRICA DE LA CELDA FOTOVOLTAICA.

### 4.1. CIRCUITO PARA MEDIR POTENCIA DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA.



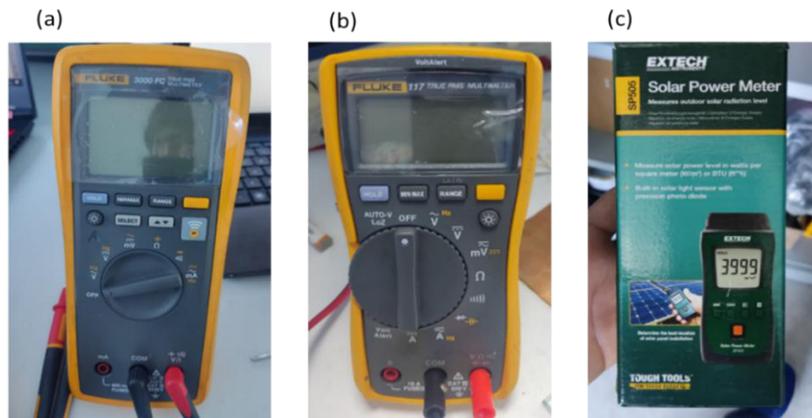
**Figura 26** Circuito utilizado para medir la potencia eléctrica de celda fotovoltaica de OG.

El circuito de la figura 26 fue utilizado para medir la capacidad de entregar potencia de la celda utilizando una resistencia variable (reóstato) de  $50\text{ k}\Omega$  para simular el consumo de potencia en un circuito como carga utilizando para las pruebas físicas: una tableta de experimentos, jumpers, caimanes, la celda de OG, un voltímetro y un amperímetro.

A continuación, se mostrará el equipo utilizado y dos gráficas en las cuales se relaciona el voltaje y la corriente medidas al variar el reóstato en paralelo con la celda de OG y posteriormente se muestra la eficiencia de esta celda.

### 4.2. APARATOS UTILIZADOS PARA REALIZAR LA MEDICIÓN.

Para la caracterización de la celda fotovoltaica se utilizaron 3 medidores, un voltímetro marca Fluke modelo 3000FC, un amperímetro marca Fluke modelo 117 y un medidor marca Extech modelo sp505 para la medición intensidad lumínica.



**Figura 27** Equipos para medición de la potencia de celda de OG (a) Fluke 3000FC, (b) Fluke 117, (c) EXTECH Solar Power Meter.

#### 4.3. MEDICIÓN DE POTENCIA EN LUZ DIFUSA.



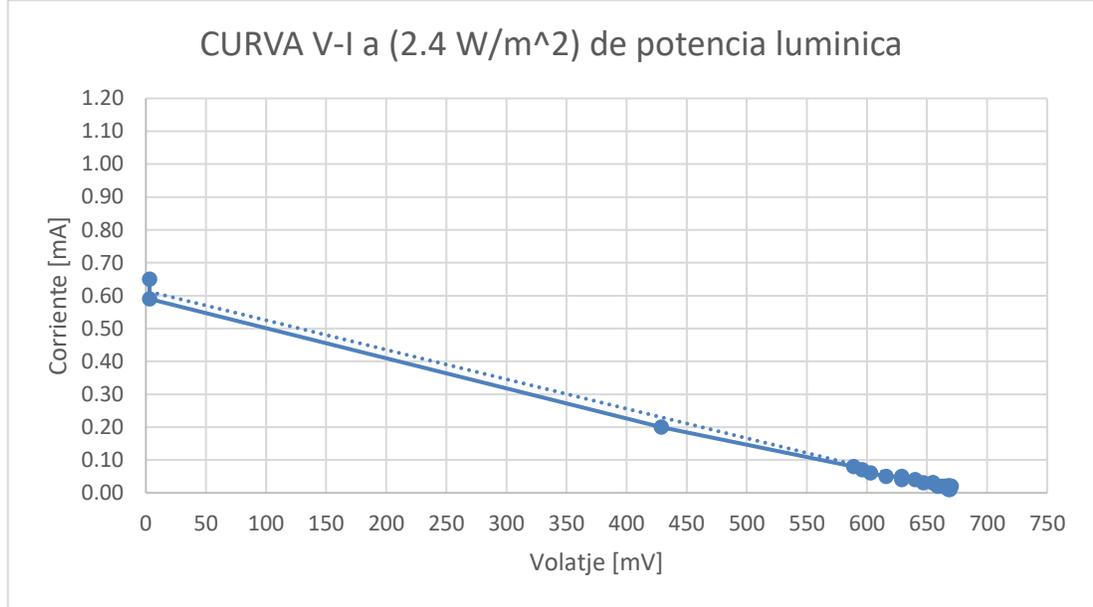
**Figura 28** Instrumentación para medir la potencia en luz difusa.

La medición de potencia se realizó iluminando sobre la celda fotovoltaica con luz difusa (luz incidiendo sobre la celda fotovoltaica desde múltiples ángulos, proporcionando una iluminación más homogénea y haciendo que las sombras sean menos nítidas) de 3 lámparas de leds colocadas en el techo del laboratorio de materiales y se construyó el circuito de la figura 26.

La potencia lumínica medida con el Solar Power Meter (no mostrado en la figura 28) con su detector paralelo y junto a la celda fue de  $2.4 \frac{W}{m^2}$ .

**Tabla 1** Celda Solar de OG con luz difusa.

CURVA V-I (2.4 W/m <sup>2</sup> )			
Medición	Voltaje [mV]	Corriente [mA]	Resistencia (K $\Omega$ )
1	669	0.01	47.996
2	668	0.01	47.959
3	670	0.02	47.065
4	669	0.02	46.727
5	668	0.02	46.093
6	669	0.02	44.397
7	668	0.02	41.380
8	668	0.02	40.450
9	670	0.02	39.730
10	669	0.02	39.000
11	669	0.02	38.320
12	668	0.02	37.180
13	669	0.02	36.570
14	667	0.02	35.340
15	669	0.02	34.500
16	668	0.02	33.340
17	668	0.02	32.780
18	666	0.02	31.980
19	666	0.02	31.380
20	665	0.02	31.160
21	663	0.02	30.680
22	659	0.02	28.160
23	655	0.03	22.860
24	650	0.03	20.250
25	647	0.03	19.090
26	640	0.04	17.560
27	629	0.04	15.450
28	629	0.05	14.060
29	616	0.05	13.210
30	603	0.06	12.160
31	596	0.07	11.680
32	589	0.08	10.740
33	429	0.20	9.510
34	3	0.59	1.030
35	3	0.65	0.930



**Figura 29** Grafica de I-V con luz difusa iluminando la celda y con en una resistencia variable como carga

#### 4.4. MEDICIÓN DE POTENCIA EN LUZ SOLAR DIRECTA.

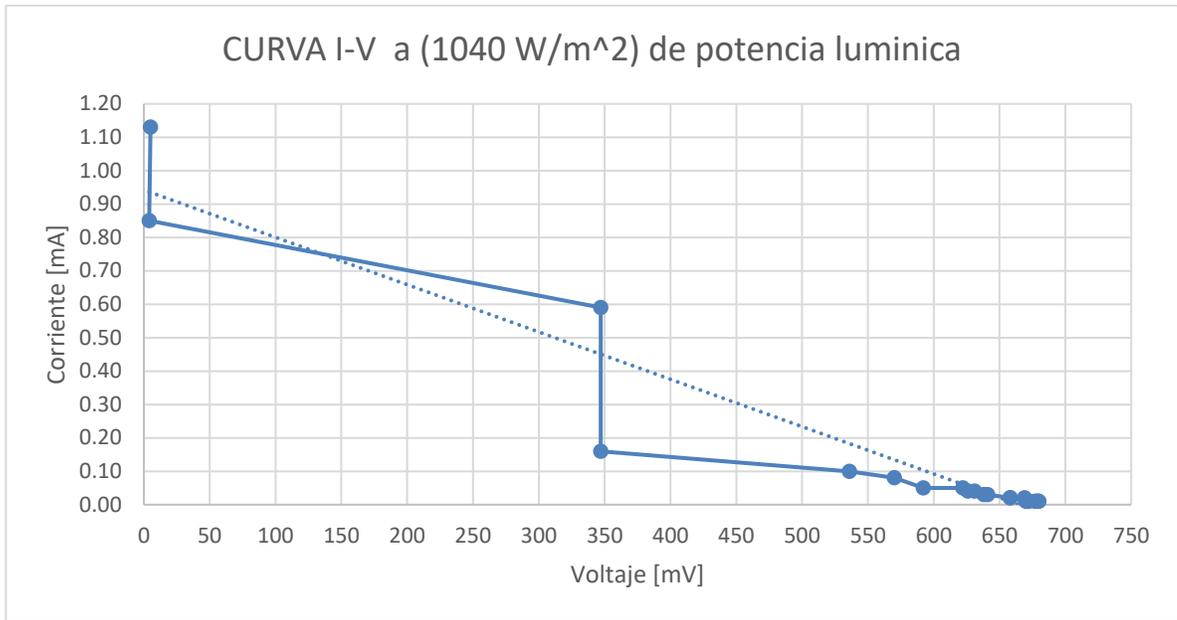
La medición de potencia con luz solar directa de la celda fotovoltaica se realizó también con el circuito de la figura 30 y con una medición de potencia solar (no mostrado en la figura 30) de  $1040 \frac{W}{m^2}$  medida con el Solar Power Meter con su detector paralelo y junto a la celda.



**Figura 30** Medición de la celda de OG con luz solar Directa.

**Tabla 2** Celda solar de OG en luz solar directa.

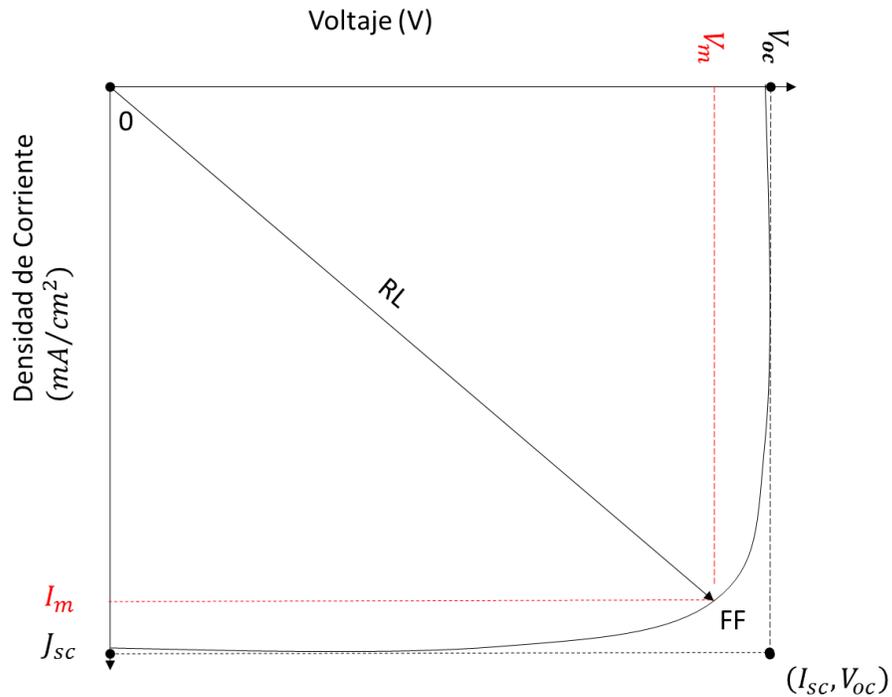
CURVA V-I (1040 W/m <sup>2</sup> )			
Medición	Voltaje [mV]	Corriente [mA]	Resistencia (K $\Omega$ )
1	677	0.01	46.997
2	679	0.01	46.940
3	680	0.01	45.760
4	671	0.01	42.270
5	671	0.01	41.348
6	672	0.01	40.686
7	679	0.01	39.950
8	671	0.01	39.290
9	670	0.01	38.050
10	672	0.01	37.140
11	669	0.02	35.130
12	658	0.02	32.040
13	658	0.02	26.350
14	641	0.03	21.050
15	638	0.03	18.740
16	626	0.04	16.160
17	631	0.04	15.250
18	622	0.05	12.870
19	592	0.05	11.750
20	570	0.08	9.820
21	536	0.10	8.750
22	347	0.16	9.040
23	347	0.59	5.130
24	4	0.85	0.370
25	5	1.13	0.420



**Figura 31** Gráfica de I-V con luz directa solar iluminando la celda y con en una resistencia variable como carga.

#### 4.5. CALCULO DE LA EFICIENCIA DE LA CELDA FOTOVOLTAICA.

Para medir la potencia de la celda fotovoltaica se obtuvo la curva  $I(V)$ , mediante la carga en la resistencia eléctrica  $R_L$  como se muestra en la figura 32, cuyo valor debe ser tal que el dispositivo estará polarizado en el punto de potencia máximo  $I_m, V_m$  como se muestra en la figura 32. [13].



**Figura 32** Grafica I (V) de una celda fotovoltaica para calcular su potencia.

La eficiencia de la conversión de energía  $\eta$ , de la celda solar está definida como [13]:

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot (FF)}{P_{in}} \quad (1)$$

Donde  $I_{sc}$  es la densidad de corriente en corto circuito,  $V_{oc}$  es la tensión de circuito abierto,  $P_{in}$  es la potencia incidente y  $(FF)$  es el factor de llenado o Fill Factor y está definido por la relación [13]:

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (2)$$

La conversión de energía está limitada por factores internos y pérdidas externas, estos últimos incluyen reflexión, resistencias en serie, extracción incompleta de los portadores foto generadores y los no radiativos, recombinación de portadores de carga [13].

#### 4.6. RESULTADOS.

En el cálculo de la eficiencia de la celda solar con luz difusa, se usó un potenciómetro de  $50K\Omega$  como se muestra en la figura 26, de la medición se obtuvieron los siguientes datos:

$$\begin{aligned}I_{sc} &= 0.65mA \\V_{oc} &= 670mV \\P_{in} &= 2.4 W/m^2\end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación (1):

$$\eta = \frac{0.65mA \cdot 670mV \cdot (FF)}{2.4 W/m^2} \quad (3)$$

Para el factor de llenado se sustituyeron los valores  $I_m$ ,  $V_m$  en la ecuación (2)

$$\begin{aligned}I_m &= 0.30mA \\V_m &= 300mV\end{aligned}$$

$$FF = \frac{300mV \cdot 0.30mA}{0.65mA \cdot 670mV} = 0.206659 \quad (4)$$

Sustituyendo en (3):

$$\eta = \frac{0.65mA \cdot 670mV \cdot (0.206659)}{2.4 W/m^2} = 37.49999 \quad (5)$$

Para calcular la eficiencia de la celda solar en luz directa se repite el mismo proceso.

$$\begin{aligned}I_{sc} &= 1.13mA \\V_{oc} &= 680mV \\P_{in} &= 1040 W/m^2\end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación (1).

$$\eta = \frac{1.13mA \cdot 680mV \cdot (FF)}{1040 W/m^2} \quad (6)$$

Para el factor de llenado se sustituyen los siguientes valores en la ecuación (2)

$$\begin{aligned}I_m &= 0.45mA \\V_m &= 350mV\end{aligned}$$

$$FF = \frac{350mV \cdot 0.45mA}{1.13mA \cdot 680mV} = 0.20432 \quad (7)$$

Y sustituyendo en (7):

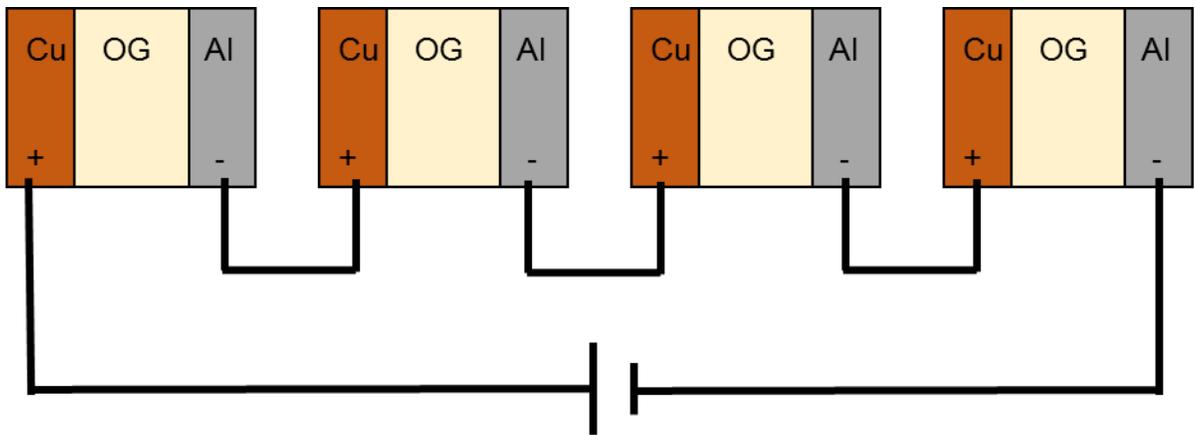
$$\eta = \frac{1.13mA \cdot 680mV (0.20432)}{1040 W/m^2} = 0.1514 \quad (8)$$

Con los resultados obtenidos de las gráficas  $I(V)$  figuras 29 y 31, donde se usó una resistencia variable RL de 50 K $\Omega$  se observa que la celda fotovoltaica obtuvo un aumento de potencia pasando de luz solar difusa a luz solar directa, sin embargo, la eficiencia cae por debajo del 1% cuando se expone a luz solar directa comparado con el 37.5% de eficiencia con luz difusa, considerando que los resultados obtenidos posiblemente puedan ser de una suma de un efecto fotovoltaico y termoeléctrico que requerirá de un estudio posterior.

## CAPITULO 5 CELDA FOTOVOLTAICA EN CIRCUITO DE BAJA POTENCIA.

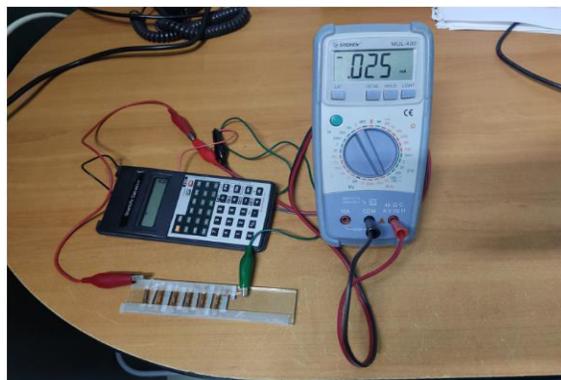
### 5.1. CIRCUITO UTILIZADO PARA ALIMENTAR EQUIPOS DE BAJA POTENCIA.

Anteriormente, para conocer el desempeño de la celda fotovoltaica en condiciones de servicio se utilizaron dos circuitos en diferentes condiciones de luz, y medimos su comportamiento, como se muestra en las gráficas de la figuras 29 y 31, la celda fotovoltaica presenta un desempeño promedio de  $675mV$  y  $0.89mA$  la cual baja para alimentar algún circuito comercial estándar los cuales son de  $3.3v$  y  $5v$  entonces la celda fotovoltaica se sometió a un arreglo en serie para poder aumentar el voltaje de salida como se muestra en la figura 33.

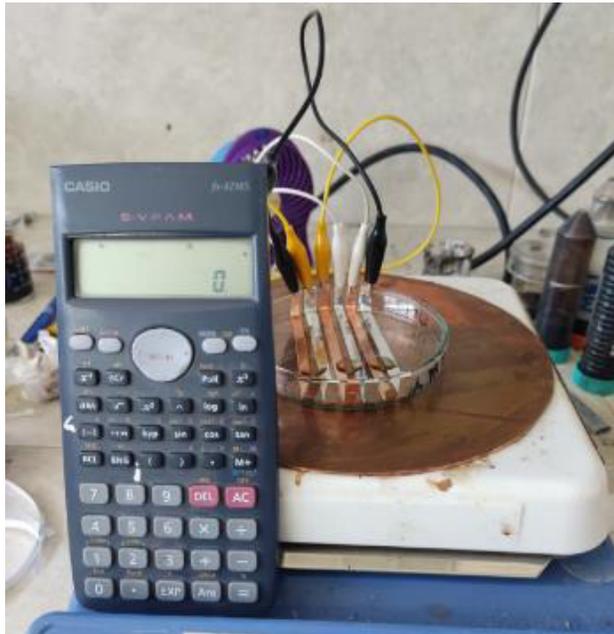


**Figura 33** Celdas Fotovoltaica de OG conectadas en serie para aumentar la tensión de salida.

Los primeros circuitos de baja potencia utilizados fueron varias calculadoras, las cuales utilizan una batería de  $1.5v$  para funcionar, y fueron probadas con la celda fotovoltaica de OG en luz difusa como lo muestran las figura 34 y 35.



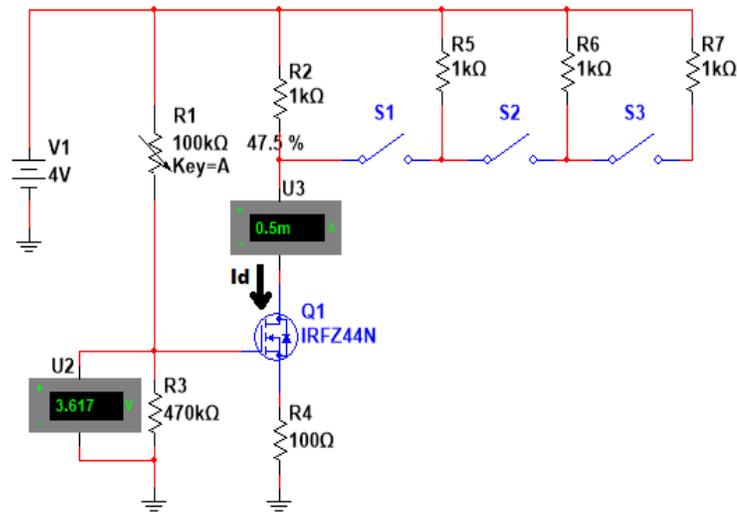
**Figura 34** Celda de OG Alimentando una calculadora que consume  $0.025mA$ .



**Figura 35** Celda fotovoltaica de OG de  $2.2v$  alimentado una calculadora con la celda iluminada con luz difusa.

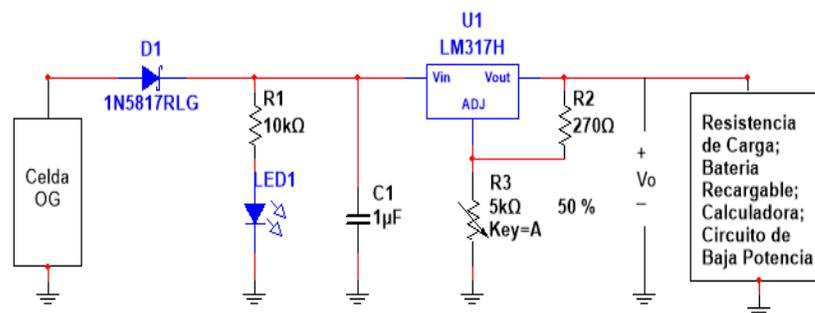
Debido a que el voltaje de salida de las celdas fotovoltaicas de OG variaba de los  $3.5v$  a  $1.5v$  se determinó utilizar un circuito regulador de voltaje y así evitar la variación y evitar malfuncionamiento a los equipos electrónicos alimentados por la celda fotovoltaica de OG.

Primero se experimentó simulando una fuente de corriente constante con un mosfet de enriquecimiento de tal manera que, al rebasar el voltaje en la compuerta (para el IRFZ44 es mayor a  $3V_{dc}$  o el voltaje de salida de la celda OG), la corriente de carga  $I_d$  se mantenga constante, aunque la  $R_d$  sea diferente. Esto permitía considerar que una batería recargable puede ser cargada. En la figura 36 se muestra el circuito simulado en el simulador Multisim Versión 14.2 de marca National Instruments.



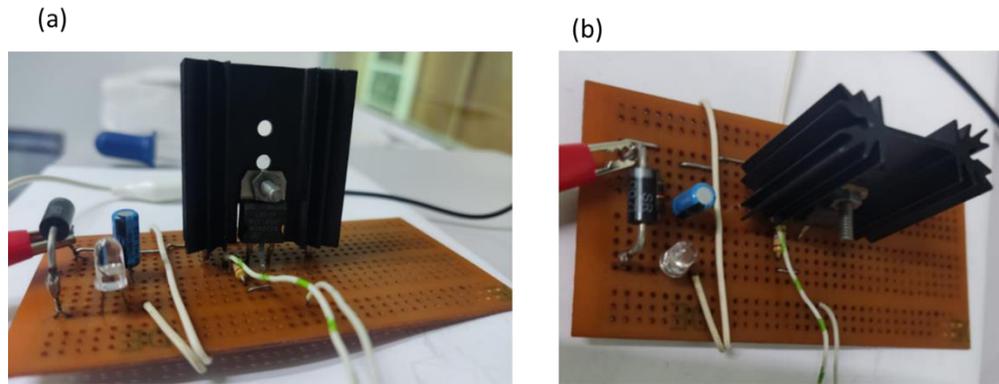
**Figura 36** Circuito utilizado para simular una corriente constante  $I_d$  en una carga ( $R_2$  ó batería recargable).

El MOSFET IRFZ44N se activa a un voltaje de compuerta mayor de  $3.3V$  aproximadamente. Los valores que se deben seleccionar para que  $I_d$  sea de  $500\mu A$  son:  $V_1 = 4V_{dc}$ ,  $V_{R3} = 3.617V_{dc}$ ,  $R_4 = R_s = 100\text{ ohms}$  y  $R_1$  de  $47.1\text{ Kohms}$ .  $I_d$  es la corriente que fluye por  $R_2$  y  $R_4$  ( $R_d$ ) aunque los switches  $S_1$ ,  $S_2$  o  $S_3$  estén abiertos o cerrados. Una batería recargable se puede poner en lugar de  $R_4$  y con  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$  abiertos.



**Figura 37** Circuito regulador para la celda de carga de OG.

El circuito de la figura 37 incluye después de las celdas fotovoltaicas de OG un regulador de voltaje [18] con posibilidad de ajuste del voltaje en la salida que alimentará a diferentes dispositivos. En nuestro caso la corriente del dispositivo en  $V_o$  debe ser por ahora de poca corriente (máximo  $2\text{ mA}$ ).



**Figura 38** (a) y (b) Circuito para regular el voltaje para alimentar diferentes cargas a baja corriente ( $3\text{ mA}$ ).

## 5.2. RESULTADOS.

La celda se probó con luz solar directa a las 15:00 hrs. con el sol iluminando perpendicular a su superficie. La salida de la celda de OG es conectando a la entrada del regulador de voltaje y de ahí a una calculadora con pantalla LCD, la celda fotovoltaica de OG figura 38, da una salida de  $3.5\text{ v}$  en circuito abierto y  $2\text{ mA}$  en corto circuito y la calculadora se alimenta con una batería AAA ( $1.5\text{ Vdc}$   $0.0004\text{ W}$ ) pero en nuestro caso fueron sustituidas por la salida del regulador de voltaje.

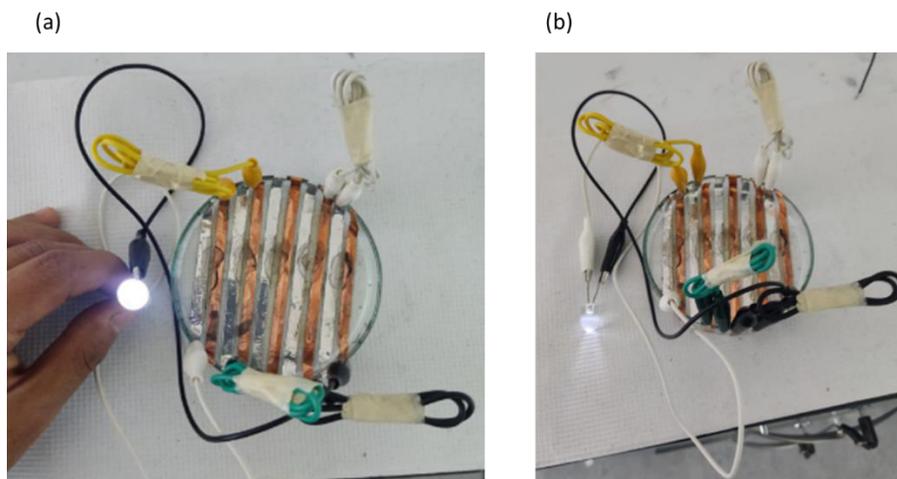
La celda fotovoltaica de OG, se conectó al circuito regulador de voltaje figura 38, ajustando su voltaje de salida a  $1.5\text{ v}$  para alimentar una calculadora, se usaron 2 multímetros para medir el voltaje de salida de la celda fotovoltaica de OG y otro para medir la corriente que consume la calculadora.



**Figura 39** Circuito con Celda fotovoltaica de OG, circuito regulador de voltaje, calculadora y 2 multímetros para medición de corriente y voltaje.

Al conectar la celda Fotovoltaica de OG esta tuvo una salida de voltaje de  $3.5\text{ V}$ , la salida del regulador se ajustó a  $2.186\text{ V}$  (simulando unas baterías medio cargadas) para posteriormente alimentar la calculadora científica marca CASSIO de 10 dígitos y la salida del circuito regulador logró encenderla y operarla normalmente.

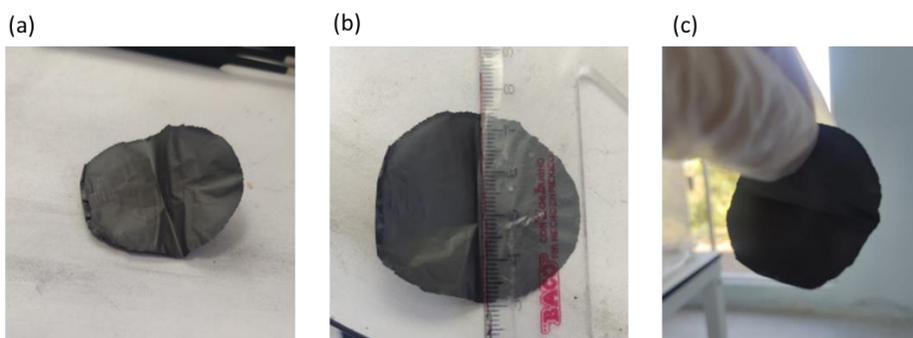
También se probó la una celda fotovoltaica de OG de 4 subceldas e iluminada con luz difusa y esta vez se encendió un led blanco con voltaje de umbral de  $3.8\text{ V}$  y  $1\text{ mA}$  aproximadamente (no mostrado), figura 39.



**Figura 40** (a) y (b) Celda Fotovoltaica de OG iluminada con luz difusa para encender un led de forma directa.

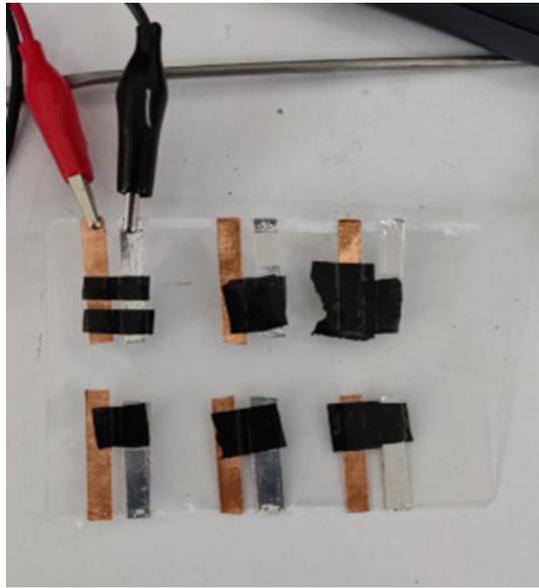
### 5.3. Celdas Fotovoltaicas de papel de OG

Para elaborar las celdas fotovoltaicas de OG se utilizó como las anteriores celdas con cinta de aluminio y cinta de cobre, pero en lugar de usar gotas de OG se usa papel de OG figura 40.

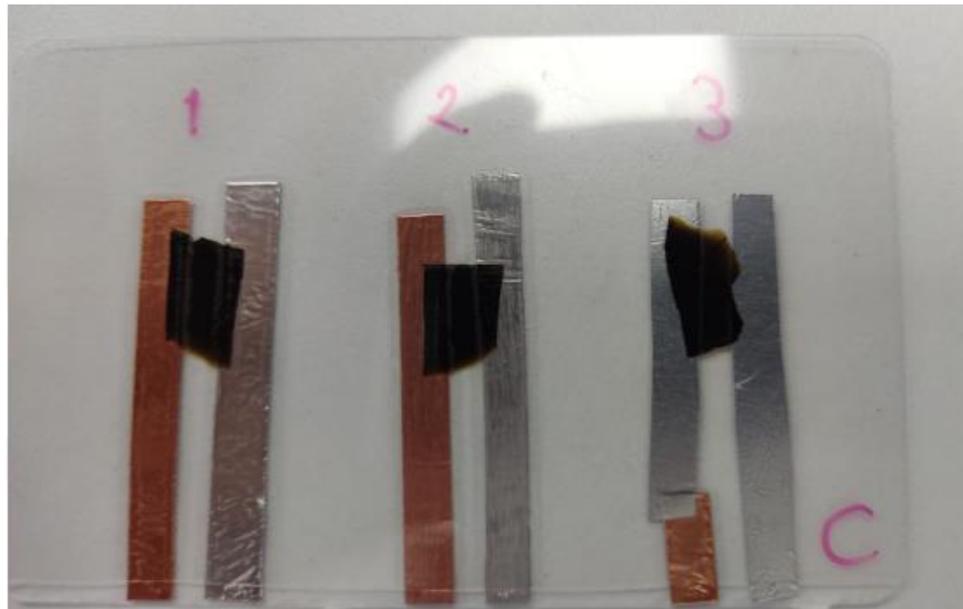


**Figura 41** Papel en forma circular de OG de aproximadamente 4cm de diámetro, (a) Papel de OG, (b) Midiendo el diámetro aproximado de papel de OG, (c) Papel de OG a contra luz para comprobar que no tenga huecos.

Como siguiente paso es recortar el papel de OG con un área aproximada de  $1 \text{ cm}^2$ , posteriormente se coloca encima de los electrodos y se encapsulan figuras 41 y 42.



**Figura 42** Celdas Fotovoltaicas de OG encapsuladas con electrodos cortos.



**Figura 43** Celdas Fotovoltaicas de OG encapsuladas con electrodos largos.

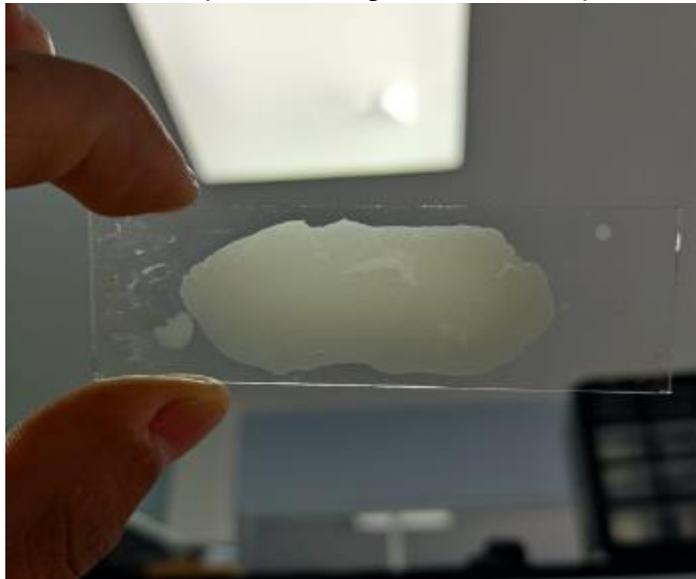
El voltaje de salida promedio de las celdas fotovoltaicas de papel de OG es 231 a 640  $mV$  en circuito abierto y una corriente en corto circuito promedio de 0.01 a 0.02  $mA$  con luz difusa.

Para luz solar directa de la celda fotovoltaica de papel de OG el voltaje en circuito abierto promedio es 380 a 611  $mV$  y una corriente en corto circuito promedio de 0.01 a 0.04  $mA$ .

A pesar del aumento de potencia de la celda fotovoltaica de papel de OG en corriente de corto circuito por ser alimentada con luz solar directa esta no fue capaz de mantener su potencia al conectar una resistencia de carga.

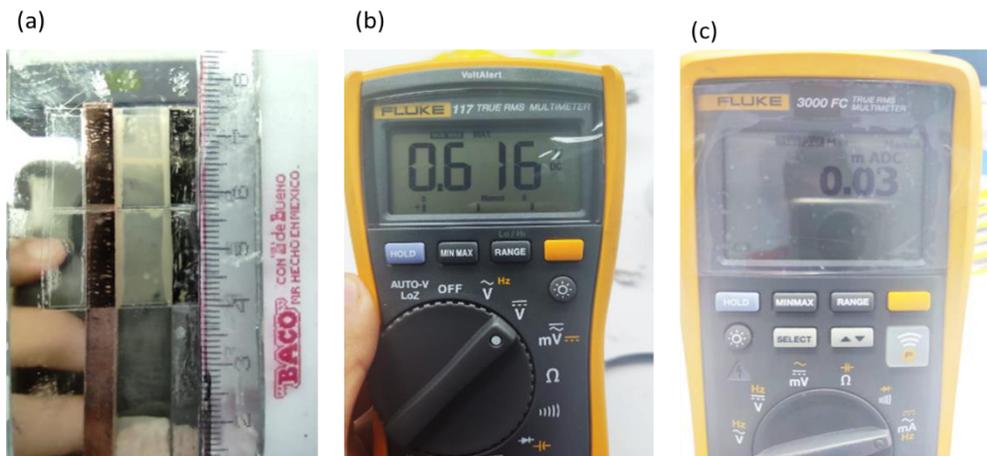
#### 5.4. Celdas fotovoltaicas de OG semitransparentes.

Para la elaboración de las celdas fotovoltaicas de OG se usaron como electrodos cintas de cobre y aluminio una película delgada semitransparente de OG Figura 43.



**Figura 44** Película semitransparente de OG sobre vidrio.

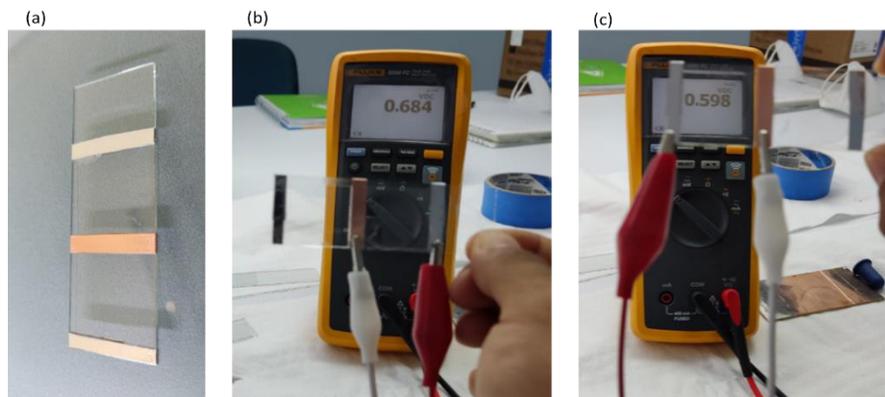
Posteriormente se cubrió con cinta adhesiva transparente, para protegerlo del polvo y rasguños por manipularla, la cual al alimentarla con luz solar directa entrega 616  $mV$  en circuito abierto y 0.03  $mA$  en corto circuito figura 44.



**Figura 45** Celda semitransparente de OG, (a) la celda esta sobre un espejo el cual se ve de manera difusa sobre la misma, (b) voltaje de la celda en circuito abierto, (c) corriente de la celda en corto circuito.

### 5.5. Celdas fotovoltaicas de OG transparentes.

Para la elaboración de la celda fotovoltaica de OG transparente, se usaron como electrodos cinta de cobre y aluminio sobre un portaobjetos, entra ellas una gota de OG poco concentrado y encima de todo un cubreobjetos figura 45.



**Figura 46** (a) Celdas fotovoltaicas de OG transparentes, (b) Celda derecha entrega 684 mV en circuito abierto, (c) Celda izquierda entrega 598 mV en circuito abierto.

## **CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS.**

En esta investigación se demostró que el OG modificado es un semiconductor que dependiendo de las condiciones de temperatura, puede llegar a ser un semiconductor tipo N o tipo P. Con el cual se obtuvo una celda fotovoltaica sencilla y fácil de ensamblar. La celda proporcionó una eficiencia aproximadamente del 37.5% en luz difusa, al exponerla en luz solar directa la potencia tuvo un incremento, sin embargo, la eficiencia solo se obtuvo del 1%.

Para las celdas fotovoltaicas de papel de OG su potencia de salida fue muy baja como para poder hacer un arreglo que fuera de utilidad para alimentar un circuito de baja potencia sin embargo al exponerlas a la radiación solar directa esta aumentaba su potencia y temperatura (aproximada de 3°C). Al excluir la radiación solar directa mantenía su aumento de potencia bajando poco a poco conforme la celda regresaba a temperatura ambiente.

De esta investigación se concluye que el material genera energía eléctrica de un delta de energía adicional a la que se obtiene con la radiación electromagnética y su comportamiento se puede considerar como material termoeléctrico y/o fotovoltaico sin embargo se requiere hacer más investigación.

Se considera que los resultados prácticos obtenidos de la celda construida con OG pueden ser utilizados en investigaciones futuras perfeccionando la técnica de construcción, acoplamiento y obtención de mayores salidas de voltaje y corriente como en las celdas construidas a base de semiconductores y darles aplicaciones similares.

## REFERENCIAS.

- [1] F. M. Smits, "*History of silicon solar cells*," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 23, no. 7, pp. 640-643, July 1976,
- [2] Paul Breeze, "*Chapter 9-types of solar cells, Solar Power Generation*", Academic Press, pp 57-70, 2016.
- [3] Kaiwen Gong, Jichao Hu, Nan Cui, Yunzhou Xue, Lianbi Li, Gen Long, Shenghuang Lin, "*The roles of graphene and its derivatives in perovskite solar cells: A review*", Materials & Design, vol. 211, 2021,
- [4] S. Xuewei et al., "*Research on Energy Storage Configuration Method Based on Wind and Solar Volatility*", 2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), Chengdu, China, 2020, pp. 464-468.
- [5] Castro Beltrán, A., Sepúlveda Guzmán, S., De la Cruz Hernández, W. J., & Cruz Silva, R. "*Obtención de Grafeno mediante la reducción química del óxido de grafito*", Ingenierías, vol. 14, no. 52, pp. 34-42.
- [6] Tahmineh Mahmoudi, Yousheng Wang, Yoon-Bong Hahn, "*Graphene and its derivatives for solar cells application*", Nano Energy, Vol. 47, pp. 51-65.
- [7] K. A. Ray, "*Flexible Solar Cell Arrays for Increased Space Power*", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-3, no. 1, pp. 107-115, Jan. 1967.
- [8] A. Goetzberger, "*Crystalline thin silicon cells*", Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists, Anaheim, CA, USA, 1997, pp. 1-6.
- [9] Paul Breeze, "*Chapter 2-The Solar Resource, Solar Power Generation*", Academic Press, pp. 2016.
- [10] HEa, C., LAa, A., Romano, A., Flores, C., & Pérez, M. "*Síntesis Caracterización de Grafeno*", Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, pp. 3-4, 2012.

[11] García Martínez, Vanessa. "*Estudio de la estabilidad del óxido de grafeno con el tiempo*", UNIVERSIDAD DE OVIEDO, Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica (2013).

[12] Hadi Heidari; Vahid Nabaei, "*Magnetic Sensors Based on Hall Effect*", in *Magnetic Sensors for Biomedical Applications*, IEEE, pp.33-56. 2020.

[13] Madan Arun, P. Shaw Melvin. "*The Physics and Applications of Amorphous Semiconductors*", Academic Press, Inc., pp.164-167 1988.

[14] "*Bridge Technology Applying 95/5% Indium/Tin Sample Corners in Preparation for Mounting onto Sample Board*" 2023.

[15] Park, M., Kim, J., Song, H., Kim, S., & Jeon, M, "*Fast and stable ionic electroactive polymer actuators with PEDOT: PSS/ (Graphene–Ag–Nanowires) nanocomposite electrodes*", *Sensors*, Vol. 18, no. 9, 2018.

[16] Askeland, D. R., & Wright, W. J. "*Ciencia e ingeniería de materiales*", Sexta Edición, Cengage learning, pp. 921, 2017.

[17] Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. "*Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*", Décima Edición, PEARSON educación, pp. 891, 2003.

[18] Franco S., "*Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuit*", Third Edition, Mc-Graw Hill International Editions, New York, pp. 540, 2002.