

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA TIPO
KESTERITA A TRAVÉS DE SIMULACIONES.**

**ALEJANDRO BERNAL CONDIA
JESSICA ANDREA SÁNCHEZ CELY**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2018**

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA TIPO
KESTERITA A TRAVÉS DE SIMULACIONES.**

**ALEJANDRO BERNAL CONDIA
JESSICA ANDREA SÁNCHEZ CELY**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingenieros Electricistas

Directora

**MARIA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS
Doctora en Ingeniería, Ingeniera Electrónica**

Codirectora

**MONICA ANDREA BOTERO LONDOÑO
Doctora en ciencias físicas, Ingeniera Electricista**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

A Dios: Por haberme permitido culminar con satisfacción esta etapa de mi vida y haberme dado salud y fortaleza para lograr mis objetivos.

A mi madre Julia Elizabeth: Por haberme dado su apoyo incondicional en todo momento, gracias por sus consejos, comprensión, sus valores inculcados, por la motivación constante, pero más que nada, por su amor.

A mi padre Luis Alejandro: Por ser ejemplo de perseverancia, esfuerzo, dedicación, por el valor mostrado para salir adelante, por brindarme su apoyo, confianza y por los valores inculcados durante mi formación personal, que me han permitido ser una persona de bien.

A mis hermanas: Nancy, Rosa, Alejandra, Sofía, gracias por el apoyo, los consejos, comprensión, amor y por ser mi ejemplo a seguir.

A mi familia: Quiero agradecer a mis tías Chávela y Eva por ser un apoyo incondicional, a mis primos Yiyo, Diana que son como mis hermanos, gracias por ser ejemplo durante mi formación, a Lizeth, Adan y mi ahijado Miguelito, por sus palabras de apoyo y buenos deseos.

A Thalía Rodríguez. Gracias por haber sido mi apoyo durante gran parte de mi carrera, por brindarme su amor comprensión y por haber estado siempre cuando necesite de un consejo.

A mis amigos. Por la ayuda, compañía, confianza y consejos brindados durante mi formación académica.

Alejandro Bernal Condia

DEDICATORIA

La vida es hermosa gracias a Dios.

El amor recibido, la dedicación y la paciencia con la que cada día se preocupaban mis padres. A ellos Luz Mery y Nelson Javier por ser los principales promotores de mis sueños, porque con su apoyo y confianza me dieron la fortaleza para alcanzarlos.

A mis hermanos por brindarme su infinito amor en un abrazo o una sonrisa.

A mis abuelos por ser un gran ejemplo de emprendimiento y resistencia.

A mis tíos por jugarse el papel de ser mis segundos padres.

A mis amigos por las noches de desvelos, por su compañía, por sus consejos, por que en muchas ocasiones se convertían en mi familia.

A las Doctoras María Alejandra Mantilla y Mónica Botero por sus directrices y enseñanzas para la realización del trabajo de grado.

A mi alma mater, La Universidad Industrial de Santander porque me enseñó a ser persistente, a luchar, a traspasar, a llorar, a reír, porque en el paso por ella deja recuerdos y momentos que no se olvidan, por algo dirán que la vida de universitario es la mejor etapa de la vida.

A todos ellos y a los que me acompañaron en este proceso, infinitas gracias.

JESSICA ANDREA SÁNCHEZ CELY

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la oportunidad de formarnos como personas y como profesionales, a la escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones por las lecciones aprendidas, saber infundido y formación dada.

A las profesoras Mónica Andrea Botero Londoño y María Alejandra Mantilla Villalobos, por la confianza, apoyo, tiempo y orientación brindada durante la realización y culminación con éxito de este proyecto de grado.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. OBJETIVOS	18
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2. CELDAS SOLARES	19
2.1 FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA SOLAR	19
2.2 CELDAS SOLARES DE PELÍCULA DELGADA.....	21
2.2.1 Ventana óptica	21
2.2.2 Capa absorbente.....	22
3. SIMULACIÓN DEL MODELO	23
3.1 ESTRUCTURA DE LA CELDA	23
3.2 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LA CELDA	26
3.3 CALCULO DE LA DENSIDAD DE FOTOCORRIENTE.....	30
3.4 CARACTERÍSTICAS DE LA CELDA SOLAR	33
3.5 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN.....	35
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	38
4.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA LA CAPA BUFFER (CdS) ..	38
4.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA LA CAPA ABSORBENTE CZTSSE	41
4.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA EFICIENCIA EN FUNCION DE LA CAPA ABSORBENTE CZTSSE Y LA CAPA BUFFER CDS.....	44
5. CONCLUSIONES.....	47
6. RECOMENDACIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	50
ANEXOS	54

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Parámetros usados en la simulación	36
Cuadro 2. Parámetros de simulación para la capa Buffer	38
Cuadro 3. Parámetros de simulación de la capa absorbente	42
Cuadro 4. Parámetros de simulación de la eficiencia en función de la capa absorbente y la capa Buffer	45
Cuadro 5. Resultados	48

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. transporte eléctrico de los portadores	20
Figura 2. Estructura de la celda solar.....	23
Figura 3. Dimensiones en función de los espesores de la capa Buffer y absorbente	24
Figura 4. Gráficas irradiancia, flujo solar y flujo solar incidente	28
Figura 5. Coeficiente de absorción CDS, ZNO y CZTSSEE.....	30
Figura 6. Modelo del diodo	33
Figura 7. Región 1 al variar el espesor de la capa Buffer.....	39
Figura 8. Región 2 al variar el espesor de la capa Buffer.....	40
Figura 9. Resultados de la simulación: a) voltaje de circuito abierto (VOC), b) corriente de corto circuito (JSC), c) eficiencias (H) y d) factor de forma (FF) en función del espesor de la capa buffer.	41
Figura 10. Eficiencia en función del espesor de la capa Buffer	41
Figura 11. Región 1 al variar el espesor de la capa absorbente	43
Figura 12. Región 2 al variar el espesor de la capa absorbente	43
Figura 13. Resultados VOC, JSC, H, FF función del espesor de la capa absorbente.....	44
Figura 14. Eficiencia del modelo 1 de irradiancia en función de la capa buffer y absorbente.....	45
Figura 15. Eficiencia del modelo 1 de irradiancia en función de la capa Buffer y absorbente.....	46

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Irradiancia del espectro solar al nivel de la tierra.	54
Anexo B. Diagrama de bloques para la simulación para la capa buffer.....	58
Anexo C. Diagrama de bloques para la simulación para la capa absorbente.....	64

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA TIPO KESTERITA A TRAVÉS DE SIMULACIONES*

AUTORES: ALEJANDRO BERNAL CONDIA
JESSICA ANDREA SANCHEZ CELY**

PALABRAS CLAVE: Kesterita, celda fotovoltaica, simulaciones.

DESCRIPCIÓN:

En la actualidad se han desarrollado nuevas tecnologías para la fabricación de las celdas fotovoltaicas que han atraído la atención mundial, buscando impactar lo menos posible el medio ambiente para la obtención de sus materiales, una de estas tecnologías es la denominada película delgada que utiliza la Kesterita como capa absorbente con composición $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S-Se})_4$ (CZTSSe). este material es de gran interés debido a sus elementos, pues éstos se presentan con mayor abundancia en comparación con los materiales que actualmente se utilizan en otro tipo de celdas que emplean esta misma tecnología para su fabricación.

La eficiencia de conversión o rendimiento de una celda fotovoltaica se define como el cociente entre la máxima potencia eléctrica que se puede entregar a una carga y la irradiación incidente sobre la celda a condiciones estándares, ya que juega un papel importante cuando se emplean estos materiales, pues se busca que esta sea igual o muy parecida a las de las celdas convencionales que se utilizan en el mercado, para darle así viabilidad al uso de este tipo de materiales en estas tecnologías.

Por lo tanto, este trabajo de grado en base a un modelo de celda fotovoltaica con una estructura de heterojunturas óxido de Zinc (ZnO)/ sulfuro de Cadmio (CdS)/ Kesterita $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S-Se})_4$ (CZTSSe), (Ventana óptica/absorbente) y la implementación del mismo en la herramienta Matlab, evalúa la eficiencia de conversión, de acuerdo a las características y propiedades ópticas que contribuyen a la densidad de fotocorriente, comprobando que un aumento en el espesor de las capa absorbente afecta significativamente la eficiencia de la celda.

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director María Alejandra Mantilla Villalobos.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF A KESTERITE PHOTOVOLTAIC CELL THROUGH SIMULATIONS*

AUTHORS: ALEJANDRO BERNAL CONDIA
JESSICA ANDREA SANCHEZ CELY*

KEYWORDS: Kesterite, photovoltaic cell, simulations.

DESCRIPTION:

Currently, new technologies have been developed for the manufacture of photovoltaic cells that have attracted worldwide attention, seeking to impact the least possible environment to obtain their materials, one of these technologies is the so-called thin film that uses the Kesterite as an absorbent layer with composition $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S-Se})_4$ (CZTSSe). This material is of great interest due to its elements, because these are presented with greater abundance in comparison with the materials that are currently used in other types of cells which use this same technology for its manufacture.

The efficiency of conversion or performance of a photovoltaic cell is defined as the quotient between the maximum electrical power that can be delivered to a load and the irradiation incident on the cell at standard conditions, due to it plays an important role when these materials are used, It is intended that this is the same or very similar to the conventional cells used in the market, to give viability to the use of this type of materials in these technologies.

Therefore, this work of degree based on a photovoltaic cell model with a structure of heterojunctions Zinc oxide (ZnO) / Cadmium sulfide (CdS) / Kesterite $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S-Se})_4$ (CZTSSe), (Optical window / absorbent) and the implementation of it in the Matlab tool, evaluates the conversion efficiency, according to the characteristics and optical properties that contribute to the photocurrent density, verifying that an increase in the thickness of the absorbent layer significantly affects the efficiency of the cell.

* Draft Degree

* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering. Director María Alejandra Mantilla Villalobos.

INTRODUCCIÓN

Según Century¹, la adopción de modernas tecnologías de energías renovables después del acuerdo de París, ha impulsado a países como Kazajstán, la federación Rusa y Ucrania a realizar una inversión considerable en estas tecnologías, optando por mecanismos de regulación que promuevan nuevas políticas en las diferentes regiones, que ayuden a eliminar las barreras para el desarrollo a través de soluciones distribuidas como la energía solar.

La generación de electricidad a través de la conversión fotovoltaica de la energía solar, es considerada como una de las más importantes, ya que cuenta con la característica de no ser contaminante y durante su funcionamiento, usa la irradiancia del espectro solar como su fuente principal. Visto esto desde un punto económico, la generación por estos mecanismos tiene limitaciones que han ido mejorando, como es la incorporación de nuevas tecnologías para la fabricación de las celdas, que permiten mejorar significativamente la relación eficiencia/costo en comparación con otras tecnologías.

En este tema Colombia ha adquirido compromisos internacionales respecto a la reducción de gases que ocasionan el aumento del calentamiento global, y motivados por esto, el Congreso de Colombia expidió en mayo del 2014 la ley 1715²,

¹ CENTURY, T. U. Unece Renewable Energy Status Report. Ren21 Unece Renewable Energy Status Report. [En línea] 2017. [Consultado 10 dic 2017] Disponible en: < [https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/renew/Renewable_energy_report_2017_web.p
df](https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/renew/Renewable_energy_report_2017_web.pdf) >

² COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1715 (13, mayo, 2014). Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2014. no. 49150.

con el propósito de promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable. Esta ley tiene como finalidad establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción del aprovechamiento de las fuentes no convencionales, como el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para la producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda.

Adicionalmente, en el 2018 se definieron las reglas para la producción y venta de energía eléctrica por parte de los usuarios del Sistema Interconectado Nacional, mediante la Resolución Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) 030 de 2018 ³, lo cual impulsa y viabiliza la implementación de estas fuentes no convencionales de energía en Colombia.

Uno de los elementos principales de un sistema fotovoltaico es el correspondiente al panel solar, compuesto de la conexión serie-paralelo de celdas fotovoltaicas. Concretamente en lo que respecta a las celdas, una tecnología de película delgada que ha atraído la atención mundial es la Kesterita con composición $Cu_2ZnSn(S-Se)_4$ (CZTSSe), dado principalmente a su eficiencia de conversión y a los elementos que la componen, pues éstos se presentan con mayor abundancia en comparación con los materiales que actualmente se utilizan en otro tipo de celdas que emplean esta misma tecnología.

De acuerdo a lo anterior, en este trabajo de grado se evaluó la eficiencia de una celda fotovoltaica a través de la implementación de un modelo matemático con la

³ COLOMBIA. COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución 030 (2018). Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional. Bogotá, D.C., 2018.

siguiente estructura ZnO/CdS/CZTSSe (TCO/ buffer /absorbente) en la herramienta MATLAB, en la cual se simuló el modelo de la celda en función del espesor de las capas buffer y absorbente, teniendo en cuenta las propiedades ópticas de los materiales empleados. Entre los resultados obtenidos mediante las simulaciones se destaca que el espesor de la capa buffer no influye en la eficiencia de la celda, si éste es igual o menor al ancho de la zona de carga espacial de la capa tipo n, ya que actúa como un acople mecánico para la celda, en este caso específico se utilizó CdS. Por otro lado, también se notó que el espesor de la capa absorbente influye significativamente en la eficiencia de la celda, siendo ésta máxima cuando el espesor es igual al ancho de la zona de carga espacial en la capa p más la longitud de difusión de los huecos, debido a que esta longitud es la distancia promedio en la que un portador puede moverse desde el punto de generación hasta que se recombina.

Un aporte significativo de este trabajo corresponde al análisis de la eficiencia de la celda considerando datos más reales para el espectro de la irradiancia del flujo solar. En este caso, las simulaciones condujeron a mejores resultados al considerar una aproximación más exacta del espectro, ya que la irradiancia del flujo solar proporciona la energía suficiente en consideración con la brecha de energía prohibida o gap del material, para que los electrones sean excitados a la banda de conducción. De esta manera, mediante este trabajo de grado se encuentra que sería muy pertinente que se realizara un estudio para encontrar dicho espectro en América latina, especialmente en Bucaramanga (Colombia), para determinar con mayor exactitud la eficiencia de este tipo de tecnologías y analizar sus ventajas y desventajas para su utilización en dichas zonas geográficas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Simular en la herramienta MATLAB el modelo matemático de la celda fotovoltaica tipo Kesterita $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}-\text{Se})_4$ para evaluar su eficiencia de conversión.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar en la herramienta MATLAB el modelo matemático de celda fotovoltaica $\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{CZTSSe}$ que permita analizar la eficiencia de conversión en función del espesor de las capas buffer y absorbente.
- Simular el modelo implementado en la herramienta MATLAB para diversos espesores de la capa buffer (CdS) y capa absorbente (CZTSSe) para obtener los datos que permiten calcular los parámetros característicos.
- Analizar los datos obtenidos de las simulaciones para determinar el grado de eficiencia de la celda fotovoltaica de acuerdo a los parámetros característicos.

2. CELDAS SOLARES

2.1 FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA SOLAR

Según Hegedus & Luque⁴, los dispositivos fotovoltaicos como las celdas solares, convierten la luz solar directamente en electricidad por medio del fenómeno físico denominado efecto fotovoltaico, en el cual se incluyen los siguientes procesos:

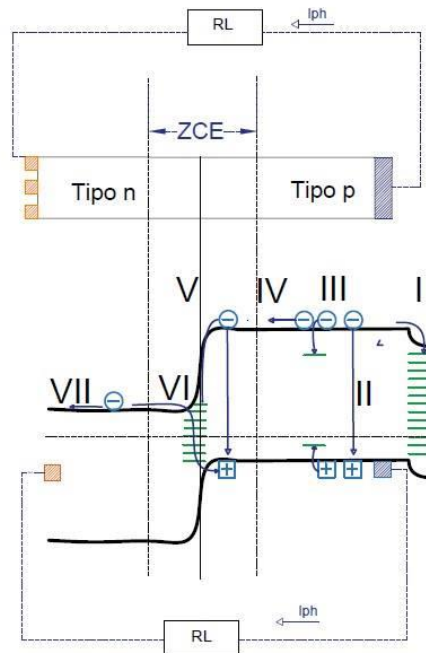
- La absorción de fotones con energías mayores o iguales a la brecha de energía prohibida (E_g) del material absorbente, provoca que la energía del fotón absorbido se use para la excitación de los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción, causando la creación de pares electrón-hueco o portadores.
- A través del campo eléctrico \vec{E} interno que se forma en la ZCE (Zona de Carga Espacial), por la unión de un semiconductor tipo n y uno tipo p, estos portadores generados son transportados por procesos de difusión y de arrastre hasta el exterior, obteniendo de esta manera una fotocorriente.

Además de los procesos de difusión y arrastre existen otros procesos competitivos. En la figura 1 se muestran los principales procesos de transporte eléctrico de los portadores, algunos de los cuales provocan pérdidas en la fotocorriente. Estos procesos son:

⁴ HEGEDUS, S., & LUQUE, A. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (Vol. 1). [En línea] Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley [Consultado 10 dic 2017] Disponible en: <[ftp://nozdr.ru/biblio/kolxo3/E/EE/Luque%20A.,%20Hegedus%20S.%20\(eds.\)%20Handbook%20of%20photovoltaic%20science%20and%20engineering%20\(Wiley,%202003\)\(ISBN%200471491969\)\(O\)\(1179s\)_EE_.pdf](ftp://nozdr.ru/biblio/kolxo3/E/EE/Luque%20A.,%20Hegedus%20S.%20(eds.)%20Handbook%20of%20photovoltaic%20science%20and%20engineering%20(Wiley,%202003)(ISBN%200471491969)(O)(1179s)_EE_.pdf)>

- Proceso I: Recombinación superficial: Atrapamiento de electrones en estados superficiales generados por la presencia de enlaces incompletos en la superficie del material.
- Proceso II: Recombinación en el volumen: Recombinación de electrones con huecos en el volumen del material.
- Proceso III: Recombinación debido a impurezas: Atrapamiento de electrones en estados de impurezas.
- Proceso V: Recombinación en Estados Interfaciales: Atrapamiento de portadores en la interface de los dos materiales.

Figura 1. transporte eléctrico de los portadores



Fuente: Elaboración autores con base en Londoño⁵

⁵ BOTERO LONDOÑO, M. A. Síntesis y Caracterización de nuevos materiales no tóxicos empleados como cappa buffer y capa absorbente en la fabricación de celdas solares. Bogotá: tesis de doctorado. 2008.

2.2 CELDAS SOLARES DE PELÍCULA DELGADA

Las celdas solares que se estudiaron en este trabajo son de tipo heterojunturas puesto que el material tipo n es diferente al material tipo p, generando discontinuidades en las bandas de conducción y de valencia como consecuencia de la diferencia en las brechas de energía prohibida (gap) y en las afinidades electrónicas de los dos (2) materiales, siendo el mecanismo de recombinación en estados interfaciales el transporte eléctrico dominante, dicha recombinación se da como consecuencia de las tensiones mecánicas que se producen entre las constates de red de los materiales, lo que provoca pérdidas de fotocorriente.

Según Brown & Wu⁶, una manera de reducir las pérdidas de fotocorriente en las celdas tipo heterojunturas es que sean fabricadas siguiendo el concepto denominado ventana óptica- capa absorbente.

2.2.1 Ventana óptica. Está constituida por la capa buffer y la capa de Oxido Conductor Transparente (TCO), ver figura 1. Según Morales⁷, su función principal es facilitar que la mayor cantidad de radiación solar llegue hasta la capa absorbente y además formar el campo eléctrico en la ZCE que da lugar a la diferencia de potencial entre los contactos del dispositivo.

A su vez, la capa buffer cumple la función de acople mecánico entre la capa absorbente y la TCO; si la capa buffer tiene un alto coeficiente de absorción, debe

⁶ BROWN, Gregory & WU, Junqiao. Third generation photovoltaics. DOI 10.1002/lpor.200810039. [En línea] [Consultado 10 dic 2017] Disponible en: < <http://www.mse.berkeley.edu/~jwu/publications/Brown-LPR-09.pdf> >

⁷ MORALES, M. F. Síntesis y caracterización de películas delgadas del semiconductor $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ y su uso como capa absorbente en celdas solares. [En línea] 2014 Bogotá [Consultado 10 dic 2017] Disponible en: < <http://bdigital.unal.edu.co/46438/1/01198067.2014.pdf> >

ser ultra delgada para lograr que un alto porcentaje de radiación llegue a la capa absorbente. De otro lado, la capa TCO actúa también como contacto superior transparente.

2.2.2 Capa absorbente. Su función, según Morales⁸, como su nombre lo indica, consiste en absorber la mayor cantidad de radiación solar y contribuir a la generación de la ZCE, con el propósito de generar una alta fotocorriente ya que la presencia del alto campo eléctrico, arrastra los portadores generados dentro de esta zona y adicionalmente contribuye a reducir las pérdidas de fotocorriente asociadas a procesos de recombinación en estados de interfaz.

En el modelo de celda solar que se desarrolló dentro de este proyecto el compuesto $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, se empleó como capa absorbente, el CdS como capa buffer, el ZnO como capa TCO, ver figura 1. Estos materiales están caracterizados por tener diferentes valores de gap de energía y por tener una discontinuidad en la banda de conducción.

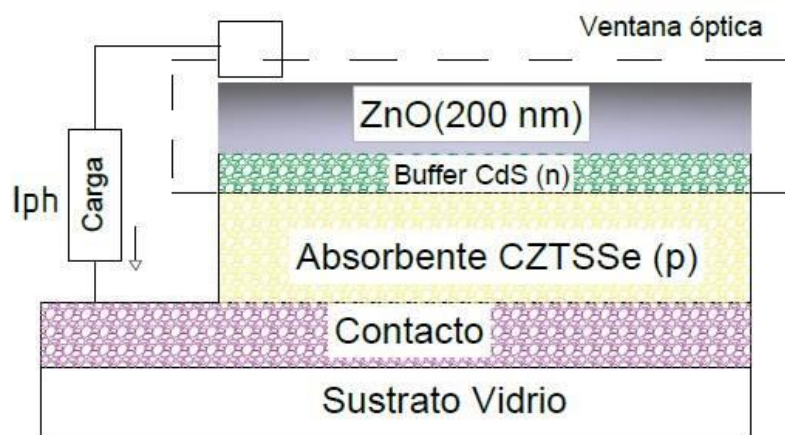
⁸ Ibíd. Pág. 15.

3. SIMULACIÓN DEL MODELO

3.1 ESTRUCTURA DE LA CELDA

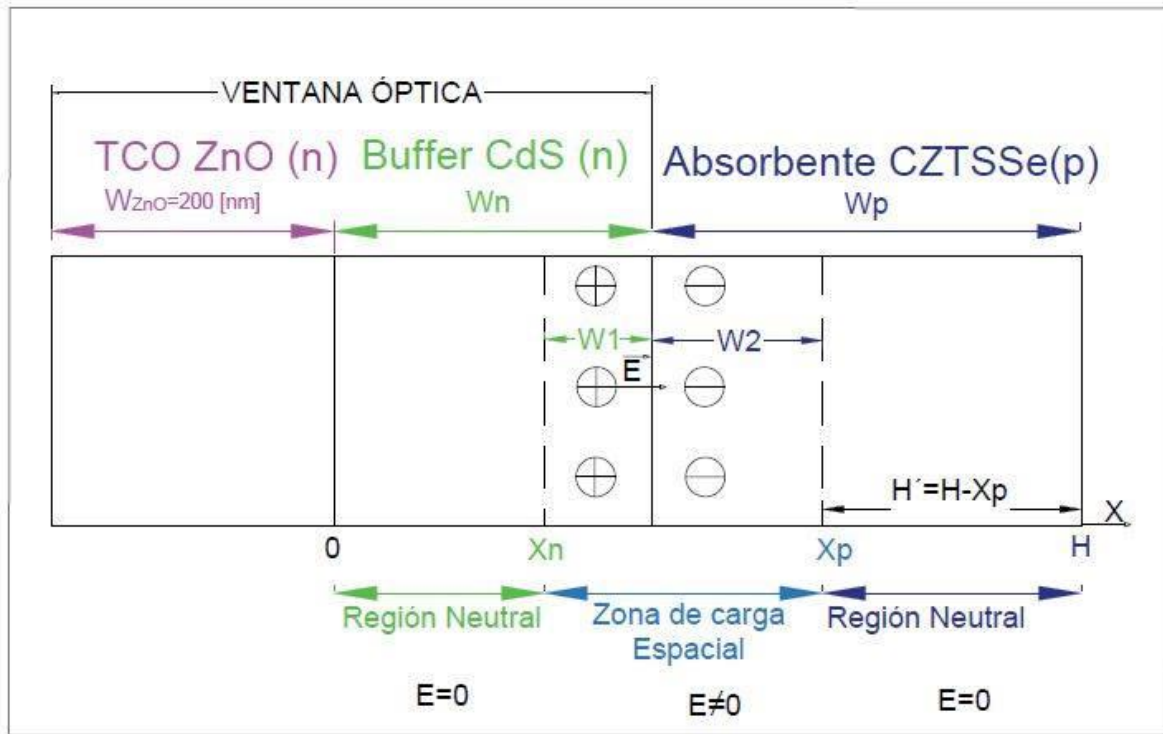
La celda fotovoltaica que se considera para este análisis se basa en un modelo con una estructura de heterojunturas óxido de Zinc (ZnO)/ sulfuro de Cadmio (CdS)/ Kesterita $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S-Se})_4$ (CZTSSe), (Ventana óptica/absorbente), como se presenta en la siguiente figura 2.

Figura 2. Estructura de la celda solar



Fuente: Elaboración autores

Figura 3. Dimensiones en función de los espesores de la capa Buffer y absorbente



Fuente: Elaboración autores con base en Hegedus & Luque.

En la figura 3 se muestran en detalle las dimensiones de la celda en función de los espesores de cada una de las capas, donde W_n y W_p es el espesor de la capa buffer y absorbente, respectivamente, H es el ancho de la celda, w_1 y w_2 son los anchos de la ZCE, X_n y H' son el ancho de la zona de carga neutra para la capa n y p, respectivamente. Según Hegedus & Luque⁹, para obtener las expresiones en función de los espesores de las capas buffer y absorbente, se toma como referencia inicial el punto cero de la celda como se muestra en la figura 3 y para los anchos de la ZCE se determinan por medio de las ecuaciones 1 y 2.

⁹ HEGEDUS, S., & LUQUE, A. Op. cit.,

$$w_1 = \left(\frac{2 \cdot N_a}{q \cdot N_d} \cdot \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{\epsilon_1 \cdot N_d + \epsilon_2 \cdot N_a} \cdot V_d \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$w_2 = \left(\frac{2 \cdot N_d}{q \cdot N_a} \cdot \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{\epsilon_1 \cdot N_d + \epsilon_2 \cdot N_a} \cdot V_d \right)^{1/2} \quad (2)$$

Dónde: V_d Es la tensión incorporada de la celda en voltios, ϵ_1 y ϵ_2 son las permitividades de cada material (CdS, CZTSSe), N_a y N_d es la concentración de aceptores y donores respectivamente y q es la carga de un electrón en columbs.¹⁰

Para la tensión incorporada se encuentra la ecuación 3, que se muestra a continuación.

$$V_d = \frac{(E_{g2} + (x_2 - x_1))}{e} + U_t * \ln \left(\frac{N_a \cdot N_d}{N_{c1} \cdot N_{v2}} \right) \quad (3)$$

Donde esta tensión depende de: U_t que es el potencial termodinámico en milivoltios a una temperatura estándar de 300 Kelvin, la energía del band gap de la kesterita (E_{g2}) en electronvoltios, las afinidades electrónicas de los materiales (x_1, x_2) en electronvoltios, la carga de un electrón en electrones y las densidades de las bandas de valencia y de conducción (N_{v2}, N_{c1}) en cm^{-3} .

Las otras dimensiones que se muestran en la figura 3, están determinadas por las ecuaciones 4, 5,6. La Ecuación 4 determina la zona neutral de la capa n, en función de las dimensiones del espesor de la capa buffer y del ancho de la ZCE de la capa n.

¹⁰ BENMIR, A., & AIDA, M. Simulation of a thin film solar cell based on copper zinc tin sulfo-selenide $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$. Superlattices And Microstructures, 9170-77. 2016. doi:10.1016/j.spmi.2015.12.027.

$$X_n = W_n - w_1 \quad (4)$$

La Ecuación 5 determina el punto donde termina la ZCE en la capa p, en función de la zona neutral de la capa n y los anchos de la ZCE.

$$X_p = X_n + w_1 + w_2 \quad (5)$$

La Ecuación 6 determina la zona neutral de la capa p, en función de la longitud total de la celda y del punto donde termina la ZCE en la capa p.

$$H' = H - X_p \quad (6)$$

3.2 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LA CELDA

Para la irradiancia del espectro solar al nivel de la tierra se emplearon dos modelos. El primero¹¹, es un modelo aproximado por medio de una ecuación no lineal con un *air mass* de 1.5 en función de la longitud de onda y el segundo¹², más exacto, se basa en una tabla de datos con un *air mass* 1.5 y una atmosfera limpia.

¹¹ BENMIR, A., & AIDA, M. Analytical Modeling and Simulation of CIGS Solar Cells. Energy Procedia, In TerraGreen 13 International Conference 2013 - Advancements in Renewable Energy and Clean Environment, Energy Procedia. 2013 36:618-627.

¹² MECHERIKUNNEL, A. T., & RICHMOND, J. Spectral Distribution of Solar Radiation. [En línea] Maryland 20771: Goddard Space Flight Center.1980. [Consultado 10 dic 2017] Disponible en: < <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19810016493.pdf> >

Modelo 1

$$Irs(\lambda) = 0.06977 + 7.0625 \left(1 - e^{\frac{-(\lambda-0.26053)}{0.15994}}\right)^{2.28411} \cdot e^{\frac{-(\lambda-0.26053)}{0.15994}} [w \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}] \quad (7)$$

Modelo 2

Este modelo se presenta en el Anexo. A Irradiancia del espectro solar al nivel de la tierra¹³.

Según Benmir & Aida¹⁴, con los modelos de irradiancia se determina el flujo solar al nivel de la tierra dividiendo por la expresión de la ecuación 9 como se muestra:

$$F(\lambda) = \frac{Irs(\lambda)}{h \cdot v} [s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}] \quad (8)$$

$$hv = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{1.2414}{\lambda} \quad (9)$$

Donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz y λ es la longitud de onda en μm .

Según Benmir & Aida¹⁵, ahora para realizar una simulación adecuada del modelo de la celda solar, se debe tener en cuenta el flujo solar incidente sobre la primera

¹³ Ibíd. p.

¹⁴ BENMIR, A., & AIDA, M. Op. cit.,

¹⁵ Ibíd. p.

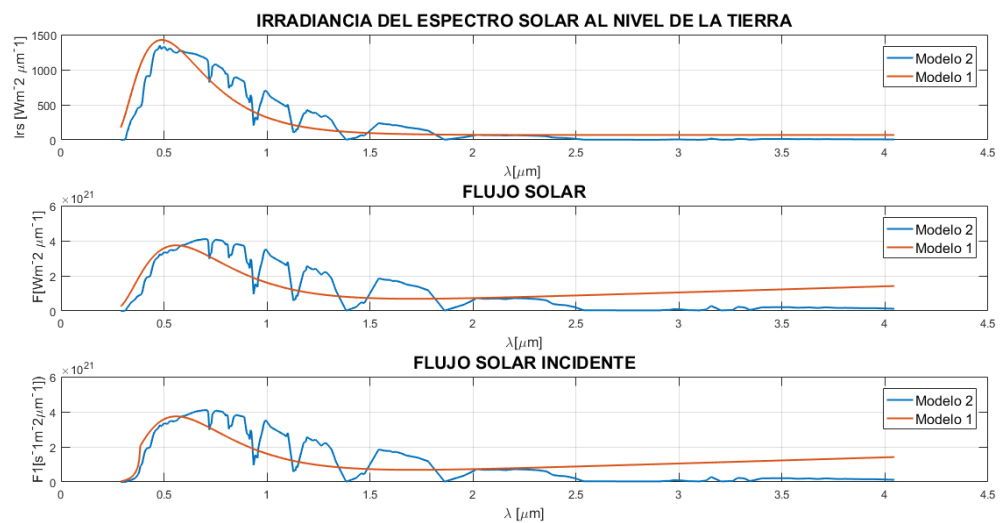
capa expuesta a la radiación, que para este caso es la TCO con un material oxido conductor como es el ZnO mediante la ecuación (10)

$$F_1(\lambda) = F(\lambda)e^{-\alpha_{ZnO}(\lambda)W_{ZnO}} [S^{-1} \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}] \quad (10)$$

Donde $\alpha_{ZnO}(\lambda)$ es el coeficiente de absorción y W_{ZnO} es el espesor de la capa TCO.

Estos tres resultados de irradiancia, flujo solar y el flujo solar incidente se muestran en la figura 4.

Figura 4. Gráficas irradiancia, flujo solar y flujo solar incidente



Fuente: Elaboración autores

Según Adewoyin, Olopade & Chendo¹⁶ y Palik¹⁷, un parámetro importante del material es el coeficiente de absorción de cada una de las capas CdS, ZnO y CZTSSe (Palik, 1984) y está dado por las ecuaciones (11), (12) y (13), respectivamente.

$$\alpha_{\text{CdS}}(\lambda) = \frac{A}{E} (E - E_{g1})^{1/2} [cm^{-1}] = \alpha_1 \quad (11)$$

$$\alpha_{\text{CZTSSe}}(\lambda) = B (E - E_{g2})^{1/2} [cm^{-1}] = \alpha_2 \quad (12)$$

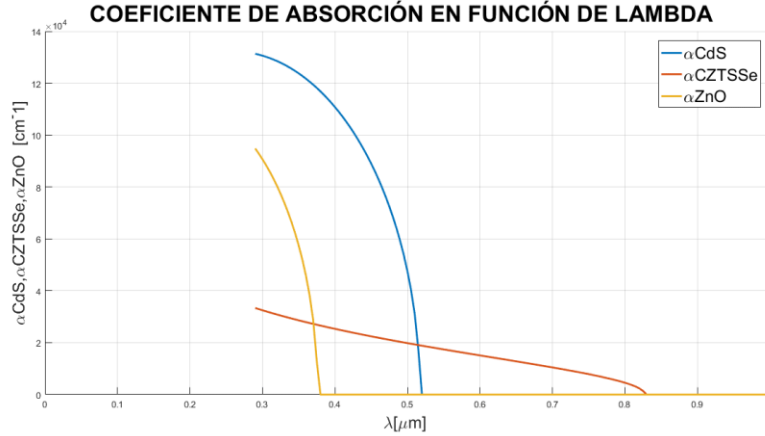
$$\alpha_{\text{ZnO}}(\lambda) = \frac{c}{E} (E - E_{g3})^{1/2} [cm^{-1}] = \alpha_3 \quad (13)$$

Donde E es la energía cinética del fotón $E = h * \nu$, E_{g1} es el gap del material Cds, E_{g2} es el gap del material CZTSSe y E_{g3} es el gap del material ZnO. En la figura 5 se presenta la simulación de los coeficientes de absorción para cada uno de los materiales propuestos en función de la longitud de onda.

¹⁶ ADEWOYIN, A. D., OLOPADE, M. A., & CHENDO, M. Enhancement of the conversion efficiency of Cu₂ZnSnS₄ thin film solar cell through the optimization of some device parameters. *Optik - International Journal For Light And Electron Optics*, 2017. 133122-131. doi:10.1016/j.ijleo.2017.01.008.

¹⁷ PALIK, E. Handbook of optical-constants. *J. Opt. Soc. Am. A* 1. 1984.

Figura 5. Coeficiente de absorción CDS, ZNO y CZTSSEE



Fuente: elaboración autores

3.3 CALCULO DE LA DENSIDAD DE FOTOCORRIENTE

Otro parámetro importante es el cálculo de la densidad de fotocorriente de los portadores minoritarios, que se divide en dos términos: el primero es la corriente de arrastre debido a la presencia de un campo eléctrico, el segundo es la corriente de difusión debido a la diferencia de concentración de los portadores. Según Hegedus & Luque¹⁸, en las regiones neutras solo existen corrientes de difusión, ya que el campo eléctrico es insignificante, por tal motivo se tiene que la corriente debido a los huecos en la región n (J_n) está dada por la expresión (14) y la corriente de los electrones en la región tipo p (J_p) está dada por la expresión (18).

¹⁸ HEGEDUS, S., & LUQUE, A. Op. cit.,

- **Corriente debida a los huecos en la región n**

$$J_p(\lambda) = \left(q \cdot \frac{F_1(\lambda) \cdot (1-R) \cdot \alpha_1 \cdot L_p}{\alpha_1^2 \cdot L_p^2 - 1} \right) \cdot \left(\frac{\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} + e^{-\alpha_1 \cdot x_n} \cdot \left(\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \cdot \cosh\left(\frac{x_n}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{x_n}{L_p}\right) \right)}{\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \cdot \sinh\left(\frac{x_n}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x_n}{L_p}\right)} - \alpha_1 \cdot L_p \cdot e^{-\alpha_1 \cdot x_n} \right) [A \cdot m^{-2}] \quad (14)$$

Donde L_p, D_p, R y S_p son la longitud de difusión de los huecos, el coeficiente de difusión, la reflectividad y la velocidad de recombinación, respectivamente.

$$L_p = (D_p \cdot \tau_p)^{1/2} [\text{cm}] \quad (15)$$

$$D_p = U_t \cdot \mu_p [\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (16)$$

τ_p es el tiempo de vida de los huecos y μ_p es la movilidad de los huecos

$$\tau_p = (\sigma_p * V_{th} * N_{tp})^{-1} [\text{s}] \quad (17)$$

- **Corriente debida a los electrones en la región p**

$$J_n(\lambda) = \left(q \cdot \frac{F_1(\lambda) \cdot (1-R) \cdot \alpha_2 \cdot L_n}{\alpha_2^2 \cdot L_n^2 - 1} \right) \cdot e^{-\alpha_1 \cdot (x_n + w_1) - \alpha_2 \cdot w_2} \cdot \left(\alpha_2 \cdot L_n - \frac{\left(\frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \cdot \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right) - e^{(-\alpha_2 \cdot H')} + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha_2 \cdot L_n \cdot e^{(-\alpha_2 \cdot H')} \right)}{\frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \cdot \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \right) [A \cdot m^{-2}] \quad (18)$$

Donde L_n , D_n , R y S_n son la longitud de difusión de los electrones, el coeficiente de difusión, la reflectividad y la velocidad de recombinación, respectivamente.

$$L_n = (D_n \cdot \tau_n)^{1/2} [\text{cm}] \quad (19)$$

$$D_n = U_t \cdot \mu_n [\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (20)$$

τ_n es el tiempo de vida de los electrones y μ_n es la movilidad de los electrones.

$$\tau_n = (\sigma_n * V_{th} * N_{tn})^{-1} [\text{s}] \quad (21)$$

En la región de carga espacial debido a la presencia del campo eléctrico se genera la densidad de corriente (J_{zce}).

- **Corriente en la zona de carga espacial**

$$J_{zce}(\lambda) = q \cdot F_1(\lambda) \cdot (1 - R) \cdot e^{-\alpha_1 \cdot (x_n)} (1 - e^{-\alpha_1 \cdot (w_1) - \alpha_2 \cdot (w_2)}) [A \cdot m^{-2}] \quad (22)$$

$$J_{ph}(\lambda) = (J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{zce}(\lambda)) [A \cdot m^{-2}] \quad (23)$$

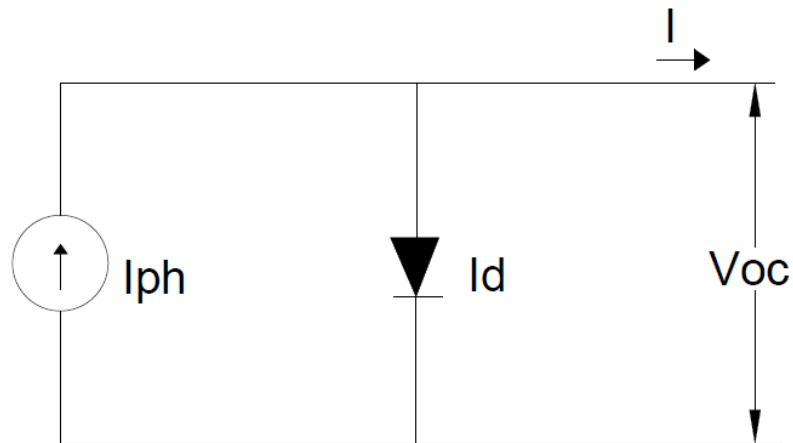
La densidad total de fotocorriente se obtiene al integrar la densidad de corriente $J_{ph}(\lambda)$ en todo el espectro solar. Para este estudio $\lambda_1 = 0.29 [\mu\text{m}]$ y $\lambda_2 = 4.045 [\mu\text{m}]$ según los datos del modelo 2.

$$J_{ph} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_{ph}(\lambda) d\lambda [A \cdot m^{-2}] \quad (24)$$

3.4 CARACTERÍSTICAS DE LA CELDA SOLAR

La capa absorbente (kesterita) tipo p tiene una alta concentración de huecos y baja concentración de electrones, mientras que en la capa tipo n (CdS) ocurre lo contrario, por lo tanto, los electrones fluyen fácilmente a través del material tipo n al material tipo p por procesos de arrastre y difusión, formando pares electrón hueco y dejando huecos en la capa n (CdS), generando de esta manera una fotocorriente.

Figura 6. Modelo del diodo



Fuente: Elaboración autores

Según Sze¹⁹, a partir del modelo y de la ecuación de Shockley presentado en la figura 6, la corriente que se genera en la celda activa se puede representar por medio de la ecuación del diodo en función de la densidad de corriente.

$$J = J_{ph} - J_0 \cdot (e^{V/Q \cdot U_t} - 1) [A \cdot m^{-2}] \quad (25)$$

Donde J_{ph} es la corriente fotogenerada, V es la tensión, Q y U_t son el factor ideal del diodo y el potencial termodinámico, respectivamente, es J_0 la densidad de corriente en lo oscuro y se puede determinar empleando la ecuación (26) (U.Rau & H.W.Schock, 1999).

$$J_0 = q_1 \cdot S_p \cdot N_{v2} \cdot e^{\frac{-E_{g2}}{Q \cdot k \cdot T}} [A \cdot m^{-2}] \quad (26)$$

La densidad de corriente de cortocircuito J_{sc} es el mayor valor de la densidad de corriente que puede obtenerse del dispositivo, y que se produce cuando $V = 0$ en la ecuación (25).

$$J_{sc} = J_{ph} \quad (27)$$

La tensión de circuito abierto (V_{oc}) es la mayor tensión que polariza el dispositivo, dada para $I = 0$ en la ecuación (25).

$$V_{oc} = \frac{Q \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{J_{ph}}{J_0} + 1 \right) [v] \quad (28)$$

¹⁹ S. M. Sze, K. K. Physics of semiconductor devices (Vol. 2). [En línea] 1936. New Jersey: JOHN WILEY & SONS. [Consultado 10 dic 2017] Disponible en: < <https://leseprobe.buch.de/images-adb/11/20/11208a77-2a56-4daf-813a-e071090be049.pdf> >

El punto de máxima potencia (P_m) es un punto de trabajo en el que la potencia entregada por la celda a la carga externa es máxima.

$$P_m = (J \cdot V) [w \cdot m^{-2}] \quad (29)$$

El factor de forma (FF) es la relación entre la potencia máxima y el producto entre J_{sc} y V_{oc} (Hegedus & Luque, 2003) :

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} [\%] \quad (30)$$

La eficiencia de conversión energética (η), expresada como un porcentaje (S. M. Sze, 1936), está dada por:

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} [\%] \quad (31)$$

Donde P_i es la potencia estándar incidente dada por:

$$P_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{rs}(\lambda) d\lambda [w \cdot m^{-2}] \quad (32)$$

3.5 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

En el cuadro 1 se muestran los parámetros que se utilizaron para realizar las simulaciones con sus respectivos valores y referencias.

Cuadro 1. Parámetros usados en la simulación

DATOS USADOS EN LA SIMULACIÓN			
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	VALOR	REFERENCIA
N_a	Concentración de aceptores (huecos)	$1 * 10^{17} [\text{cm}^{-3}]$	(Simya, Mahaboobatcha, & Balachander, 2015)
N_d	Concentración de donores (electrones)	$1 * 10^{15} [\text{cm}^{-3}]$	
ε₁	Permitividad relativa CdS	10	
ε₂	Permitividad relativa CZTSSe	13.6	
ε₀	Permitividad del vacío	$8.8542 * 10^{12} [\text{C}^2/\text{N} * \text{m}^2]$	
q	Carga de un electrón el coulombs	$1.6022 * 10^{-19} [\text{C}]$	
E_{g3}	Energía del Band gap ZnO	3.3[eV]	(Cherouana & Labbani, 2017)
E_{g2}	Energía del Band gap CZTSSe	1.5[eV]	(Benmir & Aida, Simulation of a thin film solar cell based on copper zinc tin sulfo-selenide Cu ₂ ZnSn(S,Se) ₄ , 2016)
E_{g1}	Energía del Band gap CdS	2.4[eV]	(Cherouana & Labbani, 2017)
x₁	Afinidad electrónica CdS	4.2[eV]	(Simya, Mahaboobatcha, & Balachander, 2015)
x₂	Afinidad electrónica CZTSSe	4.1[eV]	
U_t	Potencial termodinámico	25.9[mV]	
N_{c1}	Densidad de la banda de conducción	$2.2 * 10^{18} [\text{cm}^{-3}]$	(Simya, Mahaboobatcha, & Balachander, 2015)
N_{v2}	Densidad de banda de valencia	$1.8 * 10^{19} [\text{cm}^{-3}]$	
e	Carga de un electrón en electrones	1 [e]	
W_{ZnO}	Espesor de la capa ZnO	200 [nm]	(Adewoyin, Olopade, & Chendo, 2017)
R	Reflectividad	0.1	

A	Constante del material CdS	$4.1 * 10^5 [\text{cm}^{-1}\text{eV}^{0.5}]$	
B	Constante del material CZTSSe	$2 * 10^4 [\text{cm}^{-1}\text{eV}^{-0.5}]$	
C	Constante del material ZnO	$4.1 * 10^5 [\text{cm}^{-1}\text{eV}^{0.5}]$	
μ_p	Movilidad de los huecos	$25 [\text{cm}^2 * \text{V}^{-1} * \text{s}^{-1}]$	(Simya, Mahaboobbatcha, & Balachander, 2015)
μ_n	Movilidad de los electrones	$25 [\text{cm}^2 * \text{V}^{-1} * \text{s}^{-1}]$	
σ_p	Sección de captura de los huecos	$10^{-13} [\text{cm}^2]$	(Kanevce, Repins, & Wei, 2015)
σ_n	Sección de captura de los electrones	$10^{-14} [\text{cm}^2]$	
V_{th}	Velocidad térmica	$10^7 [\text{cm} * \text{s}^{-1}]$	
N_{tp}	Densidad de defecto	$10^{17} [\text{cm}^{-3}]$	
N_{tn}	Densidad de defecto	$1.35 * 10^{15} [\text{cm}^{-3}]$	
S_p	Velocidad de recombinación de los huecos en la superficie frontal del CdS	$10^7 [\text{cm}/\text{s}^{-1}]$	
S_n	Velocidad de recombinación de los electrones en la superficie posterior de CZTSSe	$10^7 [\text{cm}/\text{s}^{-1}]$	
Q	Factor ideal del diodo	1.45	
K	Constante de Boltzmann	$8.6173\text{e-}5 [\text{eV} * \text{K}^{-1}]$	

Fuente: Elaboración autores

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para evaluar los resultados de la eficiencia teórica de una celda fotovoltaica tipo kesterita, en primera instancia se implementó el modelo matemático que se mostró en la figura 3. Según Hegedus & Luque²⁰, este modelo presenta sus dimensiones en función de las capas buffer (CdS) y absorbente (CZTSSe) que están descritas como ecuaciones. A partir de esto se realizaron las simulaciones obteniendo los siguientes resultados:

4.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA LA CAPA BUFFER (CdS)

En la figura 9 se muestran los resultados de la simulación variando el espesor de la capa buffer con los siguientes parámetros cuadro 2, el diagrama de bloques correspondiente a la simulación se encuentra en el anexo. B simulación para la capa buffer:

Cuadro 2. Parámetros de simulación para la capa Buffer

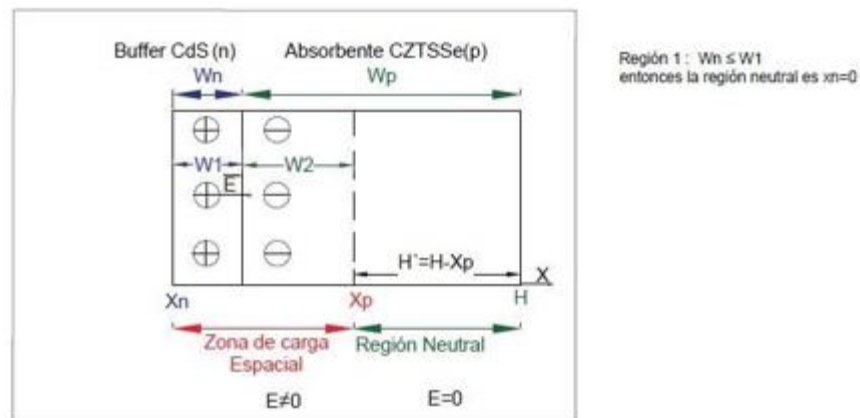
Rango de espesor capa buffer CdS	Mínimo: $10^{-7}[cm]$	Máximo: $100^{-7}[cm]$
E_{g1}	2.4 [eV]	
E_{g2}	1.5 [eV]	
W_{ZnO}	200 [nm]	
$W_p = W_2$	$1.2578 * 10^{-4}[cm]$	
W_1	$1.2578 * 10^{-6}[cm]$	
W_2	$1.2578 * 10^{-4}[cm]$	

Fuente: Autores

²⁰ HEGEDUS, S., & LUQUE, A. Op. cit.,

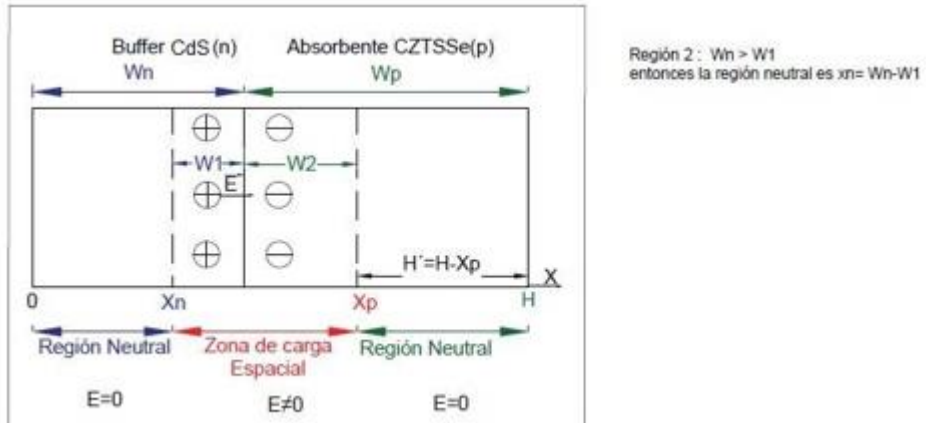
Donde w_1 y w_2 son resultados de las ecuaciones (1) y (2). Como se muestra en la figura 3, esta capa contiene el espesor de la región de carga espacial w_1 , por tal motivo se pueden considerar dos regiones: la primera, si se toma un espesor para la capa buffer $W_n \leq w_1$, donde el ancho de la zona de carga neutral para la capa n (X_n) sería igual a 0, ver figura 7. La segunda si se toma un $W_n > w_1$ donde el ancho de la zona de carga neutral para la capa n, $X_n = W_n - w_1$, ver figura 8. Si se observa en la figura 9, se ve el efecto del espesor de la capa buffer CdS sobre la eficiencia de la celda, en la cual si se toma la primera región donde $W_n \leq w_1$, la eficiencia no se ve afectada. Ahora si se toma la segunda región donde $W_n > w_1$, el ancho de la zona de carga neutral para la capa n tendría un valor que reduce la corriente y por lo tanto la eficiencia, ver figura

Figura 7. Región 1 al variar el espesor de la capa Buffer



Fuente: Elaboracion autores

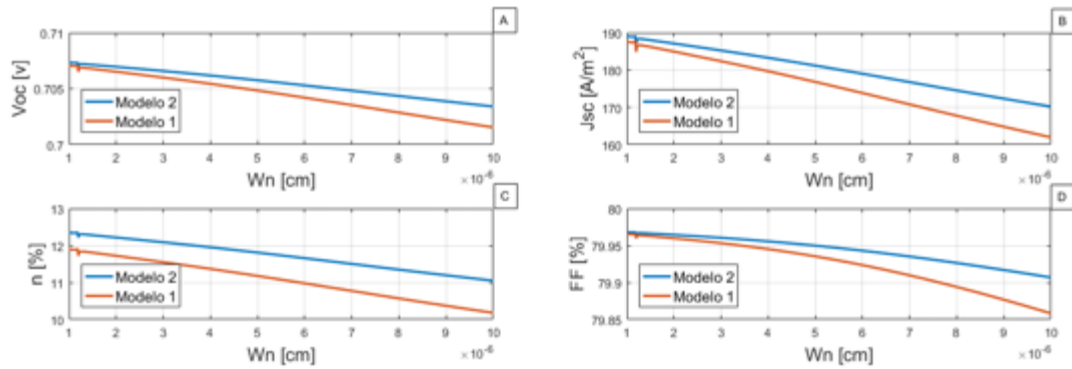
Figura 8. Región 2 al variar el espesor de la capa Buffer



Fuente: Elaboración autores

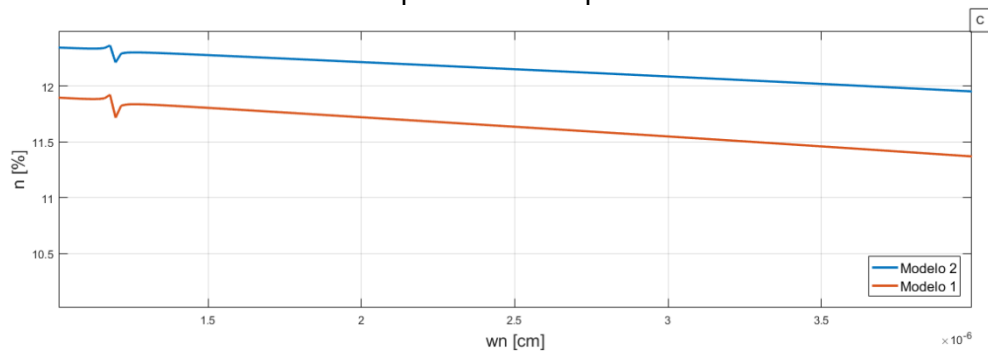
Lo anterior sucede debido a que la longitud de difusión de los portadores minoritarios (huecos), L_p de la capa n (CdS) es pequeña en relación con los portadores minoritarios (electrones) de la capa p (CZTSSe), por lo tanto, si aumentamos el espesor de W_n , una gran cantidad de fotones de longitud de onda pequeña se absorben en esta capa antes de alcanzar la capa absorbente, esto conduce a la disminución de fotones que llegan a la capa absorbente p. Por lo tanto, se deduce que la capa buffer debe tener un espesor menor o igual al espesor de la zona de carga espacial su en la capa n (w_1) para que la eficiencia no disminuya.

Figura 9. Resultados de la simulación: a) voltaje de circuito abierto (VOC), b) corriente de corto circuito (JSC), c) eficiencias (H) y d) factor de forma (FF) en función del espesor de la capa buffer.



Fuente: Elaboración autores

Figura 10. Eficiencia en función del espesor de la capa Buffer



Fuente: Elaboración autores

4.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA LA CAPA ABSORBENTE CZTSSE

En la figura 13 se muestran los resultados de la simulación variando el espesor de la capa buffer con los siguientes parámetros en la cuadro 3, el diagrama de bloques

correspondiente a la simulación se encuentra en el anexo. C simulación para la capa absorbente.

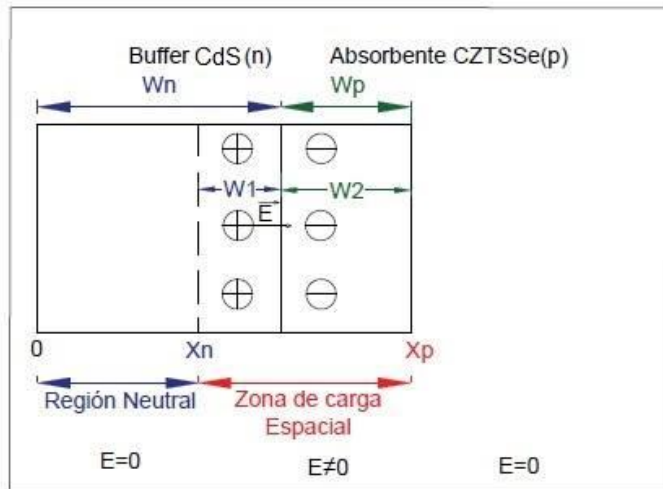
Cuadro 3. Parámetros de simulación de la capa absorbente

Rango de espesor capa absorbente CZTSSe	Mínimo: $1 * 10^{-4}[cm]$	Máximo: $5 * 10^{-4}[cm]$
E_{g1}	2.4 [eV]	
E_{g2}	1.5 [eV]	
W_{ZnO}	200 [nm]	
$W_n=w_1$	$1.2578 * 10^{-6}[cm]$	
$W1$	$1.2578 * 10^{-6}[cm]$	
$W2$	$1.2578 * 10^{-4}[cm]$	

Fuente: Elaboración autores

Si se observa en la figura 13, se ve el efecto del espesor de la capa absorbente CZTSSe sobre la eficiencia de la celda, donde sí se incrementa W_p , la corriente de corto circuito J_{sc} aumenta ya que la absorción de fotones aumentaría pero, el factor de forma FF y la tensión de circuito abierta V_{oc} casi no se ven afectados por este aumento. Por lo tanto se puede decir que si se toma la primera región $W_p \leq w_2$, ver figura 11, la eficiencia aumenta rápidamente, ahora si se toma la segunda región $W_p > w_2$, ver figura 12, en la zona de carga neutral de la capa p se inicia el fenómeno de difusión, lo que provoca que la eficiencia no aumente rápidamente. Además de esto, si se considera la longitud de difusión de los portadores minoritarios (electrones) en la capa p cuando $W_p > w_2 + L_n$, se comienza el fenómeno de recombinación que provoca una reducción en el crecimiento de la eficiencia.

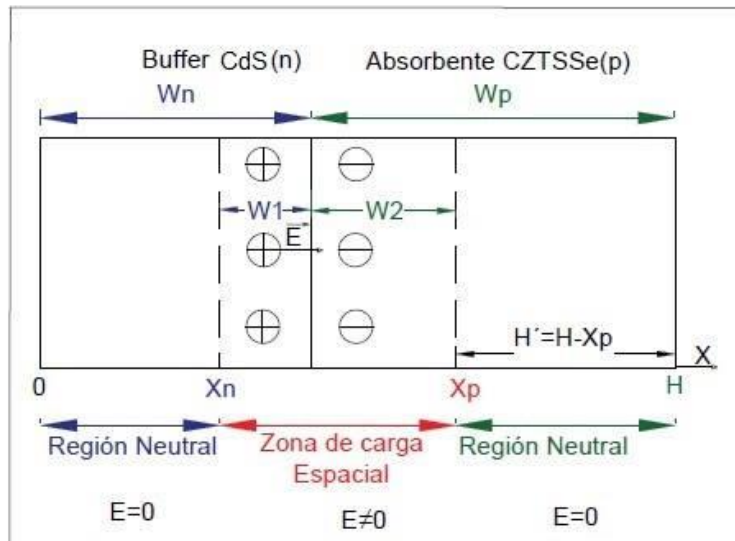
Figura 11. Región 1 al variar el espesor de la capa absorbente



Región 1 : $W_p \leq W_2$
aumenta la eficiencia rapidamente y $x_p = x_n + w_1 + w_2$

Fuente: Elaboración autores

Figura 12. Región 2 al variar el espesor de la capa absorbente

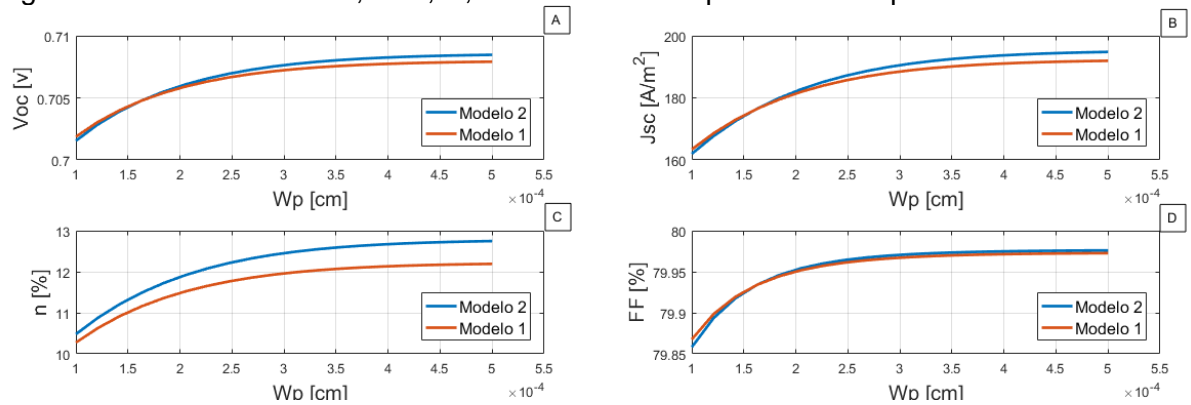


Región 2 : $W_p > W_2$
la eficiencia no aumenta rapidamente.

Fuente: Elaboración autores

Por lo tanto, se deduce que la capa absorbente debe tener un espesor igual al espesor de la zona de carga neutral en la capa p (w_2), más la longitud de difusión de los electrones en la capa p para tener una eficiencia máxima ver cuadro 4. Aunque por cuestiones económicas buscando una reducción de material utilizado, se podría utilizar un espesor igual a w_2 .

Figura 13. Resultados VOC, JSC, H, FF función del espesor de la capa absorbente



Fuente: Elaboración autores

4.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA EFICIENCIA EN FUNCIÓN DE LA CAPA ABSORBENTE CZTSSE Y LA CAPA BUFFER CDS

Para analizar la relación que existe de la eficiencia entre los espesores de las dos capas se hizo una tercera simulación en la cual los dos espesores se variaron, la cual arrojaron como resultado las figuras 14 y 15 para cada uno de los modelos de la irradiancia.

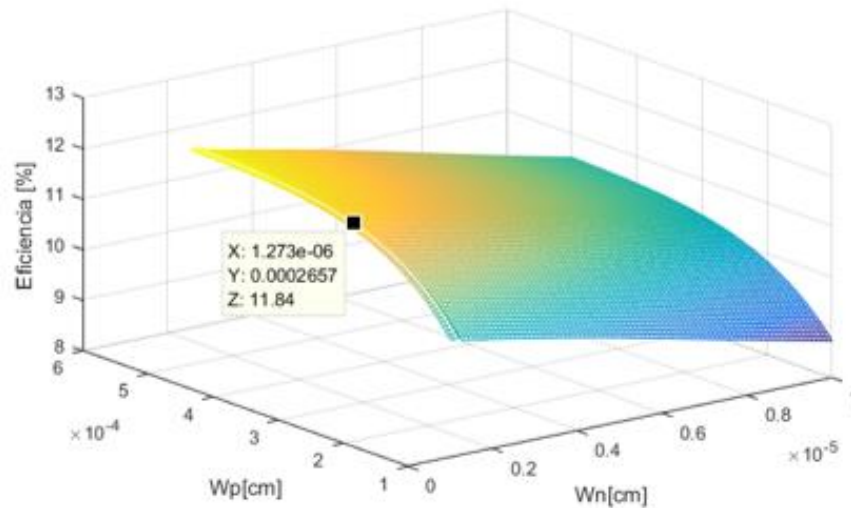
Cuadro 4. Parámetros de simulación de la eficiencia en función de la capa absorbente y la capa Buffer

Rango de espesor capa absorbente CZTSSe	Mínimo: $1 * 10^{-4} [cm]$	Máximo: $5 * 10^{-4} [cm]$
Rango de espesor capa absorbente CDS	Mínimo: $10^{-7} [cm]$	Máximo: $100^{-7} [cm]$
E_{g1}	2.4 [eV]	
E_{g2}	1.5 [eV]	
W_{ZnO}	200 [nm]	
W1	$1.2578 * 10^{-6} [cm]$	
W2	$1.2578 * 10^{-4} [cm]$	

Fuente: Elaboración autores

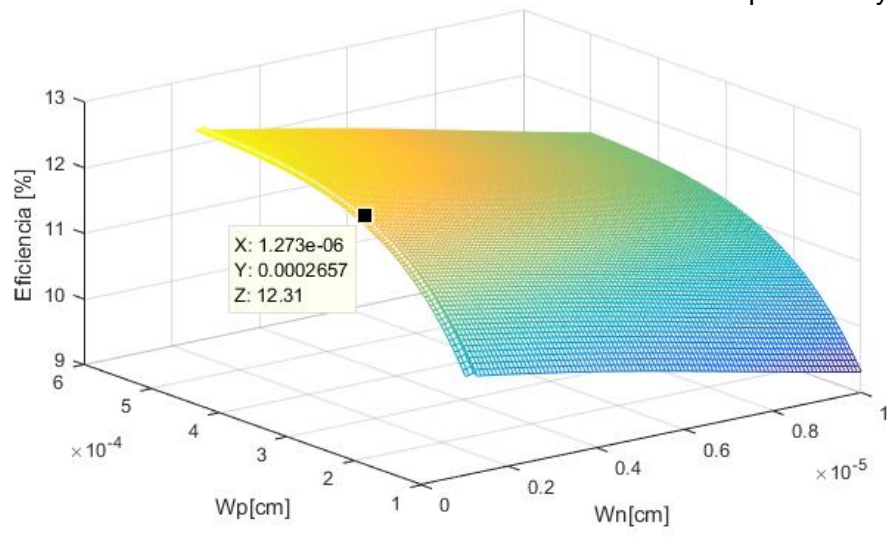
Al analizar las figuras 14 y 15 se pudo constatar que las dos simulaciones que se realizaron por separado al dejar un espesor constante y variar el otro espesor, tienen concordancia con la simulación que se hizo para analizar la eficiencia (η), y variar los dos espesores en la misma simulación, por tanto el mismo análisis es válido solo que aquí se va tener un área donde la eficiencia va ser la más óptima.

Figura 14. Eficiencia del modelo 1 de irradiancia en función de la capa buffer y absorbente



Fuente: Elaboración autores

Figura 15. Eficiencia del modelo 1 de irradiancia en función de la capa Buffer y absorbente



Fuente: Elaboración autores

5. CONCLUSIONES

Se implementó un modelo matemático en la herramienta MATLAB para determinar la eficiencia de conversión en una celda solar de película delgada con estructura ZnO/CdS/CZTSSe; se seleccionó esta estructura debido a que el compuesto que se utiliza para la capa absorbente (CZTSSe) contiene elementos no tóxicos, de bajo costo y abundantes en la naturaleza, por tal motivo es de especial interés en la actualidad para el área de los materiales fotovoltaicos.

El modelo matemático implementado en MATLAB permitió estudiar la influencia de los espesores de las capas buffer y absorbente en la eficiencia de una celda solar seleccionada, ya que se desarrollaron cálculos en función de estos, para encontrar los parámetros característicos de corriente, tensión, potencia y factor de forma que permitieron encontrar el mayor valor de eficiencia.

A partir de la simulación del modelo implementado, los resultados obtenidos mostraron que: La eficiencia de una celda fotovoltaica no varía significativamente siempre y cuando el espesor de la capa buffer sea igual o menor que el ancho de la zona de carga espacial (w_1). Respecto al espesor de la capa absorbente, éste debe tener un valor mínimo igual al de la zona de carga espacial y máximo la suma de la zona de carga espacial (w_2) más la longitud de difusión de los electrones (L_n), ya que, a partir de este valor, la eficiencia no aumenta considerablemente pues presenta una variación muy pequeña.

Se emplearon dos modelos de irradiancia, ver figura 4, en los que se puede notar al hacer una comparación que al tener un modelo más exacto aumenta los valores en

la eficiencia, ya que los cálculos efectuados para encontrar la corriente están en función de la longitud de onda y por tanto influye considerablemente.

Finalmente, los valores que presentan mejores eficiencias y los tiempos de duración de las simulaciones para la configuración estudiada son:

Cuadro 5. Resultados

Material	Espesor optimo		Eficiencia		Duración de simulación
	Mínimo	Máximo	Modelo 1	Modelo 2	
Buffer CdS	$1 \cdot 10^{-7} [cm]$	$1.2578 \cdot 10^{-6} [cm]$	11.89 %	12.34 %	15.191260[s]
Absorbente	$1.2578 \cdot 10^{-7} [cm]$	$2.6473 \cdot 10^{-4} [cm]$	11.86%	12.32%	19.935314[s]

Fuente: Autores

6. RECOMENDACIONES

Un estudio interesante se podría llevar acabo alrededor de la irradiancia en América latina, especialmente en Colombia por su particular clima, ya que factores como la nubosidad y el ángulo con el cual caen los rayos a la superficie terrestre inciden en este valor y así mismo en los resultados de la eficiencia.

BIBLIOGRAFÍA

ADEWOYIN, A. D., OLOPADE, M. A., & CHENDO, M. Enhancement of the conversion efficiency of Cu₂ZnSnS₄ thin film solar cell through the optimization of some device parameters. *Optik - International Journal For Light And Electron Optics*, 2017. 133122-131. doi:10.1016/j.ijleo.2017.01.008.

ALSEMA, E., MCEVOY, A., MARKVART, T., & CASTANER, L. *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications* (Vol. 1). Oxford U.K: Elsevier. 2003.

BENMIR, A., & AIDA, M. Analytical Modeling and Simulation of CIGS Solar Cells. *Energy Procedia*, In TerraGreen 13 International Conference 2013 - Advancements in Renewable Energy and Clean Environment, *Energy Procedia*. 2013 36:618-627.

BENMIR, A., & AIDA, M. Simulation of a thin film solar cell based on copper zinc tin sulfo-selenide Cu₂ZnSn(S,Se)₄. *Superlattices And Microstructures*, 9170-77. 2016. doi:10.1016/j.spmi.2015.12.027.

BOTERO LONDOÑO, M. A. *Síntesis y Caracterización de nuevos materiales no tóxicos empleados como cappa buffer y capa absorbente en la fabricación de celdas solares*. Bogotá: tesis de doctorado. 2008.

BROWN, Gregory & WU, Junqiao. Third generation photovoltaics. DOI 10.1002/lpor.200810039. [En línea] [Consultado 10 dic 2017] Disponible en: <
<http://www.mse.berkeley.edu/~jwu/publications/Brown-LPR-09.pdf>>

CENTURY, T. U. Unece Renewable Energy Status Report. Ren21 Unece Renewable Energy Status Report. [En línea] 2017. [Consultado 10 dic 2017] Disponible en: <
https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/renew/Renewable_energy_report_2017_web.pdf>

CHEROUANA , A., & LABBANI, R. Study of CZTS and CZTSSe solar cells for buffer layers selection. Applied Surface Science, 424251-255. 2017. doi:10.1016/j.apsusc.2017.05.027.

COLOMBIA. COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución 030 (2018). Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional. Bogotá, D.C., 2018.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1715 (13, mayo, 2014). Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2014. no. 49150.

HEGEDUS, S., & LUQUE, A. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (Vol. 1). [En línea] Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley [Consultado 10 dic 2017] Disponible en: <
[ftp://nozdr.ru/biblio/kolxo3/E/EE/Luque%20A.,%20Hegedus%20S.%20\(eds.\)%20Handbook%20of%20photovoltaic%20science%20and%20engineering%20\(Wiley,%202003\)\(ISBN%200471491969\)\(O\)\(1179s\)_EE_.pdf](ftp://nozdr.ru/biblio/kolxo3/E/EE/Luque%20A.,%20Hegedus%20S.%20(eds.)%20Handbook%20of%20photovoltaic%20science%20and%20engineering%20(Wiley,%202003)(ISBN%200471491969)(O)(1179s)_EE_.pdf) >

KANEVCE, A., REPINS, I., & WEI, S.-H. Impact of bulk properties and local secondary phases on the Cu₂(Zn,Sn)Se₄ solar cells open-circuit voltage. Solar Energy Materials And Solar Cells, 133119-125. 2015. doi:10.1016/j.solmat.2014.10.042.

MECHERIKUNNEL, A. T., & RICHMOND, J. Spectral Distribution of Solar Radiation. [En línea] Maryland 20771: Goddard Space Flight Center.1980. [Consultado 10 dic 2017] Disponible en: <
<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19810016493.pdf> >

MORALES, M. F. Síntesis y caracterización de películas delgadas del semiconductor Cu₂ZnSnS₄ y su uso como capa absorbente en celdas solares. [En línea] 2014 Bogotá [Consultado 10 dic 2017] Disponible en: <
<http://bdigital.unal.edu.co/46438/1/01198067.2014.pdf> >

S. M. Sze, K. K. Physics of semiconductor devices (Vol. 2). [En línea] 1936. New Jersey: JOHN WILEY & SONS. [Consultado 10 dic 2017] Disponible en: <
<https://leseprobe.buch.de/images-adb/11/20/11208a77-2a56-4daf-813a-e071090be049.pdf> >

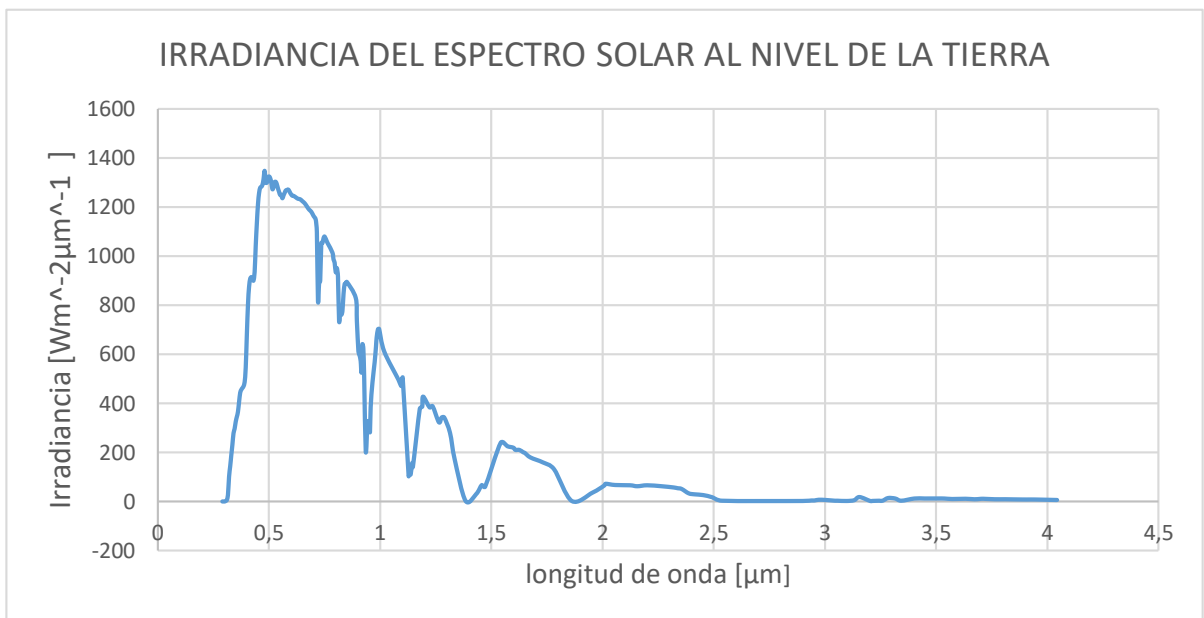
SIMYA, O., MAHABOBBATCHA, A., & BALACHANDER, k. A comparative study on the performance of Kesterite based thin film solar cells using SCAPS simulation program. *Superlattices and Microstructures*, 82248-261. 2015. doi:10.1016/j.spmi.2015.02.020.

U.Rau, & H.W.Schock. Electronic properties of Cu(In,Ga)Se₂ heterojunction solar cells—recent achievements, current understanding, and future challenges. *Applied Physics A (Materials Science Processing)*, 131-147. 1999. doi:10.1007/s003390050984.

ANEXOS

Anexo A. Irradiancia del espectro solar al nivel de la tierra.

Irradiancia del espectro solar al nivel de la tierra para un Air Mass 1.5, asumiendo un estándar atmosférico, precipitación de vapor de agua 3.4 mm, con una atmosfera limpia $\alpha=1.3$, $\beta=0.04$.



longitud de onda [μm]	irradiancia [$\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$]
0,29	0
0,295	0
0,3	0
0,305	2
0,31	6
0,315	26
0,32	101
0,325	143
0,33	188
0,335	231
0,34	278
0,345	296
0,35	325
0,355	345
0,36	365
0,365	405
0,37	443
0,375	455
0,38	462
0,385	469
0,39	486
0,395	546
0,4	679
0,405	801
0,41	874
0,415	907
0,42	914
0,425	908
0,43	900
0,435	935
0,44	1042
0,445	1133
0,45	1210
0,455	1256
0,46	1278
0,465	1282
0,47	1289
0,475	1312

longitud de onda [μm]	irradiancia [$\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$]
0,48	1347
0,485	1299
0,49	1298
0,495	1320
0,5	1324
0,505	1317
0,51	1299
0,515	1272
0,52	1280
0,525	1301
0,53	1302
0,535	1292
0,54	1275
0,545	1261
0,55	1248
0,555	1249
0,56	1235
0,565	1247
0,57	1257
0,575	1267
0,58	1268
0,585	1271
0,59	1266
0,595	1257
0,6	1250
0,605	1245
0,61	1245
0,62	1239
0,63	1233
0,64	1231
0,65	1223
0,66	1215
0,67	1202
0,68	1189
0,69	1180
0,7	1163,2
0,71	1147,6
0,715	1097,1

longitud de onda [μm]	irradiancia [Wm ⁻² μm ⁻¹]
0,72	817,9
0,725	887,3
0,73	899,6
0,735	1053,3
0,74	1052,7
0,745	1072,5
0,75	1079
0,76	1058,9
0,765	1049,7
0,785	1013,8
0,79	985,5
0,795	973
0,8	933,1
0,805	950,6
0,81	915,7
0,815	734,1
0,82	783,5
0,825	760,1
0,83	775,6
0,835	846,2
0,84	885,6
0,845	887,7
0,85	894,1
0,89	829,1
0,895	734,6
0,902	610,8
0,907	595,3
0,912	572,4
0,916	526
0,92	639,8
0,924	623
0,928	501
0,935	203,3
0,943	324,6
0,95	299
0,954	283,4
0,957	384,3
0,965	483,8

longitud de onda [μm]	irradiancia [Wm ⁻² μm ⁻¹]
0,975	567,8
0,981	631,6
0,984	668,2
0,99	701,9
0,995	702,6
1,018	611
1,082	496
1,094	470,3
1,098	492,6
1,101	506
1,128	102,1
1,131	118,3
1,137	110
1,144	157,3
1,147	141
1,178	377,4
1,189	385,8
1,193	427,2
1,222	383,4
1,236	387,7
1,264	322,6
1,276	341,7
1,288	342
1,314	279,4
1,335	171,3
1,384	2,4
1,432	30,4
1,457	67
1,472	60
1,542	239
1,572	225
1,599	219
1,608	210
1,626	210
1,644	200
1,65	198
1,676	179,2
1,732	159

longitud de onda [μm]	irradiancia [$\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$]
1,782	131,3
1,862	2
1,955	36
2,008	65
2,014	72
2,057	67
2,124	66
2,156	62
2,201	66
2,266	62
2,32	57
2,338	54
2,356	51
2,388	33
2,415	29
2,453	26
2,494	17
2,537	3
2,9	2
2,941	4
2,954	4
2,973	7
3,005	6
3,045	3
3,056	3

longitud de onda [μm]	irradiancia [$\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$]
3,097	2
3,132	5
3,156	18
3,204	2
3,214	2,2
3,245	3
3,26	3
3,285	14
3,317	12
3,344	3
3,403	12
3,45	12,1
3,507	12,2
3,538	12
3,573	10
3,633	11
3,673	9
3,696	10,2
3,712	11
3,765	9
3,812	9
3,888	8
3,923	8
3,948	7,9
4,045	6

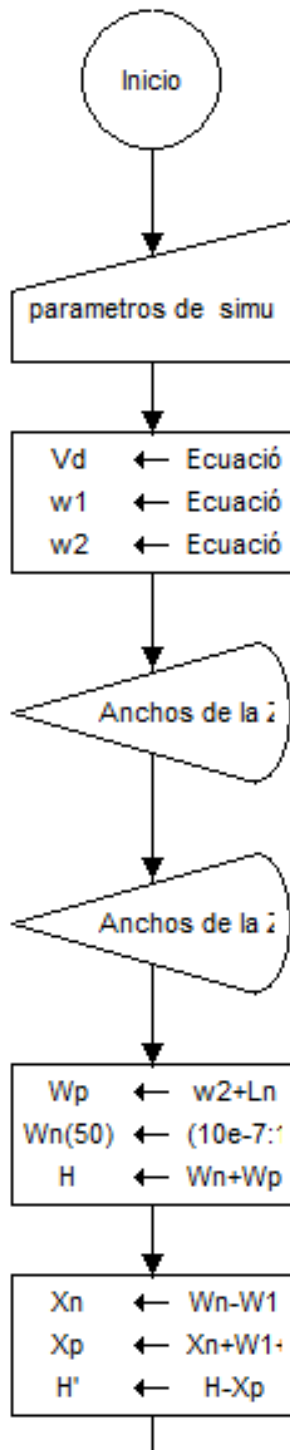
Anexo B. Diagrama de bloques para la simulación para la capa buffer.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
Perfecta Combinación entre Energía e Intelecto



Diagrama de bloques de la simulación en la herramienta MATLAB del modelo matemático de la celda fotovoltaica tipo Kesterita $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}-\text{Se})_4$ para evaluar su eficiencia de conversión variando el espesor de la capa buffer.



Inicio del programa

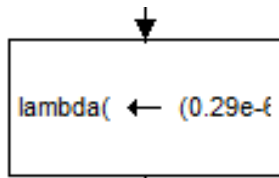
Lectura de los parámetros de simulación de la tabla 1 y los datos de la irradiancia del espectro solar al nivel de la tierra anexo A .

Asignación de las ecuaciones para la tensión incorporada y espesores del ancho de la zona de carga espacial.

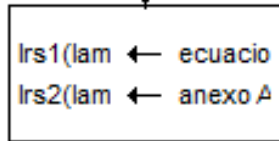
Mostrar el espesor del ancho de la zona de carga espacial w_1 .

Mostrar el espesor del ancho de la zona de carga espacial w_2 .

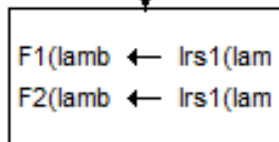
Asignación de las dimensiones de la celda solar, para el espesor de la capa buffer w_n se crea un vector que inicia $10^{-7}[cm]$ y finaliza en $100^{-7}[cm]$ y para el espesor de la capa buffer w_n se deja como una contante de valor .



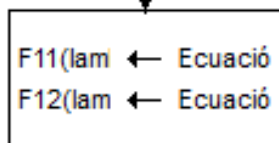
Asignación del vector de las longitudes de onda el cual es el mismo que proporcionan las tablas de datos de la irradiancia del espectro solar al nivel de la tierra anexo A.



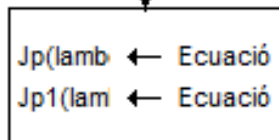
Asignación de los dos modelos de la irradiancia del espectro solar al nivel de la tierra en función de longitud de onda ecuación 7 y anexo A.



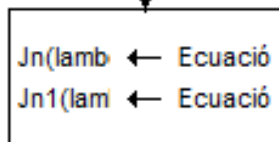
Asignación del flujo solar en función de función de longitud de onda, la cual obtiene de la irradiancia del espectro solar al nivel de la tierra, ecuación 8.



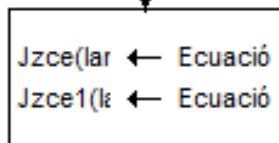
Asignación del flujo solar incidente sobre la primera capa expuesta a la radiación Ecuación 10.



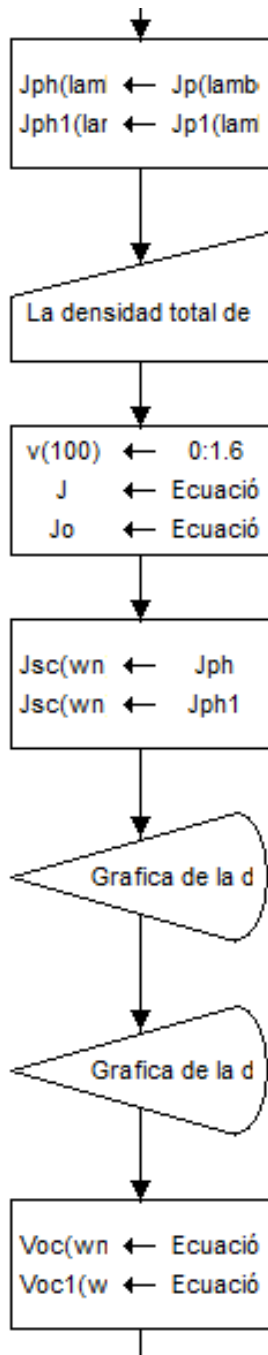
Asignación de la Corriente debida a los huecos en la región n, ecuación 14.



Asignación de la Corriente debida a los electrones en la región p, ecuación 18.



Asignación de la Corriente en la zona de carga espacial, ecuación 22.



Asignación de la corriente total, ecuación 23.

Asignación de la densidad total de fotocorriente al integrar la densidad de corriente $J_{ph}(\lambda)$ en todo el espectro solar. Para este estudio $\lambda_1 = 0.29 [\mu\text{m}]$ y $\lambda_2 = 4.045 [\mu\text{m}]$

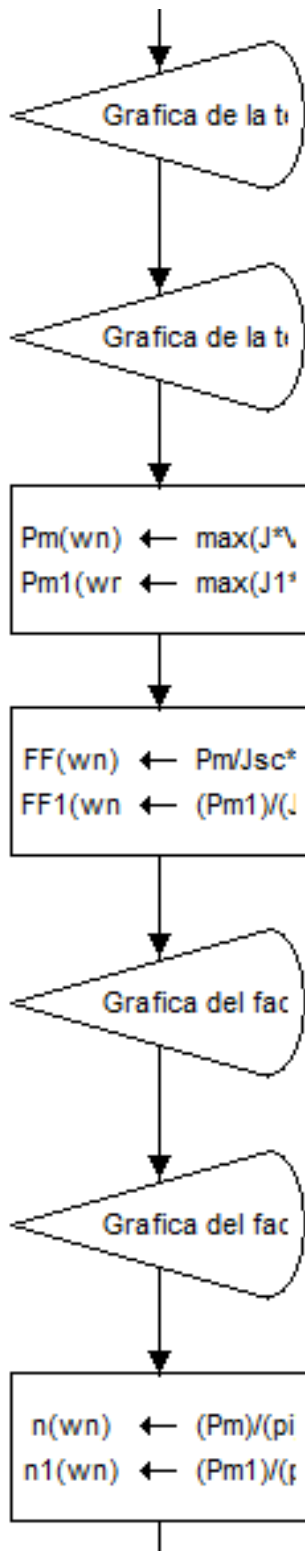
Asignación de un vector de la tensión de la celda solar que inicia en $0 [V]$ y finaliza en $1.6 [V]$ y de la corriente que se genera en la celda activa la cual se representa por medio de la ecuación del diodo en función de la densidad de corriente, ecuación 25 y 26 .

Asignación de la densidad de corriente de cortocircuito $J_{sc}(w_n)$ en función del espesor de la capa buffer para los dos modelos de irradiancia, ecuación 27.

Mostrar Grafica de la densidad de corriente de cortocircuito $J_{sc}(w_n)$ para el modelo 1 de irradiancia del espectro solar.

Mostrar Grafica de la densidad de corriente de cortocircuito $J_{sc}(w_n)$ para el modelo 2 de irradiancia del espectro solar.

Asignación de la tensión de circuito abierto $V_{oc}(w_n)$ en función de la capa buffer, ecuación 28.



Mostrar grafica de la tensión de circuito abierto en función de w_n para el modelo 1 de la irradiancia del espectro solar.

Mostrar grafica de la tensión de circuito abierto en función de w_n para el modelo 2 de la irradiancia del espectro solar.

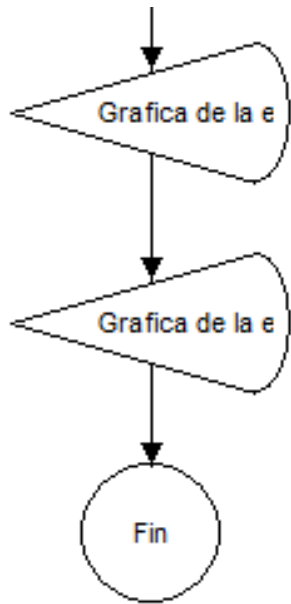
Asignación del punto de máxima potencia (P_m), ecuación 29.

Asignación del factor de forma (FF) , ecuación 30.

Mostrar grafica del factor de forma en función de w_n para el modelo 1 de la irradiancia del espectro solar

Mostrar grafica del factor de forma en función de w_n para el modelo 1 de la irradiancia del espectro solar

Asignación de la eficiencia de conversión energética (η) en función de w_n , ecuación 31.



Mostrar grafica de la eficiencia de conversión energética en función de w_n para el modelo 1 de la irradiancia del espectro solar

Mostrar grafica de la eficiencia de conversión energética en función de w_n para el modelo 2 de la irradiancia del espectro solar

Fin del programa

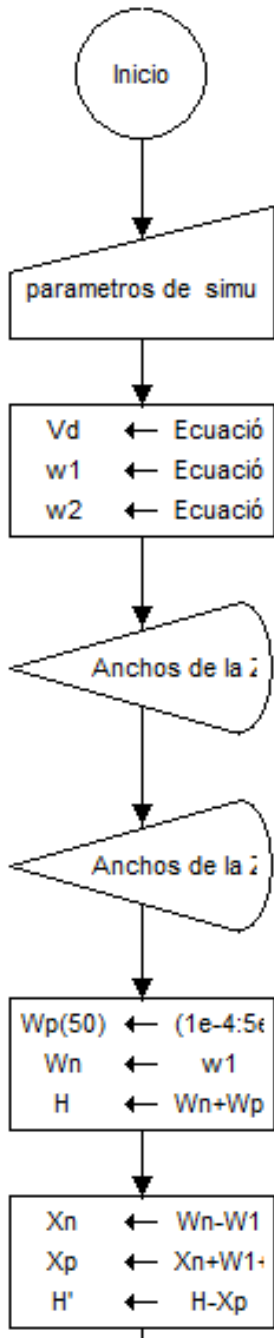
Anexo C. Diagrama de bloques para la simulación para la capa absorbente.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
Perfecta Combinación entre Energía e Intelecto



Diagrama de bloques de la simulación en la herramienta MATLAB del modelo matemático de la celda fotovoltaica tipo Kesterita $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}-\text{Se})_4$ para evaluar su eficiencia de conversión variando el espesor de la capa absorbente.



Inicio del programa

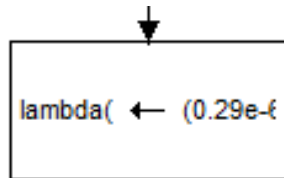
Lectura de los parámetros de simulación de la tabla 1 y los datos de la irradiancia del espectro solar al nivel de la tierra anexo A .

Asignación de las ecuaciones para la tensión incorporada y espesores del ancho de la zona de carga espacial.

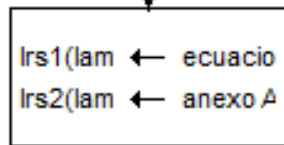
Mostrar el espesor del ancho de la zona de carga espacial w_1 .

Mostrar el espesor del ancho de la zona de carga espacial w_2 .

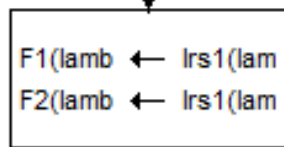
Asignación de las dimensiones de la celda solar, para el espesor de la capa absorbente w_p se crea un vector que inicia $1^{-4}[cm]$ y finaliza en $5^{-4}[cm]$ y para el espesor de la capa buffer w_n se deja como una contante de valor .



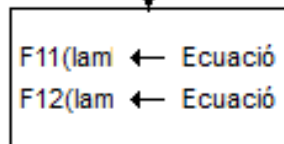
Asignación del vector de las longitudes de onda el cual es el mismo que proporcionan las tablas de datos de la irradiancia del espectro solar al nivel de la tierra anexo A.



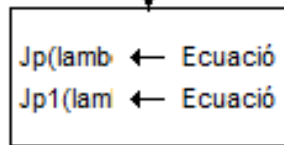
Asignación de los dos modelos de la irradiancia del espectro solar al nivel de la tierra en función de longitud de onda ecuación 7 y anexo A.



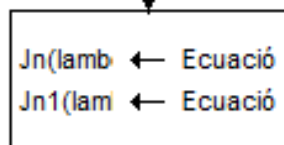
Asignación del flujo solar en función de función de longitud de onda, la cual obtiene de la irradiancia del espectro solar al nivel de la tierra, ecuación 8.



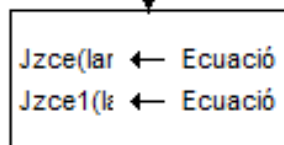
Asignación del flujo solar incidente sobre la primera capa expuesta a la radiación Ecuación 10.



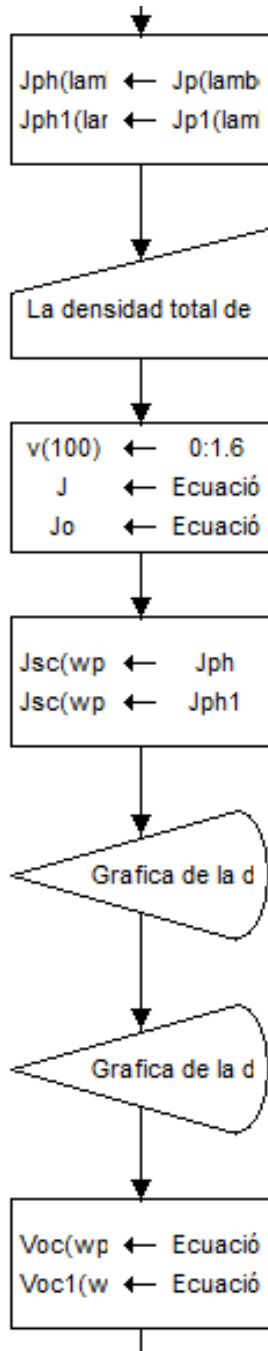
Asignación de la Corriente debida a los huecos en la región n, ecuación 14.



Asignación de la Corriente debida a los electrones en la región p, ecuación 18.



Asignación de la Corriente en la zona de carga espacial, ecuación 22.



Asignación de la corriente total, ecuación 23.

Asignación de la densidad total de fotocorriente al integrar la densidad de corriente $Jph(\lambda)$ en todo el espectro solar. Para este estudio $\lambda_1 = 0.29 [\mu\text{m}]$ y $\lambda_2 = 4.045 [\mu\text{m}]$

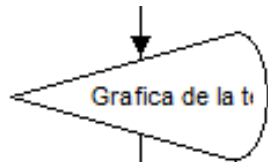
Asignación de un vector de la tensión de la celda solar que inicia en 0 [V] y finaliza en 1.6 [V] y de la corriente que se genera en la celda activa la cual se representa por medio de la ecuación del diodo en función de la densidad de corriente, ecuación 25 y 26 .

Asignación de la densidad de corriente de cortocircuito $Jsc(w_p)$ en función del espesor de la capa buffer para los dos modelos de irradiancia, ecuación 27.

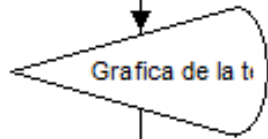
Mostrar Grafica de la densidad de corriente de cortocircuito $Jsc(w_p)$ para el modelo 1 de irradiancia del espectro solar.

Mostrar Grafica de la densidad de corriente de cortocircuito $Jsc(w_p)$ para el modelo 2 de irradiancia del espectro solar.

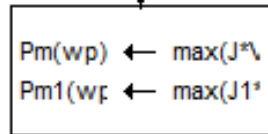
Asignación de la tensión de circuito abierto $Voc(w_p)$ en función de la capa buffer, ecuación 28.



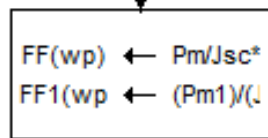
Mostrar grafica de la tensión de circuito abierto en función de w_p para el modelo 1 de la irradiancia del espectro solar.



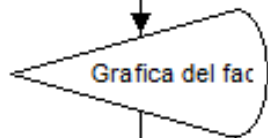
Mostrar grafica de la tensión de circuito abierto en función de w_p para el modelo 2 de la irradiancia del espectro solar.



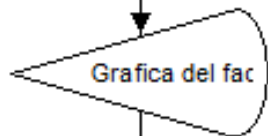
Asignación del punto de máxima potencia (P_m), ecuación 29.



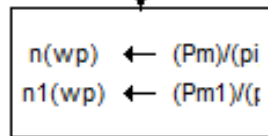
Asignación del factor de forma (FF), ecuación 30.



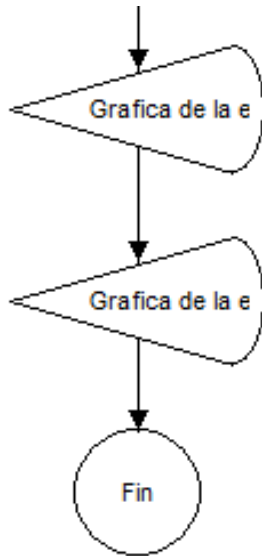
Mostrar grafica del factor de forma en función de w_p para el modelo 1 de la irradiancia del espectro solar



Mostrar grafica del factor de forma en función de w_n para el modelo 1 de la irradiancia del espectro solar



Asignación de la eficiencia de conversión energética (η) en función de w_p , ecuación 31.



Mostrar grafica de la eficiencia de conversión energética en función de w_p para el modelo 1 de la irradiancia del espectro solar

Mostrar grafica de la eficiencia de conversión energética en función de w_p para el modelo 2 de la irradiancia del espectro solar

Fin del programa