

Identificación de parámetros de desempeño en las conexiones serie y paralelo con celdas solares



Colaboración

Mario Espinosa Tlaxcaltecatl, Marco Antonio Alonso Pérez, Jacob Javier Vasquez Sanjuan, Juan Antonio Arizaga Silva, Carlos Muñiz Montero, Universidad Politécnica de Puebla

Fecha de recepción: 15 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 07 de octubre de 2024

RESUMEN: El trabajo reporta la valoración de los parámetros de desempeño obtenidas al implementar las conexiones serie y paralelo con celdas solares comerciales. Las estimaciones de los parámetros se obtienen usando curvas IV (corriente-voltaje), obtenidas al usar un equipo de medición y alimentación eléctrica basado en un electrómetro. Así mismo, el sistema de iluminación de luz blanca es empleado en un ambiente aislado donde se asegura la uniformidad de la mancha de iluminación. Las diversas formas de conexión de celdas son empleadas para obtener una mayor amplitud resultante de corriente y/o voltaje del sistema fotovoltaico, pero igual de importante es determinar su relación con la eficiencia de conversión de potencia, como el principal parámetro de desempeño. Los resultados muestran que la eficiencia de conversión de potencia es mayor un 2.14% en la conexión en serie en comparación con la conexión en paralela.

PALABRAS CLAVE: caracterización eléctrica, respuesta corriente-voltaje, medición de corriente, configuración serie, configuración paralela.

ABSTRACT: The work reports assessing the performance parameters obtained when implementing series and parallel connections with commercial solar cells. Parameter estimates are obtained using IV (current-voltage) curves, obtained by using electrical power and measurement equipment based on an electrometer. Likewise, the white light lighting system is used in an isolated environment where the uniformity of the lighting spot is ensured. The various forms of cell connection are used to obtain a greater resulting amplitude of current or voltage of the photovoltaic system, but equally important is determining its relationship with the power conversion efficiency, as the main performance parameter. The results show that the power conversion efficiency is 2.14% higher in the series connection compared to the parallel connection.

KEYWORDS: electrical characterization, current-voltage response, current measurement, series configuration, parallel configuration.

INTRODUCCIÓN

Los dispositivos fotovoltaicos son utilizados con un crecimiento acelerado en los últimos años, según datos de la Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency, 2023), se estima en su reporte del 2023 que las fuentes renovables presenten un crecimiento de 30%, liderada por la energía fotovoltaica. De las cuales se pueden identificar dos casos, los dispositivos individuales con baja potencia, los comúnmente llamados como celdas solares y los paneles solares. Los dispositivos de baja potencia están limitados en su aplica-

ción, para alimentación de dispositivos domésticos o en sistemas modernos de recarga de pequeñas baterías (Mulyono et al., 2018)(Serdiuk et al., 2024)(Juep Chicaiza, Christian Alexander; Romero Bedón, 2024). La limitación está definida por los requerimientos de potencia eléctrica que requieren los dispositivos de carga, los cuales presentan variantes de corrientes y voltajes diversos. Para hacer viable el uso de estos dispositivos es necesario definir la relación entre las características eléctricas y de desempeño (Cardet, 2022)(Al- Ezzi & Ansari, 2022) de los dispositivos comerciales, en su forma individual y en sus formas de conexión serie y paralela. Este análisis ha sido atendido en el caso de celdas solares por (Toure et al., 2022) y con paneles solares (Mengounou Mengata et al., 2022). El trabajo se enfoca en determinar esta relación usando celdas solares. Primero, cumpliendo las condiciones estables del espacio de iluminación y controlando la excitación eléctrica a las celdas solares con una interfaz automatizada. Después, obteniendo las mediciones de corriente, para finalmente, analizar los parámetros de desempeño usando los resultados numéricos. La caracterización realizada en este trabajo contribuye con información sobre el desempeño particular de las conexiones serie y paralela. Al momento de utilizar alguna de estas conexiones, es necesario, considerar los requerimientos de potencia, ya sea, con incremento de la corriente en la conexión paralela o incrementando el voltaje en la conexión en serie. Así, como considerar el desempeño de la conexión seleccionada, con importancia significativa, en la eficiencia de conversión de potencia, ya que este parámetro define el porcentaje final de potencia resultante.

MATERIAL Y MÉTODOS

Materiales

Se utilizan celdas solares comerciales con patente USA NO.:29/158.337 de 10 x 8.5 cm de área total, con voltaje nominal de 1.5 V. La iluminación como en trabajos similares (Mengounou Mengata et al., 2022) (Mathews et al., 2019) (Venkateswararao et al., 2020) es proporcionada por una lámpara de luz blanca con una irradiancia máxima de 1040 W/m², la luz es conducida por un ducto hueco con forma de prisma rectangular de 150 x 10 x 12 cm, que permite aislar la iluminación externa y es caracterizada con un medidor solar marca ANAHEIM SCIENTIFIC H115. La fuente de voltaje y el medidor de corriente está integrado en un electrómetro marca Keithley 6517B. Para el arreglo de celdas solares se utiliza un dispositivo configurable que permite la conexión de las tres celdas solares en formas diversas.

Método de caracterización

La Figura 1 muestra las etapas en el proceso para determinar los parámetros de desempeño, usando las curvas I-V en las conexiones serie y paralela en celdas solares.

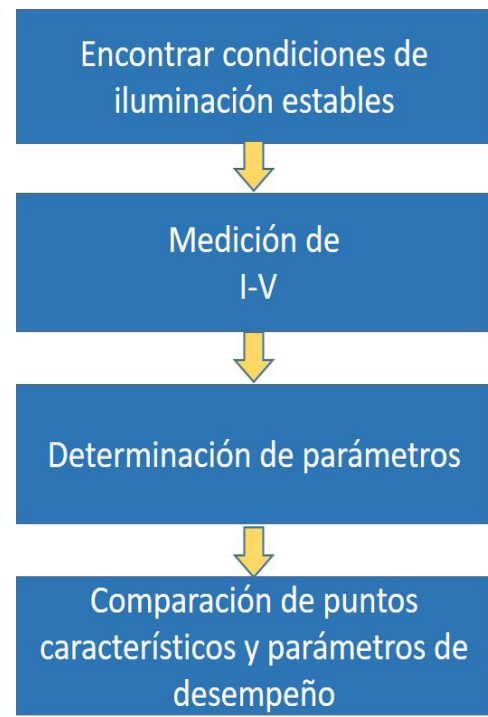


Figura 1. Proceso de caracterización de celdas solares individuales y en conexión.

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar las mediciones en condiciones de laboratorio, la iluminación es proporcionada por una lámpara de luz blanca. Inicialmente, se observa la presencia de un patrón de iluminación irregular, caracterizado por picos y espacios de baja intensidad de iluminación. Por lo tanto, se implementa un arreglo experimental para mejorar la homogeneidad del perfil de iluminación. Se propone confinar el haz en un ducto hueco de forma rectangular, esto disminuye la intensidad de radiación en la salida del ducto, lo cual asociamos a un proceso de absorción en las paredes, pero mejora la uniformidad del haz. Y mediante un proceso heurístico se buscó la homogeneidad del haz y la longitud del ducto, encontrando una distancia adecuada de 150 cm. El perfil de iluminación es escaneado a través de un medidor solar, con una irradiancia promedio a cada celda solar de 1.23 W/m², esto presenta una potencia óptica de 1.57 mW al considerar el área efectiva de cada celda solar.

Sistema de caracterización

El arreglo experimental mostrado en la Figura 2, está integrado por una fuente de luz blanca a la izquierda, esta iluminación es confinada y conducida hasta las celdas solares por una estructura aislada a temperatura ambiente, que además uniforma la intensidad de radiación en el área de iluminación. Las celdas solares se conectan a un electrómetro, el cual es configurado para excitar las celdas solares con su fuente de voltaje y medir la corriente obtenida.

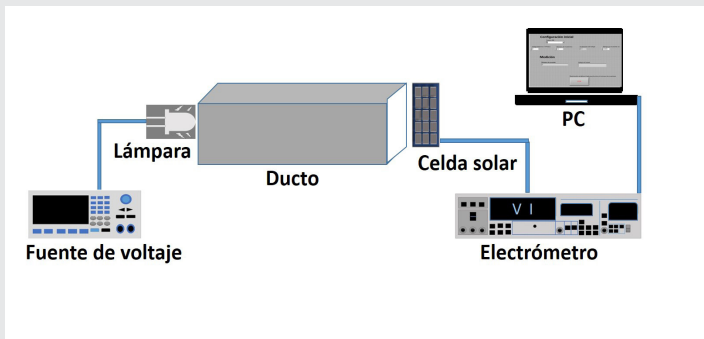


Figura 2. Diagrama esquemático de la configuración del sistema de caracterización.

Fuente: Elaboración propia.

La configuración del electrómetro utiliza comunicación serie RS232 con una computadora, que controla los rangos de voltaje aplicados a las celdas, usando el programa de automatización Labview. En el panel frontal, se elige el voltaje máximo que puede proporcionar la fuente de voltaje del electrómetro. Este parámetro debe garantizar que la respuesta del dispositivo excitado no sobrepase la capacidad de medición de corriente del electrómetro de 10A a 21 mA, y del voltaje de 1uV a 210V (Keithley, 2016) en nuestro experimento, las celdas solares individuales deben ser excitadas con un voltaje no mayor a 0.7 V. Con este voltaje máximo la corriente resultante depende de la intensidad de iluminación. Al contar con niveles de irradiancia menores a 2 W/m², se mide una corriente no mayor a 2 mA. Sin embargo, para proteger al electrómetro de corrientes mayores se elige una escala de medición de 20 mA, que es la mayor escala del instrumento.

Estimación de parámetros de desempeño en celdas solares

Los parámetros de desempeño de dispositivos fotovoltaicos son comúnmente estimados usando los puntos característicos: voltaje de circuito abierto (V_{oc}), corriente de corto circuito (I_{sc}), voltaje de potencia máxima ($V_{P_{max}}$), corriente de potencia máxima ($I_{P_{max}}$) y punto de potencia máxima (P_{max}), ubicados en la curva IV, ver Figura 3.

La corriente de corto circuito está ubicada en el punto de intersección de la curva IV con el eje de corriente, el voltaje de circuito abierto está ubicado en el punto de intersección de la curva con el eje de voltaje. Para el caso del voltaje de potencia máxima, está asociado al punto de máxima potencia (Tourre et al., 2022), calculado al trazar la curva PV (Potencia Voltaje). Esta curva se obtiene al multiplicar el voltaje y la corriente de la curva IV. Después se identifica la corriente de potencia máxima asociada a este voltaje de potencia máxima.

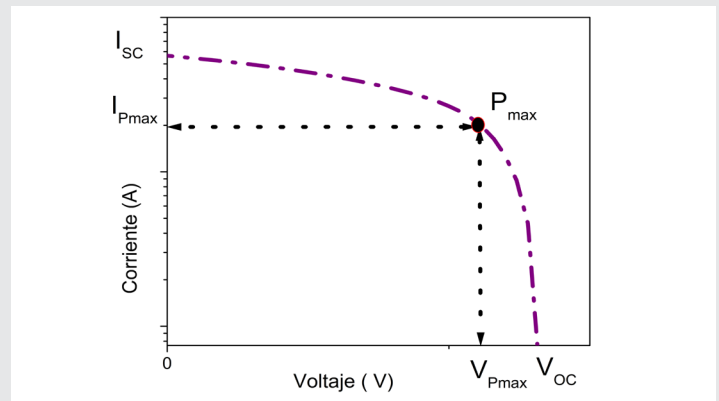


Figura 3. Curva IV de un dispositivo fotovoltaico.

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros de desempeño determinados en este trabajo es el factor de llenado (FF, por sus siglas en inglés) y la eficiencia de conversión de potencia η . El primero, determina la relación del área bajo la curva del rectángulo formado por el voltaje y corriente de máxima potencia, con respecto al área bajo la curva del rectángulo que forma el voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito, Ecuación (1). El segundo parámetro determina la razón de transformación de la potencia eléctrica resultante con respecto a la potencia óptica incidente, sin considerar las pérdidas asociadas a la reflexión de la iluminación, Ecuación (2).

$$FF = \frac{V_{P_{max}} I_{P_{max}}}{V_{oc} I_{sc}} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$\eta = \frac{V_{P_{max}} I_{P_{max}}}{Irr A} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde, Irr es la irradiancia en W/m² y A es el área de incidencia en m².

RESULTADOS

En la primera parte se determinan las condiciones de operación de las celdas solares con iluminación solar, se mide la respuesta de la celda solar con una iluminación de 856 W/m², la celda presenta un área de incidencia de 1.28X10⁻³ m², esto indica una potencia óptica captada de 1.09 W. La respuesta eléctrica obtenida es 1.72 V y una corriente de 128 mA, bajo estas condiciones se estima una eficiencia instantánea de conversión de potencia de 20.19% usando la ecuación (2).

Después, en condiciones de laboratorio se obtienen las curvas IV.

La Figura 4 muestra las curvas IV experimentales de las tres celdas solares. Donde, el comportamiento de la celda solar 1 presenta un comportamiento más cercano al proceso de rectificación ideal, en cambio las otras celdas solares muestran un comportamiento semejante entre ellas, pero alejado de lo ideal y más

cercano a un comportamiento resistivo, lo cual favorece a bajos parámetros de desempeño.

comportamiento de las dos celdas con características más resistivas.

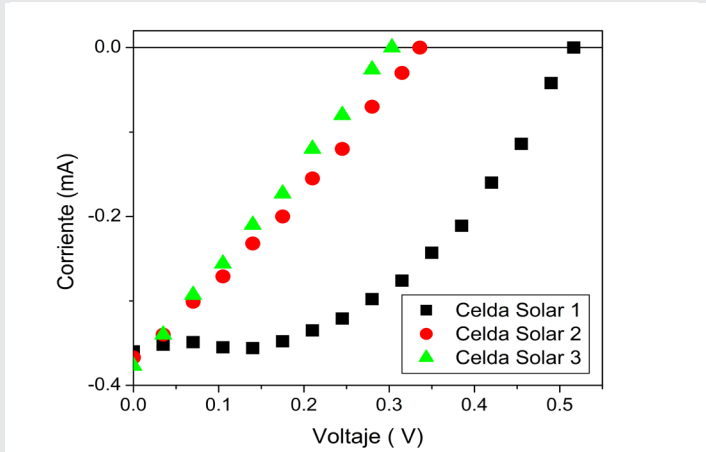


Figura 4. Curva IV de las tres celdas solares, usando una potencia óptica 1.57mW.
Fuente: Elaboración propia.

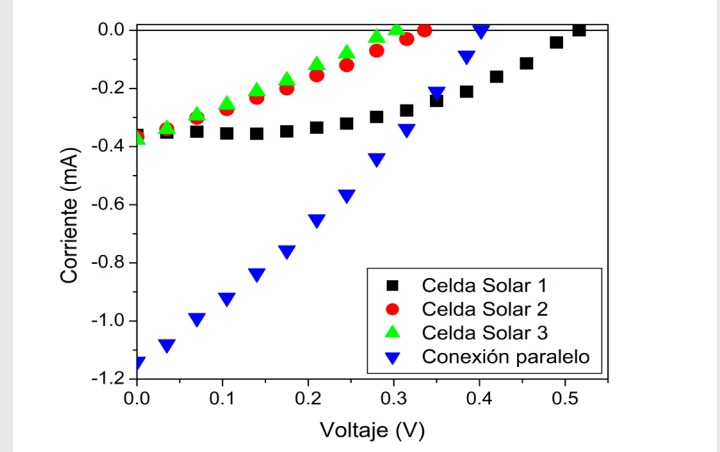


Figura 5. Curva IV de las tres celdas solares individuales y la curva IV obtenida al conectar todas en paralelo.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 1 muestra los puntos característicos de las curvas IV de cada celda solar, así como los parámetros de desempeño estimados. Es importante considerar que la amplitud de los puntos característicos son reducidos al compararlos con los obtenidos en la caracterización solar debido a la baja intensidad de iluminación en laboratorio.

Tabla 1. Puntos característicos y parámetros de desempeño de las tres celdas solares en forma individual.

CS	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	V _{Pmax} (V)	I _{Pmax} (mA)	FF	η (%)
CS1	0.51	0.36	0.31	0.27	0.45	5.33
CS2	0.33	0.36	0.17	0.20	0.28	2.16
CS3	0.30	0.37	0.17	0.17	0.26	1.84

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5 muestra las curvas IV experimentales de las tres celdas solares comparadas con la curva IV resultante al conectar en paralelo todas las celdas solares.

La amplitud de la I_{sc} en la curva IV de la conexión en paralelo es 1.14 mA. Este valor es 0.03 mA mayor a la suma de las I_{sc} individuales de cada celda solar, este resultado es el esperado al considerar que en conexión en paralelo donde cada corriente contribuye a la corriente total. Pero en el caso de la amplitud del Voc de la conexión en paralelo es 0.4 V, ubicado aproximadamente en el valor medio de los extremos de los valores Voc individuales. La forma de la curva IV de la conexión en paralelo presenta una forma resistiva, que refleja la influencia en forma predominante del

La Figura 6 muestra las curvas IV experimentales de las tres celdas solares comparadas con la curva IV resultante al conectar en serie todas las celdas solares.

La amplitud del Voc en la curva IV de la conexión en serie es 1.22 V. Este valor es 0.07 V mayor a la suma de los Voc individuales de cada celda solar.

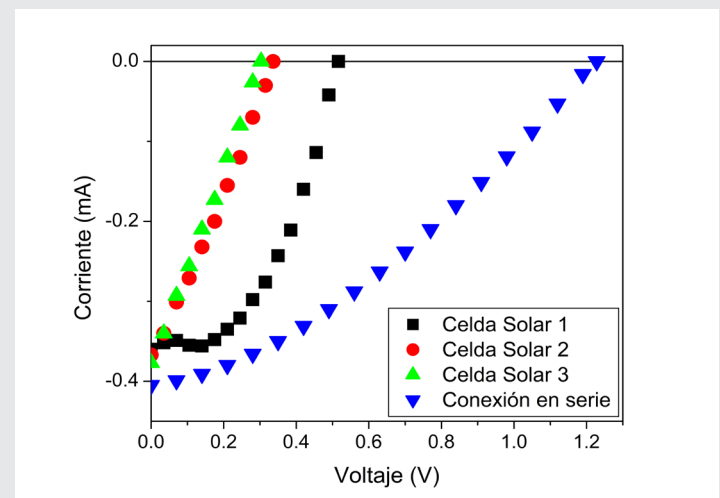


Figura 6. Curva IV de las tres celdas solares individuales y la curva IV obtenida al conectar todas en serie.
Fuente: Elaboración propia.

Este resultado es el esperado al considerar que en conexión en serie cada voltaje contribuye al voltaje total. Pero en el caso de la amplitud del I_{sc} es 0.4 mA, ubicado aproximadamente 10% mayor al promedio de los valores I_{sc} individuales. La forma de la curva IV de la conexión en serie presenta una forma combinada, que refleja una influencia mayor en el intervalo de voltaje de 0 a 0.2 V de la celda solar 1, que presenta

las mejores características rectificadoras, lo que se ve reflejado en mejores parámetros de desempeño. Aunque, a mayores valores de voltaje pierde esta deseable característica rectificadora.

Para comparación de los parámetros eléctricos y de desempeño de las formas de conexión en serie y en paralelo de las tres celdas solares, se utilizan las curvas PV (Potencia-Voltaje), ver Figura 7.

La potencia máxima de la conexión en paralelo es 0.13 mW y de la conexión en serie es 0.16 mW. En este sentido, la conexión en serie presenta una amplitud 0.03 mW mayor que la conexión en paralelo.

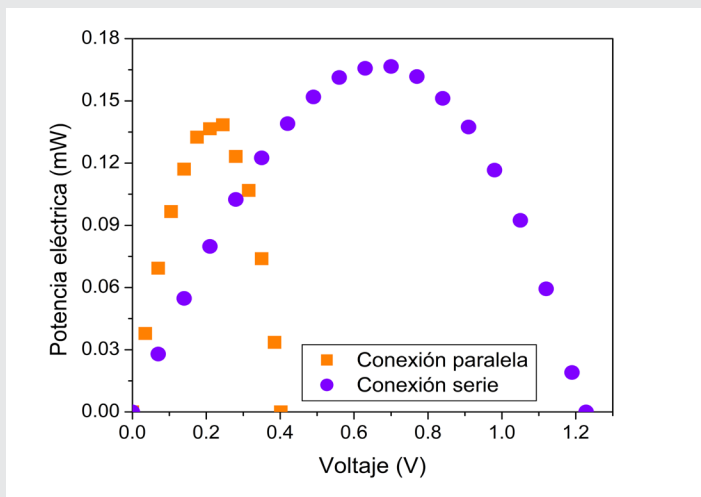


Figura 7. Curva PV de la conexión serie y paralelo.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2 muestra los puntos característicos y parámetros de desempeño de las curvas PV de las conexiones paralela y serie.

Tabla 2. Puntos característicos y parámetros de desempeño de las conexiones paralela y serie de las 3 celdas solares.

Con.	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	V _{Pmax} (V)	I _{Pmax} (mA)	FF	η (%)
Paralela	0.40	1.14	0.24	0.56	0.29	8.56
Serie	1.22	0.40	0.70	0.24	0.34	10.7

Fuente: Elaboración propia.

Independientemente de los requerimientos de la carga, la conexión en serie contribuye con mayor voltaje y la conexión en paralelo con mayor corriente. En términos de potencia máxima la conexión en serie es ligeramente mayor. Donde existe una clara mejoría es en términos de la eficiencia de conversión de potencia, donde la conexión en serie tiene un 2.14 % mayor con respecto a la conexión paralela.

Al comparar estos resultados con otros autores, las líneas de investigación contrastan en forma parcial,

como en el caso del análisis realizado por (Toure et al., 2022), donde se define que la conexión paralela presenta menores pérdidas, pero en el caso de iluminación parcial de iluminación, en nuestro caso es relevante que la iluminación sea uniforme sobre las celdas solares. Otros grupos de investigación presentan resultados con enfoques limitados y aplicados, como (Serdiuk et al., 2024) donde realizan análisis de las conexiones desde las condiciones de potencia requeridas sin considerar el análisis de eficiencia. En este sentido, este trabajo es innovador por su perfil de análisis de baja potencia (condiciones de uso en interiores) y su análisis de eficiencia.

CONCLUSIONES

La determinación de los parámetros de desempeño de celdas solares con baja iluminación es un requerimiento para aplicaciones en espacios internos. En este sentido, es valiosa la información obtenida de estos parámetros y en particular la eficiencia de conversión de potencia en las comunes configuraciones serie y paralelo. Las cuales se emplean para incrementar corriente y voltaje dependiendo de la carga que se desea alimentar. La importancia de seleccionar correctamente la conexión no solo permite cumplir con las condiciones básicas de operatividad de alimentación en sistemas eléctricos, también es importante definir las ventajas de usar la conexión en serie por la eficiencia alcanzada, si se tiene la oportunidad de usar su contraparte en paralelo desde la fase de diseño. Esta valoración permite conocer las implicaciones de incrementar uno de los parámetros eléctricos al implementar algunas de las dos configuraciones analizadas y las consecuencias en los parámetros de desempeño, buscando equilibrar el desempeño del sistema de alimentación. Esta investigación requirió de equipo especializado, con condiciones experimentales controladas y un conocimiento de diversos programas e interfaces de comunicación, lo que contribuye al desarrollo profesional de recursos humanos a través del estudio metodológico de una aplicación planteada, que es el uso de celdas solares en aplicaciones compartidas de comunicación y alimentación.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Politécnica de Puebla, por su apoyo al brindar el espacio de trabajo para el proceso de caracterización de celdas solares.

BIBLIOGRAFÍA

AIEzzi, A. S., & Ansari, M. N. M. (2022). *Photovoltaic Solar Cells: A Review*. *Applied System Innovation*, 5(4), 1-17. <https://doi.org/10.3390/asi5040067>.

Cardet, P. H. pdf. (2022). *Técnicas avanzadas de caracterización de materiales semiconductores y de celdas solares de película delgada*. Instituto de Física del Litoral.

International Energy Agency. (2023). *World Energy Outlook 2023 | Enhanced Reader*. <https://www.iea.org/news/the-energy-world-is-set-to-change-significantly-by-2030-based-on-today-s-policy-settings-alone>.

Juep Chicaiza, Christian Alexander; Romero Bedón, F. R. (2024). *Análisis comparativo en aplicaciones de carga de batería utilizando motores stirling versus celdas solares*. *Dom. Cien.*, 10, 104-119.

Keithley. (2016). *Model 6517B Reference Manual*. In Keithley Instruments Inc. (Issue June).

Mathews, I., Kantareddy, S. N., Buonassisi, T., & Peters, I. M. (2019). *Technology and Market Perspective for Indoor Photovoltaic Cells*. *Joule*, 3(6), 1415-1426. <https://doi.org/10.1016/J.JOULE.2019.03.026>.

Mengounou Mengata, G., Ngoffe Perabi, S., 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*, 8, 12105-12116. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.056>.

Mulyono, A. E., Mustika, T., Sulaikan, H. P., & Kartini, E. (2018). *Development of battery performance data acquisition system for monitoring battery performance inside solar cell system*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 432(1).

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/432/1/012057>. Serdiuk, T., Serchenko, M., Radkevych, A., Serdiuk, S., & Skalko, V. (2024). *Modernization of the power supply system applying solar cells and batteries*. *MATEC Web of Conferences*, 390, 01001. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202439001001>

Toure, C. S., Sow, P. L. T., Dia, F., & Mbodji, S. (2022). *Experimental Analysis to Extract the Maximum Output of Serial and Parallel PV Module ConFigurations under Partial Shadow Conditions: A Case Study for Bambey, Senegal*.

Energy and Power Engineering, 14(07), 233-247. <https://doi.org/10.4236/epe.2022.147013>.

Venkateswararao, A., Ho, J. K. W., So, S. K., Liu, S. W., & Wong, K. T. (2020). *Device characteristics and material developments of indoor photovoltaic devices*. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 139, 100517. <https://doi.org/10.1016/J.MSER.2019.100517>.

