

PROPUESTA DE ELABORACIÓN DE UN PIRANOMETRO CON BASE DE CELDAS DE CdTe

Daniel Alberto Reyes Guerrero*, Rogelio Mendoza Pérez, José Alfredo del Oso Acevedo**, Álvaro Eduardo Lentz Herrera**, Miguel Morales Rodríguez***, Jesús Adán Fierro López***

- * Universidad Politécnica de Sinaloa, Carretera Municipal Libre Mazatlán Higuera Km 3, Col. Genaro Estrada C.P. 82199 Mazatlán, Sinaloa, México. 2019031025@upsin.edu.mx
- ** Universidad Autónoma de la Ciudad de México, plantel San Lorenzo Tezonco, Calle Prolongación San Isidro No. 151, Col. San Lorenzo Tezonco, Alcaldía Iztapalapa, México, D.F., C.P. 09790
rogelio.mendoza@uacm.edu.mx
- *** Universidad Politécnica del Valle de México Av. Mexiquense s/n esquina Av. Universidad Politécnica, Col. Villa Esmeralda, Tultitlán, C.P. 54910, Estado de México.

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2063>

RESUMEN

Actualmente, se encuentra en crecimiento la importancia de aprovechar la energía solar como una fuente de energía, ya que es considerada como una de las fuentes más limpias en el mercado. Es por ello, que se necesita contar con equipos capaces de cuantificar el recurso solar y aprovechar la energía brindada por el mismo. Es de suma importancia mencionar que en la actualidad existen dispositivos especializados y calibrados para poder medir y cuantificar el recurso solar.

Los equipos que ya se encuentran en el mercado utilizados para este tipo de actividades, son considerablemente caros, haciendo que su obtención solo sea para unos cuantos, lo que genera que poca gente voltee hacia la energía solar por el motivo que no pueden realizar las mediciones necesarias para poder trabajar sobre esto. Por ello, se buscó el apoyo del Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables (LACyTES) de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) para elaborar un piranómetro utilizando una celda solar de Teluro de Cadmio (CdTe), este tipo de tecnología cuenta con un record de eficiencia a nivel mundial de 22.1%.

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de capa delgada son actualmente una alternativa que actualmente se encuentran en el mercado fotovoltaico, aunque en menor presencia comparada con la tecnología de silicio cristalino. Para el año 2017 las celdas solares de capa delgada han llegado a cubrir aproximadamente el 5% de la producción mundial. Uno de los principales fabricantes de este tipo de tecnología es la empresa First Solar, que produce celdas solares de CdTe, tiene alrededor del 60% de toda la oferta comercial actual en cuanto a capa delgada se refiere (Systems, 2020). La tecnología de las celdas solares, es una de las tecnologías que se encuentran disponibles para producir energía eléctrica usando el recurso solar disponible. A la radiación que llega a la superficie de la Tierra en línea recta sin tener cambio alguno en su dirección, se le conoce como Irradiancia Directa y se mide en W/m^2 ; cuando las condiciones climatológicas son las idóneas la componente de la Irradiancia Directa es mayor, esto se presenta cuando existe un cielo despejado. Inclusive cuando se tenga un día despejado, la componente de radiación difusa puede alcanzar alrededor de un 10% de la componente directa (PVEducation, 2019)

En México, la mayor parte del territorio nacional se encuentra en condiciones favorables para utilizar sistemas fotovoltaicos. En la figura 1, se muestra la Irradiación Normal Directa (Direct Normal Radiation - DNI) del territorio mexicano en kWh/m^2 por año, se puede apreciar que los valores más altos de este tipo de radiación se pueden encontrar en gran parte de la zona norte del país.

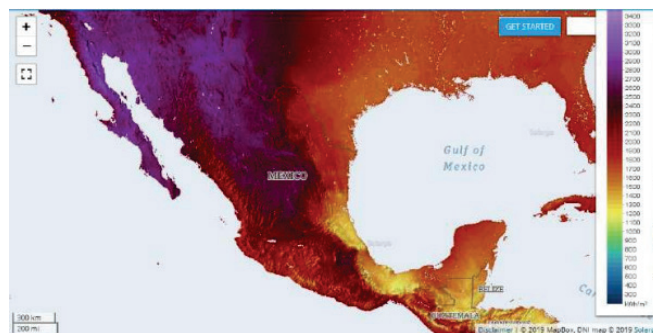


Figura 1. Irradiación Normal Directa (DNI) en México por año (Solargis, 2020; Solargis, 2020)

Al valor de la radiación solar que llega a la atmósfera exterior de la Tierra en un plano perpendicular se le conoce como constante solar, y es de aproximadamente $1,366.1 W/m^2$ (ASTM-E-490-00a, Standar Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectrak Irradiance, 2014), al espectro de irradiación en la atmósfera exterior se le conoce como masa de aire igual a cero (AM0). La trayectoria mínima que puede recorrer la radiación solar para llegar a la superficie terrestre es de una masa de aire igual a uno (Air mass - AM1), esto se presenta cuando el movimiento aparente del Sol pasa por el cenit del lugar de observación. La condición de que los rayos solares atraviesan 1.5 veces la atmósfera terrestre (AM1.5) se ha denominado como un estándar de referencia de la irradiancia en la superficie terrestre (ASTM-G173-03, 2012). En la Figura 2, se observa la distribución espectral de la irradiancia para dos condiciones; 1) considerando la irradiancia global, espectro AM1.5g y 2) considerando la irradiancia normal directa incluyendo la radiación circunsolar, espectro AM1.5d. La irradiancia correspondiente al espectro estándar de referencia AM1.5d es de $900.1 W/m^2$, en ambos casos se considera que la superficie irradiada se encuentra en un plano perpendicular a la luz solar incidente y que se obtiene la irradiancia para longitudes de onda entre 280-4000 nm.

De acuerdo a las normas ASTM e IEC la irradiancia estándar es una irradiancia normal global (GNI) de $1000 W/m^2$ para el espectro de referencia AM1.5g en aplicaciones de sistemas fotovoltaicos (ASTM-E1036-15, 2019) (IEC-60904-3, 2019); mientras que para sistemas fotovoltaicos con concentrador solar, el estándar de referencia es una irradiancia directa normal (DNI) de $850 W/m^2$ para pruebas realizadas con luz solar natural de acuerdo a la normativa ASTM (ASTM-E2527, 2009), para la normativa IEC se considera una irradiancia de $900 W/m^2$ como estándar de operación considerando una irradiancia espectral AM1.5d (IEC-62670-1, 2013).

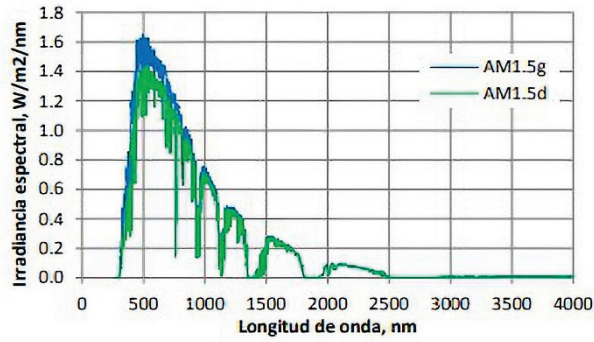


Figura 2. Distribución espectral estándar de la irradiancia para aplicaciones terrestres (ASTM-G173-03, 2012).

El objetivo de la presente investigación es la construcción de un sensor capaz de medir la radiación solar a través de celdas solares de CdTe.

MATERIALES

En este estudio se utilizaron celdas solares de CdTe con dimensiones de 25 mm por lado, en la Figura 3 se muestra el tipo de celda solar utilizada durante el experimento. Para estudiar la respuesta fotovoltaica de las celdas solares se realizaron pruebas en un Simulador Solar certificado Oriel Clase AAA, tal como se muestra en la Figura 4.



Figura 3. Celda Solar de CdTe.



Figura 4. Simulador Solar AAA.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Caracterización de celdas solares

El proceso para la fabricación de las celdas solares (CS) del tipo Vidrio-SnO₂:F/ZnO/CdS/CdTe/CdCl₂/Cu-Mo, se describe a continuación:

1. Depósito de los semiconductores ventana ZnO+CdS por medio del sistema de erosión catódica magneto planar en modo de radio frecuencia (Sputtering RF):
2. Depósito del semiconductor absorbente CdTe por medio de la técnica de sublimación en espacio cerrado (CSS por sus siglas en inglés) con un espesor de 4 μm aproximadamente.
3. Tratamiento térmico en mufla después del depósito de CdCl₂, este depósito se lleva a cabo por la técnica de transporte de vapor en espacio cerrado (CSVT por sus siglas en inglés).
4. Finalmente se depositan los contactos de Cu-Mo por medio de la técnica de erosión catódica magneto planar en corriente directa (Sputtering DC).

Se obtuvieron las características eléctricas de las celdas solares utilizadas durante los experimentos, se determinaron los parámetros eléctricos para celdas solares, la caracterización eléctrica se realizó midiendo la respuesta en corriente vs. voltaje (I-V) de la celda solar por medio de un arreglo de resistencias. Por medio de la curva I-V se determinaron los diferentes parámetros de la celda solar, como son: Voltaje de circuito abierto V_{oc} , corriente de cortocircuito I_{sc} , Factor de llenado F_F y eficiencia fotovoltaica η .

Factor de llenado

El factor de llenado se define como el cociente entre la potencia en el punto de máxima potencia entre el producto $V_{oc} I_{sc}$. Ec. 1. El valor máximo que puede tomar el factor de llenado es 1, también da una idea de la forma de la curva I-V de la celda fotovoltaica.

$$F_F = \frac{P_{mpp}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_{mpp} I_{mpp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1)$$

Eficiencia de celdas solares.

La eficiencia en una celda solar se calcula como la potencia máxima de salida que genera una celda solar a cierta irradiancia dividida entre la potencia de la irradiancia incidente, como se muestra en la Ec. 2. Despejando P_{mpp} de la Ec. 1 y sustituyendo en la Ec. 2 se obtiene la Ec. 3, la potencia de entrada depende de la irradiancia incidente y del área del material fotovoltaico en que incide la radiación para su conversión.

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{P_{in}} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} F_F}{\sigma A_{pv}} \quad (3)$$

Despejando la Ec. 3 se puede obtener la irradiancia solar incidente (Ec. 4), esta ecuación es útil para determinar la irradiancia solar con celdas solares de referencia calibradas.

$$\sigma = \frac{V_{oc} I_{sc} F_F}{\eta A_{pv}} \quad (4)$$

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez obtenida la celda solar base de CdTe, se realizaron pruebas en el simulador solar para encontrar las curvas I-V de la celda a diferentes niveles de radiación, esto con la finalidad de tener el comportamiento de nuestra CS en un ambiente controlado que simule los diferentes cambios de radiación que se presentan en el exterior, siendo el valor de 1.0 Soles el equivalente a 1000 W/m². Esto nos sirve como la base para tener la relación entre las CS y el comportamiento de un piranómetro calibrado

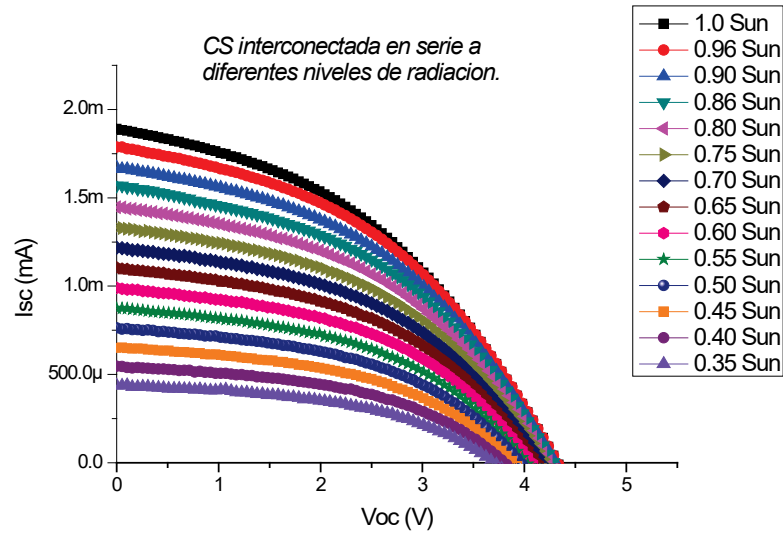


Figura 5. Mediciones celda solar (CS) a diferentes niveles de radiación.

Los primeros resultados obtenidos de las mediciones tomadas en la ciudad de México de la celda solar interconectada en serie y comparada con un piranómetro comercial marca EKO, son los siguientes:

Tabla 1. Mediciones día 27 de febrero 2020, celda solar y piranómetro EKO.

Hora	W/m ² Piranómetro	Voc Celda Solar (V)	Isc Celda Solar (mA)
10:30	745.5	3.340	1.617
10:40	751.0	3.460	1.559
10:50	777.9	3.546	1.723
11:00	797.0	3.724	1.842
11:10	835.0	3.634	1.857
11:20	846.0	3.755	1.747
11:30	856.0	3.718	1.767
11:40	840.4	3.770	1.878
11:50	906.6	3.740	1.933
12:00	941.8	3.855	2.021
12:10	941.9	3.791	2.143
12:20	910.8	3.770	1.847
12:30	889.7	3.792	1.82
12:40	926.3	3.739	1.984
12:50	901.6	3.776	1.946
13:00	932.5	3.802	1.919
13:10	923.6	3.874	2.044
13:20	920.9	3.845	2.077
13:30	913.9	3.905	2.029

Por medio de esta tabla podemos observar que al conectar nuestra CS en serie con una resistencia de carga obtenemos valores de voltaje y corriente que podemos correlacionar con el nivel de radiación presente a través de un piranómetro en nuestra zona de estudio, al haber un nivel bajo de radiación la respuesta tanto en voltaje como corriente es menor en comparación a cuando existe un nivel alto de radiación, lo que nos dice que tanto el voltaje en circuito abierto como la corriente en corto circuito son proporcionales al nivel de radiación.

Los datos obtenidos fueron graficados en el software Origin8 Pro, para encontrar la correlación lineal que hay entre los valores de irradiancia y el voltaje en circuito abierto, mediante una regresión lineal para encontrar nuestra R^2 , de esta forma encontramos la variación de nuestro voltaje de circuito abierto con respecto a la irradiancia medida.

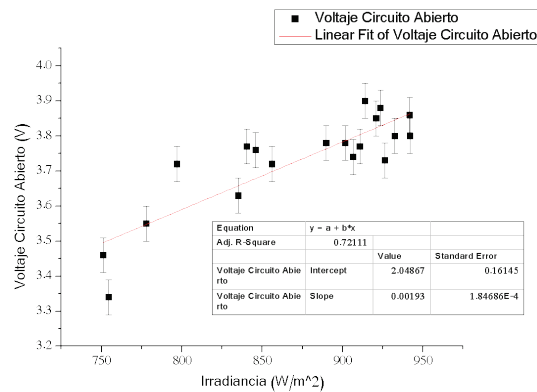


Figura 6. Relación radiación - voltaje del día 27 de febrero de 2020.

CONCLUSIONES

Una vez que obtuvimos la caracterización de la celda solar, con la ayuda del simulador solar se midieron los parámetros fotovoltaicos para comenzar a realizar las pruebas de interconexiones de nuestra celda solar (CS), esto con la finalidad de elegir la CS que mejor respuesta tuviera al momento de volver a medir estos parámetros. Dando como resultado que al interconectar la CS en serie la respuesta FV es mejor para los fines de este trabajo, ya que al utilizar el simulador solar y un piranómetro calibrado, tenemos que nuestra CS presenta respuestas que se pueden tomar dentro de una tabla de verdad que le asigne los valores de voltaje en circuito abierto para un cierto nivel de radiación, de esta forma podemos emular el trabajo del piranómetro con nuestra celda.

Se observa que la dependencia V vs Irradiancia es lineal creciente y el valor de R^2 muestra un comportamiento más alrededor de 0.75. Aunque; el trabajo aún se encuentra en proceso de caracterización podemos observar que la dependencia lineal puede asegurar la obtención de valores de radiación usando una celda solar de CdTe conociendo los valores de V_{oc} y I_{sc} que está genere.

AGRADECIMIENTOS.

Se agradece el apoyo otorgado a: Proyecto UACM 1er convocatoria de investigación del CCyT, equipo de trabajo del Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables de la UACM y en especial al proyecto 263488 del fondo SENER-CONACYT. De igual forma se brinda un agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento de los estudios de maestría, que fueron aprovechados para la realización de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

ASTM-E1036-15. (2019). Standard Test Methods for Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells.

ASTM-E2527. (2009). Standard Test Method for Electrical Performance of Concentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Systems under NATural Sunlight.

ASTM-E-490-00a. (2014). Standar Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectrak Irradiance.

ASTM-E-490-00a. (2014). Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables.

ASTM-G173-03. (2012). Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical Surface.

IEC-60904-3. (2019). Photovoltaic devices - Part 3: Measurment principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data.

IEC-62670-1. (2013). Photovoltaic concentrators (CPV)-Performance testing Part 1: Standar conditions.

PVEducation. (2019). Masa de aire. Obtenido de www.veducation.org.es/fotovoltaica/2-propiedades-de-la-luz-del-sol/masa-de-aire

Solargis. (2020). Global Solar Atlas. Obtenido de <https://globalsolaratlas.info/>

Systems, F. I. (2020). Photovoltaics Reports .