



Caracterización eléctrica y determinación de la eficiencia de un módulo de celdas solares policristalinas bajo condiciones no estándares: caso de estudio Radioshack 277-1205

Electrical characterization and determination of the efficiency of a polycrystalline solar cell module under non-standard conditions: case study Radioshack 277-1205

Ramiro A. Villarreal G.

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá.

ramiro.villarreal@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0001-0887-6707>

Fecha de recepción: 30 de junio de 2025

Fecha de aceptación: 28 de octubre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v28n1.a8952>

RESUMEN

Se determinaron, la curva I vs V , el factor de forma y la eficiencia de un módulo de celda solar policristalina, marca RadioShack de 6Vcc y 50mAh con encapsulado 277-1205. Esto, con un valor de irradiancia constante de 217W/m^2 ($24,3^\circ\text{C}$) proveniente de un bombillo incandescente de 200W a una distancia de 13,0cm. Teniendo presente, en que estas no eran las condiciones STC, se fueron midiendo los valores de voltaje y corriente del módulo de celda solar, al conectarle diferentes resistencias en paralelo. Posteriormente, se construyó la curva I vs V y se creó un modelo del diodo simple. Con estos datos, se calculó la potencia correspondiente para cada resistencia ajustada. Finalmente, con la potencia máxima obtenida (114,60mW), el voltaje a circuito abierto, la corriente en corto circuito y la superficie de dicho módulo, se calcularon, el factor de forma y la eficiencia de conversión de energía, los cuales fueron de 0,60 y 23,7%, respectivamente. Estos resultados fueron comparados con estudios previos en los cuales, no se utilizaron las condiciones STC y también, con estudios en los cuales sí se utilizaron las condiciones STC. Estas comparaciones reflejaron dos hechos, el primero, es que bajo condiciones STC, el factor de forma será mayor que el obtenido. Y el segundo, es que el valor de eficiencia obtenida, puede variar a causa de la no linealidad entre la potencia máxima generada y la irradiancia incidente.

PALABRAS CLAVE

Célula solar policristalina, curva característica I vs V , factor de forma, eficiencia de conversión de energía.

ABSTRACT

The I vs V curve, fill factor and efficiency of a 6Vcc, 50mAh RadioShack brand polycrystalline solar cell module with 277-1205 encapsulation were determined. This, with a constant irradiance value of 217W/m^2 ($24,3^\circ\text{C}$) coming from a 200W incandescent bulb at a distance of 13,0cm. Keeping in mind that these were not the STC conditions, the voltage and current values of the solar cell module were measured by connecting different resistors in parallel. Subsequently, the I vs V curve was constructed and a simple diode model was created. With these data, the corresponding power for each adjusted resistance was calculated. Finally, with the maximum power obtained (114,60mW), the open circuit voltage, the short circuit current and the surface of said module, the fill factor and the energy conversion efficiency were calculated, which were 0,60 and 23,7%, respectively. These results were compared with previous studies in which STC conditions were not used and also with studies in which STC conditions were used. These comparisons reflected two facts, the first is that under STC conditions, the fill factor will be greater than the one obtained. And the second is that the efficiency value obtained may vary due to the non-linearity between the maximum power generated and the incident irradiance.

KEYWORDS

Célula solar policristalina, curva característica I vs V , factor de forma, eficiencia de conversión de energía.

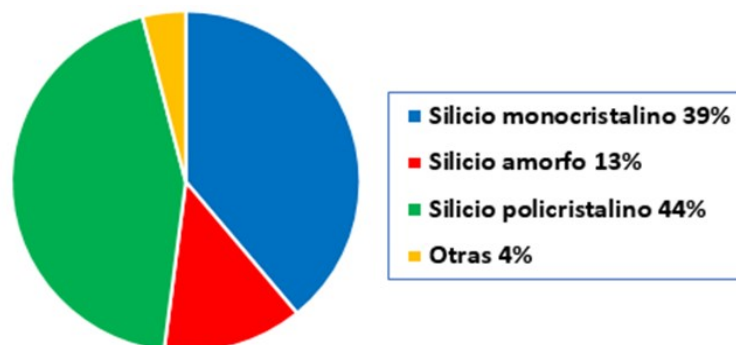
INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen una amplia gama de celdas fabricadas con diferentes materiales y estructuras, pero todo esto con el fin de obtener la máxima eficiencia posible a un costo accesible (Barzola & Rubinib, 2013). Por otro lado, vale la pena mencionar que la materia base de estas celdas son materiales semiconductores también utilizados en otros dispositivos, tales como, diodos, transistores, circuitos integrados, etc. Se han obtenido experimentalmente celdas con eficiencias próximas al 30%, mientras que las fabricadas industrialmente superan, con frecuencia, el 15%. Las celdas de silicio cristalino, las mismas con una eficiencia del 18%, comparten el mercado con las celdas policristalinas (Flores & Domínguez, 2016). Sin embargo, las celdas de capa delgada de silicio amorfo son más económicas, pero también considerablemente menos eficientes. Se están empezando a fabricar celdas de capa delgada de diferentes compuestos semiconductores como el telurio de cadmio (CdTe) y el diseleniuro de indio (In_2Se_3) que prometen eficiencias aceptables combinadas con precios más bajos. También se están trabajando en celdas de alta eficiencia de silicio monocristalino, arseniuro de galio (GaAs) y fosfuro de indio (InP) para usos y aplicaciones más especializadas

(Arencibia-Carballo, 2016). En la figura 1 se muestran la disponibilidad de las celdas solares más comunes en el mercado (Flores & Domínguez, 2016).

Figura 1.

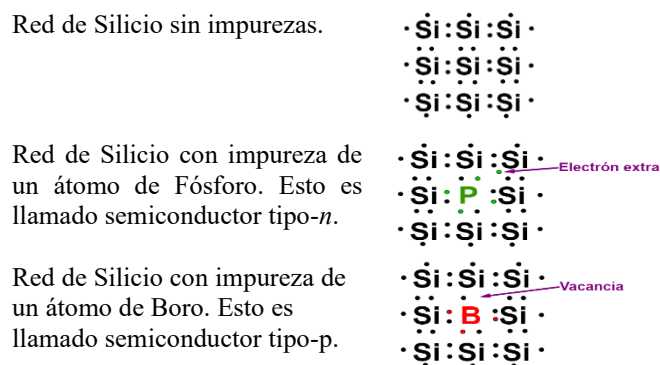
Disponibilidad de las celdas solares más comunes en el mercado.



Como ya se mencionó, una celda solar está hecha de un material semiconductor de silicio (Si). Un átomo de silicio tiene cuatro electrones de valencia, lo que le permite formar una red cristalina con otros cuatro átomos de silicio vecinos. Cuando una impureza tal como el fósforo (P), o el arsénico (As), o el antimonio (Sb), los cuales tienen cinco electrones de valencia, es adicionado uno de estos, el electrón de más puede ser fácilmente liberado para convertirse en un electrón de conducción (García, 2011). Un semiconductor con un electrón de más es llamado, semiconductor tipo-*n*. Ahora, si se agrega una impureza, tal como el aluminio (Al), o el boro (B), o el indio (In), los cuales tienen tres electrones de valencia, al cristal de silicio en cuestión, se le crearía un agujero en los electrones de enlace (García, 2011). Un semiconductor con una vacancia es llamado, semiconductor tipo-*p*. La figura 2 muestra estos tres tipos de enlace.

Figura 2.

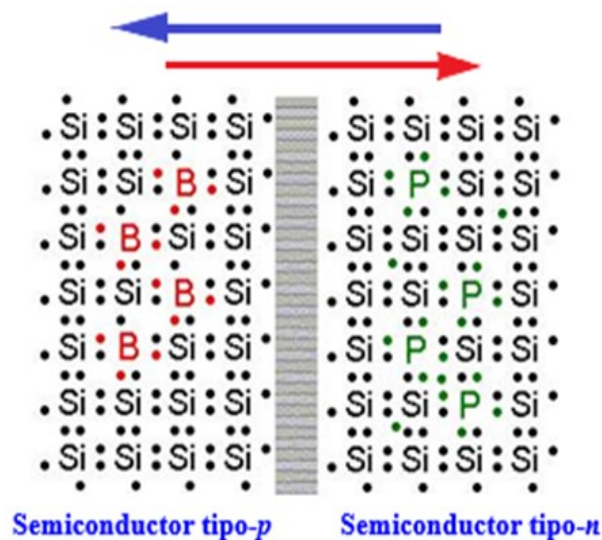
Estructura química básica de un semiconductor basado en Silicio



Una unión semiconductor $p-n$, se forma al unir un material con una deficiencia de un electrón (semiconductor tipo- p) y otra con un electrón de más (semiconductor tipo- n). Si un electrón ubicado cerca de la denominada “longitud de difusión” (región dentro de la unión $p-n$), absorbe un fotón con suficiente energía para hacer un salto energético entre la banda de conducción y la banda de valencia (Cabezas-Maslanczuk *et al.*, 2018), se produce un “hueco” en la banda de valencia, lo que corresponde a la generación de un par “electrón-hueco”. A causa de esto, existe una alta probabilidad de que estos portadores de carga eléctrica (par electrón-hueco) sean separados por el elevado campo eléctrico existente en la unión $p-n$, forzando así, el desplazamiento del electrón hacia la región del semiconductor tipo- n y el hueco hacia la región del semiconductor tipo- p (figura 3), creándose, con ello, una corriente de electrones que va desde el semiconductor tipo- n hacia el semiconductor tipo- p (Flores & Domínguez, 2016).

Figura 3.

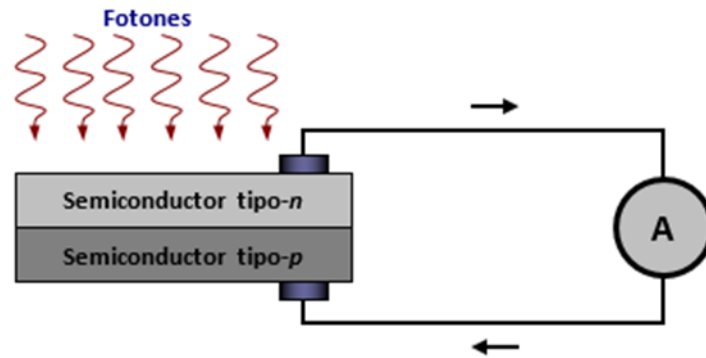
Formación del par electrón-hueco, en una unión semiconductor tipo $p-n$. La flecha roja indica la dirección del electrón y la flecha azul la dirección del hueco.



La figura 4 esquematiza este fenómeno de inducción de corriente eléctrica en la unión semiconductor tipo $p-n$, aplicado a un circuito eléctrico externo al arreglo semiconductor.

Figura 4.

Fenómeno de inducción de corriente eléctrica a causa de la incidencia de fotones sobre la unión semiconductora p-n.



Las flechas en negro muestran el sentido en que se desplazan los electrones. Por otra parte, debemos recordar que, en electricidad, el sentido de la corriente eléctrica en un cable es opuesto al sentido de desplazamiento de los electrones en el mismo, de modo, que las dos flechas negras en el diagrama, van en sentido opuesto a la corriente eléctrica. El dispositivo de lado derecho del cable representa un medidor de corriente eléctrica o amperímetro.

Una desventaja de los dispositivos que utilizan celdas de silicio es su respuesta espectral, la cual posee sus máximos valores entre el rojo y el infrarrojo cercano del espectro solar. Pero, por otro lado, tiene ventajas, tales como, un bajo costo (Rodríguez, 2024) y su rápido tiempo de respuesta para una medición instantánea.

Al conocerse la relación entre la radiación incidente y la corriente generada para estos dispositivos semiconductores, es posible ubicar a los mismos en una categoría de “fotodetectores” (Aguirre *et al.*, 2022). En este contexto, hay tres tipos principales de fotodetectores: los fotovoltaicos, los fotoconductivos y los fotoemisivos. Los fotovoltaicos son los más simples de los fotodetectores y proporcionan la ventaja adicional de un voltaje medible sin requerimiento de una batería externa al ser irradiados con luz visible o radiación cercana al ultravioleta. Estos son los comúnmente conocidos como fotoceldas (Salazar-Peralta *et al.*, 2016). Los fotoconductivos, en esta categoría ocurre que las fotoceldas para mediciones en la región espectral del infrarrojo son frecuentemente del tipo, en la cual, la conductancia eléctrica del material varía con el flujo de la radiación espectral incidente.

Muchos de estos dispositivos requieren enfriamiento con la consecuente complejidad en los sistemas de medición. A diferencia de los detectores fotovoltaicos, los detectores

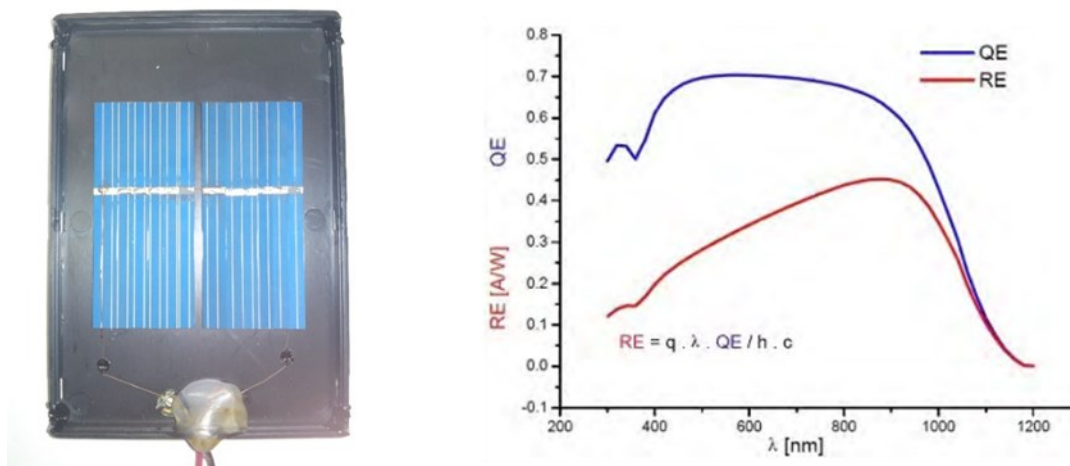
fotoconductivos requieren una batería externa. Estos se conocen en el área de la electrónica como resistencia variable con la luz o LDR por sus siglas en inglés. Y finalmente, los fotoemisivos. En estos detectores, los electrones son expulsados del material, para posteriormente ser colectados al ánodo para dar un flujo de corriente a través del detector. Existen dos tipos generales: los fotodiodos (los cuales son de baja ganancia) y los fototransistores (que tienen una buena ganancia).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó un módulo de celda solar de silicio policristalino (figura 5, lado izquierdo), marca *RadioShack*, modelo 277-1205 y con características eléctricas: 6,0V de corriente continua a circuito abierto y 50mA de corriente máxima a corto circuito. La misma posee dimensiones rectangulares 4,90cm×4,60cm. Pero debe tenerse claro que el encapsulado o cubierta de fábrica es de dimensiones 9,50cm×6,40cm.

Figura 5.

(Izquierda) Módulo de celda solar de silicio policristalino, marca *RadioShack* de 6V cc y 50mAh con encapsulado 277-1205. (Derecha) Respuesta Espectral (RE) y Eficiencia Cuántica (QE) típica de una celda de silicio cristalino (García, 2011)



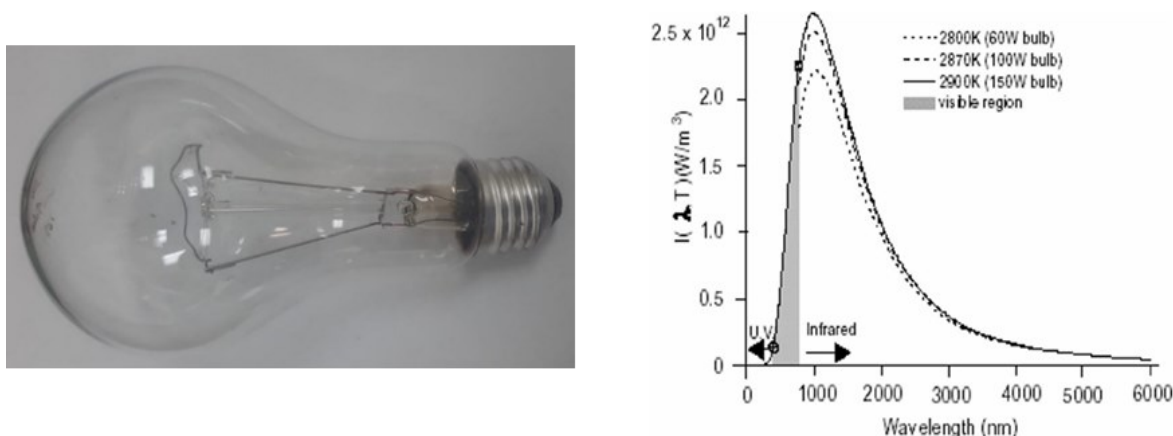
Por otro lado, la respuesta espectral juega un papel importante en su caracterización (Rojas Hernández, 2011), esto recordando que dicho concepto se define como la corriente de cortocircuito por unidad de potencia incidente de luz monocromática, en función de la longitud de onda (García, 2011). Razón por la cual, esta característica es mostrada en la figura 5, lado derecho. En dicha gráfica, se puede apreciar que la respuesta espectral para este

dispositivo tiene un máximo de longitud de onda en 900nm, lo cual corresponde al infrarrojo, en particular, al infrarrojo cercano (NIR).

Como fuente de luz, se utilizó un bombillo incandescente transparente con filamento de tungsteno y 200W de potencia (Rajendra, 2020), para una conexión de 120V_{rms} (figura 6, izquierda) y ubicado a una distancia constante de 13,0cm del módulo de celda solar (figura 9).

Figura 6.

(Izquierda) Bombillo incandescente con filamento de tungsteno y potencia eléctrica de 200W. (Derecha) Energía irradiada en función de la longitud de onda correspondiente a un bombillo incandescente de tungsteno (Sebitosi & Pillay, 2007)



Una vez el filamento de dicho bombillo está irradiando en equilibrio con el entorno, el mismo se comporta según la ley de radiación de Planck (Rajendra, 2020), alcanzando una temperatura de 2900K (Sebitosi & Pillay, 2007). Según la ley de desplazamiento de Wien, el espectro de emisión (figura 6, derecha) correspondiente a este bombillo, tiene una longitud de onda máxima de alrededor de 1000nm, lo que corresponde al infrarrojo cercano (NIR).

Lo cual es bastante adecuado para la respuesta espectral del módulo de celda solar en cuestión. Vale la pena mencionar, que los resultados obtenidos en este estudio, se pueden comparar con otros estudios previos, tales como Roy & Sarkar, 2014 y Mengata *et al.*, 2022, en donde también se utilizaron bombillos incandescentes para caracterizar módulos de celda solar.

Para la medición de la irradiancia se utilizó un medidor de irradiancia solar marca *Fluke*, modelo *IRR1-SOL* (figura 7), el mismo también puede medir temperatura de manera simultánea. Las especificaciones técnicas de este dispositivo se muestran en la tabla 1.

Figura 7.

Medidor de irradiancia solar marca Fluke, modelo IRR1-SOL.



Tabla 1.

Especificaciones técnicas del medidor de irradiancia solar marca Fluke, modelo IRR1-SOL.

Irradiance	
Measuring Range	0 to 1400 W/m ²
Resolution	1 W/m ²
Measuring Accuracy	± (5 % + 5 Digit)
Temperature Measurement	
Measuring range (°C)	-22 °F to 212 °F (-30 °C to 100 °C)
Resolution	0.2 °F (0.1 °C) / 1 °F @ >100 °F
Measuring Accuracy	±2 °F (±1 °C) @ 14 °F to 167 °F (-10 °C to 75 °C), ±4 °F (±2 °C) @ -22 °F to 14 °F (-30 °C to -10 °C) and 167 °F to 212 °F (75 °C to 100 °C)

Para las mediciones de voltaje, corriente y resistencia, se utilizaron dos multímetros digitales, marca MEXTECH, modelo DT603 (figura 8). Las especificaciones técnicas de estos dispositivos se muestran en la tabla 2.

Figura 8.

Multímetros digitales marca MEXTECH, modelo DT603.



Tabla 2.

Especificaciones técnicas de los multímetros digitales marca MEXTECH, modelo DT603

Function	Ranges	Accuracy
AC Voltage	6V/60V/600V/1000V	±1.0%
DC Voltage	600mV/6V/60V/600V/1000V	±0.5%
AC Current	6mA/60mA/600mA/10A	±1.5% (up to 600mA), ±3.0% (in A Range)
DC Current	600μA/6mA/60mA/600mA/10A	±1.0% (up to 600mA), ±2.0% (in A Range)
Resistance	600Ω/6kΩ/60kΩ/600kΩ/6mΩ/60MΩ	±0.8%

Las resistencias empleadas, para la caracterización del módulo de celda solar, eran resistencias de carbón de 0,50W de potencia. La tabla 3 muestra los diversos valores que se usaron, con sus respectivas tolerancias.

Tabla 3.

Resistencias empleadas en la toma de datos.

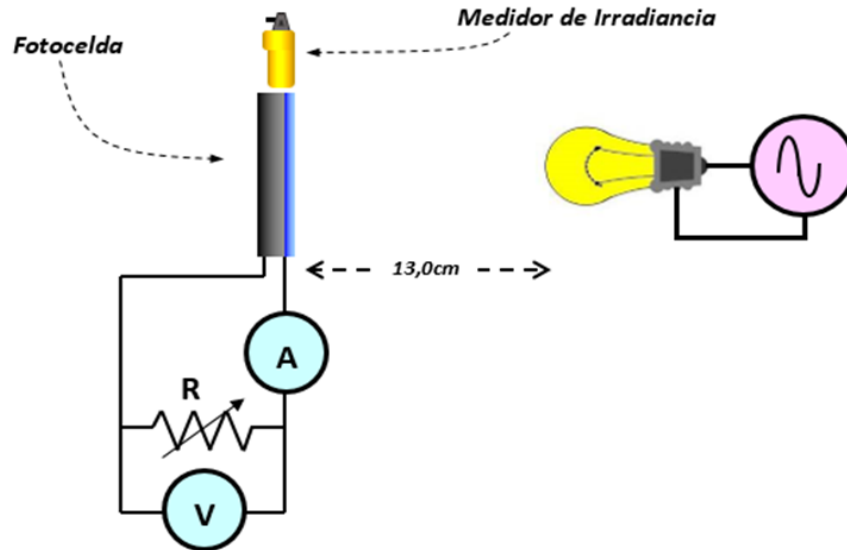
Cantidad	Valor (Ω)	Tolerancia
1	100k	10%
2	20k	10%
4	10k	10%
2	5k	5%
2	1k	10%
5	100	5%
2	40	5%
5	10	5%

Sistema para la toma de datos

La figura 9 esquematiza el sistema para la toma de datos de voltaje y corriente, que se empleó para caracterizar el módulo de celda solar (Novoa Jerez *et al.*, 2020). En dicho sistema, el dispositivo con la letra “V”, representa al voltímetro, el dispositivo con la letra “A”, representa al amperímetro y la “R”, el valor de la resistencia o el valor de una resistencia equivalente, esto, debido a que, durante la toma de datos, en algunas ocasiones, se combinaron algunas resistencias en un arreglo en paralelo, con el fin de generar una diversidad de valores.

Figura 9.

Sistema de toma de datos de voltaje y corriente para caracterizar el módulo de celda solar policristalina.



El procedimiento para la toma de datos fue muy sencillo, solo se cambiaba el valor de la resistencia o se combinaba con otra u otras en un arreglo en paralelo, montado en un tablero de conexiones (protoboard). Hecho esto, se anotaron los valores correspondientes de resistencia equivalente, voltaje y corriente eléctrica. Sin embargo, los valores de potencia eléctrica fueron calculados con el producto del voltaje por la corriente eléctrica respectiva (Novoa Jerez *et al.*, 2020), es decir

$$P = VI \quad (1)$$

Ahora bien, debido a que se mantuvo constante la distancia del bombillo incandescente al módulo de celda solar, durante el proceso de medición, la irradiancia tenía un valor constante de 217W/m^2 . Adicional a esto, se registró una temperatura de $24,3^\circ\text{C}$, tal y como se aprecia en la figura 10.

Figura 10.

Valores de irradiancia y temperatura medidos por el irradiómetro IRR1-SOL. En esta imagen, el mismo se encuentra en modo HOLD.



Con el objetivo de hacer una comparación de este estudio con el realizado por Mengata *et al.*, 2022, se midió la iluminancia que incidía sobre este módulo de celda solar, bajo las condiciones mencionadas en el sistema de la figura 9. El valor obtenido fue de 4309,84 lx, dicha medida fue realizada con el sistema de adquisición de datos *Xplorer GLX*, *PASPort*, marca PASCO, modelo PS-2002 y con la sonda *Light Sensor*, modelo PS-2106A, con rangos: 0-2,6 lx, 0-260 lx y 0-26000 lx. Resolución del 0,01% del valor máximo del rango seleccionado y una temperatura de operación entre 0-40°C.

Resistencia característica

La razón por la cual, se coloca una resistencia en paralelo con el módulo de celda solar en el sistema de la figura 9, es a causa, de que uno de los principales efectos que ocurren en los módulos de celda solar después de ser irradiadas, es la saturación de cargas eléctricas en la salida de voltaje. Esto debido a la ausencia de un dispositivo que drene estos excesos. Este dispositivo, bien puede ser una resistencia en paralelo con dicho módulo de celda solar (Othman, 2012). Ahora bien, es requerido que la resistencia mencionada, tenga un valor particular, ya que, si posee un valor muy alto con respecto al adecuado, el efecto de saturación continuará. Y, por el contrario, si es muy bajo con respecto al adecuado, se drenará más de

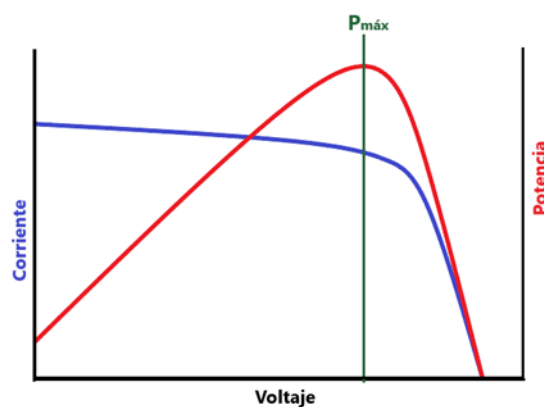
lo necesario y el voltaje caerá independientemente del valor la irradiancia incidente. En otros términos, una resistencia característica correspondiente a este sistema, es la que provoca que el módulo de celda solar entregue la mayor cantidad de energía por unidad de tiempo. Según la literatura consultada (Othman, 2012), el conocimiento de esta resistencia característica tiene la utilidad de hacer que el voltaje de salida del módulo de celda solar tenga un comportamiento lineal con respecto a la irradiancia incidente, lo cual resulta bastante conveniente, si dicho dispositivo semiconductor se desea utilizar como algún tipo de medidor de irradiancia. Sin embargo, esta correspondencia lineal no se puede corroborar en este artículo, ya que la irradiancia incidente era constante.

Factor de forma y la eficiencia de conversión de energía

Tomando como referencia el sistema anterior (figura 9), se debe destacar que el comportamiento de parámetros, tales como, el voltaje generado, la corriente eléctrica drenada, la potencia eléctrica generada, el tamaño del módulo de celda solar y el valor de la irradiancia incidente, definen qué tan eficiente es este dispositivo semiconductor, en su conversión de energía recibida por irradiación versus la energía eléctrica entregada por la misma. Ahora bien, el comportamiento real de los parámetros eléctricos para el sistema esquematizado en la figura 9, es similar al modelo mostrado en la figura 11

Figura 11.

Modelo de las gráficas I vs V y P vs V , que representan el comportamiento real de dichos parámetros eléctricos para un sistema equivalente al de la figura 9 (a irradiancia constante)



Si un módulo de celda solar se comportara como una fuente ideal de energía eléctrica (a irradiancia constante), la gráfica I vs V tendría forma rectangular (Novoa Jerez *et al.*, 2020).

Desde esta perspectiva, la potencia máxima ideal correspondería al rectángulo mostrado en la figura 12, el cual estaría representado por el producto de la corriente en corto circuito I_{sc} y el voltaje a circuito abierto V_{oc} .

Figura 12.

El rectángulo delimitado por la corriente en corto circuito I_{sc} y el voltaje a circuito abierto V_{oc} , correspondería a una potencia máxima ideal entregado por un módulo de celda solar.

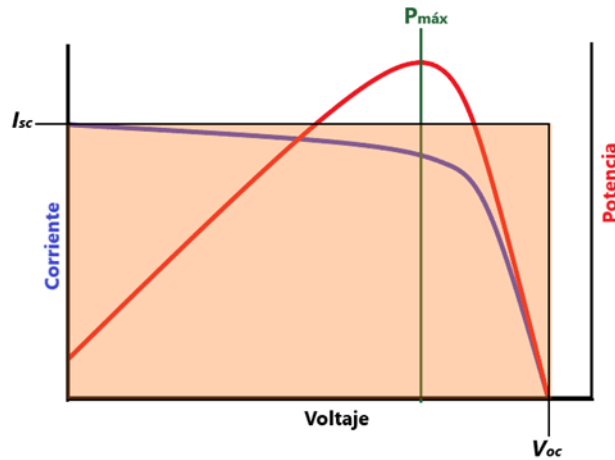
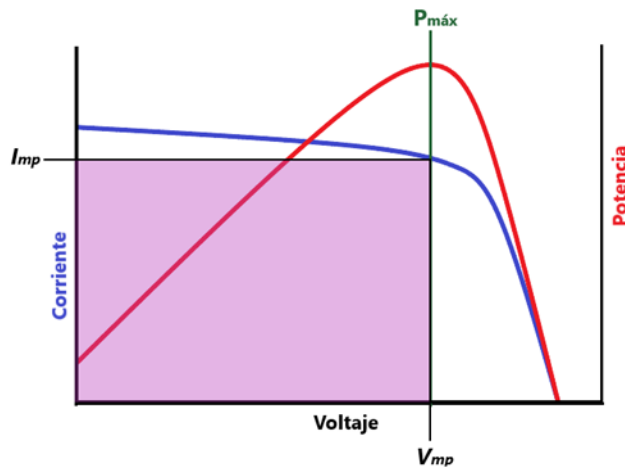


Figura 13.

El rectángulo delimitado por la corriente I_{mp} y el voltaje V_{mp} , correspondería, a una potencia máxima real entregada por un módulo de celda solar.



Un factor o cociente muy útil para definir una comparación entre el comportamiento real y el comportamiento ideal, es el denominado *factor de forma* o *FF* por sus siglas en inglés (*fill factor*). Este, se define como el cociente entre la potencia eléctrica máxima entregada y el producto de la corriente eléctrica en cortocircuito y el voltaje a circuito abierto (Calle Martín, 2021). Lo que correspondería a la siguiente expresión matemática

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (2)$$

Teniendo presente en la expresión (2) que

$$P_{max} = I_{mp}V_{mp} \quad (3)$$

Según Torres-Pacheco *et al.*, 2018, este es un parámetro importante para evaluar el rendimiento de las celdas solares comerciales.

Otro factor útil para definir la eficiencia de un módulo de celda solar, pero en términos de porcentaje de energía, es *la eficiencia de conversión de energía*, representada con la letra griega η .

El mismo, manifiesta qué porcentaje de energía en forma de radiación incidente sobre el módulo de célula solar, ha sido convertido a energía eléctrica (Torres-Pacheco *et al.*, 2018). La expresión analítica para este factor es

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{sc} V_{oc}}{\phi A} \times 100\% \quad (4)$$

En donde, ϕ y A , representan respectivamente, la irradiancia incidente sobre el módulo de celda solar y la superficie de la misma en unidades de m^2 .

Modelo del Diodo simple

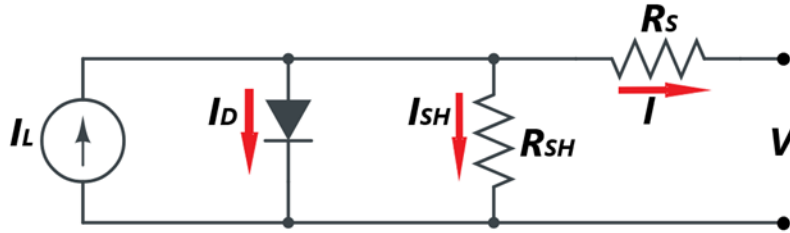
La curva ideal de I vs V , correspondiente a un módulo de celda solar, se ve alterada, principalmente, por la presencia de tres factores (Flores & Domínguez, 2016). El primero es el factor de idealidad m , el cual está asociado a un factor de corrección cuyo valor suele estar entre 1 y 2 (Ndegwa *et al.*, 2020). El segundo factor, es lo equivalente a una resistencia en serie R_S en la salida de voltaje y corriente de este dispositivo semiconductor. Dicha resistencia en serie, es un parámetro que deriva de la resistencia interna del módulo de celda solar y se debe, específicamente, a la malla de metalización, a la resistencia de los contactos y a la resistencia del propio semiconductor (Flores & Domínguez, 2016). Y como tercer factor, lo equivalente a una resistencia en paralelo R_{SH} en la salida de voltaje y corriente. Este

parámetro tiene su origen en las imperfecciones de la calidad de la unión $p-n$ y es responsable de la existencia de fugas de corriente eléctrica (Flores & Domínguez, 2016). Vale la pena mencionar, que estos dos últimos factores afectan el factor de forma de un módulo de celda solar (Torres-Pacheco *et al.*, 2018), el cual será abordado posteriormente.

En base a la información mencionada en el párrafo anterior, el modelo matemático que representa a un módulo de celda solar a través del esquema de un circuito eléctrico, se conoce con el nombre de “modelo de diodo simple” (Chan & Phang, 1987). Dicho circuito eléctrico está representado en la figura 14.

Figura 14.

Modelo del diodo simple para representar el comportamiento del voltaje y la corriente eléctrica en un módulo de celda solar.



En este modelo, el efecto fotoeléctrico es representado con una fuente de corriente (extremo izquierdo de la figura 14), la cual genera una corriente eléctrica representada por I_L . En ausencia de iluminación, la corriente eléctrica que circula a través del módulo de celda solar coincide con una corriente eléctrica I_D que circula por un diodo (mostrado en la figura 14) y esto es debido a la combinación inducida dentro del dispositivo por efecto del voltaje V y la temperatura T . Por otro lado, en presencia de iluminación, la corriente I_L es equivalente a la corriente que genera la fuente, estando la misma en paralelo con el diodo, esto representa una analogía a la unión $p-n$ del módulo de celda solar (Flores & Domínguez, 2016). La corriente de salida I es igual a la diferencia entre la corriente I_L y la corriente del diodo I_D . Sin embargo, a circuito abierto y con iluminación, toda la corriente generada pasa a través del diodo, dándole sentido a la corriente nula en la salida del módulo de celda solar. Ahora bien, en cortocircuito, el voltaje en la salida de este módulo de celda solar es nulo y toda la corriente pasa a través de las cargas externas.

Tomando en consideración todo lo mencionado anteriormente, se plantea el modelo analítico del diodo simple (Ndegwa *et al.*, 2020), el cual es

$$I = I_{PH} - I_0 \left(e^{\frac{qe(V+R_S I)}{mk_B T}} - 1 \right) - \frac{V+R_S I}{R_{SH}} \quad (5)$$

La corriente eléctrica I_{PH} está relacionada con la fotocorriente generada en el efecto fotoeléctrico (Calle Martín, 2021). El parámetro I_0 es denominado corriente inversa de saturación del diodo y depende en gran medida de la temperatura T (Flores & Domínguez, 2016). Para este modelo matemático, el factor de idealidad m se ajustó a 1, además, teniendo presente que q_e es la carga de un electrón, k_B es la constante de Boltzmann y T la temperatura del sistema en unidades de Kelvin.

Para que la expresión (5), modele la curva experimental I vs V , mostrada en la figura 11, es requerido que dicha expresión pueda representar una curva a nivel de la forma

$$f(V, I) = 0 \quad (6)$$

En donde, la misma debe pasar por estos puntos experimentales en el mejor ajuste posible. Pero para realizar dicho ajuste, es requerido calcular los parámetros: I_{PH} , I_0 , R_S y R_{SH} correspondientes a este sistema.

Como primer paso para obtener estos parámetros, se procede algebraicamente, dejando I_{PH} , I_0 y R_{SH} en función de R_S (Novoa Jerez *et al.*, 2020). Sin embargo, de manera previa, es necesario calcular las constantes C_A , C_B y C_C , cada una, correspondiente a los siguientes casos:

Caso 1: módulo de celda solar a circuito abierto

Para este caso $I = 0$ y $V = V_{OC}$, con lo que se ajusta

$$C_A = e^{\frac{q_e V_{OC}}{k_B T}} - 1 \quad (7)$$

Obteniendo la siguiente expresión

$$I_0 = \frac{I_{PH}}{C_A} - \frac{V_{OC}}{C_A R_{SH}} \quad (8)$$

Caso 2: módulo de celda solar en corto circuito

Para este caso $V = 0$ y $I = I_{SC}$, con lo que se ajusta

$$C_B = e^{\frac{q_e R_S I_{SC}}{k_B T}} - 1 \quad (9)$$

Obteniendo la siguiente expresión

$$I_{PH} = \frac{I_{SC} \left(1 + \frac{R_S}{R_{SH}}\right) C_A - \frac{V_{OC} C_B}{R_{SH}}}{(C_A - C_B)} \quad (10)$$

Caso 3: máxima potencia entregada por el módulo de celda solar

Para este caso $V = V_{MP}$ y $I = I_{MP}$, en donde

$$P_{MAX} = V_{MP} I_{MP}$$

Con lo que se ajusta

$$C_C = e^{\frac{q_e(V_{MP} + R_S I_{MP})}{k_B T}} - 1 \quad (11)$$

Obteniendo la siguiente expresión

$$R_{SH} = \frac{V_{OC}(C_C - C_B) - V_{MP}(C_A - C_B)}{I_{MP}(C_A - C_B) - I_{SC}(C_A - C_C)} - R_S \quad (12)$$

Para el tratamiento numérico, primero se ingresan los parámetros: q_e , V_{OC} , I_{SC} , k_B , T , V_{MP} y I_{MP} . Nótese que C_A puede ser calculada inmediatamente, con dichos parámetros ingresados. Posterior a esto, se manipula el valor de R_S y ya que el resto de los parámetros C_B , C_C , R_{SH} , I_{PH} y I_0 , dependen de dicho valor, se crea un algoritmo para calcular cada uno de estos parámetros, de forma dinámica y así, ajustar la curva a nivel (expresión (6)), hasta aproximarse al comportamiento experimental (curva I vs V) en su mayor medida (Novoa Jerez *et al.*, 2020). Por otro lado, dicho algoritmo debe tener el siguiente orden cronológico para el cálculo de estos parámetros, con una dependencia en “cadena”, siguiendo el orden mostrado en las expresiones desde la (13) hasta la (17)

$$C_B = C_B(R_S) \quad (13)$$

$$C_C = C_C(R_S) \quad (14)$$

$$R_{SH} = R_{SH}(C_B, C_C, R_S) \quad (15)$$

$$I_{PH} = I_{PH}(C_B, R_S, R_{SH}) \quad (16)$$

$$I_0 = I_0(R_{SH}, I_{PH}) \quad (17)$$

Por cuestiones de simplicidad, el resto de los valores, de los cuales dependen estos parámetros, se dejaron de manera implícita. Ahora bien, el software utilizado para dicho ajuste fue el software libre Geogebra versión 6.0.829.0. La figura 15 expone de forma concisa el diagrama de flujo empleado en el tratamiento numérico de los datos.

Figura 15.

Diagrama de flujo que describe de manera concisa el procedimiento para calcular los parámetros del modelo analítico del diodo simple correspondiente al módulo de celda solar en cuestión.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el sistema esquematizado en la figura 9 se generaron los siguientes datos.

Tabla 4.

Valores de voltaje y corriente eléctrica obtenidos en el sistema esquematizado en la figura 9

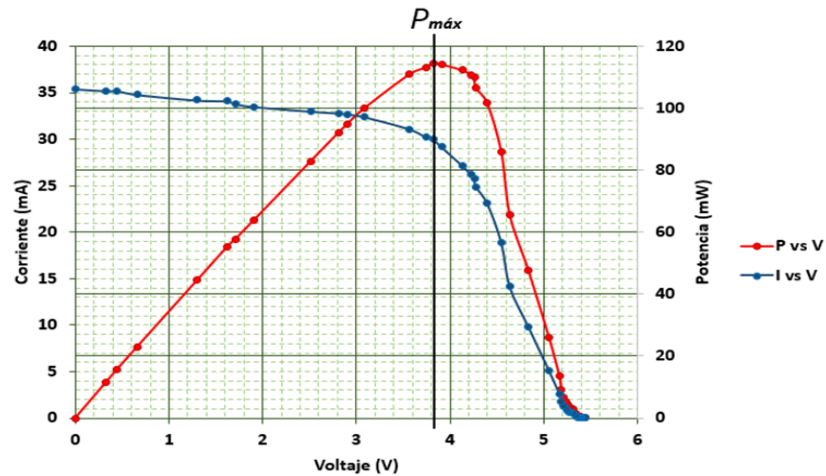
Resistencia (Ω)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)
99000	5,44	0,06	0,33
90200	5,41	0,06	0,32
80300	5,39	0,07	0,38
70300	5,39	0,08	0,43
60300	5,38	0,09	0,48
50200	5,37	0,11	0,59
40100	5,35	0,14	0,75
30000	5,35	0,18	0,96
20100	5,34	0,27	1,44

10000	5,32	0,53	2,82
8800	5,28	0,60	3,17
7800	5,27	0,67	3,53
6920	5,26	0,76	4,00
5930	5,25	0,89	4,67
4900	5,23	1,06	5,54
3950	5,21	1,32	6,88
2960	5,19	1,75	9,08
1970	5,17	2,62	13,55
992	5,06	5,12	25,91
494	4,84	9,84	47,63
330	4,64	14,15	65,66
248	4,55	18,90	86,00
196	4,40	23,10	101,64
176	4,28	24,90	106,57
170	4,26	25,80	109,91
166	4,23	26,20	110,83
157	4,13	27,20	112,34
138	3,91	29,20	114,17
131	3,82	30,00	114,60
128	3,75	30,20	113,25
119	3,57	31,10	111,03
98	3,09	32,40	100,12
92	2,90	32,70	94,83
89	2,81	32,80	92,17
79	2,51	33,00	82,83
59	1,91	33,50	63,99
52	1,71	33,80	57,80
50	1,62	34,10	55,24
40	1,30	34,20	44,46
20	0,66	34,80	22,97
13	0,45	35,20	15,84
11	0,33	35,20	11,62
0	0,00	35,40	0,00

La figura 16 muestra la superposición de la curva característica I vs V y la gráfica de la respuesta de potencia en función del voltaje, señalizando sobre ambas, el punto en donde la potencia es máxima. Estas dos gráficas son la referencia principal para interpretar el comportamiento eléctrico de este módulo de celda solar.

Figura 16.

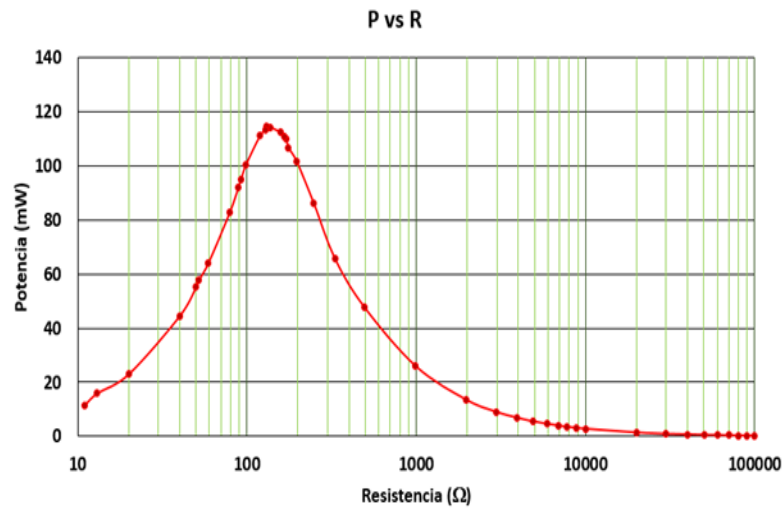
Superposición de las gráficas I vs V y P vs V , señalizando en ambas, el punto en donde la potencia es máxima. Esto para una irradiancia incidente constante de 217W/m^2 y una temperatura de $24,3^\circ\text{C}$.



Por otro lado, la figura 17 muestra la potencia generada en función del valor de la resistencia (o la equivalente) conectada en paralelo con el módulo de celda solar.

Figura 17.

Gráfica que muestra la potencia entregada por el módulo de celda solar versus la resistencia conectada a la misma.



Nótese que la figura 17 corrobora que existe un valor particular de resistencia que provoca un máximo de potencia eléctrica generada por el módulo de celda solar, y tal como se pudo apreciar en la tabla 4, dicho valor corresponde a 131Ω , en donde este valor máximo de potencia fue de $114,60\text{mW}$. No se puede pasar por alto el hecho de que los valores de resistencia son discretos, razón por la cual, el punto más alto o el máximo de potencia generada en la figura 17, no es un punto en sí, sino más bien una región. En otras palabras, el valor de 131Ω es un valor aproximado asociado con un error, ya sea este, sistemático o propio del sistema empleado. Adicional a esto, en torno a este valor característico de resistencia, se produce una inflexión en el comportamiento, tanto del voltaje (figura 18), como de la corriente eléctrica (figura 19), lo que da sentido a la curva característica de I vs V (figura 16).

Figura 18.

Gráfica de voltaje generado por el módulo de celda solar en función de la resistencia conectada.

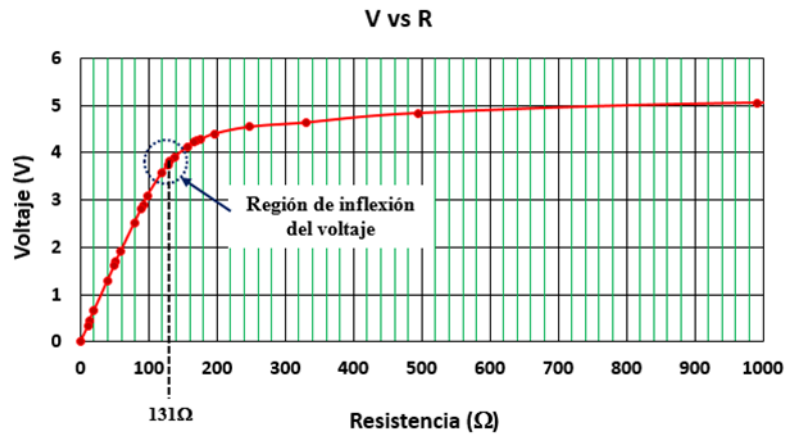
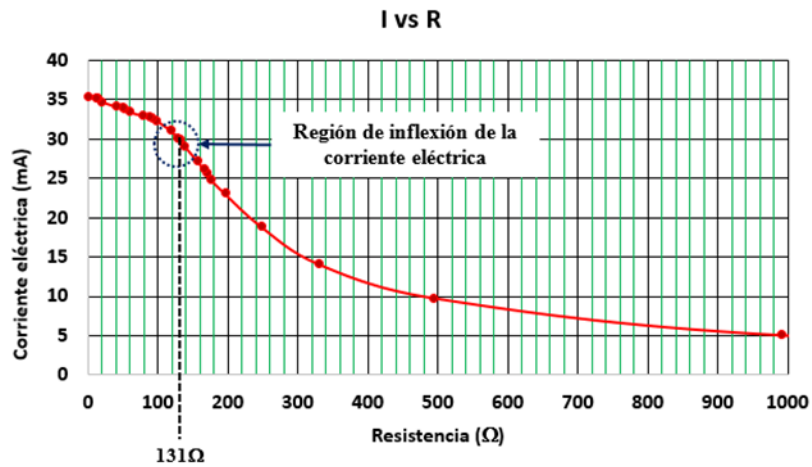


Figura 19.

Gráfica de la corriente eléctrica drenada del módulo de celda solar en función de la resistencia conectada.



Cálculo del factor de forma y la eficiencia de conversión de energía, correspondientes a este módulo de celda solar policristalina.

Con toda la información disponible, se procede a calcular el factor de forma FF y la eficiencia de conversión de energía η (Torres-Pacheco *et al.*, 2018). Ahora bien, para el cálculo del factor de forma, se utiliza la expresión (2) y de la tabla 4, se aprecia que, para la potencia máxima, los valores de I_{mp} y V_{mp} fueron de 30,00mA y 3,82V, respectivamente. Para el caso de la corriente eléctrica a corto circuito I_{sc} y el voltaje a circuito abierto V_{oc} se obtuvieron los valores de 35,40mA y 5,44V, respectivamente. Por razones de estabilidad, en la toma de datos, el voltaje a circuito abierto corresponde al caso de la resistencia de mayor valor (99000 Ω). Finalmente, se plantea

$$FF = \frac{(30,00mA)(3,82V)}{(35,40mA)(5,44V)}$$

Obteniendo para el factor de forma

$$FF = 0,60$$

Si el proceso de medición se realiza bajo condiciones estándares o STC (Torres-Pacheco *et al.*, 2018), los módulos de celda solar típicas tienden a tener un factor de forma mayor a 0,70. Para tal caso, de ser inferior a dicho valor, las mismas se considerarían de muy bajas prestaciones (Calle Martín, 2021).

Para el cálculo de la eficiencia de conversión de energía, se utiliza la expresión (4). Adicional a esto, se mostró en la figura 10, que la irradiancia fue de 217 W/m². Por otro lado, en el párrafo previo a la figura 5, se mencionó que las dimensiones rectangulares de este dispositivo semiconductor son 4,90cm×4,60cm. De manera que

$$A = (4,90 \times 10^{-2}m)(4,60 \times 10^{-2}m)$$

$$A = 2,25 \times 10^{-3}m^2$$

Por consiguiente, la eficiencia de conversión de energía sería

$$\eta = \frac{(0,60)(35,40 \times 10^{-3}A)(5,44V)}{(217W/m^2)(2,25 \times 10^{-3}m^2)} \times 100\%$$

$$\eta = 23,7\%$$

Según Torres-Pacheco *et al.*, 2018, los actuales módulos de celdas solares de silicio están en un rango de eficiencia de alrededor del 24%. Pero, teniendo presente que este criterio deriva de un proceso de medición bajo condiciones estándares o STC (Torres-Pacheco *et al.*, 2018).

Por otro lado, Roy & Sarkar, 2014, desarrollaron un mecanismo simple para la caracterizaron de un módulo de celdas solar, sin las condiciones STC. Dicho mecanismo disponía de una plataforma horizontal, con 18 bombillos incandescentes de tungsteno, el mismo podía desplazarse verticalmente para ajustar la irradiancia incidente. El módulo de celdas solar en cuestión era uno de marca japonés, modelo No. GL230/M25, 22Wp y 56cm×33cm de área. Con este sistema, se obtuvieron los siguientes resultados

Tabla 5.

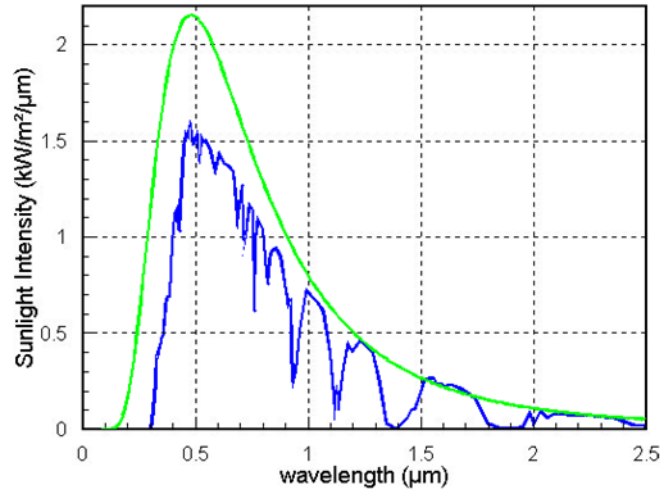
Factores de forma obtenidos para diferentes irradiancias (Roy & Sarkar, 2014).

Irradiancia (W/m ²)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)	$P_{m\acute{a}x}$ (W)	FF
1080	12,5	1,35	16,88	0,6736
950	13,3	1,10	14,63	0,6505
850	11,7	0,67	7,84	0,6626
100	11,6	0,55	6,38	0,6606

Pero antes de analizar los datos de la tabla 5, lo primero que se debe destacar, es que, al igual que el sistema descrito en este artículo, se utilizó como fuentes de irradiancia, bombillos incandescentes de tungsteno. El espectro de emisión de estos se mostró en la figura 6 (lado derecho), en donde se mencionó que el pico de emisión es de alrededor de 1000nm, lo que corresponde al infrarrojo cercano (NIR). Sin embargo, para un proceso de caracterización de un módulo de celdas solares, bajo condiciones STC, se utiliza la radiación solar, con un valor de irradiancia de 1000W/m² y una masa de aire de 1.5 (AM1.5), lo que corresponde a una incidencia de los rayos del Sol en un ángulo zenit de 48,19° y a cielo despejado. Pero durante el ingreso de los rayos del Sol, hasta la superficie de la Tierra (a nivel del mar), los mismos interactúan con la atmósfera, ocurriendo diferentes efectos tales como: absorción, dispersión, reflexión, etc., modificando el espectro de radiación del Sol (Honsberg & Bowden, 2019). La figura 20 muestra la comparación del espectro de radiación solar antes de ingresar a la atmósfera de la Tierra (color verde) y el espectro de radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra (color azul) pero con un ángulo zenit de 48,19° (AM1.5).

Figura 20.

Comparación del espectro de radiación solar, antes de ingresar a la atmósfera terrestre (color verde), con el espectro de radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra (color azul), el mismo, bajo condición de AM1.5 (Honsberg & Bowden, 2019).



El espectro de radiación sobre la superficie de la Tierra ya no corresponde plenamente a un cuerpo negro, debido a la ausencia de algunas longitudes de onda. No obstante, mantiene el máximo de emisión alrededor de la longitud de onda de $0,5\mu\text{m}$ (gamma entre el azul y el verde). A pesar de la diferencia entre el máximo de emisión de este espectro y el máximo de emisión del bombillo incandescente de tungsteno, el factor de forma, en la tabla 5, tiende a un valor en los cuatro casos. Dicha tendencia es

$$FF \approx 0,6$$

Los autores registraron una eficiencia del 12,45% con este sistema. Resulta evidente la similitud entre los factores de forma entre ambos estudios. No así, las eficiencias, en donde esta última es apenas la mitad de la calculada en este artículo. Esta comparación no está muy fundamentada, ya que se trata de dos módulos de celdas solares diferentes. En contraste, y con el objetivo de hacer una comparación más directa, entre una caracterización bajo condiciones STC y otra realizada sin las condiciones STC, Mengata *et al.*, 2022, caracteriza cuatro módulos de celdas solares, dos monocristalinas y dos policristalinas, bajo condiciones no STC. Pero en este caso, los autores sí disponían de los correspondientes parámetros eléctricos medidos por el fabricante, bajo condiciones STC. La tabla 6 muestra la comparación entre el factor de forma correspondiente a cada módulo de celda solar, según el fabricante (condiciones STC) y el factor de forma de las mismas, según el estudio realizado por Mengata *et al.*, 2022, sin las condiciones STC.

Tabla 6.

Comparación entre factores de forma obtenidos bajo condiciones STC y factores de forma obtenido sin las condiciones STC (Mengata et al., 2022).

<i>Módulo de celda solar</i>	<i>FF obtenido bajo condiciones STC</i>	<i>FF obtenido sin las condiciones STC (uso de un bombillo incandescente de 60W)</i>
Silicio monocristalino MD-WLT13302L, fabricado por la empresa China Zhong shan Huifo Solar Technology Co. Ltd.	0,6707	100 lx → 0,5377 500 lx → 0,5849 800 lx → 0,5271 1000 lx → 0,5703 1500 lx → 0,6144 2000 lx → 0,6221
Silicio policristalino Fabricado por Wining Star Co. Ltd., China.	0,7621	100 lx → 0,5901 500 lx → 0,6283 800 lx → 0,6256 1000 lx → 0,6314 1500 lx → 0,6621 2000 lx → 0,6872
Silicio policristalino Fabricado por M/S Khan Co. Ltd., India.	0,8381	100 lx → 0,3689 500 lx → 0,4679 800 lx → 0,4599 1000 lx → 0,3897 1500 lx → 0,4408 2000 lx → 0,4279
Silicio monocristalino Hebei Oushang Photovoltaic Technology Co. Ltd., China.	0,7047	100 lx → 0,5960 500 lx → 0,6496 800 lx → 0,6523 1000 lx → 0,6616 1500 lx → 0,6847 2000 lx → 0,6860

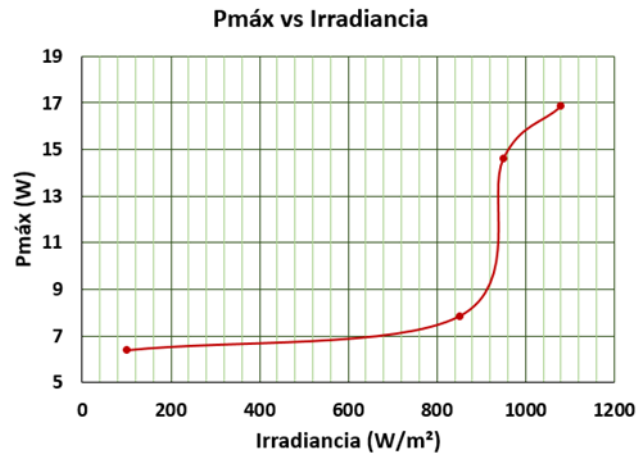
Lo primero que se puede mencionar en este estudio, es que no se midió la irradiancia en el procedimiento no estándar (STC), lo cual es una limitación para efectos de comparación con

procedimientos de caracterización de módulos de celdas solares, bajo condiciones STC. La información que brinda la cantidad física iluminancia es limitada con respecto a los detalles del espectro de radiación de una fuente, razón por la cual, se utiliza la cantidad física irradiancia para dichas caracterizaciones. Por consiguiente, este estudio (Mengata *et al.*, 2022) no puede cuantificar valores de eficiencia para ninguno de los cuatro módulos de celda solar. Otro detalle que se aprecia en la tabla 6 para todos los módulos de celda solar, es que, al aumentar la iluminancia, existe una leve tendencia de aumento del factor de forma (Mengata *et al.*, 2022), desvelando implícitamente, la dependencia del factor de forma versus el valor de irradiancia. No obstante, el valor de iluminancia registrado en este artículo para el bombillo de 200W a solo 13,0cm de distancia del módulo de celda solar, fue de 4309,84 lx. Esta información indica que los datos de iluminancia mostrados en la tabla 6, corresponden a valores bajos de irradiancia, muy por debajo de 1000W/m².

Ahora bien, haciendo una comparación de los factores de forma obtenidos sin las condiciones STC para los dos módulos de celdas solares de silicio policristalino en este estudio (tabla 6), se aprecia que el módulo de celda solar fabricado por Wining Star Co. Ltd. (China) tiene una menor dispersión de los valores calculados de FF , que los valores de FF calculados para el módulo de celda solar fabricado por M/S Khan Co. Ltd. (India). Dichas dispersiones se toman con respecto a los valores calculados de FF , bajo condiciones STC, respectivamente. Estos argumentos sugieren que el factor de forma para el módulo de celda solar de silicio policristalino, marca *RadioShack*, modelo 277-1205, debe ser mayor que el registrado en este artículo. Adicional a esto, las expresiones (2) y (4), muestran que la eficiencia de conversión de energía depende principalmente del cociente entre la potencia máxima generada por el módulo de celda solar y la irradiancia incidente. La tabla 5 corrobora, tal y como es de esperarse, que esta potencia máxima aumenta con la irradiancia incidente. Pero la independencia de dicha eficiencia, de la irradiancia incidente, solo sería posible, si la relación entre la potencia máxima y la irradiancia fuera lineal. La figura 21 muestra que dicha relación no es lineal.

Figura 21.

Gráfica de la potencia máxima generada por el módulo de celda solar vs la irradiancia incidente (Roy & Sarkar, 2014).



Este hecho manifiesta que el cálculo de la eficiencia de conversión de energía, depende de la magnitud de la irradiancia incidente, por lo que el valor de 23,7% registrado en este artículo, puede variar bajo condiciones STC.

Parámetros obtenidos en el modelo del diodo simple, correspondiente a este módulo de celda solar policristalina.

La tabla 7 muestra los parámetros ajustados correspondientes al modelo del diodo simple y planteados en la expresión (5), para este módulo de celda solar policristalina. Esto, gracias al ajuste numérico descrito en la sección anterior.

Tabla 7.

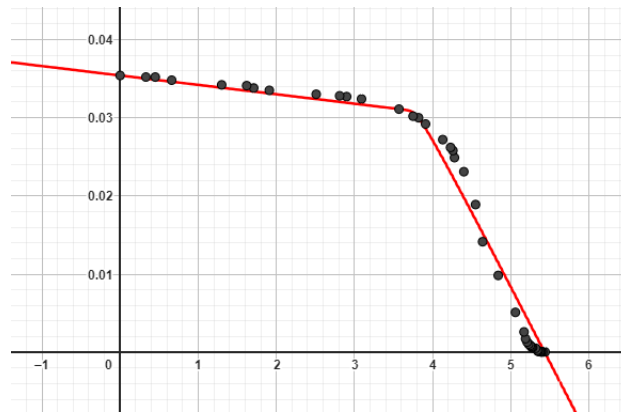
Parámetros ajustados para el modelo del diodo simple en cuestión.

Parámetro	Valor ajustado (3 cifras significativas)
R_S	50,9Ω
R_{SH}	781Ω
I_{PH}	0,0377A
I_0	$1,92 \times 10^{-94}$ A

Finalmente, la figura 22 muestra la comparación entre el modelo del diodo simple ajustado y los datos experimentales (Vera-Dávila *et al.*, 2018).

Figura 22.

Gráfica del modelo del diodo simple (curva roja) y curva experimental I vs V (puntos negros) correspondientes al módulo de celda solar en cuestión, utilizando el software Geogebra versión 6.0.829.0.



CONCLUSIONES

Para la caracterización de un módulo de celda solar, no solo basta conocer parámetros, tales como, sus dimensiones, su estructura química, la radiación incidente, la temperatura de equilibrio en el sistema de toma de datos, etc., sino, además conocer el comportamiento de la corriente eléctrica y el voltaje generado en su salida, al colocarle una resistencia en paralelo. Recalcando que, para dicha caracterización, es necesario variar la resistencia mencionada, con lo que finalmente, se puede construir la curva característica I vs V , la cual es crucial para determinar el factor de forma y la eficiencia de conversión de energía. Adicional a esto, el modelo del diodo simple desvela características estructurales muy importantes de un módulo de celda solar, pero de manera indirecta, ya que este modelo es solo un modelo matemático diseñado a través de un circuito eléctrico en el cual se hacen analogías con la estructura de este tipo de semiconductores pero que tienen su correspondencia con parámetros que sí se pueden medir directamente.

Un detalle en este estudio, que puede resultar muy ventajoso, es que la respuesta espectral de este módulo de celda solar de silicio policristalino posee su máximo de longitud de onda en el infrarrojo cercano y que similarmente, la distribución de longitud de onda, como cuerpo negro, de la fuente de radiación (bombillo incandescente de tungsteno) posee su máximo de longitud de onda, también, en el infrarrojo cercano. De manera, que la mayor incidencia de fotones con cierta longitud de onda concuerda con una mejor respuesta de dicho módulo de celda solar.

Con respecto a la información cuantitativa obtenida, se puede mencionar, que el módulo de celda solar en cuestión ofrece una corriente máxima o corriente a corto circuito de 35,40mA,

además, de un voltaje máximo o voltaje a circuito abierto de 5,44V y una potencia máxima entregada de 114,60mW para una irradiancia de 217W/m². Cabe mencionar, que al ser este valor de irradiancia muy bajo comparado con el utilizado en las condiciones STC, ocurren dos situaciones. La primera, es que el factor de forma, el cual fue de 0,60, al ser comparado con valores de *FF* obtenidos en otros sistemas en que también se utilizaron bombillos incandescentes de tungsteno, se aprecian valores similares de *FF*, pero inferiores a los obtenidos bajo condiciones STC. Segundo, la eficiencia de conversión de energía para este dispositivo semiconductor se calculó en 23,7%, pero al observar en estudios previos, en los que utilizaron bombillos incandescentes de tungsteno, que no hay una relación lineal entre la potencia máxima generada y la irradiancia incidente, ocurrirá, que dicho valor de eficiencia obtenida podría variar bajo condiciones STC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, A., Hernández, D., Ordoñez, L., Martínez, L. (2022). *Comparación de eficiencias de conversión de energía en celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino, policristalino y amorfo para mediciones meteorológicas de la ciudad Santiago de Cali* (Informe No. 5). Instituto Nacional de Metrología / Universidad Santiago de Cali. <https://inm.gov.co/wp-content/uploads/2022/06/Trabajo-No.5.pdf>
- Arencibia-Carballo, G. (2016). *La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica*. *Revista Electrónica de Veterinaria*, Vol. 17, No. 9, pp. 1-4. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63647456002>
- Barzola, J., Rubin, L. (2013). *Eficiencia de una celda solar común y su comparación con celdas de tecnología HIT*. *Revista Tecnológica ESPOL – RTE*, Vol. 26, No. 2, pp. 1-15. https://www.researchgate.net/publication/267211218_Eficiencia_de_una_celda_solar_comun_y_su_comparacion_con_celdas_de_tecnologia_HIT
- Cabezas-Maslanczuk, M. D., Franco-Brazês, J. I., & Fasoli-Tolosa, H. J., (2018). *Diseño y evaluación de un panel solar fotovoltaico y térmico para poblaciones dispersas en regiones de gran amplitud térmica*. *Revista Ingeniería Investigación y Tecnología*, Volumen 19, No. 2, pp. 209-221. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n2.018>
- Calle Martín, R. D. L. (2021). *Caracterización de curvas I-V en paneles fotovoltaicos bifaciales* (Tesis de Grado en Ingeniería Eléctrica). Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/47961/TFG-I-1926.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Chan, D. S. H. & Phang, J. C. H. (1987). *Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics*. In IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 34, No. 2, pp. 286-293.
<https://doi.org/10.1109/T-ED.1987.22920>
- Flores Rivera, N. R. & Domínguez Ramírez, M. A. (2016). *Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio* (Tesis de Maestría). Centro de investigación en materiales avanzados, S. C. Posgrado.
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/215>
- García, J. A. (2011). *Respuesta Espectral en Celdas Solares Multi-Juntura de Estructura Monolítica Basadas en Semiconductores III-V*. 10.13140/RG.2.2.13127.50089. (Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas). Universidad de Buenos Aires.
https://www.researchgate.net/publication/317168359_Respuesta_Espectral_en_Celdas_Solares_Multi-Juntura_de_Estructura_Monolitica_Basadas_en_Semiconductores_III-V
- Honsberg, C. B. & Bowden, S. G. (2019). *Photovoltaics Education Website*.
www.pveducation.org
- Mengata, G. M., Perabi, S. N., Ndi, F. E. & Wiysahnyuy, Y. S. (2022). *Characterization of solar photovoltaic modules powered by artificial light for use as a source for smart sensors*. Energy Reports, Volume 8, Pages 12105-12116.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.056>
- Ndegwa, R., Simiyu, J., Ayieta, E. & Odero, N. (2020). *A Fast and Accurate Analytical Method for Parameter Determination of a Photovoltaic System Based on Manufacturer's Data*. Journal of Renewable Energy, Volume 2020, 7580279, p. 18.
<https://doi.org/10.1155/2020/7580279>
- Novoa Jerez, J. E., Alfaro, M., Alfaro, I. & Guerra, R. (2020). *Determinación de la eficiencia de un mini panel solar fotovoltaico: Una experiencia de laboratorio en energías renovables*. Educación Química. Volumen 31(2), pp. 22-37.
<https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2020.2.70300>
- Othman, A. M., El-arini, M. M. M., Ghitas, A., & Fathy, A. (2012). *Realworld maximum power point tracking simulation of PV system based on Fuzzy Logic control*. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 1(2), 186–194.
<https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2012.12.016>

- Rajendra, N. (2020) Study on Emitted Radiations from Filament Bulb of Different Power. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 8, 1615-1645.
<https://doi.org/10.4236/jamp.2020.88124>
- Rodríguez, A. G., (2024). *Paneles solares, un beneficio económico y ambiental*. *Revista Materiales Avanzados*, Volumen 53, No. 40, pp. 53-56.
<https://doi.org/10.22201/iim.rma.2024.40.31>
- Rojas Hernández, R. E., (2011). *Caracterización espectral de células solares comerciales* (Tesis de Maestría en Física y Tecnología de los láseres). Universidad de Salamanca.
<https://lbt.usal.es/wp-content/uploads/2015/12/TFM.pdf>
- Roy, S. & Sarkar, P. (2014). *Study the Characteristics of PV Module Using a Sun Simulator*. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. Vol. 3 Issue 4.
https://www.researchgate.net/publication/327633501_Study_the_Characteristics_of_PV_Module_Using_a_Sun_Simulator
- Salazar-Peralta, A., Pichardo-S. J. A., & Pichardo-S, U. (2016). *La energía solar, una alternativa para la generación de energía renovable*. *Revista de Investigación y Desarrollo*, Vol. 2, No. 5, pp. 11-20.
https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Investigacion_y_Desarrollo/vol2num5/Revista_de_Investigaci%C3%B3n_y_Desarrollo_V2_N5_2.pdf
- Sebitosi, A. B. & Pillay, P. (2007). *New Technologies for Rural Lighting in Developing Countries: White LEDs*. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 22, No. 3, pp. 674-679.
<https://core.ac.uk/download/pdf/211511316.pdf>
- Torres-Pacheco, S., Jurado-Pérez, F., Granados-Lieberman, D. & Lozano-Luna, A. (2018). *Eficiencia en paneles solares*. *Revista del Diseño Innovativo*, Volumen 2, No. 2, pp. 9-21.
https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Diseno_Innovativo/vol2num2/Revista_Diseno_Innovativo_V2_N2.pdf
- 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*. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación (RIDI)*, Vol. 8, No. 2, pp. 343-356.
<https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972>