

DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE UNA CELDA SOLAR Y SU ANALISIS COMPARATIVO CON EL MODELO DE UN SOLO DIODO MEDIANTE SIMULACION EN LTSPICE

José A. Rodríguez Cruz, Roberto C. Ambrosio Lázaro, Víctor R. González Díaz

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 4 sur 104, Puebla, Puebla, 72570, México, 222 229 5500 antonio.rodriguezcr@alumno.buap.mx, roberto.ambrosio@correo.buap.mx, vicrodolfo.gonzalez@correo.buap.mx

Johan J. Estrada López

Facultad de Matemáticas, Universidad Autónoma de Yucatán, Calle 60 491A, Parque santa Lucia, Mérida, Yucatán, 97000, México, 999 930 0900, johan.estrada@correo.uady.mx.

RESUMEN

Actualmente, la energía solar se considera una alternativa de energías renovables prometedora para producir energía eléctrica limpia, sin embargo, algunos de los obstáculos que se presentan durante su análisis es obtener y mantener su eficiencia ante diferentes escenarios del clima. Este estudio presenta el análisis de una celda solar comercial que hace uso del modelo matemático Single-Diode debido a que se pueden deducir los 5 parámetros principales a partir de las curvas características de corriente-voltaje y potencia-voltaje. De esta forma se obtienen, analizan y comparan los parámetros y curvas características de manera experimental y a nivel simulación utilizando el instrumento de medición Model 2450 de Keithley, el software OriginPro y Matlab y el simulador LTSpice de Linear Technology, obteniendo un margen de error mínimo del 8.6% y máximo del 24.5% entre simulación y medición.

ABSTRACT

Currently, solar energy is considered a promising renewable energy alternative to produce clean electrical energy, however, some of the obstacles that arise during its analysis are obtaining and maintaining its efficiency in different climate scenarios. This study presents the analysis of a commercial solar cell that makes use of the single diode mathematical model because the 5 main parameters can be deduced from the current-voltage and power-voltage curves. In this way, the parameters and characteristics are obtained, analyzed and compared in an experimental and simulation level using the Keithley Model 2450 measuring instrument, the OriginPro and Matlab software and the Linear Technology LTSpice simulator, obtaining a minimum margin of error of 8.6% and a maximum of 24.5% between simulation and measurement.

Palabras claves: Celda solar, curvas características, eficiencia, circuito solar equivalente, Matlab, LTSpice, Resistencia R_s , Resistencia R_{sh} , Recolección de energía, Energía Renovables.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas fotovoltaicos convierten la energía solar en energía eléctrica aprovechando el recurso aparentemente inagotable del sol, haciendo de este sector uno de los de mayor crecimiento a nivel mundial. La importancia de la energía solar hace necesario el uso de herramientas que permitan diseñar y analizar el comportamiento de las celdas solares bajo diferentes condiciones de irradiación y temperatura [1]. La curva característica I-V es una ecuación no lineal con múltiples parámetros clasificados de la siguiente manera: 1) los proporcionados por los constructores, 2) los conocidos como constantes y 3) los que deben calcularse. Algunos grupos de investigación desarrollan métodos simplificados en los que no se pueden calcular algunos parámetros desconocidos; Por lo tanto, se suponen como constantes. Por ejemplo, en [6] se incluye la resistencia en serie (R_s), pero no la resistencia en paralelo (R_{sh}) para un modelo de complejidad moderada al considerar la resistencia paralela (R_{sh}) muy grande. Otros autores descuidan las resistencias tanto R_{sh} como R_s ; la primera por ser muy grande y la segunda por ser muy pequeña. Por otro lado, existen otros trabajos en la literatura, en los que estas dos características internas de una celda solar son muy importantes y deben ser determinadas con mayor precisión. Además de R_s y R_{sh} algunos autores sugieren que se deben determinar otros parámetros importantes como I_0 es la fotocorriente (I_{ph}), la corriente de saturación (I_0) y el factor de idealidad (n) [2].

Por otro lado, en algunas ocasiones las hojas de datos de las celdas solares que los fabricantes proporcionan al usuario no disponen de suficiente información sobre los parámetros que dependen de la irradiancia y la temperatura, por lo que en algunos supuestos con respecto a la naturaleza física del comportamiento de la celda solar son necesarios para establecer un modelo matemático [2]. Varios autores han desarrollado y diseñado distintos modelos fotovoltaicos, al igual que los han simulado con ayuda de herramientas computacionales como MatLab/Simulink o LTSpice para analizar y comprender la eficiencia que pueden proporcionar. El modelado y simulación de dispositivos fotovoltaicos para conocer su comportamiento representan una parte importante de la investigación actual en el campo de la energía solar. Las simulaciones permiten la optimización del diseño de paneles solares y sistemas de energía solar sin experimentos costosos, en cambio, el modelado con un circuito equivalente es de particular interés, porque permite la simulación conjunta de un dispositivo fotoeléctrico con electrónica periférica. La topología de circuito equivalente elegida correctamente es una parte muy importante del

proceso de modelado, pero igualmente importante es la metodología correcta para extraer el conjunto óptimo de parámetros de circuito equivalente que caracterizan al dispositivo específico [4].

En este trabajo se presenta, la determinación de los parámetros de desempeño y su correlación con el modelo eléctrico de una celda solar bajo diferentes condiciones de operación usando el software Matlab y LTSpice. De esta manera se presenta una metodología de caracterización, la determinación y su comparación con el modelo de simulación.

2. DESARROLLO DE METODOLOGIA Y ANTECEDENTES TEÓRICOS

El circuito equivalente de una celda solar consta del modelo matemático ideal de un diodo clásico de unión p-n. El circuito más común para analizar el trabajo y comportamiento de las celdas solares es el modelo de diodo único (single-diode) o también conocido como 1M5P (One Machine Five Parameter) que se muestra en la Figura 1.

Aplicando la ley de voltaje y corriente de Kirchhoff al circuito de la Figura 1 con una iluminación dada, se puede deducir la corriente generada (I_{cel}) por el panel solar, como se muestra en las ecuaciones (1) y (2) [1, 5]. La fuente I_{ph} es la corriente fotogenerada a un valor fijo de radiación solar, la resistencia Shunt (R_{sh}) representa la pérdida por corriente de fuga, la resistencia en serie (R_s) se utiliza para representar la caída de voltaje a la salida aunque también se menciona que ésta si afecta significativamente el comportamiento de la celda y la resistencia de carga (R_L) que representa la carga usada para la medición [1]. Además, I_d es la corriente del diodo ideal, I_{sh} es la corriente de fuga en la resistencia shunt, I_0 es la corriente de saturación de polarización inversa del diodo, q es la carga del electrón ($1,6 \times 10^{-19}$ C), V es el voltaje de la celda solar, K_B es la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), T es la temperatura de operación de la celda y n es el factor de idealidad.

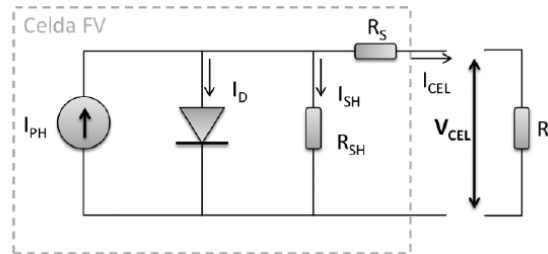


Figura 1. Circuito equivalente de un panel solar [1].

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

$$I_{cel} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V + R_s I_{cel})}{n K_B T}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I_{cel}}{R_{sh}} \quad (2)$$

La corriente fotogenerada varía en función de la radiación solar y la temperatura de la celda presentes en la medición [1, 2]. No es fácil determinar los parámetros de la ecuación (2) que corresponden a la característica intrínseca de la construcción de celdas solares, pero este modelo ofrece la mejor combinación con valores experimentales. Estos parámetros se pueden extraer utilizando la técnica de ajuste no lineal en una sola curva I-V [5].

La R_s representa la resistencia total de la celda y es un compuesto de: 1) la resistencia interfacial y la resistencia de la capa activa, 2) las resistencias de los electrodos y 3) las diversas resistencias de contacto e interconexión. La R_{sh} representa la unión p-n de la celda solar. En conjunto R_s y R_{sh} corresponden al factor de llenado (FF) de conversión de energía en la celda solar como se muestra en la ecuación (3) [2, 5]. El factor de llenado (FF) es un parámetro que junto con el V_{oc} e I_{sc} determina la potencia máxima de una celda solar, es decir, está relacionado con la eficiencia [7].

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{cs} V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{cs} V_{oc}} \quad (3)$$

Los parámetros intrínsecos de la celda solar se pueden extraer de cualquier método, como un método manual con aproximación del factor de idealidad. La Figura 2 muestra cómo determinar R_s y R_{sh} a partir de la pendiente inversa cerca de V_{oc} e I_{sc} respectivamente, para calcular R_s se fija un punto (P) sobre la pendiente respecto a V_{oc} y para calcular R_{sh} se fija un punto (P) sobre la pendiente respecto a I_{sc} . Al utilizar esta técnica, no se han encontrado otros parámetros, como I_{ph} , I_0 y n . Cabe mencionar que disminuyendo R_s hace que I_{sc} y V_{max} aumenten, y aumentando R_{sh} hace que I_{max} y V_{oc} aumenten, por lo que, a partir de este supuesto, muchos investigadores desarrollan celdas solares a través de la variación de R_s y R_{sh} [5].

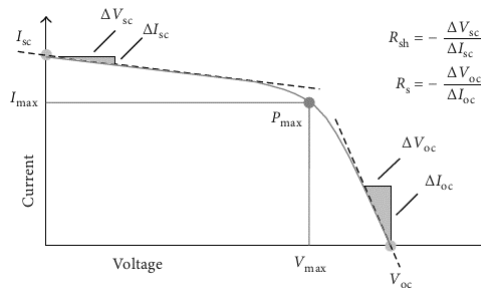


Figura 2. Extracción de la resistencia en serie y shunt a partir de la curva I-V bajo iluminación [5].

Una vez calcula la resistencia R_s y R_{sh} se puede calcular la corriente fotogenerada (I_{ph}) mediante la ecuación (4) la cual se considera ligeramente equivalente a la I_{sc} [3].

$$I_{ph} = \left(\frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} \right) I_{sc} \quad (4)$$

En [3] menciona que a partir del modelo single-diode o 1M5P se pueden deducir fácilmente las curvas características (I-V y P-V) calculando los cinco parámetros desconocidos que en la mayoría de los puntos de cortocircuito, circuito abierto y máxima potencia se incluyen en la hoja de datos de las celdas solares como se ilustra en la Fig.3.

La I_{sc} y el V_{oc} son los máximos valores de corriente y voltaje que se pueden extraer de una celda solar, sin embargo, en estos puntos de operación la potencia es cero. Por ellos es necesario encontrar un punto de la curva I-V en donde el producto tenga un máximo valor. En la Figura 3 se muestra que este punto corresponde al máximo punto de potencia que la celda puede entregar, es decir, hay un voltaje de máxima potencia (V_{mp}) y una corriente de máxima potencia (I_{mp}).

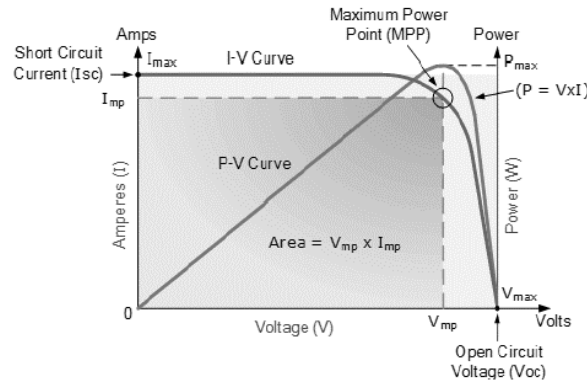


Figura 3. Curvas características I-V y P-V de una celda solar típica [3].

La eficiencia de conversión de la celda solar se define como la razón de la potencia eléctrica máxima que suministra la celda entre la potencia de la radiación solar (P_{in}) que incide sobre ésta multiplicada por el área (A) de la celda como se muestra en la ecuación (5). La potencia de entrada de la radiación solar para cálculos de eficiencia se considera como $1 \frac{KW}{m^2}$ o $100 \frac{mW}{cm^2}$ [7].

$$\eta = \frac{I_{mp} V_{mp}}{P_{in} A} = \left(\frac{I_{sc} V_{oc}}{P_{in} A} \right) FF \quad (5)$$

3. METODOS Y MATERIALES

La metodología se dividió en tres fases. Primero, la recolección de datos de potencia de una celda solar utilizando un instrumento de medición y un algoritmo en Matlab para la generación de gráficas experimentales; Segundo, el tratamiento que se hizo a los datos obtenidos para ser empleados en la simulación en LTSpice; Tercero, la comparación y el análisis de resultados de los datos experimentales y simulados.

3.1. Recolección De Datos

Para iniciar el análisis se procede a conectar la celda solar con dimensiones de 5.6cm x 6cm con el instrumento de medición Model 2450 Source Meter de Keithley como se muestra en la Figura 4 para realizar las mediciones necesarias a diferentes horas del día obteniendo los parámetros bajo iluminación y de esta manera obtener las curvas I-V y P-V respectivamente. Con los datos que se recaban y con ayuda de la Figura 3 se identifican los cinco parámetros principales como: V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp} y P_{mp} . Para calcular y determinar los parámetros de FF, η , I_{ph} , R_s , y R_{sh} se implementa un algoritmo en Matlab el cual se muestra en la Figura 6.

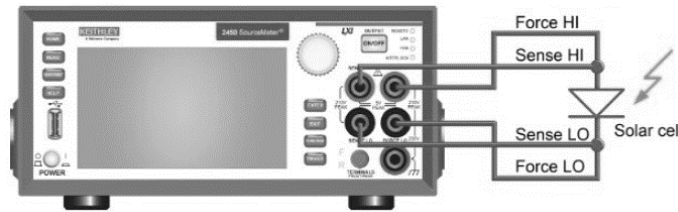


Figura 4. Conexión de una celda solar al instrumento de medición Model 2450.

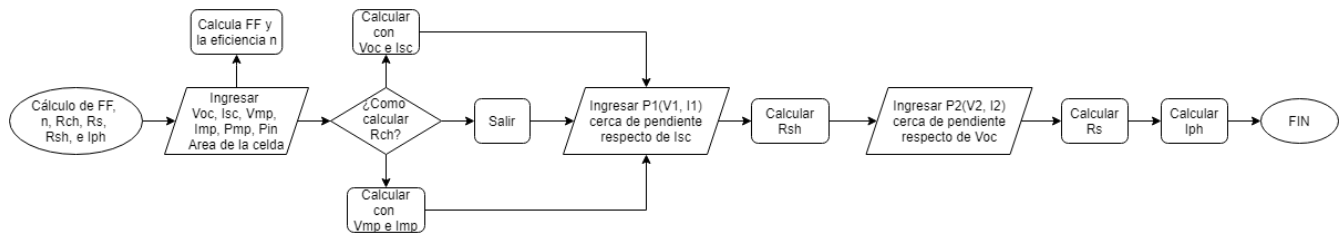


Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo que se implementó en Matlab.

La Tabla 1 muestra las características eléctricas de la celda solar las cuales se obtuvieron a partir de la caracterización realizada y que se utilizaron al momento de simular el comportamiento de la celda solar mediante el circuito equivalente de la Figura 1.

Tabla 1. Parámetros obtenidos de la caracterización de una celda solar comercial.

CELDA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
HORA	11:40	12:10	12:11	12:12	12:35	12:50	13:15	13:40	14:00
V_{max} [V]	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.4	2.4	2.6	2.4
I_{max} [mA]	63.1	91.3	18.0	15.2	21.6	21.1	22.5	92.3	20.1
P_{max} [mW]	157.7	228.4	36.1	30.5	54.0	50.8	53.9	239.9	48.4
V_{oc} [V]	3.2	3.2	2.8	2.8	3	3.1	3.2	3.4	3.1
I_{sc} [mA]	72.9	104.7	19.8	16.8	28.2	24.6	25.4	101.8	23.4
Area de celda [cm ²]	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6
P_{in} [mW/cm ²]	100	100	100	100	100	100	100	100	100
FF [%]	67.5	68.1	64.9	64.6	63.7	66.5	66.2	69.3	66.7
Eficiencia [%]	4.7	6.8	1	0.9	1.6	1.5	1.6	7.1	1.4
R_s [Ω]		3.8						4.5	
R_{sh} [Ω]		968						1160.1	
I_{ph} [mA]		105.11101						102.19488	

3.2. Tratamiento De Datos

El tratamiento de la información implicó tomar mediciones en diferentes horarios de 11:00 am a 2:00 pm donde cabe mencionar que entre ese intervalo del día se encuentra la radiación solar más alta en la ciudad de Puebla, México. Con ayuda de la herramienta computacional OriginPro versión 8.5 se obtuvieron los datos de Excel para obtener las curvas I-V y P-V de las mediciones que mostraron tener una mayor eficiencia que el resto de las mediciones. Estas curvas se muestran en la Figura 6a y 6b respectivamente.

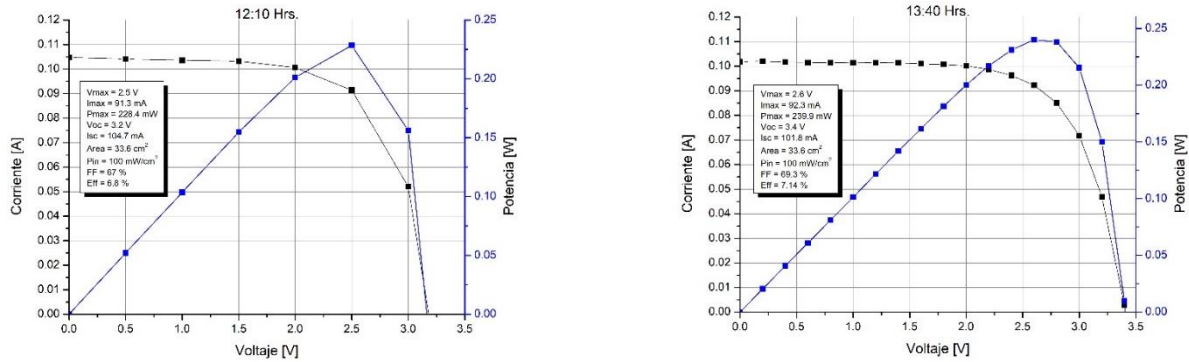


Figura 6. a) Curvas Características de 12:10 HR. b) Curvas características de 13:40 HR.

3.3. Simulación y Análisis de Celda Solar

Utilizando el software LTSpice, se consiguió simular el comportamiento de la celda solar utilizando el diagrama eléctrico de la Figura 1 el cual consta del modelo matemático ideal con un diodo clásico de unión p-n que por medio del efecto fotoeléctrico convierte la radiación solar en energía eléctrica junto con componentes electrónicos como fuentes y elementos resistivos que emulan las pérdidas que se presentan en un entorno real. La Figura 7 muestra el modelo eléctrico que se utilizó para obtener el comportamiento de la celda solar y en la Figura 8 se muestran las curvas características que mostraron tener una mejor eficiencia. Un punto importante es que para todas las mediciones realizadas en diferentes horarios se asume la misma irradiación solar, por lo que para para obtener las curvas I-V y P-V se asume lo mismo realizando un barrido en DC.

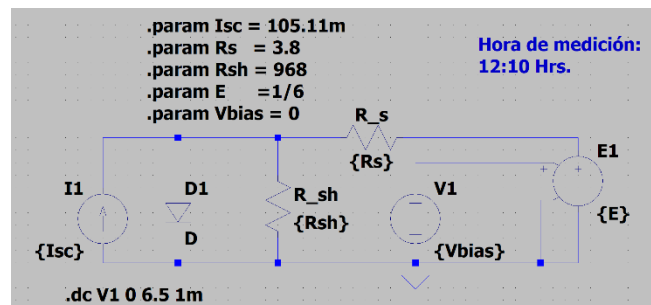


Figura 7. Modelo eléctrico single-diode de una celda solar en LTSpice.

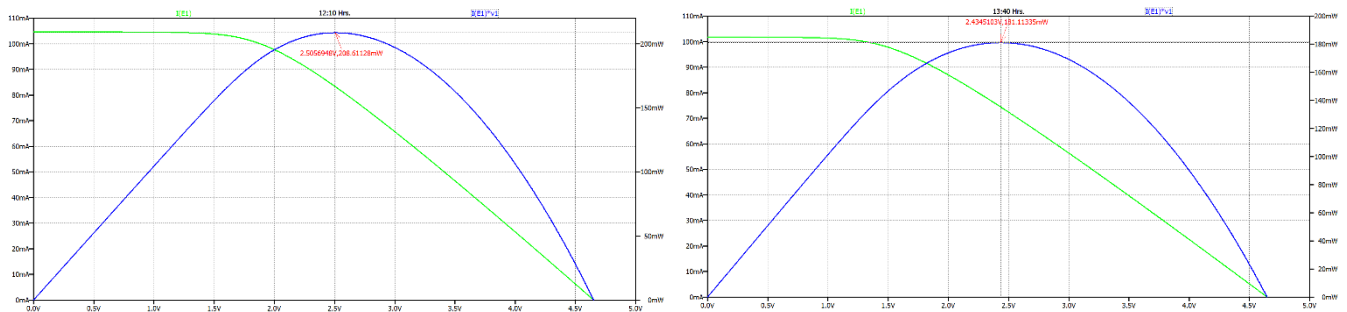


Figura 8. Curvas características I-V y P-V de a) las 12:10 hrs. y b) las 13:40 hrs.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las gráficas I-V y P-V que se obtuvieron en las simulaciones con respecto a las mediciones que se realizaron, no fueron en su totalidad iguales, pero sí parecidas porque se obtuvieron valores aproximados de V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp} y P_{mp} , inclusive se realizó el cálculo manual de obtener la potencia máxima con un factor del 70% y 80% obteniendo resultados tolerables. Estos márgenes de error o desvíos se pueden producir debido a la resistencia parasita que generan las conexiones con los instrumentos de medición que se utilizan, ya que se considera que la resistencia en serie calculada resulto grande a pesar de ser relativamente en el rango de Ohms, de lo contrario, esta pudo haberse obtenido en un rango menor.

5. CONCLUSIONES

En el estudio presentado del análisis de una celda solar comercial se realizaron las pruebas de campo necesarias bajo condiciones de irradiancia para obtener las curvas características y con la implementación de un algoritmo en Matlab obtener los parámetros de desempeño. Utilizando los parámetros recabados y utilizando el modelo matemático implementado en el software LTSpice se obtuvieron las curvas simuladas que se compararon con las curvas que se obtuvieron de manera experimental.

En el análisis para determinar la eficiencia que tiene la celda solar se utilizaron las mediciones que mostraron tener un mejor rendimiento que corresponden a las 12:10 HRS. y 13:40 HRS. obteniendo un 6.8% y 7.1% respectivamente.

REFERENCIAS

- [1] Vera-Dávila, A. G., Delgado- Ariza, J. C., & Sepúlveda-Mora, S. B. (2018). Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab. *Rev. investig. desarro. innov*, 8(2), 343-356.
- [2] Bellia, H., Youcef, R., & Fatima, M. (2014). A detailed modeling of photovoltaic module using ATLAB. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 3(1), 53-61.
- [3] Afghan, S. A., Almusawi, H., & Geza, H. (2017). Simulating the electrical characteristics of a photovoltaic cell based on a single-diode equivalent circuit model. In *MATEC Web of Conferences*, Vol. 126, p. 03002.
- [4] Lineykin, S., Averbukh, M., & Kuperman, A. (2012). Five-parameter model of photovoltaic cell based on STC data and dimensionless. In *2012 IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, pp. 1-5.
- [5] Diantoro, M., Suprayogi, T., Hidayat, A., Taufiq, A., Fuad, A., & Suryana, R. (2018). Shockley's equation fit analyses for solar cell parameters from IV curves. *International Journal of Photoenergy*, Vol. 18, pp.1-7.
- [6] Walker, G. (2001). Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model. *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 21(1), 49-55.
- [7] Honsberg C., & Bowden S. (2020) Operación de celdas solares. Khan Academy. Arizona State University. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/ideal-solar-cells>.