

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN CELDAS SOLARES  
DE PELÍCULA DELGADA EMPLEANDO MATLAB**

**LUIS ALFONSO RADA ALEÁN**

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

**2019**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN CELDAS SOLARES  
DE PELÍCULA DELGADA EMPLEANDO MATLAB**

**LUIS ALFONSO RADA ALEÁN**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electricista**

**Directora**

**MÓNICA ANDREA BOTERO LONDOÑO**

**Doctora en Ciencias – Física**

**Codirectora**

**MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS**

**Doctora en Ingeniería Electrónica**

**Codirector**

**JULIÁN GUSTAVO RODRÍGUEZ FERREIRA**

**Doctor en Astrofísica**

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

**2019**

## **DEDICATORIA**

A la familia que Dios eligió para mí; Juan de Dios y Nancy. A sus hijos; mis hermanos, que llevamos la misma sangre. A mi nueva familia; Rose, que compartimos los mismos sueños, anhelos y esperanzas. A la familia con la que llevé a cabo este proceso y que me alentó a seguir y no renunciar. A todos, Gracias.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a cada uno de los que compartió su sabiduría y experiencia para hacer realidad este proyecto, en especial, a la profesora Mónica Botero por enseñarme que, antes de ser profesional, primero se es persona. Adicionalmente, agradezco a mis codirectores María Alejandra Mantilla y Julián Rodríguez, y al profesor David Forero por ser un gran apoyo durante la realización del trabajo.

## CONTENIDO

Pág.

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCCIÓN .....                                       | 13 |
| 1. EFECTO FOTOVOLTAICO .....                             | 16 |
| 2. CELDAS SOLARES DE SEGUNDA Y TERCERA GENERACIÓN.....   | 17 |
| 2.1. CAPAS DE UNA CELDA DE PELÍCULA DELGADA DE CZTS..... | 19 |
| 3. AMBIENTE EN EL ESPACIO .....                          | 22 |
| 4. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN .....                       | 25 |
| 4.1. ESTRUCTURA DE LA CELDA .....                        | 25 |
| 4.2. PROPIEDADES ÓPTICAS DE LA CELDA .....               | 28 |
| 4.3 CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE FOTOCORRIENTE .....        | 29 |
| 4.4. CARACTERÍSTICAS DE LA CELDA SOLAR .....             | 31 |
| 5. RESULTADOS.....                                       | 33 |
| 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....                           | 36 |
| 7. CONCLUSIONES .....                                    | 38 |
| 8. PRODUCTOS .....                                       | 39 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                                        | 40 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                     | Pág. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Capas de una celda de película delgada .....                                                                                                                                                              | 20   |
| Figura 2. Distribución espectral AM0 .....                                                                                                                                                                          | 23   |
| Figura 3. Estructura de la celda .....                                                                                                                                                                              | 25   |
| Figura 4. Variación de los parámetros de desempeño con respecto a la<br>temperatura para (a) tensión de circuito abierto, (b) densidad de corriente de<br>cortocircuito, (c) eficiencia y (d) factor de forma. .... | 34   |

## LISTA DE TABLAS

**Pág.**

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Parámetros de la simulación ..... | 26 |
|--------------------------------------------|----|

## **LISTA DE ANEXOS**

“Los anexos están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS”

ANEXO A. Diagrama de flujo.

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN CELDAS SOLARES DE PELÍCULA DELGADA EMPLEANDO MATLAB\*

**AUTOR:** Luis Alfonso Rada Aleán\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Temperatura, AM0, eficiencia, CZTS, GaAs

### DESCRIPCIÓN:

Dadas las condiciones a las que son expuestas las celdas solares instaladas en satélites artificiales en el espacio, se requiere que éstas sean fabricadas a partir de materiales que alcancen la mayor eficiencia posible, teniendo en cuenta el estrés térmico generado por los amplios cambios de temperatura y la degradación en sus componentes producida por la radiación y las partículas cargadas<sup>1,2,3,4</sup>. En este trabajo se evaluó el desempeño de dos celdas solares de película delgada con estructura ZnO/ZnS/Absorbente bajo condiciones de irradiancia de AM0 (Air Mass Zero) y un rango de temperatura entre 250 y 525K, por medio de simulaciones numéricas en Matlab. La kesterita (CZTS) se simuló en la primera parte del trabajo y posteriormente el arseniuro de galio (GaAs) como capa absorbente. Los parámetros de desempeño que se evaluaron mediante los modelos físicos corresponden a la eficiencia, factor de forma, corriente de cortocircuito y tensión de circuito abierto. Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de los dos materiales estudiados, los resultados de los parámetros de desempeño obtenidos a partir de ambas simulaciones se compararon numéricamente y gráficamente, evidenciándose una mejor respuesta para la tensión de circuito abierto y el factor de forma ante el aumento de la temperatura para el caso de la kesterita, con respecto a la de GaAs.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Directora: Dra. Mónica Andrea Botero Londoño

<sup>1</sup> REINDERS, Angèle, et al. Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications. John Wiley & Sons, 2017

<sup>2</sup> PATEL, Mukund R. Spacecraft power systems. CRC press, 2004

<sup>3</sup> LYNN, P. A. Electricity from sunlight: an introduction to photovoltaics. John Wiley & Sons. 2011

<sup>4</sup> LUQUE, Antonio, and STEVEN Hegedus, eds. Handbook of photovoltaic science and engineering. John Wiley & Sons, 2011

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THIN-FILM SOLAR CELLS USING MATLAB\*

**AUTHOR:** Luis Alfonso Rada Aleán\*\*

**KEYWORDS:** Temperature, AM0, efficiency, CZTS, GaAs

### DESCRIPTION:

Solar cells installed in artificial satellites are exposed to harsh conditions in space, therefore, they require materials that reach the highest efficiency despite the thermal stress and the degradation of their components produced by wide temperature changes, radiation and charged particles<sup>5,6,7,8</sup>. In this work, the performance of two thin-film solar cells was evaluated by using Matlab. Simulations of ZnO/ZnS/Absorber structures were carried out under AM0 (Air Mass Zero) conditions and considering a temperature range of 250 to 525K. The kesterite (CZTS) absorber layer was simulated in the first part of this work, then the Gallium Arsenide (GaAs) absorber layer was evaluated in a following simulation. The performance parameters of the cell were evaluated by using the physical models. These parameters were: the efficiency, fill factor, short circuit current density and open circuit voltage. The results obtained from both simulations were compared numerically and graphically where kesterite had a better response regarding to the open circuit voltage and the fill factor as temperature rises.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Directora: Dra. Mónica Andrea Botero Londoño

<sup>5</sup> REINDERS, et al. Op. Cit.

<sup>6</sup> PATEL, MUKUND. Op. Cit.

<sup>7</sup> LYNN, Op. Cit.

<sup>8</sup> LUQUE, and STEVEN HEGEDUS, Op. Cit.

## INTRODUCCIÓN

El reciente lanzamiento del nanosatélite de observación FACSat marcó el inicio del proyecto de conformar una constelación de satélites de fabricación colombiana que estaría a disposición del país para atender las necesidades de varios sectores socioeconómicos, asegurando independencia operacional y seguridad durante cualquier eventualidad o crisis<sup>9</sup>. Este primer satélite, desarrollado por la empresa GOMspace en 2014 y puesto en órbita el 29 de noviembre de 2018, cuenta con celdas triplejuntura de GaAs (arseniuro de galio), material semiconductor ampliamente utilizado en aplicaciones espaciales en la actualidad.

A pesar del largo desarrollo e implementación de celdas de Si (silicio) durante buena parte de la exploración espacial, las celdas multijuntura basadas en GaAs demostraron tener un mejor desempeño a altas temperaturas gracias a su bandgap directo<sup>10</sup>, adicionalmente, presentan mayor resistencia a las duras condiciones del espacio, convirtiéndose en el estándar para las celdas solares que alimentan los satélites desde entonces. Una de las celdas multijuntura más empleadas se basa en la unión InGaP/GaAs/Ge, sin embargo, los procesos de preparación de estos materiales son complejos<sup>11</sup>; el In (indio), por ejemplo, es escaso en la corteza terrestre, el As (arsénico) es tóxico y el Ga (galio), además de considerarse tóxico, es más escaso que el oro, por tal razón, las celdas solares de triplejuntura de GaAs presentan un costo de fabricación muy elevado.<sup>12</sup>

---

<sup>9</sup> CARRERO URBINA, Jonathan. "El Espacio, Futuro de la Fuerza Aérea Colombiana." Ciencia y poder aéreo 12.1. 2017. 202-208

<sup>10</sup> REINDERS, et al. Op. Cit.

<sup>11</sup> ILES, Peter A. Photovoltaic Conversion: Space Applications. 2004. 25-33

<sup>12</sup> PATEL, MUKUND. Op. Cit.

Otras alternativas como las celdas de película delgada basadas en CIGS y CdTe alcanzan eficiencias comparables a un menor costo de producción, sin embargo, mantienen el inconveniente de estar compuestas de elementos tóxicos y escasos como In y Ga.<sup>13</sup>

Por otro lado, las celdas de película delgada basadas en CZTS (kesterita) se sintetizan a partir de elementos abundantes en la naturaleza y que no representan un peligro al medio ambiente, ya que no son tóxicos, permitiendo que los procesos de fabricación sean de menor costo. Además, esta celda presenta la ventaja de poseer un alto coeficiente de absorción, bandgap directo y un límite de Shockley-Queisser de 32%<sup>14</sup>, lo cual la posiciona como potencial candidata para aplicaciones espaciales.

Cabe resaltar que en la Universidad Industrial de Santander se está llevando a cabo un proyecto relacionado con la fabricación de celdas solares basadas en CZTS mediante evaporación multietapa, el cual busca la síntesis de celdas basada en materiales amigables con el ambiente.

Debido a lo antes mencionado, en el presente trabajo se simuló la eficiencia de una celda solar basada en kesterita empleando el software de programación Matlab, bajo condiciones de irradiancia de AM0, variando la temperatura entre 250 y 525K y comparando estos resultados con la simulación de una celda de GaAs para determinar si el desempeño de la CZTS es apto para aplicaciones espaciales. Cabe mencionar que a la fecha de realización de esta investigación no se encontró en la literatura una propuesta para la evaluación del efecto que tienen las condiciones que se presentan en el espacio sobre el desempeño de celdas solares de CZTS. Para llevar a cabo esto, el trabajo realizado partió del estudio del principio básico de

---

<sup>13</sup> WANG, DONGXIAO, et al. Path towards high-efficient kesterite solar cells. Journal of energy chemistry 27.4. 2018. 1040-1053

<sup>14</sup> Ibid.

funcionamiento de una celda solar, los parámetros característicos de los materiales que constituyen sus capas y las propiedades físicas que influyen en su eficiencia. Teniendo en cuenta que las celdas a evaluar son de película delgada, de la revisión bibliográfica se identificaron las ecuaciones que modelan la generación de fotocorriente y los parámetros de desempeño, las cuales están en función de la temperatura, constantes físicas de los materiales y de la distribución espectral de la radiación incidente. Adicionalmente, se determinaron las condiciones ambientales en el espacio revisando los requerimientos y las tecnologías de las celdas solares implementadas en satélites que siguen el estándar CubeSat y analizando las características de las órbitas más comunes alrededor de la tierra para así establecer un rango de temperaturas y un espectro de irradiancia que se asemejen a lo percibido en el exterior de la atmósfera terrestre.

Los modelos y constantes físicas de las celdas de película delgada y las características referentes a las condiciones espaciales fueron implementadas en un algoritmo empleando Matlab, software de simulación con licencia disponible en la universidad. Se estableció un rango de temperaturas aproximado al que se presenta en una órbita LEO (Low Earth Orbit). Se eligió y estableció el espectro de irradiancia AM0 E-490-00, desarrollado por la ASTM (American Society for Testing and Materials) y proporcionado por el NREL (National Renewable Energy Laboratory) en su base de datos, para representar la energía de la radiación incidente. A partir de los resultados obtenidos de la evaluación de los modelos, se llevó a cabo la comparación del desempeño de las celdas de CZTS y GaAs analizando las curvas de  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$ ,  $FF$  y  $\eta$ .

## 1. EFECTO FOTOVOLTAICO

El estudio de este trabajo de simulación parte del funcionamiento de una celda solar de película delgada, por tanto, los procesos que tienen lugar dentro de ésta durante la operación están reflejados en las ecuaciones presentadas en la literatura y serán implementadas en un algoritmo.

Una celda solar es un dispositivo capaz de absorber y convertir la energía proveniente de la luz solar a energía eléctrica. Su funcionamiento se basa en la unión de dos materiales semiconductores; uno tipo-p y otro tipo-n. Por su naturaleza, el material tipo-n tiene una mayor cantidad de electrones libres (portadores de carga mayoritarios) que de huecos (portadores de carga minoritarios), mientras que en el tipo-p se da el caso contrario, los portadores mayoritarios son los huecos y los minoritarios son los electrones. Al unir los dos materiales, los portadores de carga mayoritarios de un lado transitan al otro mediante procesos de difusión, generándose la zona de carga espacial (ZCE) que es un campo eléctrico fuerte. Cuando la luz solar, la cual está compuesta por fotones con una cierta cantidad de energía, incide sobre la unión p-n y dicha energía es mayor a la del band gap del material, los electrones de la banda de valencia son excitados a la banda de conducción, creándose pares electrón-hueco. Mientras los portadores mayoritarios ven el campo eléctrico de la ZCE como una barrera, los nuevos portadores fotogenerados cruzan la ZCE para ser recolectados en los terminales de la celda produciendo la corriente que alimenta a una carga conectada. A este proceso se le llama efecto fotovoltaico y es el principio básico del funcionamiento de la celda solar<sup>15, 16</sup>.

---

<sup>15</sup> LYNN, Op. Cit.

<sup>16</sup> LUQUE, and STEVEN HEGEDUS, Op. Cit.

## 2. CELDAS SOLARES DE SEGUNDA Y TERCERA GENERACIÓN

En el marco del continuo crecimiento de la energía solar fotovoltaica, los esfuerzos que se realizan en investigación y desarrollo buscan seguir expandiendo la implementación de celdas solares en aplicaciones espaciales, con miras a obtener siempre la mejor relación eficiencia-costos. En primer lugar, este fue el objetivo que dio origen a tecnologías de menor costo como las de película delgada, que hacen parte de la segunda generación de celdas solares propuesta por Green.<sup>17</sup>

La principal ventaja de las celdas de película delgada frente a las de primera generación (silicio cristalino) es el band gap directo que poseen los materiales semiconductores de los que están compuestas. Esta característica les permite tener coeficientes de absorción muy altos, lo que implica que, para recolectar la misma cantidad de luz que sus competidores comerciales, se puede usar una cantidad menor de material<sup>18</sup>. A esta tecnología se le atribuye la ventaja de contar con procesos de manufactura menos complejos y costosos debido al uso reducido de material, permitiendo que su manipulación sea flexible y menos propensas a daños mecánicos a expensas de una reducción en su eficiencia.<sup>19</sup>

Existen diversos tipos de celdas de película delgada. Entre las que tienen mayor desarrollo e impacto comercial se encuentran las de CdTe y CIGS, las cuales están fabricadas a partir de elementos escasos como el telurio (Te), galio (Ga) e indio (In), y tóxicos como el cadmio (Cd)<sup>20</sup>. Otros materiales como el arseniuro de galio (GaAs)

---

<sup>17</sup> EL CHAAR, L., and N. EL ZEIN. "Review of photovoltaic technologies." *Renewable and sustainable energy reviews* 15.5. 2011. 2165-2175

<sup>18</sup> SCRAGG, Jonathan J. *Opto-Electronic Properties of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> Films: Influences of Growth Conditions and PRECURSOR Composition. Copper Zinc Tin Sulfide Thin Films for Photovoltaics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. 155-195

<sup>19</sup> IBN-MOHAMMED, TAOFEEQ, et al. "Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80. 2017. 1321-1344

<sup>20</sup> Ibid.

demonstraron tener un mejor desempeño gracias a la calidad de su estructura, resistencia a la degradación y a las ventajas de poseer band gap directo, sin embargo, son sintetizadas a partir galio y arsénico (tóxico) y los procesos para la producción de una película de alta calidad son complejos, razón por la cual son mucho más costosas de fabricar.<sup>21,22</sup>.

La tercera generación de celdas solares trajo consigo nuevos conceptos para mejorar la eficiencia, uno de los cuales consiste en sintetizar varias uniones p-n, para que cada una absorba parte del espectro y así incrementar el rango de longitudes de onda que aportan al efecto fotovoltaico y, por tanto, aumentar la eficiencia<sup>23</sup>. A esta tecnología se le llama multijuntura o tandem y emplea principalmente materiales como GaAs e InGaP, por lo tanto, es extremadamente costosa y su aplicación se reserva para las duras condiciones del espacio, siendo las celdas que se emplean actualmente en satélites y misiones espaciales.<sup>24</sup>

A pesar de que esta tecnología se ha afianzado a lo largo de los años, la visión es que el costo de alimentar un satélite y mantenerlo en órbita no sea tan elevado como lo es en este momento<sup>25</sup>. Por esta razón, en este trabajo se propone estudiar, por medio de simulaciones, el desempeño de celdas de película delgada de kesterita (CZTS) en el espacio, ya que además de poseer características similares a las del GaAs como su band gap directo (entre 1 y 1.5 eV) y alto coeficiente de absorción ( $10^4 \text{ cm}^{-1}$ ), son amigables con el ambiente y presentan costos de fabricación reducidos.<sup>26</sup> Las celdas de kesterita surgieron de la necesidad de omitir el empleo de elementos tóxicos, escasos y/o costosos, y ser la alternativa a las celdas de película delgada comerciales mencionadas, por tal razón, se sintetizan a partir de

---

<sup>21</sup> LUQUE, and STEVEN HEGEDUS, Op. Cit.

<sup>22</sup> IBN-MOHAMMED, et al. Op. Cit.

<sup>23</sup> GREEN, Martin A. Third generation photovoltaics: Recent theoretical progress. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich. 2001

<sup>24</sup> ILES, Op. Cit.

<sup>25</sup> PATEL, MUKUND. Op. Cit.

<sup>26</sup> PARANTHAMAN, M. PARANS, Winnie, WONG-Ng, and RAGHU N. Bhattacharya, eds. Semiconductor materials for solar photovoltaic cells. Vol. 218. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

cobre (Cu), zinc (Zn), estaño (Sn) y azufre (S), elementos abundantes y no tóxicos. El grupo GISEL está empezando a trabajar en la fabricación de este tipo de celda, por esta razón, la evaluación de su desempeño es importante para ese objetivo.

## **2.1. CAPAS DE UNA CELDA DE PELÍCULA DELGADA DE CZTS**

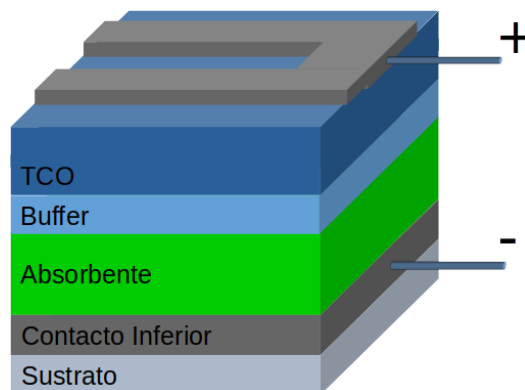
Como se observa en la Figura 1, las celdas de película delgada están compuestas por un conjunto de capas que permiten la absorción de luz y conversión a energía eléctrica, incluyendo las encargadas de mejorar el acople entre los distintos materiales, mitigar las pérdidas y dar soporte al dispositivo. A continuación, se describe la función que cumple cada una ellas.

El semiconductor tipo-p es el que constituye la capa donde la luz incidente es absorbida y se da la excitación de los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción. Es la capa activa del dispositivo, por tanto, la más importante. Se le conoce como absorbente y junto a las capas TCO y buffer forman la unión p-n en la que se presenta el efecto fotovoltaico.<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> SCRAGG, Op. Cit.

**Figura 1. Capas de una celda de película delgada**



La capa buffer, o de acople mecánico, es de un material tipo-n muy delgado que ayuda al transporte de los portadores fotogenerados y minimiza las pérdidas de absorción por recombinación en la interfaz, gracias a que tiene un band gap alto y un espesor reducido, sirviendo de acople en la juntura y permitiendo que una mayor cantidad de luz llegue a la capa absorbente.<sup>28</sup>

La capa TCO (Transparent Conducting Oxide) corresponde a la región-n que recolecta los portadores fotogenerados hasta los contactos metálicos superiores. Ésta posee el band gap más alto del dispositivo para que la energía de los fotones la atraviese y sea absorbida en la capa absorbente; esto requiere que sea transparente y tenga buena conductividad<sup>29, 30</sup>.

---

<sup>28</sup> SINHA, SOUMYADEEP, et al. Atomic-layer-deposited buffer layers for thin film solar cells using earth-abundant absorber materials: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 176. 2018. 49-68

<sup>29</sup> LUQUE, and STEVEN HEGEDUS. Op. Cit.

<sup>30</sup> BOSIO, A., G. Rosa, and N. Romeo. Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells. *Solar Energy* 175. 2018. 31-43

El material de cada una de las capas se escoge de acuerdo a sus características ópticas y su costo de producción<sup>31</sup>. Durante la fabricación, cada una de las capas que componen la celda se apila secuencialmente una sobre la otra por medio de diversos métodos de deposición. El contacto inferior, que normalmente es una película de molibdeno (Mo), se deposita en un sustrato de vidrio u otro material que sirva de soporte mecánico y pueda ser flexible. Luego, las capas absorbentes, buffer y TCO, las cuales son el foco de estudio de este trabajo, se depositan una sobre la otra, respectivamente. Por último, una rejilla de contactos metálicos se deposita sobre la capa TCO para formar el contacto superior<sup>32</sup>. En la sección 5.1 se describen los materiales empleados en este trabajo para las capas absorbente, buffer y TCO.

---

<sup>31</sup> IBN-MOHAMMED, TAOFEEQ, Op. Cit.

<sup>32</sup> PARANTHAMAN, PARANS, Winnie; WONG-NG, and RAGHU N. BHATTACHARYA, Op. Cit.

### 3. AMBIENTE EN EL ESPACIO

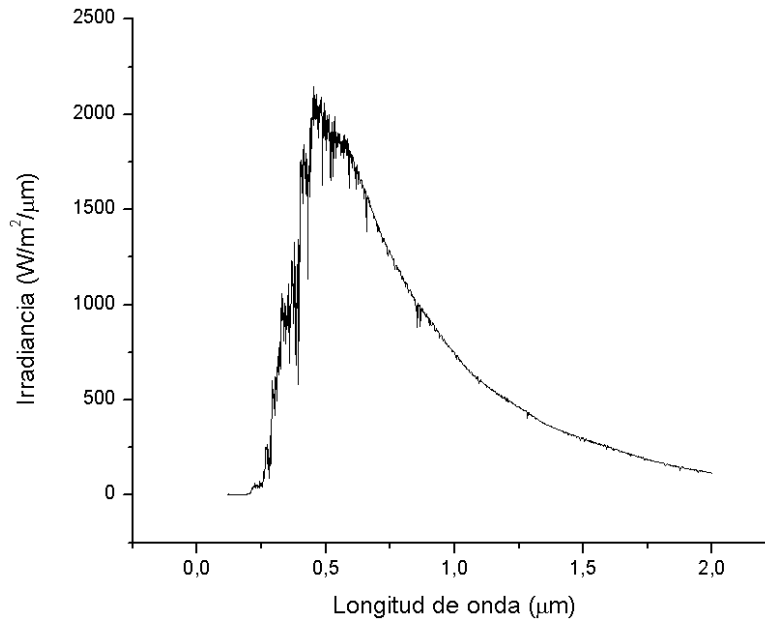
Las celdas de interés de este estudio estarán bajo un ambiente muy diferente al que predomina dentro de la atmósfera terrestre. A continuación, se da una descripción de algunas condiciones que se presentan por fuera de la atmósfera y que serán consideradas durante el trabajo.

El espectro solar en el espacio posee una distribución tal que permite considerar al sol como un emisor de cuerpo negro a una temperatura de 6000K, aproximadamente. La energía que éste emite es irradiada uniformemente en todas las direcciones y está en concordancia con la ecuación de radiación de cuerpo negro de Planck, por lo que puede calcularse que, al viajar desde el sol hasta el planeta tierra, su valor disminuye a 1366 W/m<sup>2</sup> en el borde de la atmósfera terrestre. Dicho valor de irradiancia se conoce como la constante solar y se utiliza para calibrar celdas fotovoltaicas en aplicaciones espaciales. Al continuar y atravesar los gases de la capa atmosférica hasta el nivel del mar, esta cantidad se reduce aproximadamente a 1000 W/m<sup>2</sup>; valor estándar para pruebas en aplicaciones terrestres.<sup>33</sup>

---

<sup>33</sup> LYNN, Op. Cit.

**Figura 2. Distribución espectral AM0**



La distribución espectral por fuera de la atmósfera terrestre se conoce como masa de aire cero (AM0 por sus siglas en inglés -Air Mass Zero) y se muestra en la Figura 2. Ésta se determina de acuerdo a la longitud de trayectoria a través de la atmósfera y al ángulo con el que el sol incide sobre la tierra<sup>34</sup>. Los espectros de irradiancia como el AM0 se construyen a partir de datos tomados por instrumentos de medición montados en satélites y globos estratosféricos, y presentan la densidad de potencia de la radiación solar en función de la longitud de onda.<sup>35</sup>

Contrario a lo que sucede al interior de la atmósfera terrestre, las celdas están expuestas a un ambiente en el que el sol incide en forma directa y se presentan temperaturas muy variadas<sup>36</sup>. La temperatura a la que opera una celda solar en el espacio está sujeta a la intensidad y duración de la iluminación a la que está

<sup>34</sup> MESSENGER, Roger A., and AMIR Abtahi. Photovoltaic systems engineering. CRC press, 2010

<sup>35</sup> LUQUE, and STEVEN HEGEDUS, Op. Cit.

<sup>36</sup> BENMIR, ABDELKADER, and MOHAMED SALAH Aida. "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 91. 2016. 70-77

expuesto el satélite. En una órbita como la de la Estación Espacial Internacional (~340km) la temperatura de una celda es de 55°C (328K) cuando se hace seguimiento al sol y -180°C (93K) durante el eclipsamiento más largo, mientras que en una órbita típica alrededor de la tierra las temperaturas que experimentan van de 20°C (293K) a 85°C (358K).<sup>37</sup>

Estas condiciones de irradiancia y temperatura dan una noción de la configuración necesaria para la simulación, permitiendo llegar a una aproximación del ambiente al que estará expuesta la celda y determinar su influencia sobre el desempeño.

---

<sup>37</sup> LUQUE, and STEVEN HEGEDUS, Op. Cit.

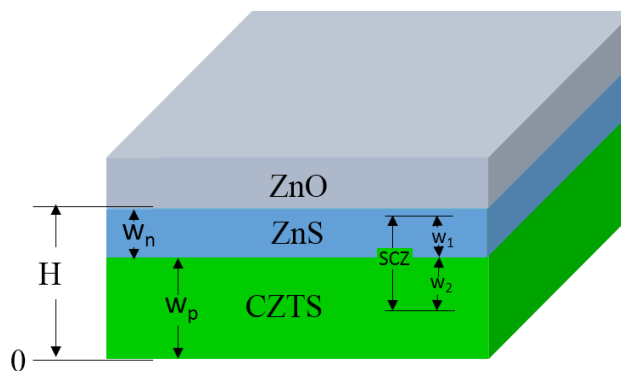
## 4. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Mediante el uso de Matlab se evaluaron los modelos físicos aquí presentados con el fin de dar una aproximación del desempeño de la celda solar bajo diferentes condiciones de operación. Teniendo en cuenta las condiciones ambientales mencionadas anteriormente, para este estudio se consideró el escenario de simulación de una órbita LEO (Low Earth Orbit) típica bajo un rango de variación de temperatura entre 250 y 525K y el espectro de irradiancia AM0.

### 4.1. ESTRUCTURA DE LA CELDA

La Figura 3 muestra la estructura y las capas de la celda estudiada en este trabajo. Se empleó ZnO (óxido de zinc) como capa TCO con un espesor de 1 mm, ZnS (sulfuro de zinc) para la capa buffer con un espesor de 13 nm y CZTS como capa absorbente con un espesor de  $3\mu\text{m}$ . Por ser un material que poseen bandgap directo, el espesor requerido para la capa absorbente es del orden de micrómetros.

**Figura 3. Estructura de la celda**



Tal y como se ve en la Figura 3,  $W_n$  y  $W_p$  corresponden a los espesores de las capas buffer y absorbente, respectivamente.  $W_1$  y  $W_2$  son los espesores en [m] de la capa buffer y absorbente que constituyen la zona de carga espacial (ZCE) y están dados por<sup>38</sup>:

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

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

donde  $V_d$  en [V] es la tensión incorporada o potencial de difusión de la celda y se calcula como:

$$V_d = \frac{1}{q} [E_{g2} + (x_2 - x_1)] + U_t \ln \left( \frac{N_a N_d}{N_{c1} N_{v2}} \right) \quad (3)$$

Estas ecuaciones están en función de las propiedades físicas de los materiales seleccionados para la celda cuyos datos se estimaron teóricamente o fueron proporcionados en otros experimentos y se listan en la Tabla 1, siendo  $U_t = KT/q$  el potencial termodinámico en [V], donde  $K$  es la constante de Boltzmann en [eV/K],  $q$  la carga del electrón en [C] y  $T$  la variación de temperatura en [K].

**Tabla 1. Parámetros de la simulación**

|       | Descripción                | Unidades         | ZnS                   | CZTS                     | GaAs                     |
|-------|----------------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| $N_a$ | Concentración de donores   | cm <sup>-3</sup> | 9.00E+17 <sup>a</sup> |                          |                          |
| $N_d$ | Concentración de aceptores | cm <sup>-3</sup> |                       | 1.00E+16<br><sup>a</sup> | 1.00E+14<br><sup>b</sup> |
| $E_g$ | Band gap                   | eV               | 3.3 <sup>a</sup>      | 1.5 <sup>a</sup>         | 1.42 <sup>b</sup>        |

<sup>38</sup> BENMIR, ABDELKADER, and MOHAMED SALAH. Op. Cit.

|              | Descripción                                                      | Unidades                           | ZnS                   | CZTS                  | GaAs                  |
|--------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $\epsilon_r$ | Permitividad relativa                                            |                                    | 10 <sup>a</sup>       | 10 <sup>a</sup>       | 13.1 <sup>c</sup>     |
| $\chi$       | Afinidad electrónica                                             | eV                                 | 4.4 <sup>a</sup>      | 4.4 <sup>a</sup>      | 4.07 <sup>b</sup>     |
| $N_c$        | Densidad efectiva de estados en la banda de conducción           | cm <sup>-3</sup>                   | 2.20E+18 <sup>a</sup> |                       |                       |
| $N_v$        | Densidad efectiva de estados en la banda de valencia             | cm <sup>-3</sup>                   |                       | 1.80E+19 <sup>a</sup> | 7.00E+18 <sup>b</sup> |
| $R$          | Reflectividad                                                    |                                    | 0.1                   |                       |                       |
| $S_p$        | Velocidad de recombinación de huecos en superficie frontal       | cm/s                               | 1E+3                  |                       |                       |
| $S_n$        | Velocidad de recombinación de electrones en superficie posterior | cm/s                               |                       | 1.00E+04 <sup>d</sup> | 1.00E+07 <sup>e</sup> |
| $A$          | Constante absorción                                              | cm <sup>-1</sup> eV <sup>0.5</sup> | 6.70E+05              |                       |                       |
| $B$          | Constante absorción                                              | cm <sup>-1</sup> eV <sup>0.5</sup> |                       | 4.25E+04 <sup>g</sup> | 4.25E+04 <sup>g</sup> |
| $\mu_n$      | Movilidad de los electrones                                      | cm <sup>2</sup> /Vs                | 230 <sup>f</sup>      | 100 <sup>f</sup>      | 8800 <sup>c</sup>     |
| $\tau_n$     | Tiempo de vida de los electrones                                 | s                                  |                       | 8.00E-09 <sup>f</sup> | 1.00E-09 <sup>c</sup> |
| $\mu_p$      | Movilidad de los huecos                                          | cm <sup>2</sup> /Vs                | 40 <sup>f</sup>       |                       |                       |
| $\tau_p$     | Tiempo de vida de los huecos                                     | s                                  | 5.50E-10 <sup>f</sup> |                       |                       |
| $W_p$        | Espesor capa absorbente                                          | μm                                 |                       | 3                     | 3.5                   |
| $W_n$        | Espesor capa buffer                                              | nm                                 | 13                    |                       |                       |

<sup>a</sup> Valor tomado de CHEROUANA, ABDELBAKI, and REBIHA LABBANI. "Study of CZTS and CZTSSe solar cells for buffer layers selection." Applied Surface Science 424 (2017): 251-255

<sup>b</sup> Valor tomado de ANSARI, ZEESHAN Alam, et al. "Photovoltaic Solar Cells Based On Graphene/Gallium Arsenide Schottky Junction." Optik 2019

<sup>c</sup> Valor tomado de SAHOO, G. S., and G. P. MISHRA. "Effective use of spectrum by an ARC less dual junction solar cell to achieve Higher efficiency: A simulation study." Superlattices and Microstructures 109 2017: 794-804

<sup>d</sup> Valor tomado de COUREL, MAYKEL, J. A. ANDRADE-ARVIZU, and O. VIGIL-GALÁN. "The role of buffer/kesterite interface recombination and minority carrier lifetime on kesterite thin film solar cells." Materials Research Express 3.9 2016: 095501

<sup>e</sup> Valor tomado de JIN, MUCHUN, et al. "Research on quantum efficiency of transmission-mode InGaAs photocathode." Optik-International Journal for Light and Electron Optics 125.10 2014: 2395-2399

<sup>f</sup> Valor tomado de VALLISREE, S., R. THANGAVEL, and T. R. LENKA. "Theoretical investigations on enhancement of photovoltaic efficiency of nanostructured CZTS/ZnS/ZnO based solar cell device." Journal of Materials Science: Materials in Electronics 29.9 2018: 7262-7272

<sup>g</sup> Valor tomado de ADEWOYIN, ADEYINKA D., et al. "Development of CZTGS/CZTS tandem thin film solar cell using SCAPS-1D." Optik 176 2019: 132-142

## 4.2. PROPIEDADES ÓPTICAS DE LA CELDA

Como se observa en la Figura 3, la primera capa que está expuesta a la radiación incidente es la TCO. El flujo en  $[W/\mu m]$  sobre ésta está dado por<sup>39</sup>:

$$F(\lambda) = F_0(\lambda)e^{-\alpha_{ZnO}(\lambda)W_{ZnO}} \quad (4)$$

donde el flujo de fotones,  $F_0(\lambda)$ , se obtiene al dividir la densidad de potencia incidente por la energía del fotón<sup>40</sup>. La fracción del flujo incidente que penetra y es absorbida por cada una de las capas es determinada por el coeficiente de absorción, el cual varía con la densidad de estados del material<sup>41</sup>. Ya que los materiales empleados en esta celda son de band gap directo, se calcula una aproximación de este coeficiente en  $[cm^{-1}]$  dada por la ecuación para transición directa para cada una de las capas<sup>42</sup>:

$$\alpha_1 = \alpha_{ZnS}(\lambda) = \frac{A}{E}(E - E_{g1})^{1/2} \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \alpha_{CZTS}(\lambda) = B(E - E_{g2})^{1/2} \quad (6)$$

$$\alpha_3 = \alpha_{ZnO}(\lambda) = \frac{C}{E}(E - E_{g3})^{1/2} \quad (7)$$

donde A, B y C son constantes en  $[cm^{-1}eV^{0.5}]$  que depende del material, E es la energía incidente de los fotones y  $E_g$  energía del bandgap en  $[eV]$ .

---

<sup>39</sup> BENMIR, ABDELKADER, and MOHAMED SALAH, Op. Cit.

<sup>40</sup> LUQUE, and STEVEN HEGEDUS, Op. Cit.

<sup>41</sup> SCRAGG, Op. Cit.

<sup>42</sup> Luque, and STEVEN HEGEDUS, Op. Cit.

### 4.3 CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE FOTOCORRIENTE

Partiendo de la premisa de que no existen campos eléctricos por fuera de la zona de carga espacial, el transporte de portadores fotogenerados se divide en 3 zonas; la zona neutra superior, la ZCE, y la zona neutra inferior. El transporte de estos portadores se da por procesos de difusión, excepto en la ZCE donde se da por arrastre, por tanto, la porción de ésta en el lado n puede despreciarse.

La densidad de fotocorriente en  $[A/m^2]$  debida a los huecos en el límite entre la región n y la ZCE (superficie frontal) se obtiene mediante la ecuación:

$$J_p(\lambda) = \left( q \frac{F(\lambda)(1-R)\alpha_1 L_p}{\alpha_1^2 L_p^2 - 1} \right) \times \left[ \frac{\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha_1 L_p - e^{-\alpha_1 x_n} \left( \frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\left(\frac{x_n}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{x_n}{L_p}\right) \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{x_n}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x_n}{L_p}\right)} - \alpha_1 L_p e^{-\alpha_1 x_n} \right] \quad (8)$$

donde  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ ,  $D_p = U_t \mu_p$  y  $S_p$  son la longitud de difusión en [m], coeficiente de difusión en  $[m^2/s]$  y velocidad de recombinación de los huecos en [m/s], respectivamente. Dichos parámetros describen los procesos de recombinación y transporte por difusión de portadores minoritarios que en el caso de la región n son huecos.  $x_n$  es el espesor en [m] de la zona neutra de la región n y  $R$  la reflectividad.

De manera similar, la densidad de fotocorriente en  $[A/m^2]$  debida a los electrones en el límite entre la región p y la ZCE (superficie posterior) está dada por:

$$J_n(\lambda) = \left( q \frac{F(\lambda)(1-R)\alpha_2 L_n}{\alpha_2^2 L_n^2 - 1} \right) e^{-\alpha_1(x_n+w_1)-\alpha_2 w_2} \times \left[ \alpha_2 L_n - \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} \left( \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right) - e^{-\alpha_2 H'} \right) + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha_2 L_n e^{-\alpha_2 H'}}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \right] \quad (9)$$

donde  $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ ,  $D_n = U_t \mu_n$  y  $S_n$  son la longitud de difusión en [m], coeficiente de difusión en [m<sup>2</sup>/s] y velocidad de recombinación de los electrones [m/s], respectivamente, y  $H'$  es el espesor en [m] de la zona neutra del material tipo p<sup>43</sup>. Una parte de la generación de fotocorriente sucede dentro de la ZCE y se calcula en [A/m<sup>2</sup>] como:

$$J_{ZCE}(\lambda) = qF(\lambda)(1-R)e^{-\alpha_1 x_n}(1 - e^{-\alpha_1 w_1 - \alpha_2 w_2}) \quad (10)$$

Finalmente, la densidad total de fotocorriente en [A/m<sup>2</sup>],  $J_{ph}$ , la cual es la suma de las contribuciones de cada una de las anteriores, puede calcularse integrando  $J_{ph}(\lambda)$  sobre todo el rango de longitudes de onda del espectro solar<sup>44</sup>, donde:

$$J_{ph}(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{ZCE}(\lambda) \quad (11)$$

<sup>43</sup> SZE, Simon M., and KWOK K. Ng. Physics of semiconductor devices. John wiley & sons, 2006.

<sup>44</sup> BENMIR, ABDELKADER, and MOHAMED SALAH. Op. Cit.

#### 4.4. CARACTERÍSTICAS DE LA CELDA SOLAR

Los parámetros que se analizaron para determinar el desempeño de la celda solar fueron su tensión de circuito abierto ( $V_{OC}$ ), corriente de cortocircuito ( $J_{SC}$ ), factor de forma ( $FF$ ) y eficiencia ( $\eta$ ).

La tensión de circuito abierto en [V] se obtiene de la característica corriente-tensión (J-V) cuando la densidad de corriente es cero. Es el valor tensión máximo disponible de la celda<sup>45</sup> y se calcula en función de la temperatura como:

$$V_{OC} = \frac{QkT}{q} \ln \left( \frac{J_{ph}}{J_0} + 1 \right) \quad (12)$$

donde  $Q$  es el factor ideal del diodo (adimensional) y  $J_0$  se conoce como densidad de corriente de saturación inversa y es una medida de las pérdidas por recombinación de portadores minoritarios en la zona neutra en los dos lados de la juntura, influyendo en el valor de  $V_{OC}$  por efecto de la temperatura<sup>46</sup>.  $J_0$  en [A/m<sup>2</sup>] está dada por la ecuación:

$$J_0 = Ae^{-qE_g/kT} \quad (13)$$

la cual es una aproximación empírica propuesta por Martin Green, donde  $A = 1.5 \times 10^8$  [mAcm<sup>2</sup>]<sup>47</sup>. La corriente de corto circuito en [A/m<sup>2</sup>],  $J_{SC}$ , se obtiene de la característica J-V cuando la tensión es cero, esto representa el máximo valor de corriente disponible<sup>48, 49</sup>

---

<sup>45</sup> SZE, SIMON, and KWOK, Op. Cit.

<sup>46</sup> Ibid

<sup>47</sup> SINGH, PRIYANKA, and N. Mr Ravindra. Temperature dependence of solar cell performance—an analysis. Solar Energy Materials and Solar Cells 101 (2012): 36-45

<sup>48</sup> BENMIR, ABDELKADER, and MOHAMED SALAH. Op. Cit.

<sup>49</sup> SZE, and KWOK, Op. Cit.

El factor de forma en [%] está definido como la razón entre el punto de potencia máxima y el producto de la tensión de circuito abierto y la densidad de corriente de corto circuito:

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc}J_{sc}} \quad (14)$$

donde  $P_m$  en [W/m<sup>2</sup>] es el punto de máxima potencia de la característica J-V<sup>50</sup>. Dicho parámetro es una medida de la calidad de la juntura p-n de la celda y se relaciona con la forma rectangular de la característica J-V; entre más cercano esté este resultado de la unidad, mayor es la calidad de la celda.<sup>51</sup>

Por último, la eficiencia en [%] de la celda se obtiene como:

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} \quad (15)$$

donde  $P_i$  en [W/m<sup>2</sup>] es la intensidad de la radiación incidente conocida como constante solar, con un valor 1366 W/m<sup>2</sup> y calculada como la integral de la irradiancia sobre todo el intervalo de longitudes del espectro AM0<sup>52</sup>.

---

<sup>50</sup> LUQUE, and STEVEN HEGEDUS. Op. Cit.

<sup>51</sup> EL CHAAR, and EL ZEIN. Op. Cit.

<sup>52</sup> LUQUE, and STEVEN HEGEDUS. Op. Cit.

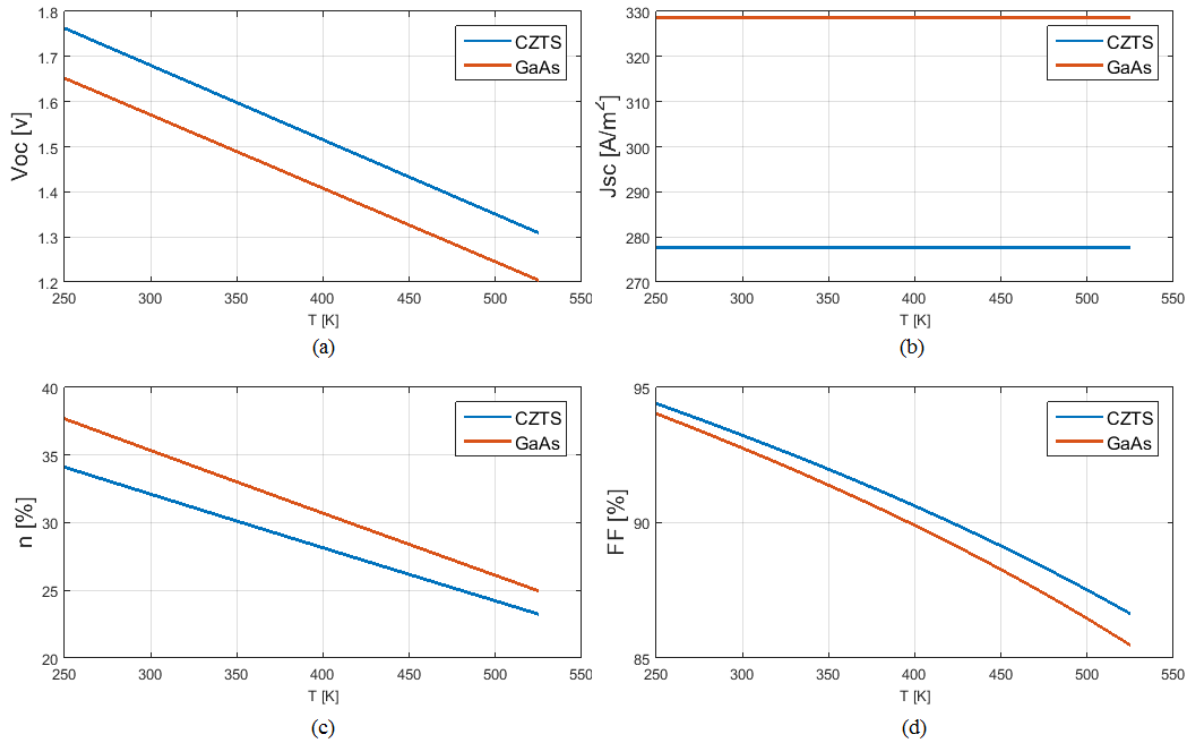
## 5. RESULTADOS

Se simuló el comportamiento de dos celdas solares de película delgada con estructura ZnO/ZnS/Absorbente, donde la capa absorbente corresponde a CZTS y GaAs, empleando los parámetros descritos en la Tabla 1, bajo la influencia del espectro de irradiancia AM0 y una variación de temperatura entre 250 y 525K, con el fin de evaluar y comparar sus desempeños.

La evaluación de los modelos mencionados en la sección anterior se realizó a través de un algoritmo implementado en Matlab. En el Anexo se muestra el diagrama de flujo que describe dicho algoritmo para determinar el valor de los parámetros de desempeño de las celdas de CZTS y GaAs. Las entradas incluyen las constantes de la Tabla 1, la constante de Boltzman, factor ideal del diodo, carga del electrón, reflectividad, permitividad del vacío; los valores de irradiancia con respecto a la longitud de onda del espectro AM0; el bandgap, espesor y la constante de absorción de la capa TCO; el vector de tensión en terminales y el vector de temperatura. El bloque “Parámetros” (en naranja) incluye cada una de las ecuaciones implementadas en la simulación, las cuales están en función de las entradas, y en éste se calculan el potencial termodinámico y la tensión incorporada para determinar la ZCE y zonas neutras, seguido de los coeficientes de absorción, flujo incidente, coeficientes y longitudes de difusión para determinar las fotocorrientes generadas en dichas zonas. La densidad de corriente, que junto al vector tensión de terminales generan la característica J-V, se calcula a partir de la densidad total de fotocorriente y la densidad de corriente de saturación. El punto de potencia máxima se determina a partir de la característica J-V y por último la potencia incidente se calcula a partir de los datos de irradiancia con respecto a la longitud de onda (entradas). Los parámetros anteriores son los necesarios para determinar el desempeño de la celda representados por los bloques Voc, Jsc, FF y n (en verde).

En la Figura 4 se presentan los resultados de la simulación para las dos estructuras, CZTS y GaAs.

**Figura 4. Variación de los parámetros de desempeño con respecto a la temperatura para (a) tensión de circuito abierto, (b) densidad de corriente de cortocircuito, (c) eficiencia y (d) factor de forma.**



La Figura 4a muestra el efecto de la variación de la temperatura sobre la tensión de circuito abierto. En ésta se observa que el valor de  $V_{oc}$ , representado en azul para CZTS y rojo para GaAs, disminuye linealmente a medida que aumenta la temperatura. La celda de CZTS presenta un mejor desempeño con respecto a la celda de GaAs en el rango de temperaturas estudiado en lo que respecta a este parámetro. En la Figura 4b se observa que la densidad de corriente de cortocircuito

se mantiene constante para ambos materiales, obteniéndose un valor mayor para el GaAs, cercano a  $330 \text{ A/m}^2$ .

En la Figura 4c se presentan los resultados de la variación de la eficiencia de la celda en función de la temperatura. Puede observarse una disminución lineal y una diferencia apreciable entre las pendientes de las rectas que representan el cambio de la eficiencia con respecto a la temperatura. En este caso, la eficiencia de la celda de GaAs se mantiene por encima de la de CZTS en el rango de temperaturas establecido.

La Figura 4d representa la variación del factor de forma en función de la temperatura para ambos materiales. Se observa que a medida que aumenta la temperatura disminuye el FF. Así mismo, para altas temperaturas, del orden de 500K, el FF es superior al 85%. De manera similar a la tensión de circuito abierto, se observa que la película delgada de CZTS responde mejor al aumento de la temperatura con respecto a este parámetro.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados presentados muestran que el valor de los parámetros de desempeño, a excepción de la densidad de corriente de cortocircuito, disminuye a medida que aumenta la temperatura a la que se expone la celda solar, esto se debe al incremento en la energía de los electrones cuando la temperatura aumenta, por lo tanto, los electrones que van ganando energía recombinan con otros huecos y, como resultado, la tasa de recombinación de los portadores aumenta, lo que conlleva a la disminución de la tensión de circuito abierto, el factor de forma y la eficiencia<sup>53</sup>. Esta disminución se da por efecto de la densidad de corriente de saturación,  $J_0$ , que corresponde a la recombinación de portadores en las zonas neutras, es decir, por fuera de la ZCE<sup>54</sup>, incrementado su valor al aumentar la temperatura y disminuyendo  $V_{oc}$ . Un comportamiento diferente se obtiene en el caso de la densidad de corriente de cortocircuito, donde el valor de ésta se mantiene constante para ambos materiales. Así mismo, para altas temperaturas, del orden de 500K, el FF es superior al 85%, valor adecuado para celdas solares.

La disminución de los parámetros  $V_{oc}$ ,  $FF$  y  $\eta$  se da de manera similar en el análisis de las propiedades termodinámicas en las celdas de película delgada de CIGS con datos reportados por Clarke y Breguel<sup>55</sup>, y de celdas de GaAs por Singh<sup>56</sup>. Con respecto a la densidad de corriente de cortocircuito, los resultados de ambos trabajos muestran un comportamiento casi constante, con un aumento mínimo del valor de este parámetro al incrementar la temperatura y con valores cercanos a los obtenidos en este trabajo para el GaAs. Para el GaAs, Singh presenta resultados

---

<sup>53</sup> JHUMA, FARJANA AKTER, MARSHIA ZAMAN SHAILY, and MOHAMMAD JUNAEBUR RASHID. Towards high-efficiency CZTS solar cell through buffer layer optimization." Materials for Renewable and Sustainable Energy 8.1. 2019. 6

<sup>54</sup> SZE, SIMON, and KWOK K. Op. Cit.

<sup>55</sup> CLARKE, D., and BREGUEL R., Analysis of Thermodynamic Properties of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Thin-film Solar Cells for Viable Space Application. PAM Review: Energy Science & Technology, Vol 5. 2018. 131-149

<sup>56</sup> SINGH, PRIYANKA, and N. Mr RAVINDRA. Op. Cit.

experimentales de eficiencia obtenidos por otros autores a nivel de laboratorio con una temperatura de 298 K y un espectro de irradiancia AM0. La eficiencia experimental reportada a esas condiciones es de 26.9%. Adicionalmente, reporta los siguientes parámetros de desempeño teóricos:  $V_{oc}=1.041$  V,  $J_{sc}=386.1$  A/m<sup>2</sup>,  $FF=88.6$  % y  $\eta =26.33$  %. Los resultados obtenidos en este trabajo a esas condiciones son:  $V_{oc}=1.574$  V,  $J_{sc}=328.6$  A/m<sup>2</sup>,  $FF=92.81$  % y  $\eta =35.42\%$ , observándose que los valores de tensión de circuito abierto, factor de forma y eficiencia son mayores a los reportados en<sup>57</sup> a excepción de la densidad de corriente de circuito abierto. Esta diferencia puede deberse a que en este trabajo la resistencia shunt, la cual es un parámetro que se considera una pérdida resistiva y afecta negativamente el valor de la densidad corriente generada, se considera despreciable, reflejándose en una mayor eficiencia.

Por otro lado, de acuerdo al límite de Shockley-Queisser, los materiales con un band gap entre 1.2 y 1.5 eV presentan los valores más altos de eficiencia [28]. Dentro de dicho rango se encuentran el GaAs y la CZTS con eficiencias cercanas a las calculadas en este trabajo. Adicionalmente, el bandgap del GaAs se aproxima más al valor óptimo, por lo tanto, presenta una eficiencia mayor al de la CZTS, como se observa en los resultados obtenidos. Debe tenerse en cuenta que la constante B en la ecuación (6) se supuso igual para ambos materiales, sin embargo, un menor valor de B representa una disminución en la eficiencia, por ello, dicha constante debe determinarse experimentalmente para obtener un resultado cercano al adecuado.

---

<sup>57</sup> Ibid.

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se simuló el comportamiento de dos celdas solares de película delgada con estructura ZnO/ZnS/Absorbente, donde la capa absorbente corresponde a CZTS y GaAs. En las simulaciones realizadas se consideró el espectro de irradiancia AM0 y una variación de temperatura entre 250 y 525K, con el fin de evaluar los parámetros de desempeño y realizar un análisis comparativo entre estos dos tipos de celdas.

La comparación de ambas estructuras mostró que, al aumentar la temperatura, la CZTS presenta una mejor respuesta en tensión de circuito abierto y factor de forma frente al GaAs, material ampliamente utilizado en aplicaciones espaciales.

Se analizó el efecto de la densidad de corriente de saturación inversa,  $J_0$ , sobre los parámetros de desempeño, observándose que, con el aumento de la temperatura, el valor de  $J_0$  se incrementa, por lo tanto,  $V_{oc}$  disminuye, lo que conlleva a una reducción del factor de forma y la eficiencia de la celda solar.

## **8. PRODUCTOS**

Este trabajo de investigación participó en el Décimo Congreso Argentino de Tecnología Espacial - CATE 2019, el cual fue llevado a cabo en la ciudad de Buenos Aires del 10 al 12 de abril de 2019, con el objetivo presentar y discutir proyectos latinoamericanos de control y guiado, materiales de uso espacial y estructuras, satélites y cargas útiles, entre otros, buscando reunir profesionales que trabajen en el sector espacial y así intercambiar experiencias de los distintos entes, organismos e instituciones interesadas.

## BIBLIOGRAFÍA

ADEWOYIN, ADEYINKA D., et al. Development of CZTGS/CZTS tandem thin film solar cell using SCAPS-1D. Optik. 176. 2019. 132-142.

ANSARI, ZEESHAN ALAM, et al. Photovoltaic Solar Cells Based On Graphene/Gallium Arsenide Schottky Junction. Optik. 2019.

BENMIR, ABDELKADER, AND MOHAMED SALAH AIDA. 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 91 (2016): 70-77.

BOSIO, A., G. ROSA, and N. ROMEO. Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells. Solar Energy 175 (2018): 31-43.

CARRERO URBINA, Jonathan. El Espacio, Futuro de la Fuerza Aérea Colombiana. Ciencia y poder aéreo 12.1 (2017): 202-208

CHEROUANA, ABDELBAKI, and REBIHA LABBANI. Study of CZTS and CZTSSe solar cells for buffer layers selection. Applied Surface Science 424. 2017. 251-255.

CLARKE, D., and BREGUEL R., Analysis of Thermodynamic Properties of  $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$  Thin-film Solar Cells for Viable Space Application. PAM Review: Energy Science & Technology, Vol 5. 2018. 131-149.

COUREL, MAYKEL, J. A. ANDRADE-Arvizu, and O. VIGIL-GALÁN. The role of buffer/kesterite interface recombination and minority carrier lifetime on kesterite thin film solar cells. Materials Research Express 3.9. 2016. 095501.

EL CHAAR, L., and N. EL ZEIN. Review of photovoltaic technologies. Renewable and sustainable energy reviews 15.5. 2011. 2165-2175.

GREEN, Martin A. "Third generation photovoltaics: Recent theoretical progress. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich. 2001.

IBN-MOHAMMED, TAOFEEQ, et al. Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 80. 2017. 1321-1344.

ILES, Peter A. Photovoltaic Conversion: Space Applications. 2004. 25-33.

JHUMA, FARJANA AKTER, MARSHIA ZAMAN SHAILY, and MOHAMMAD JUNAEBUR Rashid. Towards high-efficiency CZTS solar cell through buffer layer optimization. Materials for Renewable and Sustainable Energy 8.1. 2019. 6.

JIN, MUCHUN, et al. Research on quantum efficiency of transmission-mode InGaAs photocathode. Optik-International Journal for Light and Electron Optics 125.10. 2014. 2395-2399.

LUQUE, Antonio, and STEVEN HEGEDUS, eds. Handbook of photovoltaic science and engineering. John Wiley & Sons. 2011.

LYNN, P. A. Electricity from sunlight: an introduction to photovoltaics. John Wiley & Sons. 2011

MESSENGER, Roger A., and AMIR, Abtahi. Photovoltaic systems engineering. CRC press. 2010.

PARANTHAMAN, M.; PARANS, WINNIE, Wong-Ng, and RAGHU, N. Bhattacharya, eds. Semiconductor materials for solar photovoltaic cells. Vol. 218. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

PATEL, Mukund R. Spacecraft power systems. CRC press. 2004.

REINDERS, Angèle, et al. Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications. John Wiley & Sons. 2017.

SAHOO, G. S., and G. P. Mishra. Effective use of spectrum by an ARC less dual junction solar cell to achieve higher efficiency: A simulation study. Superlattices and Microstructures 109. 2017. 794-804.

SCHEER, Roland, and HANS-WERNER, Schock. Chalcogenide photovoltaics: physics, technologies, and thin film devices. John Wiley & Sons. 2011

SCRAGG, Jonathan J. Opto-Electronic Properties of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  Films: Influences of Growth Conditions and Precursor Composition. Copper Zinc Tin Sulfide Thin Films for Photovoltaics. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. 155-195.

SINGH, Priyanka, and N. Mr Ravindra. Temperature dependence of solar cell performance—an analysi." Solar Energy Materials and Solar Cells 101. 2012. 36-45.

SINHA, Soumyadeep, et al. Atomic-layer-deposited buffer layers for thin film solar cells using earth-abundant absorber materials: A review. Solar Energy Materials and Solar Cells 176. 2018. 49-68.

SZE, Simon M., and KWOK, K. Ng. Physics of semiconductor devices. John wiley & sons. 2006.

VALLISREE, S., R. THANGAVEL, and T. R. Lenka. Theoretical investigations on enhancement of photovoltaic efficiency of nanostructured CZTS/ZnS/ZnO based solar cell device. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 29.9. 2018. 7262-7272.

WANG, Dongxiao, et al. Path towards high-efficient kesterite solar cells. *Journal of energy chemistry* 27.4. 2018. 1040-1053