

## ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO, CASO DE ESTUDIO EN CHIHUAHUA CHIH.

Rivera Mejía José, Medina Rodríguez Vicente, Sánchez Mejía Ian F., Ruíz Acosta José Luis y Durán Merino Gilberto

Instituto Tecnológico de Chihuahua del Tecnológico Nacional de México

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Ave. Tecnológico No. 2909, Chihuahua Chih. C.P. 31310

Tel. (614) 201-2000 ext. 2114

[rrivera@itchihuahua.edu.mx](mailto:rrivera@itchihuahua.edu.mx), [vmedina@itchihuahua.edu.mx](mailto:vmedina@itchihuahua.edu.mx), [ifsanchezmejia@gmail.com](mailto:ifsanchezmejia@gmail.com),

[jruiz@itchihuahua.edu.mx](mailto:jruiz@itchihuahua.edu.mx), [gduran@ieee.org](mailto:gduran@ieee.org)

### RESUMEN.

En el presente trabajo se muestra un estudio de un módulo foto-voltaico y la selección de un modelo matemático. El modelo seleccionado es utilizado para simular un módulo foto-voltaico comercial. El módulo foto-voltaico es colocado en el techo de una casa habitación de la ciudad de Chihuahua Chih., para hacer el estudio real. Los parámetros de voltaje y corriente generados se miden utilizando una tarjeta de adquisición de datos comercial y se guardan en una base de datos. Los datos simulados y reales son comparados y se muestra como el modelo matemático seleccionado genera información confiable del desempeño del módulo foto-voltaico. El trabajo que aquí se presenta proporciona las bases para entender el comportamiento de un módulo PV y su eficiencia.

**Palabras Clave:** Arreglo Foto-voltaico, Sensores Inteligentes, Instrumentación, Adquisición de datos, Simulación.

### ABSTRACT.

*In this paper, we show the bases for performance understanding of photovoltaic module and their efficiency. The mathematic model selected is used to evaluate a commercial photovoltaic module. To real study, the photovoltaic array was placed on the ceiling of a home in the City of Chihuahua in Northern Mexico. The voltage and the current generated by the photovoltaic module were measured with a commercial Data Acquisition system and stored in a database. The simulated and real data were compared. The results demonstrate the reliability of the results of the mathematic model selected.*

**Keywords:** Photo Voltaic Módulo, Intelligent Sensors, Instrumentation, Data acquisition, Simulation.

### 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha cobrado gran importancia el uso de energías alternas en sustitución a las energías a base de fósiles como el petróleo. Principalmente el uso de energías como la eólica o fotovoltaica.

La tecnología solar fotovoltaica (*Solar photovoltaic Technologies*) también llamada celdas solares son dispositivos electrónicos que convierten la luz del sol a electricidad, *photo voltaic* (PV). La forma moderna de las celdas solares fue inventada en los laboratorios de telefonía Bell en 1954 [1].

Hoy en día la PV es una tecnología de energía renovable de un rápido crecimiento y se espera que jugará un mayor rol en el futuro global en la generación de electricidad [1].

Los sistemas solares PV también es una de las más democráticas tecnologías renovables, su tamaño modular está al alcance individual de cooperativas, pequeños negocios y de cualquiera que quiera su propia generación y bloquear el precio de la electricidad [1].

La tecnología PV ofrece significantes beneficios, incluyendo:

- La energía solar es una fuente renovable que está disponible en cualquier lugar del mundo.
- Las tecnologías PV son pequeñas y modulares y pueden ser utilizadas virtualmente en cualquier lugar, diferente a otras tecnologías de generación de electricidad.
- Diferente a las convencionales plantas de generación que usan carbón, energía nuclear, petróleo o gas. PV, no tiene costos de combustible, su operación y mantenimiento son relativamente bajos.
- PV, aunque sea variable, tiene una alta coincidencia con la demanda de la electricidad máxima para el enfriamiento en verano y durante todo el año en los países cálidos.

Un módulo PV consiste de celdas PV que son agrupadas para formar un módulo PV y componentes auxiliares (ejemplo: balance del sistema –BOF), inversor, controles, etc. Por lo que hoy en día hay un amplio rango de tecnología disponible de módulos PV en el mercado, utilizando diferentes tipos de materiales y un número mayor estará disponible en el futuro. Las celdas PV se pueden clasificar en tres generaciones dependiendo del material básico utilizado y el nivel de madurez comercial [1]:

- Primera generación de los sistemas PV. Totalmente comercial, utiliza la tecnología de silicio cristalino a base de obleas (c-Si) ya sea cristalino-único (sc-Si) o cristalino-múltiple (mc-Si).
- Segunda generación de sistemas PV. Recientemente aparecieron en el mercado, tecnología basada en películas-delgadas y generalmente incluyen tres familias: 1) Amorfas (a-Si), 2) Silicio\_micromorfo (a-Si/c-Si) y 3)

Cobre-Indio-Selenide (SIS) y la de Cobre-Indio\_Gallium-Diselenuro (CIGS).

- Incluyen tecnologías tales como concentrados PV (CPV) y celdas orgánicas PV. Aún están en la etapa de demostración y no han sido ampliamente comercializadas. Conceptos novedosos bajo desarrollo.

El modelado de una celda PV ha sido de gran interés en la investigación [2,3], de tal manera que a través del estudio del Voltaje (V) y la corriente (I) generado por una celda PV poder modelar su funcionamiento. De tal manera que se han hecho trabajos de tesis sobre este tema [4]. Propuestas de métodos para modelar arreglos de PV utilizando herramientas de simulación [5,6]. También se han abordado los temas del modelado de PV para evaluar el comportamiento eléctrico de un arreglo de PV con respecto a los cambios de temperatura e irradiación solar [7]. Lo anterior es una muestra de que se ha hecho mucha investigación teórica alrededor del modelado de los arreglos PV. Vemos como es una tecnología que ha evolucionado en los últimos años y que su aplicación es mayor en todos los países y en todos los sectores.

Por lo que es importante no dejar de lado y estar conscientes de los factores que afectan el comportamiento de los sistemas PV como: La variación de las características eléctricas de los sistemas PV, las variaciones de manufactura, la eficiencia del inversor, el acoplamiento inversor-arreglo PV, cables sueltos, la suciedad del arreglo (depende del lugar en que se instalen los arreglos PV), disponibilidad de arreglos y la disponibilidad de equipamiento para soportar la inactividad del sistema PV por fallas del equipo [8].

El presente trabajo está enfocado al estudio de un arreglo PV y la selección de un modelo matemático confiable para simular el desempeño de módulos fotovoltaicos comerciales y sentar las bases para diseño y monitoreo de arreglos PV a gran escala.

## 2. MODELO MATEMÁTICO DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA

Una celda solar es tradicionalmente representada por un circuito equivalente compuesto de una fuente de corriente, un diodo anti-paralelo, una resistencia en serie  $R_s$  y una resistencia en derivación (*shunt*),  $R_{sh}$ . Como se muestra en la Figura 1 [9 y 10]:

De la Figura 1 obtenemos que el valor de la corriente  $I$  está determinado por la ley de Kirchhoff para corrientes, de la forma:

$$I = I_L - I_D - I_{Sh} \quad (1)$$

La corriente en el diodo es:

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) \quad (2)$$

donde:

$I_0$ : es la corriente saturación en inversa.

$n$ : es el factor de idealidad del diodo, aprox. 1.2.

$q$ : es la carga del electrón ( $1.602 \times 10^{-19}$  C).

$k$ : es la constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/°K).

$T$ : es la temperatura de la celda en °K.

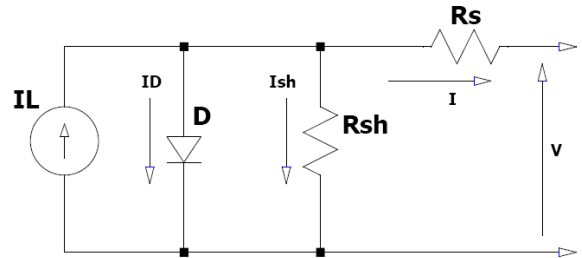


Figura 1.- Circuito equivalente de una celda fotovoltaica.

La corriente en la resistencia  $R_{Sh}$

$$I_{Sh} = \frac{IR_s + V}{R_{Sh}} \quad (3)$$

Sustituyendo la Ecc.(2) y Ecc.(3) en la Ecc.(1)

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{IR_s + V}{R_{Sh}} \quad (4)$$

La fotocorriente  $I_L$  y la corriente de saturación  $I_0$  en función de la temperatura esta definida como:

$$I_L = I_L(T_1) + K_0(T - T_1) \quad (5)$$

donde:

$$I_L(T_1) = I_{sc}(T_{1,nom}) \frac{G}{G_{nom}}$$

y

$$K_0 = \frac{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)}{(T_2 - T_1)}$$

La corriente de saturación del diodo  $I_0$  [9]:

$$I_0 = I_0(T_1) \left( \frac{T}{T_1} \right)^3 e^{\left( \frac{qE_g}{nk} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T} \right) \right)} \quad (6)$$

$$X_n = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \quad (9)$$

donde  $E_g$  es la energía del ancho de banda [eV], definen el valor de  $E_g$  para el silicio como [11]:

$$E_g = 1.16 - 7.02 \times 10^{-4} \left( \frac{T^2}{T - 1108} \right) \quad (7)$$

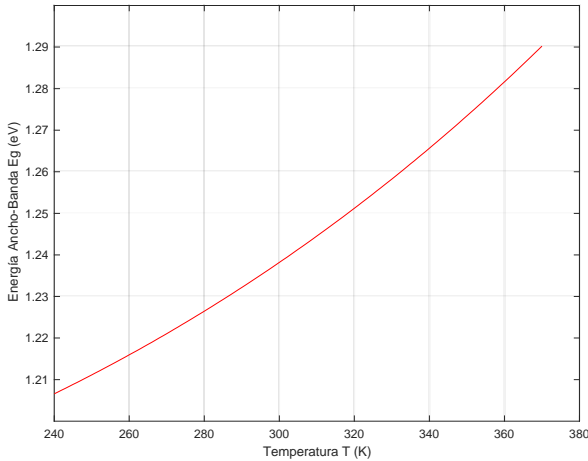


Figura 2.- Voltaje  $E_g$  contra variaciones de  $T$ .

e

$$I_0(T_1) = \frac{I_{sc}(T_1)}{\left( \frac{e^{qV_{oc}(T_1)}}{nkT_1} - 1 \right)}$$

La resistencia en serie  $R_s$  la cual representa la resistencia dentro de cada celda en la conexión entre celdas:

$$R_s = - \frac{dV}{dI_{V_{oc}}} - \frac{1}{X_V} \quad (8)$$

$$X_V = I_0(T_1) \frac{q}{nkT_1} e^{\frac{qV_{oc}(T_1)}{nkT_1}} - \frac{1}{X_V}$$

Se considera la  $R_{sh} = \infty$  [12].

Por medio del método de Newton-Raphson o método de Newton dado un valor de  $V_n$  se obtiene un valor de  $I_n$  y se puede estimar el valor de  $I_{n+1}$ , por medio de la ecuación:

Así estamos ya en condiciones de generar las curvas características de un PV relacionando la I-V a distintas temperaturas o a distintas radiaciones y analizar el desempeño de un módulo PV.

Antes de la simulación de acuerdo con el modelo matemático seleccionado es necesario realizar algunos razonamientos en los que con base a las características eléctricas proporcionadas por el fabricante podamos resolver las ecuaciones antes presentadas.

En la Figura 3. se muestra la relación típica de Voltaje-Corriente de una celda PV, basado en el modelo matemático antes descrito. Y analizando esta respuesta podemos hacer las siguientes consideraciones [13]:

a) **Corriente a Corto-Circuito ( $I_{sc}$ )**. Esta es el valor de la mayor corriente generada por la celda. Corriente producida por las condiciones de corto circuito, en el que matemáticamente se cumple:

$$V = 0 \quad \text{ó} \quad V_{PV} = 0$$

b) **Voltaje a Circuito-Abierto ( $V_{oc}$ )**. En estas condiciones  $I = 0$  y se representa matemáticamente como:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left[ \frac{I_L}{I_0} \right] = V_t \ln \left[ \frac{I_L}{I_0} \right] \quad (10)$$

donde:

$$V_t = \frac{nkT}{q}$$

c) **Potencia Máxima ( $P_{max}$  ó  $MPP$ )**. Es la máxima potencia disipada en la carga y se define como:

$$P_{max} = V_{max} I_{max} \quad (11)$$

$$V_{max} \approx 0.8V_{oc}$$

$$I_{max} \approx 0.8I_{sc}$$

d) **Eficiencia Máxima ( $\eta$ )**. Es la relación entre la potencia máxima y la potencia de luz incidente:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{max} I_{max}}{AG_a} \quad (12)$$

donde  $A$  es el área de la celda y  $G_a$  es la radiación ambiental.

e) **Factor de Llenado ( $Fill\ factor$ ), ( $FF$ )**. Es la relación de la máxima potencia que puede alimentarse a la carga y el producto entre  $V_{oc}$  y  $I_{sc}$ :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{V_{max}I_{max}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (13)$$

El factor de llenado es una medición real de la característica V-I, con un valor más alto de 0.7 define una buena celda. Este valor decrece con la temperatura de la celda.

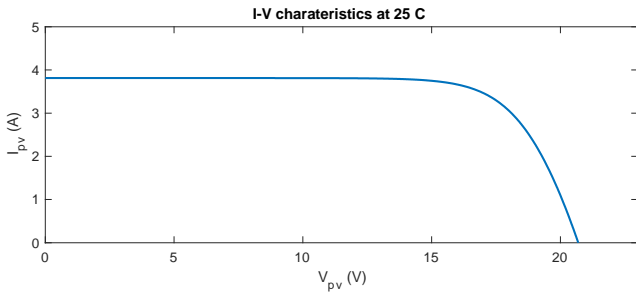


Figura 3. Curva característica de la relación V-I en una celda o un módulo PV.

### 3. SIMULACIÓN DEL DESEMPEÑO DE CELDAS BAJO ESTUDIO

Para el caso de estudio se utilizó un módulo PV de la marca CONERMEX JW-S13 con las siguientes características proporcionadas por el fabricante:  $P_{max}=13\text{ W}$ ,  $V_{oc}=21.1\text{ V}$ ,  $I_{sc}=0.894\text{ A}$ ,  $V_{pmax}=16.8\text{ V}$ ,  $I_{pmax}=0.798\text{ A}$  y 32 celdas. Utilizando MatLab se programó el modelo estudiado en la sección anterior y en la Figura 4 se muestra la relación voltaje-corriente del módulo PV a diferentes temperaturas y en la Figura 5 se muestra la relación voltaje-corriente para distintas radiaciones solares. En la parte superior izquierda se puede seleccionar el modelo del módulo PV a simular. Los parámetros para la simulación se obtienen a partir de la hoja de especificaciones que proporciona el fabricante.

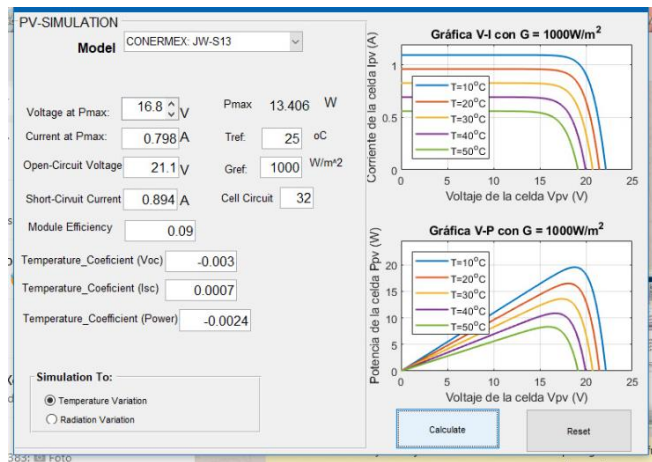


Figura 4. Resultados de la simulación del panel PV (JW-S13) a cambios de temperatura.

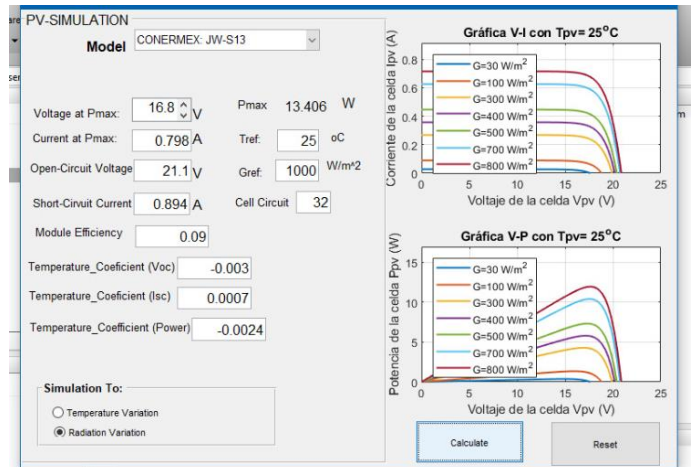


Figura 5. Resultados de la simulación del panel PV (JW-S13) a cambios de radiación solar.

### 4. PRUEBA FÍSICA DE LA CELDA FOTOVOLTAICA

Para la prueba física del módulo PV se utilizó una tarjeta USB-6009 de la marca *National Instruments*, en modo diferencial se mide el voltaje de la celda y utilizando una resistencia  $R_{sc}$  de 2 ohms se mide la caída de voltaje en la resistencia y se calcula la corriente. Para el monitoreo de los parámetros se desarrolló un programa en LabWindows/CVI que cada diez segundos toma los valores de voltaje y corriente para calcular la potencia generada y guardar los datos en un archivo tipo texto. Para la carga del módulo PV se utilizó un regulador de 12Vdc el LM7812, al que se le conectaron dos focos LED de 4 W cada uno. Los valores de la radiación solar y la temperatura ambiente se obtuvieron del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA), de la estación de monitoreo Chihuahua Centro [14]. El circuito de prueba se muestra en la Figura 6.

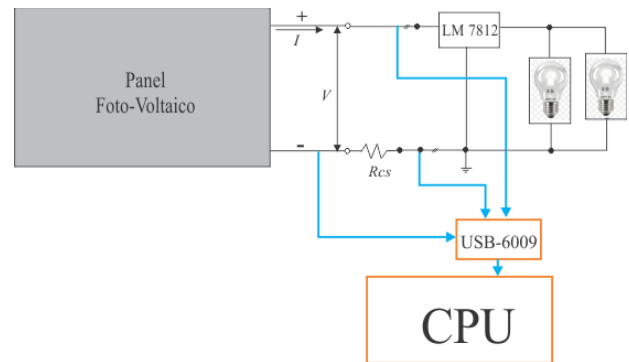


Figura 6. Circuito para prueba funcional de un panel PV (JW-S13).

Con los datos registrados de voltaje, corriente y radiación solar se realizaron las graficas que se muestran en las Figuras 7 y 8.

Estas graficas se realizaron en HTML y Javascript permitiendo visualizarlas en cualquier dispositivo inteligente.

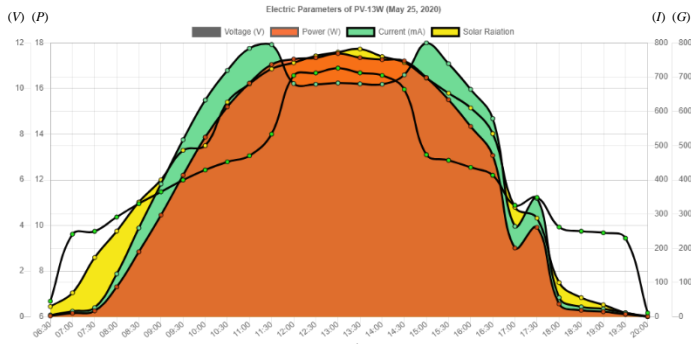


Figura 7. Resultado de la prueba eléctrica del panel PV (JW-S13, 25 de mayo 2020).

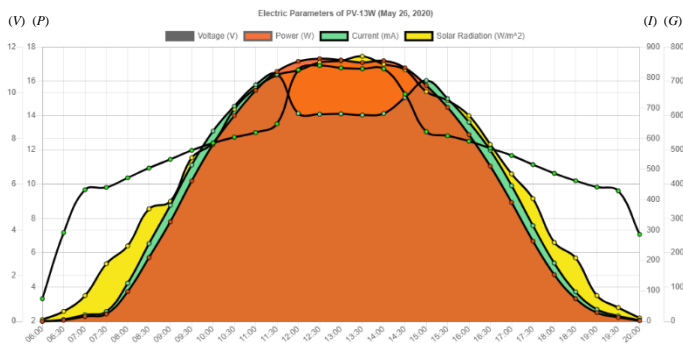


Figura 8. Resultado de la prueba eléctrica del panel PV (JW-S13, 26 de mayo 2020).

Evaluando los resultados prácticos del circuito de prueba que se almacenaron los días 25 y 26 de mayo del 2020 y utilizando la Ecuación 12 se obtuvo la eficiencia de panel PV, JW-S3. Los resultados se muestran en la Figura 9.

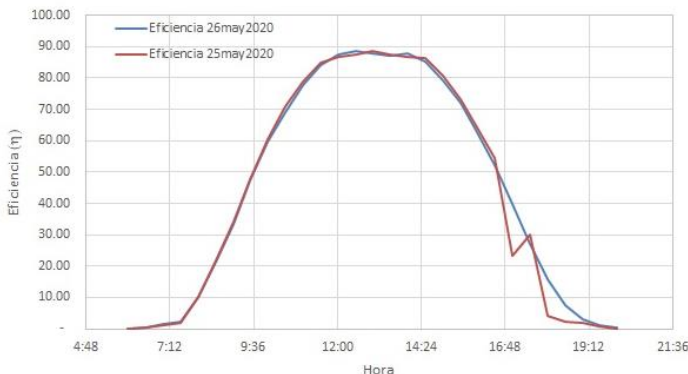


Figura 9. Eficiencia del Panel PV de los días 25 y 26 de mayo 2020)

## ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las gráficas de las Figuras 7 y 8 muestran el comportamiento de generación de energía del módulo PV en dos días diferentes en la ciudad de Chihuahua. En la Figura 7 se muestra en el extremo derecho de la gráfica una variación debido a que se presentaron nublados intermitentes. En la Figura 8 se muestra el comportamiento del módulo PV un día soleado y sin nubes.

Se puede observar una similitud resultados de la Figura 5 con los de las Figuras 7 y 8 entre los datos de  $I$  y  $V$  obtenidos con el modelo de simulación y los resultados prácticos. También se observa que efectivamente la eficiencia del módulo está en función de la radiación solar y vemos que en estas fechas de acuerdo a datos del SINACA [14] fue de aproximadamente  $29 \text{ w/m}^2$  la radiación mínima y  $755 \text{ w/m}^2$  la radiación máxima. La radiación máxima se muestra aproximadamente a las 11:00 am. Por medio de la Ecuación 12 se calculó la eficiencia ( $\eta$ ) del panel PV como se muestra en la Figura 9, por lo cual podemos confirmar que la eficiencia de las celdas solares esta directamente ligada a la radiación solar. Podemos observar que se obtiene una eficiencia arriba del 50% entre las 9:30 am y las 16:30pm, y una eficiencia arriba del 80% de las 11:00 am a las 15:00 pm. La influencia de las nubes la podemos observar a la derecha de la curva, la eficiencia del módulo PV disminuye con la presencia de las nubes. Con esta información comprobamos que este tipo de energía se puede utilizar de forma confiable, tomando en cuenta las condiciones que afectan su eficiencia, como la radiación, la presencia de las nubes y la contaminación del lugar donde se instalen.

Con el trabajo aquí presentado se pueden hacer las siguientes conclusiones.

- Se desarrolló un estudio preliminar de distintos modelos matemáticos disponibles para modelar una celda PV.
- El modelo matemático seleccionado genera información confiable para determinar las características de un módulo PV a partir de las especificaciones del fabricante. Los datos de simulación coinciden con los resultados prácticos obtenidos.
- El circuito práctico de prueba fue seleccionado y probado en casa, con herramientas y equipo limitado por las medidas de confinamiento a causa del COVID-19. Sin embargo, cumple con los resultados esperados.
- El estudio de la eficiencia en la generación de energía de los paneles o módulos PV es necesario que se haga de manera continua. Ya que además de lo señalado la eficiencia en la generación puede disminuir por las condiciones ambientales del lugar donde se instalen como el polvo y la fauna. Además, los fabricantes establecen características de eficiencia

- El uso de esta tecnología es redituable en el norte de nuestro país, ya que se cuenta con el territorio suficiente para su instalación, muchas horas de sol y desafortunadamente con pocos días nublados o de lluvia.
- Con este trabajo se sientan las bases para el desarrollo de un sensor inteligente que pueda utilizarse para el monitoreo de arreglos PV de gran escala y poder determinar su eficiencia en tiempo real. Garantizando el funcionamiento óptimo de un arreglo PV.

## 6. REFERENCIAS.

- [1] International Renewable Energy Agency, Solar Photovoltaics, Volume 1: Power sector, issue 4/5, 2012.
- [2] H. Tian, D.F. Mancilla, K. Ellis, P. Jenkins and Muljadi, A Detailed Performance Model for Photovoltaic Systems, National Renewable Laboratory, Oak Ridge U.S.A., Jul. 2012.
- [3] A. Zekry, A. Shaker and M. Salem, Solar Cells and Arrays: principles, Analysis and Design, ELSEVIER 2018.
- [4] B. Mishra and B. K. Kar, Matlab Based Modeling of Photovoltaic Array Characteristics, Bachelor dissertation, dept. Elect. Ing., National Institute of Technology, Rourkela India, 2012.
- [5] V.M. Gradella, G.J. Rafael and F.E. Ruppert, Comprehensive Approach to Modelig and Simulation of Photovoltaic Arrays, IEEE Trans. Power Electron, Vol.24, No.5, pp. 1198-1208, May 2009.
- [6] S. Dhar, R. Sridhar and V. Avasthy, Modeling and Simulation of Photovoltaic Array, in Proc. 17th National Power Systems Conference (NOSC-2012), Varanasi, Uttar Pradesh, India, 2012, pp. 1-5.
- [7] A. Ahlawat, D. Gupta and S.K. Gupta, Modeling of a PV Array & Implementation of an Efficient MPPT Based Control Mechanism in Stand-Alone Photovoltaic Systems, J Circuits Syst., Vol.5, No.2, pp. 51-61, May 2017.
- [8] Guide to the Installation of Photovoltaic Systems, Microgeneration Certification Scheme, London 2012.
- [9] M.B. Eteiba, E.T. El Shenawy, J.H. Shazly and A.Z. Hafez, A Photovoltaic (Cell, Module, Array) Simulation and Monitoring Model Using MATLAB/GUI Interface, Int. J. Comput. Appl., Vol. 69, No. 6, pp 14-28, May. 2013.
- [10] A.O. Awodugba, Y.K. Sanusi and J.O. Ajayi, Photovoltaic Solar Cell Simulation of Shockley Diode Parameters in Matlab, Int. J. Phys. Sci., Vol.8, No.22, Jun. 2013. F.M.
- [11] H. Tian, F. Mancilla-David, K. Ellis and E. Muljadi, A Detail Performance Model for Photovoltaic System, National Renewable Laboratory, pp. 1-54, Jul. 2012.
- [12] M.N. Akram and S. Lotfifard, Modeling and Health Monitoring of DC Side of Photovoltaic Array, IEE Trans. Sustain. Energy, Vol.6, No4, pp.1245-1253, Oct. 2015.
- [13] González-Longatt, Model of Photovoltaic Module in MatlabTM, II CIBELEC'2015, 2do Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Mérida Venezuela, 2015, pp1-5.
- [14] Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA), <https://sinaica.inecc.gob.mx/>