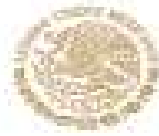




**INSTITUTO  
TECNOLÓGICO  
SUPERIOR DE LIBRES**



**SEP**  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LIBRES**

Organismo Público Descentralizado del Gobierno del Estado de Puebla

**FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA CELDA SOLAR,  
UTILIZANDO UNA ESTRUCTURA PEROVSKITA (MA-PbBr<sub>3</sub>) COMO  
CAPA ACTIVA.**

**OPCIÓN I**

**TESIS PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**PRESENTA:**

**DANIEL CLEMENTE FERNÁNDEZ LÓPEZ**

**LIBRES, PUEBLA, OCTUBRE, 2019**



"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Fecha: 21 de octubre de 2019.  
Asunto: Liberación de proyecto para la  
titulación integral.

**Ing. Silvia Salazar Pérez**  
Jefa del Departamento de Estudios Profesionales  
**Presente.**

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre del estudiante y/o egresado: Daniel Clemente Fernández López
Carrera: Ingeniería Electromecánica
No. de control: 14940130
Nombre del proyecto: "FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA CELDA SOLAR, UTILIZANDO UNA ESTRUCTURA PEROVSKITA (MA-PbBr3) COMO CAPA ACTIVA"
Producto: I Tesis Profesional.

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

**ATENTAMENTE**  
"POR UNA CULTURA CIENTÍFICA, TECNOLÓGICA Y SUSTENTABLE"



S.E.P.

INSTITUTO TECNOLÓGICO  
SUPERIOR DE LIBRES  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
ELECTROMECÁNICA

**ING. LUIS ALBERTO ARAGÓN PARRA**  
ENCARGADO DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

Ing. Humberto Morales Suárez

Asesor

Ing. Abraham Anibal Victoria Rojas

Revisor

Ing. Rafael Ortuño Lucas

Revisor

Ing. Luis Alberto Aragón Parra

Revisor



## *Agradecimientos*

A mis directores de tesis externos Dr. Rafael Ramírez Bon y M. en C. Eneftali Flores García por su ayudada para el desarrollo de este proyecto, pero en especial al M. en C. Eneftali Flores García por su ayuda brindada a mi llegada a Querétaro.

A mi director interno Ing. Humberto Morales Suárez por sus aportaciones para la realización de la presente tesis.

A mis revisores Ing. Abraham Aníbal Victoria Rojas y Ing. Rafael Ortuño Lucas, por sus valiosa ayuda en revisiones del presente trabajo.

A Cinvestav unidad Querétaro por darme la oportunidad de poder realizar mi residencia de igual manera agradecer al I. Q. en A. Martin Adelaido, M.I. Adair Jiménez M. C. Joaquín Márquez, y Ing. Francisco Rodríguez Melgarejo, por su asistencia en la caracterización del dispositivo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado para la realización de este trabajo a través del fondo nacional para investigadores.

"Todo el mundo es un genio. Pero si juzgas a un pez por su habilidad para trepar árboles, vivirá toda su vida pensando que es un inútil"

Albert Einstein

## *Dedicatoria*

*A mis padres Virginia López y Martín Fernández por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de la carrera y la vida.*

*A mis tíos Ponciano López y Adela Fernández por su ayuda y consejos brindados.*

*A todas esas personas que formaron parte fundamental de esta historia llamada vida.*

# ÍNDICE

1	CAPÍTULO I GENERALIDADES.....	1
1.1	Introducción.....	2
1.2	Planteamiento del problema.....	3
1.3	Objetivos .....	4
1.3.1	Objetivo general.....	4
1.3.2	Objetivos específicos.....	4
1.4	Hipótesis .....	4
1.5	Justificación.....	4
1.6	Alcances y limitaciones .....	5
2	CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	6
2.1	Radiación solar .....	7
2.1.1	Absorción solar y efecto fotovoltaico .....	8
2.2	Semiconductores .....	9
2.2.1	Semiconductores intrínsecos.....	10
2.2.2	Semiconductores extrínsecos.....	10
2.3	Principales tipos de celdas fotovoltaicas .....	11
2.3.1	Primera generación .....	11
2.3.2	Segunda generación.....	12
2.3.3	Tercera generación.....	12
2.4	Celda solar de perovskita.....	12
2.5	Sistemas cristalinos.....	16
2.5.1	Concepto de cristal .....	16
2.5.2	Sistemas de cristalización .....	17

2.5.3	Redes de cristalización .....	19
2.6	Técnicas de procesamiento .....	20
2.6.1	Deposición química .....	20
2.6.2	Parámetros importantes dentro del DBQ.....	21
2.6.3	El proceso de spin coating.....	22
2.7	Técnicas de caracterización.....	24
2.7.1	Difracción de Rayos X (DRX) .....	25
2.7.2	Microscopia electrónica de barrido .....	25
2.7.3	Espectroscopia de Reflectancia Difusa .....	27
2.7.4	Caracterización (I-V) de una celda solar.....	27
3	CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	29
3.1	Metodología general.....	30
3.2	Primera Etapa .....	31
3.2.1	Reactivos utilizados .....	31
3.2.2	Preparación de soluciones .....	31
3.2.3	Formulaciones depositadas .....	32
3.2.4	Depósito de estructuras de PbBr(OH) .....	32
3.2.5	Limpieza del sustrato por ultrasonido. ....	33
3.2.6	Limpieza de sustrato por ultrasonido. ....	33
3.2.7	Depósito de las estructuras PbBr(OH).....	34
3.2.8	Control de la temperatura de la solución química.....	34
3.2.9	Obtención de precipitado de PbBr(OH) para su conversión en estructura tipo perovskita .....	35
3.2.10	Caracterización de estructuras PbBr(OH) .....	37
3.2.11	Difracción de rayos X .....	37

3.2.12	Microscopía electrónica de barrido SEM .....	38
3.2.13	Espectroscopia de reflectancia difusa .....	38
3.3	Segunda etapa .....	40
3.3.1	Reactivos utilizados .....	40
3.3.2	Formulaciones depositadas .....	40
3.3.3	Depósito de las estructuras tipo perovskita .....	41
3.3.4	Caracterización de la estructura perovskita (MAPbBr <sub>3</sub> ) .....	42
3.4	Etapa 3.....	42
3.4.1	Fabricación de la celda fotovoltaica.....	42
3.4.2	Depósito de la capa conductora de electrones (ESL).....	42
3.4.3	Depósito de la capa activa de perovskita .....	43
3.4.4	Depósito de la capa conductora de huecos (HTL).....	44
3.4.5	Caracterización del rendimiento fotovoltaico .....	45
4	CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
4.1	Resultados etapa 1 .....	48
4.1.1	Validación de la estructura PbBr(OH).....	48
4.1.2	Caracterización estructural del Pb Br (OH) en condición de síntesis de 25°C	49
4.1.3	Caracterización estructural del Pb Br (OH) en condición de síntesis de 40°C	51
4.1.4	Selección de estructura PbBr(OH) para su conversión en una estructura tipo perovskita .....	52
4.1.5	Reflectancia Difusa de las estructuras PbBr(OH).....	53
4.1.6	Determinación de la brecha prohibida de las estructuras PbBr(OH) .	55
4.1.7	Caracterización morfológica. ....	57
4.2	Resultados Etapa 2 .....	60

4.2.1	Análisis estructural del MA-PbBr <sub>3</sub> (perovskita) .....	60
4.3	Resultados Etapa 3.....	64
4.3.1	Caracterización propiedades fotovoltaicas del dispositivo basado en la estructura perovskita MAPbBr <sub>3</sub> .....	64
4.4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	67
4.5	BIBLIOGRAFÍA .....	68
4.6	GLOSARIO .....	71
4.7	ANEXOS .....	73
	Anexo (1) Redes de cristalización .....	73



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1:</b> Reactivos para la síntesis de la estructura PbBr(OH).....	31
<b>Tabla 3.2</b> Reactivos utilizados para la conversión de la estructura PbBr(OH).....	40
<b>Tabla 4.1:</b> Parámetros de red de la estructura PbBr(OH) a 25 °C.....	50
<b>Tabla 4.2</b> Tamaño promedio de los cristales. ....	50
<b>Tabla 4.3:</b> Parámetros de red del PbBr(OH) a 40 °C.....	52
<b>Tabla 4.4</b> Tamaño promedio de los cristales. ....	52
<b>Tabla 4.5</b> Brecha prohibida de las estructuras depositadas. ....	57
<b>Tabla 4.6</b> Eficiencia promedio del dispositivo fotovoltaico .....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Rango de frecuencias y longitud de onda del espectro solar. ....	7
<b>Figura 2.2</b> Diferencia de energía entre las bandas de valencia y conducción [10]. 9	
<b>Figura 2.3</b> Semiconductor extrínseco tipo P. ....	11
<b>Figura 2.4</b> Semiconductor extrínseco tipo N. ....	11
<b>Figura 2.5</b> Estructura atómica general de la perovskita. ....	13
<b>Figura 2.6</b> Representación esquemática de una celda solar de perovskita en su configuración más común. ....	14
<b>Figura 2.7</b> Representación esquemática de un correcto alineamiento de las bandas energéticas en una celda de perovskita y los procesos de transferencia selectiva a los contactos. ....	15
<b>Figura 2.8</b> Características de la periodicidad. ....	16
<b>Figura 2.9</b> (a) material cristalino (b) material amorfo. ....	17
<b>Figura 2.10</b> Sistemas cristalinos[17]. ....	19
<b>Figura 2.11</b> Proceso de spin coating. ....	23
<b>Figura 2.12:</b> Diagrama típico de un difractómetro. ....	25
<b>Figura 2.13:</b> Comparación entre el microscopio óptico y el microscopio electrónico. ....	26
<b>Figura 3.1</b> Metodología general de depósito. ....	30
<b>Figura 3.2</b> Formulación a 25 °C. ....	32
<b>Figura 3.3</b> Formulación a 40 °C. ....	32
<b>Figura 3.4:</b> Equipo de ultrasonido (Marca Branson. Modelo 2510). ....	33
<b>Figura 3.5</b> (a) método de deposición química, (b) inmersión de sustrato en solución. ....	34
<b>Figura 3.6</b> Recirculador de agua con control de temperatura. ....	35
<b>Figura 3.7</b> Obtención de sustrato. ....	35
<b>Figura 3.8</b> Filtrado de la solución química. ....	36
<b>Figura 3.9</b> Proceso de secado. ....	36
<b>Figura 3.10:</b> Difractómetro de Rayos X. ....	37

<b>Figura 3.11:</b> Microscopío electrónico de barrido.....	38
<b>Figura 3.12</b> Espectrofotómetro Cary 5000 UV-Vis-NIR. ....	39
<b>Figura 3.13</b> Formulaciones de depósito para la obtención de la estructura perovskita.....	40
<b>Figura 3.14</b> Metodología de depósito. ....	41
<b>Figura 3.15</b> Polvos obtenidos bajo las formulaciones (1, 2, 3) de la sección (3.3.2) para la síntesis de la estructura perovskita. ....	41
<b>Figura 3.16</b> Depósito de la capa conductora de electrones (ESL).....	43
<b>Figura 3.17</b> Depósito de la capa MAPbBr <sub>3</sub> por el método de spin coating.....	44
<b>Figura 3.18</b> Depósito de la capa de P3HT por el método de spin coating.....	44
<b>Figura 3.19 (a)</b> Representación esquemática de la celda solar <b>(b)</b> . Celda sintetizada con los 3 contactos fusionales. ....	45
<b>Figura 3.20</b> Simulador solar.....	46
<b>Figura 4.1</b> Espectro de rayos X perteneciente al bromuro básico de plomo en polvo.....	48
<b>Figura 4.2:</b> Patrón de difracción del PbBr(OH) a 25 °C.....	49
<b>Figura 4.3:</b> Patrón de difracción del PbBr(OH) a 40 °C.....	51
<b>Figura 4.4</b> Condiciones de depósito de la línea roja (PbBr(OH) pH 6.5, 1h, 40 °C), condiciones de depósito de la línea negra (PbBr(OH) pH 5.5, 1h, 25 °C).....	53
<b>Figura 4.5:</b> Reflectancia difusa con pH 6.5.....	54
<b>Figura 4.6</b> Reflectancia difusa con pH 5.5.....	54
<b>Figura 4.7</b> Brecha prohibida de las estructuras depositadas en un pH de 5.5.....	55
<b>Figura 4.8</b> Brecha prohibida de las estructuras depositadas en un pH de 6.5.....	56
<b>Figura 4.9</b> Estructura 6.5 1h 25 °C. ....	57
<b>Figura 4.10</b> Estructura 6.5 2h 25 °C.....	57
<b>Figura 4.11</b> Estructura 6.5 1h 40 °C.....	58
<b>Figura 4.12</b> Estructura 6.5 2h 40 °C.....	58
<b>Figura 4.13</b> Estructura 5.5 1h 25 °C.....	58
<b>Figura 4.14</b> Estructura 5.5 2h 25 °C.....	58
<b>Figura 4.15</b> Estructura 5.5 1h 40 °C.....	59
<b>Figura 4.16</b> Estructura 5.5 2h 40 °C.....	59

<b>Figura 4.17</b> Patrón de difracción de rayos (X) de la estructura MAPbBr <sub>3</sub> con 0.01 g de MABr..	60
<b>Figura 4.18</b> Micrografía de la estructura perovskita con 0.01 g de MABr.	61
<b>Figura 4.19</b> Patrón de difracción de rayos (X) de la estructura MAPbBr <sub>3</sub> con 0.03 g de MABr.	61
<b>Figura 4.20</b> Micrografía de la estructura perovskita con 0.03 g de MABr.	62
<b>Figura 4.21</b> Patrón de difracción de rayos X de las estructuras MA-PbBr <sub>3</sub> con 0.05 g MABr.	63
<b>Figura 4.22</b> Micrografía de la estructura perovskita con 0.05 g de MABr.	63
<b>Figura 4.23</b> Curva I-V de la celda (contacto número 1)	64
<b>Figura 4.24</b> Curva I-V de la celda (contacto número 2)	65
<b>Figura 4.25</b> Curva I-V de la celda (contacto número 3)	65
<b>Figura 4.26</b> Imagen transversal SEM	66

# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

## 1.1 Introducción

De manera general, una celda solar es un dispositivo optoelectrónico que funciona a través del efecto fotovoltaico, el cuál convierte la energía luminosa que transportan los fotones en energía eléctrica; cuando los fotones inciden sobre los dispositivos solares estos pueden ser reflejados, absorbidos o pasar a través de él, los absorbidos son los que transfieren su energía a los electrones desde la banda de valencia excitándolos a la banda de conducción generando el par electrón-hueco que se conoce como excitón. Para la generación de corriente eléctrica es necesario extraer los electrones liberados del material activo antes que estos vuelvan a recombinarse con los huecos; una forma de lograrlo es dopando el material con impurezas (tipo p o n) que altera significativamente las propiedades intrínsecas del semiconductor [1].

Actualmente los dispositivos fotovoltaicos se clasifica en tres tipos: La primera generación incluye celdas solares basadas en silicio monocristalino, con los cuales se han alcanzado eficiencias cercanas al 25%, como también celdas basadas en GaAs monocristalino, que han alcanzado eficiencias de hasta del 28%. Sin embargo, estos tienen como limitación los altos costos de producción. Ahora bien, los dispositivos de segunda generación corresponden a aquellos en los cuales las celdas solares son fabricadas con tecnología de película delgada, dentro de estos se incluyen dispositivos basados en  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  (CIGS) y en CdTe con los cuales se han alcanzado eficiencias mayores al 20%.

Finalmente, se encuentran los dispositivos que usan la tecnología de película delgada, que además de hacer uso de materiales denominados como emergentes, en esta categoría se encuentran los dispositivos fotovoltaicos basados en una estructura cristalina tipo perovskita híbrida (sistemas multi-unión p-n) basadas principalmente de un material orgánico, comúnmente yoduro de metilamonio ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ ), un material inorgánico comúnmente plomo (Pb) y un halogenuro comúnmente yodo (I) logrando eficiencias mayores al 20%[2].

Con base en lo anterior, este trabajo de Tesis se propone la fabricación y caracterización de una estructura de tipo perovskita ( $\text{MA-PbBr}_3$ ) a través del sistema precursora  $\text{PbBr(OH)}$  para su posterior aplicación en una celda solar empleando los métodos químicos de depósito tales como: depósito por baño químico (DBQ) y revestimiento por rotación, para finalmente caracterizar la eficiencia fotovoltaica generada por el dispositivo solar base perovskita.

## 1.2 Planteamiento del problema

Hoy en día la generación de energía eléctrica, es un proceso demasiado costoso, pero sobre todo es un proceso que agota cada vez más, los recursos naturales con los que contamos, por lo tanto las empresas generadoras de energía buscan alternativas para la obtención del recurso de una manera mucho más limpia[3].

Del mismo modo, dentro de las principales alternativas de generación eléctrica limpia se encuentran las celdas solares basadas en silicio, las cuales, han obtenido eficiencias máximas del 25%, sin embargo; actualmente la producción de estos dispositivos requieren de infraestructuras complejas tales como: Hornos eléctrico de arco (HEA), reactor de lecho fluido, columnas de destilación, reactor, sierra multihilo, entre otros[4], con la finalidad de reducir las impurezas a 10 átomos por millón (10ppm) requerida por la industria fotovoltaica, lo cual ha generado altos costos de fabricación y comercialización en el mercado energético[5].

Por consiguiente, se tienen los paneles solares a base de silicio, que presentan altos costos de producción. Sin embargo, una alternativa funcional es la fabricación de dispositivos a través de métodos químicos que mantienen la atención de la comunidad científica debido a que no requieren altas temperaturas de depósito ni estructuras complejas para obtener dispositivos eficaces.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

- Fabricar una celda solar, sintetizando y caracterizando una estructura del tipo perovskita (MA-PbBr<sub>3</sub>) como capa activa y obtener su eficiencia fotovoltaica.

### 1.3.2 Objetivos específicos.

- Sintetizar una estructura de tipo perovskita MA-PbBr<sub>3</sub> a través del sistema precursor PbBr(OH).
- Caracterizar estructuralmente y morfológicamente el sistema PbBr(OH) y la estructura perovskita MA-PbBr<sub>3</sub>.
- Disolver la estructura MA-PbBr<sub>3</sub> para su posterior aplicación en una celda solar como capa activa.
- Obtener la eficiencia fotovoltaica de la celda solar.

## 1.4 Hipótesis

A partir de una estructura PbBr(OH) es posible obtener una estructura perovskita (MA-PbBr<sub>3</sub>), para ser utilizada como capa activa en un celda solar.

## 1.5 Justificación

Actualmente la mayoría de las tecnologías fotovoltaicas existentes conocidas como celdas de primera generación son fabricadas a base de silicio. Estas requieren de un elevado costo de producción debido a las altas temperaturas utilizadas durante



el proceso de fabricación ( $>1800^{\circ}\text{C}$ ), así como a la compleja infraestructura utilizada para asegurar la pureza del silicio a fin de conseguir la máxima eficiencia posible[4].

Por lo cual, la fabricación de celdas solares basadas en una estructura perovskita (capa activa) son de gran importancia debido a que las celdas solares base perovskita ofrecen diversas ventajas sobre sus antecesoras ya que pueden ser fabricadas en un laboratorio convencional con técnicas químicas de depósito que no requieren equipos especializados ni temperaturas altas de depósito reduciendo así su costo de producción. Asimismo pueden alcanzar eficiencias de hasta un 24.2 % [6], ya que permiten combinar las propiedades de los materiales orgánicos junto con las propiedades de los materiales inorgánicos.

## 1.6 Alcances y limitaciones

Los alcances de la presente tesis están conformados por cuatro etapas principales como se muestra a continuación:

- Sintetizar y caracterizar la estructura  $\text{PbBr}(\text{OH})$  a partir del diseño experimental 2k con  $k=3$  (pH de la solución, tiempo de depósito y temperatura de depósito) .
- Generar tres estructuras perovskitas del tipo  $\text{MA-PbBr}_3$ , por medio de la estructura precursora  $\text{PbBr}(\text{OH})$ .
- Fabricar y obtener la eficiencia de una celda solar con una capa activa de  $\text{MAPbBr}_3$

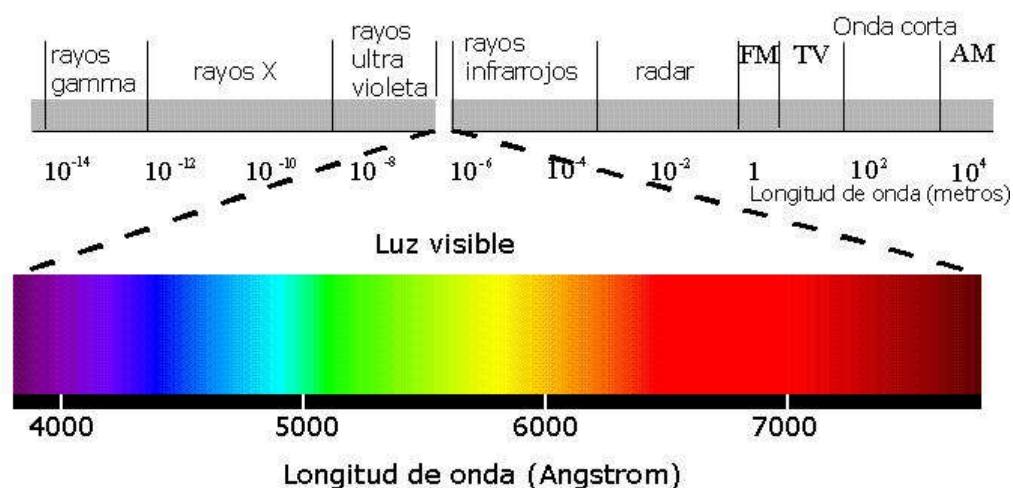
Por consiguiente, la presente tesis se limita a fabricar y caracterizar una celda solar de capa activa de  $\text{MA-PbBr}_3$  así como su rendimiento fotovoltaico.

# CAPÍTULO II

## MARCO TEÓRICO

## 2.1 Radiación solar

La radiación solar la podemos definir como el flujo de energía que recibimos del Sol en forma de ondas electromagnéticas que permite la transferencia de energía solar a la superficie terrestre. Estas ondas electromagnéticas son de diferentes frecuencias y aproximadamente la mitad de las que recibimos están entre los rangos de longitud de onda de 0.4 [ $\mu\text{m}$ ] y 0.7 [ $\mu\text{m}$ ], y pueden ser detectadas por el ojo humano, constituyendo lo que conocemos como luz visible como se observa en Figura (2.1) [7].



**Figura 2.1** Rango de frecuencias y longitud de onda del espectro solar.

La radiación solar incidente sobre la Tierra es equivalente a más de 800 000 millones de GWh de energía en un año lo que representa alrededor de 35000 veces el consumo mundial en ese tiempo, y es 500 veces mayor que el equivalente energético suministrado por todas las demás fuentes de energía. La superficie de la Tierra recibe en 30 minutos una cantidad de energía solar equivalente al consumo energético mundial en un año.

México posee un importante potencial de energéticos renovables. Por ejemplo, el país recibe en seis horas de exposición al sol una cantidad de energía equivalente al consumo nacional de un año. Esta energía se transforma en calor, viento, agua evaporada y en diversas formas de biomasa, y, aunque la tecnología nueva permite

un uso importante de este energético, hasta la fecha en México se usa marginalmente.[8]

### **2.1.1 Absorción solar y efecto fotovoltaico**

Cuando un flujo de fotones incide sobre la celda construida a partir de la unión entre semiconductores tipo N y tipo P, parte de ellos son absorbidos en el material. Los fotones que poseen una energía mayor al salto energético entre la banda de conducción y la de valencia pueden ser absorbidos y forzar el salto de un electrón entre estas dos bandas. Como este salto deja un hueco en la banda de valencia, se dice que la absorción de un fotón genera un par electrón – hueco. Si esta generación tiene lugar a una distancia de la unión inferior a la denominada longitud de difusión existe una alta probabilidad de que estos portadores de carga eléctrica (el electrón y el hueco) sean separados por el elevado campo eléctrico existente en la unión P-N, produciéndose la separación de ambas cargas: el electrón se desplaza hacia la zona N y el hueco hacia la zona P, creándose, con ello, una corriente de electrones desde la zona N a la zona P. Si se conectan ambas regiones mediante un circuito eléctrico exterior, se establece una corriente eléctrica a través de este. En esto consiste, precisamente, el efecto fotovoltaico: es la conversión directa, según el mecanismo que se acaba de explicar, de radiación electromagnética en corriente eléctrica, mediante un dispositivo llamado celda fotovoltaica.

El salto energético entre bandas limita la proporción de radiación que puede ser absorbida en un semiconductor. Una celda de silicio puede aprovechar alrededor de un 65% de radiación solar recibida. En el caso de celdas construidas a partir de otros semiconductores, con distinta anchura energética de banda prohibida, la energía mínima de los fotones de la luz incidente para producir pares electrón – hueco es distinta, así como la fracción de la energía incidente que puede aprovecharse.

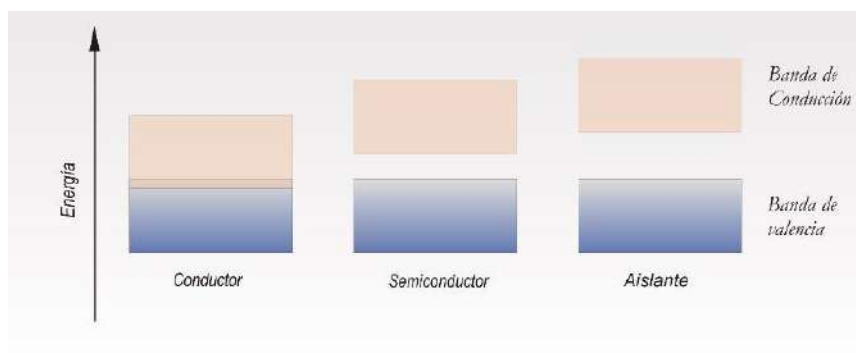
El efecto fotovoltaico se produce de forma prácticamente instantánea, de forma que las celdas fotovoltaicas generan electricidad inmediatamente después de ser iluminadas.[9]

## 2.2 Semiconductores

Los semiconductores son los materiales básicos para la construcción de los dispositivos fotovoltaicos y se caracterizan porque su conductividad eléctrica es intermedia entre los materiales conductores, que presentan una mínima oposición al paso de los electrones, y los aislantes, que impiden el paso de electrones.

En materiales cristalinos la última banda de energía llena, o de valencia, puede estar separada de la siguiente banda de energía vacía, o de conducción, por unos valores de energía en los que no existen estados permitidos. La diferencia de energía entre la banda de valencia y la de conducción se denomina *band gap* ( $E_g$ ) y su valor caracteriza el comportamiento eléctrico del material.

En materiales conductores el *band gap* es nulo, por lo que las bandas de valencia y conducción se solapan y siempre existen electrones disponibles para transportar carga; en materiales aislantes el *band gap* es elevado por lo que los electrones de la banda de valencia no pueden alcanzar la banda de conducción. Mientras que, en los semiconductores, la diferencia de energía en torno a 1-2 eV como se observa en la Figura (2.2), posibilita que la banda de conducción tenga ya una población de electrones a temperatura ambiente.[10]



**Figura 2.2** Diferencia de energía entre las bandas de valencia y conducción [10]

Los semiconductores se clasifican dependiendo de la existencia o no de dopado, es decir, si el silicio presenta o no átomos de otros grupos de la tabla periódica en forma de impurezas. Estas impurezas aumentan la densidad de

electrones y huecos y, por tanto, mejoran considerablemente las propiedades conductoras del silicio.[10]

### **2.2.1 Semiconductores intrínsecos**

Los semiconductores intrínsecos son aquellos que se encuentran de manera pura, es decir, sin ningún material adicional que se pueda considerar como una impureza y que presentan una conductividad nula a bajas temperaturas, pero que pueden ser débilmente conductores a temperatura ambiente, debido a que la anchura de su banda prohibida no es elevada. A medida que la temperatura aumenta, algunos electrones de valencia adquieren una energía térmica mayor que  $E_g$ , y por tanto se mueven hacia la banda de conducción. A partir de este momento, son electrones libres en el sentido de que pueden moverse bajo la influencia de cualquier campo exterior aplicado. El material que antes era aislante ahora sea convertido en un conductor, esta característica de poder cambiar entre los dos estados electrónicos hace que se le considere como semiconductores[11].

### **2.2.2 Semiconductores extrínsecos**

Los semiconductores extrínsecos son aquellos a los que se les ha introducido un elemento contaminante, llamado impureza, generalmente del grupo III o V de la tabla periódica, que cambia bruscamente las propiedades de conducción de los materiales intrínsecos, reduciendo enormemente la resistividad del mismo. La razón para que suceda tal cosa es que el material contaminante es del tipo III (Boro: B, Aluminio: Al, Galio: Ga o Indio: In) y los átomos de dicho material completan solamente 3 enlaces covalentes, quedando un enlace covalente incompleto, que puede ser completado por un electrón de un orbital vecino de un átomo de silicio con una pequeña aportación de energía del entorno. Si esto sucede se genera una ausencia de un orbital abandonado, que se denomina hueco. Así, la consecuencia de impurificar con estos materiales, llamados aceptores, es la aparición de un hueco por cada átomo de impureza introducido en el cristal y generan un material del tipo  $p$  como se muestra en la Figura (2.3) Si el material dopante es del grupo V (Fósforo: P,

Arsénico: As o Antimonio: Sb), sobra un electrón débilmente ligado, que podría pasar a la banda de conducción y dando como resultado un material del tipo *n* como se muestra en la Figura (2.4)[12]

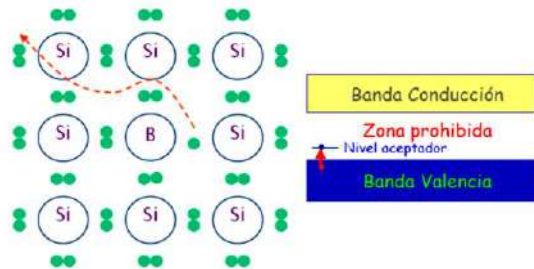


Figura 2.3 Semiconductor extrínseco tipo P.

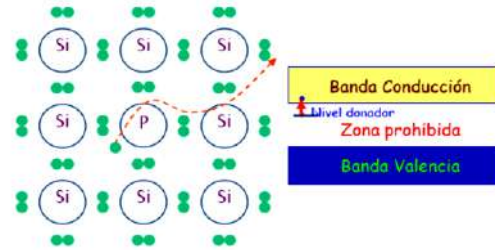


Figura 2.4 Semiconductor extrínseco tipo N.

## 2.3 Principales tipos de celdas fotovoltaicas

Actualmente, las celdas solares en el mercado utilizan una gama de materiales diversos con diferente grado de madurez comercial. Las diferencias han permitido precisar tres generaciones de celdas solares[13]

### 2.3.1 Primera generación

La primera generación fue introducida en la década de 1950, se caracterizan por utilizar monocristales de óxido silicio ( $\text{SiO}_2$ ). La eficiencia media de los módulos comerciales es de alrededor del 16%, con una vida útil de aproximadamente 20 años

El inconveniente principal es el uso de láminas de  $\text{SiO}_2$  con un alto grado de pureza que requieren altas temperaturas ( $> 1000^\circ\text{C}$ ) e instalaciones al vacío. Estos requisitos ocasionan el incremento de los costos de fabricación.[13]

### **2.3.2 Segunda generación**

La investigación en celdas solares de segunda generación fabricadas con tecnología de película delgada, también ha logrado grandes avances mediante el desarrollo de materiales fotovoltaicos con propiedades especiales, fabricados a través de procesos tecnológicos muy avanzados y la incorporación de conceptos físicos novedosos. En la actualidad tres tecnologías de película delgada hicieron tránsito a la producción a nivel industrial, estas son: Silicio amorfo (a-Si), Teluro de Cadmio (CdTe).[13]

### **2.3.3 Tercera generación**

La tercera generación son celdas solares aún en fase de desarrollo. Dentro de las cuales sobresalen las celdas solares tipo orgánicas, de perovskita y Grätzel (también conocidas como celda solar sensibilizada con colorante).

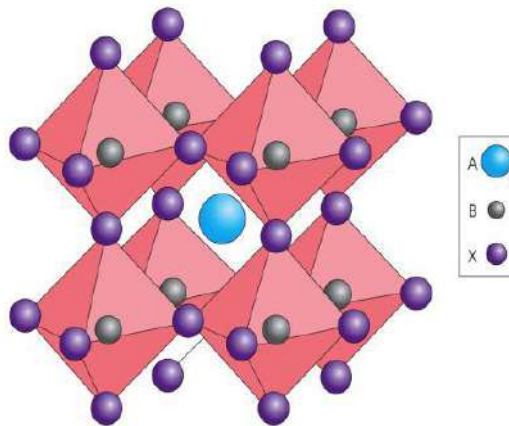
Las cuales son áreas de investigación actuales con retos como la disminución de los costos de fabricación, obtención de eficiencias mayores, la simplicidad de manufactura y la producción en serie.[13]

## **2.4 Celda solar de perovskita**

Los materiales tipo perovskita utilizados para fabricar celdas solares fotovoltaicas se caracterizan por tener una fórmula química genérica  $ABX_3$ , donde A es un catión voluminoso orgánico o inorgánico como el metilamonio o el cesio, B es un catión metálico como el plomo y X un anión haluro como el bromo o el yodo. En la Figura (2.5) se muestra la estructura cristalina de este material. La simetría de esta estructura sugiere que los principales sistemas cristalográficos en los que las perovskitas se pueden encontrar son el cúbico, el tetragonal o el ortorrómbico. Las



transiciones entre estas estructuras dependen de la temperatura y se han estudiado profusamente.



**Figura 2.5** Estructura atómica general de la perovskita.

De manera genérica, estos materiales presentan un band gap que les permite absorber de forma eficiente la luz en la zona del visible. Este hecho y las propiedades optoelectrónicas que se presentan a continuación las hacen ideales para su utilización como materiales fotovoltaicos:

- Elevado coeficiente de absorción.
- Amplio espectro de absorción.
- Elevada movilidad intrínseca de portadores libres.
- Baja tasa de recombinación.
- Baja concentración de defectos y una alta tolerancia a los mismos.

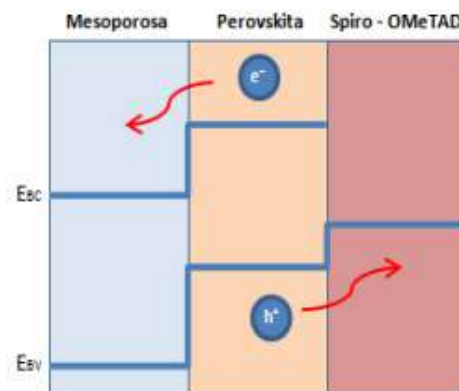
Cabe destacar que el alto coeficiente de absorción de la perovskita permite que estas celdas se puedan considerar de capa fina (thin-film), ya que con sólo 400 nm de grosor se puede sintetizar una capa activa idónea para la fabricación de dispositivos fotovoltaicos. Debido a sus excelentes propiedades optoelectrónicas y su proceso de fabricación que es considerado relativamente sencillo a través de métodos químicos y físicos de depósito. Es por ello que las celdas solares de perovskita están consideradas como opción atractiva para su comercialización.



- Un contacto eléctrico conductor, como por ejemplo oro.

Conforme a esta estructura, la luz penetra a través del FTO siendo la capa activa de perovskita la encargada de absorber la luz incidente. Los fotones absorbidos por la capa activa de perovskita generarán un par electrón-hueco en el material. Los electrones generados se inyectan en la capa mesoporosa (ESL) y pasan al circuito externo hasta llegar al contacto de oro. Por otro lado, y de forma simultánea, los huecos se dirigen hacia el HSL y difunden por conducción eléctrica hasta el oro. Solo con el empleo de contactos selectivos se generará una corriente eléctrica al favorecer una separación eficiente de las cargas que reduzcan al mínimo los procesos de recombinación (reacción entre los electrones y huecos fotogenerados).

Es necesario que exista un alineamiento adecuado de las bandas de las diferentes capas para que se produzca una extracción de carga eficiente. La banda de conducción del ESL se debe encontrar a niveles de energía más bajos que la banda de conducción de la perovskita. Por el lado contrario, la banda de valencia del HSL debe estar a niveles de energía más altos que la banda de valencia de la perovskita como se observa en la Figura (2.7).



**Figura 2.7** Representación esquemática de un correcto alineamiento de las bandas energéticas en una celda de perovskita y los procesos de transferencia selectiva a los contactos.

Sin embargo; a pesar de que las PSC presentan altas expectativas para su utilización a mayor escala en un futuro próximo, éstas adolecen de problemas de inestabilidad en condiciones operativas y ambientales. En cuanto a las condiciones

operativas su estabilidad es relativamente baja, teniendo en cuenta que un producto comercializable requiere una garantía de 20 a 25 años con una caída máxima del 10% en el rendimiento[14].

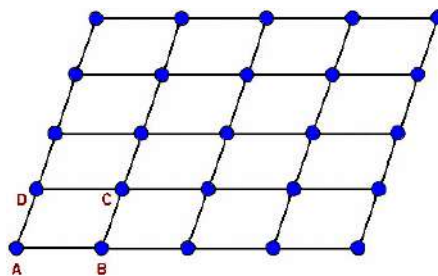
## 2.5 Sistemas cristalinos

### 2.5.1 Concepto de cristal

Un cristal está definido como una porción homogénea de materia en estado sólido, compuesto de una estructura atómica ordenada en un modelo de tipo repetitivo, adquiriendo una forma externa, limitada por superficies planas y uniformes simétricamente dispuestas.

Las principales características de los cristales se muestran a continuación:

- Periodicidad: Característica primordial que define el medio cristalino como un ordenamiento de agrupaciones atómicas, cuya distribución en el espacio muestra ciertas relaciones de simetría a lo largo de cualquier dirección, es decir, que la materia que constituye a un cristal se encuentra a distancias específicas y paralelamente orientadas en una dirección específica ver Figura (2.8).

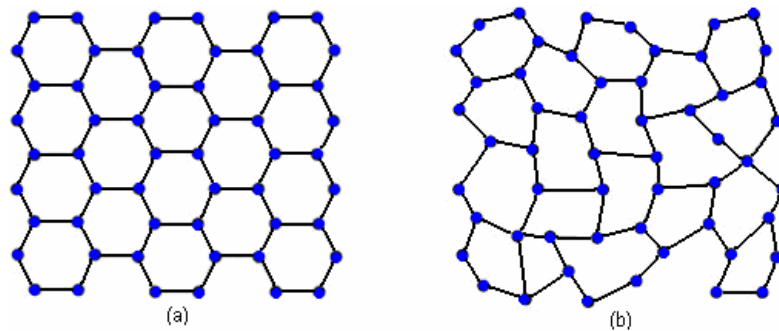


**Figura 2.8** Características de la periodicidad

- Homogeneidad: Característica que indica que las porciones de la materia cristalina son de igual forma, dimensión y orientación en el espacio, es decir, existen direcciones y planos equivalentes, situados paralelamente

presentando las mismas propiedades fisicoquímicas. Sin embargo, por muy homogéneas que sean las condiciones de cristalización de un conjunto, siempre hay diferencias en las condiciones locales donde se producen los cristales, y rara vez los productos obtenidos son todos idénticos.

Los materiales cristalinos están formados por átomos siguiendo un modelo de repetición periódica dando lugar a lo que se conoce como red cristalina, denominada celda unitaria al conjunto repetitivo. Sin embargo, existen materiales que no presentan propiedades de periodicidad y homogeneidad estructural y por tal motivo son conocidos como materiales “amorfos” como se muestra en la Figura (2.9). [15]



**Figura 2.9** (a) material cristalino (b) material amorfo.

### 2.5.2 Sistemas de cristalización

Un sólido cristalino se construye a partir de la repetición en el espacio de una estructura elemental paralelepípedica denominada celda unitaria. En función de los parámetros de red, es decir, de las longitudes de los lados o ejes del paralelepípedo elemental y de los ángulos que forman, se distinguen siete sistemas cristalinos y se dividen en: cúbico, hexagonal, tetragonal, trigonal, rómbico, monoclinico y triclinico como se muestra en la Figura (2.10).

La forma geométrica de los cristales es una de las características de cada sal ó compuesto químico, por lo que la ciencia que estudia los cristales en general, la cristalografía, los ha clasificado en siete sistemas universales de cristalización:

(a). - Sistema Cúbico:

Las sustancias que cristalizan bajo este sistema forman cristales de forma cúbica, los cuales se pueden definir como cuerpos en el espacio que manifiestan tres ejes en ángulo recto, con "segmentos", "látices", ó aristas de igual magnitud, que forman las seis caras ó lados del cubo. A esta familia pertenecen los cristales del oro, plata, diamante, cloruro de sodio, etc.

(b). - Sistema Hexagonal:

Presentan cuatro ejes en el espacio, tres de los cuales son coplanares en ángulo de  $60^\circ$ , formando un hexágono "bencénico", y el cuarto en ángulo recto, como son los cristales de zinc, cuarzo, magnesio, cadmio, etc.

(c). - Sistema Tetragonal:

Estos cristales forman cuerpos con tres ejes en el espacio en ángulo recto, con dos de sus segmentos de igual magnitud, formando hexaedros con cuatro caras iguales, representados por los cristales del óxido de estaño,  $\text{SnO}_2$ .

(d). - Sistema romboédrico:

Presentan tres ejes de similar ángulo entre sí, pero ninguno es recto, y segmentos iguales, como son los cristales de arsénico, bismuto y carbonato de calcio o mármol.

(e). - Sistema Ortorrómbico:

Presentan tres ejes en ángulo recto, pero ninguno de sus lados ó segmentos son iguales, formando hexaedros con tres pares de caras iguales pero diferentes entre par y par, representados por los cristales de azufre, nitrato de potasio, sulfato de bario, etc.

(f). - Sistema Monoclínico:

Presentan tres ejes en el espacio, pero sólo dos en ángulo recto, con ningún segmento igual, como es el caso del bórax y de la sacarosa.

(g). - Sistema Triclínico:

Presentan tres ejes en el espacio, ninguno en ángulo recto, con ningún segmento igual, formando cristales ahusados como agujas, como es el caso de la cafeína.[16]

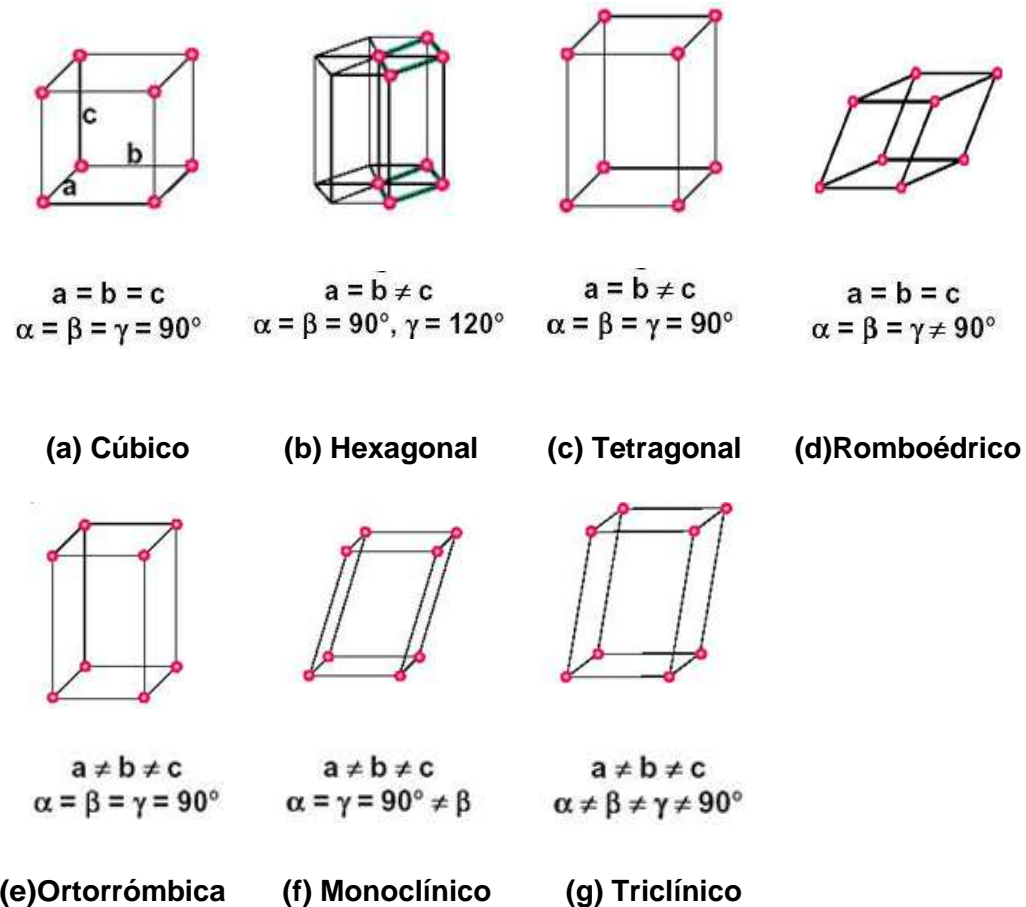


Figura 2.10 Sistemas cristalinos[17].

### 2.5.3 Redes de cristalización

En función de los parámetros de la celda unitaria, longitudes de sus lados y ángulos que forman, se distinguen 7 sistemas cristalinos ver Figura (2.10).

Para determinar completamente la estructura cristalina elemental de un sólido, además de definir la forma geométrica de la red, es necesario establecer las posiciones en la celda de los átomos o moléculas que forman el sólido cristalino; lo que se denomina puntos reticulares. Las alternativas son las siguientes:

- P: Celda primitiva o simple en la que los puntos reticulares son sólo los vértices del paralelepípedo.
- F: Celda centrada en las caras, que tiene puntos reticulares en las caras, además de en los vértices. Si sólo tienen puntos reticulares en las bases, se designan con las letras A, B o C según sean las caras que tienen los dos puntos reticulares.
- I: Celda centrada en el cuerpo, que tiene un punto reticular en el centro de la celda, además de los vértices.
- C: Primitiva con ejes iguales y ángulos iguales ó hexagonal doblemente centrada en el cuerpo, además de los vértices.

Combinando los 7 sistemas cristalinos con las disposiciones de los puntos de red mencionados, se obtendrían 28 redes cristalinas posibles. En realidad, como puede demostrarse, sólo existen 14 configuraciones básicas ver Anexo (1), pudiéndose obtener el resto a partir de ellas. Estas estructuras se denominan redes de Bravais[18]

## 2.6 Técnicas de procesamiento

### 2.6.1 Deposición química

La deposición química (CD, se describió por primera vez en 1869, y se ha utilizado desde entonces para depositar estructuras y películas de muchos semiconductores diferentes. Probablemente sea el método más simple disponible



para este propósito; todo lo que se necesita es un recipiente que contenga la solución (una solución acuosa compuesta por unos pocos productos químicos, generalmente comunes) y el sustrato sobre el que se requiere la deposición. Varias "complicaciones", como algunos mecanismos para agitar y un baño termostatzado para mantener una temperatura específica y constante, son opciones que pueden ser útiles. A pesar de esta extrema simplicidad experimental, la comprensión de los mecanismos involucrados en la deposición y la capacidad de ampliar el rango de depósitos obtenidos, tanto en la composición como en el control de muchas otras propiedades, generalmente no es tan simple. Además, a pesar de su simplicidad, no se ha explotado como una técnica tanto como podría esperarse. Sin embargo, el CD ha experimentado un poco de renacimiento recientemente, debido en gran parte a su abrumadoramente exitoso uso en el depósito de capas tampón de CdS (y materiales similares) en células fotovoltaicas de película delgada.[19]

### **2.6.2 Parámetros importantes dentro del DBQ**

Dentro de las principales variables que influyen en el proceso de formación de las películas por *DBQ* se encuentran los reactivos químicos, sustrato, temperatura y pH, donde cada uno de ellos juega un papel importante para obtener películas de buena calidad. Reactivos químicos: Debido a que el método *DBQ* se basa en un sistema de reacción para formar el compuesto esperado es importante la elección correcta de reactivos que permitan establecer un sistema eficaz y viable, ya que de lo contrario la formación del compuesto podría tardar días, semanas e incluso no llegar a completarse. Sustrato: Para lograr una buena adherencia de la película es necesario contar con un sustrato a fin al compuesto que se desea depositar, ya que de lo contrario podría deslaminarse por esfuerzos mecánicos, térmicos e incluso por la rugosidad que éste posea. pH: Ya que el *DBQ* se basa en el producto de solubilidad el pH juega un papel importante en la formación de hidroxilos. Por lo tanto, en una solución alcalina mientras más alto sea el pH más rápida será la formación de estas especies, el efecto contrario sucede en una solución ácida, es decir, para valores menores de pH se favorece la formación de dichas especies. Por

tal motivo es necesario mantener un pH constante durante toda la reacción que permita la precipitación controlada del compuesto a depositar. Temperatura: Ya que existen compuestos con  $K_{ps}$  relativamente bajas, incluso con una selección adecuada de reactivos su formación podría darse en tiempos muy prolongados, reduciendo así su viabilidad, por lo que un aumento gradual en la temperatura modificará su  $K_{ps}$  permitiendo la formación de los compuestos en tiempos más cortos.

Una vez establecido un sistema de reacción adecuado para la formación de una película por *DBQ* se denotan cuatro etapas que caracterizan el crecimiento de la película las cuales son: incubación, nucleación, crecimiento y etapa final.

**Incubación.** Es la primera etapa para el crecimiento, en este tiempo se establecen los equilibrios químicos entre las distintas especies que forman la solución.

**Nucleación.** En esta etapa el substrato sobre el cual la película será depositada, es cubierto inicialmente con una capa de núcleos del precipitado, los cuales son generalmente hidróxidos, esta capa es adherida al substrato y dará pie al sostenimiento de la película.

**Crecimiento.** En este transcurso se lleva a cabo la liberación de los iones metálicos que es controlada por el agente acoplante que al combinarse con los no metálicos dan lugar a la formación del compuesto esperado, aumentando así el espesor de la película formado sobre el substrato.

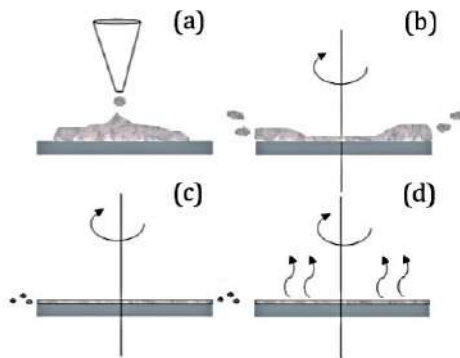
**Etapas final.** En esta etapa el crecimiento de la película es más lento hasta que finalmente se detiene debido al agotamiento de los reactivos y al bajo coeficiente de adherencia por la formación de partículas grandes en la superficie del substrato lo que ocasiona que haya una capa polvosa y no adherible sobre la superficie.[20]

### 2.6.3 El proceso de spin coating

El proceso de spin coating es una técnica empleada para formar recubrimientos uniformes sobre grandes superficies, Básicamente, consiste en la deposición de un

fluido (disolución) sobre un sustrato que, mediante el giro, provoca la formación de una película del material de grosor homogéneo. Los procesos de deposición por spin coating cuenta con numerosas ventajas, como son la rapidez con la que tiene lugar y el control sobre el grosor de la película fina.

Este procedimiento puede emplearse tanto como disoluciones como con dispersiones de partículas, siempre y cuando se encuentren bien homogeneizadas. El proceso de spin coating puede dividirse en cuatro etapas, las cuales se muestran en la Figura (2.11). Las tres primeras etapas ocurren secuencialmente, mientras que la evaporación se da a lo largo de todo el proceso de deposición y se convierte en la principal fuente de adelgazamiento de la lámina, una vez el portamuestras ha alcanzado la velocidad de rotación establecida.



**Figura 2.11** Proceso de spin coating.

a) La deposición

En primer lugar, se aplica sobre sustrato una cantidad en exceso de la dispersión de partida. Se puede girar e inclinar el sustrato para obtener un completo recubrimiento del mismo, aprovechando mejor así la cantidad de material disponible. Adicionar demasiada cantidad de la dispersión inicial no tiene ningún efecto en el grosor final de la película, puesto que el excedente se elimina en las siguientes etapas de deposición. Sin embargo, si la cantidad de suspensión no es suficiente, el sustrato no resultará uniformemente recubierto.

b) La aceleración

Etapa en la cual el portamuestras pasa de encontrarse en reposo a alcanzar la velocidad de rotación establecida. En esta parte del proceso es cuando se elimina la mayor cantidad de material excedente debido a fuerzas centrífugas, alcanzándose así un grosor bastante uniforme de dispersión sobre el sustrato.

c) La rotación

En esta etapa se alcanza la velocidad de giro establecida, se termina de adelgazar la película por fuerzas centrífugas y comienza a tomar importancia la evaporación de los disolventes, en el caso en que estos sean volátiles.

d) La evaporación

Tiene lugar durante todo el proceso, aunque adquiere mayor importancia una vez alcanzada la velocidad final de rotación. Durante la evaporación parte del disolvente pasa a la atmósfera debido a la presión de vapor del mismo, aumentando la concentración de sólido causando un incremento en la viscosidad que terminará en la formación de una película sólida.[21]

## 2.7 Técnicas de caracterización

Las técnicas de caracterización son herramientas útiles y necesarias para conocer a fondo sus propiedades y características que posee determinado material. Dentro de las técnicas de caracterización se encuentran las técnicas destructivas y no destructivas. Sin embargo, la idea principal es obtener la máxima información, independientemente del método o técnica utilizada.

Por lo que, es necesario utilizar varias técnicas que en conjunto aportan toda la información posible. Estas técnicas de caracterización permiten correlacionar las condiciones de crecimiento y las propiedades resultantes del método de fabricación.

### 2.7.1 Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX) es una de técnica no destructiva utilizada para análisis cualitativos y cuantitativos de materiales cristalinos semi cristalinos, mono cristalinos y policristalinos. Esta técnica ha sido utilizada durante muchas décadas para proporcionar información sobre la estructura cristalina de los materiales, tal como: las dimensiones de la celda unitaria de un cristal, orientación preferencial, textura, tamaño de cristal, tensión residual, entre otras propiedades.

En la Figura (2.12) se muestra un diagrama típico de un difractómetro de nueva generación con geometría Seemann-Bohlin. La muestra está situada al centro del eje del goniómetro de precisión, el haz divergente de radiación primaria procedente del foco lineal se difracta en la muestra y converge en la rendija receptora, situada en el círculo de focalización. La divergencia angular del haz primario en el plano de focalización (vertical al eje del goniómetro) está determinada por la apertura de la rendija de divergencia, mientras que el conjunto de las múltiples rendijas paralelas (Soller slit) limita la divergencia axial de los rayos en el plano normal al de focalización. La rendija anti dispersión limita convenientemente la sección del haz de radiación reflejado que incide sobre el detector [11].

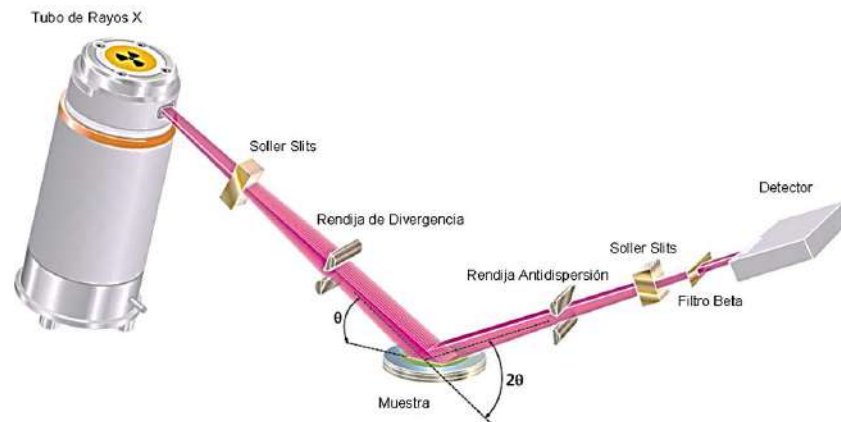


Figura 2.12: Diagrama típico de un difractómetro.

### 2.7.2 Microscopia electrónica de barrido

El microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés), es uno de los instrumentos más versátiles para el análisis microestructural de materiales tanto

orgánicos como inorgánicos. El SEM utiliza un haz de electrones para formar una imagen.

Al realizar una comparación entre el microscopio óptico y el microscopio electrónico fundamentalmente la luz se sustituye por un haz de electrones, las lentes por electroimanes y algunas muestras requieren de una preparación para poder ser observadas, aunque la preparación de las muestras es relativamente fácil pues la mayoría de los SEM sólo requieren que estas sean conductoras. Algunas diferencias significativas entre estas dos técnicas se presentan esquemáticamente en la Figura (2.13).



**Figura 2.13:** Comparación entre el microscopio óptico y el microscopio electrónico.

La manera en que se genera una imagen en un microscopio electrónico de barrido es algo muy diferente a la correspondiente a la visión humana. En un SEM, los electrones de alta energía se focalizan en un fino haz, el cual barre la superficie de la muestra, debido a esto, una amplia variedad de señales es producida, dado que existen interacciones complejas entre el haz de electrones y los átomos del espécimen.

La mezcla de las señales producidas por electrones secundarios (ES) y electrones retrodispersados (ER), son registradas por el detector fotomultiplicador, el cual posee una caja de Faraday que puede polarizarse entre -100V y 300V según se desee rechazar o atraer a los electrones secundarios. Luego, los electrones de baja energía son acelerados con un potencial aproximado de 12kV. Dichos electrones inciden sobre un material centellador, el cual produce luz ante el bombardeo de electrones de alta energía.

La luz creada es llevada por una guía de luz hasta la ventana de un fotomultiplicador, que consiste en una serie de dinodos metálicos, cada uno de los cuales producen una cascada de electrones. Este sistema produce una ganancia en amplificación muy grande con un mínimo de contribución del ruido. Finalmente, la señal resultante es amplificada y visualizada[22].

### **2.7.3 Espectroscopia de Reflectancia Difusa**

Este tipo de espectroscopia estudia la luz reflejada por la superficie de la muestra y puede ser de dos tipos: especular y difusa. Las medidas de reflectancia en condiciones normales contienen ambas componentes; la componente especular posee una escasa información sobre la composición y, por lo tanto, las medidas se realizan intentando minimizar el efecto de esta componente, mientras que la componente difusa es la base de las medidas cuantitativas. En términos más rigurosos, la energía total reflejada por una muestra, es la suma de la reflexión especular (superficial) más la reflexión difusa, que es aquella temporalmente absorbida y luego reemitida por la muestra. Esta técnica ha despertado gran interés, ya que se ha convertido en una de las más utilizadas para el análisis de sólidos y de muestra de polvo fino. Además, los espectros de la mayoría de las muestras sólidas pueden medirse sin ningún tipo de preparación. Debido a lo anterior esta espectroscopia se ha convertido en la técnica más importante que suele utilizarse para el análisis de semiconductores con actividad fotocatalítica. [23]

### **2.7.4 Caracterización (I-V) de una celda solar**

Una celda solar es caracterizada y comparada con otras mediante cuatro parámetros: corriente en corto circuito  $I_{sc}$ , voltaje en circuito abierto  $V_{oc}$ , factor de llenado FF y eficiencia  $\eta$ .

Corriente en corto circuito  $I_{sc}$ : Esta es la corriente máxima que fluye en una celda solar cuando sus terminales del lado p y lado n se encuentran en corto una con la otra, en este caso  $V = 0$ .

$$I = I_{sc} = I_L \quad (1.1)$$

Voltaje en circuito abierto  $V_{oc}$ : Este es el máximo voltaje generado a través de las terminales de una celda solar cuando el circuito es abierto, en este caso  $I = 0$ .

$$I = 0 = I_L - I_F = I_L - I_s \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.2)$$

Así Podemos encontrar  $V_{oc}$ :

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln\left(1 + \frac{I_L}{I_s}\right) \quad (1.3)$$

Factor de llenado FF: Es la tasa de potencia máxima  $P_m = V_m I_m$  que puede ser extraída de una celda solar de la potencia ideal  $P_O = V_{oc} I_{sc}$ .

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1.4)$$

Éste representa la cuadratura de la curva I-V de la celda solar y se representa en términos de porcentaje.

Eficiencia  $\eta$ : Se define como la tasa entre la potencia de salida y la potencia de entrada. La potencia de salida es la potencia máxima en el punto  $P_m$  de la celda solar, y la potencia de la radiación solar  $P_{rad}$ . De acuerdo al estándar internacional para la caracterización de celdas solares,  $P_{rad}$  es igual a  $100 \text{ mW/cm}^2$  o  $1000 \text{ W/m}^2$ .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{rad}} \quad (1.5)$$

Usando  $P_m = V_m I_m$  y las ecuaciones (1.4) y (1.5) se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{rad}} = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{rad}} \quad (1.6)$$

A través de la ecuación (1.6) se puede calcular la eficiencia fotovoltaica[24].



# CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

### 3.1 Metodología general

La metodología general para la Fabricación y caracterización del dispositivo solar se divide en 3 etapas como se ilustra en la Figura (3.1).

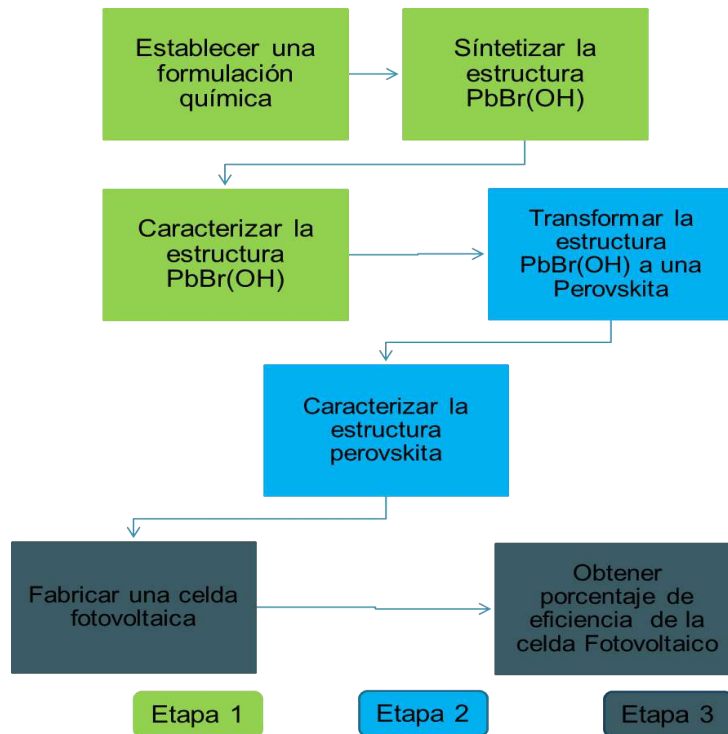


Figura 3.1 Metodología general de depósito.

De acuerdo con la Figura (3.1) se observan tres etapas principales que se describen a continuación:

- **Primera etapa:**  
En esta primera etapa se sintetiza y caracteriza las estructuras  $\text{PbBr(OH)}$  depositadas en un sustrato por el método de deposición química.
- **Segunda etapa**  
En esta etapa se considera la transformación de la estructura  $\text{PbBr(OH)}$  en una estructura tipo perovskita ( $\text{MAPbBr}_3$ ), para su posterior caracterización.
- **Tercera etapa**  
En esta etapa se realiza la fabricación de una celda fotovoltaica, de la cual se obtiene su eficiencia fotovoltaica (%).

## 3.2 Primera Etapa

### 3.2.1 Reactivos utilizados

Los reactivos utilizados para la síntesis de la estructura PbBr(OH) se detallan en la Tabla (3.1), todos los reactivos fueron de grado analítico, con una pureza mayor al 80 %.

Reactivo	Compañía	Porcentaje de pureza	CAS
Nitrato de plomo. Pb (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	MEYER	99%	10099-74-8
Bromuro de potasio KBr	J.T. BAKER	99.5%	7758-02-3
Hidróxido de potasio KOH	Fagalab	85.5%	1310-58-3

**Tabla 3.1:** Reactivos para la síntesis de la estructura PbBr(OH).

### 3.2.2 Preparación de soluciones

Todos los reactivos utilizados para el depósito de las estructuras fueron de las marcas J.T. Baker, Meyer y Faga Lab, por tal motivo es fundamental determinar la cantidad en gramos de cada reactivo para posteriormente preparar las soluciones. La cantidad de reactivo a utilizar se determinó a partir de la siguiente fórmula[25]:

$$g = \frac{M * Lt * W}{\%}$$

Donde:

$M$  = Molaridad del soluto.

$Lt$  = Cantidad de solvente.

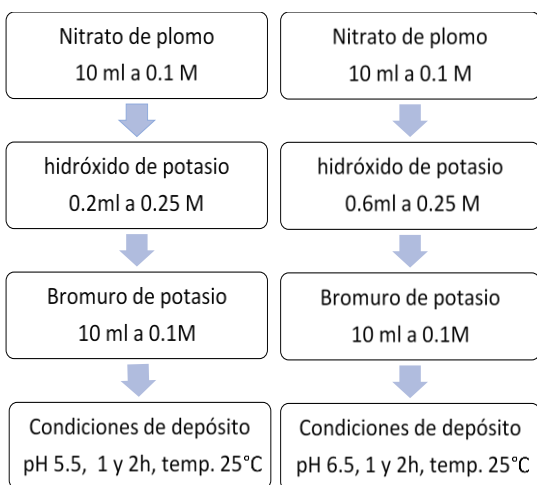
$W$  = Peso molar del soluto.

% = Pureza del soluto

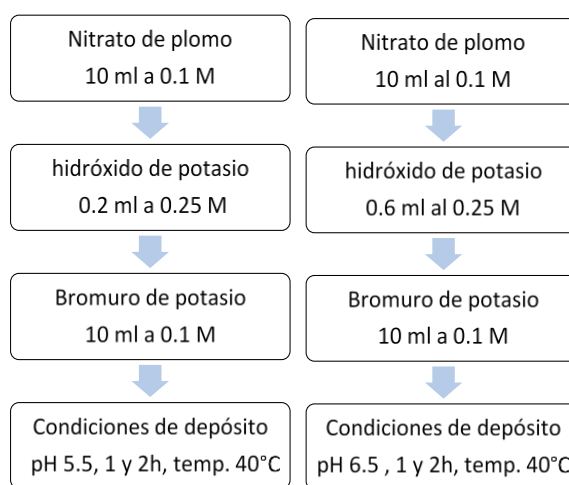
$g$  = Cantidad de reactivo

### 3.2.3 Formulaciones depositadas

A continuación, se muestran las formulaciones y parámetros de depósito utilizados para la síntesis de las estructuras precursoras  $PbBr(OH)$  ver Figuras (3.2 y 3.3). Las corridas experimentales se organizaron con ayuda de un diseño de experimentos 2k con  $k=3$  (pH de la solución, tiempo de depósito y temperatura de depósito).



**Figura 3.2** Formulación a 25 °C.



**Figura 3.3** Formulación a 40 °C.

### 3.2.4 Depósito de estructuras de $PbBr(OH)$

El proceso de limpieza de sustratos permite eliminar la presencia de polvo, grasa o suciedad o impurezas que contenga el objeto, con la finalidad de lograr una mejor tasa de depósito de las estructuras en el sustrato, por lo cual; este proceso de limpieza es de suma importancia para el depósito de las estructuras  $PbBr(OH)$ .

### 3.2.5 Limpieza del sustrato por ultrasonido.

La limpieza de los sustratos requiere utilizar un equipo de ultrasonido (Marca Branson. Modelo 2510) ver Figura (3.4), con la finalidad de garantizar una mayor remoción de polvo o grasa para obtener una mayor tasa de depósito de estructuras.



**Figura 3.4:** Equipo de ultrasonido (Marca Branson. Modelo 2510).

### 3.2.6 Limpieza de sustrato por ultrasonido.

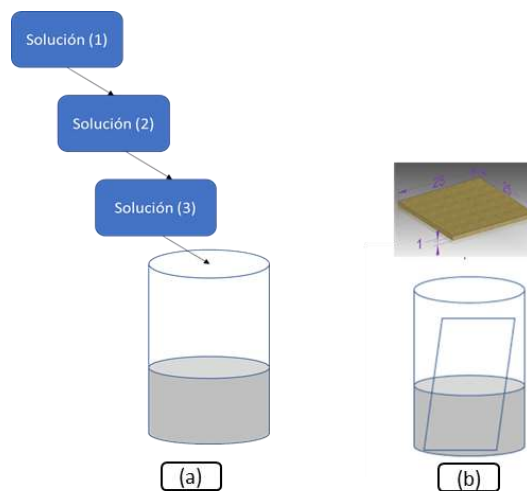
La limpieza de sustratos requiere de los siguientes pasos:

- Lavarlos con jabón neutro y enjuagarlos con agua común.
- Enjuagarlos con agua des-ionizada y colocarlos en el porta-sustratos con agua des-ionizada por 10 minutos en ultrasonido.
- Preparar una razón de 1:1:1 de etanol, xileno y acetona.
- Enjuagarlos con etanol y someterlos a la mezcla antes preparada en el ultrasonido por 10 min.
- Enjuagarlos con acetona.
- Colocarlos en acetona y someterlos al ultrasonido por 5 minutos.
- Enjuagarlos con etanol.
- Colocarlos en etanol y someterlos al ultrasonido por 5 minutos.

Se retiran los sustratos del ultrasónico y se mantienen en porta-sustratos. Antes de ser usados deben ser secados con Nitrógeno a presión.

### 3.2.7 Depósito de las estructuras PbBr(OH)

En la Figura (3.5 a) se ilustra el método de deposición química para la generación de estructuras de PbBr(OH), la cual consiste en verter la solución 1 (Nitrato de plomo) en un vaso de precipitado, posteriormente se ajusta el potencial de hidrogeno con las solución 2 (hidróxido de potasio) y finalmente se agrega la solución 3 (Bromuro de potasio) de acuerdo a las cantidades de solución y condiciones de depósito mostrados en la sección 3.2.3.



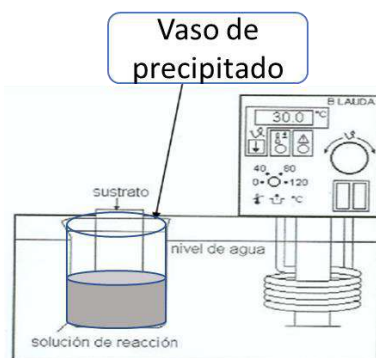
**Figura 3.5** (a) método de deposición química, (b) inmersión de sustrato en solución.

A partir de la solución química realizada, se introduce un sustrato marca Corning ver Figura (3.5 b), con dimensiones de 25 mm<sup>2</sup> y un espesor de 1mm, el cual fue sometido a limpieza por ultrasonido descrito en la sección 3.2.6.

### 3.2.8 Control de la temperatura de la solución química

La solución química obtenida se mantuvo a temperatura constante de acuerdo a la sección 3.2.3, ya que el control de la temperatura en una de las variables de análisis de este proyecto, para lo cual se utilizó un recirculador de agua con control de temperatura (marca PolyScience), donde se introdujeron los vasos de precipitado

con la solución química antes preparada ver Figura (3.6), en función del tiempo de síntesis descrita en la sección 3.2.4.



**Figura 3.6** Recirculador de agua con control de temperatura.

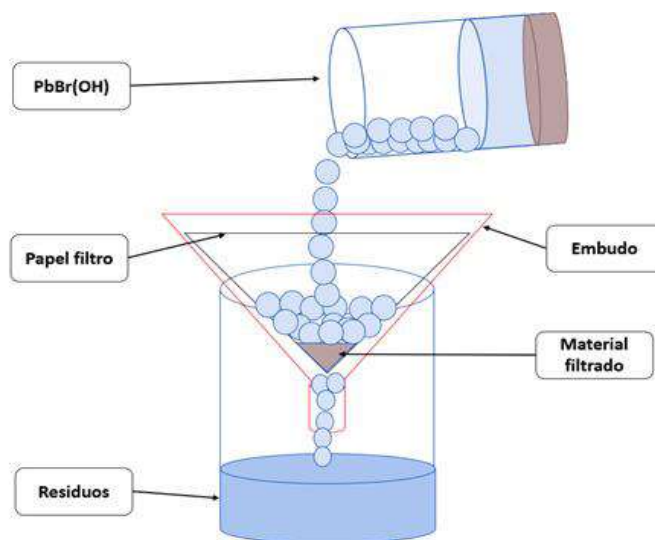
### 3.2.9 Obtención de precipitado de $\text{PbBr}(\text{OH})$ para su conversión en estructura tipo perovskita

Inmediatamente alcanzar las condiciones de depósito, se retira el sustrato de la solución química, para su posterior caracterización estructural, óptica y morfológica de las estructuras depositadas en el sustrato, como se muestra en la Figura (3.7). Adicionalmente es necesario obtener el precipitado de la solución química para su posterior conversión en una estructura perovskita de acuerdo al análisis de las estructuras obtenidas.



**Figura 3.7** Obtención de sustrato.

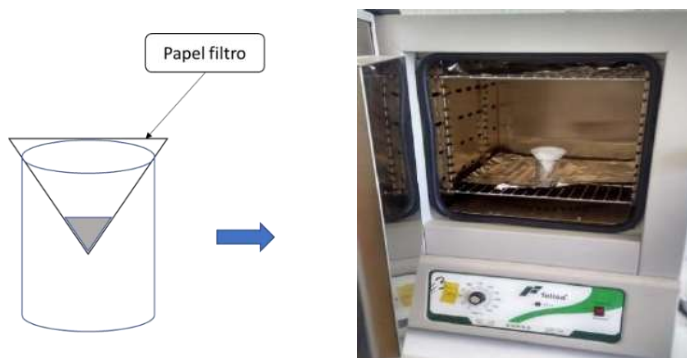
Sin embargo, el precipitado debe ser filtrado con ayuda de papel filtro, el cual permite retener partículas sólidas de la solución precipitada, dicho proceso consiste en hacer fluir la solución precipitada a través de un papel filtro, que está sujeto al embudo que, a su vez, está introducido en un vaso de precipitado para recolectar la solución que no logra retener el filtro, como se muestra en la Figura (3.8).



**Figura 3.8** Filtrado de la solución química.

Finalizado el proceso de filtrado se inicia el proceso de secado del material refinado, con el propósito de eliminar la mayor cantidad de humedad de la muestra precipitada, el proceso de secado se llevó a cabo en un horno felisa<sup>®</sup> ver Figura (3.9), bajo las siguientes condiciones.

- 1 hora de secado
- 60 ° C



**Figura 3.9** Proceso de secado.



Finalizado el ciclo de secado se almacena el polvo en un contenedor para su posterior uso.

### 3.2.10 Caracterización de estructuras PbBr(OH)

La caracterización de las estructuras PbBr(OH) se llevaron a cabo mediante los siguientes equipos Rigaku Dmax2100, Labram II marca Dilor, Cary 5000, Philips modelo XL30 que se detallan a continuación.

### 3.2.11 Difracción de rayos X

Para las mediciones en DRX se sintetizaron 8 estructuras de PbBr(OH) depositadas en sustratos, las cuales se colocaron en un difractómetro de rayos X marca Rigaku Dmax2100 con geometría Seemann-Bohlin mostrado en la Figura (3.10), utilizando un blanco de cobre para la generación de rayos X . Los parámetros utilizados fueron:

- Potencia aplicada para la generación de rayos X: 30 kV.
- Paso del detector: 0.3°/ seg
- Angulo rasante: 2 ° $\theta$



**Figura 3.10:** Difractómetro de Rayos X.

### 3.2.12 Microscopía electrónica de barrido SEM

La obtención de imágenes de la morfología de las muestras se realizó en microscopio electrónico de barrido marca Philips modelo XL30 ESEM mostrado en la Figura (3.11), donde se colocaron muestras de 10 X 10mm aproximadamente las cuáles se pegaron con pintura de plata sobre una placa metálica. Para realizar este análisis se utilizaron las siguientes condiciones:

- Potencia del haz: 10 kV.
- Modo de operación: (morfología).
- Aumentos: 1000X, 2000, 2500X y 5000X
- Spot size: 10  $\mu m$ , 20  $\mu m$  y 50  $\mu m$ .



**Figura 3.11:** Microscopio electrónico de barrido.

### 3.2.13 Espectroscopia de reflectancia difusa

La caracterización de las propiedades ópticas de las estructuras depositadas se llevó a cabo mediante la espectroscopia de reflectancia difusa utilizando un espectrofotómetro UV-Vis-NIR marca Agilent Technologies, modelo Cary 5000

mostrado en la Figura (3.12), equipado con una esfera de integración, utilizando los siguientes parámetros de medición:

- Rango espectral: 200-1000 nm.
- rango de escaneo: 600 nm/min.
- modo: reflectancia difusa.



**Figura 3.12** Espectrofotómetro Cary 5000 UV-Vis-NIR.

### 3.3 Segunda etapa

#### 3.3.1 Reactivos utilizados

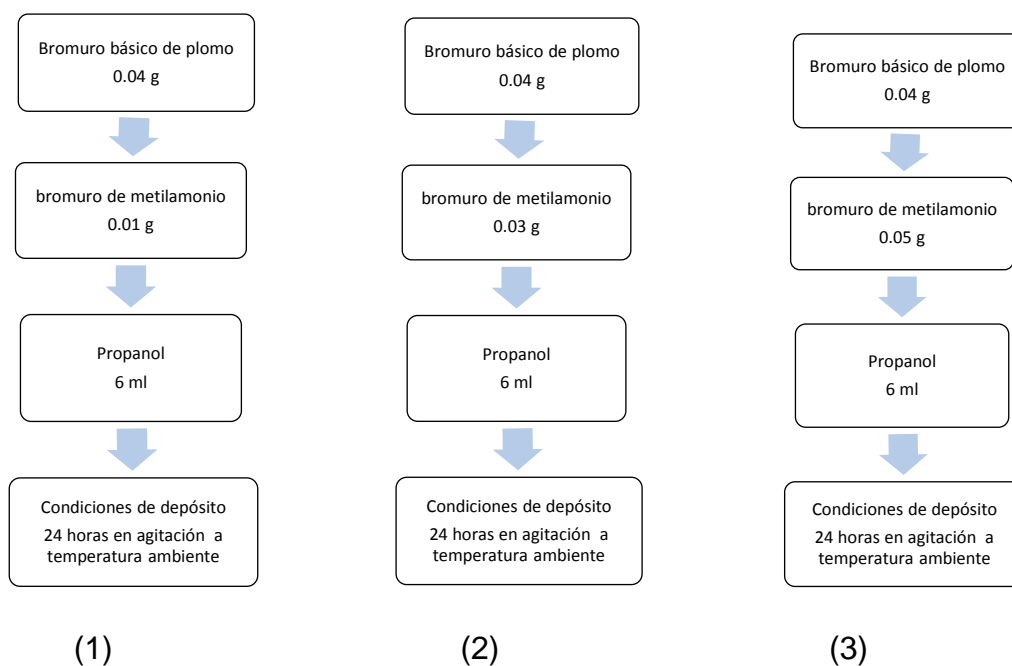
Los reactivos utilizados para la conversión de la estructura  $\text{PbBr}(\text{OH})$  se detallan en la Tabla (3.2).

Reactivo	Compañía	Porcentaje de pureza	CAS
Propanol	J.T.Baker	99.5%	9084-02
bromuro de metilamonio	polymers	NA	6876-37-5
Bromuro básico de plomo	NA	NA	Material sintetizado

**Tabla 3.2** Reactivos utilizados para la conversión de la estructura  $\text{PbBr}(\text{OH})$ .

#### 3.3.2 Formulaciones depositadas

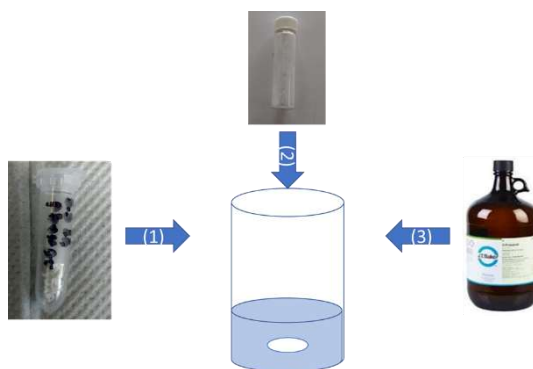
En la Figura (3.13), se muestran las 3 formulaciones y parámetros de depósito utilizados para la conversión de la estructura  $\text{PbBr}(\text{OH})$  a una estructura perovskita. Sin embargo no se utilizó un diseño experimental debido a la escases del reactivo bromuro de metilamonio el cual es fundamental para obtener la estructura perovskita.



**Figura 3.13** Formulaciones de depósito para la obtención de la estructura perovskita.

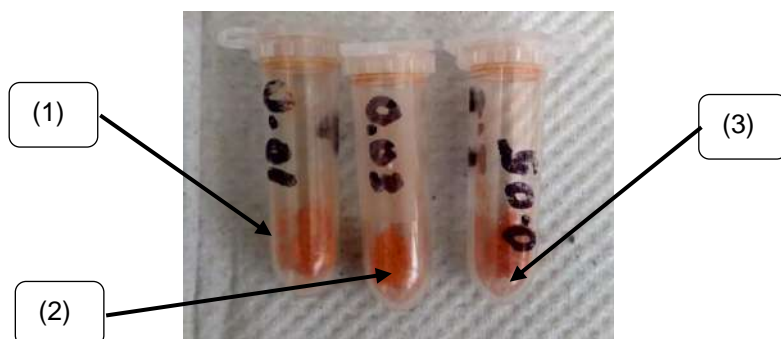
### 3.3.3 Depósito de las estructuras tipo perovskita

En la Figura (3.14) se observa la metodología para la obtención de las estructuras perovskitas, el depósito de las estructuras consiste en agregar el polvo 1 (bromuro básico de plomo), en un vaso de precipitado de 20 ml, a continuación, se agrega el polvo 2 (bromuro de metilamonio), finalmente se agrega la solución 3 (propanol) la cual provoca un cambio de coloración de un color blanco perteneciente a los precursores a un color naranja intenso lo cual indica la presencia de la estructura perovskita de acuerdo a lo reportado en la literatura [26]. Los polvos y soluciones los antes mencionados fueron depositados de acuerdo a la sección 3.3.2.



**Figura 3.14** Metodología de depósito.

Con la finalidad de obtener una mezcla homogénea la solución se somete en agitación de acuerdo a la sección 3.3.2. Finalizado el proceso de agitación se obtuvieron polvos de coloración de naranja bajo las formulaciones mencionadas en la sección (3.3.2) como se muestran en la Figura (3.15).



**Figura 3.15** Polvos obtenidos bajo las formulaciones (1, 2, 3) de la sección (3.3.2) para la síntesis de la estructura perovskita.

### **3.3.4 Caracterización de la estructura perovskita (MAPbBr<sub>3</sub>)**

La caracterización estructural y morfológica se realizó de acuerdo a los parámetros de las secciones 3.2.11 y 3.2.12 respectivamente.

## **3.4 Etapa 3**

### **3.4.1 Fabricación de la celda fotovoltaica.**

Como ha sido anteriormente mencionado (en la sección 2.4), una celda fotovoltaica se caracteriza por una estructura en multicapas. Por ello, el procedimiento para su montaje conlleva varias operaciones efectuadas de forma secuencial. Por lo cual el dispositivo propuesto para fabricar en la presente tesis tendrá la siguiente configuración.

FTO/CdS/MAPbBr<sub>3</sub>/P3HT/C

En dicha configuración se tiene un óxido conductor transparente (FTO) depositado sobre un vidrio, una capa conductora de electrones (CdS), una capa activa (MAPbBr<sub>3</sub>), una capa conductora de huecos (P3HT) y contactos de grafito (C)

### **3.4.2 Depósito de la capa conductora de electrones (ESL)**

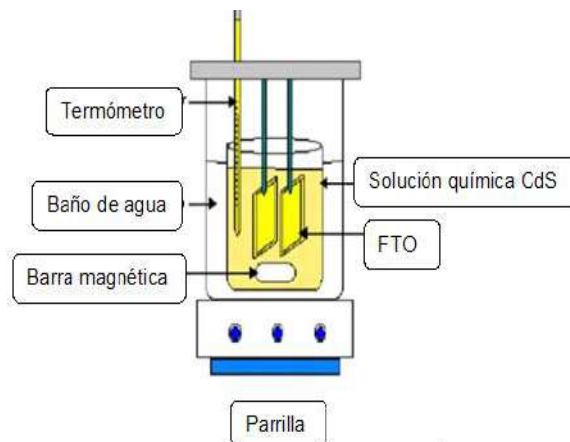
Para la fabricación de la PSC, las diferentes capas serán depositadas sobre los sustratos transparentes conductores de (óxido de estaño dopado con flúor, FTO).

El sustrato de FTO es sometido a un protocolo de limpieza en tres etapas. En primer lugar, se utiliza una disolución de jabón y agua desionizada a 80°C, posteriormente se introduce en acetona durante 10 minutos en ultrasonido y

finalmente se introduce en IPA durante 10 minutos para asegurar la eliminación de las impurezas en el sustrato.

La capa de sulfuro de cadmio se depositó en la cara conductora del sustrato mediante el método de baño químico (ver Figura 3.16). De acuerdo a la metodología reportado en la literatura acerca del crecimiento de CdS por el método de baño químico (DBQ) [27], bajo los siguientes parámetros.

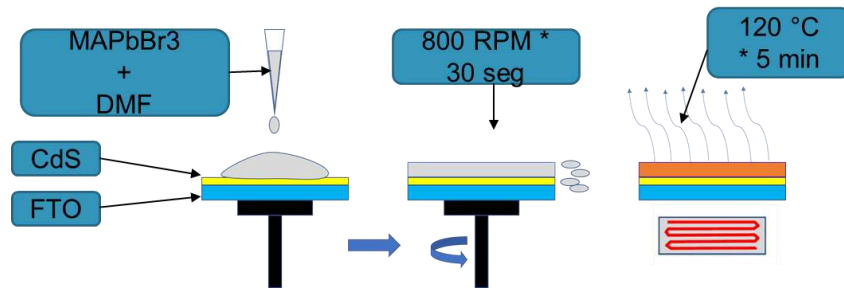
- Temperatura de depósito: 70 °C.
- Tiempo de depósito: 10 min.
- Número de depósitos: 4



**Figura 3.16** Depósito de la capa conductora de electrones (ESL)

### 3.4.3 Depósito de la capa activa de perovskita

La capa de MAPbBr<sub>3</sub> se deposita a partir de la técnica spin coating. El recubrimiento por rotación se lleva a cabo a una velocidad de 800 rpm durante 30 segundos usando el polvo número (2) de la Figura (3.15) diluida en dimetilformamida (DMF), posteriormente, se secan el sustrato en una placa calefactora a 120 °C durante 5 minutos. Como se muestra en la Figura (3.17).

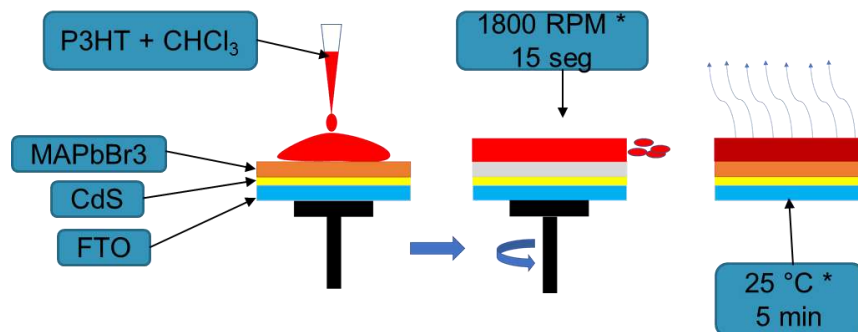


**Figura 3.17** Depósito de la capa MAPbBr3 por el método de spin coating.

Es importante mencionar que en muchos laboratorios el depósito de perovskita se realiza en una cámara de guantes, con una atmósfera inerte y con una humedad despreciable. No obstante, con la idea de disminuir costes, esta fabricación de celdas solares ha sido depositada la estructura de perovskita en una atmósfera húmeda (fuera de la cámara de guantes).

### 3.4.4 Depósito de la capa conductora de huecos (HTL)

El P3HT es depositado como contacto selectivo de huecos (HTL) disolviendo 0.02 g del mismo en 2 ml de cloroformo. La disolución resultante es depositada por spin-coating a una velocidad de 1800 rpm durante 15 segundos. Consecutivamente los sustratos se mantienen a temperatura ambiente durante 5 minutos como se muestra en la Figura (3.18).

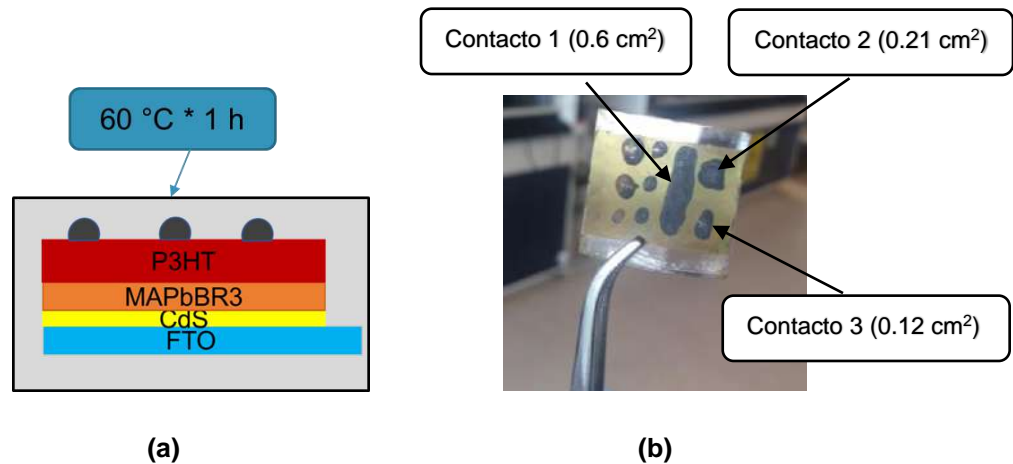


**Figura 3.18** Depósito de la capa de P3HT por el método de spin coating.

Finalmente se depositan 9 contactos de grafito (C) pero sin embargo solo 3 funcionaron debidamente cuentan con áreas activas de (0.6 cm<sup>2</sup>), (0.21 cm<sup>2</sup>) y (0.12



cm<sup>2</sup>), ya que el equipo de caracterización ejercía una presión mayor a la requerida causando la ruptura de 6 contactos ver Figura (3.19 (b)). Los contactos se introducen a un ciclo de secado a 60 °C durante una hora como se muestra en la Figura (3.19 (a)).

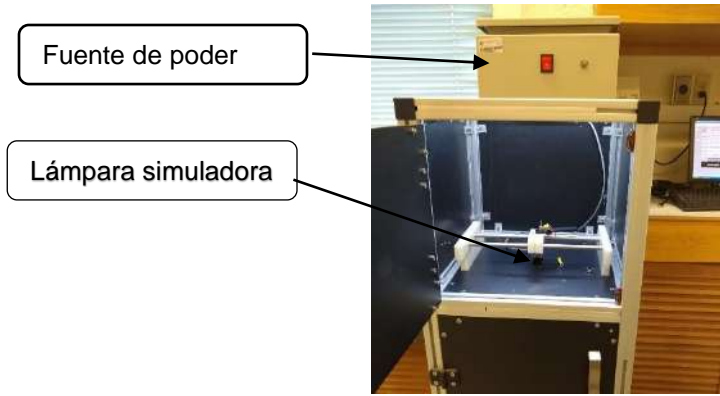


**Figura 3.19 (a)** Representación esquemática de la celda solar **(b)**. Celda sintetizada con los 3 contactos fusionales.

### 3.4.5 Caracterización del rendimiento fotovoltaico

La caracterización del rendimiento fotovoltaico de la celda sintetizada se obtuvo a partir de la curva IV (Curva de Intensidad de corriente-Voltaje), mediante el empleo de un simulador solar ver Figura (3.20), bajo los siguientes parámetros de medición:

- Intensidad de luz: 100 mW/cm<sup>2</sup> (1 sol).
- Áreas activas en cm<sup>2</sup> (contactos 1, 2, 3): (0.6 cm<sup>2</sup>), (0.21 cm<sup>2</sup>) y (0.12 cm<sup>2</sup>)
- Temperatura de celda: Ambiente



**Figura 3.20** Simulador solar

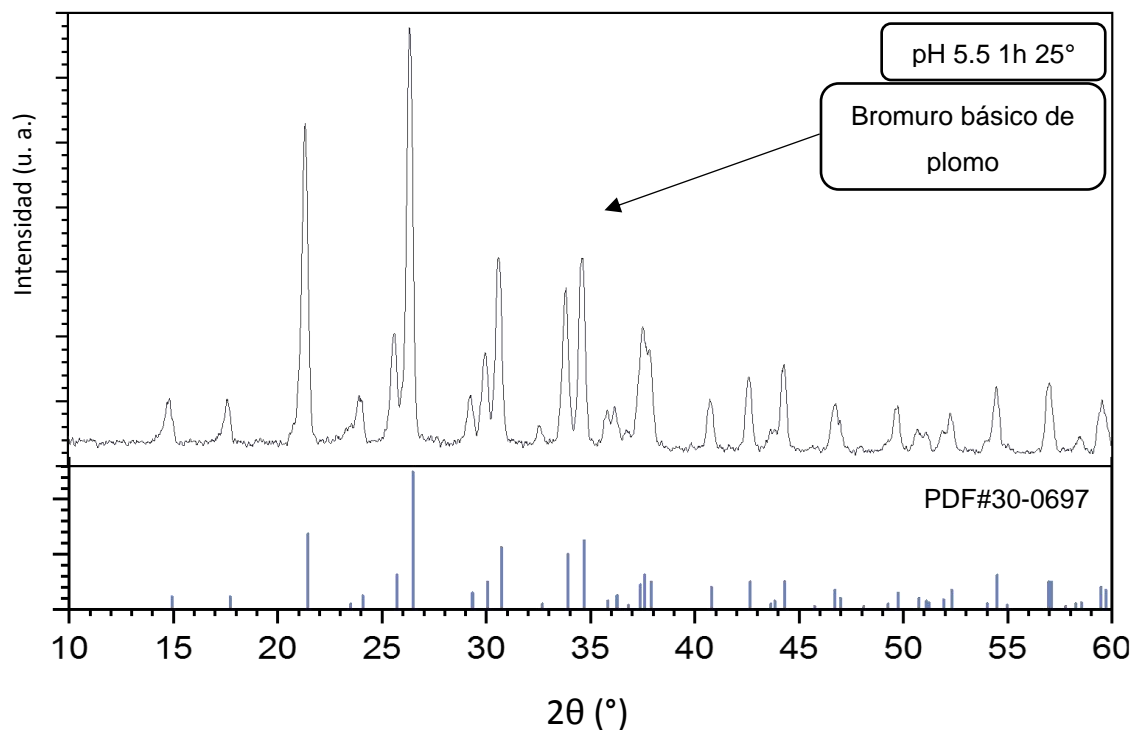
**CAPÍTULO IV.**  
**ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## 4.1 Resultados etapa 1

### 4.1.1 Validación de la estructura PbBr(OH)

La validación del material se realizó mediante un difractómetro de Rayos-X, donde se midió el bromuro básico en forma de polvo, obteniendo las reflexiones correspondientes al PbBr(OH) ver Figura (4.1) de acuerdo a la base de datos Jade6, con número de identificación 30-0697, con lo cual se confirma la presencia del material precursor de la estructura perovskita por consiguiente se da paso al depósito de la estructura PbBr(OH) en sustratos marca Corning. Dicho polvo fue sintetizado bajo las siguientes condiciones.

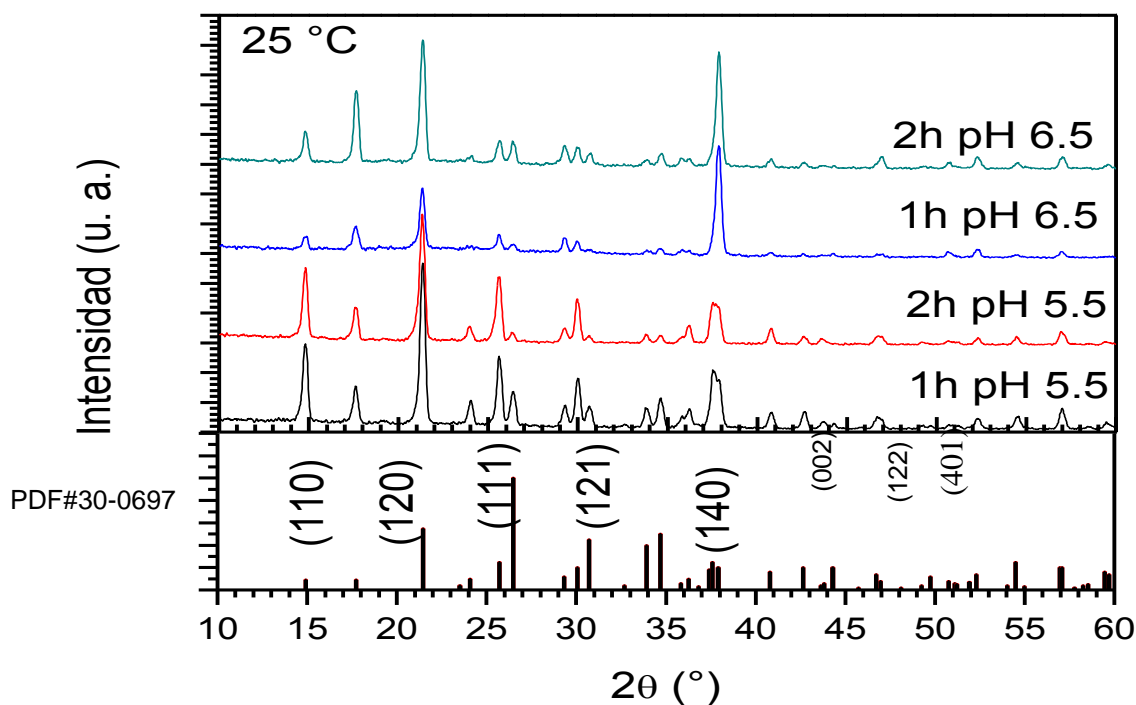
- 1) Potencial de hidrógeno (pH): 5.5
- 2) Tiempo de depósito: 1 h
- 3) Temperatura: 25 °C
- 4) Ciclo de secado: 70 °C



**Figura 4.1** Espectro de rayos X perteneciente al bromuro básico de plomo en polvo

#### 4.1.2 Caracterización estructural del Pb Br (OH) en condición de síntesis de 25°C

Mediante el difractograma de rayos-X se obtuvieron 4 espectros de difracción a una temperatura de síntesis de 25 °C perteneciente al Pb Br (OH)



**Figura 4.2:** Patrón de difracción del PbBr(OH) a 25 °C.

En la Figura (4.2) se observan los espectros de difracción de las estructuras depositadas, donde todos los picos de reflexión pueden indexarse a los de la fase ortorrómbica de Pb Br (OH), de igual manera los picos de difracción fuertes y nítidos indican la buena cristalinidad de los productos sintetizados por el método de síntesis en deposición química.

Por otra parte, los patrones de difracción del PbBr(OH) a 25 °C, no muestran corrimiento de los picos con respecto a los parámetros de depósito tales como: potencial de hidrógeno, tiempo y temperatura de depósito.

Adicionalmente se obtuvieron los parámetros de red de la estructura Pb Br (OH) mediante un ajuste al patrón por el método de Rietveld como se muestra en la Tabla (4.1) obteniendo los siguientes resultados.

No. Muestra	a	b	c	Alpha = beta = gama
5.5 1h 25 °C	7.412 Å	10.067 Å	4.097 Å	90.00°
5.5 2h 25 °C	7.421 Å	10.078 Å	4.101 Å	90.00°
6.5 2h 25 °C	7.415 Å	10.060 Å	4.095 Å	90.00°
6.5 1h 25 °C	7.417 Å	10.073 Å	4.098 Å	90.00°

**Tabla 4.1:** Parámetros de red de la estructura PbBr(OH) a 25 °C.

Con los datos de la tabla (4.1) se logró identificar la celda unitaria del Pb Br (OH) la cual muestra una geometría ortorrómbica, adicionalmente los parámetros de red no muestran variaciones mayores a 0.018 Å por lo cual la forma geométrica de la celda unitaria no presenta deformaciones significativas en sus parámetros (a, b y c).

Con el fin de obtener la mayor información acerca de las estructuras PbBr(OH), se realizó un ajuste al patrón, con el objetivo de obtener el tamaño promedio de los cristales depositados sobre el sustrato, dichos cristales alcanzaron tamaños promedios máximo de 87 nm y mínimo de 24.7 nm, como se observa en la Tabla (4.2).

T(°C)	pH	t(h)	XS (nm)
25 °C	5.5	1 h	87.3
25 °C	5.5	2 h	63.7
25 °C	6.5	1 h	24.7
25 °C	6.5	2 h	52.6

**Tabla 4.2** Tamaño promedio de los cristales.

#### 4.1.3 Caracterización estructural del Pb Br (OH) en condición de síntesis de 40°C

En la Figura (4.3) se observan los espectros de difracción

En la Figura (4.3) se observan los espectros de difracción de las estructuras depositadas, donde todos los picos de reflexión pueden indexarse a los de la fase ortorrómbica de Pb Br (OH), de igual manera los picos de difracción fuertes y nítidos indican la buena cristalinidad de los productos sintetizados por el método de síntesis en solución acuosa. Los cambios de intensidad de los picos se atribuyen principalmente a la temperatura de depósito de la solución acuosa.

Igualmente, los patrones de difracción del PbBr(OH) a 40°C no muestran corrimiento de los picos con respecto a los parámetros de depósito tales como: potencial de hidrógeno, tiempo y temperatura de depósito.

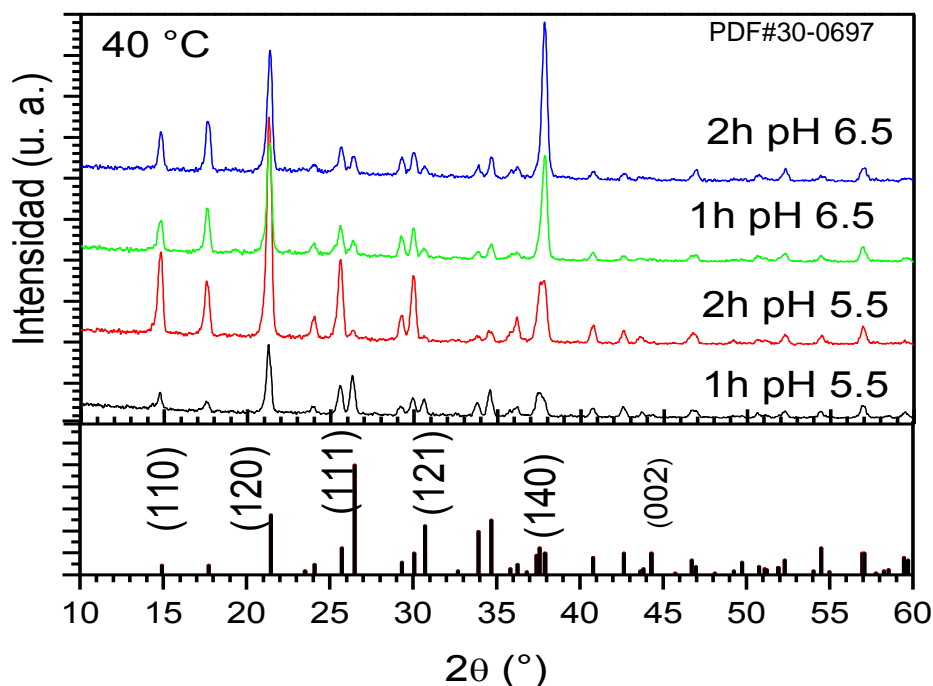


Figura 4.3: Patrón de difracción del PbBr(OH) a 40 °C.

También con los datos de la Tabla (4.3) se logró identificar la celda unitaria del Pb Br (OH) la cual muestra una geometría ortorrómbica, adicionalmente los parámetros de red no muestran variaciones mayores a 0.031 Å por lo cual la forma

geométrica de la celda unitaria no presenta deformaciones significativas en sus parámetros (a, b y c).

No. Muestra	A	b	c	Alpha = beta = gama
5.5 1h 40 °C	7.429 Å	10.102 Å	4.109 Å	90.00°
5.5 2h 40 °C	7.424 Å	10.092 Å	4.105 Å	90.00°
6.5 1h 40 °C	7.422 Å	10.083 Å	4.102 Å	90.00°
6.5 2h 40 °C	7.415 Å	10.071 Å	4.102 Å	90.00°

**Tabla 4.3:** Parámetros de red del PbBr(OH) a 40 °C.

Finalmente se obtuvo la información acerca de las estructuras PbBr(OH), en la cual se realizó un ajuste al patrón con el objetivo de obtener el tamaño promedio de los cristales depositados sobre el sustrato, dichos cristales alcanzaron tamaños promedios máximo de 89.1 nm y mínimo de 25.7nm, como se observa en la Tabla (4.4).

T(°C)	pH	t(h)	XS (nm)
40 °C	6.5	1 h	35.2
40 °C	6.5	2 h	69.4
40 °C	5.5	1 h	25.2
40 °C	5.5	2 h	89.1

**Tabla 4.4** Tamaño promedio de los cristales.

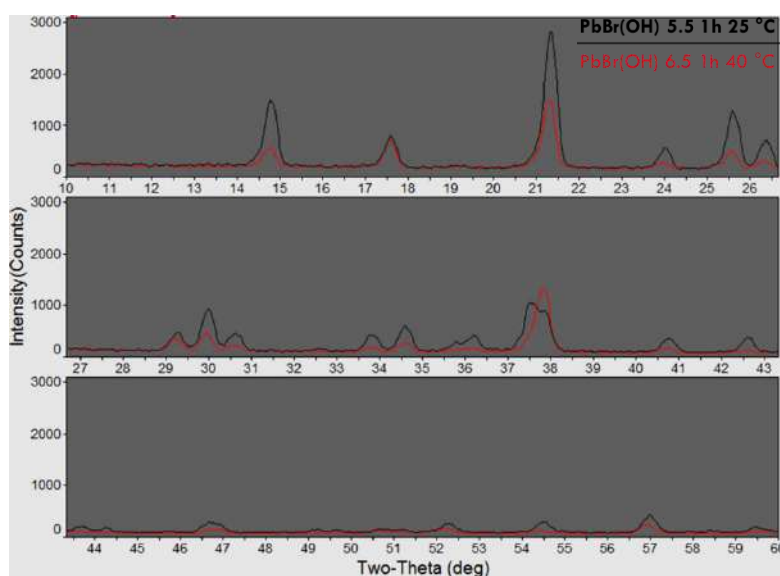
#### 4.1.4 Selección de estructura PbBr(OH) para su conversión en una estructura tipo perovskita

De acuerdo a los 8 espectros de difracciones de rayos (X) de las Figuras (4.2 y 4.3), se realizaron comparaciones de las intensidades de los picos, con la finalidad de obtener los dos mejores espectros (ver Figura 4.4)., ya que el espectro que



muestre una mayor intensidad en sus picos, por tal motivo, tendrá una mayor adherencia al sustrato lo cual es fundamental a la hora de depositar las capa activa de perovskita en una celda solar.

De acuerdo a la Figura (4.4) el espectro de color negro bajo las condiciones de depósito (pH 5.5, 1h, 25 °C), muestran una mayor intensidad de picos en comparación al espectro de color rojo que muestra condiciones de depósito (pH 6.5, 1h, 40 °C), por lo cual el espectro de color negro tiene las características para ser utilizado como precursor de la estructura perovskita.



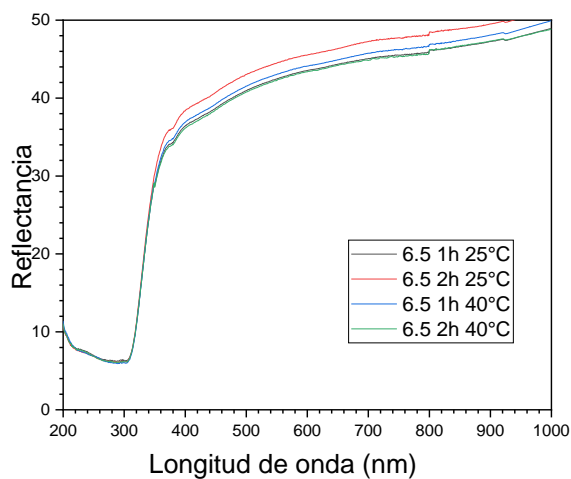
**Figura 4.4** Condiciones de depósito de la línea roja (PbBr(OH) pH 6.5, 1h, 40 °C), condiciones de depósito de la línea negra (PbBr(OH) pH 5.5, 1h, 25 °C)

#### 4.1.5 Reflectancia Difusa de las estructuras PbBr(OH)

Los equipos de reflectancia difusa miden el espectro de mayor a menor longitud de onda, para el caso de estas mediciones, se programó de 200 a 1000 nm, por lo que los gráficos se deben interpretar de derecha a izquierda.

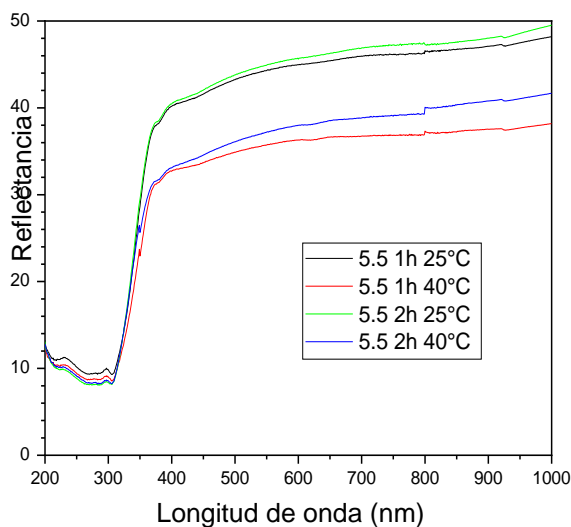
De acuerdo con la Figura (4.5) la reflectancia difusa de las estructura depositadas en un pH de 6.5, muestran longitudes de onda de 400-1000 nm, donde se observa una línea descendente que representa la luz incidente que pasa a través

de las muestras, estas regiones se denomina transmisión o transmitancia óptica, por el contrario, se observa una caída en la longitud de onda de 370 nm aproximadamente adicionalmente los espectros de transmitancia presenta una reflectancia mínima de 48.76% y máxima del 50% .



**Figura 4.5:** Reflectancia difusa con pH 6.5

Del mismo modo en la figura (4.6) se muestra la reflectancia difusa donde se observa las longitudes de onda de 400-1000 nm, perteneciente a las estructuras depositadas bajo el parámetro de pH (5.5), donde se observa una línea descendente que representa la luz incidente que pasa a través de las muestras, además se observa una caída en la longitud de onda de 395 nm aproximadamente adicionalmente presenta una reflectancia mínima de 38.19% y máxima del 49.53%,



**Figura 4.6** Reflectancia difusa con pH 5.5.

#### 4.1.6 Determinación de la brecha prohibida de las estructuras PbBr(OH)

A partir de los espectros de reflectancia difusa se determinó la brecha prohibida de las estructuras, utilizando como variable de análisis principal el valor del pH igual a 5.5. Los valores obtenidos fueron calculados a través del método de aproximación Kubelka-Munk, el cual permite calcular los valores de la brecha prohibida ( $E_g$ ), obteniendo valores que van desde 3.0 eV hasta 3.15 eV, como se ilustra en la Figura (4.7).

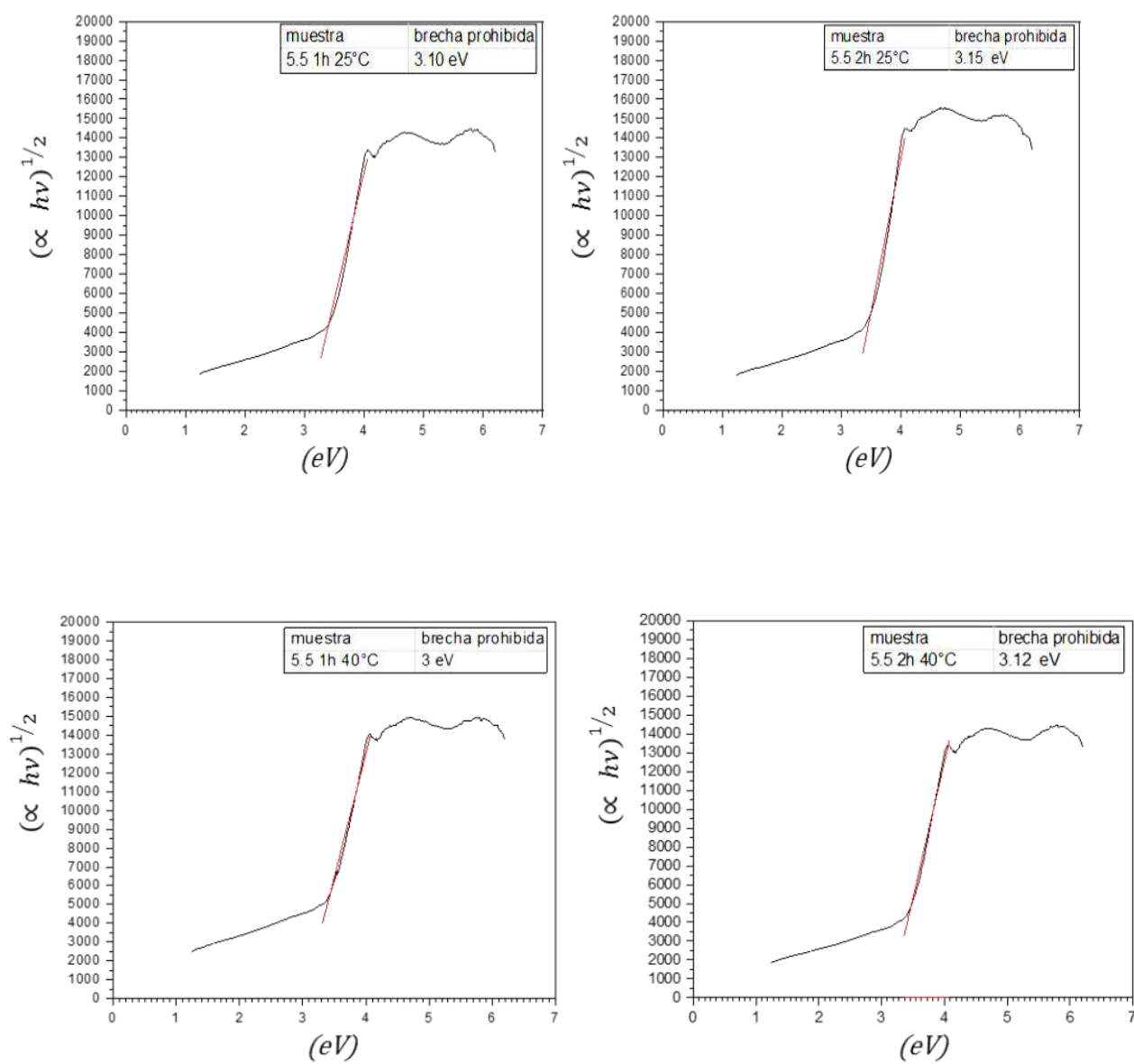
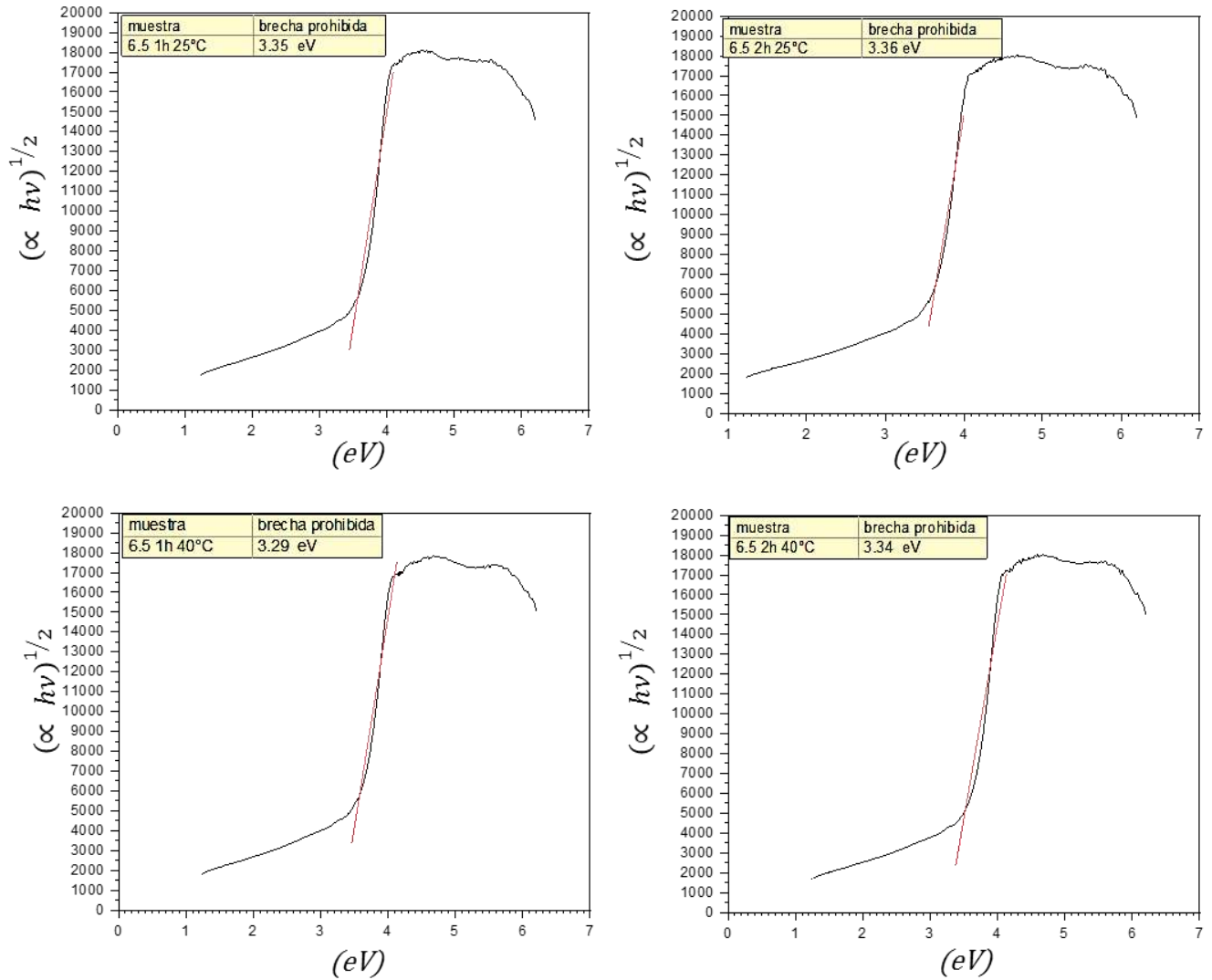


Figura 4.7 Brecha prohibida de las estructuras depositadas en un pH de 5.5.

Sucesivamente se determinó la brecha prohibida de las estructuras que presentan un valor de pH igual a 6.5, alcanzando valores que van desde 3.29 eV hasta 3.36 eV, como se ilustra en la Figura (4.8).



**Figura 4.8** Brecha prohibida de las estructuras depositadas en un pH de 6.5.

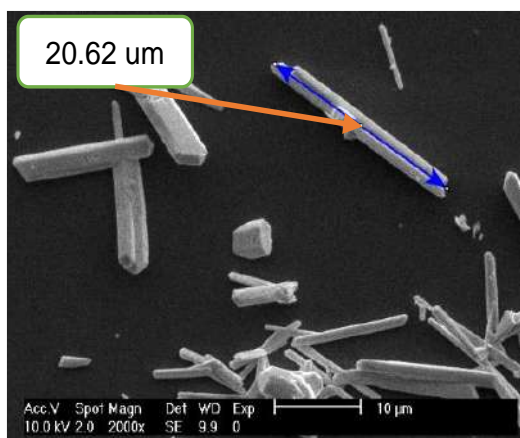
De acuerdo a los graficas antes mencionadas se realizó una recopilación de datos ver Tabla (4.5), con la finalidad de observar el comportamiento de la brecha prohibida en función del pH, los cuales muestran un comportamiento accedente conforme se aumente el valor del pH, lo cual muestra una tendencia para la manipulación del valor de la brecha prohibida.

Muestra	Brecha prohibida
5.5 1h 25°C	3.10 eV
5.5 2h 25°C	3.15 eV
5.5 1h 40°C	3.0 eV
5.5 2h 40°C	3.12 eV
6.5 1h 25°C	3.35 eV
6.5 2h 25°C	3.36 eV
6.5 1h 40°C	3.29 eV
6.5 2h 40°C	3.34 eV

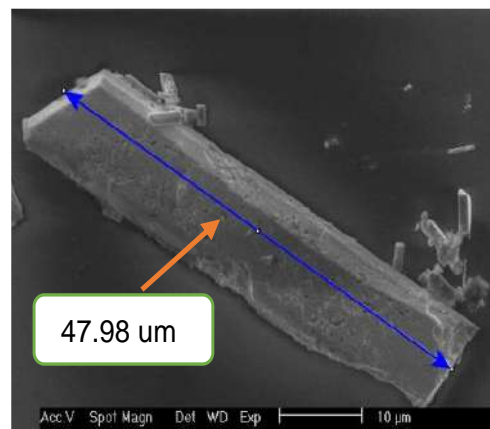
**Tabla 4.5** Brecha prohibida de las estructuras depositadas.

#### 4.1.7 Caracterización morfológica.

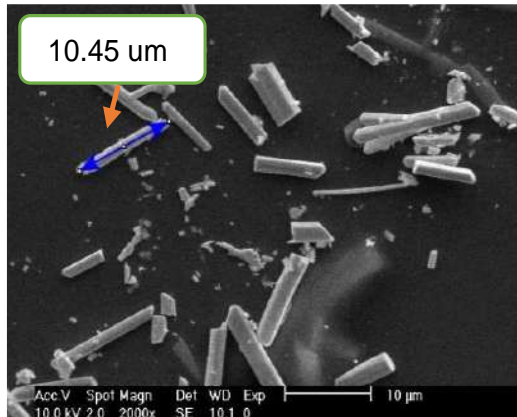
El depósito de las estructuras  $\text{PbBr}(\text{OH})$  fue caracterizada por un microscopio electrónico de barrido (SEM), para realizar el análisis correspondiente fue necesario cortar pequeñas parte de los sustratos aproximadamente  $1 \text{ cm}^2$  para así ser colocados en el porta sustratos del equipo y obtener su posterior caracterización en (SEM). Obteniendo las siguientes micrografías como se muestran en las Figuras (4.9 y 4.10).



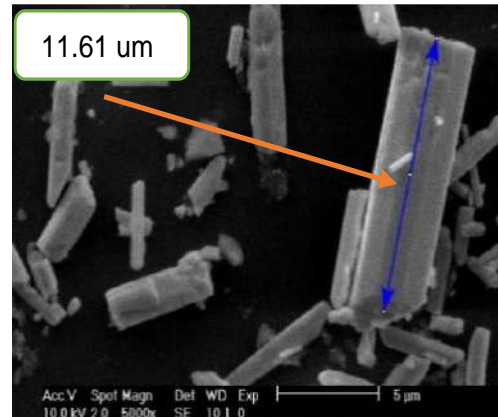
**Figura 4.9** Estructura 6.5 1h 25 °C.



**Figura 4.10** Estructura 6.5 2h 25 °C.

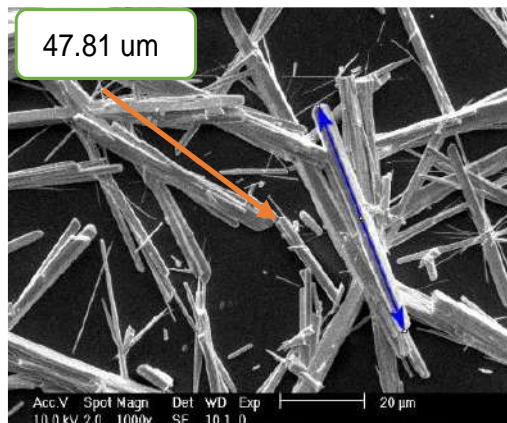


**Figura 4.11** Estructura 6.5 1h 40 °C

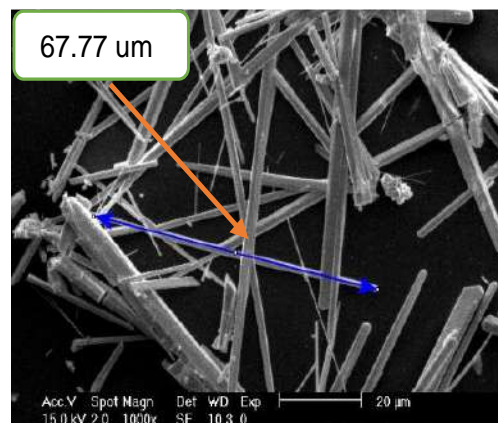


**Figura 4.12** Estructura 6.5 2h 40 °C

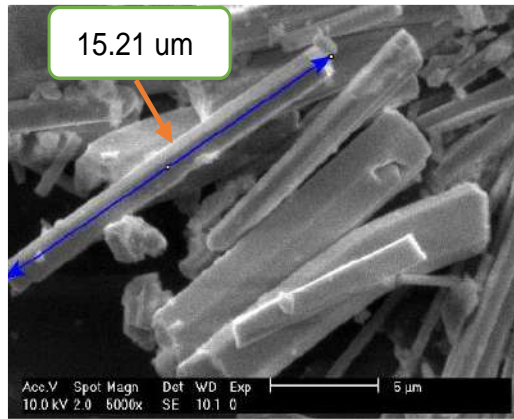
De acuerdo a las micrografías expuestas anteriormente, se puede observar la presencia de estructuras en forma de barras depositadas sobre un sustrato en un pH igual a 6.5. Posteriormente las estructuras depositadas fueron dimensionadas con el software (ImageJ) obteniendo longitudes que va de 10.45 (um) a 47.98 (um). Así mismo las micrografías que presentan valores de pH igual a 5.5 (Ver Figuras 4.11 y 4.12) se logra observa una mayor presencia de estructuras sobre la superficie del sustrato a comparación de las micrografías con valores de pH mayores (6.5), además muestra una longitud mínima de 15.21 (um) y máxima de 67.77(um).



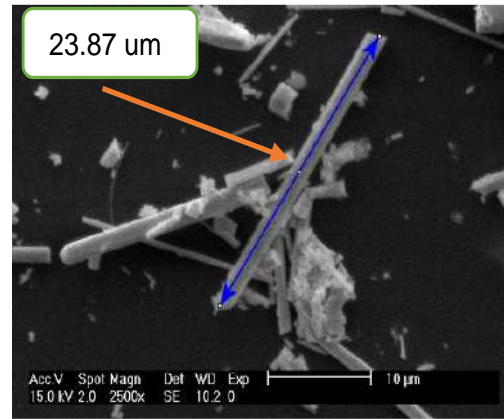
**Figura 4.13** Estructura 5.5 1h 25 °C



**Figura 4.14** Estructura 5.5 2h 25 °C



**Figura 4.15** Estructura 5.5 1h 40 °C



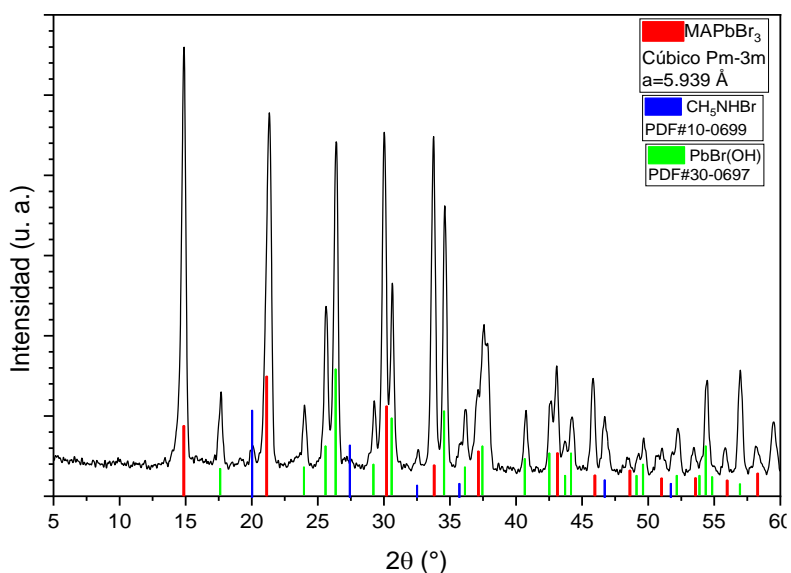
**Figura 4.16** Estructura 5.5 2h 40 °C

## 4.2 Resultados Etapa 2

### 4.2.1 Análisis estructural del MA-PbBr<sub>3</sub> (perovskita)

Con el objetivo de observar el comportamiento de la pureza de la estructura perovskita se realizaron tres depósitos con diferentes cantidades en (g) de MABr.

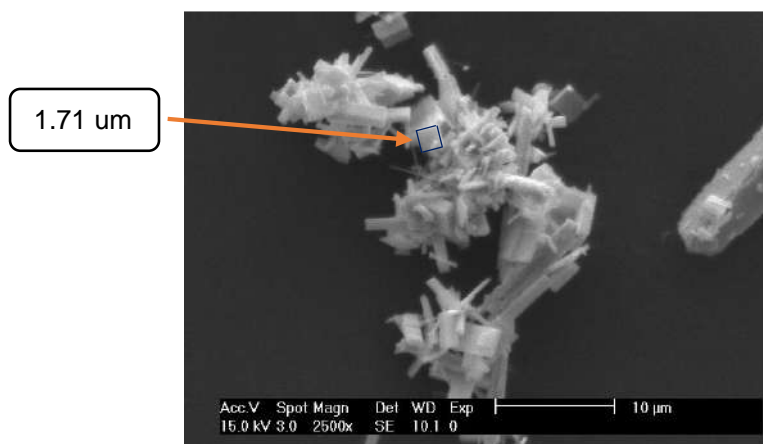
A partir de un difractograma de rayos (X) Rigaku Dmax2100 se caracterizó estructuralmente el polvo (1) (Ver Figura 3.15), el cual contiene 0.01 g de MABr.



**Figura 4.17** Patrón de difracción de rayos (X) de la estructura MAPbBr<sub>3</sub> con 0.01 g de MABr..

De acuerdo con la Figura (4.13) se observan la presencia de líneas rojas, las cuales se pueden indexar a una estructura perovskita cubica  $a=5.9394 \text{ \AA}$  (grupo espacial = Pm-3m) ([28]), por consiguiente se logro obtener la estructura deseada (perovskita), sin embargo tambien se observan faces adicionales pertenecientes a los materiales precursores de la perovskita (PbBr(OH) y CH<sub>3</sub>NHBr con numeros de identificación PDF#30-0697, PDF#10-0699 respectivamente), afectando la pureza cristalina de la estructura deseada. Igualmente fue caracterizada por un microscopio electrónico de barrido (SEM) la morfología del polvo antes mencionado obteniendo una micrografia la cual fue dimensionada con el software (ImageJ) obteniendo una longitud de 1.71 (um) como se muestra en la Figura (4.14)

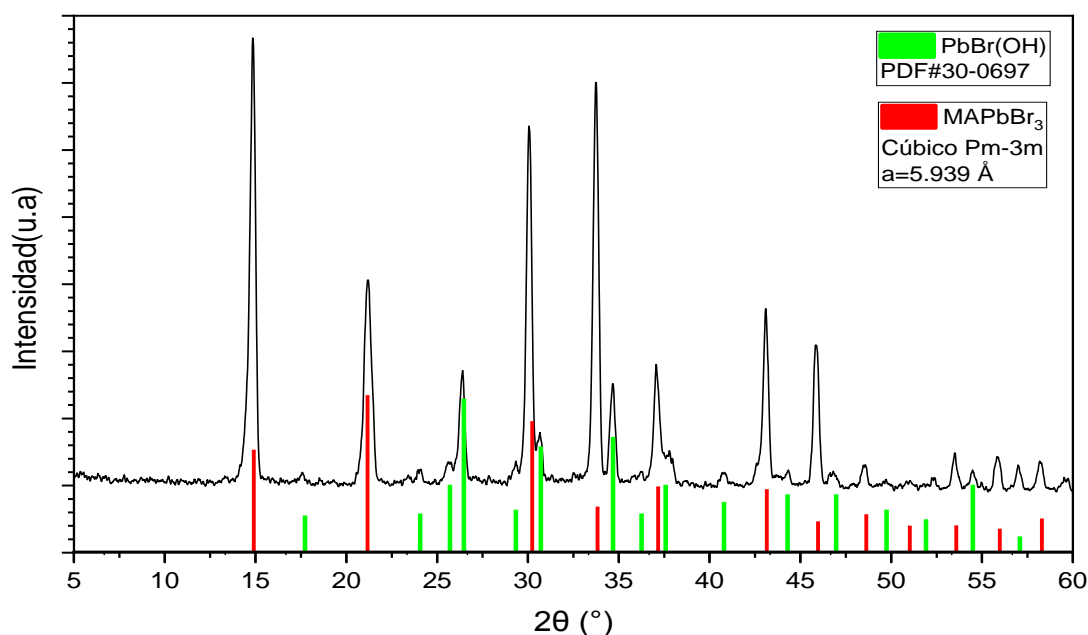




**Figura 4.18** Micrografía de la estructura perovskita con 0.01 g de MABr.

La micrografía mostrada anteriormente corresponde a la Figura (4.14), donde se pueden observar estructuras cubicas pertenecientes a la estructura perovskita de acuerdo a lo reportado en la literatura ([26]), sin embargo; se observan más estructuras, pertenecientes a los precursores de la estructura perovskita de acuerdo al análisis estructural DRX.

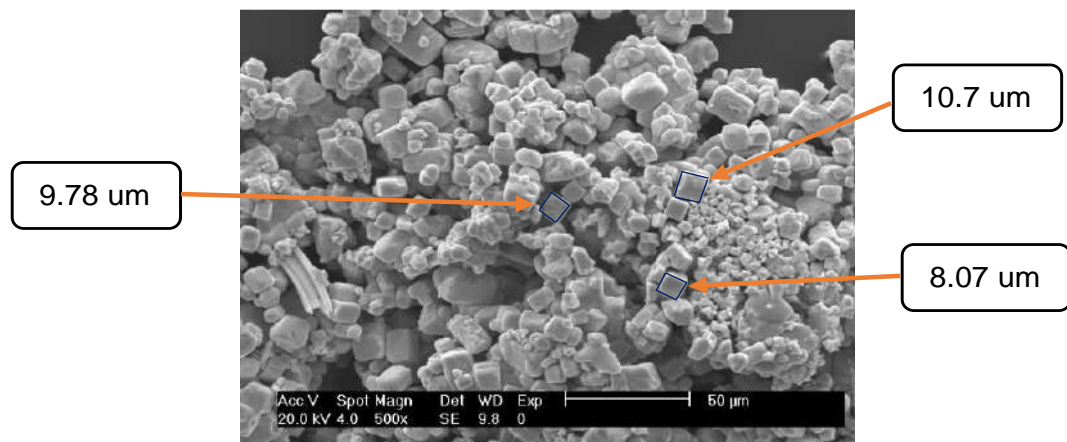
El polvo número (2) (Ver Figura 3.15), se caracterizó estructuralmente usando un difractograma de rayos (X) Rigaku Dmax2100 dicho polvo tiene una concentración de 0.03 g de MABr.



**Figura 4.19** Patrón de difracción de rayos (X) de la estructura MAPbBr<sub>3</sub> con 0.03 g de MABr.

De acuerdo con la Figura (4.15) se observan la presencia de la estructura perovskita la cual se indexar a una estructura cubica  $a=5.9394 \text{ \AA}$  (grupo espacial = Pm-3m) ([28]). A consecuencia del aumento del material MABr se logro obtener la estructura (perovskita) con mayor pureza por tener una fase adicional al material sintetizado en comparacion a las Figuras (4.13 y 4.17), las cuales presentan dos fases adicionales al material deseado.

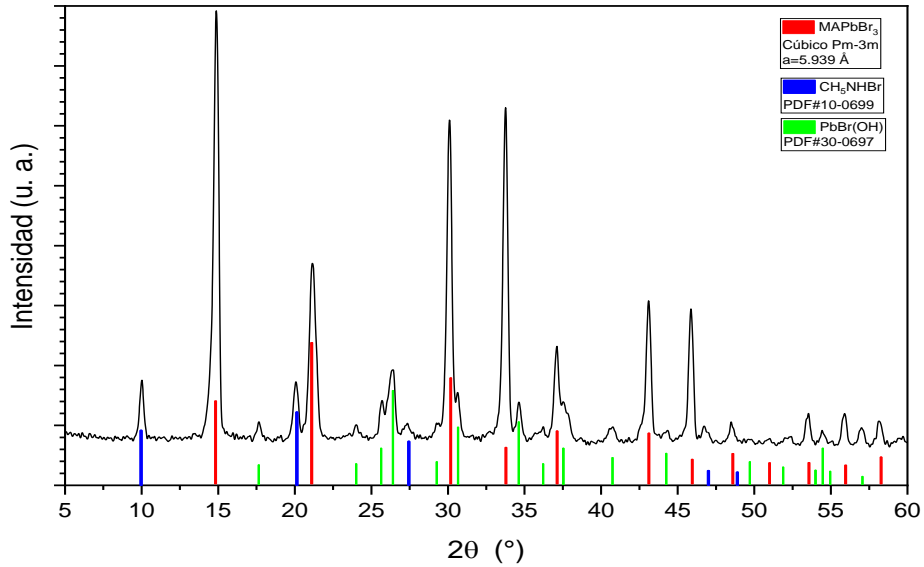
Además, se caracterizó por medio de un microscopio electrónico de barrido (SEM) la morfología del polvo obteniendo una micrografía la cual fue dimensionada con el software (ImageJ) obteniendo unas longitudes de 9.78 (um), 10.7 (um) y 8.07 (um) como se muestra en la Figura (4.16)



**Figura 4.20** Micrografía de la estructura perovskita con 0.03 g de MABr.

De acuerdo a la, micrografía de la Figura (4.16) se pueden observar estructuras cubicas bien definidas lo cual indica una mayor presencia del material esperado, en consecuencia, se reduce la presencia de materiales no deseados. Lo cual reafirman los datos estructurales obtenidos a partir de rayos (X), así mismo cabe señalar que la estructura Perovskita  $\text{MAPbBr}_3$  será deposita como capa activa en la celda solar propuesta en la presente tesis se utilizará el polvo antes analizado.

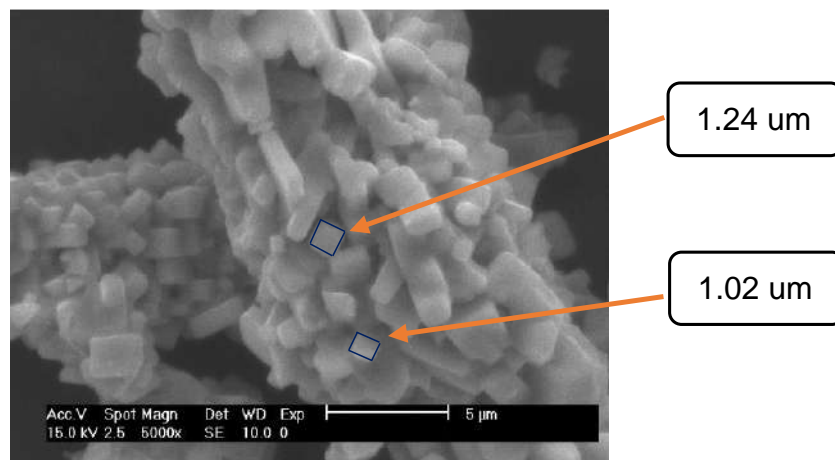
El polvo número (3) (Ver Figura 3.15), se caracterizó estructuralmente usando un difractograma de rayos (X) Rigaku Dmax2100 dicho polvo tiene una concentración de 0.05 g de MABr.



**Figura 4.21** Patrón de difracción de rayos X de las estructuras MA-PbBr<sub>3</sub> con 0.05 g MABr..

De acuerdo al espectro de la Figura (4.17) se observa la presencia de la estructura perovskita pero sin embargo se observan dos fases, lo cual perjudica la pureza de la estructura perovskita. Por lo cual la cantidad en (g) de MABr es el reactivo limitante en la obtención de la estructura perovskita.

De acuerdo a la, micrografía de la Figura (4.16) fue dimensionada con el software (ImageJ) obteniendo las siguientes longitudes de 1.24 (um) y 1.02 (um) se pueden observar estructuras cubicas, así como estructuras pertenecientes a precursores no deseados lo cual confirma la interpretación del espectro DRX antes analizado.



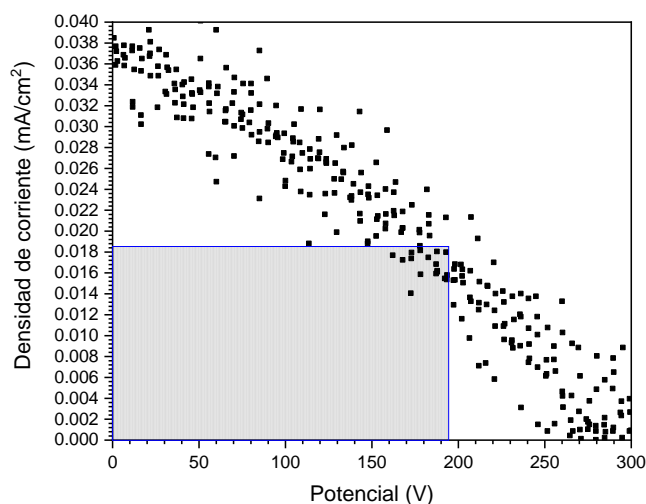
**Figura 4.22** Micrografía de la estructura perovskita con 0.05 g de MABr.

## 4.3 Resultados Etapa 3

### 4.3.1 Caracterización propiedades fotovoltaicas del dispositivo basado en la estructura perovskita MAPbBr<sub>3</sub>

El dispositivo fotovoltaico fabricado cuenta con tres contactos superiores con áreas activas de (0.6 cm<sup>2</sup>), (0.21 cm<sup>2</sup>) y (0.12 cm<sup>2</sup>), las cuales se analizarán a continuación para obtener la eficiencia promedio de la celda solar.

El primer análisis de eficiencia se realizó al contacto número (1) ver Figura (3.19 (b)) con un área activa de (0.6 cm<sup>2</sup>).

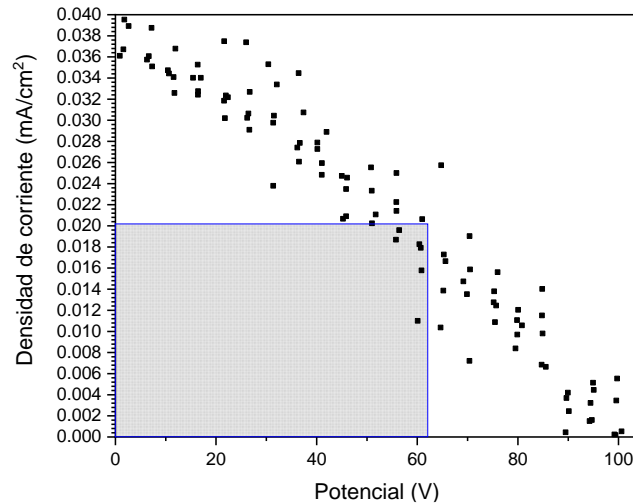


**Figura 4.23** Curva I-V de la celda (contacto número 1)

En la Figura (4.19) se muestra la curva I-V iluminada con una potencia de 100 mW/cm<sup>2</sup> (1 sol) a partir de los datos de densidad de corriente y voltaje se calcula la potencia ( $P=J*V$ ) para determinar el punto máximo de potencia de la celda, que corresponde al punto mínimo de función. A partir de esto se obtuvo los parámetros básicos de desempeño de la celda de  $V_{oc} = 100$  mV,  $J_{sc} = 0.03$  mA/cm<sup>2</sup>, el FF de 37.36 % y  $\eta=0.0011$  %.

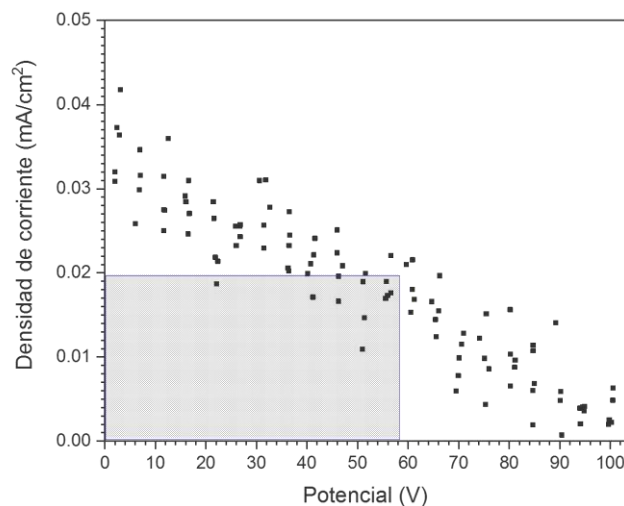
Posteriormente se analizó la eficiencia del contacto número (2) ver Figura (3.19 (b)) con un área activa de (0.21 cm<sup>2</sup>). Este contacto muestra un voltaje igual con

respecto al contacto anterior, sin embargo, en cuanto a la densidad de corriente, ésta aumento, obteniendo valores de  $V_{oc} = 100 \text{ mV}$ ,  $J_{sc} = 0.04 \text{ mA/cm}^2$ , el FF de 35.65 % y  $\eta=0.0014 \%$ .



**Figura 4.24** Curva I-V de la celda (contacto número 2)

En el contacto número (3) ver Figura (3.19 (b)) con un área activa de  $(0.12 \text{ cm}^2)$  se obtuvo un valor de densidad de corriente igual al contacto (2), en cuanto al valor de voltaje, éste aumento, obteniendo valores de  $V_{oc} = 300 \text{ mV}$ ,  $J_{sc} = 0.04 \text{ mA/cm}^2$ , el FF de 29.19. y  $\eta= 0.0035 \%$ .



**Figura 4.25** Curva I-V de la celda (contacto número 3)

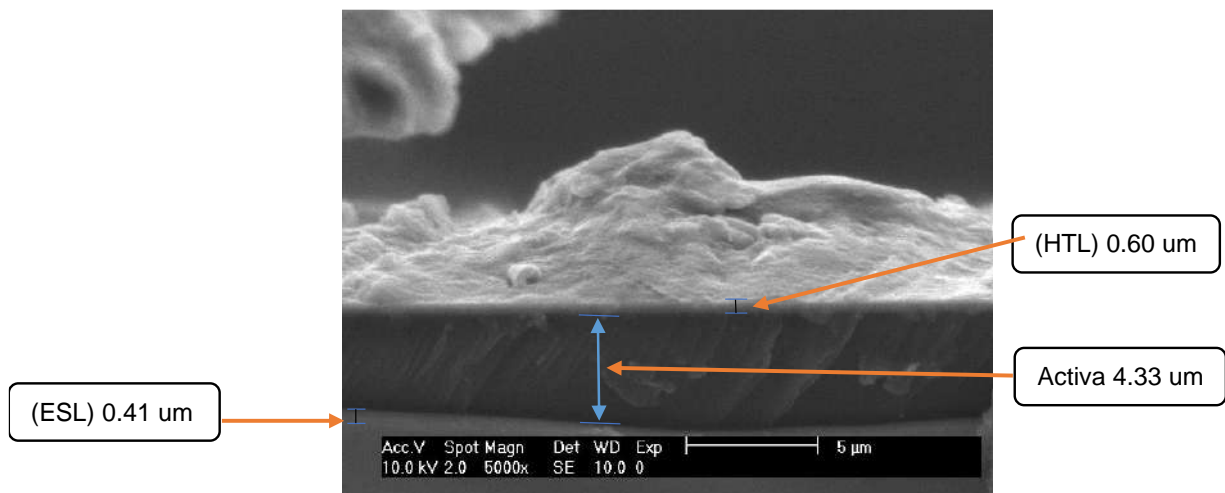
Tomando los valores de eficiencia de las Figuras (4.19, 4.20 y 4.21) se realizó la tabla (4.6) en la cual se observan los distintos parámetros para la obtención de la

eficiencia fotovoltaica de los diferentes contactos de la celda solar obteniendo una eficiencia promedio de 0.002 %

Número de contacto	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	FF (%)	$\eta$ (%)	Eficiencia promedio
1	0.03	100	37.36	0.0011	
2	0.04	100	35.65	0.0014	
3	0.04	300	29.19	0.0035	
					<u>0.002 %</u>

**Tabla 4.6** Eficiencia promedio del dispositivo fotovoltaico

En la Figura (4.42) se presenta la imagen transversal de SEM correspondiente a la celda de FTO/CdS/MAPbBr<sub>3</sub>/P3HT/C, donde se puede observar, la capa conductora de electrones CdS (espesor alrededor de los 0.41  $\mu\text{m}$ ), la capa activa MAPbBr<sub>3</sub> (espesor alrededor de los 4.33  $\mu\text{m}$ ) y la capa conductora de huecos P3HT (espesor alrededor de los 4.33  $\mu\text{m}$ ).



**Figura 4.26** Imagen transversal SEM

#### 4.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo de tesis se logró la obtención de la estructura perovskita, a partir del sistema precursor  $\text{PbBr}(\text{OH})$ , dicha estructura fue analizada mediante un diseño experimental  $2^k = 3$  (pH, tiempo y temperatura), logrando de este modo obtener la estructura opima para su transformación en una estructura perovskita, posteriormente todo esto fue sustentado bajo la caracterización estructural (DRX).

Finalmente, en base a toda la evidencia encontrada tras las caracterizaciones estructurales, morfológicas y fotovoltaica, se concluye la presente tesis con la fabricación de una celda solar funcional logrando una eficiencia promedio del 0.002% utilizando la configuración  $\text{FTO} / \text{CdS} / \text{MAPbBr}_3 / \text{P3HT} / \text{C}$  a través de métodos químicos de depósito los cuales involucran temperaturas bajas de depósito y por consiguiente la generación de una celda solar a bajo costo. De igual forma se acepta la hipótesis es decir existen evidencias suficientes de la formación de una capa activa atribuida a la estructura  $(\text{MA-PbBr}_3)$ , a partir del sistema precursor  $\text{PbBr}(\text{OH})$ .

Sin embargo, se obtiene una eficiencia baja, por lo cual se recomienda variar los espesores de las capas involucradas en la celda ya que de acuerdo a lo reportado en la literatura el espesor de las capas (ESL, activa y HTL) es uno de los factores directamente ligados en la obtención de eficiencias superiores en un dispositivo fotovoltaico multicapas.[29]

## 4.5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Diana and M. M. Montoya, "Películas Orgánico-Inorgánicas con Estructura Perovskita como Capa Activa en Dispositivos Fotovoltaicos Estudiante :," 2016.
- [2] L. Carolina and L. Rinc, "Evaluación de las propiedades ópticas, eléctricas y estructurales de películas delgadas del compuesto Cs," 2017.
- [3] I. N. G. Humberto, R. López, I. N. G. Rafael, and L. Puente, "RED PARA EL AREA DE ESTACIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE SALAMANCA " PARA OBTENER EL TITULO DE MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES PRESENTAN: DR . JOSÈ ALBERTO DUARTE MOLLER CHIHUAHUA , CHIHUAHUA OCTUBRE 2014," 2014.
- [4] S. P. Alc, "Células solares de silicio: fundamentos y aplicaciones," 2008.
- [5] J. Anta, P. D. E. A. Asociacion, D. E. L. A. Industria, F. Asif, E. Silicio, and P. De, "El silicio solar Solar silicon," 2004.
- [6] N. R. E. Laboratory, "National Renewable Energy Laboratory," *Best Research-Cell Efficiency Chart*, 2019. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [7] E. Sol, "Capítulo 2. El potencial de la radiación solar Capítulo 2. EL POTENCIAL DE LA RADIACIÓN SOLAR 2.1 CARACTERIZACIÓN SOLAR 2.1.1 El Sol," pp. 26–54.
- [8] J. A. Bernal Martínez, "Síntesis y Caracterización de películas delgadas de PbSe elaboradas por baño químico en un proceso de dos etapas," 2012.
- [9] N. Flores and M. Dominguez, "Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio.," p. 82, 2015.
- [10] M. Arenas Pérez, "Diseño y síntesis de semiconductores orgánicos con capacidad de organización, alta movilidad de portadores de carga y bajo band gap," 2016.



- [11] J. A. A. MARTINEZ, "Sintetización e incorporación de la fase  $\text{Co}_2\text{SnO}_4$  en varistores cerámicos basados en  $\text{SnO}_2$ ," UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, 2008.
- [12] "No Title Óxido de Silicio Rico en Silicio." [Online]. Available: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20426/Capitulo1.pdf>.
- [13] C. Nohe, "celdas solares tipo Grätzel Artículo Fabricación automatizada de películas delgadas compactas en el desarrollo de celdas solares tipo Grätzel," no. June, 2017.
- [14] S. R. Terrón, "Fabricación y caracterización de celdas fotovoltaicas de perovskita de nueva composición," 2018.
- [15] C. N. V. HERNÁNDEZ, "SÍNTESIS DE CRISTALES A PARTIR DE DOS FASES INMISCIBLES.," INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, 2007.
- [16] "Química General, Darrell D. Ebbing., Editorial McGraw-Hill, 1997, 5ª Edición, pág. 460-463."
- [17] F. Borquez, "Cristalización," *SCRIBD*. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/371159800/CAPITULO5CRISTALIZACION#logout>. [Accessed: 10-Feb-2019].
- [18] "Redes de Bravais," *Wikiwand*. [Online]. Available: [http://www.wikiwand.com/es/Redes\\_de\\_Bravais](http://www.wikiwand.com/es/Redes_de_Bravais).
- [19] I. Weizmann Institute of Science Rehovot, *CHEMICAL SOLUTION DEPOSITION OF SEMICONDUCTOR FILMS*, vol. 10. New York, 2002.
- [20] E. M. RODRÍGUE, "SÍNTESIS DE BICAPA  $\text{CdS}/\text{CuS}$  CRECIDA MEDIANTE DEPÓSITO EN BAÑO QUÍMICO CONCURRENTE Y ANÁLISIS DE SUS PROPIEDADES," INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LIBRES, 2015.
- [21] G Solares, "Preparación , Caracterización y Modelización de Cristales Fotónicos Coloidales para Aplicaciones en Células."

- [22] R. C. Colonia, "Síntesis y Caracterización de nanopartículas de ZnO<sub>2</sub> y su actividad antimicrobiana," no. August, 2014.
- [23] S. B. Ynbo, "Síntesis y Caracterización del nuevo Síntesis y Caracterización del nuevo."
- [24] D. L. R. VELA, "ESTUDIO SOBRE LOS EFECTOS DEL POS-TRATAMIENTO PARA EL DESARROLLO DE ESTRUCTURAS FOTOVOLTAICAS USANDO SULFURO SELENIURO DE PLATA ANTIMONIO COMO MATERIAL ABSORBEDOR," UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, 2016.
- [25] E. M. RODRÍGUEZ, "SÍNTESIS DE BICAPA CdS/CuS CRECIDA MEDIANTE DEPÓSITO EN BAÑO QUÍMICO CONCURRENTES Y ANÁLISIS DE SUS PROPIEDADES," INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LIBRES, 2015.
- [26] U. Coruña, "Máster Universitario en Investigación Química y Química Industrial," 2017.
- [27] M. G. Sandoval-paz and M. B. Ortun, "Journal of Physics and Chemistry of Solids Observations on the influence of pH control on the properties of chemically deposited CdS films in an ammonia-free system," vol. 70, pp. 1034–1041, 2009.
- [28] T. Baikie *et al.*, "and solid-state nuclear magnetic resonance study," *J. Mater. Chem. A Mater. energy Sustain.*, vol. 3, pp. 9298–9307, 2015.
- [29] S. L. LOREDO, "DISEÑO DE CELDAS SOLARES EN PELÍCULA DELGADA USANDO CuInS<sub>2</sub>, CuInSe<sub>2</sub> y AgInS<sub>2</sub> COMO CAPAS ABSORBEDORA," UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, 2014.

## 4.6 GLOSARIO

**Anión:** es un ion con carga eléctrica negativa, es decir, que ha ganado más electrones.

**Band gap:** La diferencia de energía entre la banda de valencia y la de conducción

**Catión:** es un ion con carga eléctrica positiva, es decir, que ha perdido electrones.

**Coplanaridad** un conjunto de puntos en el espacio es coplanario si todos los puntos se encuentran en el mismo plano.

**Difracción:** es un fenómeno característico de las ondas que se basa en la desviación de estas al encontrar un obstáculo o al atravesar una rendija.

**Dinodo** Un dinodo es el nombre que reciben cada uno de los electrodos de un tubo fotomultiplicador.

**Electrón** El electrón, comúnmente representado por el símbolo  $e^-$ , es una partícula subatómica con una carga eléctrica elemental negativa. Un electrón no tiene componentes o subestructura conocidos; en otras palabras, generalmente se define como una partícula elemental.

**Fotón** El fotón es la partícula elemental responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético.

**FTO** Oxido de estaño dopado con flúor.

**Hidroxilos** El grupo hidroxilo es un grupo funcional formado por un átomo de oxígeno y otro de hidrógeno, característico de los alcoholes, fenoles y ácidos carboxílicos entre otros compuestos orgánicos.

**IPA** Alcohol isopropílico.

**Indexarse** Ordenar una serie de datos o informaciones de acuerdo a un criterio común a todos ellos, para facilitar su consulta y análisis

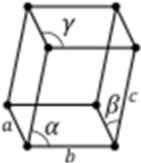
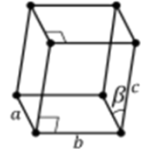
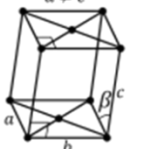
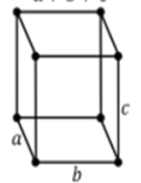
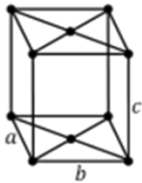
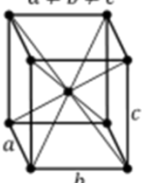
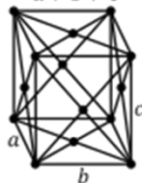
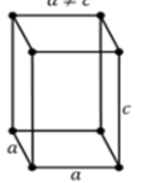
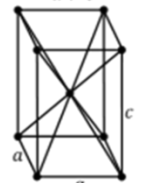
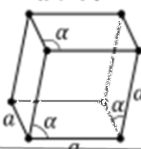
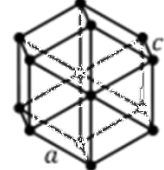
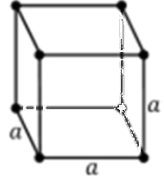
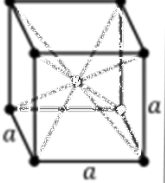
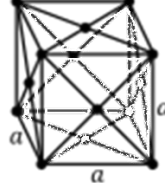
**Monocristales** monocristal es un material en el que la red cristalina es continua y no está interrumpida por bordes de grano hasta los límites de la muestra.

**Morfología:** es la disciplina encargada del estudio de la estructura de un organismo o sistema y sus respectivas características.

**Paralelepípedica** Un paralelepípedo es un poliedro de seis caras, en el que todas las caras son paralelogramos, paralelas e iguales dos a dos

## 4.7 ANEXOS

### Anexo (1) Redes de cristalización

celda	P	C	I	F
triclínico				
monoclínico	$\beta \neq 90^\circ$ $a \neq c$ 	$\beta \neq 90^\circ$ $a \neq c$ 		
ortorrómbico	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 
tetragonal	$a \neq c$ 		$a \neq c$ 	
romboédrico (trigonal)	$\alpha \neq 90^\circ$ 			
hexagonal				
cúbico				

Anexo (2) Celda unitaria de la estructura PbBr(OH)

