

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERIA**



**“FORMACIÓN DE RECUBRIMIENTOS FOTOVOLTAICOS  
APLICANDO TECNOLOGÍA ELECTROQUÍMICA”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA**

**RUBÉN CASTRO CONTRERAS**

**DR. ROUMEN ZLATEV**

*DIRECTOR DE TESIS*

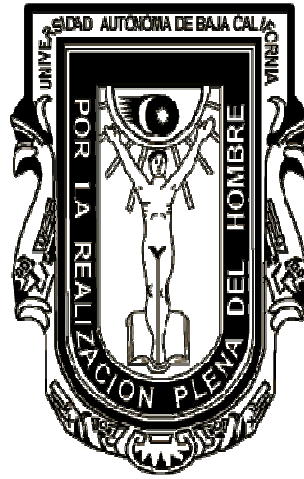
**DR. ALEJANDRO MARTINEZ RUIZ**

*CO-DIRECTOR DE TESIS*

**MEXICALI, B.C., MÉXICO, A 10 DE JUNIO DE 2013**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**



**“FORMACIÓN DE RECUBRIMIENTOS FOTOVOLTAICOS  
APLICANDO TECNOLOGÍA ELECTROQUÍMICA”**

**TESIS**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA**

**RUBÉN CASTRO CONTRERAS**

**DR. ROUMEN ZLATEV**

*DIRECTOR DE TESIS*

**DR. ALEJANDRO MARTINEZ RUIZ**

*CO-DIRECTOR DE TESIS*

**MEXICALI, B.C., MÉXICO, A 10 DE JUNIO DE 2013**

## **DEDICATORIAS**

### **GRACIAS**

A mi amigo fiel Jesucristo, estando conmigo en todo tiempo, lugar y momento, fortaleciendo y guiando mi vida profesional.

A mis padres Rubén Castro Castro y Bertha Alicia Contreras de Castro, por ser las personas que Dios me ha permitido tener, siendo ese pilar de enseñanza toda la vida.

A mis hermanos Mónica Martínez Contreras, Violeta Martínez Contreras y Arón Castro Contreras, por el apoyo, paciencia y sacrificio invertido, para poder culminar una etapa más en mi vida profesional.

A mi sobrinas Frida Zoé Limón Martínez y Azul Estrella, por su gran alegría al verlas y estar convencido que si vale la pena seguir adelante.

A todos mis grandes amigos, que siempre han estado ahí, apoyándome hasta el final.

Y por último, a todas aquellas personas que me conocen y de alguna u otra manera, han creído y confiado en mí.

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>Dedicatorias</b> .....	3
<b>Índice</b> .....	4
<b>Lista de figuras</b> .....	7
<b>Lista de tablas</b> .....	11
<b>Agradecimientos</b> .....	12
<b>Reconocimientos institucionales</b> .....	13
<b>Resumen de tesis</b> .....	14
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	16
<b>2. OBJETIVO</b> .....	19
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	21
3.1 Energía, Medio ambiente y Celda solar.....	21
3.2 Compuesto semiconductor.....	22
3.3 Celda solar, hoy en día.....	23
3.4 Energía solar a Energía eléctrica.....	23
3.5 Unión n-p.....	25
3.6 Corriente de cortocircuito y Voltaje a circuito abierto.....	26
3.7 Factor de llenado.....	26
3.8 Eficiencia de conversión.....	27
3.9 Celda solar a película delgada.....	27
3.10 Nanoalambres.....	28
	4

3.11 Capa fotovoltaica.....	28
3.12 Óxido cuproso (Cu <sub>2</sub> O).....	29
3.13 Óxido de zinc (ZnO).....	29
3.14 Cobre (Cu), Óxido cuproso (Cu <sub>2</sub> O) y Óxido de zinc (ZnO). Características y Propiedades.....	30
3.15 Módulo fotovoltaico.....	31
<b>4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>33</b>
4.1 Reactivos, Material y Equipo.....	33
4.2 Acondicionamiento del sustrato.....	34
4.3 Formación del Óxido cuproso (Cu <sub>2</sub> O).....	35
4.3.1 Método 1.....	35
4.3.1.1 Sin considerar la cantidad de oxígeno presente.....	35
4.3.1.2 Considerando la cantidad de oxígeno presente.....	37
4.3.2 Método 2.....	38
4.4 Baño de arena.....	39
4.5 Formación del Óxido de zinc (ZnO).....	41
4.5.1 Vía química.....	41
4.5.2 Vía electroquímica.....	42
<b>5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>44</b>
5.1 Muestras Finales.....	44
5.2 Caracterización de las muestras.....	46
5.2.1 Caracterización de la capa cuprosa (Cu <sub>2</sub> O).....	46

5.2.2 Caracterización de la capa de óxido de zinc (ZnO).....	49
5.3 Análisis de las propiedades fotovoltaicas.....	50
5.3.1 Caracterización de los recubrimientos fotovoltaicos preparados vía electroquímica.....	50
5.3.2 Caracterización de los recubrimientos fotovoltaicos preparados vía química.....	53
5.4 Comparación entre la Vía electroquímica y la Vía química.....	56
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>57</b>
<b>7. REFERENCIAS.....</b>	<b>58</b>
<b>8. ANEXO.....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE FIGURAS

Número	Nombre	Página
Figura 1	Representación esquemática del diagrama de bandas de un semiconductor.....	24
Figura 2	(Izquierda) Cada línea negra representa un electrón de valencia en un enlace covalente. Cuando un fotón rompe uno de estos enlaces, se crea un electrón libre y un hueco. (Derecha) Un fotón excita un electrón (circulo negro) de la banda de valencia a la banda de conducción.....	24
Figura 3	El óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) es un material semiconductor rojizo, con una estructura molecular cúbica.....	29
Figura 4	Estructura de banda para ambos óxidos de cobre presentes.....	30
Figura 5	Recubrimientos fotovoltaicos de la celda solar.....	31
Figura 6	(Izquierda) Placa de cobre de 4x7 cm. (Derecha) Placas de cobre de 1 cm <sup>2</sup> cada una.....	34
Figura 7	(Izquierda) Tratamiento de limpieza para la placa de cobre de 4x7 cm. (Derecha) Tratamiento de limpieza con solución crómica, acetona y metanol....	35
Figura 8	(Izquierda) Parrilla eléctrica con dos placas de cobre de 4x7 cm. (Derecha) Formación del óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) mediante el proceso de oxidación.....	36
Figura 9	(Izquierda) Después de 40 min de calentamiento. (Derecha) Después de una hora y media de calentamiento y media hora de enfriamiento, el óxido cúprico ( $\text{CuO}$ ) empezará a desprenderse.....	36
Figura 10	Parrilla eléctrica, placa de cobre y tapa metálica con una distancia de abertura de 1.5 cm.....	37
Figura 11	(Izquierda) 30 min de enfriamiento. (Derecha) Desprendimiento del óxido cúprico ( $\text{CuO}$ ).....	37

Figura 12	(Izquierda) Muestras de cobre de 1 cm <sup>2</sup> cada una. (Derecha) Solución de sulfato cuproso (Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) alcanzando una temperatura de 80°C.....	38
Figura 13	(Izquierda) Deposición química del óxido cuproso (Cu <sub>2</sub> O) sobre las placas de cobre. (Derecha) Acercamiento al tratamiento químico.....	38
Figura 14	(Izquierda) Deposición química del óxido cuproso (Cu <sub>2</sub> O) sobre las placas de cobre. (Derecha) Muestras de 2, 4, 6 y 8 hrs de tratamiento químico.....	39
Figura 15	(Izquierda) Cernidores de 500, 63 y 9 μm. (Derecha) Se deposita cierta cantidad de arena, una y otra vez.....	39
Figura 16	(Izquierda) Se cierne la arena con movimientos circulares hasta obtener arena muy fina. (Derecha) Se recoge la arena muy fina en un recipiente con ayuda de una brocha.....	40
Figura 17	Baño de arena a presión sobre las muestras.....	40
Figura 18	(Izquierda) Sonicador, a=0.7 ciclos y 25% de amplitud. (Derecha) Sonicando la suspensión precursora.....	41
Figura 19	(Izquierda) Horno a 80 °C. (Derecha) Horno a 400°C.....	41
Figura 20	Placa de cobre con recubrimiento fotovoltaico de óxido cuproso (Cu <sub>2</sub> O).....	42
Figura 21	Sistema electroquímico.....	43
Figura 22	Acercamiento a la celda electroquímica.....	43
Figura 23	(Izquierda) Placa de cobre (Cu). (Derecha) Placa de cobre con un recubrimiento de óxido cuproso (Cu/Cu <sub>2</sub> O).....	46
Figura 24	Muestra de cobre (Cu), aplicando lijado en forma vertical y horizontal para aumentar la superficie.....	46
Figura 25	Muestra de óxido cuproso sobre cobre (Cu/Cu <sub>2</sub> O).....	47



Figura 26	Mediante la técnica de SEM, se muestra la estructura del cobre (Cu) con un aumento de 500x.....	47
Figura 27	Mediante la técnica de EDS, se muestra cada uno de los elementos químicos presentes en la estructura química.....	48
Figura 28	Mediante la técnica de SEM, se muestra la estructura del óxido de cobre (I) sobre cobre (Cu/Cu <sub>2</sub> O) con un aumento de 500x.....	48
Figura 29	Mediante la técnica de EDS, se muestra cada uno de los elementos químicos presentes en la estructura química.....	49
Figura 30	Mediante la técnica de SEM, se muestra la estructura del óxido de zinc, óxido de cobre (I) sobre cobre (Cu/Cu <sub>2</sub> O,ZnO) con un aumento de 500x.....	49
Figura 31	Convertidor con propiedades fotovoltaicas generado vía electroquímica.....	50
Figura 32	Contacto eléctrico en la cara superior.....	50
Figura 33	Contacto eléctrico en la cara inferior.....	51
Figura 34	Comprobando las propiedades fotovoltaicas del convertidor.....	51
Figura 35	Corriente vs Tiempo. A diferentes distancias (Intensidad de luz).....	52
Figura 36	Convertidor con propiedades fotovoltaicas generado vía química.....	53
Figura 37	Contacto eléctrico en la cara superior.....	53
Figura 38	Contacto eléctrico en la cara inferior.....	54
Figura 39	Comprobando las propiedades fotovoltaicas del convertidor.....	54
Figura 40	Corriente vs Tiempo. A diferentes distancias (Intensidad de luz).....	55
Figura 41	Muestra #01.....	60
Figura 42	Muestra #03.....	60
Figura 43	Muestra #05.....	61

Figura 44	Muestra #06.....	61
Figura 45	Muestra #08.....	62
Figura 46	Muestra #10.....	62
Figura 47	Muestra #11.....	63
Figura 48	Muestra #13.....	63
Figura 49	Muestra #15.....	64
Figura 50	Muestra #16.....	64
Figura 51	Muestra #18.....	65
Figura 52	Muestra #20.....	65
Figura 53	Muestra #21.....	66
Figura 54	Muestra #23.....	66
Figura 55	Muestra #25.....	67
Figura 56	Muestra #26.....	67
Figura 57	Muestra #28.....	68
Figura 58	Muestra #30.....	68
Figura 59	Muestra #31.....	69
Figura 60	Muestra #32.....	69

## LISTA DE TABLAS

<b>Número</b>	<b>Nombre</b>	<b>Página</b>
Tabla 1	Datos de un lote de muestras, aplicando el método 1 y el método 2.....	45
Tabla 2	Valores de corriente máxima alcanzada a diferentes distancias en un tiempo 100 seg.....	52
Tabla 3	Valores de corriente máxima alcanzada a diferentes distancias en un tiempo de 100 seg.....	55

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma de Baja California, por ser la Universidad en donde me formé y desarrollé como Profesionista y ahora como Maestro en Ingeniería.

Al Instituto de Ingeniería, por permitirme llevar a cabo la realización del presente proyecto.

A la Facultad de Ciencias, UABC, Ensenada, por el apoyo y facilidad que me han otorgado para la ejecución de este proyecto de tesis.

Muy en particular, al Dr. Roumen Zlatev, por guiarme e instruirme a lo largo del desarrollo de esta tesis. Por esa formación académica que me ha transmitido para crecer profesionalmente.

Así mismo, al Dr. Alejandro Martínez Ruiz, por todo el apoyo moral y académico que me ha transmitido para poder llegar a la realización de esta tesis.

A mis maestros, Dra. Margarita Stoytcheva y Dr. Nicola Nedev Radnev, por sus valiosas aportaciones en el presente trabajo.

A todos mis maestros que de alguna manera contribuyeron a mi formación académica, siendo de gran magnitud para poder terminar y concluir este trabajo de tesis.

A todos mis compañeros y amigos de posgrado, por sus ánimos y confianza puesta en mí, para terminar esta tesis.

Y por último, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento del proyecto y la beca otorgada.

## **RECONOCIMIENTOS INSTITUCIONALES**

El presente trabajo de tesis se desarrollo en el Laboratorio de Electroquímica Aplicada del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, como director de tesis el profesor-investigador:

**Dr. Roumen Zlatev**

Y como co-director de tesis el profesor-investigador:

**Dr. Alejandro Martínez Ruiz**

El proyecto de investigación fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), número de beca: 316950.

## RESUMEN DE TESIS

La mayor parte de la energía que se ha consumido y consume en el mundo tiene su origen en las reservas fósiles de carbón, metano y petróleo. Sin embargo éstas son finitas.

Para ello, se buscan materiales y dispositivos capaces de aprovechar las fuentes de energía renovables como: energía eólica, energía solar, energía mareomotriz, energía de hidrogeno, etc.

La historia muestra que desde hace siglos el hombre ha tratado de aprovechar la energía solar, la cual es abundante, universal y no requiere de transporte.

Dentro de las diferentes variantes de utilización de la energía solar, la energía fotovoltaica se convierte directamente en electricidad, sin aplicar conversión en otras formas; es versátil, silenciosa, los convertidores se instalan fácilmente, incluso por partes, generando energía renovable inmediatamente.

La energía solar convertida en corriente eléctrica puede ser utilizada para la producción de trabajo mecánico. Además, la energía solar tiene muchas otras aplicaciones en donde la conversión fototérmica resultaría atractiva: calentamiento de agua para consumo domestico, procesos de secado, destilación de agua, calefacción y enfriamiento de ambientes, bombeo de agua y/o generación de cantidades moderadas de electricidad para áreas rurales, etc.

Por lo tanto, una celda fotovoltaica es un dispositivo que produce electricidad directamente a partir de los fotones de la luz solar. Las celdas se construyen con películas o capas de materiales semiconductores. La primera capa tiene una carga positiva: semiconductor tipo-p y la segunda capa tiene una carga negativa: semiconductor tipo-n.

Cuando la luz solar entra en contacto con la celda fotovoltaica, el material semiconductor absorbe fotones de la luz. Este proceso de electrones libres de la capa “n” pasan a la capa “p”. Este flujo de electrones constituye una corriente eléctrica, la cual puede ser capturada en un circuito externo conectado a las dos capas. La electricidad generada por una celda fotovoltaica puede ser usada directamente o como reserva en baterías.

Las celdas solares de alta eficiencia son hechas actualmente de silicio purificado. La construcción de estos dispositivos requiere equipos especializados y gran inversión en infraestructura, por lo que una desventaja importante que debe resolverse para que se pueda aplicar la energía fotovoltaica de manera masiva, es su costo alto.

La disminución de los costos de producción del silicio, material del cual se producen casi el 90% de las celdas solares con la que se fabrican los paneles, es una de las maneras a disminuir el precio por KW/hr fotovoltaico basado en este material. Las celdas solares fabricadas en base a películas delgadas poseen un costo menor por área, al utilizar menos material, y aunque poseen una eficiencia menor que las de silicio convencional, el costo del Watt fotovoltaico puede llegar a disminuir

Así mismo, se conoce otra vía alterna, que puede contribuir exitosamente al proceso de producción de fotovoltaicos: utilización del cobre como material básico para la construcción de los fotovoltaicos, en donde, para su producción se aplica tecnología muy barata. Su bajo costo, su gran abundancia, fácil de producir, no es dañino al medio ambiente, hacen este tipo de fotovoltaicos de gran perspectiva para el futuro.

En base a estudios recientes, se conoce que utilizar óxidos de cobre y óxido de zinc, soportados sobre cobre puro, forman una unión n-p (negativo-positivo), característica importante que los hace ser un material fotovoltaico viable hoy en día.

Todo ello, conlleva la base del desarrollo de este trabajo de tesis, la formación de un material fotovoltaico, con materiales distintos a los comunes, muy económicos y abundantes en el medio ambiente, fácil de fabricar y sobre todo, con un costo muy bajo tanto de elaboración como de venta, en donde cada persona puede contar con un arreglo fotovoltaico de uso doméstico para disminuir sus gastos de luz, aprovechando la radiación solar para suplir sus necesidades básicas.

# 1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de la energía que se ha consumido y consume en el mundo tiene su origen en las reservas fósiles de carbón, metano y petróleo. Sin embargo, éstas son finitas. La gran necesidad de apoyar el desarrollo en base al modelo económico poco sustentable ha hecho cada vez más notoria la necesidad de la utilización y comercialización de estos materiales naturales con las consecuencias ahora de todos conocidas; posible agotamiento del recurso en los próximos años y un incremento notable en las concentraciones de gases que modifican las condiciones meteorológicas del planeta.

Para lo anterior, es imperiosa la necesidad de encontrar materiales y dispositivos capaces de aprovechar las fuentes de energía renovables como: energía eólica, energía solar, energía mareomotriz, etc.

La historia muestra que desde hace siglos el hombre ha tratado de aprovechar la energía solar, la cual es abundante, universal y no requiere de transporte [1].

Dentro de las diferentes variantes de utilización de la energía solar, la energía fotovoltaica se convierte directamente en electricidad sin aplicar conversión en otras formas; es versátil, silenciosa, los convertidores se instalan fácilmente, incluso por partes, generando energía renovable inmediata [2].

La energía solar convertida en corriente eléctrica puede ser utilizada para la producción de trabajo mecánico. Además, la energía solar tiene muchas otras aplicaciones en donde la conversión fototérmica resultaría atractiva: calentamiento de agua para consumo doméstico, procesos de secado, destilación de agua, calefacción y enfriamiento de ambientes, bombeo de agua y/o generación de cantidades moderadas de electricidad para áreas rurales, etc. [3].

Una celda fotovoltaica es un dispositivo que produce electricidad directamente a partir de los fotones de la luz solar. Las celdas se construyen con películas o capas de materiales semiconductores. La primera capa tiene una carga positiva: semiconductor tipo-p y la segunda capa tiene una carga negativa: semiconductor tipo-n.

Cuando la luz solar entra en contacto con la celda fotovoltaica, el material semiconductor absorbe fotones de la luz.



Este proceso de electrones libres de la capa “n” pasan a la capa “p”. Este flujo de electrones constituye una corriente eléctrica, la cual puede ser capturada en un circuito externo conectado a las dos capas. La electricidad generada por una celda fotovoltaica puede ser usada directamente o como reserva en baterías o en enlaces de hidrogeno.

Las celdas solares de alta eficiencia son hechas actualmente de silicio purificado. La construcción de estos dispositivos requiere equipos especializados y gran inversión en infraestructura [4]. Una desventaja importante que debe resolverse para que se pueda aplicar la energía fotovoltaica de manera masiva, es su costo alto.

La disminución de los costos de producción del silicio, material del cual se producen casi el 90% de las celdas solares con la que se fabrican los paneles, es una de las maneras a disminuir el precio por KW/hr fotovoltaico basado en este material. Las celdas solares fabricadas en base a películas delgadas poseen un costo menor por área, al utilizar menos material, y aunque poseen una eficiencia menor que las de silicio convencional, el costo del Watt fotovoltaico puede llegar a disminuir [5].

Así mismo, se conoce otra vía alterna, que puede contribuir exitosamente al proceso de producción de fotovoltaicos: utilización del cobre como material básico para la construcción de sistemas fotovoltaicos, en donde, para su producción se aplica tecnología muy barata. Su bajo costo, su gran abundancia, fácil de producir, no es dañino al medio ambiente, hacen este tipo de fotovoltaicos de gran perspectiva para el futuro, muy accesible. El cobre es de bajo costo, gran abundancia, fácil de producir, no es dañino al medio ambiente, y México es fuerte productor mundial de este metal.

En base a estudios recientes, se conoce que utilizar óxidos de cobre y óxido de zinc, soportados sobre cobre puro, forman una unión n-p (negativo-positivo), característica importante que los hace ser un material fotovoltaico viable hoy en día.

Una reacción química de gran importancia para la formación de los recubrimientos en este trabajo de investigación, es aquella que se lleva a cabo entre cobre y oxígeno. Los átomos de cobre y los átomos de oxígeno forman moléculas de óxido de cobre, las cuales pueden existir en dos formas, en dos diferentes óxidos. Estos son: el óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) y el óxido cúprico ( $\text{CuO}$ ). El óxido cuproso, un material rojo cristalino, puede ser producido por métodos que conllevan el tener que hornear y se termina por obtener un semiconductor.

La superficie de cobre puede ser oxidada por sobrecalentamiento, creando una capa de óxido cúprico de color negro [6]. Una vez obtenido el óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) siendo el óxido metálico adecuado con propiedades semiconductoras, da lugar a la superficie positiva, soportado sobre cobre puro (material base), y por último, se agrega el óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) sobre el óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), dando lugar a la formación de la superficie negativa y con esto, completar la unión n-p. El óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) se puede obtener depositando el zinc mediante dos métodos: Químico (por inmersión) o Electroquímico y Oxidación.

Todo ello, conlleva la base del desarrollo de este trabajo de tesis, la formación de un material fotovoltaico, con materiales distintos a los comunes, muy económicos y abundantes en el medio ambiente, fácil de fabricar y sobre todo, con un costo muy bajo tanto de elaboración como de venta, en donde cada persona puede contar con un arreglo fotovoltaico de uso doméstico para disminuir sus gastos de luz, aprovechando la radiación solar para suplir sus necesidades básicas.

## 2. OBJETIVO

Contribuir al cuidado del medio ambiente, es un tema muy importante hoy en día, tomar consciencia en ello, es de gran responsabilidad y compromiso para todos. Desarrollar tecnología que cumpla con las necesidades básicas del hombre y contribuya a proteger nuestro planeta, son el principal motivo de este proyecto.

Con base en ello, se deriva el siguiente objetivo general:

- **Desarrollar recubrimientos fotovoltaicos a base de cobre y zinc del tipo Cu/(Cu<sub>2</sub>O-CuO),ZnO utilizando tecnologías de bajo costo: Química y Electroquímica.**

En base al fundamento principal que conlleva desarrollar una estructura con propiedades fotovoltaicas, en donde aplicando técnicas químicas y electroquímicas mediante las cuales se pueda formar esa unión n-p, necesaria para la conversión de luz solar en corriente eléctrica. Es importante contar con ciertos elementos básicos para su desarrollo, como son, las sustancias químicas a utilizar, con propiedades fotovoltaicas y al mismo tiempo, sean un material que no contamine al medio ambiente.

Con ello, es que resultan los siguientes objetivos específicos:

- *Caracterizar las estructuras de óxidos de cobre y zinc Cu/(Cu<sub>2</sub>O-CuO),ZnO y determinación de sus propiedades fotovoltaicas.*
- *Optimizar las características fotovoltaicas de dichas estructuras.*

Se conoce, que actualmente la mayoría de las celdas solares comerciales, basan su principio fotovoltaico mediante la utilización del elemento Silicio (Si). Elemento con propiedades semiconductoras muy apropiadas para funcionar como material fotovoltaico. Entre otros mas, tenemos al Arseniuro de Galio (GaAs), siendo el compuesto de mayor eficiencia en cuanto a conversión luz solar-corriente eléctrica, hasta un 40 %. Pero si concentramos nuestro objetivo, en utilizar materiales económicos, abundantes y no contaminantes para el medio ambiente, en otras palabras, contribuir al desarrollo, cuidado y bienestar de nuestro planeta y al mismo tiempo, el proceso de fabricación sea fácil de hacer, entonces sí, tanto el objetivo general como específico de este proyecto, vienen a suplir una necesidad por indagar en nuevas vías de

desarrollo, formación y fabricación de celdas solares capaces de contribuir con la estabilidad del medio ambiente, suplir una necesidad básica del hombre y la facilidad de contar con un arreglo fotovoltaico, de bajo costo, buena eficiencia, larga vida y fácil de obtener.

### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 ENERGÍA, MEDIO AMBIENTE Y CELDA SOLAR**

Ciertamente la capacidad de energía, limitada por los recursos de combustibles fósiles y cambios en el clima, conlleva a la necesidad de aumentar la investigación y el desarrollo de alternativas y soluciones de energía sustentable.

La energía solar es una solución atractiva, siendo un recurso natural y la forma de energía más limpia.

El empleo de celdas fotovoltaicas en paneles solares viene a ser una solución viable para sustituir todos nuestros recursos de energía primarios, como son: carbón, gas natural, productos del petróleo, material radiactivo, entre otros. Y de esta manera, contribuir al cuidado y protección del medio ambiente [7].

Por lo tanto, para llevar a cabo la transformación de la energía de la radiación solar en electricidad, mediante el empleo de celdas fotovoltaicas, es necesario que se cumplan tres aspectos fundamentales:

- 1.- Existencia de una unión n-p.
  
- 2.- Incidencia de fotones con energías iguales o mayores que la banda prohibida del semiconductor.
  
- 3.- Producción de portadores de cargas libres (electrones y huecos).

Una celda solar es el dispositivo donde ocurren los tres eventos antes mencionados. La celda solar es un dispositivo electrónico constituido por una unión n-p que convierte directamente la energía de la radiación solar en energía eléctrica. Al incidir la luz sobre una celda solar genera un voltaje entre sus terminales y al mismo tiempo una corriente que circula por un circuito externo, produciendo una potencia  $P = I \cdot V$  que puede ser empleada para energizar cualquier equipo, aparato o accesorio eléctrico.

También, en una celda solar no hay elementos móviles necesarios para la transformación como en los métodos convencionales, que ocurren en una central eléctrica, la transformación de la energía se da entonces de manera directa. Tienen un costo de mantenimiento y operación mínimo.

No generan emisiones durante su uso, no generan ruido ni algún tipo de producto secundario. No contribuyen a la producción de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a la atmosfera.

A temperatura ambiente la red cristalina de un sólido cristalino tiene una energía térmica determinada, provocando que los electrones oscilen con mayor amplitud, causando que algunos electrones adquieran energía excedente que les permita poder escapar del enlace que los mantienen unidos a los átomos, convirtiéndose en electrones libres que participen en la conducción eléctrica. Dependiendo de la energía propia que se necesita en cada cristal para que un electrón de valencia pueda estar libre del enlace, los sólidos cristalinos, estos se dividen en conductores, semiconductores y aislantes [8].

Con ello, el material y estructura de la celda solar son muy importantes en este proceso. Una celda solar está hecha de un material semiconductor el cual facilita la creación de cargas [9].

### **3.2 COMPUESTO SEMICONDUCTOR**

Los átomos que conforman los elementos semiconductores son aquellos que se encuentran en el grupo IV de la tabla periódica, fundamentalmente el Silicio (Si) y el Germanio (Ge). También existen compuestos semiconductores, formados por la combinación de elementos del grupo III y V (llamados semiconductores III-V, como el GaAs, el GaP, el GaSb, el InP, y otros) y por la combinación de los elementos del grupo II y VI (llamados semiconductores II-VI, como el ZnSe, el CdTe, el CdS, el ZnS, etc.).

Otros compuestos semiconductores han sido obtenidos a través de la combinación de elementos de la tabla periódica, agrupándose bajo la denominación de compuestos IV-IV como el SiC, IV-VI como el PbS, V-VI como el  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  y compuestos ternarios como el  $\text{CuInSe}_2$ , o el  $\text{HgCdTe}$  [10].

### **3.3 CELDA SOLAR, HOY EN DÍA**

Los avances en la investigación realizados de unos años a la actualidad, han generado grandes aportaciones.

Celdas solares basadas en  $\text{CdS/Cu}_2\text{S}$  con una conversión del 11%. Si a este mismo material fotovoltaico se le incorpora el elemento zinc (Zn),  $(\text{CdZn})\text{S/CuS}$  se alcanza una conversión de entre 14-15% [11].

Celdas solares con películas delgadas de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  más allá del 20%. El elemento Ga utilizado en películas delgadas de  $\text{CuInSe}_2$  mediante un método llamado “Proceso de bicapa” se incorporó homogéneamente. La presencia de Ga dentro de las películas de  $\text{CuInSe}_2$  mejora el rendimiento fotovoltaico, en las características de voltaje-corriente, voltaje-capacitancia y fotoluminiscencia [12].

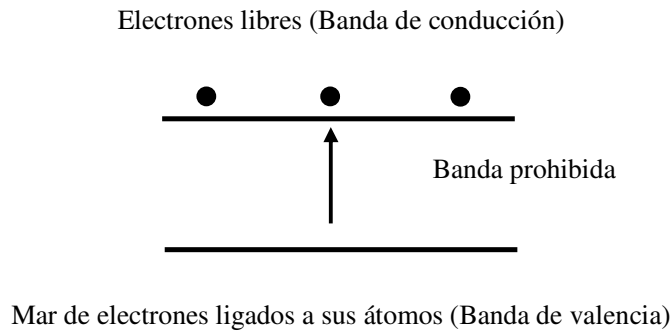
Otro elemento químico de gran influencia en el mejoramiento de las celdas solares es el elemento Sodio (Na). Su mejora, sobre las propiedades electro-ópticas de aquellas celdas solares basadas sobre  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ . El efecto del contenido de Na sobre las propiedades electro-ópticas caracterizadas mediante las técnicas de capacitancia y fotoluminiscencia. Los resultados indican el efecto benéfico de Na, en el incremento de la eficiencia, voltaje de circuito abierto e intensidad de fotoluminiscencia [13].

Contar con un sustrato que sea un metal flexible será de gran ayuda para facilitar el proceso de manufactura y extender el campo de aplicaciones [14].

Se conocen más combinaciones de elementos químicos en cuanto a su composición química para el desarrollo de celdas solares, con propiedades fotovoltaicas. Para ello, es importante estudiar más a fondo el comportamiento químico que favorece la conversión de la energía solar en energía eléctrica.

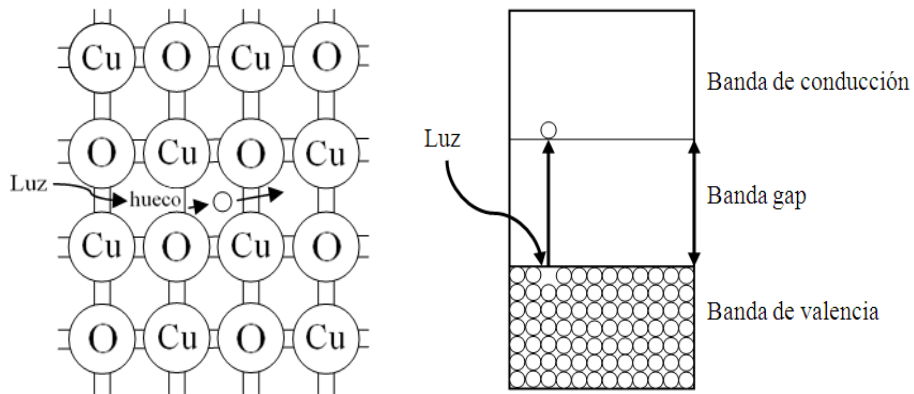
### **3.4 ENERGÍA SOLAR A ENERGÍA ELÉCTRICA**

El rango más distintivo de un semiconductor es su representación en los llamados esquemas de bandas. Estas bandas se muestran esquemáticamente en la Figura 1.



**Figura 1.** Representación esquemática del diagrama de bandas de un semiconductor.

Cuando un electrón de valencia rompe su enlace y pasa a la banda de conducción deja atrás un enlace suelto que puede ser ocupado por otro electrón que se encuentra en la banda de valencia. Es mucho más conveniente analizar este espacio vacío, al cual se le llama *hueco*, que el conjunto total de los electrones restantes. Esto, se muestra más claramente en la Figura 2.



**Figura 2.** (Izquierda) Cada línea negra representa un electrón de valencia en un enlace covalente. Cuando un fotón rompe uno de estos enlaces, se crea un electrón libre y un hueco. (Derecha) Un fotón excita un electrón (circulo negro) de la banda de valencia a la banda de conducción [15].

El concepto de banda prohibida o “Gap” de energía es fundamental para el funcionamiento de una celda solar. Para una eficiente operación de una celda solar las propiedades esenciales de los materiales semiconductores están caracterizadas por los siguientes parámetros:



- La banda prohibida.
- El número de portadores de carga libre que contribuyen a la conducción.
- Los procesos de generación y recombinación de los portadores libres cuando incide la luz.

### 3.5 UNIÓN N-P

La unión n-p es el elemento base de una celda solar. La formación de una unión n-p requiere la existencia de una región de conductividad tipo p (exceso de huecos) y otra región de conductividad tipo n (exceso de electrones).

Una unión n-p se obtiene uniendo semiconductores con conductividades tipo n y tipo p. Si las regiones n y p son hechas del mismo material, se dice que se ha formado una homounión. En el caso de que las regiones n y p sean de materiales distintos, se dice que se ha formado una heterounión. Las celdas solares son fabricadas tanto con homouniones, como con heterouniones. El rasgo más distintivo en una unión n-p para la transformación fotovoltaica es la existencia de un campo eléctrico, que es el responsable de separar las cargas libres creadas por la absorción de los fotones provenientes de la radiación incidente.

Los mecanismos físicos básicos en la operación de una celda solar son:

- Creación en el semiconductor de pares electrón-hueco generados por la absorción de la radiación solar (absorción de fotones).
- Separación de los pares electrón-hueco por el campo de la unión n-p generando una corriente  $I_L$  (corriente generada por la luz).
- Aparición de un voltaje entre las terminales de la celda solar.
- Utilización de la potencia eléctrica a través de una carga exterior.

A partir de una curva I-V (corriente vs. voltaje), los parámetros importantes para caracterizar a una celda solar son: La corriente de corto circuito  $I_{SC}$ , el voltaje a circuito abierto  $V_{OC}$ , el factor de llenado o de forma FF y la eficiencia  $\eta$ .

### **3.6 CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO Y VOLTAJE A CIRCUITO ABIERTO**

La corriente de cortocircuito es la corriente que atraviesa la celda solar cuando el voltaje entre sus terminales es nulo, esto es, cuando la celda solar esta cortocircuitada. El valor de  $I_{SC}$  depende de la generación y recolección de los portadores creados por la luz. La corriente de corto circuito es proporcional a la intensidad de la luz incidente sobre la celda solar.

El voltaje a circuito abierto es el máximo voltaje que aparece entre las terminales de la celda solar y ocurre para valores de corriente nulo. El voltaje a circuito abierto es consecuencia de la polarización positiva o directa de la unión n-p cuando la luz incide sobre la celda solar.

La corriente de cortocircuito y el voltaje a circuito abierto son los máximos valores de corriente y voltaje que se pueden extraer de una celda solar, sin embargo en estos puntos de operaciones la potencia  $P = I \cdot V = 0$ . Por ello es necesario encontrar un punto de la curva I-V en donde el producto  $I \cdot V$  tenga un máximo valor.

### **3.7 FACTOR DE LLENADO**

El factor de llenado se define como la razón entre la potencia máxima obtenida y el producto  $I_{sc} \cdot V_{oc}$ .

$$FF = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{I_{sc} \times V_{oc}}$$

FF: Factor de llenado.

$I_{mp}$ : Valor máximo de corriente.

$V_{mp}$ : Valor máximo de voltaje.

$I_{sc}$ : Corriente de corto circuito.

$V_{oc}$ : Voltaje a circuito abierto.

### 3.8 EFICIENCIA DE CONVERSIÓN

La eficiencia de conversión de energía solar en eléctrica es la figura de mérito de toda celda solar. La eficiencia de conversión o simplemente eficiencia se define como la razón de la potencia eléctrica máxima que suministra la celda entre la potencia (P) de la radiación solar que incide sobre de esta:

$$\eta = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{P} = \frac{I_{sc} \times V_{oc}}{P} FF$$

$\eta$ : Eficiencia.

$I_{mp}$ : Valor máximo de corriente.

$V_{mp}$ : Valor máximo de voltaje.

$I_{sc}$ : Corriente de corto circuito.

$V_{oc}$ : Voltaje a circuito abierto.

P: Potencia.

FF: Factor de llenado.

### 3.9 CELDA SOLAR A PELICULA DELGADA

Las celdas solares a películas delgadas se basan en el uso de sólidos policristalinos y amorfos.

Un sólido en general presenta tres formas microscópicas en su estructura: el sólido monocristalino; el sólido policristalino y el sólido amorfo. Un sólido monocristalino se caracteriza por el arreglo periódico de sus átomos, formando una estructura cristalina dada. Este arreglo periódico está caracterizado por un potencial también periódico, llamado potencial cristalino. Los portadores de carga están sujetos a la interacción con este potencial, la cual se caracteriza en que algunas de las propiedades del portador de carga difieran de las que el mismo posee en el vacío.

En el caso de un material amorfo el arreglo del potencial es aleatorio, existiendo fluctuaciones tanto de las alturas de los pozos de potencial como de la distribución espacial de estos. Estamos en presencia de un sólido policristalino, cuando existen regiones en el sólido formadas por granos o clusters monocristalinos, separados por las fronteras entre granos. Este último factor determina que además de existir el potencial periódico de la red, exista una barrera de potencial intergranular, la cual es una auténtica barrera para el flujo de portadores en el sólido, si por ejemplo el mismo está sujeto a un campo eléctrico externo. El rasgo distinto en un sólido policristalino, respecto al mismo sólido monocristalino, es la disminución de la movilidad de los portadores de carga, lo cual se traduce a una disminución de la conductividad eléctrica del sólido en cuestión.

A mayor tamaño de grano menor fronteras de grano, es decir que en la medida en que se obtengan granos grandes en una técnica de crecimiento, mejores propiedades eléctricas, morfológicas y estructurales se obtendrán [16].

### **3.10 NANOALAMBRES**

Los nanoalambres están siendo usados en celdas solares, siendo la clave benéfica de su desarrollo. El incremento del área superficial de un arreglo de nanoalambres da como resultado un decremento en la reflexión y por consiguiente aumenta la absorción de la luz solar. Definitivamente, los nanoalambres causan un efecto sobre la absorción de luz solar. El efecto de absorción es más alto al utilizar capas ultradelgadas, el beneficio agregado de reducción de la cantidad del material disminuirá los costos del diseño.

### **3.11 CAPA FOTOVOLTAICA**

Por otra parte, la formación de capas fotovoltaicas se puede llevar a cabo mediante procesos electroquímicos, que garantizan la fabricación de un material con propiedades fotovoltaicas útiles para la producción de corriente eléctrica, por deposición electroquímica, se fundamenta en una reacción redox. Los cationes metálicos son reducidos en el cátodo, mientras la oxidación se lleva a cabo en el ánodo con el mismo material reemplazando a los iones reducidos, como es el caso de los óxidos metálicos [17].

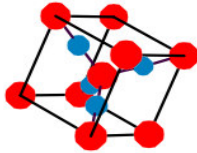
Con ello, en la búsqueda de crear celdas solares con materiales que por supuesto mantengan una eficiencia buena pero de gran importancia al cuidado y protección del medio ambiente, que sean de bajo costo, muy abundantes y fácil de fabricar, se piensa en utilizar cobre (Cu), óxido de cobre ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) y óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ). Siendo una alternativa eficaz para el desarrollo de celdas solares con un enfoque más ecológico.

Nunca perdiendo el objetivo, es importante mencionar a detalle información respecto al óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) siendo un compuesto sumamente importante para la formación de una de las capas fotovoltaicas de la celda solar que en este proyecto se desarrolla.

### 3.12 ÓXIDO CUPROSO ( $\text{Cu}_2\text{O}$ )

El óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) es un material adecuado para la generación de energía fotovoltaica con bajo costo, en teoría, provee una eficiencia en la celda solar similar a las comunes, mediante el empleo con este material, es un material muy abundante y su proceso de formación es fácil de llevar a cabo [18, 19].

La banda “gap” del óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) es de  $\sim 2.0$  eV. Al igual se considera un material con exceso de huecos (carga positiva). Esto, se muestra más claramente en la Figura 3.



**Figura 3.** El óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) es un material semiconductor rojizo, con una estructura cristalina cúbica [20, 21].

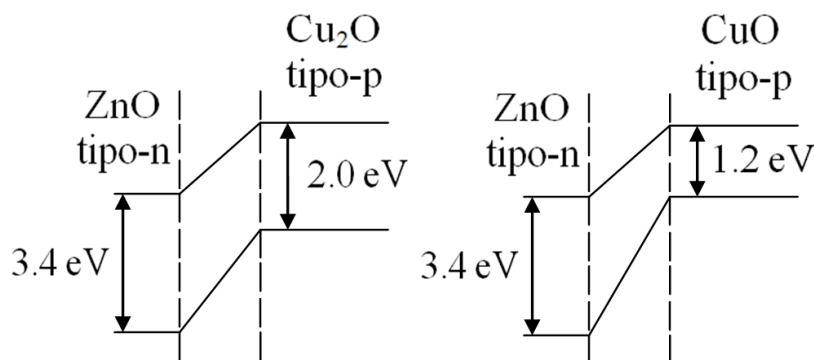
### 3.13 ÓXIDO DE ZINC ( $\text{ZnO}$ )

El óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) se considera un material con exceso de electrones (carga negativa). De igual forma, un semiconductor tipo-n, con diferentes aplicaciones técnicas tales como foto-catálisis [22], sensores de gas de películas delgadas [23], nanolasers [24], entre otras. El óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) tiene una banda gap de 3.4 eV, una estructura de cristales de forma hexagonal, cuenta con propiedades ópticas, eléctricas y semiconductoras.

### 3.14 COBRE (Cu), ÓXIDO CUPROSO (Cu<sub>2</sub>O) Y ÓXIDO DE ZINC (ZnO).

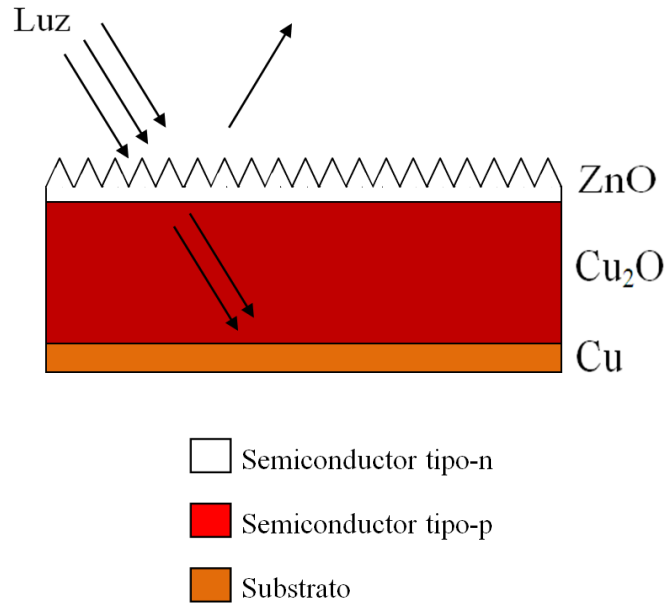
#### CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES

Por lo tanto, retomando el concepto de banda prohibida o “Gap” de energía para los materiales mencionados anteriormente, se conoce que para el óxido de zinc (ZnO) es de 3.3 eV y puede absorber solo luz ultravioleta hasta los 376 nm. Para el óxido cuproso (Cu<sub>2</sub>O) es de 2.0 eV y puede absorber luz hasta los 620 nm y para el óxido cúprico (CuO) es de 1.2 eV y puede absorber radiación hasta los 1033 nm. Con esto, se logra cubrir el rango del espectro solar. El óxido de zinc (ZnO) funciona como material tipo-n (exceso de electrones) y el óxido de cobre como material tipo-p (exceso de huecos). Esto, se muestra más claramente en la Figura 4.



**Figura 4.** Estructura de banda para ambos óxidos cuproso y cúprico [25].

De igual manera, la utilización de cada uno de los compuestos mencionados, permiten la formación de recubrimientos fotovoltaicos, debido a sus propiedades de cada material presente, dando como resultado una celda solar con un enfoque ecológico. Esto se muestra más claramente en la Figura 5.



**Figura 5.** *Recubrimientos fotovoltaicos de la celda solar.*

Al contar con celdas solares con materiales con propiedades fotovoltaicas, de bajo costo, fácil de fabricar, pero sobretodo, con un gran aporte al cuidado y protección del medio ambiente, entonces, se acomodan simétricamente dentro de módulos fotovoltaicos para su aplicación.

### 3.15 MÓDULO FOTOVOLTAICO

Un módulo fotovoltaico (FV) no es más que un arreglo de celdas solares individuales conectadas eléctricamente entre sí, para de esta manera sumar la potencia de salida de cada una. Las celdas solares son encapsuladas para ser protegidas del ambiente y para que los usuarios sean también protegidos de posibles accidentes eléctricos. Un conjunto de módulos conectados entre sí conforman un panel. El conjunto de varios paneles constituye un sistema fotovoltaico.

Varios aspectos en el diseño de los módulos FV, que pueden reducir el rendimiento de la potencia del modulo o su tiempo de vida son:

- Pérdidas debido a la interconexión de celdas solares con distintas características.
- La temperatura del módulo.

La densidad de empaquetamiento de las celdas solares en un modulo FV se refiere al área del modulo que se cubre con celdas solares respecto al área total del modulo. La densidad de empaquetamiento influye en su temperatura de operación así como el costo final del módulo.

Normalmente el voltaje del módulo FV se escoge que sea compatible con una batería de 6 ó 12 volts. De igual forma, el voltaje del módulo FV está determinado por el numero de celdas solares conectadas en serie, la corriente que circula a través del modulo, depende principalmente del área de las celdas solares y de su eficiencia de conversión [26].

Cada celda solar tiene un voltaje específico dado de los materiales que la conforman. Por lo tanto, para aumentar el valor del voltaje es necesario conectar varias celdas solares en serie, en donde el voltaje individual de cada celda se suma al de la siguiente y así sucesivamente hasta obtener un voltaje total del panel solar requerido para su aplicación. Si el caso es, de aumentar la corriente, es necesario conectar varias celdas solares en paralelo o aumentar el área superficial de cada celda solar conectada en serie.

En el caso de las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica, es muy importante evaluar, en dependencia del presupuesto que se dispone, el consumo de energía que se pretende y en función de ello, instalar el número requerido de paneles fotovoltaicos. El dimensionado del sistema fotovoltaico viene ajustado por las necesidades de garantizar un suministro constante aun en las peores condiciones.

Para el consumo, el dato que se necesita recabar de cada equipo es su potencia nominal que aparece declarada por el fabricante. La energía necesaria para el consumo del equipo en cuestión, será entonces el producto de la potencia de cada equipo por el número de horas diarias de funcionamiento. Para una optimización de la energía que se obtienen de los paneles, estos deben poseer la orientación de norte a sur [27].



## 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 4.1 REACTIVOS, MATERIAL Y EQUIPO

Los reactivos que se utilizaron son:

- Metanol [CH<sub>3</sub>OH].
- Sulfato de cobre (I) [Cu<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>].
- Acetato de zinc [(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Zn] de Sigma-Aldrich con pureza de 99.99%.
- Alcohol isopropilico [(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CHOH] de Jalmek con pureza de 99%.
- Acetona [(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO] de Jalmek con pureza de 98.2%.
- Agua desionizada de 18 MegaOhms.
- Arena.

El material que se utilizó para la preparación y ejecución de los experimentos es:

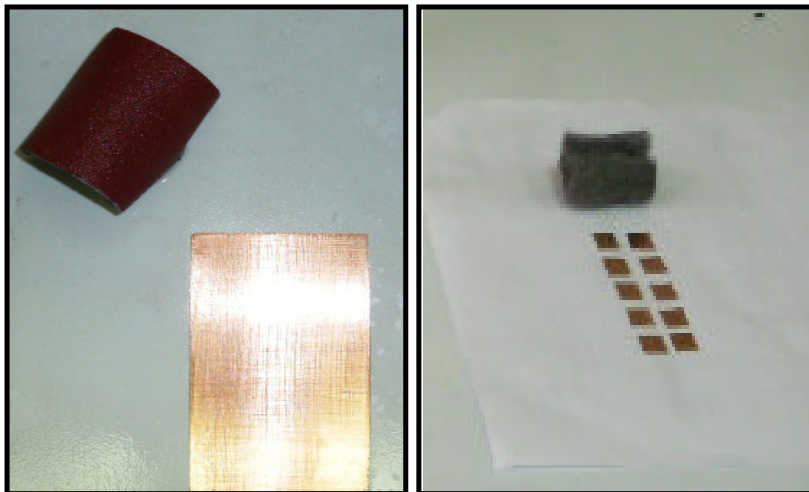
- 1 lija exclusiva para cobre.
- 2 vasos de precipitado de 10 ml cada uno.
- 2 pipetas Pasteur.
- 1 caja petri.
- 1 vaso de precipitado de 1000 ml.
- 1 termómetro de 150 °C.
- 1 matraz volumétrico de 100 ml.
- 1 vaso de precipitado de 100 ml.
- 3 portaobjetos.
- 3 cernidores de 500, 63 y 9 μm.
- 1 pinzas de punta fina.
- 1 pizeta.
- 1 espátula.

Los equipos que se utilizaron para la realización de los experimentos son:

- Parrilla eléctrica.
- Termoplato.
- Agitador magnético.
- Compresor de aire.
- Fuente de poder de corriente directa.
- Regulador de temperatura.
- Cronometro.
- Sonicador Misonix, modelo Microson XL-2000 UltrasonicCellDisruptor.
- Balanza analítica de la marca OHAUS, modelo Adventurer SL-AS214.
- Hornos Thermoscientific

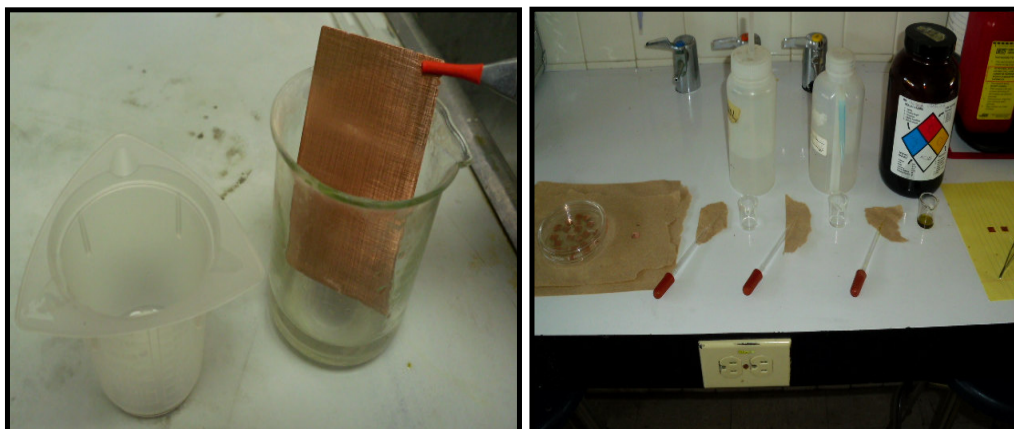
#### 4.2 ACONDICIONAMIENTO DEL SUBSTRATO

En primer lugar, se toma la placa de cobre y se corta a la medida correspondiente. Posteriormente, se toma la muestra, se enjuaga con agua desionizada y se lija con movimientos verticales y horizontales sobre la cara de interés, con la finalidad de aumentar mecánicamente la superficie activa. Esto, se muestra más claramente en la Figura 6.



**Figura 6.** (Izquierda) Placa de cobre de 4x7 cm. (Derecha) Placas de cobre de 1 cm<sup>2</sup> cada una.

En seguida, se aplica un tratamiento de limpieza para remover todo tipo de impurezas, como grasa o algún compuesto orgánico. Primero, la muestra se enjuaga con solución crómica, después con acetona, y después con metanol. Por último, se seca perfectamente. Esto, se muestra más claramente en la Figura 7.



**Figura 7.** (Izquierda) Tratamiento de limpieza para la placa de cobre de 4x7 cm. (Derecha) Tratamiento de limpieza con solución crómica, acetona y metanol.

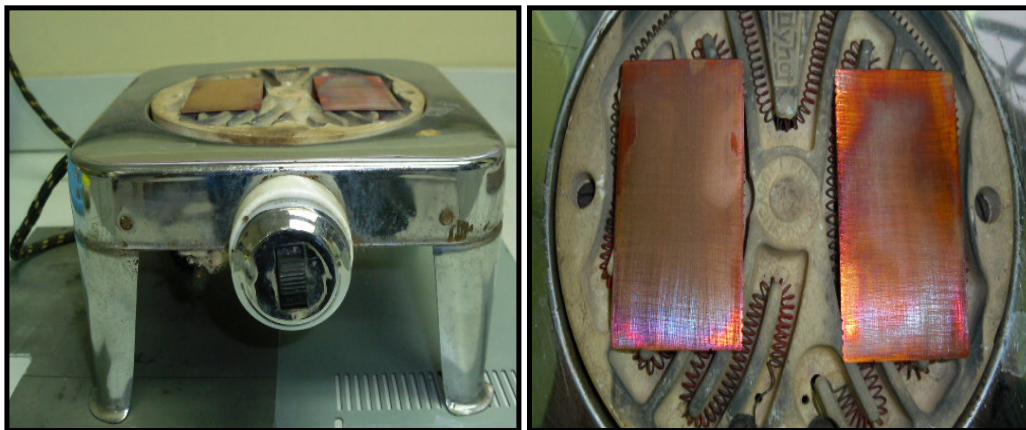
### 4.3 FORMACIÓN DEL OXIDO CUPROSO ( $\text{Cu}_2\text{O}$ )

#### 4.3.1 MÉTODO 1

Para favorecer una mayor generación del oxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), es sumamente importante la cantidad de oxígeno presente en el momento del proceso de oxidación. Por lo tanto, entre mayor cantidad de oxígeno exista, mayor es la formación del óxido cúprico ( $\text{CuO}$ ).

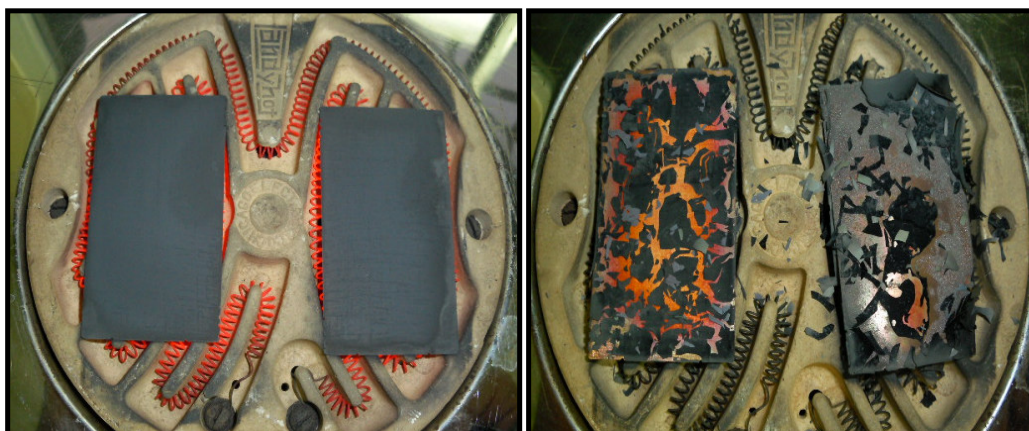
##### 4.3.1.1 SIN CONSIDERAR LA CANTIDAD DE OXIGENO PRESENTE

Se enciende la parrilla eléctrica. Una vez alcanzada una temperatura alta, se coloca la muestra con la cara de interés hacia arriba. La placa de cobre inmediatamente empezara a calentarse, la oxidación del cobre empezara a formarse, observando la diferencia en coloración naranja, morado y rojo cubriendo la superficie de cobre. Esto, se muestra más claramente en la Figura 8.



**Figura 8.** (Izquierda) Parrilla eléctrica con dos placas de cobre de 4x7 cm. (Derecha) Formación del óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) mediante el proceso de oxidación.

Se continua con el calentamiento por una hora y media, hasta observar una capa de color negro, correspondiente al óxido cúprico. Se apaga la parrilla eléctrica, se interrumpe el calentamiento y se deja enfriar, sin acelerar el proceso de enfriamiento para evitar pérdidas del proceso de oxidación, hasta observar como la capa de color negro que corresponde al óxido cúprico se empezara a levantar, arrancándose naturalmente. El de interés es el óxido cuproso, de color rojizo que se encuentra por debajo del óxido cúprico. Por último, después de una hora, se toma la placa de cobre para su uso, asegurándose de haber retirado por completo la capa de óxido cúprico. Esto, se muestra más claramente en la Figura 9.



**Figura 9.** (Izquierda) Después de 40 min de calentamiento. (Derecha) Después de una hora y media de calentamiento y media hora de enfriamiento, el óxido cúprico ( $\text{CuO}$ ) empezará a desprenderse.

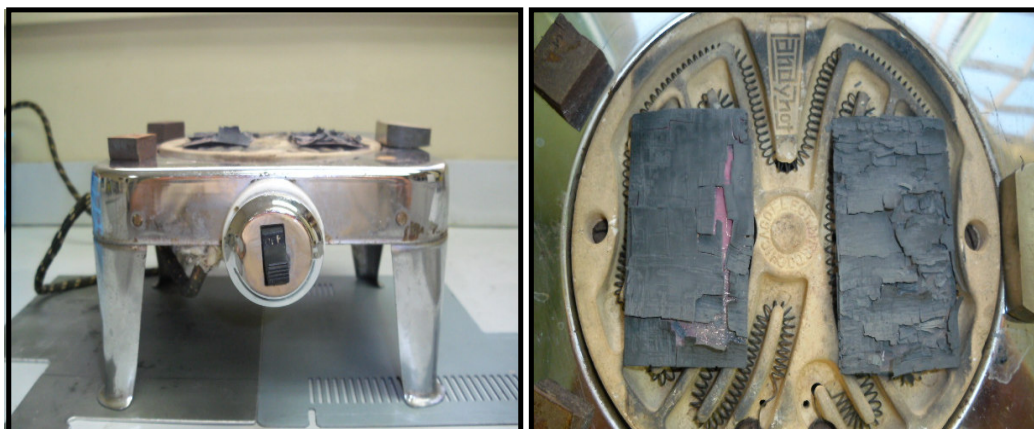
#### 4.3.1.2 CONSIDERANDO LA CANTIDAD DE OXIGENO PRESENTE

Se enciende la parrilla eléctrica. Una vez alcanzada una temperatura alta, se coloca la muestra con la cara de interés hacia arriba, inmediatamente se coloca la tapa metálica sobre la muestra. La placa de cobre inmediatamente empezara a calentarse y la oxidación del cobre empezara a formarse. Esto, se muestra más claramente en la Figura 10.



**Figura 10.** *Parrilla eléctrica, placa de cobre y tapa metálica con una distancia de abertura de 1.5 cm.*

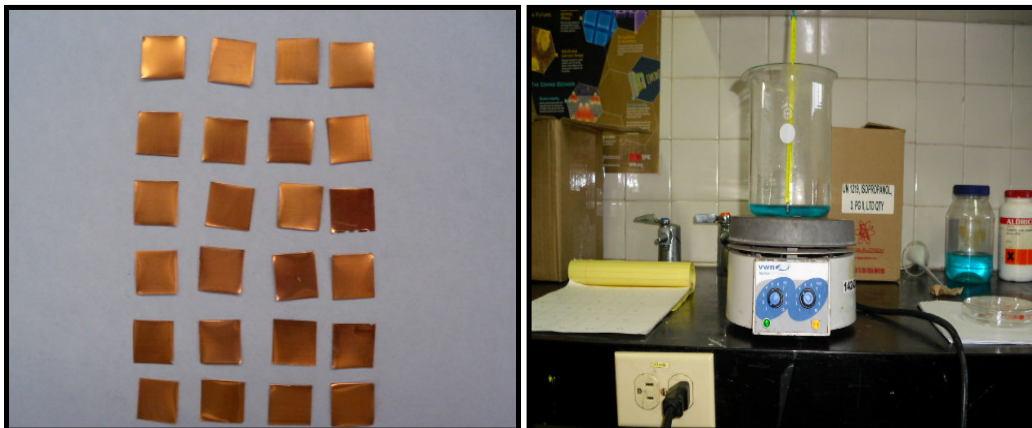
Se continúa con el calentamiento hasta una hora y media. Se apaga la parrilla eléctrica, se interrumpe el calentamiento y se deja enfriar, sin acelerar el proceso de enfriamiento para evitar pérdidas del proceso de oxidación, hasta observar como la capa de color negro que corresponde al óxido cúprico se empezara a levantar, arrancándose naturalmente. El de interés es el óxido cuproso, de color rojizo que se encuentra por debajo del óxido cúprico. Por último, después de una hora, se toma la placa de cobre para su uso, asegurándose de haber retirado por completo la capa de óxido cúprico [28]. Esto, se muestra más claramente en la Figura 11.



**Figura 11.** *(Izquierda) 30 min de enfriamiento. (Derecha) Desprendimiento del óxido cúprico (CuO).*

### 4.3.2 MÉTODO 2

Se prepara una solución de sulfato cuproso ( $\text{Cu}_2\text{SO}_4$ ) 0.001 M. Se vierte una cantidad apropiada de esta solución a un vaso de precipitado de 1000 ml y se coloca sobre un termoplato, alcanzando una temperatura de 80 °C, regulada mediante un termómetro de 150 °C. Esto, se muestra más claramente en la Figura 12.



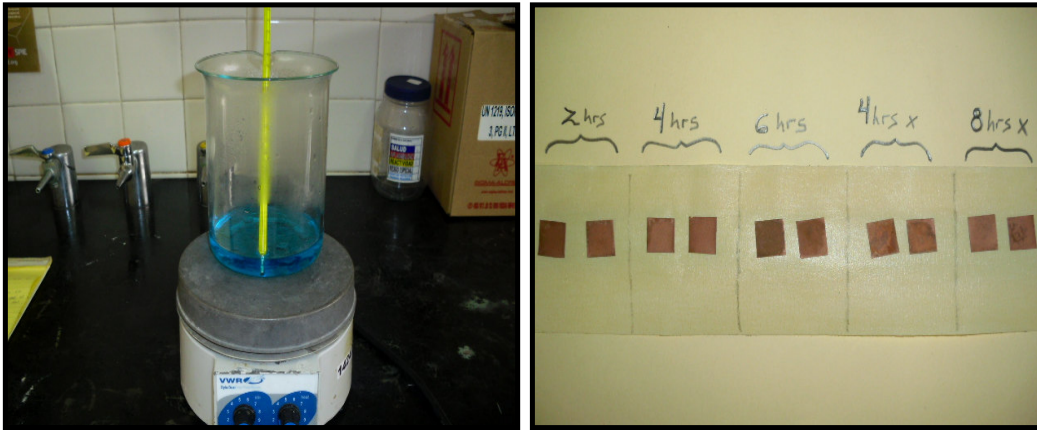
**Figura 12.** (Izquierda) Muestras de cobre de 1 cm<sup>2</sup> cada una. (Derecha) Solución de sulfato cuproso ( $\text{Cu}_2\text{SO}_4$ ) alcanzando una temperatura de 80°C.

Una vez alcanzada dicha temperatura, se introducen las placas de cobre previamente cortadas de 1cm<sup>2</sup> cada una y con el tratamiento de limpieza apropiado, dentro del vaso de precipitado de 1000 ml. Esto, se muestra más claramente en la Figura 13.



**Figura 13.** (Izquierda) Deposición química del óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) sobre las placas de cobre. (Derecha) Acercamiento al tratamiento químico.

En seguida, empezara la deposición química del óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) sobre las placas de cobre, debido al cobre presente en la solución, la temperatura indicada y un pH ligeramente ácido. Se tomaron diferentes muestras a diferentes tiempos de 2, 4, 6 y 8 hrs de tratamiento [29]. Esto, se muestra más claramente en la Figura 14.



**Figura 14.** (Izquierda) Deposición química del óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) sobre las placas de cobre. (Derecha) Muestras de 2, 4, 6 y 8 hrs de tratamiento químico.

#### 4.4 BAÑO DE ARENA

Con el propósito de aumentar más la rugosidad de la superficie activa (cara con el recubrimiento de óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ )), se someten a un baño de arena a presión. En primer lugar, se utilizan 3 cernidores de 500, 63 y 9  $\mu\text{m}$ , con la finalidad de lograr obtener la arena lo más fina posible. Esto, se muestra más claramente en la Figura 15 y 16.



**Figura 15.** (Izquierda) Cernidores de 500, 63 y 9  $\mu\text{m}$ . (Derecha) Se deposita cierta cantidad de arena, una y otra vez.



**Figura 16.** *(Izquierda) Se cierne la arena con movimientos circulares hasta obtener arena muy fina. (Derecha) Se recoge la arena muy fina en un recipiente con ayuda de una brocha.*

Por lo tanto, al tener una cantidad razonable de arena muy fina, se preparan las muestras sobre una hoja de cartón, con la cara de interés hacia arriba, cara que será expuesta al baño de arena a presión. Se utiliza un compresor de aire para bañar a presión cada una de las muestras con una o dos pasadas, con la arena muy fina obtenida. Esto, se muestra más claramente en la Figura 17.



**Figura 17.** *Baño de arena a presión sobre las muestras.*



## 4.5 FORMACIÓN DEL ÓXIDO DE ZINC (ZnO)

### 4.5.1 VÍA QUÍMICA

En primer lugar, se limpia la muestra con acetona y metanol. Se seca perfectamente la muestra y se pesa. Posteriormente, se prepara una suspensión precursora compuesta de 50 mg de acetato de zinc que se dispersan en 100 ml de alcohol isopropílico por medio de un sonicador durante 15 min. Esto, se muestra más claramente en la Figura 18.



**Figura 18.** (Izquierda)Sonicador,  $a=0.7$  ciclos y 25% de amplitud. (Derecha) *Sonicando la suspensión precursora.*

Después, se introduce la muestra en la solución precursora a manera de inmersión. Inmediatamente, se hornea a 80 °C por 5 min, con la finalidad de evaporar el solvente. En seguida, se hornea a 250 °C por 30 min, con la finalidad de favorecer la nucleación. Después, se enfría y se pesa. Se repite el procedimiento de acuerdo al espesor deseado. Se repite el procedimiento variando la temperatura a: 300 °C, 350 °C, 400 °C y 450 °C [30]. Esto, se muestra más claramente en la Figura 19.



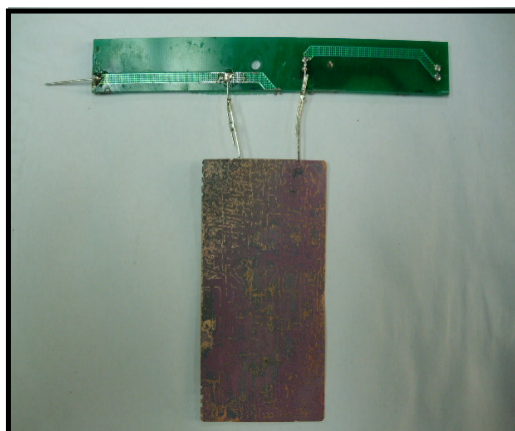
**Figura 19.** (Izquierda) Horno a 80 °C. (Derecha) Horno a 400°C.

Para este trabajo de tesis, se determinaron únicamente 2 inmersiones. Para la primera inmersión, se horneó a 80 °C por 5 min, después, se horneó a 400 °C por 10 min. Para la segunda inmersión, se horneó a 80°C por 5 min y después, se horneó a 400 °C por 30 min, así con cada una de las muestras.

Entre mayor se requiera la capa de óxido de zinc (ZnO), mas números de inmersión se deberán llevar a cabo.

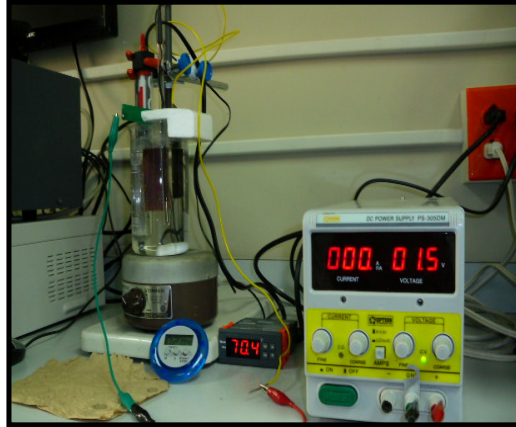
#### 4.5.2 VÍA ELECTROQUÍMICA

Una vez lista la placa de cobre con el recubrimiento fotovoltaico de óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), se prepara para la generación del óxido de zinc (ZnO), colocándole un adaptador para mantener su estabilidad dentro de la celda electroquímica. Esto, se muestra más claramente en la Figura 20.

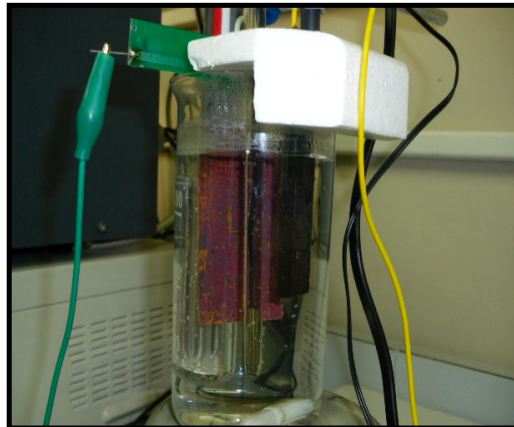


**Figura 20.** *Placa de cobre con recubrimiento fotovoltaico de óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ).*

Se prosigue, a preparar el sistema electroquímico. Fuente de poder de corriente directa, celda electroquímica, regulador de temperatura, agitador magnético, cronometro, soporte universal, pinzas para soporte y cables de conexión. En primer lugar, se prepara una solución de nitrato de zinc [ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ] 1 M en 500 ml. Después, se vierte esta solución en una celda electroquímica de cuarzo, después, se colocan el electrodo de trabajo (material fotovoltaico), el electrodo auxiliar o contraelectrodo (grafito) y el electrodo de referencia (Ag/AgCl, con solución de KCl 3M), y ya por último, se introduce el regulador de temperatura, con la finalidad de mantener la solución a una temperatura constante, sostenido mediante unas pinzas para soporte y estas a su vez, en un soporte universal. Se coloca la celda electroquímica sobre un agitador magnético con agitación moderada y se realizan las conexiones correspondientes. Se considera, una temperatura de 70 °C para la solución, se enciende la fuente de poder a un voltaje de 1.5 V y se lleva a cabo el experimento durante 30 a 40 min. Esto, se muestra más claramente en la Figura 21 y 22.



**Figura 21.** *Sistema electroquímico.*



**Figura 22.** *Acercamiento a la celda electroquímica.*

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado de la tesis, se lleva a cabo la presentación y discusión de los resultados obtenidos de un lote de muestras, de acuerdo al siguiente orden:

1. Muestras finales.
2. Caracterización de las muestras.
3. Análisis de las propiedades fotovoltaicas.

Se lleva a cabo este orden, debido, a que es importante en primer lugar, tener terminado el lote de muestras para sus estudios posteriores. En segundo lugar, se muestra la caracterización del lote de muestras, en el que se determina la superficie, composición y estructura de cada una de las muestras. Y por último, en tercer lugar, se observa el análisis de las propiedades fotovoltaicas, se analiza su respuesta ante la exposición de luz y sus propiedades eléctricas, para la determinación de un material fotovoltaico.

### 5.1 MUESTRAS FINALES

Se considero un lote de muestras, se utilizó una placa de cobre puro, la cual se corto para generar varias muestras, todas ellas de un  $1 \text{ cm}^2$ . Se variaron ciertas condiciones, tales como: área superficial de la muestra, método de limpieza de la muestra para su utilización, tiempo de calentamiento de la muestra para la formación del óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), tiempo de exposición de la muestra en la solución de sulfato cuproso ( $\text{Cu}_2\text{SO}_4$ ), número de inmersiones, temperatura de horneado, tiempo de horneado, entre otras. Todas ellas, con la finalidad de encontrar las condiciones óptimas que generaran un material fotovoltaico capaz de convertir la energía solar en energía eléctrica.

Por lo tanto, en la Tabla 1, se muestran las condiciones a las cuales fueron sometidas cada una de las muestras finales, indicando la preparación, métodos de aplicación y datos importantes a considerar desde su comienzo hasta el paso final.

Con ello, se puede tener más claramente el proceso de fabricación de cada una de las muestras y entonces sí, tomar una muestra en particular, caracterizarla y analizar sus propiedades fotovoltaicas, con el único objetivo de optimizar su proceso de fabricación y sus características como material fotovoltaico.

Tabla de muestras

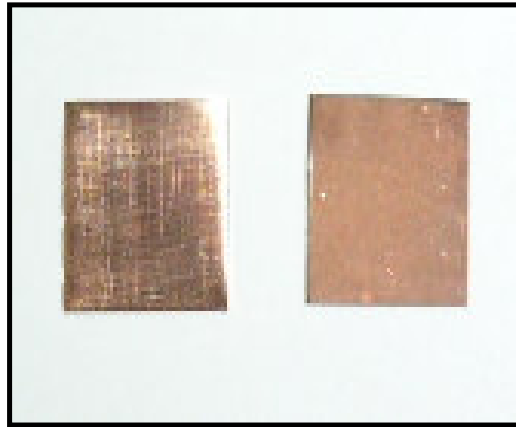
No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
1		X	2		0.2587	0.2587		Cu, Cu <sub>2</sub> O	
3		X	2		0.2557	0.2564	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	
5		X	2	X	0.2549	0.2542	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	
6		X	4		0.2493	0.2493		Cu, Cu <sub>2</sub> O	
8		X	4		0.2524	0.2448	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	
10		X	4	X	0.2448	0.2383	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	
11		X	6		0.2330	0.2330		Cu, Cu <sub>2</sub> O	
13		X	6		0.2632	0.2632	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	
15		X	6	X	0.2398	0.2410	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	
16	X		4		0.2384	0.2384		Cu, Cu <sub>2</sub> O	
18	X		4		0.2404	0.2412	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	
20	X		4	X	0.2404	0.2410	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	
21	X		8		0.2215	0.2215		Cu, Cu <sub>2</sub> O	
23	X		8		0.2377	0.2381	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	
25	X		8	X	0.2392	0.2395	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	
26	X		Por calentamiento (2 hrs)				400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	Cobre mas delgado
28	X		Por calentamiento (18.76 seg)				400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	Al interperie
30	X		Por calentamiento (35 seg)				400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	Al interperie
31	X		Por calentamiento (2 hrs)				400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	Al interperie
32	X		Por calentamiento (2 hrs)				400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	Con tapa, 5 cm de alt.

Tabla 1. Datos de un lote de muestras, aplicando el metodo 1 y el metodo 2.

## 5.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

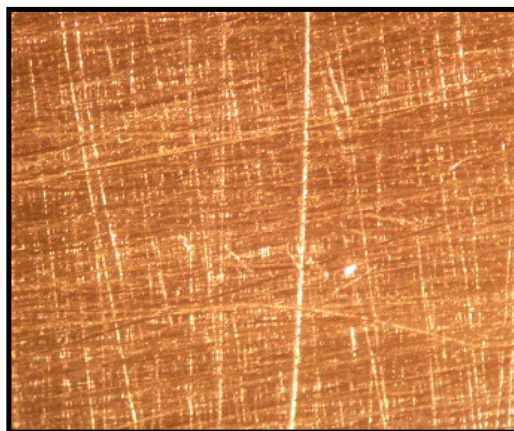
### 5.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA CAPA CUPROSA ( $\text{Cu}_2\text{O}$ )

La superficie de las placas de cobre fueron observadas por microscopio óptico, antes y después de su tratamiento. En la Figura 23, se muestran claramente dos muestras, en donde una de ellas es solamente una placa de cobre sometida a un tratamiento de lijado y la otra, es una placa de cobre con un recubrimiento de óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ).

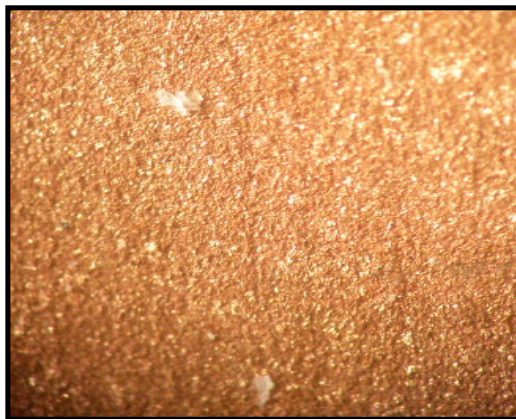


**Figura 23.** *(Izquierda) Placa de cobre (Cu). (Derecha) Placa de cobre con un recubrimiento de óxido cuproso (Cu/Cu<sub>2</sub>O).*

Las fotos presentadas en la Figura 24 y Figura 25 fueron tomadas con un Microscopio Axiostar plus Zeiss, con un aumento de Ocular: 10x y Revolver: 10x.



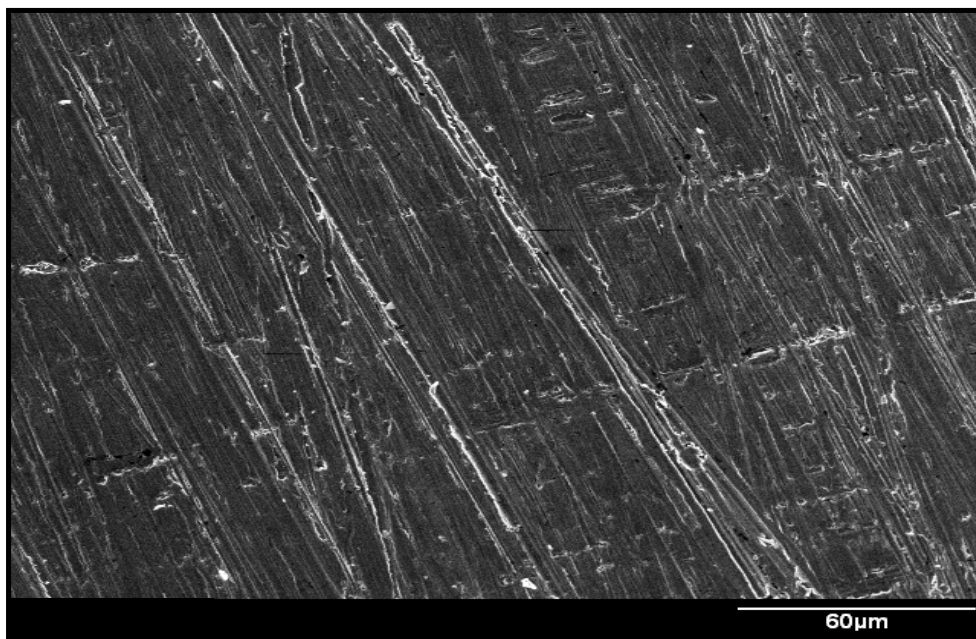
**Figura 24.** *Muestra de cobre (Cu), aplicando lijado en forma vertical y horizontal para aumentar la superficie.*



**Figura 25.** *Muestra de óxido cuproso sobre cobre (Cu/Cu<sub>2</sub>O).*

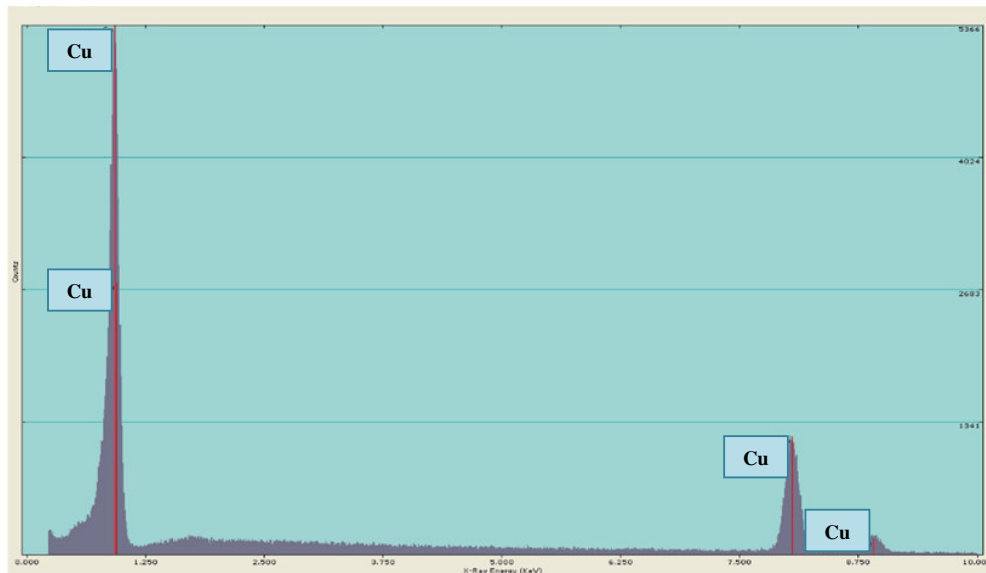
Para aumentar la superficie de las placas de cobre se aplicó un lijado (tratamiento mecánico), placas que fueron utilizadas para la formación de los recubrimientos de óxido cuproso (Cu<sub>2</sub>O) y óxido de zinc (ZnO) con propiedades fotovoltaicas y el aumento de la superficie fue determinado mediante la aplicación del método conductométrico. La Figura 26 y 27, muestran la caracterización del cobre (Cu) como sustrato para el desarrollo de fotovoltaicos.

Aplicando la técnica de SEM (Microscopia Electrónica de Barrido), se caracterizo de manera visible la rugosidad de la superficie de cobre (Cu) debido al lijado previamente realizado en forma vertical y horizontal, indicado en la Figura 24.



**Figura 26.** *Mediante la técnica de SEM, se muestra la estructura del cobre (Cu) con un aumento de 500x.*

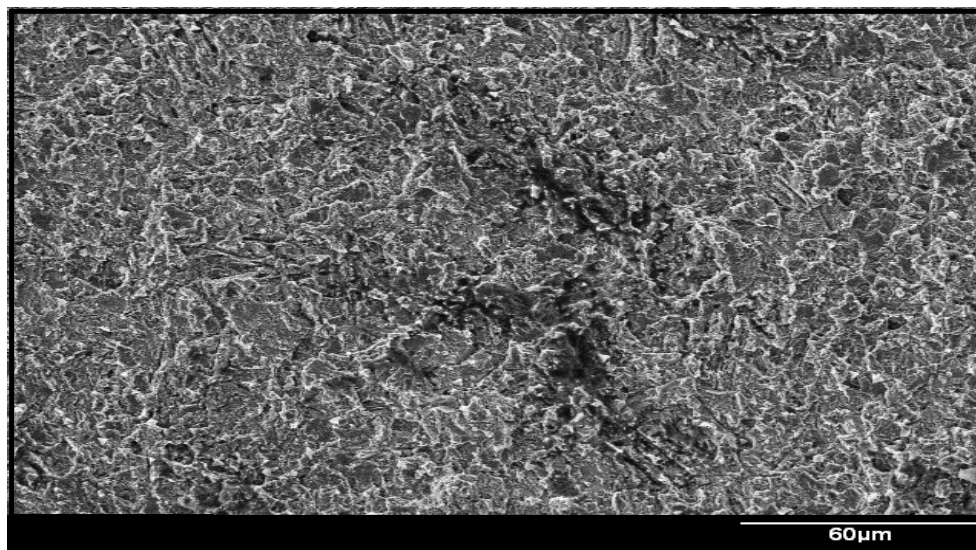
Para evitar la influencia de contaminantes en el cobre, su pureza se determino aplicando la técnica de EDS. En el espectrograma se muestra la presencia de cobre (Cu) siendo el elemento químico único presente, indicado en la Figura 27.



**Figura 27.** Mediante la técnica de EDS, se muestra cada uno de los elementos químicos presentes en la estructura química.

La técnica SEM se aplico para la caracterización de la superficie de cobre cubierta con óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), un semiconductor de tipo-p. En la Figura 28 y Figura 29, se muestra la caracterización del óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ).

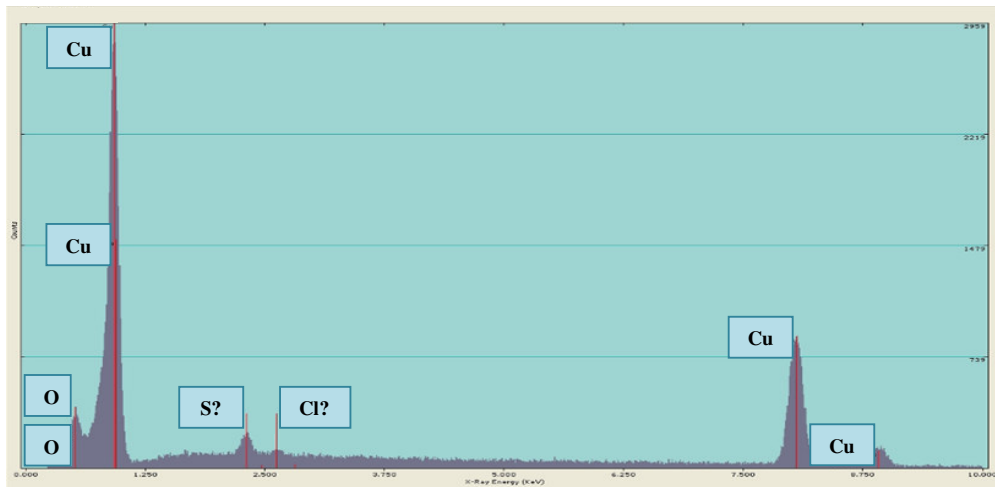
Aplicando la técnica de SEM, se registro la formación de los cristales correspondientes al óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), indicados en la Figura 25.



**Figura 28.** Mediante la técnica de SEM, se muestra la estructura del óxido de cobre (I) sobre cobre ( $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}$ ) con un aumento de 500x.



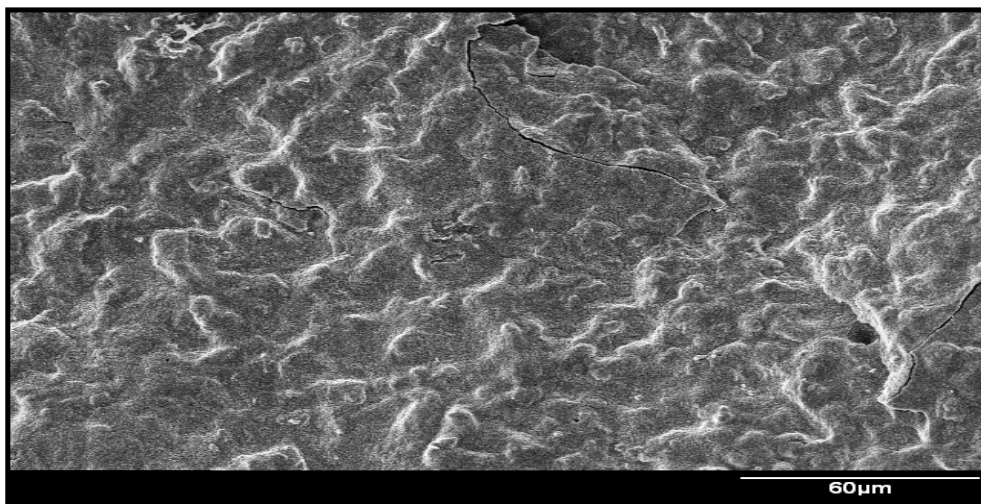
Aplicando la técnica de EDS, se muestra la presencia de cobre (Cu) y oxígeno (O), siendo elementos químicos participantes en la formación del óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), indicados en la Figura 29.



**Figura 29.** Mediante la técnica de EDS, se muestra cada uno de los elementos químicos presentes en la estructura química.

### 5.2.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CAPA DE ÓXIDO DE ZINC ( $\text{ZnO}$ )

Para completar el fotovoltaico, es necesario sobre la capa de óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) depositar una capa de óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ), la cual cuenta con propiedades como semiconductor de tipo-n. Esta capa se deposita vía electroquímica, aplicando electrolisis, deposición de zinc metálico ( $\text{Zn}$ ) y posteriormente su oxidación. También, se deposita vía química, aplicando inmersión, técnica que consiste en sumergir el material fotovoltaico por algunos segundos en una solución preparada conteniendo zinc ( $\text{Zn}$ ) y posteriormente un horneado, para favorecer la nucleación del óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) en el óxido cuproso sobre cobre ( $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}$ ). Esto, se muestra en la Figura 30.



**Figura 30.** Mediante la técnica de SEM, se muestra la estructura del óxido de zinc, óxido de cobre (I) sobre cobre ( $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}, \text{ZnO}$ ) con un aumento de 500x.

### 5.3 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FOTOVOLTAICAS

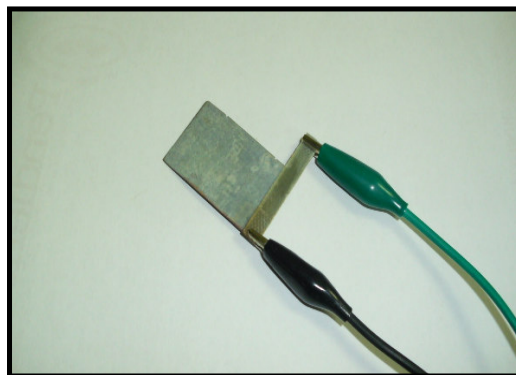
#### 5.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS FOTOVOLTAICOS PREPARADOS VÍA ELECTROQUÍMICA

El material fotovoltaico generado vía electroquímica, el cual contiene, una placa de cobre (Cu) como substrato, el óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), semiconductor tipo-p y un segundo recubrimiento de óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ), semiconductor de tipo-n, y de esta manera, se completa la unión n-p, como material con propiedades fotovoltaicas (convertidor de energía solar a energía eléctrica). Esto, se muestra más claramente en la Figura 31.

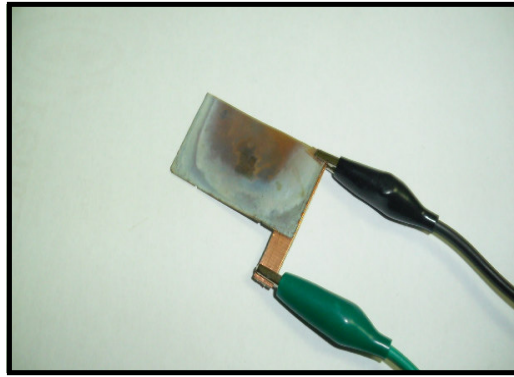


**Figura 31.** *Convertidor con propiedades fotovoltaicas generado vía electroquímica.*

Se realizan las conexiones eléctricas correspondientes. Para ello, se utiliza una barra pequeña de cobre, aislada por uno de sus lados, con el objetivo de únicamente servir como contacto eléctrico por uno de sus lados, debido a que cada cable eléctrico con su respectivo caimán debe hacer contacto, uno en una cara del convertidor, sin tocar la otra cara y el otro, hacer contacto en la cara restante. Esto, se muestra más claramente en la Figura 32 y 33.

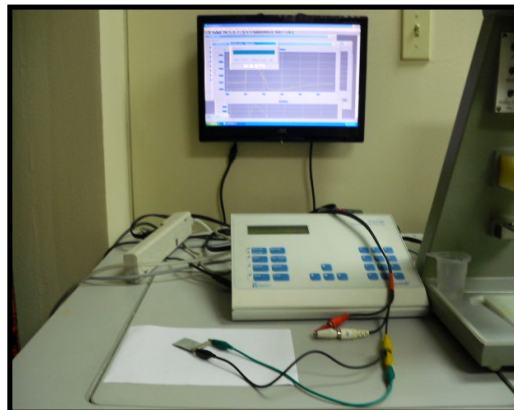


**Figura 32.** *Contacto eléctrico en la cara superior.*



**Figura 33.** *Contacto eléctrico en la cara inferior.*

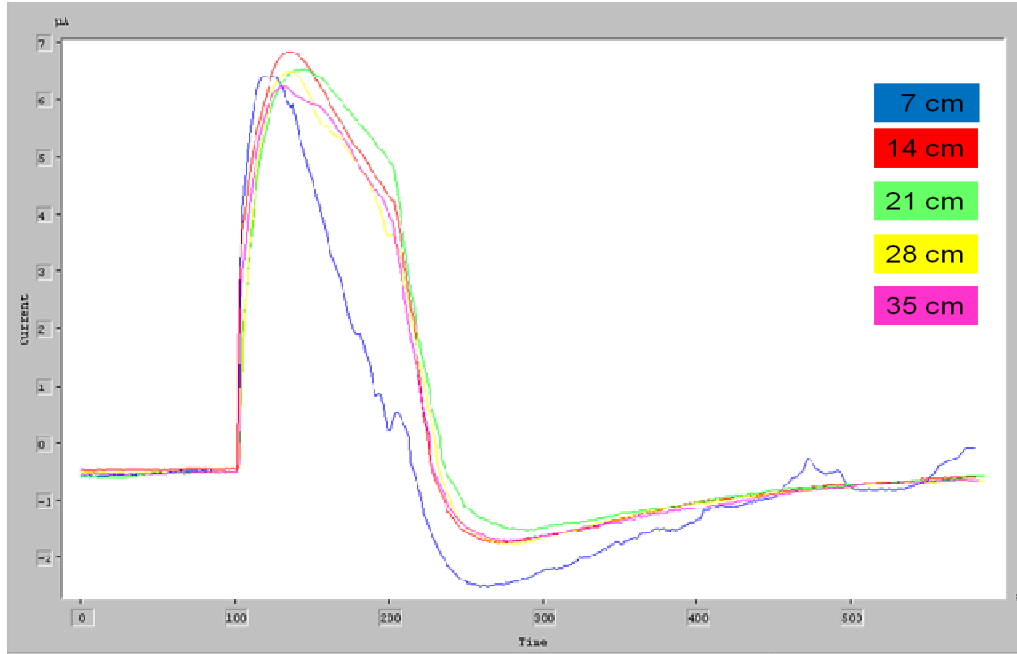
Se prosiguió a comprobar las propiedades fotovoltaicas del convertidor. Se encendió el equipo y se realizaron las conexiones correspondientes. Esto, se muestra más claramente en la Figura 34.



**Figura 34.** *Equipo utilizado para la caracterización eléctrica del material fotovoltaico.*

Las propiedades fotoeléctricas del convertidor desarrollado mediante el Método 1, se muestran en la grafica en coordenadas: Corriente vs. Tiempo, a diferentes distancias de 7, 14, 21, 28 y 35 cm de exposición de luz blanca directa al convertidor en un intervalo de tiempo de 100 seg. Esto, se muestra más claramente en la Figura 35.

Para todas las diferentes distancias, el convertidor registro corriente a tal exposición de luz blanca. Exactamente, al momento de hacer incidir luz blanca sobre el convertidor, este aumento su corriente. Entre más rápido se calentaba el convertidor, mas rápido era su disminución en corriente. Sin exposición de luz al convertidor, este, mantiene una corriente de cero.



**Figura 35.** Corriente vs Tiempo. A diferentes distancias (Intensidad de luz).

Distancia de la lampara al material fotovoltaico (cm)	Corriente maxima ( $\mu\text{A}$ )
7	6.40
14	6.80
21	6.50
28	6.45
35	6.20

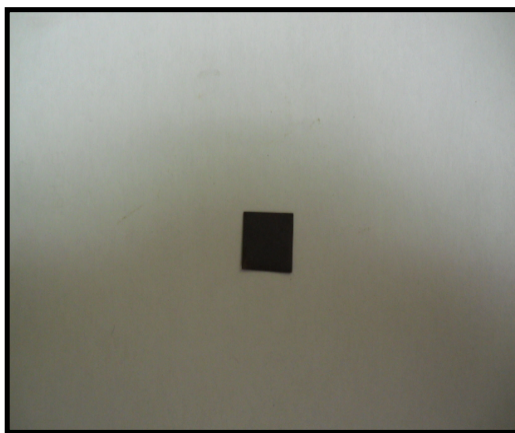
**Tabla 2.** Valores de corriente máxima alcanzada a diferentes distancias en un tiempo de 100 seg.

Comparando las diferentes distancias, se determina que a una distancia de 14 cm de incidencia de luz blanca sobre el convertidor, se obtuvo la respuesta más favorable en corriente de  $6.80 \mu\text{A}$ . Debido a que su corriente es mayor y su disminución en corriente es lenta, lo que garantiza un material fotovoltaico con propiedades fotoeléctricas buenas a diferencia de las demás.

### 5.3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS

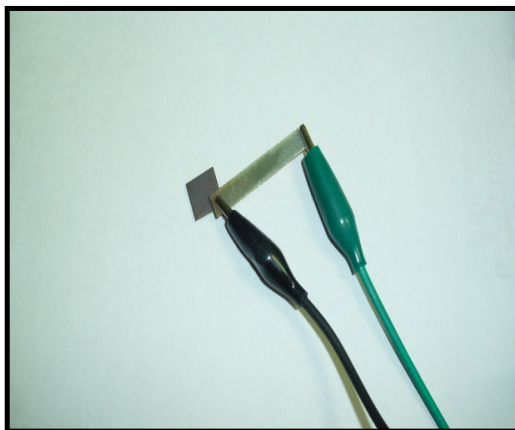
#### FOTOVOLTAICOS PREPARADOS VÍA QUÍMICA

Por otro lado, se toma el material fotovoltaico generado vía química. El material fotovoltaico tiene la misma estructura fotovoltaica, que el material fotovoltaico generado vía electroquímica: una placa de cobre (Cu) como sustrato, como primer recubrimiento, el óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) semiconductor de tipo-p y un segundo recubrimiento, el óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) semiconductor de tipo-n. La diferencia entre un material fotovoltaico generado vía electroquímica o vía química, radica en el método de deposición del semiconductor tipo-n,  $\text{ZnO}$ . Esto, se muestra más claramente en la Figura 36.

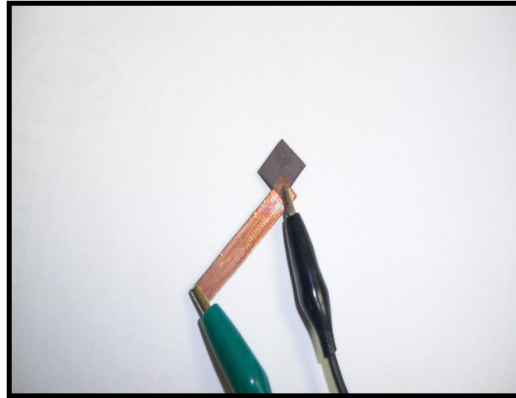


**Figura 36.** *Convertidor con propiedades fotovoltaicas generado vía química.*

Se realizan las conexiones eléctricas correspondientes. Para ello, se utiliza una barra pequeña de cobre, aislada por uno de sus lados, con el objetivo de únicamente servir como contacto eléctrico por uno de sus lados, debido a que cada cable eléctrico con su respectivo caimán debe hacer contacto, uno en una cara del convertidor, sin tocar la otra cara y el otro, hacer contacto en la cara restante. Esto, se muestra más claramente en la Figura 37 y 38.

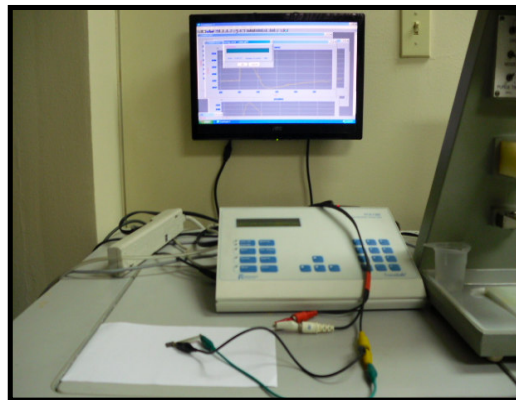


**Figura 37.** *Contacto eléctrico en la cara superior.*



**Figura 38.** *Contacto eléctrico en la cara inferior.*

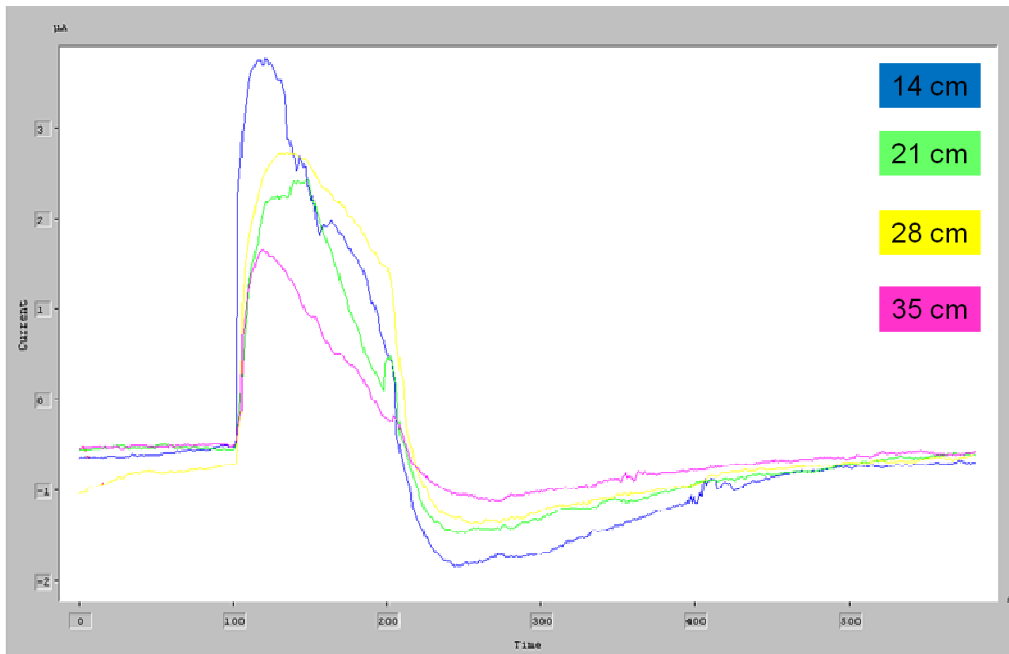
Se prosiguió a comprobar las propiedades fotovoltaicas del convertidor. Se encendió el equipo y se realizaron las conexiones correspondientes. Esto, se muestra más claramente en la Figura 39.



**Figura 39.** *Equipo utilizado para la caracterización eléctrica del material fotovoltaico.*

En la Figura 40, las propiedades foto-eléctricas del convertidor, desarrollado mediante el Método 2, se muestran en la grafica en coordenadas: Corriente vs. Tiempo, a diferentes distancias de 7, 14, 21, 28 y 35 cm de exposición de luz blanca directa al convertidor en un intervalo de tiempo de 100 seg.

Para todas las diferentes distancias, el convertidor registro corriente a tal exposición de luz blanca. Exactamente, al momento de hacer incidir luz blanca sobre el convertidor, este aumento su corriente. Entre más rápido se calentaba el convertidor, mas rápido era su disminución en corriente. Sin exposición de luz al convertidor, este, mantiene una corriente de cero.



**Figura 40.** Corriente vs Tiempo. A diferentes distancias (Intensidad de luz).

Distancia de la lampara al material fotovoltaico (cm)	Corriente maxima ( $\mu\text{A}$ )
14	3.75
21	2.40
28	2.70
35	1.60

**Tabla 3.** Valores de corriente máxima alcanzada a diferentes distancias en un tiempo de 100 seg.

Comparando las diferentes distancias, se determina que a una distancia de 14 cm de incidencia de luz blanca sobre el convertidor, se obtuvo la respuesta más favorable en corriente de 3.75  $\mu\text{A}$ . Debido a que su corriente es mayor y su disminución en corriente es lenta, lo que garantiza un material fotovoltaico con propiedades foto-eléctricas buenas a diferencia de las demás.

## 5.4 COMPARACIÓN ENTRE LA VÍA ELECTROQUÍMICA Y LA VÍA QUÍMICA

Haciendo una comparación, entre los dos convertidores generados uno vía electroquímica y el otro vía química, Se observa, que a una distancia de 14 cm, a diferencia de las demás distancias, tanto para el convertidor generado vía electroquímica con una área superficial de  $8 \text{ cm}^2$ , se alcanza una corriente máxima de  $6.80 \mu\text{A}$  en un tiempo de 100 seg. Y para el convertidor generado vía química con un área superficial de  $1 \text{ cm}^2$ , se alcanza una corriente máxima de  $3.75 \mu\text{A}$  en un tiempo de 100 seg. es la longitud más favorable para obtener la mayor cantidad de corriente posible al hacer incidir luz blanca sobre el convertidor con propiedades fotovoltaicas y su disminución en cantidad de corriente es lenta, siendo esto, muy bueno para un material que funciona como convertidor de energía solar en energía eléctrica.



## 6. CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se llegó en este trabajo de investigación son:

- Se desarrollaron recubrimientos fotovoltaicos mediante cobre (Cu) y zinc (Zn) de tipo: óxido de zinc, óxidos de cobre sobre cobre [Cu/(Cu<sub>2</sub>O-CuO),ZnO] utilizando procesos de bajo costo, como son: proceso químico y proceso electroquímico.
- Las estructuras de óxido de zinc y óxidos de cobre [Cu/(Cu<sub>2</sub>O-CuO),ZnO] fueron caracterizadas y optimizadas con respecto a sus propiedades fotovoltaicas. En base a los resultados, se determinó que, a 14 cm de distancia entre la lámpara de exposición de luz blanca directa y el material fotovoltaico de 8 cm<sup>2</sup> generado **vía electroquímica**, se obtuvo la corriente máxima de 6.80 μA en un tiempo de 100 seg. a diferencia de las demás. Así mismo, a 14 cm de distancia entre la lámpara de exposición de luz blanca directa y el material fotovoltaico de 1 cm<sup>2</sup> generado **vía química**, se obtuvo la corriente máxima de 3.75 μA en un tiempo de 100 seg. a diferencia de las demás.
- En comparación al método aplicado para la formación del material fotovoltaico tanto por vía electroquímica como por vía química, se determina que las dos vías son muy eficientes, dando resultados confiables y favorables, con algunas diferencias en: tiempo de preparación y número de equipos o aparatos a utilizar.

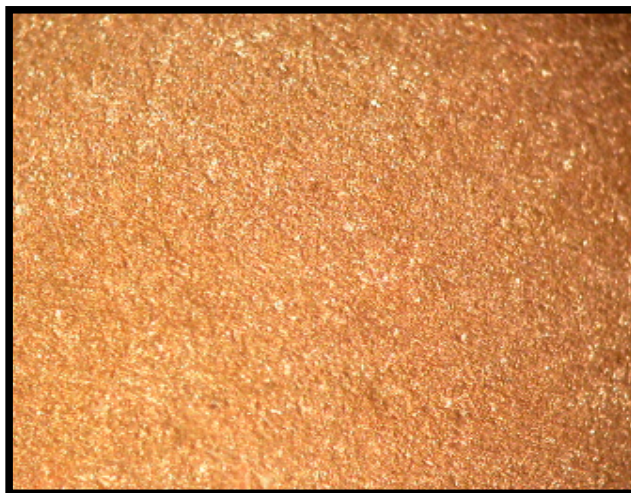
## 7. REFERENCIAS

- [1, 3] José A. Manrique, *Energía Solar, Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas*, HARLA S.A. de C.V., **1984**.
- [2, 5, 8, 10, 16, 26, 27] Héctor M. Poggi Varaldo (CINVESTAV), Alfonso Martínez Reyes (TESE), José A. Pineda-Cruz (TESE), Sergio Caffarel-Mendez (TESE), Coeditores, *Ciencia y Tecnología* N° 2, pág. 5 – 45, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (Editor), México, ISBN 978-607-95065-0-6, **2009**.
- [4, 6, 28] Unit 5-Renewables, Sección 3-Solar Energy
- [7, 9, 15, 17, 25] Dante DeMeo, Samuel MacNaughton, Simmer Sonkusale and Thomas E. Vandervelde, *Electrodeposited Copper Oxide and Zinc Oxide Core-Shell Nanowire Photovoltaic Cells*, Tufts University, USA.
- [11] R.B. Hall and J.D. Meakin, *Institute of Energy Conversion*, University of Delaware, Newark, Del. 19711, U.S.A.
- [12] Jackson, P., Hariskos, D., Lotter, E., Paetel, S., Wuerz, R., Menner, R., Wischmann, W. and Powalla, M., New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells beyond 20%. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19: 894–897. doi: 10.1002/pip.1078, **2011**.
- [13] Brian M. Keyes, Falah Hasoon, Pat Dippo, Ahmet Balcioglu, and Fuad Abulfotuh, *National Renewable Energy Laboratory*, Golden, CO 80401.
- [14] A. Romeo, M. Terheggen, D. Abou-Ras, D. L. Batzner, F. J. Haug, M. Kalin, D. Rudmann and A. N. Tiwari.
- [18] Fernando C.A.N. and Wetthsinghe S. K., *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 70, 121 – 129, **2001**.
- [19] Yoon, K. H., Choi W. J., Kang D. H., *Thin Solid Films*, 372, 259, **2000**.
- [20] Wickoff W.G. *Crystal Structures*, Wiley-Interscience. New York. Vol. 1, **1960**.
- [21] Werner A. and Hocheimer H. D., *Phys. Rev., B*, 25, 5929, **1992**.

- [22] S. Chakrabarti and B. K. Dutta, "Photocatalytic Degradation of Model Textile Dyes in Wastewater Using ZnO as Semiconductor Catalyst," *Journal of Hazardous Materials*, pp. 269-278, Vol. 112. No. 3, **2004**.
- [23] S. T. Shishiyanu, T. S. Shishiyanu and O. I. Lupen "Sensing Characteristics of Tin-Doped ZnO Thin Films as NO<sub>2</sub> Gas Sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, pp. 379-386, Vol. 107, No. 1, **2005**.
- [24] M. H. Huang, S. Mao, H. Feick, H. Yan, Y. Wu, H. Kind, E. Weber, R. Russo and P. Yang, "Room-Temperature Ultraviolet Nanowire Nanolasers", pp. 1897-1899, *Science*, Vol. 292, No. 5523, **2001**.
- [29] A. M. Ruiz, E. D. A. Magallanes, B. V. Salas, Ma. G. M. Armenta, and N. Takeuchi "Development and evaluation of electrochemical cells for water splitting in H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> from solar energy. (first part: photoelectrodes)".
- [30] M. Saleem, L. Fang, A. Wakeel, M. Rashad and C. Y. Kong "Simple preparation and characterization of nano-crystalline zinc oxide thin films by sol-gel method on glass substrate" *World Journal of Condensed Matter Physics*, 2, 10-15, **2012**.

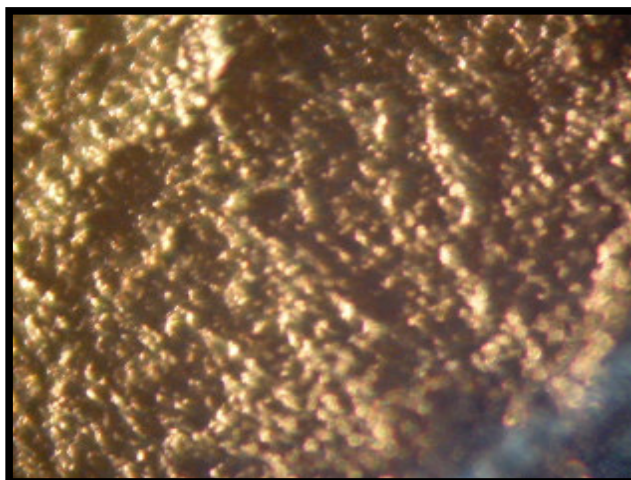
## 8. ANEXO

De acuerdo a la Tabla de Resultados presentada en la sección de Análisis de Resultados y Discusión, es que las siguientes Figuras corresponden a las muestras generadas. Fueron tomadas con un Microscopio Axiostar plus Zeiss, con un aumento de Ocular: 10x y Revolver: 10x. Esto, se muestra más claramente de la Figura 41 a la Figura 60.



No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
1		X	2		0.2587	0.2587		Cu, Cu <sub>2</sub> O	

**Figura 41. Muestra #01**



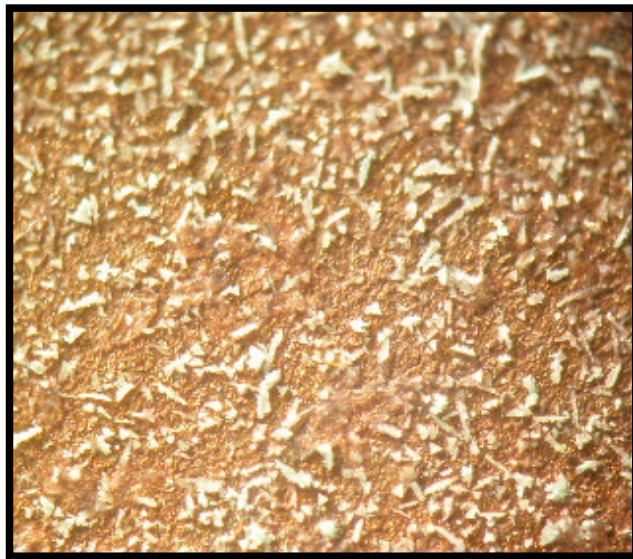
No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
3		X	2		0.2557	0.2564	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	

**Figura 42. Muestra #03**



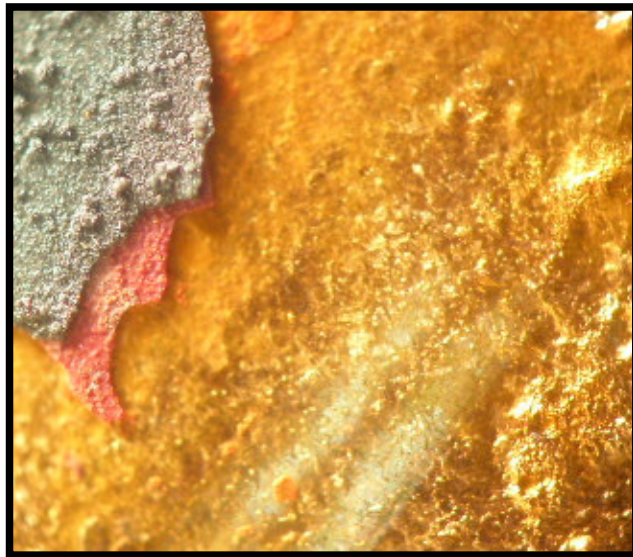
No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
5		X	2	X	0.2549	0.2542	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	

**Figura 43. Muestra #05**



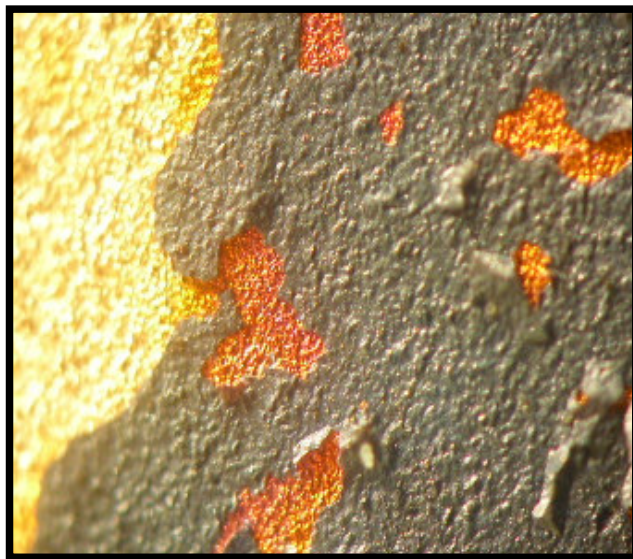
No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
6		X	4		0.2493	0.2493		Cu, Cu <sub>2</sub> O	

**Figura 44. Muestra #06**



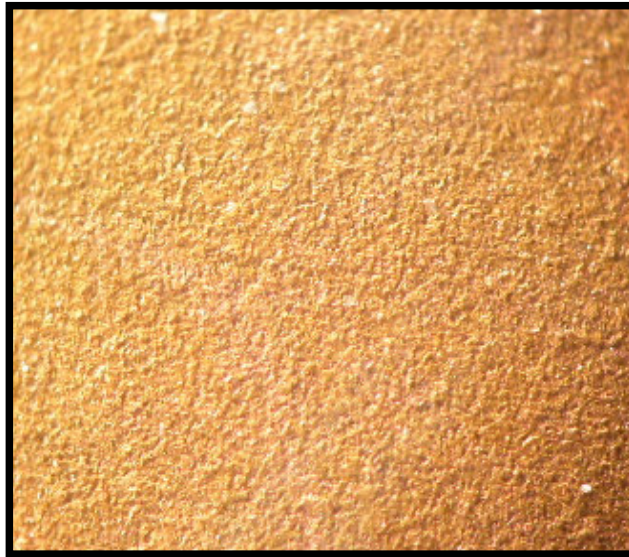
No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
8		X	4		0.2524	0.2448	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	

**Figura 45. Muestra #08**



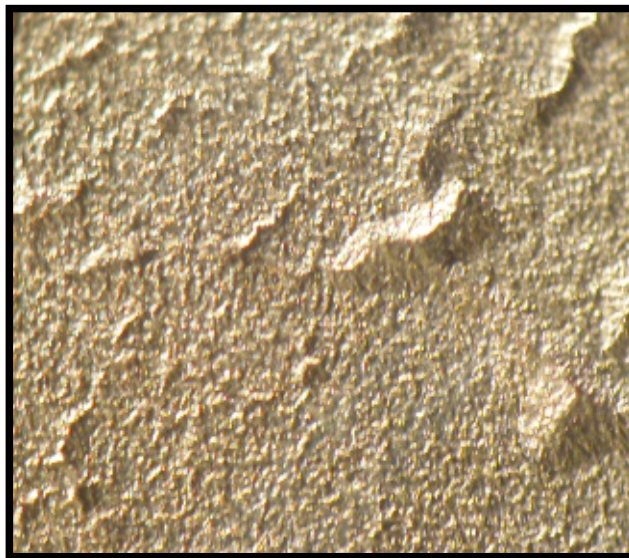
No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
10		X	4	X	0.2448	0.2383	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	

**Figura 46. Muestra #10**



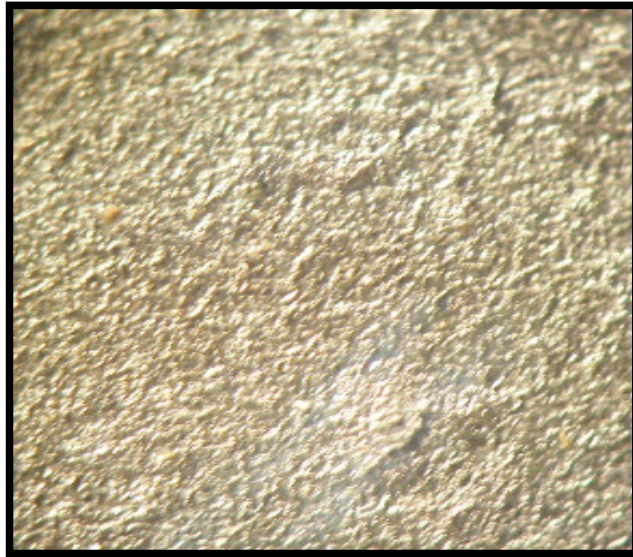
No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
11		X	6		0.2330	0.2330		Cu, Cu <sub>2</sub> O	

**Figura 47. Muestra #11**



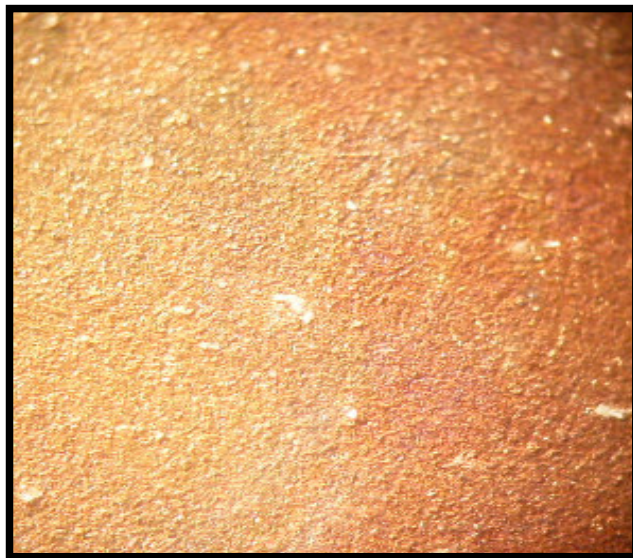
No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
13		X	6		0.2632	0.2632	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	

**Figura 48. Muestra #13**



No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
15		X	6	X	0.2398	0.2410	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	

**Figura 49. Muestra #15**



No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
16	X		4		0.2384	0.2384		Cu, Cu <sub>2</sub> O	

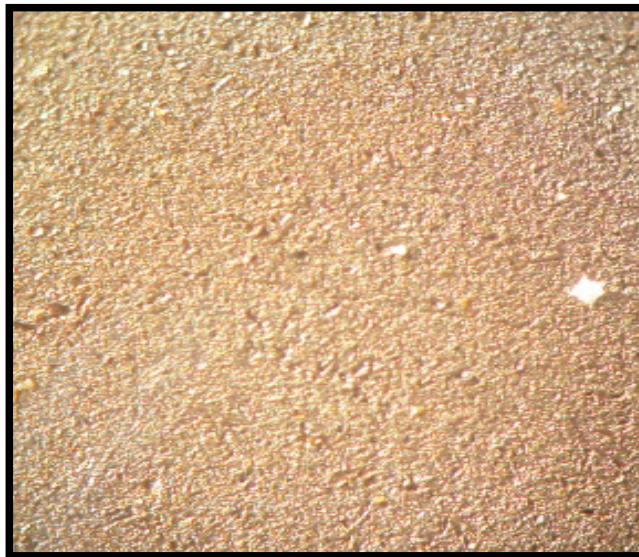
**Figura 50. Muestra #16**





No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
18	X		4		0.2404	0.2412	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	

**Figura 51. Muestra #18**



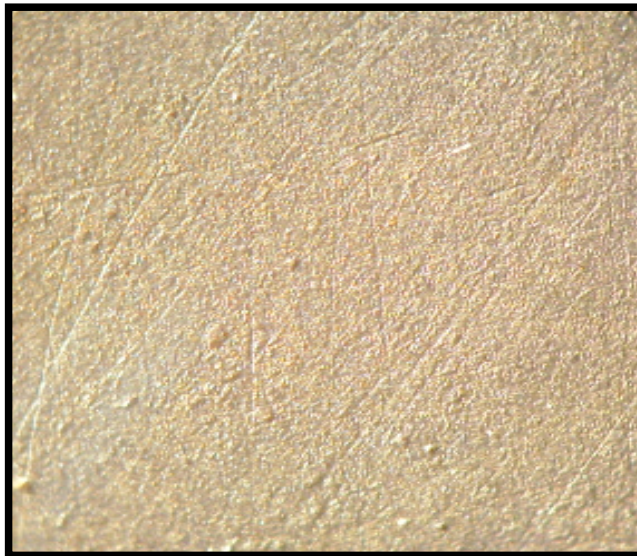
No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
20	X		4	X	0.2404	0.2410	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	

**Figura 52. Muestra #20**



No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
21	X		8		0.2215	0.2215		Cu, Cu <sub>2</sub> O	

**Figura 53. Muestra #21**



No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
23	X		8		0.2377	0.2381	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	

**Figura 54. Muestra #23**



No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
25	X		8	X	0.2392	0.2395	400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	

**Figura 55. Muestra #25**



No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
26	X		Por calentamiento (2 hrs)				400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	Cobre mas delgado

**Figura 56. Muestra #26**



No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
28	X		Por calentamiento (18.76 seg)				400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	Al interperie

**Figura 57. Muestra #28**



No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
30	X		Por calentamiento (35 seg)				400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	Al interperie

**Figura 58. Muestra #30**



No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
31	X		Por calentamiento (2 hrs)				400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	Al interperie

**Figura 59. Muestra #31**



No. de muestra	Tratamiento con lijado	Tratamiento con solución cromica	Tiempo en la solución de Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (hrs)	Rociado con arena	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Temperatura de horneado (°C)	Composición química	Observaciones
32	X		Por calentamiento (2 hrs)				400	Cu, Cu <sub>2</sub> O, ZnO	Con tapa, 5 cm de alt.

**Figura 60. Muestra #32**