

Parámetros Utilizados en Métodos de Síntesis Mediante Evaporación de Películas Delgadas de  
Sulfuro de Estaño.

Anderson Rubiano Forero y John Alejandro Castillo Ariza

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electricista

Directora

Mónica Andrea Botero Londoño

Doctora en Ciencias físicas

Codirector

Carlos Eduardo Rondón Almeyda

Magister Ingeniería de materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

Primeramente, dedico este proyecto a Dios, por haber permitido cumplir una meta más en mi vida.

A mis padres, Crisanto Rubiano y Doris Forero, que con su amor, comprensión y esfuerzo incondicional siempre están presentes apoyándome en cada proceso de mi vida. Gracias por brindarme los mejores recursos y enseñanzas, las cuales, me han hecho un ser humano lleno de principios y valores que me ayudaran a crecer en el futuro como persona y profesional.

A mi hermano, Jojan Estiben, gracias por brindarme su apoyo en todos los momentos de mi vida, por cada consejo brindado y por su gran ejemplo.

A mi hermano, Miguel, por acompañarme, brindarme su apoyo y estar ahí para mí siempre en todos los momentos de mi vida.

A Paula mi novia, por llenar de amor y alegría cada momento en esta etapa de mi formación profesional.

A todas las personas y amigos que de una u otra manera han aportado un granito de arena en esta etapa de mi vida.

***ANDERSON RUBIANO FORERO***

### **Dedicatoria**

A Dios, por permitir cumplir una meta más de mi vida.

A mis padres, Libardo Castillo Gómez y Blanca Nancy Ariza Zarate, por el apoyo incondicional que me han brindado, esta meta no es solo mía también de ustedes.

A mi hermana, por apoyarme y acompañarme cada día de mi vida.

A todas esas personas que de un modo u otro han aportado para ser la persona que soy el día de hoy.

***JOHN ALEJANDRO CASTILLO ARIZA***

### **Agradecimientos**

Agradecemos profundamente a la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, a los profesores que nos otorgaron su conocimiento, apoyo y nos ayudaron a culminar este proceso de formación. A la Dra. Mónica Botero Londoño y al Mg. Carlos Rondón Almeyda por su apoyo, dedicación, tiempo y paciencia que nos brindaron en el desarrollo de esta investigación.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
1. Objetivos .....	14
1.1 Objetivo General .....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Teórico.....	15
2.1 ¿Qué es un sistema a fotovoltaico?.....	15
2.2 Celdas solares de película delgada.....	17
2.2.1 Familias de celdas solares de película delgada .....	18
2.3 Propiedades ópticas, eléctricas y estructurales de materiales fotovoltaicos. ....	19
2.3.1 Propiedades ópticas.....	19
2.3.1.1 Coeficiente de absorción ( $\alpha$ ) .....	19
2.3.1.2 Brecha de energía prohibida .....	20
2.3.2 Propiedades Estructurales .....	22
2.3.3 Propiedades eléctricas .....	22
2.4 Técnicas de fabricación de películas delgadas.....	23
2.4.1 Deposición mediante CVD .....	23
2.4.2 Deposición mediante PVD.....	24
2.5 Estado del arte de los métodos de evaporación .....	24
2.5.1 Evaporación Térmica.....	24
2.5.2 Evaporación por haz de electrones .....	27
2.5.3 Co-evaporación .....	28
2.6 Bibliometría .....	30
2.7 VOSviewer.....	32
3. Metodología a la investigación .....	35
3.1 Análisis bibliográfico.....	35
3.2 Análisis bibliométrico a partir de la herramienta VOSviewer .....	36
3.3 Equipos de laboratorio .....	37
4. Análisis de tablas .....	39

4.1 Relación de las variables de síntesis con respecto a las variables de salida. ....	39
4.2 Mapas bidimensionales de VOSviewer .....	44
4.2.1 Visualización de red de las bases de datos analizadas .....	44
4.2.2 Densidad de la red de las bases de datos analizadas.....	47
4.3 Análisis de los mapas bidimensionales del software VOSviewer .....	49
5. Análisis de resultados .....	52
5.1 Equipos de laboratorio .....	52
5.1.1 Descripción de los equipos de laboratorio. ....	52
5.2 Método de síntesis.....	54
5.2.1 Limpieza de los sustratos .....	54
5.2.2 Metodología para el proceso de síntesis .....	54
6. Conclusiones .....	56
Referencias Bibliográficas .....	57

**Lista de Tablas**

Tabla 1. <i>Propiedades de las películas delgadas.</i> .....	18
Tabla 2. <i>Escala de importancia.</i> .....	40
Tabla 3. <i>Tipos de variables de entrada y salida por el método de evaporación térmica.</i> .....	40
Tabla 4. <i>Tipos de variables de entrada y salida por el método de co-evaporación.</i> .....	42
Tabla 5. <i>Tipos de variables de entrada y salida por el método de evaporación por haz de electrones.</i> .....	43
Tabla 6. <i>Análisis de ocurrencia de términos Scopus.</i> .....	49
Tabla 7. <i>Análisis de ocurrencia de términos Web of Science.</i> .....	50
Tabla 8. <i>Análisis de ocurrencia de términos Science Direct.</i> .....	51

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Evolución de la eficiencia de conversión de celdas solares fabricadas con diferentes tecnologías de 1975 a 2020.</i> .....	16
Figura 2 <i>Estructura de una celda solar de película delgada tipo hetero-juntura (p/n)</i> .....	17
Figura 3 <i>Ejemplo de grafica de método de Tauc.</i> .....	21
Figura 4 <i>Equipo de deposición por evaporación térmica.</i> .....	26
Figura 5 <i>Equipo de deposición usado para la técnica de evaporación por haz de electrones.</i> ....	28
Figura 6 <i>Equipo de deposición usado para la técnica de co-evaporación.</i> .....	30
Figura 7 <i>Ejemplo de visualización bibliográfica del software VOSviewer.</i> .....	33
Figura 8 <i>Emparejamiento bibliográfico a partir de las bases de datos a) Scopus b) Web of Science y c) Science Direct tomado del software VOSviewer.</i> .....	45
Figura 9 <i>Visualización de densidad de red conforme las bases de datos donde a) Scopus b) Web of Science y c) Science Direct según VOSviewer.</i> .....	47
Figura 10 <i>Equipos de laboratorio.</i> .....	52
Figura 11 <i>Componentes que conforman el sistema de evaporación de los grupos GISEL y CIMBIOS. a) Cámara de vacío b) Electrodo, sensores, y bomba de vacío turbo molecular c) Bomba de vacío mecánica d) Fuente de alimentación AC.</i> .....	53

## Resumen

**Título:** Parámetros utilizados en métodos de síntesis mediante evaporación de películas delgadas de sulfuro de estaño.\*

**Autor:** Anderson Rubiano Forero y John Alejandro Castillo Ariza.\*\*

**Palabras Clave:** Película delgada, Sulfuro de estaño, Evaporación y Síntesis.

**Descripción:** En el presente trabajo se propone un método de síntesis de películas delgadas de sulfuro de estaño (SnS), mediante un método de evaporación con propiedades adecuadas para ser usadas en celdas solares de películas delgadas. Para lo cual, se recopiló información sobre las variables utilizadas en los procesos de síntesis empleando tres bases de datos las cuales son Scopus, Science Direct y Web of Science. Posteriormente, se seleccionó la información, se analizó, adaptó y propuso una metodología para la síntesis de las películas delgadas de SnS mediante métodos de evaporación teniendo en cuenta los equipos de laboratorio con los que cuentan los grupos de investigación GISEL y CIMBIOS de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Directora: Mónica Andrea Botero Londoño. Doctorado en Ciencias Físicas. Codirector: Carlos Eduardo Rondón Almeyda. Doctorando en Ingeniería de materiales.

### Abstract

**Title:** Parameters used in synthesis methods by evaporation of thin films of tin sulfide\*

**Author(s):** Anderson Rubiano Forero and John Alejandro Castillo Ariza.\*\*

**Key Words:** Thin film, Tin sulfide, Evaporation and Synthesis

**Description:** In the present work, a method of synthesis of thin films of tin sulfide (SnS) is proposed, by means of evaporation with suitable properties to be used in thin film solar cells. For which, information on the variables used in the synthesis processes was collected using three databases which are Scopus, Science Direct, and Web of Science. The information was selected, analyzed, adapted, and proposed a methodology for the synthesis of SnS thin films by evaporation methods taking into account the laboratory equipment used by the researchers groups, GISEL and CIMBIOS of the Industrial University of Santander.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Monica Andrea Botero Londoño. Ph.D. in Physical Sciences. Co-director: Carlos Eduardo Rondon Almeyda. Doctorate in Materials Engineering.

## Introducción

En la actualidad, a pesar de los esfuerzos realizados a nivel mundial para reducir el calentamiento global la participación de combustibles fósiles en la generación de energía global continúa creciendo, reportándose una variación del 7.4% entre el periodo 2019-2021 (REN21, 2023). Por otro lado, los combustibles fósiles también son responsables de la pérdida de biodiversidad y del aumento de la contaminación (Hilcu, 2021). A raíz de esto, los Estados Miembros de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), han adoptado por implementar los objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con intención de impulsar el desarrollo económico mundial entorno a las energías renovables (ONU, 2022). Además, el Global Status Report del REN21 publicado el 30 de marzo del 2023, señala que los gobiernos deben fomentar las energías renovables debido al impacto positivo que estas tienen sobre el cambio climático (REN21, 2023). En este contexto los procesos de generación, recuperación y almacenamiento de energía a partir de fuentes renovables han adquirido una importancia que permite ampliar los campos de investigación relacionados con sistemas de generación de energía eléctrica.

En lineamiento con los ODS, el gobierno colombiano mediante su Plan Nacional de Desarrollo (PND, 2022-2026) tiene como meta la reducción del uso de combustibles fósiles y el impulso de fuentes de energía renovable no convencional para la diversificación de su matriz energética (PND, 2023). Según la asociación de energías renovables Colombia solar (SER COLOMBIA, 2022), actualmente el país cuenta con una capacidad de generación de 17.762 MW, de los cuales 18,42 MW son aportados de la energía eólica y 135,22 MW por la energía solar.

La energía solar fotovoltaica es una de las tecnologías renovables con mayor proyección gracias a las políticas globales y a la reducción en los costos de fabricación por lo que se espera

que en los próximos años sea una fuente competitiva (Gil, 2021; Acciona, 2020). En la actualidad, las tecnologías que dominan el mercado de paneles solares son las celdas de silicio monocristalino y silicio policristalino (RER Energy, 2022). No obstante, estas tecnologías aun presentan un alto costo de fabricación debido a las propiedades ópticas de los materiales que las constituyen (Guarín & Sánchez, 2021). A raíz de esto, se han desarrollado otras tecnologías como las de película delgada las cuales requieren menos material en su fabricación, son flexibles y se aplican a cualquier tipo de superficie.

A nivel comercial se encuentran celdas solares de película delgada de telurio de cadmio (CdTe) y las de selenuros de cobre-indio-galio (CIGS). Sin embargo, estas tecnologías contienen elementos tóxicos como el cadmio (Cd) y galio (Ga) y elementos escasos en la corteza terrestre como el indio (In) y telurio (Te) (News Soliclima, 2009). Por consiguiente, se estudian nuevos materiales entre los que se destaca el sulfuro de estaño (SnS) que permite superar estos inconvenientes, dado que es un material compuesto por elementos abundantes en la corteza terrestre y no tóxicos (Oropeza, 2020). Además, el SnS presenta una eficiencia teórica de conversión de energía del 24% y su síntesis se puede realizar mediante tecnologías de deposición física o química (Loferski., 1956; Robles et al., 2015). Aun así, obtener películas con propiedades adecuadas dependerá de los equipos de laboratorio con los que se cuente y del proceso para llevar a cabo la síntesis (Kafashan, 2018).

En este sentido y teniendo en cuenta que los grupos de investigación, Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) y Ciencia de Materiales Biológicos y Semiconductores (CIMBIOS) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) cuentan con sistemas de evaporación para la síntesis de películas delgadas, este proyecto de investigación busca establecer una metodología que permita

sintetizar películas delgadas de SnS con propiedades opto-eléctricas adecuadas para ser utilizadas como capa absorbente en celdas solares de película delgada.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Diseñar un procesamiento para sintetizar películas delgadas de sulfuro de estaño en procesos de evaporación con propiedades adecuadas para usarse en celdas solares.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Definir las variables de síntesis que mayor impacto tienen en los procesos de evaporación para obtener películas delgadas de SnS aplicadas en celdas solares.

Relacionar los parámetros de síntesis en cada proceso de evaporación con las propiedades ópticas, estructurales y morfológicas de películas delgadas de SnS.

Determinar los rangos de las variables para cada uno de los parámetros en los procesos de síntesis por evaporación que permitan obtener películas delgadas de SnS con propiedades adecuadas para su aplicación en sistemas fotovoltaicos.

Proponer un procedimiento de evaporación para sintetizar películas delgadas de SnS en la cámara de evaporación del grupo de investigación GISEL.

## 2. Marco Teórico

Entre las fuentes de energía que se usan actualmente, se encuentran las que provienen de recursos no renovables como los hidrocarburos (petróleo, carbón, gas natural), la energía generada a través de procesos nucleares y las que provienen de recursos renovables (biomasa, geotérmica, mareomotriz, eólica y energía solar) (BANGUERO, 2010). La edición 2023 del Global Status Report (GSR) del REN21 explora las actuales tendencias y oportunidades en la transición hacia energías renovables en los sectores de mayor consumo energético: edificios, industria, transporte y agricultura.

Según el informe de REN21, el aumento en el precio de la energía, así como diversos compromisos políticos destinados a hacer frente a la crisis climática han tenido un impacto directo en la creciente, aunque variable, demanda de energías renovables. Entre las que se destacan la energía solar y la energía eólica en la matriz energética mundial.

Por otro lado, los fuertes efectos de la inflación en estos sectores, impulsados por la crisis energética, han desencadenado políticas públicas claves para acelerar el crecimiento de la producción, uso y la fabricación local de energías renovables (REN21, 2023).

Por lo que, es importante desarrollar procesos para obtener celdas solares que permitan crear y potencializar la industria solar en el país que aumente la cobertura energética tanto en las regiones como en las zonas no interconectadas, trayendo de la mano progreso y aprovechamiento de un recurso natural renovable.

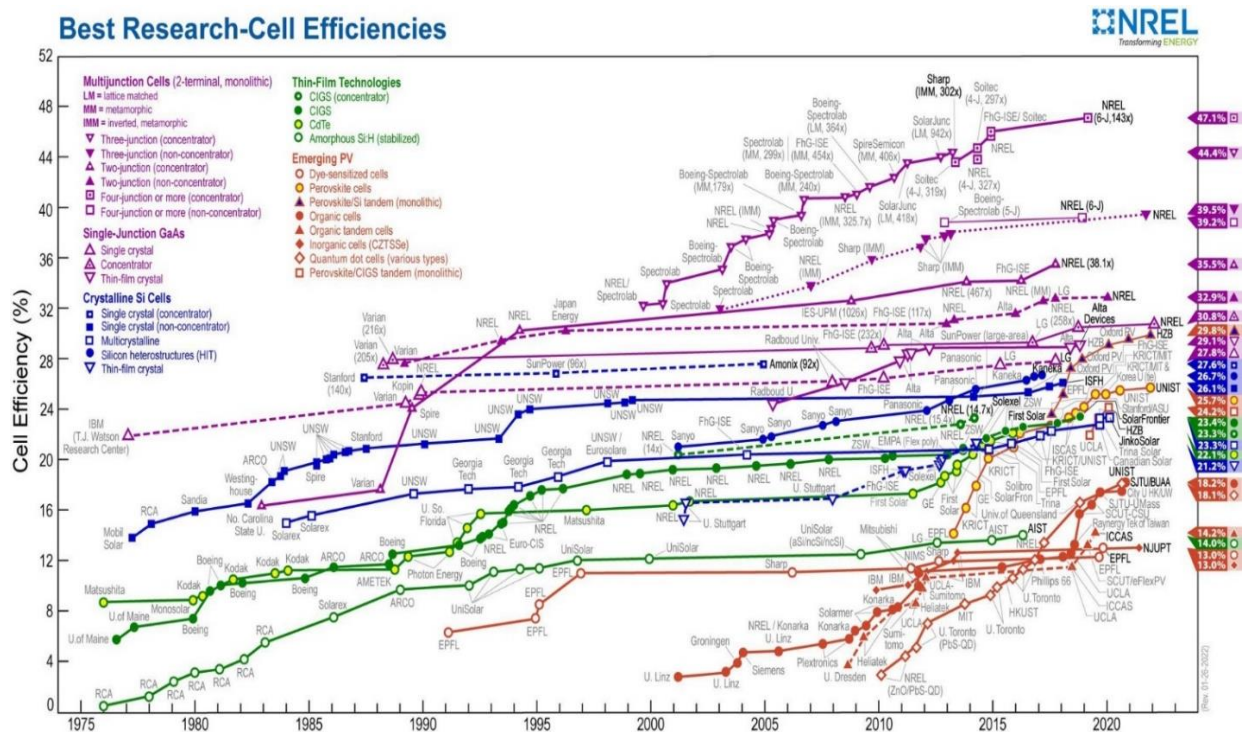
### 2.1 ¿Qué es un sistema a fotovoltaico?

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de equipos eléctricos y electrónicos que sirven para realizar la conversión directa de energía solar a energía eléctrica mediante el fenómeno fotovoltaico. En el mercado de la energía solar fotovoltaica existen diferentes tipos de tecnologías,

donde actualmente, la tecnología de silicio es la más utilizada para la fabricación de módulos fotovoltaicos, por lo tanto, domina el mercado mundial, sin embargo también existen tecnologías de película delgada (conocida como tecnología de segunda generación), las cuales permiten reducir el costo de manufactura debido a las propiedades ópticas de los materiales que las conforman (Moreno., 2017). En la Figura 1 la evolución de la eficiencia para diferentes dispositivos fotovoltaicos (REN21, 2016).

**Figura 1**

*Evolución de la eficiencia de conversión de celdas solares fabricadas con diferentes tecnologías de 1975 a 2020.*



*Nota.* Tomado del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, 2021).

## 2.2 Celdas solares de película delgada

Las celdas solares de película delgada o de segunda generación están conformadas por capas de semiconductores, cuyos espesores varían entre 20 nm y 5  $\mu\text{m}$ , las cuales son depositadas secuencialmente sobre sustratos de vidrio, plástico o metal, lo que permite que los dispositivos fotovoltaicos sean flexibles y de menor peso. Dichas celdas, se utilizan en la construcción de sistemas fotovoltaicos integrados y como material delgado puede ser utilizado en ventanas, recubrimiento sobre plásticos, lentes antirreflectivos, entre otros (Planas, 2019).

Las celdas solares de películas delgadas son una promesa en el desarrollo solar fotovoltaico debido a la reducida cantidad de material utilizado en la fabricación de dispositivos en comparación con la tecnología de silicio. En esta tecnología se destacan las celdas de CdTe y CIGS las cuales presentan un rendimiento a nivel comercial del 21% y 23.4% respectivamente (Green et al., 2022). Por otro lado, las celdas solares de película delgada están compuestas por diferentes capas (figura 2) las cuales son: sustrato, contacto eléctrico, capa absorbente, capa buffer y capa conductora transparente.

### Figura 2

*Estructura de una celda solar de película delgada tipo hetero-juntura (p/n).*



*Nota.* Imagen tomada y modificada de (Sun, 2009).

**Tabla 1.***Propiedades de las películas delgadas.*

<b>Capa</b>	<b>Características de la capa</b>	<b>Ejemplos</b>
<b>Sustratos</b>	Estabilidad mecánica, térmica y protección de la celda.	Vidrios soda lime, Molibdeno, Titanio.
<b>Contacto</b>	Extracción de las cargas, alta reflexión (contacto inferior).	Molibdeno, Titanio, Oxido conductor transparente.
<b>Capa absorbente</b>	Semiconductor tipo p, Coeficiente de absorción mayor a $10^4 \text{ cm}^{-1}$ , baja recombinación y banda de energía prohibida directa entre 1.1 y 1.6.	Si-amorfo, CdTe, CIGS, SnS.
<b>Capa buffer</b>	Semiconductor tipo n, baja recombinación, transparente y acople mecánico.	CdS, ZnS, ZnSe.

### 2.2.1 Familias de celdas solares de película delgada

Las celdas solares de película delgada generalmente se clasifican de acuerdo con la capa absorbente. Según este criterio se pueden encontrar los siguientes tipos de celdas fotovoltaicas de película delgada. Las cuales son denominadas en función del material con el cual está fabricada la capa absorbente.

- El silicio amorfo (a-Se)
- Telurio de cadmio (CdTe)
- Galio indio y cobre selenio (CIS o CIGS)
- Células solares sensibles al color (DSC) y otras células solares orgánicas.
- Sulfuro de estaño (SnS)
- Arseniuro de galio (GaAs)

Con el propósito de reducir los costos de fabricación e impacto medioambiental se han estudiado condiciones de síntesis para el desarrollo de energía solar fotovoltaica dando como resultado módulos capaces de convertir del 12 % al 18 % la radiación solar en energía eléctrica (Planas, 2019).

Si bien la eficiencia del silicio monocristalino es de 26.8% el desarrollo de nuevos materiales permite obtener relaciones de eficiencia-costo que les permiten ser competitivos a nivel comercial con respecto a las celdas de primera generación.

## **2.3 Propiedades ópticas, eléctricas y estructurales de materiales fotovoltaicos.**

### **2.3.1 Propiedades ópticas**

Las propiedades ópticas se obtienen a partir de la interacción entre un material y las radiaciones electromagnéticas en forma de ondas o partículas de energía. Las propiedades ópticas de los materiales utilizados como capa absorbente y ventana óptica, en la fabricación de celdas solares, se determinan generalmente a través del índice de refracción, coeficiente de absorción ( $\alpha$ ) y brecha de energía prohibida ( $E_g$ ) (Ordoñez R. J., 2012). La capa absorbente debe tener un alto coeficiente de absorción (del orden de  $10^4 \text{ cm}^{-1}$ ) y una brecha de energía cercana a 1.5 eV. Por otro lado, la ventana óptica constituida por el sistema capa buffer/ capa TCO no debe absorber en el rango en el que lo hace la capa absorbente. Esto significa que las dos capas que conforman la ventana óptica deben tener un valor de brecha de energía prohibida mayor que el de la capa absorbente (Hurtado, 2014).

#### **2.3.1.1 Coeficiente de absorción ( $\alpha$ )**

El coeficiente de absorción se encarga de medir hasta donde un haz de luz de una cierta longitud puede penetrar en un material antes de ser absorbido. Esto dependerá estrictamente de su

composición, grosor y la longitud de onda de la luz utilizada; para un bajo coeficiente de absorción, la onda no se absorbe de manera correcta (Perez et al., 2022).

Swanepoel desarrolló un proceso para calcular las constantes ópticas de películas delgadas a partir de datos obtenidos de medidas experimentales del espectro de transmitancia (Swanepoel, 1983; Ordoñez R. J., 2012) “este procedimiento asume un sistema compuesto por una película delgada homogénea en espesor con índice de refracción complejo  $\eta$  ( $\eta=n-ik$ ) depositada sobre un sustrato transparente de índice de refracción y espesor mucho mayor que el de la película” (p. 10) donde la parte real de  $n$  determina la velocidad con que la radiación se propaga en el material y el factor  $k$  (llamado coeficiente de extinción) es expresado en términos del coeficiente de absorción ( $\alpha$ ), mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

### 2.3.1.2 Brecha de energía prohibida

La brecha de energía prohibida de una película delgada se puede determinar por medio del método de Tauc, el cual utiliza la espectroscopia de absorción de múltiples longitudes de onda para evaluar las propiedades ópticas del material (Bautista, 2017). La espectroscopia involucra principalmente seis fenómenos 1) absorción, 2) fluorescencia, 3) fosforescencia, 4) dispersión, 5) emisión y 6) quimioluminiscencia como respuesta de la interacción de radiación electromagnética con átomos o moléculas. La espectroscopia de absorción se basa en la medición de la transmitancia o de la absorbancia. A partir de un espectro de absorción o transmisión es posible obtener información del material analizado. El método de análisis propuesto por Tauc emplea la información del espectro de absorbancia (o transmitancia), que puede ser graficado respecto a la energía del fotón incidente (Tauc, 1968). Al respecto, se ha demostrado que existe una relación

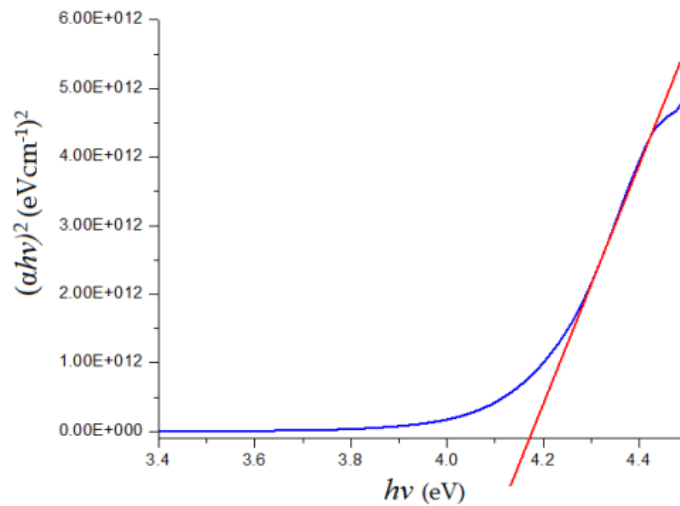
entre  $\alpha$  y la diferencia entre la energía del fotón incidente ( $h\nu$ ) y la  $E_g$  del material de estudio, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(\alpha h\nu)^{\frac{1}{n}} = C_1(h\nu - E_g)$$

Donde  $h$  es la constante de Planck,  $\nu$  es la frecuencia de la radiación incidente y  $C_1$  es una constante de proporcionalidad. El exponente  $n$ , denota la naturaleza del material con base a la transición electrónica (Moreno, 2018). El procedimiento básico para un análisis de Tauc es adquirir el espectro de absorbancia (o transmitancia) para la muestra de interés, luego se determina el valor de  $\alpha$  y se grafica  $(\alpha h\nu)^{\frac{1}{n}}$  versus  $h\nu$  y finalmente se realiza un ajuste a la región lineal de la gráfica de Tauc, cuya intersección con el eje correspondiente a la energía del fotón incidente corresponderá al valor de la  $E_g$  (Bautista, 2017).

**Figura 3**

*Ejemplo de grafica de método de Tauc.*



*Nota.* En la figura 3, se puede apreciar un ejemplo de brecha de energía prohibida aproximadamente de 4.17 eV por el método de Tauc (Bautista, 2017).

### ***2.3.2 Propiedades Estructurales***

En celdas solares tipo hetero-juntura, el mecanismo que limita fuertemente su transporte eléctrico es la recombinación de portadores en estados interfaciales, los cuales se forman como consecuencia de las tensiones mecánicas que se producen debido a la diferencia entre las constantes de red del material tipo p y del tipo n. Por esta razón es importante caracterizar estructuralmente estos materiales para poder determinar la estructura cristalina y parámetros de red.

La caracterización estructural de materiales se lleva a cabo a través de medidas de difracción de rayos-x (DRX), las cuales se realizan utilizando un difractómetro que está constituido principalmente por: un tubo de rayos X, un goniómetro, un detector y un sistema de control y adquisición de datos. La difracción de rayos-x es debida esencialmente a la superposición de dos o más ondas de rayos-x reflejadas en los planos cristalográficos de la muestra (Ordoñez J. I., 2012).

### ***2.3.3 Propiedades eléctricas***

Un proceso común para establecer las propiedades eléctricas en materiales es por medio de la técnica del efecto Hall. Esta técnica nos proporciona información como: tipos de portadores mayoritarios, concentración, movilidad y resistividad de la muestra. Las aplicaciones de esta técnica pueden ser para materiales simples cristalinos, policristalinos y amorfos en película delgada (Estrella, 2016). Este efecto consiste en hacer circular una corriente en dirección al eje x en una lámina conductora o semiconductor estando dentro de un campo magnético, este campo ejerce una fuerza magnética sobre los portadores de carga que tienden a empujarlas hacia uno de los bordes del conductor, esto hace que aparezca un exceso cargas en los lados del conductor generando así un diferencial de potencial en la dirección del eje y. La determinación de este fenómeno se efectúa a través de la resistencia de Hall  $R_H$ , definida como la relación entre el voltaje

Hall  $V_H$  y la intensidad de corriente  $I$ , también dependerá del campo magnético  $\beta$ , la densidad superficial  $\rho$  y de los portadores de carga eléctrica  $e$ . La resistencia de Hall se puede calcular con la siguiente ecuación donde  $c$  es la velocidad de arrastre de las cargas libres.

$$R_H = \frac{V_H}{I} = \frac{\vec{\beta}}{\rho * e * c}$$

A partir de estos parámetros es posible determinar diferentes propiedades de los conductores y semiconductores como por ejemplo el signo y la densidad de portadores de carga, así como la movilidad de los mismos (Muñoz & Zárate, 2009).

## 2.4 Técnicas de fabricación de películas delgadas

Las técnicas de deposición de película delgada inducen una modificación superficial y del recubrimiento de las películas delgadas, en este proceso se cambian las propiedades de la superficie del material usado como sustrato. Existen varios factores que deben ser tomados en cuenta durante el proceso de deposición para generar las modificaciones deseadas. Entre ellos la presión de vacío, la velocidad de depósito, tiempo de deposición, la relación de masa de los precursores, tipo de sustrato, la temperatura del sustrato, la limpieza de la superficie del sustrato, tipo de navecilla, la distancia entre sustrato y la navecilla, temperatura y tiempo de recocido. Estos tienen efecto en la estructura de la película que se desea formar (Pavón, 2011).

Las técnicas de deposición más usadas actualmente se dividen en dos categorías: deposición física de vapor (PVD) y deposición química de vapor (CVD).

### 2.4.1 Deposición mediante CVD

La técnica CVD (por sus siglas en inglés chemical vapor deposition) consiste en reaccionar compuestos químicos dentro de una cámara de reacción sobre los sustratos a recubrir. Los

compuestos reaccionan en la superficie del sustrato formando depósitos sólidos de espesor uniforme (Baca, 2006).

#### ***2.4.2 Deposición mediante PVD***

PVD (por sus siglas en inglés physical vapor deposition). Esta técnica de recubrimiento emplea medios físicos para obtener la película delgada mediante la condensación de materia que es atomizada o evaporada para su transporte y deposición sobre sustratos (Caballero, 2008).

### **2.5 Estado del arte de los métodos de evaporación**

La evaporación es la excitación de átomos o moléculas con medios térmicos. La materia evaporada viaja al sustrato y se condensa en forma de película sólida. El proceso consiste en generar un vapor por ebullición o sublimación de un material que actúa como fuente. El vapor generado es transportado desde la fuente hasta la superficie del sustrato provocando una condensación del vapor, consecuentemente formando una película sólida sobre la superficie del sustrato (Nieto et al., 1994). Se pueden obtener películas de materiales como metales, óxidos y/o sulfuros, ya sea en estado cristalino o amorfo. Incluso pueden llegar a formarse compuestos de dos o más componentes (Nieto et al., 1994).

La excitación térmica puede ser llevada a cabo con calentamiento por resistencia, haces de electrones, haz de iones o evaporación por arco (Baca, 2006).

#### ***2.5.1 Evaporación Térmica***

La evaporación Térmica es un proceso físico de deposición en fase vapor (PVD) ideado por Faraday durante la década de 1850. Esta técnica consiste en evaporar un material dentro de una cámara de vacío, con una presión inferior a  $10^{-6}$  Torr. En un proceso de evaporación térmica, el material se calienta por efecto Joule a la temperatura de evaporación correspondiente a la presión de vacío utilizada (Martin & Lakhtakia, 2013). El vapor generado se expande dentro de la cámara

para lograr una distribución uniforme de partículas que posteriormente se depositan sobre el sustrato (Pavón, 2011).

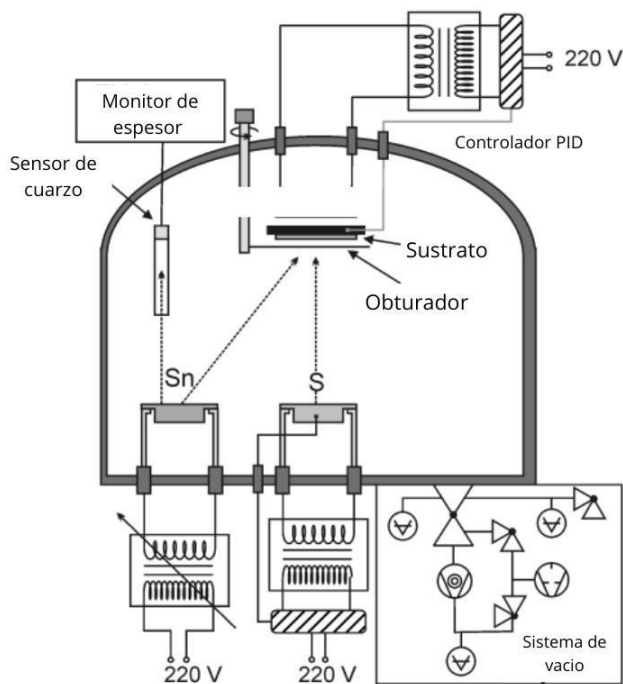
Entre las principales ventajas de la evaporación térmica, podemos encontrar las altas tasas de deposición y el control de los parámetros de síntesis, lo que permite que el crecimiento de las películas ocurra en cuestión de segundos (Espinosa, 2012). A continuación, se presentan algunas investigaciones con base en las síntesis de sulfuro de estaño mediante evaporación térmica.

En el año 2015 Kawano et al., depositaron películas delgadas de SnS por evaporación térmica variando la temperatura del sustrato entre 100 y 250 °C, en esta investigación se estableció una temperatura óptima de síntesis de 200 °C que permitió obtener como resultado granos compactos con una movilidad hall de 6,2 (cm<sup>2</sup>/Vs), además se fabricó una estructura Al/ZnO:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO/CdS/SnS/Mo/vidrio soda – lime la cual presentó una eficiencia de 2,53. En el año 2018 Basak et al., evaporaron térmicamente películas delgadas de SnS sobre tres tipos de sustratos, vidrio/ZnO:Al, vidrio/ITO y vidrio/CdS utilizando una temperatura de sustrato de 400 °C y un tiempo de deposición de 40 minutos, esto permitió establecer que las películas depositadas sobre vidrio/ZnO:Al presentan mejor movilidad y menos resistividad. Durante el mismo año Hegde et al., sintetizaron películas delgadas de SnS sobre sustratos de vidrio calentados a 300 °C, posteriormente las películas fueron recocidas utilizando temperaturas entre 100 y 200 °C, de este modo se estableció que una variación en la temperatura de recocido modificaba la brecha de energía prohibida entre 1.33 eV a 1.37 eV, además se estableció que las películas recocidas a 300 °C presentaron las mejores propiedades eléctricas. En el 2019 Guo et al., sintetizaron películas delgadas de SnS sobre sustratos de FTO (óxido de estaño dopado con flúor) variando la temperatura entre 150 y 350 °C, en este estudio se estableció que a temperaturas por debajo de 250°C se puede obtener una cristalización de SnS casi completa con una banda prohibida

de 1.4 eV; además, por otro lado, se fabricó una celda solar híbrida con estructura  $\text{TiO}_2/\text{SnS}/\text{P}_3\text{HT}$  la cual alcanza una eficiencia de conversión de 1.47%. En este mismo año Barman et al., depositaron películas delgadas de utilizando una temperatura de sustrato entre 24 y 150 °C, posteriormente se realizó un recocido a una temperatura de 100 °C durante 1h, se observó que para una temperatura de sustrato de 50 °C se logra una película de SnS casi estequiométrica con un coeficiente de absorción mayor a  $10^4 \text{ cm}^{-1}$ , por otro lado, se evidencio que la banda prohibida disminuye de 1.58 a 1.43 eV con el aumento de la temperatura del sustrato.

#### Figura 4

*Equipo de deposición por evaporación térmica.*



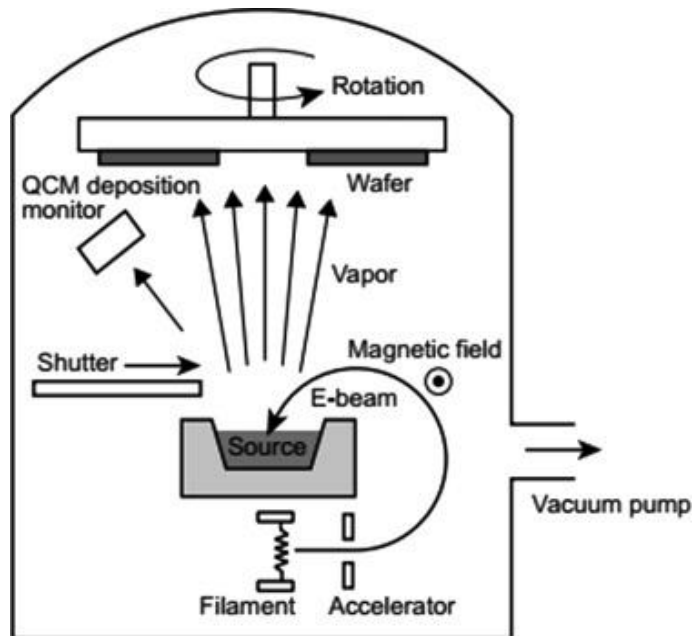
*Nota.* Figura tomada de “Optical and Structural Studies on SnS Films Grown by Co-Evaporation” (Cifuentes et al., 2006).

### ***2.5.2 Evaporación por haz de electrones***

La evaporación por haz de electrones también conocida como cañón de electrones, es una técnica que requiere de ultra alto vacío, una fuente de corriente y un voltaje que circula por un filamento que actúa como cañón de electrones el cual es dirigido hacia un crisol que contiene al material que se desea evaporar. El proceso de síntesis es realizado a partir del control de la intensidad de corriente con la cual se calienta el material hasta alcanzar la temperatura de evaporación. El material evaporado viaja hacia el sustrato de vidrio que se coloca a una distancia de trabajo entre 40 cm y 70 cm, por otro lado, esta técnica es llevada a cabo a presiones de vacío alrededor de  $10^{-7}$  Torr (Marín, 2018). En el año 2015, Parque et al., investigaron el efecto de la temperatura de crecimiento de haz de electrones sobre sulfuro de estaño, donde el voltaje se estableció en 8,67 kV mientras la corriente de aceleración fue variada entre 8 y 10 mA. En esta investigación se obtuvieron diferentes fases de sulfuro de estaño  $\text{Sn}_2\text{S}$ ,  $\text{Sn}_2\text{S}_3$  y  $\text{Sn}_3\text{S}_4$  en función de la temperatura de crecimiento, de este modo se logró establecer la formación de películas delgadas con estequiometría SnS a 25 °C presentando brechas de energía prohibida entre 1.2 y 1.4 eV.

**Figura 5**

*Equipo de deposición usado para la técnica de evaporación por haz de electrones.*



*Nota.* Figura tomada y modificada de “Chapter 3 - Interfaces and surfaces” (Bashir et al., 2020).

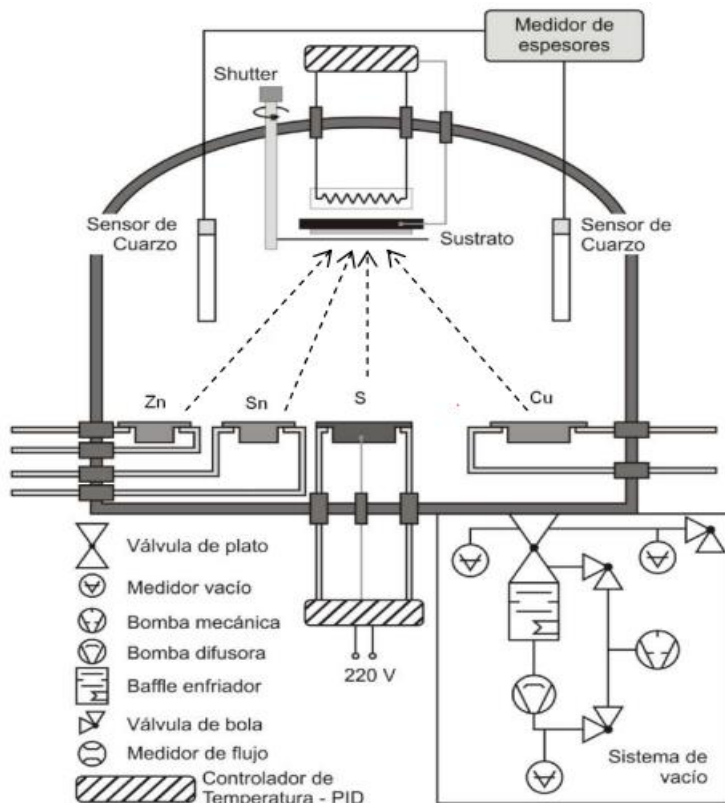
### 2.5.3 Co-evaporación

El método de la co-evaporación permite sintetizar películas delgadas controlando su espesor y composición entre otros, mediante la modificación de los parámetros de deposición durante el proceso de crecimiento, principalmente la temperatura del sustrato y la relación de masa de los precursores a evaporar. El sistema de deposición se compone de una cámara de evaporación conectada a una bomba de vacío y con unos electrodos conectados a una fuente de corriente que permiten el calentamiento de los crisoles donde son depositados los precursores a evaporar. Además, en ocasiones se utilizan sensores de cuarzo para establecer las velocidades de deposición. El proceso de co-evaporación es realizado a presiones del orden de  $10^{-6}$  mbar (Herrero, 2015). A continuación, se presentan algunas investigaciones con base en las síntesis de sulfuro de estaño mediante co-evaporación.

Trigo et al., en el 2015 crecieron películas delgadas de SnS sobre sustratos de vidrio soda lime variando la temperatura entre 200 y 400 °C con una velocidad de crecimiento de 6 Å/s y posteriormente fueron recocidas a 400 y 500 °C durante 1 hora en una atmosfera de azufre. Esta investigación permitió establecer que las películas delgadas recocidas a 400 °C presentaban una estructura SnS sin fases secundarias y una brecha de energía prohibida de 1,22 eV. En el mismo año, Robles et al., estudiaron la velocidad de crecimiento y la influencia del recocido en la síntesis de película delgada de sulfuro de estaño depositados sobre sustratos de vidrio soda lime a una temperatura de 350 °C mientras se variaba la velocidad de crecimiento entre 2-6 Å/s, posteriormente las películas fueron recocidas utilizando temperaturas entre 400 y 500 °C en una atmosfera de azufre. Esto permitió establecer que a mayor velocidad de deposición se obtienen fases de Sn y SnS las cuales al ser recocidas a 400 °C permiten obtener una película monofásica de SnS con brecha de energía prohibida de 1.24. Así mismo en 2018 Aimi Yago et al., estudiaron la influencia de la relación Sn/S en celdas solares de película delgada de SnS con estructura de vidrio soda lime/Mo/SnS/CdS/ZnO:Al/Al en donde se sintetizaron películas de SnS utilizando tres temperaturas de sustrato (250, 300 y 350 °C) y como precursores Sn y S. El desarrollo de este trabajo permitió establecer una temperatura optima de 300 °C para la síntesis de película delgada de SnS con relación de masa Sn/S igual a 0.91 y celdas solares con eficiencia de conversión de 0.35 %.

**Figura 6**

*Equipo de deposición usado para la técnica de co-evaporación.*



*Nota.* Figura tomada y modificada de “Caracterización óptica y eléctrica de películas delgadas de  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$  para ser usadas como capa absorbente en dispositivos fotovoltaicos.” (Ballesteros, 2014).

## 2.6 Bibliometría

Es la aplicación de las matemáticas y métodos estadísticos para toda fuente escrita, considerando elementos tales como autores, título de la publicación, tipo de documento, idioma, resumen y palabras claves o descriptores. La bibliometría parte de la necesidad de cuantificar

ciertos aspectos de la ciencia para poder comparar, medir y objetivar la actividad científica (López et al., 2009).

Al momento de realizar una revisión bibliométrica se debe tener en cuenta los diferentes indicadores bibliométricos, como los obtenidos a partir de bases de datos donde se toman los metadatos pertinentes. Ej.: autor, número de firmantes, país de procedencia, índice de productividad, etc (Rodríguez et al., 2009).

Los índices bibliográficos suministran información objetiva y cuantitativa de los resultados de los procesos de investigación. Son empleados para medir la calidad de las publicaciones científicas. Estos índices parten del número de citaciones o citas, esto se refiere al número de veces que ha sido citado el artículo de un autor, en una revista, como referencia en artículos o publicaciones de otros autores (Solano et al., 2009)

Para un manejo adecuado de los indicadores bibliométricos existen 8 condiciones que se deben tener en cuenta:

- La utilización de los indicadores bibliométricos debe ir ligada a valoraciones de expertos relacionados en el tema.
- Para obtener resultados fiables es necesario utilizar varios indicadores debidos a que no tienen la misma importancia y relevancia en todos los campos científicos.
- Para la confianza y validez de un indicador, se debe someter a un riguroso análisis crítico.
- Los indicadores bibliométricos carecen de sentido en sí mismos, por ello es necesario relacionarlos con la fuente de donde procede los datos.
- Por medio de un indicador no se obtienen sólidas conclusiones.
- Debe rechazarse cualquier tipo de intuiciones. Solamente pueden interpretarse

los indicadores, refiriéndolos a patrones cuantitativos.

- La complejidad o sencillez de los indicadores es variable por lo que no se puede interpretar prototípicamente.
- Los trabajos que son evaluados requieren del uso de indicadores específicos.

Los indicadores bibliométricos permiten evaluar, determinar y proporcionar información sobre los resultados del crecimiento en el proceso investigativo en cualquier campo de la ciencia como el volumen, evolución, visibilidad y estructura. Así como valorar la calidad de la actividad científica, y la influencia (o impacto) tanto del trabajo como de las fuentes. De acuerdo con ello, se pueden clasificar en dos grandes grupos: a) los indicadores cuantitativos de la actividad científica, donde incluye la cantidad de publicaciones y permite visualizar el estado real de la ciencia, y b) los indicadores de impacto que se basan en la cantidad de citas que se obtienen de los trabajos que caracterizan la importancia del documento de acuerdo al reconocimiento otorgado por otros investigadores; es decir estos indicadores valoran el impacto de autores, revistas y/o trabajos (Otalora, 2008).

## **2.7 VOSviewer**

El software VOSviewer es una herramienta que permite construir y visualizar redes bibliométricas. Con capacidad de incluir revistas, investigadores o publicaciones, estas redes se pueden diseñar en base a citas, acoplamiento bibliográfico, co-citas o relaciones de autorías (VOSviewer, 2023).

La funcionalidad del VOSviewer puede ser resumida de la siguiente manera (Universo Abierto, 2020):

- Creación de mapas basados en datos de la red. Se puede crear un mapa basado en una red que ya está disponible, pero también es posible construir uno de la red. Para

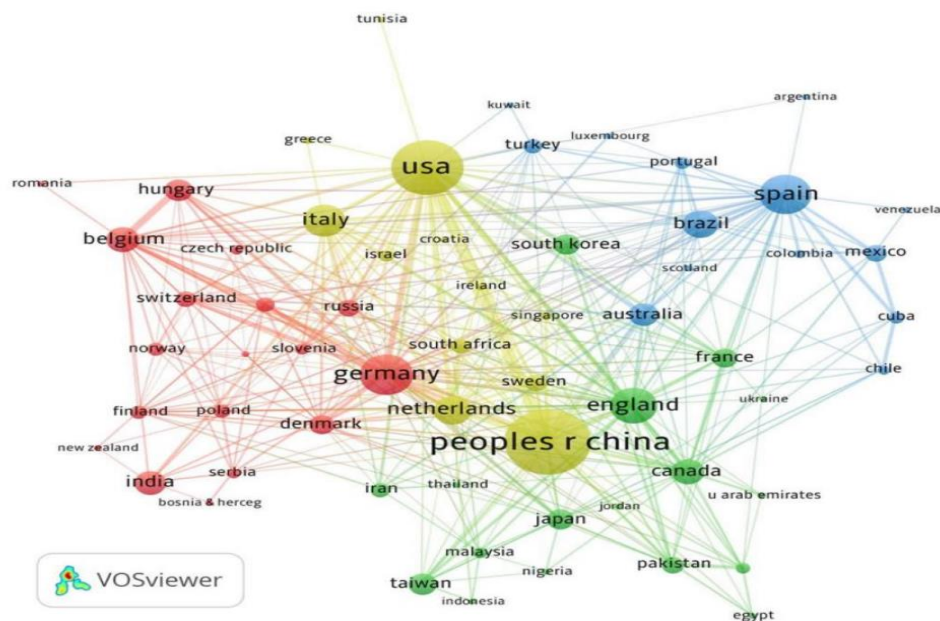
construir una red, se usan bases de datos de Web of Science, Scopus, Dimensions, PubMed, RIS, o Crossref JSON.

- VOSviewer proporciona tres visualizaciones de un mapa: La visualización de la red, la visualización de la superposición y la densidad visualización

Una vez realizada la selección de la base de datos se procede a ser leída por el software, donde se ingresarán las características específicas para poder visualizar la información buscada. Ya realizado este proceso aparecerá un mapa donde se mostrará una imagen de la siguiente manera.

### Figura 7

*Ejemplo de visualización bibliográfica del software VOSviewer.*



En la Figura 7. Se observa una red de coautoría entre países cuyos autores publicaron al menos dos documentos en la revista *Scientometrics* (2016-agosto 2020). Cada círculo representa un país y su tamaño refleja la cantidad de documentos publicados en la revista. La cercanía o lejanía de un país a otro refleja la fuerza de la coautoría que ejerce cada país. Es decir, cuanto más cerca se

encuentra un país de otro, mayor será la fuerza de coautoría entre ellos. Mientras que países que se ubican lejos uno del otro, menor será la relación de coautoría. Los colores indican clústers de países que están relativamente relacionados entre sí (Limaymanta, 2020).

### 3. Metodología a la investigación

#### 3.1 Análisis bibliográfico

##### **Etapa 1. Revisión bibliográfica**

En esta etapa se realizó una revisión detallada de estudios relacionados con la síntesis de películas delgadas de SnS por los métodos de evaporación térmica, co-evaporación y haz de electrones para identificar las variables de síntesis y como estas afectan las propiedades opto-eléctricas y estructurales del material.

*Actividad 1.* Se hizo una búsqueda de artículos, revistas, libros, tesis, etc, en donde se encontró información respecto a la síntesis de películas delgadas de SnS por los métodos antes mencionados. Estos archivos consultados en la base de datos de la Universidad Industrial de Santander (UIS) y fuentes externas de acceso abierto. Los artículos consultados de estas bases de datos han sido analizados con la herramienta Journal Citation Reports (JCR), para establecer su factor de impacto y así, poder seleccionar las publicaciones con mayor relevancia científica.

##### **Etapa 2. Recopilación de datos y creación de tablas.**

*Actividad 2.* Con el análisis de la información recopilada en las bases de datos, se escogió la información con respecto a las variables de síntesis como lo son el tipo de sustrato utilizado, la temperatura del sustrato, distancia entre la fuente y el sustrato, tiempo de deposición, entre otros.

A demás se recopiló información con respecto a las propiedades opto-electricas y estructurales de las películas delgadas de SnS que son afectadas con un cambio en las variables de síntesis.

### **Etapa 3. Análisis de los datos**

*Actividad 3.* Una vez extraída la información de los documentos se determinó la influencia de las variables controladas en el proceso de síntesis sobre las propiedades estructurales y ópticas de las películas delgadas de SnS.

### **3.2 Análisis bibliométrico a partir de la herramienta VOSviewer**

#### **Etapa 4. Selección y descarga de metadatos para análisis bibliométrico**

*Actividad 4.* Se seleccionaron las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect donde se realizó la búsqueda y descarga de los datos bibliométricos. Estos datos bibliométricos fueron analizados mediante el software VOSviewer. En este proceso se utilizó el motor de búsqueda “SnS AND evaporation AND thin film”, el cual es basado en términos que pueden describir la línea de investigación en síntesis de películas delgadas de SnS por evaporación. Una vez generada la búsqueda en las bases de datos se determinaron las investigaciones relevantes a partir de criterios de selección previamente establecidos. Estos criterios para la selección fueron:

- Se seleccionaron revistas con un factor de impacto de Q1 y Q2.
- Artículos publicados desde el año 2015.
- Síntesis de películas delgadas de SnS por métodos de evaporación.

*Actividad 5.* Una vez seleccionados los documentos para el análisis bibliométrico, se procede a descargar los datos bibliométricos obtenidos en cada base de datos. Estos archivos fueron descargados en un formato específico para cada base de datos. CVS para Scopus, txt para Web of Science y Ris para ScienceDirect.

#### **Etapa 5. Aplicación del software VOSviewer**

*Actividad 6.* A partir de los datos bibliométricos obtenidos en la etapa anterior y el software VOSviewer se realizó la extracción de los términos de interés con base en un análisis de

co-ocurrencia de términos académicos en los títulos y resúmenes de las publicaciones. Para esto se estableció un número mínimo de co-ocurrencia por termino de 3.

**Actividad 7.** Antes de crear los mapas bidimensionales a partir del software VOSviewer se construyó e incorporó en el sistema un tesauro con la intención de eliminar duplicidad o unificar términos que representan un mismo significado ejemplo eficiencia de conversión y eficiencia, posteriormente el software VOSviewer selecciono el 60% de los términos con mayor relevancia. Finalmente se verifico la selección de los términos y se excluyeron términos no relacionados con la síntesis de películas delgadas de SnS ejemplo flores.

**Actividad 8.** Una vez obtenidos los mapas dimensionales que brinda el software VOSviewer se extrae la información relevante a partir de los valores cuantitativos correspondientes a la fuerza de enlace (a mayor fuerza de enlace mayor co-ocurrencia de términos). Este cálculo indica la intensidad del enlace entre los términos. Los datos fueron extraídos en tablas para su posterior análisis. Este proceso se realiza para cada base de datos mencionada anteriormente.

**Actividad 9.** A partir de los datos obtenidos se analizó técnica con mayor relevancia en el proceso de síntesis de películas delgadas de SnS por técnicas de evaporación y probables líneas de investigación en el camino de desarrollo de celdas solares de película delgada de SnS con una eficiencia adecuada.

### **3.3 Equipos de laboratorio**

#### **Etapas 5. Diagnóstico y análisis de los equipos de laboratorio del grupo GISEL y CIMBIOS**

**Actividad 10.** Se realizó una visita al laboratorio de los grupos GISEL y CIMBIOS de la UIS en donde se diagnosticó y se revisó cada uno de los equipos, para realizar el proceso de síntesis

por evaporación, con los que cuenta el laboratorio de investigación. Posteriormente se determinó cual es la mejor metodología que se podría utilizar para la síntesis de películas delgadas de SnS.

*Actividad 11.* Se estableció una metodología de síntesis de películas delgadas de SnS partiendo de la bibliografía consultada, el análisis bibliométrico realizado en el software VOSviewer y los equipos de laboratorio con los que cuentan los grupos de investigación GISEL y CIMBIOS.

#### 4. Análisis de tablas

Durante la lectura de los diferentes reportes e investigaciones encontrados se logró establecer cuáles variables de síntesis permiten modificar las propiedades estructurales, ópticas y eléctricas con la intención de obtener películas delgadas de SnS adecuadas para ser utilizadas como capa absorbente en celdas solares de película delgada. A continuación, se presentan las variables relevantes en el proceso de síntesis:

- Tipo de sustrato
- Temperatura del sustrato
- Relación de masa Sn/S
- Distancia entre el sustrato y el crisol o navecilla
- Tipo de crisol o navecilla
- Temperatura del recocido
- Tiempo del recocido
- Tiempo de deposición

Las propiedades de las películas delgadas de SnS pueden ser modificadas conforme la variable de entrada sea modificada para realizar el proceso de síntesis de la película delgada.

##### 4.1 Relación de las variables de síntesis con respecto a las variables de salida.

A continuación, presentamos 4 tablas, en donde se muestra una escala de importancia en función del número de variables de salida que son modificadas por una variable de entrada (tabla 2). En las tablas 3, 4 y 5 se observa, para los métodos de evaporación térmica, co-evaporación y evaporación por haz de electrones, cuales variables de síntesis influyen o modifican las variables de salida tales como brecha de energía prohibida, resistividad eléctrica ( $\rho$ ), espesor de la película ( $e$ ), cristalinidad, coeficiente de absorción ( $\alpha$ ), Factor de llenado (FF) y eficiencia (%).

**Tabla 2.**

*Escala de importancia.*

Numero de variables de salida modificadas	Escala de importancia cualitativa	Escala de importancia cuantitativa
1-2	2	Muy baja
3-4	3	Baja
5-6	4	Media
7	5	Alta

En la Tabla 2, se asignó un valor numérico entre 2 y 5 dependiendo del número de variables de salida que se modifican cuando se cambian las variables de síntesis.

**Tabla 3.**

*Tipos de variables de entrada y salida por el método de evaporación térmica.*

		Variables de Salida						
		Brecha de energía prohibida	$\rho$	e	Cristalinidad	$\alpha$	FF	%
<b>Variables de entrada</b>	Temperatura de sustrato	X	X		X	X		X
	Temperatura de recocido	X	X	X	X	X		
	Tipo de sustrato	X	X	X	X			X
	Relación de masa	X	X				X	X

En la tabla 3 se observa que las variables de entrada temperatura de sustrato, temperatura de recocido y tipo de sustrato pueden modificar 5 diferentes propiedades en las películas de SnS, obteniendo un valor de 4 en la escala de importancia. También se observa que la relación de masa obtuvo un valor en la escala de importancia de 3 debido a que solo afecta o modifica 4 de las variables de salida.

Teniendo en cuenta la información presentada en la tabla 2, los niveles de importancia obtenidos y la literatura se establece que la temperatura del sustrato debe estar seleccionada entre 250 y 350 °C, sin embargo, a mayor temperatura la brecha de energía prohibida disminuye de 1.6 a 1.4 eV, además, entre mayor sea la temperatura del sustrato se puede generar una re-evaporación del estaño debido al aporte energético que incrementa su presión de vapor, lo que lleva a la formación de fases secundarias que reducen la calidad de las películas. Por otro lado, se debe establecer una temperatura de recocido de 150 °C lo cual contribuye a la deposición de azufre en el sistema que permite la difusión de las partículas para formación de estructuras SnS con alta cristalinidad (Guo et al., 2019).

Así mismo la relación de masa debe ser seleccionada entre 0.8 y 1.1. No obstante, un control no adecuado las variables de síntesis puede permitir la formación de fases secundarias que afectan negativamente la brecha de energía prohibida, el coeficiente de absorción y la eficiencia de los dispositivos fabricados (Nisha et al., 2022).

**Tabla 4.**

*Tipos de variables de entrada y salida por el método de co-evaporación.*

		Variables de Salida						
		Brecha de energía prohibida	$\rho$	e	Cristalinidad	$\alpha$	FF	%
<b>Variables de entrada</b>	Temperatura de recocido	X	X	X	X	X		
	Tiempo de deposición	X	X	X	X	X		
	Tiempo de recocido	X	X	X		X		
	Tasa de crecimiento	X	X	X		X		
	Relación de masa	X	X				X	X

En la Tabla 4 se observa que las variables de entrada temperatura de recocido y tiempo de deposición obtienen un valor de 4 en la escala de importancia debido a que pueden modificar 5 variables de salida. Por otro lado, las variables de entrada tiempo de recocido, tasa de crecimiento y relación de masa pueden modificar 4 diferentes propiedades en las películas de SnS sintetizadas para un valor en la escala de importancia de 3.

Teniendo en cuenta la información presentada en las tablas, los niveles de importancia obtenidos y la literatura se establece que las variables de recocido (temperatura y tiempo) contribuyen a la deposición de azufre en el sistema y un aumento en la temperatura del recocido puede afectar las propiedades de las películas delgadas de SnS por lo que es importante optimizarla para lograr las mejores propiedades para la aplicación deseada (Robles et al., 2015).

Con respecto a la relación de masa entre 0.8 y 1.1 a partir de las investigaciones realizadas se evidencia que su control permite obtener películas con una estructura estequiométrica SnS. No

obstante, una variación no adecuada Sn/S permite la formación de fases secundarias que afectan negativamente la brecha de energía prohibida, el coeficiente de absorción y la eficiencia de los dispositivos fabricados.

**Tabla 5.**

*Tipos de variables de entrada y salida por el método de evaporación por haz de electrones.*

		Variables de Salida					
		Brecha de energía prohibida	$\rho$	e	Cristalinidad	$\alpha$	%
Variables de entrada	Temperatura de crecimiento	X	X	X		X	X
	Tiempo de deposición	X	X	X	X	X	
	Tasa de crecimiento	X	X	X		X	

En la Tabla 5, se observa que las variables de entrada corriente de la fuente y el tiempo de deposición modifican 5 propiedades en las películas de SnS sintetizadas obteniendo un valor en la escala de importancia de 4. Se puede apreciar que la tasa de crecimiento obtiene un valor de 3 en la escala de importancia debido a que solo afecta en 4 de las variables de salida.

Teniendo en cuenta la información presentada en la tabla 4, con la literatura se define una temperatura de crecimiento entre 28 y 280 °C donde se establece que con un aumento en la temperatura de crecimiento se observa una disminución drástica en la tasa de crecimiento, esto se debe a la re evaporación de sulfuro de estaño llevando a la formación de fases secundarias (Schneikart et al., 2013). Por tanto, el control de la temperatura de crecimiento es crucial para obtener una película rica en SnS por evaporación por haz de electrones (Park et al., 2015; Nisha et al., 2022).

## **4.2 Mapas bidimensionales de VOSviewer**

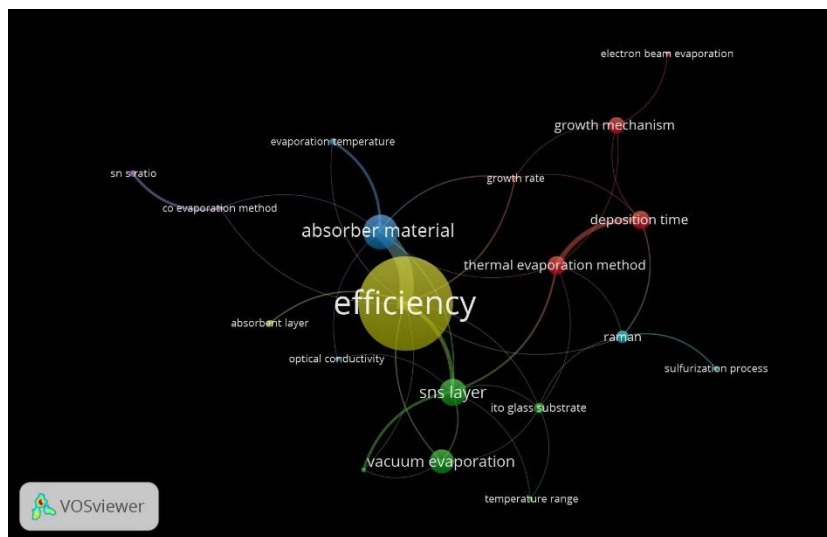
En las imágenes presentadas en las figuras 8 y 9 se muestran los mapas bidimensionales de redes obtenidos mediante el análisis bibliométrico realizado en VOSviewer a partir de cada base de datos consultada. En la visualización de red se pueden observar los términos analizados, los cuales son representados por esferas que a mayor tamaño presentan una mayor relevancia. Por otro lado, en la red también se observa la co-ocurrencia de términos a partir de líneas de enlace que unen las esferas, las cuales entre más acerquen dos esferas, mayor será la relación entre términos.

### ***4.2.1 Visualización de red de las bases de datos analizadas***

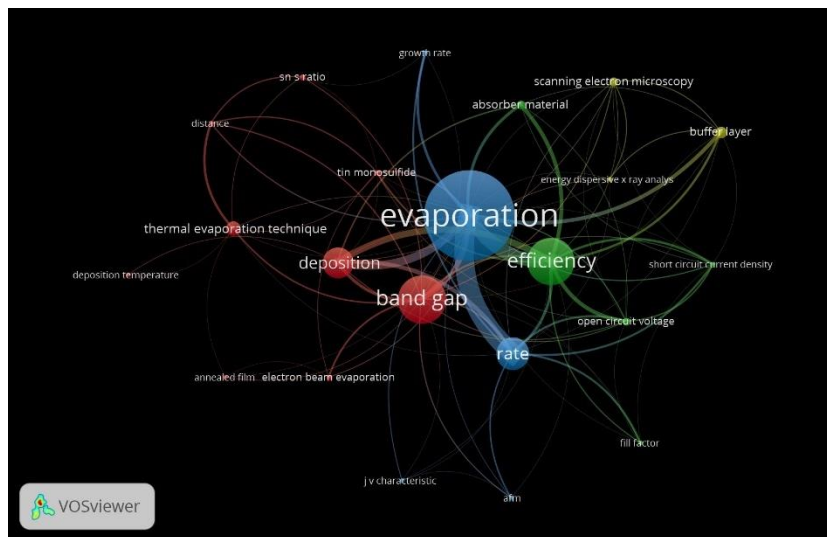
En la figura 8 se presentan 3 imágenes en las cuales se visualiza la co-ocurrencia de términos entre las palabras de interés obtenidas de base de datos correspondiente al periodo 2015-2023. Se observa que las palabras con mayor tamaño de esfera se encuentran presentes en una mayor cantidad de los documentos derivados de las bases de datos seleccionadas y analizadas por el software VOSviewer.

**Figura 8**

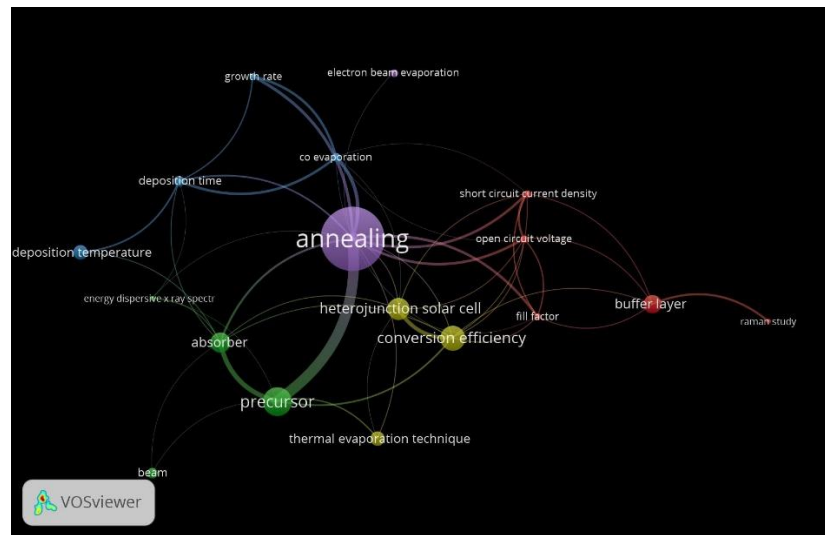
*Emparejamiento bibliográfico a partir de las bases de datos a) Scopus b) Web of Science y c) Science Direct tomado del software VOSviewer.*



a) Scopus



b) Web of Science



c) Science Direct

En la figura 8 se observa la estructura de red de las palabras seleccionadas para las bases de datos donde se muestran por nodos y colores para identificar grupos de elementos relacionados entre sí.

En la imagen a) la esfera de mayor tamaño se encuentra en el cluster de color azul con la palabra *efficiency* la cual se conecta con las esferas de color azul correspondientes a las palabras *SnS absorber*, *absorbent layer* y *evaporation temperature*, con las esferas de color rojo con las palabras *current voltage measurement*, *vacuum evaporation*, *sns layer* y *ito glass substrate*, con la esfera verde con la palabra *growth rate* y con la esfera de color amarillo con *thermal evaporation method*.

Así mismo en la imagen b) la esfera con el mayor tamaño y con la palabra *evaporation* correspondiente al cluster de color azul no posee un enlace con las palabras *deposition temperature* y *sn s ratio* que se encuentran de color rojo, sin embargo, esta esfera si posee relación directa con las demás palabras.

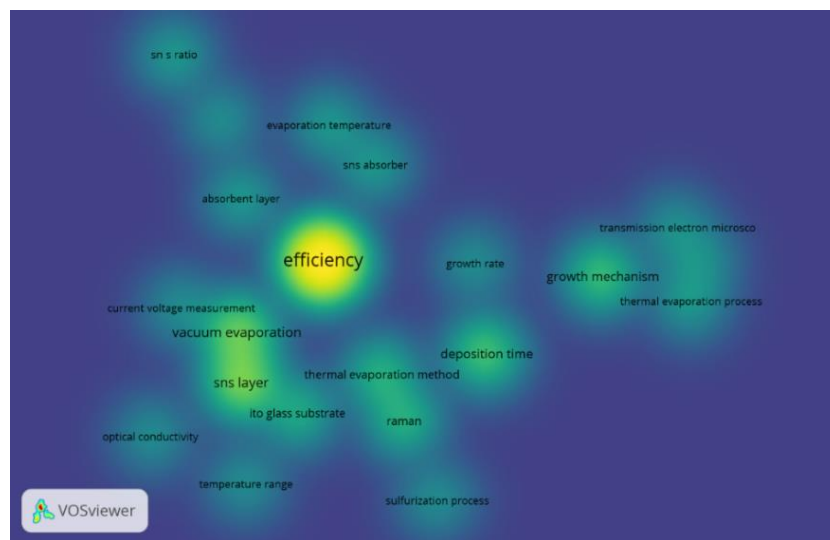
En la imagen c) se observa que la esfera de color morado con la palabra *annealing* esta indirectamente relacionada a través de la fuerza de enlace con las palabras *deposition temperature* de color azul, *beam* de color verde, *buffer layer* y *raman study* de color rojo.

#### 4.2.2 Densidad de la red de las bases de datos analizadas.

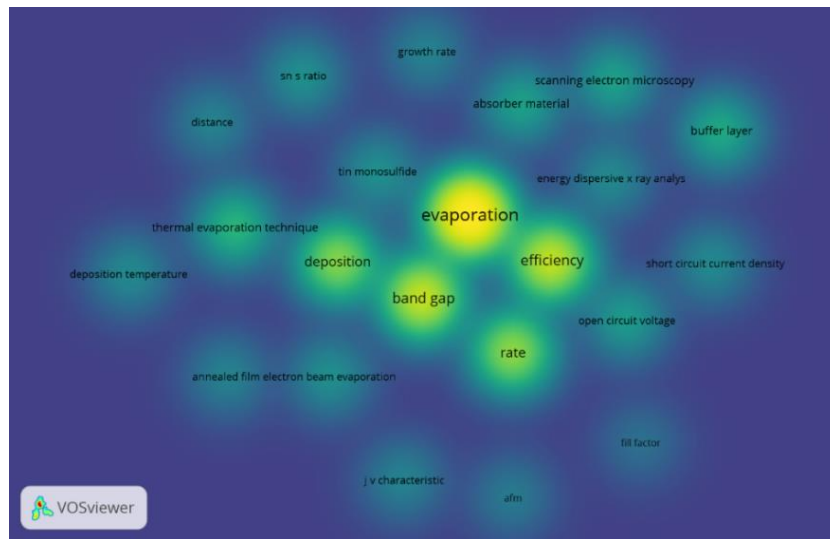
En la figura 9 se presentan 3 imágenes en donde se observan los mapas de densidad basados en las palabras obtenidas a partir de las bases de datos consultadas como Scopus, Web of Science y Science Direct. Se observa que las palabras con mayor importancia se encuentran en un color amarillo siendo significativas debido a que es la palabra con mayor presencia en parte de los artículos consultados.

#### Figura 9

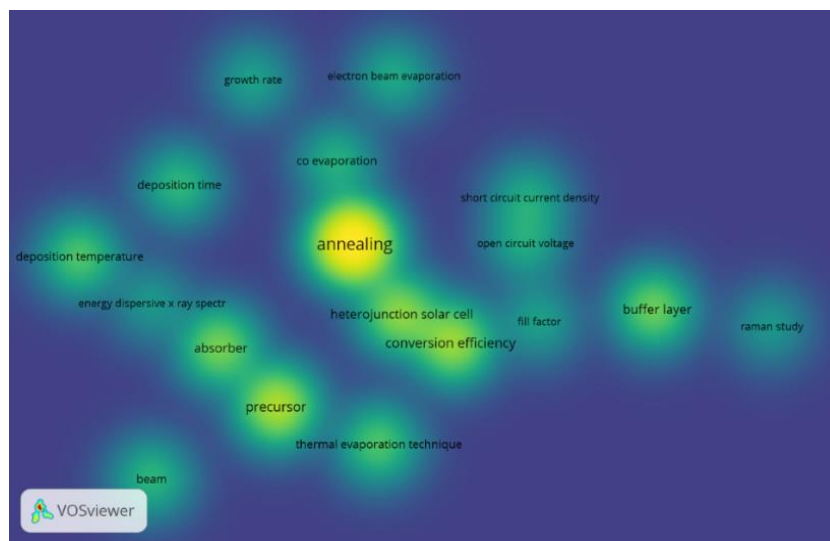
Visualización de densidad de red conforme las bases de datos donde a) Scopus b) Web of Science y c) Science Direct según VOSviewer.



a) Scopus



b) Web of Science



c) Science Direct

En la imagen a) se puede observar que la palabra con mayor densidad de red es *efficiency*, por otro lado, en la imagen b) se observan palabras con una densidad significativa como lo son *evaporation*, *efficiency* y *band gap*. En la imagen c) se observan palabras con gran densidad como *annealing*, *precursor* y *conversión efficiency*. Estas densidades proporcionan información sobre la cohesión y la conectividad de las redes. Si la densidad de red es alta, significa que hay muchas

conexiones entre los nodos, lo que sugiere que las palabras representadas en el mapa están estrechamente relacionadas.

### 4.3 Análisis de los mapas bidimensionales del software VOSviewer

Con las siguientes tablas se realizó el análisis de co-ocurrencia de términos seleccionados para así poder establecer las variables con mayor relevancia en las bases de datos Scopus, Web of Science y Science Direct. La relevancia de estos se establece con un análisis cuantitativo de la fuerza de enlace en la co-ocurrencia entre términos obtenidos a partir del software VOSviewer.

**Tabla 6.**

*Análisis de ocurrencia de términos Scopus.*

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
EFFICIENCY (1)	-	1	0	0	0	2	0	6	2
CO EVAPORATION METHOD (2)	1	-	0	0	0	0	4	0	0
THERMAL EVAPORATION METHOD (3)	0	0	-	0	0	0	0	3	0
ELECTRON BEAM EVAPORATION (4)	0	0	0	-	0	0	0	0	0
SULFURIZATION PROCESS (5)	0	0	0	0	-	0	0	0	0
VACUUM EVAPORATION (6)	2	0	0	0	0	-	0	2	0
Sn S RATIO (7)	0	6	0	0	0	0	-	0	0
SnS LAYER (8)	6	0	3	0	0	2	0	-	0
GROWTH RATE (9)	2	0	0	0	0	0	0	0	-

En congruencia con la tabla 6 se puede observar que existe gran relación entre los términos EFFICIENCY y SnS LAYER, por lo que se establece que una parte de los artículos consultados en la base de datos Scopus donde se presenta información relacionada con el proceso de síntesis de películas delgadas de SnS también se encuentra información sobre el diseño de un prototipo para así poder calcular su eficiencia, además se puede observar una relación entre la eficiencia y la evaporación en vacío, esto se debe a que la búsqueda de información se realizó con énfasis en técnicas de síntesis llevadas a cabo mediante métodos de evaporación. Por otro lado, también se

observa una alta relación entre CO EVAPORATION y Sn S RATIO por lo que se establece que al realizar un proceso de síntesis por co-evaporación la variable de síntesis utilizada es la relación de masa de los precursores.

Del mismo modo se puede establecer que debido a que las fuerzas de enlace son cero para las técnicas de THERMAL EVAPORATION METHOD y ELECTRON BEAM EVAPORATION con relación a EFFICIENCY, existe una gran posibilidad de desarrollar investigación en torno a la fabricación de celdas solares de películas delgadas de SnS por estos métodos y así establecer su eficiencia.

**Tabla 7.**

*Análisis de ocurrencia de términos Web of Science.*

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
EFFICIENCY (1)	-	0	2	0	0	0	0	0	9
CO EVAPORATION METHOD (2)	0	-	0	0	0	0	0	0	0
THERMAL EVAPORATION METHOD (3)	2	0	-	0	0	1	2	0	1
ELECTRON BEAM EVAPORATION (4)	0	0	0	-	0	3	0	0	0
SULFURIZATION PROCESS (5)	0	0	0	0	-	0	0	0	0
VACUUM EVAPORATION (6)	0	0	1	3	0	-	0	0	0
Sn S RATIO (7)	0	0	2	0	0	0	-	0	1
SnS LAYER (8)	0	0	0	0	0	0	0	-	0
GROWTH RATE (9)	0	0	1	0	0	1	1	0	-

En la tabla 7 se puede observar que en los documentos consultados en la base de datos Web of Science existe una relación entre la EFFICIENCY y GROWTH RATE, los cuales a su vez se relacionan con THERMAL EVAPORATION METHOD, por lo que se puede establecer que se ha utilizado la velocidad de crecimiento como parámetro de entrada en la síntesis de películas delgadas de SnS por el método de evaporación térmica.

Así mismo a partir de la co-ocurrencia entre términos presentada se puede establecer que existe una gran posibilidad de realizar investigación al sintetizar celdas solares de película delgada de SnS entorno a los métodos de CO EVAPORATION METHOD y ELECTRON BEAM EVAPORATION.

**Tabla 8.**

*Análisis de ocurrencia de términos Science Direct.*

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
EFFICIENCE (1)	-	1	0	0	0	0	0	0	0
CO EVAPORATION METHOD (2)	1	-	0	0	0	0	0	0	6
THERMAL EVAPORATION METHOD (3)	0	0	-	0	0	0	0	0	0
ELECTRON BEAM EVAPORATION (4)	0	0	0	-	0	0	0	0	0
SULFURIZATION PROCESS (5)	0	0	0	0	-	0	0	0	0
VACUUM EVAPORATION (6)	0	0	0	0	0	-	0	0	0
Sn S RATIO (7)	0	0	0	0	0	0	-	0	0
SnS LAYER (8)	0	0	0	0	0	0	0	-	0
GROWTH RATE (9)	0	6	0	0	0	0	0	0	-

Según la tabla 8 se puede establecer la relación entre EFFICIENCE y CO EVAPORATION METHOD, a su vez la relación entre CO EVAPORATION METHOD y GROWTH RATE.

Según la base de datos Science Direct existe poca co-ocurrencia entre los términos lo que da cabida a realizar desarrollo de investigación de celdas solares de película delgada de SnS centrada en estos términos.

## 5. Análisis de resultados

### 5.1 Equipos de laboratorio

En la figura 10 se muestran los equipos de laboratorio de los que disponen los grupos de investigación GISEL y CIMBIOS para la síntesis de películas delgadas por métodos de evaporación.

#### Figura 10

*Equipos de laboratorio.*

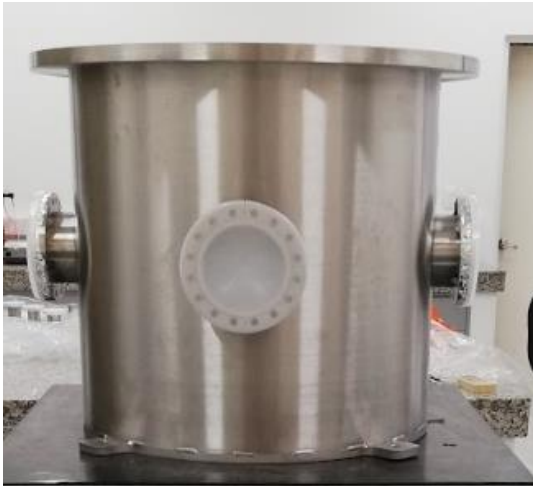


#### 5.1.1 Descripción de los equipos de laboratorio.

El laboratorio de investigación de los grupos GISEL y CIMBIOS cuenta con una cámara de vacío y un sistema de recocido ensamblado a la cámara principal, electrodos y sensores, termocuplas, bomba de vacío turbo molecular y mecánica y una fuente de alimentación. A continuación, se presentarán algunas figuras donde se muestra en detalle algunos equipos del laboratorio.

**Figura 11**

*Componentes que conforman el sistema de evaporación de los grupos GISEL y CIMBIOS. a) Cámara de vacío b) Electrodo, sensores, y bomba de vacío turbo molecular c) Bomba de vacío mecánica d) Fuente de alimentación AC.*



a)



b)



c)



d)

## **5.2 Método de síntesis**

### ***5.2.1 Limpieza de los sustratos***

Los laboratorios de los grupos de investigación GISEL y CIMBIOS cuentan con sustratos de vidrio sodalime para el proceso de síntesis de películas delgadas, estos deberán ser limpiados mediante una solución sulfocrómica. Los sustratos deberán permanecer sumergidos en esta solución durante un tiempo de 24 horas.

### ***5.2.2 Metodología para el proceso de síntesis***

En el proceso de síntesis se depositarán películas delgadas de SnS en los sustratos de vidrio sodalime ubicados en el portasustrato. En las navecillas de la cámara principal y del sistema de recocido se deben depositar las masas de estaño y azufre, respectivamente. Los precursores deben ser pesados al seleccionar una relación de masa Sn/S entre 0.8 y 1.1. El estaño y azufre utilizados para el proceso de síntesis cuentan con una pureza 99.5%. Además, la distancia entre las navecillas y el portasustrato debe ser de 30 cm.

Seguido a esto, se debe cerrar la cámara y realizar el proceso de vacío encendiendo la bomba mecánica y 2 minutos después la bomba turbo molecular, luego de haber transcurrido un tiempo entre 7 y 10 minutos el sensor de vacío registrará un valor de presión inferior a  $10^{-4}$  mbar, después de alcanzar la presión de vacío se debe cerrar la compuerta que une la zona de recocido con la cámara principal. Durante el proceso de síntesis la temperatura de trabajo del sustrato, la cual ha sido determinada de acuerdo con la investigación, debe ser establecida entre 250 y 350 °C. Los sustratos son calentados mediante lámparas alógenas controladas por un equipo PID.

Una vez alcanzada la temperatura del sustrato se enciende la fuente de AC colocándole una corriente de 130 A y se establece un tiempo de encendido de 10 minutos para alcanzar la temperatura de evaporación del estaño de 997 °C correspondiente a la presión de vacío. Luego de

alcanzar la temperatura de evaporación del estaño, el gas generado viajará a través de la cámara hasta depositarse en el sustrato que se encuentra a menor temperatura para así formar una película de estaño.

Luego se procede a apagar los equipos y se espera aproximadamente 15 minutos para abrir la compuerta que comunica la cámara principal con el sistema de recocido y posteriormente mediante un sistema de brazos magnéticos la película debe ser transportada a la cámara de recocido. Una vez la película se encuentre en la zona de recocido se cierra la compuerta con la intención de evitar que el azufre que va a ser evaporado contamine la cámara de vacío y la bomba turbo molecular. Mediante controladores PID se enciende la lámpara alógena que se encuentra en el sistema de recocido hasta alcanzar una temperatura de 150 °C que permitirá que se evapore el azufre.

Después de la deposición del azufre se apagan los equipos y se espera que se enfríe la película. Luego se elimina el vacío mediante la apertura de una válvula de escape. Finalmente se abre el sistema de recocido, se saca la película delgada de SnS y se guarda de modo que no se contamine con el aire. Posteriormente se lleva a caracterizar.

## 6. Conclusiones

- En este documento se realizó la recopilación de información en bases datos (Scopus, Science Direct y Web of Science) de síntesis de película delgadas de sulfuro de estaño (SnS) mediante los métodos de evaporación térmica, co-evaporación y evaporación por haz de electrones. A partir de las cuales se recopiló información de las variables de síntesis utilizadas y las propiedades opto-eléctricas y estructurales.
- Con la información recopilada se realizó un análisis bibliométrico con el software VOSviewer para así establecer la co-ocurrencia entre las variables de síntesis.
- Se determinaron los rangos de las variables de síntesis basándonos en la literatura consultada para así obtener películas delgadas de SnS con propiedades opto-eléctricas y estructurales adecuadas para ser usadas en celdas solares.
- Se propone un método de síntesis de películas delgadas de SnS teniendo en cuenta la información recopilada y analizada de las bases de datos y los equipos con los que cuentan los grupos GISEL y CIMBIOS de la UIS.

### Referencias Bibliográficas

- Acciona*. (2020). Obtenido de BUSINNES AS UNUSUAL: [https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/?\\_adin=02021864894](https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/?_adin=02021864894)
- Aimi Yago et al., T. K. (19 de Enero de 2018). Influence of Sn/S composition ratio on SnS thin-film solar cells produced via co-evaporation method. *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(2S2). doi:10.7567/JJAP.57.02CE08
- Andrade, J. A. (2016). Síntesis y caracterización de películas delgadas de SnS depositadas por las técnicas CSVT y rocío químico neumático: estudio comparativo. (*Tesis de Maestria*). INSTITUCION POLITÉCNICO NACIONAL, México D.F, Mexico. Recuperado el 22 de Diciembre de 2021, de [https://www.researchgate.net/publication/307168175\\_Sintesis\\_y\\_caracterizacion\\_de\\_pelculas\\_delgadas\\_de\\_SnS\\_depositadas\\_por\\_las\\_tecnicas\\_CSVT\\_y\\_rocio\\_quimico\\_neumatico\\_estudio\\_comparativo](https://www.researchgate.net/publication/307168175_Sintesis_y_caracterizacion_de_pelculas_delgadas_de_SnS_depositadas_por_las_tecnicas_CSVT_y_rocio_quimico_neumatico_estudio_comparativo)
- Baca, C. O. (2006). Deposición de Películas Delgadas de TiN mediante Erosión Catódica Reactiva sobre Sustratos Nanoporosos de Alúmina. *Tesis de maestria*. CIMAV, Chihuahua, Chihuahua, Mexico. Recuperado el 23 de Enero de 2023, de <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/913>
- Ballesteros, V. A. (2014). Caracterización óptica y eléctrica de películas delgadas de CU<sub>3</sub>BIS<sub>3</sub> para ser usadas como capa absorbente en dispositivos fotovoltaicos. *Tesis de Maestria*. Universidad Libre, Bogotá, Colombia. Recuperado el 05 de Mayo de 2023, de <https://hdl.handle.net/10901/9359>
- BANGUERO, E. (2010). PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS DE SnS Y SnS:Bi DEPOSITADAS POR SULFURIZACIÓN. (*Tesis de*

*maestria*). UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Bogota, Colombia.  
 Recuperado el 31 de marzo de 2022, de  
[https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/7585/835225.2010.pdf?sequence=1  
 &isAllowed=y](https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/7585/835225.2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Barman et al., B. K. (Septiembre de 2019). Evaluation of semiconducting p-type tin sulfide thin films for photodetector applications. *Superlattices and Microstructures*.  
 doi:<https://doi.org/10.1016/j.spmi.2019.106215>

Basak et al., H. A. (01 de Enero de 2018). Effect of substrate on the structural, optical and electrical properties of SnS thin films grown by thermal evaporation method. *Thin Solid Films*, 97-101. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.10.039>

Bashir et al. (2020). Chapter 3 - Interfaces and surfaces. *Chemistry of Nanomaterials*, 51-87.  
 doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818908-5.00003-2>

Bashir et al., T. I. (2020). Interfaces and surfaces. *Chemistry of Nanomaterials*, 51-87.  
 doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818908-5.00003-2>

Bautista, W. (2017). DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES ÓPTICAS, ELÉCTRICAS Y CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE PELÍCULAS CON ESTRUCTURAS METAL ORGÁNICAS (MOFs) PARA POSIBLES APLICACIONES EN CELDAS SOLARES. *TESIS PARA OBTENER TITULO DE MAESTRO EN CIENCIA DE MATERIALES*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO, Toluca, Mexico. Recuperado el 09 de Marzo de 2023, de <http://hdl.handle.net/20.500.11799/69413>

Caballero, R. (2008). Comportamiento mecánico bajo sollicitaciones de contacto de materiales de herramienta recubiertos con capas cerámicas duras. *Tesis para obtener titulo de pregrado*.

Universidad Politécnica de cataluña, Barcelona, España.

doi:<http://hdl.handle.net/2099.1/5508>

Cepeda Moya, J. S. (2017). *Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11634/4196>

Cifuentes et al., M. B. (Septiembre de 2006). Optical and Structural Studies on SnS Films Grown by Co-Evaporation. *Brazilian Journal of Physics*(36). Recuperado el 29 de Abril de 2023, de <https://www.scielo.br/j/bjp/a/wNkc3JsPqdpdhXMb79B9wzM/?format=pdf&lang=en>

*ENF Solar*. (2021). Obtenido de ENF Solar: <https://es.enfsolar.com/>

Engi. (22 de Septiembre de 2020). *Engi*. Obtenido de <https://engi.co/impacto-paneles-solares/>

Espinosa, S. H. (2012). Depósito de Películas de Bismuto por Evaporación Térmica. (*Tesis de física*). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de Mexico, Mexico. Recuperado el 06 de Enero de 2021, de <http://132.248.9.195/ptd2013/enero/0687786/0687786.pdf>

Estrella, J. C. (2016). Mediciones eléctricas por el método de cuatro puntas en películas delgadas de interés fotovoltaico. *TESIS PARA OBTENER GRADO DE MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA*. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, Altamira, Tamaulipas, Mexico. Recuperado el 02 de Mayo de 2023, de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/18560/Mediciones%20Electricas%20por%20el%20metodo%20de%20cuatro%20puntas%20en%20peliculas%20delgadas%20de%20interes%20fotovoltaico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gil, A. (09 de Marzo de 2021). *El orden mundial* . Obtenido de EOM: <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/grandes-productores-energia-solar-mundo/>

Green et al., M. ., (21 de Noviembre de 2022). Solar cell efficiency tables (Version 61). *Progress in Photovoltaics*. doi:<https://doi.org/10.1002/pip.3646>

Guarín & Sánchez, D. y. (2021). *Estudio de factibilidad para la implementación de energía limpia con paneles solares*. Barrancabermeja. Obtenido de [https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/34697/1/2021\\_energ%c3%ada\\_lim pia\\_paneles.pdf](https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/34697/1/2021_energ%c3%ada_lim pia_paneles.pdf)

Guo et al., W. X. (15 de Septiembre de 2019). Characterization of evaporated tin sulfide and its application for hybrid solar cell. *Materials Letters*, 234-237. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.05.036>

Hegde et al., K. A. (Marzo de 2018). Vacuum annealed tin sulfide (SnS) thin films for solar cell applications. *Surfaces and Interfaces*, 78-84. doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2017.12.003>

Herrero, V. R. (1 de May de 2015). SnS absorber thin films by co-evaporation: Optimization of the growth rate and influence of the annealing. *Thin Solid Films*, 582, 249-252. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.10.081>

Hilcu, M. (Junio de 2021). *OTOVO*. Obtenido de OTOVO: <https://www.otovo.es/blog/energia/impacto-energias-renovables-medioambiente/>

Hurtado, M. F. (2014). SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS DEL SEMICONDUCTOR  $Cu_2ZnSnS_4$  Y SU USO COMO CAPA ABSORBENTE EN CELDAS SOLARES. (*Tesis de Doctorado en Ciencias – Química* ). UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Bogota, Colombia. Recuperado el 04 de Marzo de 2023, de

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/52170/01198067.2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

JULISSA, R. R. (2015). Procesamiento de películas delgadas de CdS:Cu para DBQ para su aplicación en celdas solares. (*Tesis de ingeniería*). Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México. Recuperado el 26 de Enero de 2021, de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/20698/Procesamiento%20de%20pel%C3%ADculas%20delgadas%20de%20CdS%20Cu%20por%20DBQ%20para%20su%20aplicaci%C3%B3n%20en%20celdas%20solares.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Kafashan, H. (12 de 2018). Comparison the effects of Se and Te inclusion on the physical and electrochemical properties of SnS thin films. *Materials Science in Semiconductor Processing*(88), 148-160. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.07.038>

Kawano et al., C. J. (2015). Impact of growth temperature on the properties of SnS film prepared by thermal evaporation and its photovoltaic performance. *Current Applied Physics*, 897-901. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cap.2015.03.026>.

Limaymanta, C. (31 de Agosto de 2020). *tlet*. Recuperado el 23 de Enero de 2023, de <https://www.revistaotlet.com/tips-cesar-limaymanta-mapeo-cientifico-con-vosviewer/>

Loferski., J. J. (1956). Theoretical Considerations Governing the Choice of the Optimum Semiconductor for Photovoltaic Solar Energy Conversion. *Journal of Applied Physics*, 27, 777. doi:<https://doi.org/10.1063/1.1722483>

López et al., S. J. (2009). La bibliometría: una herramienta eficaz para evaluar la actividad científica postgraduada. *Ciencias Médicas en Cienfuegos*. Recuperado el 01 de Enero de 2023, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1727-897X2009000400011&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-897X2009000400011&lng=es&tlng=es).

- Marín, G. (2018). Sistema de Evaporación por cañón de electrones. *steemit*. Recuperado el 01 de Febrero de 2022, de <https://steemit.com/stem-espanol/@iamphysical/canon-de-electrones-para-fabricar-capas-delgadas-de-materiales>
- Martin & Lakhtakia. (2013). Vapor-Deposition Techniques. *Engineered Biomimicry*, 384-386. Recuperado el 15 de DICIEMBRE de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124159952000155?via%3Dihub>
- Moreno, J. E. (2018). “DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DE BRECHA PROHIBIDA DE COMPUESTOS PRESENTES EN MEZCLAS DE POLVOS: SISTEMAS BIFÁSICOS”. *Tesis para obtener el Título de: Licenciatura en Ingeniería en Materiales*. BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA, Puebla, Puebla, Mexico. Recuperado el 09 de Marzo de 2023, de <https://hdl.handle.net/20.500.12371/8709>
- Moreno., R. (2017). SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN ÓPTICA Y ESTRUCTURAL DE PELÍCULAS DELGADAS DE **Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>** CRECIDAS POR PVD (Physical Vapor Deposition) MÉTODO DE COEVAPORACIÓN. (*Tesis de Maestría*). Universidad Nacional de Colombia, Bogota, Cundinamarca, Colombia. Recuperado el 09 de Febrero de 2022, de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/60916/sintesisPVDKesterita.pdf?sequence=1>
- Muñoz & Zárate, I. A. (2009). SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA VISUALIZACIÓN DE SEÑALES ELÉCTRICAS DE MOTORES AC Y DC. *Tesis para obtener titulo de ingeniero electrónico*. UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, Bucaramanga, Colombia. Recuperado el 03 de Mayo de 2023, de

[https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/602/digital\\_18246.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/602/digital_18246.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de Paris*. Dakota del Norte. Obtenido de <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>

*News Soliclima*. (09 de Febrero de 2009). Obtenido de News Soliclima: <https://news.solicluma.com/noticias/energia-solar/el-cigs-el-futuro-de-la-fotovoltaica>.

Nieto et al., J. F. (1994). Películas delgadas: fabricación y aplicaciones. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. Obtenido de <http://boletines.secv.es/upload/199433245.pdf>

Nisha et al., P. K. (2022). Influence of S/Sn ratio on microstructural, morphological and optical properties of tin monosulfide thin films. *Optical Materials*(133). doi:<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112792>

NREL. (2021). *NREL Transforming ENERGY*. Recuperado el 7 de Abril de 2022, de <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

ONU. (2022). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado el 28 de 04 de 2023, de [https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022\\_Spanish.pdf](https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022_Spanish.pdf)

Ordoñez, J. I. (2012). Síntesis y Estudio de Propiedades de Películas Delgadas de  $Cu_2ZnSnS_4$ . (*Tesis de Maestría en Ciencias Física*). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado el 04 de Marzo de 2023, de <https://repository.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/11542/835305.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Ordoñez, R. J. (2012). Síntesis y Estudio de Propiedades de Películas Delgadas de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ . *Magister en Ciencias Física*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado el 06 de Marzo de 2023, de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/11542/835305.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Oropeza, M. M. (2020). FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA CELDA SOLAR BASADA EN SULFURO DE ESTAÑO Y ÓXIDO DE ZINC SOBRESUBSTRATOS DE COBRE. (*Tesis de Doctorado*). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Mexico. Recuperado el 28 de Abril de 2022, de <https://hdl.handle.net/20.500.12371/10669>
- Otalora, T. A. (2008). EL ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO COMO HERRAMIENTA PARA EL SEGUIMIENTO DE PUBLICACIONES CIENTÍFICAS, TESIS Y TRABAJOS DE GRADO. *Trabajo de grado (Microbiología Industrial)*. Pontificia Universidad JAVERIANA, Bogotá, Colombia. Recuperado el 23 de Enero de 2023, de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8212/tesis209.pdf>
- Park et al., H. K. (September de 2015). Structural, optical, and electrical properties of tin sulfide thin films grown with electron-beam evaporation. *Current Applied Physics*, 15(9), 964-969. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cap.2015.05.007>
- Pavón, L. A. (2011). SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS Y PELÍCULAS DELGADAS POR MÉTODOS FÍSICOS A PARTIR DE ALEACIONES CON EFECTO DE MEMORIA DE FORMA. *Tesis en Materiales*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, San Nicolás de los Garza, Mexico. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/2534/1/1080090516.pdf>

Perez et al., A. P. (2022). DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE UN DISPOSITIVO CON GEOMETRÍA DE HAZ ESTRECHO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE ATENUACIÓN LINEAL DE LUZ EN TEJIDO BIOLÓGICO MURINO. *TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN BIOINGENIERÍA MÉDICA*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO, TOLUCA DE LERDO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO. Recuperado el 09 de Marzo de 2023, de <http://hdl.handle.net/20.500.11799/137035>

PITRE, V. M. (2020). DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS. *Tesis de Ingenieria Quimica*. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, Bogota, Colombia . Recuperado el 15 de 12 de 2021, de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8005/1/6151517-2020-II-IQ.pdf>

Planas, O. (26 de Septiembre de 2019). *Energia Solar*. Obtenido de Energia Solar: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/celula-solar-de-pelicula-fina>

Planeación, D. N. (2019). Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022. *Pacto por Colombia, pacto por la Equidad*, 198. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Ley1955-PlanNacionaldeDesarrollo-pacto-por-colombia-pacto-por-la-equidad.pdf>

PND, P. N. (Febrero de 2023). COLOMBIA, POTENCIA MUNDIAL DE LA VIDA. *Bases del Plan Nacional de Desarrollo*, 159. Recuperado el 05 de Abril de 2023, de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-03-17-bases-plan-nacional-desarrollo-web.pdf>

- REN21. (2016). *Renewable Energy Policy Network*. GLOBAL STATUS REPORT. Recuperado el 7 de Abril de 2022, de [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REN21\\_GSR2016\\_FullReport\\_en\\_11.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf)
- REN21. (15 de Junio de 2021). *REN21 RENEWABLES NOW*. Obtenido de REN21 , RENEWABLES NOW: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REN21\\_GSR2021\\_PressRelease\\_Spanish.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REN21_GSR2021_PressRelease_Spanish.pdf)
- REN21. (2023). *ENERGÍA RENOVABLE CAPTURA ATENCIÓN GLOBAL ANTE AGRAVADAS CRISIS*. Recuperado el 03 de Abril de 2023, de [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023\\_Demand\\_Press\\_Release\\_ES.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023_Demand_Press_Release_ES.pdf)
- RER Energy. (7 de Enero de 2022). *RER energy group*. Recuperado el 28 de Abril de 2022, de RER energy group: <https://rerenergygroup.com.mx/tipos-de-sistemas-fotovoltaicos-cuales-mejor/#:~:text=Silicio%20monocristalino%3A%20se%20utiliza%20para,del%2015%20a%2017%25>).
- Robles et al. (1 de Mayo de 2015). SnS absorber thin films by co-evaporation: Optimization of the growth rate and influence of the annealing. *Thin Solid Films*, 582, 252. Obtenido de [science/article/pii/S0040609014010529](https://science/article/pii/S0040609014010529)
- Robles et al., T. J. (1 de Mayo de 2015). SnS absorber thin films by co-evaporation: Optimization of the growth rate and influence of the annealing. *Thin Solid Films*, 249-252. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.10.081>
- Rodríguez et al., R. G.-U. (2009). Bibliometría: conceptos y utilidades para el estudio médico y la formación profesional. *Salud Uninorte*, 25(2). Recuperado el 23 de Enero de 2023, de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-55522009000200011](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-55522009000200011)

- Schneikart et al., H.-J. S. (5 de Julio de 2013). Efficiency limitations of thermally evaporated thin-film SnS solar cells. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(30). doi:10.1088/0022-3727/46/30/305109
- SER COLOMBIA. (13 de Marzo de 2022). *Ser COLOMBIA Asociación Energías Renovables*. Recuperado el 28 de Abril de 2022, de Ser COLOMBIA Asociación Energías Renovables: <https://ser-colombia.org/>
- Serrano, R. (15 de 08 de 2019). *TRITEC INTERVENTO*. Obtenido de <https://tritec-intervento.cl/eficiencia-de-diferentes-tipos-de-celulas-solares-de-silicio-parte-2/>
- Solano et al., S. J. (Jul.-Ago. de 2009). La bibliometría: una herramienta eficaz para evaluar la actividad científica postgraduada. *Revista Científica de las Ciencias Médicas en Cienfuegos*, VII(4). Recuperado el 04 de Mayo de 2023, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1727-897X2009000400011#:~:text=La%20bibliometr%C3%ADa%20es%20la%20aplicaci%C3%B3n,y%20palabras%20claves%20o%20descriptores](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-897X2009000400011#:~:text=La%20bibliometr%C3%ADa%20es%20la%20aplicaci%C3%B3n,y%20palabras%20claves%20o%20descriptores).
- Sun, T. (6 de 10 de 2009). *Techno Sun*. Obtenido de Techno Sun: <http://blog.technosun.com/celulas-de-capa-fina-2/>
- Swanepoel, R. (1983). Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon. *Journal of Physics*, 16(16). doi:10.1088/0022-3735/16/12/023
- Tauc, J. ( January de 1968). Optical properties and electronic structure of amorphous Ge and Si. *Materials Research Bulletin*, 37-46. Recuperado el 09 de Enero de 2023, de [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(68\)90023-8](https://doi.org/10.1016/0025-5408(68)90023-8)

- Top Cable. (2019). *Top Cable*. Recuperado el 21 de Diciembre de 2019, de <https://www.topcable.com/sites/es-co/cuales-son-las-fncer-y-su-importancia-en-la-matriz-energetica-colombiana/>
- Trigo et al., J. V. (1 de Noviembre de 2015). Growth of SnS thin films by co-evaporation and sulfurization for use as absorber layers in solar cells. *Materials Chemistry and Physics*, 165-170. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.10.026>
- Universo Abierto. (2020). *Universo Abierto*. Recuperado el 23 de Enero de 2023, de Universo Abierto: <https://universoabierto.org/2020/02/18/vosviewer-es-una-herramienta-de-software-para-construir-y-visualizar-redes-bibliometricas/>
- users.dcc. (s.f.). *users.dcc*. Recuperado el 23 de Enero de 2023, de users.dcc: <https://users.dcc.uchile.cl/~roseguel/celdasolar.html>
- VOSviewer. (2023). *VOSviewer*. Recuperado el 23 de Enero de 2023, de VOSviewer: <https://www.vosviewer.com/>