



Doi: <https://doi.org/10.70577/asce.v5i2.792>

**Recibido:** 2026-04-29

**Aceptado:** 2026-05-08

**Publicado:** 2026-06-12

## **Evaluación de dispositivos LED como captadores de energía solar.**

### **Evaluation of led devices as solar energy collectors.**

#### **Autor(s)**

**Alex Iván Masabanda Gavilanes <sup>1</sup>**

Facultad de ciencias de la Ingeniería

[alex.masabanda0510@utc.edu.ec](mailto:alex.masabanda0510@utc.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0007-3267-6717>

**Universidad Técnica de Cotopaxi**

Latacunga – Ecuador

**Ing. Marco León <sup>1</sup>**

Aplicadas Carrera de Electricidad

[marco.leon@utc.edu.ec](mailto:marco.leon@utc.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0001-7989-1544>

**Universidad Técnica de Cotopaxi**

Latacunga – Ecuador

#### Como Citar

Masabanda Gavilanes. A. I. &, León. I. (2026) Evaluación de dispositivos LED como captadores de energía solar. ASCE MAGAZINE 5(2) 3075-



---

## Resumen

En el ámbito académico, la precisa caracterización fotovoltaica tropieza con obstáculos derivados de los elevados costos que implican tanto la instrumentación especializada como los simuladores comerciales. Con el fin de subsanar esta laguna técnica, el objetivo del presente estudio fue evaluar de forma experimental, el comportamiento fotovoltaico de ocho configuraciones de LED multiespectro en una cámara de iluminación de bajo costo. La metodología consistió en implementar un sistema automatizado de caracterización en una cámara de 1m<sup>2</sup> calibrada a ~1000 W/m<sup>2</sup>, donde un microcontrolador ESP32 y un sensor INA226 registraban curvas I-V en barridos de 60 segundos. Se probaron matrices macrométricas, módulos RGB, tiras LED y paneles blancos. Los resultados cuantitativos revelaron que los LED blancos (2,4 W) y la tira de LED presentaron el mejor desempeño con potencias máximas ( $P_{m\acute{a}x}$ ) de 1,02 mW y 0,71 mW, y factores de relleno (FF) de 0,55 y 0,57, respectivamente. Por otro lado, los LED UV inducían la respuesta fotográfica más débil, con un DE ( $P_{m\acute{a}x}$ ) de 0,05 mW y un FF de 0,45. En conclusión, se comprueba la viabilidad técnica de emplear dispositivos LED como eficientes captadores solares de energía a pequeña escala, validando el impacto del simulador solar DIY como herramienta de alta reproducibilidad ( $CV\% < 5\%$ ) y bajo costo para la investigación optoelectrónica.

**Palabras clave:** LED fotovoltaico; curva I-V; Simulador solar DIY; ESP32; INA226; Iluminación de espectro completo.



---

## Abstract

In the academic field, accurate photovoltaic characterization faces obstacles stemming from the high costs associated with both specialized instrumentation and commercial simulators. To address this technical gap, the objective of this study was to experimentally evaluate the photovoltaic performance of eight multispectral LED configurations in a low-cost lighting chamber. The methodology involved implementing an automated characterization system in a 1 m<sup>2</sup> chamber calibrated to ~1000 W/m<sup>2</sup>, where an ESP32 microcontroller and an INA226 sensor recorded I-V curves in 60-second sweeps. Macrometric arrays, RGB modules, LED strips, and white panels were tested. The quantitative results revealed that the white LEDs (2.4 W) and the LED strip performed best, with maximum powers (P<sub>max</sub>) of 1.02 mW and 0.71 mW, and fill factors (FF) of 0.55 and 0.57, respectively. On the other hand, UV LEDs induced the weakest photoresponse, with a DE (P<sub>max</sub>) of 0.05 mW and an FF of 0.45. In conclusion, the technical feasibility of using LED devices as efficient small-scale solar energy collectors has been demonstrated, validating the impact of the DIY solar simulator as a highly reproducible (CV% < 5%) and low-cost tool for optoelectronic research.

**Keywords:** Photovoltaic LED; I–V curve; DIY solar simulator; ESP32; INA226; Full-spectrum lighting.



---

## Introducción

La caracterización de dispositivo fotovoltaico se realiza habitualmente bajo condiciones estandarizadas para evaluar parámetros clave como el voltaje de circuito abierto, corriente de cortocircuito, la potencia máxima y el factor de llenado. El estudio práctico de estas variables es crucial para la formación técnica y el desarrollo de tecnologías renovables en el ámbito académico. Por otro lado, la dependencia de instrumentación especializada y simuladores solares comerciales de alto costo crea una barrera económica que limita su uso en entornos universitarios e investigaciones de bajo presupuesto, restringiendo el acceso equitativo a la experimentación científica avanzada. También, fueron diseñados como dispositivos electroluminiscentes, además, pueden presentar respuesta fotoeléctrica cuando son expuestos a iluminación extrema, lo que genera señales eléctricas medibles. Esta característica los convierte en una opinión útil para fines didácticos y experimentales, especialmente en estudios comparativos de bajo costo (International Electrotechnical Commission, IEC 60904-1:2020, 2020; Dirnberger & Kräling, 2013).

A partir de ello, la mayoría de las investigaciones previas se han enfocado en demostraciones aisladas, dispositivos individuales o condiciones de iluminación poco controladas. Esto ha limitado la comparación sistemática entre diferentes configuraciones de LED y ha minimizado la reproducibilidad de los resultados (Bourgeois et al., 2026; Ranilović et al., 2024). En consecuencia, persiste la necesidad de contar con una metodología simple, estable y accesible que permita evaluar el comportamiento I-V de distintos arreglos de LED bajo condiciones controladas (Colace et al., 2024; Hwang & Yasuda, 2022).

Por tales razones, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la respuesta fotovoltaica comparativa de ocho configuraciones de LED multiespectro bajo condiciones controladas de bajo costo, validando un sistema de adquisición basada en ESP32 e INA226 para su replicación académica.

## Material y métodos

Esta investigación adopta un enfoque cuantitativo de tipo experimental y alcance descriptivo-comparativo, orientado a evaluar variables eléctricas bajo condiciones controladas. Bajo este diseño, la plataforma experimental se estructuró para aproximarse a las condiciones estandarizadas

de caracterización fotovoltaica. El sistema operó con una irradiación cercana a  $1000 \text{ W/m}^2$  y parámetros de medición estables (Bliss et al., 2009). Aunque la cámara no reproduce con exactitud el espectro AM1.5G, el diseño prioriza la uniformidad lumínica, estabilidad y la comparabilidad entre los dispositivos evaluados (International Electrotechnical Commission, IEC 60904-1:2020, 2020; Sengupta et al., 2021; Schubert & Spinner, 2016), ver figura 1.

### Figura 1

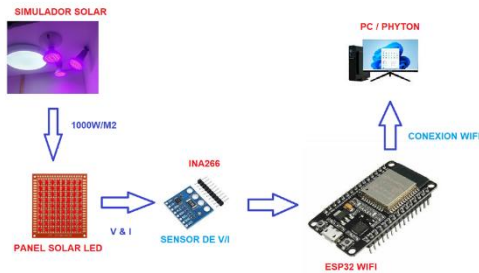
#### *Caja experimental y disposición interna del sistema de iluminación LED*



**Nota.** Elaboración propia. (A) Caja experimental de poliestireno expandido (EPS) con difusor acrílico opalino. (B) Disposición interna de las lámparas LED de cultivo de espectro completo y del panel LED blanco auxiliar dentro de la caja.

Los DUT incluyeron distintas configuraciones de LED multiespectro, entre ellas LED blancos, rojos, verdes, azules, amarillos, ultravioleta, RGB y una tira LED comercial. Todos los dispositivos se montaron sobre placas PCB de dimensiones estandarizadas para mantener uniformidad mecánica y eléctrica durante las pruebas. Adicionalmente, la adquisición de datos se realizó por medio de un microcontrolador ESP32 conectado a un sensor INA226 por protocolo I<sup>2</sup>C. Donde, esta configuración permitió registrar voltaje, corriente y potencia en tiempo real durante los barridos I-V, con almacenamiento digital de los datos en formato CSV para su posterior procesamiento (Texas Instruments, 2024). A continuación, en la figura 2 se resume la disposición general del sistema experimental, incluyendo la fuente de iluminación, difusor, posición del DUT y la electrónica de medición. Esta configuración permitió desarrollar un procedimiento de caracterización comparativa en un entorno experimental de bajo costo.

**Figura 2** Esquema general de la configuración experimental para la caracterización del LED I–V



**Nota.** Elaboración propia. Esquema del sistema experimental empleado para la caracterización I–V del LED, lo cual integra las etapas de iluminación, medición y adquisición de datos.

El sistema de iluminación estuvo conformado por paneles LED de espectro completo y proyectores LED blancos auxiliares, dispuestos dentro de una cámara cerrada para mantener condiciones controladas de irradiancia (Green et al., 2024). Las superficies internas fueron acondicionadas con materiales reflectantes para mejorar la uniformidad de la iluminación sobre el plano del dispositivo bajo prueba (DUT) (Yamaguchi et al., 2021). Por otro lado, la calibración del sistema se realizó por medio de un panel Onda ODA10W. Primero, se estableció la línea base con el panel a una altura de 1,0 m ( $\sim 720\text{W/m}^2$ ). Segundo, se acoplaron dos reflectores auxiliares orientando los haces de luz para mitigar pérdidas angulares ( $\sim 960\text{W/m}^2$ ). Tercero, se redujo la altura de iluminación a una distancia exacta de 0,60 m y se ajustó el difusor opalino para homogeneizar el flujo, alcanzando la meta de  $\sim 1000\text{W/m}^2$  con una uniformidad de  $\pm 10\%$ . Los pasos cuantitativos se detallan en la Tabla1 (Ranilović et al., 2024).

**Tabla 1** Mediciones de calibración con el panel fotovoltaico OSDA ODA10W

Paso de calibración	Mesurado Voz (V)	Mesurado Isc (A)	Estimado Irradiancia (W/m <sup>2</sup> )	Ajuste Realizado
1. Iluminación inicial (solo panel de espectro completo, 1,0 m de altura)	17.85	0,36	~720 W/m <sup>2</sup>	Base configuración
2. Se agregó el primer foco auxiliar blanco (50 W)	19.10	0,41	~820 W/m <sup>2</sup>	Activación de auxiliar lámpara #1
3. Se agregó un segundo reflector (50-100 W, 6500 K)	20.45	0,45	~900 W/m <sup>2</sup>	Activación de auxiliar lámpara #2
4. Lámparas reorientadas para reducir pérdidas angulares	21.10	0,47	~960 W/m <sup>2</sup>	Direccional haz ajuste
5. Altura de iluminación reducida de 1,0 m → 0,60 m	21.30	0,48	~990 W/m <sup>2</sup>	Optimización de la altura para aumentar la densidad de fotones
6. Optimizado final configuración (uniformidad ±10%)	21.25	0,48	~1000 W/m <sup>2</sup>	Correcciones menores de alineación; reposicionamiento del difusor

**Nota.** Elaboración propia.

En la Tabla 1 se muestran los pasos de calibración efectuados con el panel de referencia Osa ODA10W para regular las condiciones de iluminación en la cámara de pruebas. En cada fase se consignan los parámetros eléctricos medidos, la irradiancia estimada correspondiente y los ajustes específicos realizados en el sistema de iluminación, tales como la activación de lámparas auxiliares, correcciones direccionales y la reducción de la altura de iluminación a 0,60 m. Estas modificaciones sucesivas permitieron conseguir una irradiancia efectiva de aproximadamente 1000 W/m<sup>2</sup> con una uniformidad aceptable en todo el plano del DUT (González et al., 2021).

**Tabla 2** Especificaciones de las fuentes de iluminación

Fuente tipo	Potencia nominal (O)	Temperatura de color / espectro	Notas
Panel LED de cultivo de espectro completo	960 (6x160)	Banda ancha (380-780 nm)	Principal iluminación
Proyectores LED (1 unidad)	50	5000-6500 K (blanco frío)	Espectral complementario
Difusor (acrílico opalino)	N / A	N / A	Homogeneización de la luz

**Nota.** Elaboración propia.

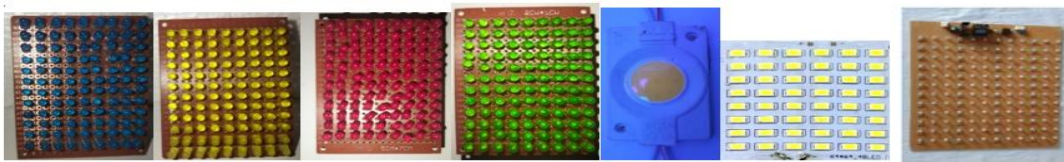
La configuración híbrida emplea un panel de cultivo de banda ancha (380-780nm) como fuentes principales y proyectores LED de blanco frío para complementar el espectro visible, logrando la densidad de flujo requerida (Tabla 2). Esta combinación, homogeneizada por medio del difusor la acrílico opalino, asegurando las condiciones de irradiancia controlada indispensables para garantizar la estabilidad y comparabilidad en la caracterización fotovoltaica de los dispositivos bajo prueba.

### Dispositivos bajo prueba (DUT)

Se seleccionaron ocho configuraciones basadas en LED como dispositivos bajo prueba (DUT), con la finalidad de comparar su respuesta fotovoltaica bajo condiciones controladas de iluminación (Polman et al., 2026). Donde, las configuraciones incluyeron LED de diferentes características espectrales de arquitecturas físicas, lo cual permitió evaluar variaciones en el comportamiento corriente-voltaje (I-V) entre los dispositivos analizados. La figura 3 detalla las arquitecturas de los DUT ensamblados, organizados secuencialmente desde las matrices monocromáticas (a-d, g) hasta los módulos de potencia COB y las tiras de componentes de montaje superficial (f) (Sze et al., 2021).

### Figura 3

*Conjuntos de LED utilizados como DUT: (a) matriz de LED azules, (b) cadena de LED amarilla, (c) matriz de LED ROJOS, (d) matriz de LED verdes, (e) módulo COB de 2,4, (f) matriz de tiras de LED de 2,4 (SMD) (g) cadena de LED UV*



*Nota.* Elaboración propia. Conjuntos LED evaluados como dispositivos bajo prueba (DUT) en la caracterización experimental.

**Tabla 4** Resumen de los dispositivos led bajo prueba (DUT), características espectrales y respuesta eléctrica esperada.

Identificación del DUT	Tipo de LED / Configuración	Longitud de onda nominal (λ)	Típica banda prohibida (eV)	Umbral de encendido	Voc bajo iluminación (V)	Isc bajo iluminación (mA)	Notas
1	Poder blanco LED (2,4 W)	Banda ancha (azul + fósforo, 430-700 nm)	~2,7-3,2 (base azul)	10-20	0,3-0,6	1-10	Banda ancha visible, conversión de fósforo, fuerte respuesta general.
2	LED roja	620-660 nm	~1,9-2,0	10-20	0,15-0,40	2-15	Alta Isc bajo luz visible; respuesta de banda estrecha.
3	LED verdes	~520 nm	~2,3-2,4	10-20	0,20-0,45	1-8	Eficiencia moderada, posición espectral intermedia.
4	LED azules	~470 nm	~2,6-2,7	0,10-0,20	25-55	0,5-5	Mayor Voc, menor Isc; fuerte dependencia de la irradiancia.
5	Amarillo LED	585-595 nm	~2,0-2,2	0,10-0,20	25-55	0,5-5	Mayor Voc, menor Isc; fuerte dependencia de la irradiancia.
6	LED UV	365-405 nm	~3,2-3,4	0,06-0,12	10-30	0,1-2	un nivel bajo de Isc debido al bajo contenido de UV en la fuente de luz.
7	Módulo COB (10-15 W)	Amplio espectro (mezcla de chips)	Compuesto	0,6-3	20-90	5-50	Gran área activa, mayor Pmax, se comporta más parecido a un megapanel fotovoltaico.
8	LED RGB	R: 630 nm / G: 520 nm / B: 470 nm	1,9-2,7	0,06-0,12	5-20 (por canal)	0,5-5	Canales probados por separado y en combinación para emisión blanca.

*Nota.* Elaboración propia.

### Cadena de adquisición de datos

Para obtener características I-V completas y precisas, cada DUT se sometió a variaciones de carga controladas (Polman et al., 2026). El barrido sistemático desde la tensión de circuito abierto (Voc) hasta la corriente de cortocircuito (Isc) se ejecutó de manera automatizada por medio de una carga electrónica programable en modo de resistencia constante (CR). Este procedimiento gradual evitó picos de corrientes abruptos, redujo el estrés término en los LED y garantizó la estabilidad y repetibilidad en la adquisición de cada curva eléctrica (Sara et al., 2014).

### Procedimiento experimental

Se estableció un protocolo experimental estandarizado para garantizar la repetibilidad, la consistencia entre los ensayos y la comparabilidad directa entre todos los dispositivos bajo prueba (DUT) (Sengupta et al., 2021; Sara et al., 2014). El procedimiento se ejecutó secuencialmente por medio de las siguientes fases operativas:

**Iniciando sistema de iluminación:** Con el fin de obtener condiciones óptimas estables y reproducibles, se encendió el panel de cultivo LED de espectro completo y los reflectores LED blancos auxiliares varios minutos antes de comenzar las mediciones. Se dejó un tiempo de calentamiento de aproximadamente cinco minutos para que las lámparas se equilibraran térmica y espectralmente. Este paso fue importante, pues las fuentes de luz LED sufren pequeñas, pero



medibles, variaciones en su salida espectral y en su flujo luminoso durante su arranque inicial, mientras se estabilizan las temperaturas de unión.

**Colocación de los DUT:** Los grupos de LED se colocaron en el centro geométrico de la zona iluminada, justo debajo del difusor de acrílico opalino. En la plataforma de prueba se añadieron marcas de alineación para guiar la colocación y minimizar la variabilidad debida a un posicionamiento irregular. Para todas las pruebas se mantuvo constante la distancia entre el difusor y la superficie del DUT, lo cual asegura una irradiancia incidente uniforme y evita que aparezcan distorsiones en las curvas I-V por efecto de variaciones angulares, por movimiento lateral o por sombreado parcial.

**Conexiones eléctricas:** Los terminales del dispositivo en prueba fueron conectados al módulo de medida INA226 calibrado con cables de la misma longitud para mantener la simetría eléctrica. Antes de cada prueba se comprobó la resistencia de contacto e inspeccionó todo el cableado para verificar la continuidad, evitando caídas parásitas o conexiones intermitentes que pudieran sesgar las lecturas. Para evitar la polarización inversa involuntaria de los LED, que podría dañar el dispositivo bajo prueba o interrumpir la electrónica de adquisición, se verificó sistemáticamente la polaridad antes de alimentar el sistema.

**Condiciones operativas iniciales:** Para cada secuencia de caracterización se inició en condiciones de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), lo que se corresponde con el voltaje máximo posible generado por el DUT bajo iluminación. Se abandonó este estado inicial durante varios segundos para comprobar la estabilidad del voltaje, antes de aplicar cualquier variación de carga.

**Desarrollo de una limpieza de carga supervisada:** Después de estabilizar el estado de circuito abierto, se efectuó un barrido controlado de carga, utilizando una carga resistiva de baja potencia ajustable digitalmente, diseñada específicamente para la salida en milivatios de los DUT basados en LED. Se redujo de forma gradual la resistencia equivalente, comenzando desde valores muy altos que se aproximaban a las condiciones de circuito abierto y descendiendo hasta valores del orden de unas pocas decenas de ohmios (por ejemplo,  $\sim 29 \Omega$  para 0,35 V y 0,012 A, correspondiente a una potencia máxima de aproximadamente 4,2 mW).

Este ajuste progresivo fue cambiando poco a poco el punto de operación desde la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) hasta la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) evitando picos de corriente bruscos y minimizando la tensión térmica sobre los LED.

Recolección de datos: En cada barrido, el microcontrolador ESP32 realizaba una muestra continua del voltaje de bus (V) y de corriente (I) del INA226, con una frecuencia de 10 a 20 Hz. La potencia eléctrica instantánea se calculó conforme a:

$$P(t) = V(t) \cdot I(t)$$

Todos los datos (voltaje, corriente, potencia y marcas de tiempo) se enviaron por USB a una PC en tiempo real. La información se guardó automáticamente en formato CSV para su posprocesamiento. El tiempo de cada barrido era de 60 s, lo que era suficiente para capturar una curva completa y evitar un calentamiento espontáneo importante de los LED.

**Repetibilidad y reproducibilidad:** Para evaluar la repetibilidad y cuantificar la variabilidad experimental, cada medición se realizó por triplicado ( $n = 3$ ) bajo condiciones estrictamente idénticas. Entre cada prueba consecutiva, se permitió que los DUT se enfriaran completamente a temperatura ambiente para asegurar el equilibrio térmico y evitar los efectos de calentamiento acumulativo que podrían afectar la respuesta eléctrica de los dispositivos. Todos los experimentos se llevaron a cabo en condiciones ambientales de laboratorio estables, con la temperatura ambiente mantenida entre 22 y 25 °C y una humedad relativa cercana al 50 %. Debido a la corta duración de cada barrido y a los niveles de irradiancia relativamente moderados utilizados en la cámara de iluminación, no se requirió un sistema de enfriamiento activo ni para los dispositivos LED ni para la electrónica de detección. Esto aseguró que las mediciones reflejaran el comportamiento intrínseco de los DUT en lugar de fluctuaciones inducidas térmicamente.

### Procesamiento de datos y métricas

Tras la adquisición de datos, los conjunto de datos estructurados en formato CSV se procesaron por medio de scripts personalizados de Python para extender los parámetros fotovoltaicos clave de cada dispositivo. A partir de las curvas experimentales, se determinaron de forma automatizada el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) y el punto de máxima potencia ( $P_{m\acute{a}x}$ ). Con estos valores, se calculó el factor de llenado ( $FF$ ) como indicador de rendimiento y eficiencia en la extracción energética, empleando la ecuación:

$$FF = \frac{P_{m\acute{a}x}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

Finalmente, para evaluar la estabilidad y reproductibilidad del protocolo de medición, se cuantificó la repetibilidad de cada parámetro por medio de la determinación de la media, desviación estándar ( $\sigma$ ) y el coeficiente de variación ( $CV\%$ ) en las tres réplicas ejecutadas por dispositivo.

El factor de llenado (FF) da una idea de la cuadratura de la curva I-V y actúa como indicador de la eficiencia con la que cada dispositivo bajo prueba puede producir energía eléctrica. Para cada parámetro se calcularon la media y la desviación estándar ( $\sigma$ ) de tres repeticiones, con el fin de cuantificar la repetibilidad y la estabilidad de la medición. La dispersión relativa de los resultados también se evaluó mediante el cálculo del coeficiente de variación ( $CV\%$ ) y se comparó la consistencia entre los dispositivos con distintas magnitudes de salida.

Para todos los cálculos numéricos se usaron scripts personalizados en Python con las librerías NumPy, Pandas y Matplotlib. Estos scripts analizaron los archivos CSV estructurados obtenidos durante la adquisición e identificaron automáticamente los parámetros eléctricos clave ( $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  y  $P_{m\acute{a}x}$ ), seguido del cálculo del factor de llenado. Las métricas resultantes se compilaron y tabularon para cada dispositivo bajo prueba (DUT) para facilitar la comparación cruzada (Systems, 2026).

El código fuente completo utilizado para la adquisición de datos, la configuración del INA226 y la operación con carga controlada se proporciona en el Apéndice A, el cual incluye el firmware completo del ESP32 utilizado para realizar los barridos I-V, controlar la etapa de carga basada en MOSFET y transmitir los datos de voltaje-corriente en formato CSV para su posprocesamiento.

La Tabla 5 resume los parámetros eléctricos estimados obtenidos para cada configuración de LED probada bajo iluminación controlada. Los valores de voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) se midieron directamente a partir de los barridos I-V, mientras que el punto de máxima potencia ( $P_{m\acute{a}x}$ ) y el factor de llenado (FF) se calcularon a partir de las curvas experimentales mediante la relación  $FF = P_{max} / (V_{oc} \cdot I_{sc})$ . Como era de esperar, las configuraciones de LED blanco y de tiras mostraron las mayores potencias totales debido a su mayor área activa y espectros de emisión más amplios, mientras que los LED UV y RGB presentaron respuestas comparativamente más bajas.

**Tabla 5** Métricas extraídas para cada DUT (Media  $\pm$   $\Sigma$ , N=3)

DUT	Voz (V)	Isc (mA)	Pmáx (mW)	FF
LEDS blancos de 2,4 W	0,37	5.0	1.02	0,55
LEDS rojos	0,20	2.5	0,29	0,58
LEDS verdes	0,22	1.8	0,21	0,52
LEDS azules	0,23	1.5	0,17	0,50
Amarillo LED	0,26	2.0	0,28	0,54
LED UV	0,15	0.8	0,05	0,45
tira de LED	0,31	4.0	0,71	0,57
LED RGB	0,18	1.2	0,10	0,48

**Nota.** Elaboración propia.

### Reproducibilidad y disponibilidad de datos

Cada dispositivo bajo prueba (DUT) se evaluó por triplicado (n=3) bajo condiciones idénticas de iluminación y medición para cuantificar la variabilidad experimental (Polman et al., 2026). A partir de las réplicas, se determinaron la media, desviación estándar y el coeficiente de variación (CV%) de los parámetros eléctricos principales (Green et al., 2024). Los flujos de datos conseguidos registraron de forma nativa en archivos estructurados en formato CSV y se procesaron por medio de script de Python para la reconstrucción algorítmica de las curvas I-V y P-V, sirviendo de base para la extracción de las métricas de rendimiento (Green et al., 2024).

## Resultados

Esta sección presenta los resultados experimentales obtenidos de la caracterización de los ocho dispositivos LED bajo prueba (DUT). Los conjuntos de datos se analizaron y organizaron en tres componentes principales:

- i. características de corriente-tensión (I-V) y potencia-tensión (P-V),
- ii. parámetros de rendimiento extraídos (Voc, Isc, Pmáx y FF), y
- iii. análisis de reproducibilidad e incertidumbre.

### Características de corriente-tensión y potencia-tensión

La Figura 4 presenta los valores registrado de tensión de circuito abierto (Voc) para cada configuración de LED bajo condiciones de iluminación idénticas. En este comportamiento se

evidencia la dependencia directa de la fotorrespuesta respecto a la banda prohibida del material semiconductor y el número de elementos conectados en serie de cada arreglo.

**Figura 4** Voc para cada configuración y tipo de LED



**Nota.** Elaboración propia. Valores de voltaje en circuito abierto (Voc) obtenidos para cada configuración de LED estudiada.

De los resultados mostrados en la figura, los LED azules y verdes generaron los valores más altos de Voc ( $\approx 0,23-0,24$  V por unión), lo cual es consistente con sus bandas prohibidas relativamente anchas en el rango de  $\sim 2,6-2,7$  eV. Los LED rojos, con bandas prohibidas más estrechas ( $\sim 1,9-2,0$  eV), mostraron tensiones más bajas, de alrededor de  $\approx 0,20$  V, mientras que los LED amarillos, que se encuentran en una región espectral intermedia ( $\sim 2,0-2,2$  eV), tuvieron valores de Voc cercanos a  $\approx 0,26$  V, proporcionando así una transición efectiva entre el comportamiento de dispositivos con banda prohibida baja y alta. Por otra parte, el conjunto de LED blancos alcanzó un voltaje de circuito abierto más alto ( $\approx 0,37$  V) que cualquiera de los dispositivos monocromáticos, mejora atribuida a su respuesta de banda ancha y a la conversión de longitud de onda basada en fósforo. Finalmente, la tira de LED produjo un Voc comparable ( $\approx 0,31$  V), gracias a su gran número de uniones integradas y a su área activa extendida, factores que aumentan la región efectiva de absorción de fotones.

En cambio, los LED ultravioleta registraron el valor de Voc más bajos ( $\approx 0,15$  V). Desde la perspectiva de la física de semiconductores, esta lectura remanente pese al mínimo contenido de radiación UV en la fuente no corresponde a una fotorrespuesta intrínseca pura, más bien a una anomalía asociada a la absorción por estados de defectos intermedios en la banda prohibida del AlGaIn ( $3,2-3,4$  eV) bajo la intensa iluminación visible residual, sumada a los efectos de acoplamiento por la impedancia de entrada y la corriente de fuga del sensor INA2026 en el circuito. Por su parte, la configuración RGB presentó niveles de Voc intermedios, en torno a ( $\approx 0,18$  V), con

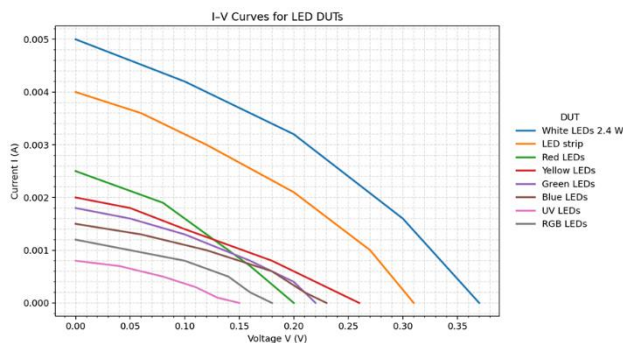
variaciones mínimas entre los subcanales rojo, verde y azul, cuya respuesta combinada refleja la ponderación espectral producida por la operación RGB con emisión blanca.

En conjunto, estos resultados refuerzan la correlación esperada entre la energía de la banda prohibida del semiconductor y la tensión de circuito abierto en todos los DUT basados en LED examinados en este estudio. Además, las tendencias consistentes observadas entre las repeticiones confirman la fiabilidad del método de medición y la idoneidad de los dispositivos LED como análogos fotovoltaicos controlados y con longitud de onda específica.

La Figura 5 presenta los gráficos de corriente-tensión ( $I-V$ ) obtenidas para todas las configuraciones del DUT bajo las condiciones de iluminación estandarizadas descritas en la Sección 2.5. Cada trazo se generó mediante un barrido de carga controlado, que inició con la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y redujo gradualmente la resistencia de carga hasta aproximarse a la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ). Este método permitió el mapeo completo de la respuesta eléctrica, lo que permitió comparar la pendiente, la posición de la rodilla y la morfología general de las respuestas eléctricas en los diferentes dispositivos LED.

Los resultados evidenciaron diferencias en el comportamiento eléctrico de las configuraciones LED evaluadas, asociadas tanto a la banda prohibida del semiconductor como la geometría de cada dispositivo. Las matrices de LED blancos y la tira LED presentaron mayores corrientes de cortocircuito y el mejor desempeño general, mientras que los LED rojos mostraron una respuesta favorable entre los dispositivos monocromáticos. En cambio, los LED verdes, azules y UV registraron corrientes menores, aunque con valores de voltaje de circuito abierto relativamente más altos en algunos casos. En conjunto, estos resultados confirman la influencia de las características espectrales y estructurales sobre la respuesta fotovoltaica de los dispositivos analizados.

**Figura 5** *Curvas  $I-V$  de las configuraciones de LED bajo iluminación controlada*



*Nota.* Elaboración propia. Se presenta las curvas corriente-voltaje de los dispositivos LED evaluados, conseguida bajo condiciones de iluminación controlada (promedio de  $n=3$  ciclos).

### Parámetros de rendimiento extraídos

De los conjuntos de datos registrados, se extrajeron los parámetros fotovoltaicos clave según la metodología descrita en la Sección 2.6. La Tabla 6 resume los valores promedio de  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{m\acute{a}x}$  y factor de llenado (FF) para cada dispositivo bajo prueba.

**Tabla 6** Parámetros de rendimiento eléctrico extraídos para los DUT LED ( $Media \pm \sigma$ ,  $N = 3$ )

DUT	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (mA)	$P_{m\acute{a}x}$ (mW)	FF	Nota
LED blanco (2,4 W)	$0,37 \pm 0,01$	$5,0 \pm 0,2$	$1,02 \pm 0,05$	0,55	Amplia respuesta visible; salida fuerte y estable debido a la conversión de fósforo.
LED rojo	$0,20 \pm 0,01$	$2,5 \pm 0,1$	$0,29 \pm 0,02$	0,58	Alto $I_{sc}$ ; banda espectral estrecha; respuesta reproducible.
LED verde	$0,22 \pm 0,01$	$1,8 \pm 0,1$	$0,21 \pm 0,02$	0,52	Corriente más baja y FF moderado; región espectral intermedia.
LED azules	$0,23 \pm 0,01$	$1,5 \pm 0,1$	$0,17 \pm 0,01$	0,50	Alto $V_{oc}$ ; bajo $I_{sc}$ ; banda prohibida amplia ( $\sim 2,7$ eV).
Amarillo LED	$0,26 \pm 0,01$	$2,0 \pm 0,1$	$0,28 \pm 0,02$	0,54	Perfil de voltaje-corriente equilibrado; respuesta rango medio-visible.
LED UV	$0,15 \pm 0,01$	$0,8 \pm 0,05$	$0,05 \pm 0,01$	0,46	Respuesta débil; baja fracción de irradiancia UV en fuente de iluminación.
Tira de LED (10-30 W)	$0,31 \pm 0,02$	$4,0 \pm 0,2$	$0,71 \pm 0,05$	0,57	Curva I-V suave; $P_{max}$ alto; actúa como un pequeño minipanel fotovoltaico.
LED RGB	$0,18 \pm 0,01$	$1,2 \pm 0,1$	$0,10 \pm 0,01$	0,48	El canal rojo domina; el modo combinado (blanco) proporciona una respuesta intermedia.

*Nota.* Elaboración propia.

### Tendencias clave observadas:

**Los LED blancos (2,4 W) y la tira de LED presentaron el mejor desempeño global**, tanto en generación neta como en potencia total entregada. Su emisión visible de banda ancha, combinada con una superficie activa significativamente mayor, permitió una absorción de fotones altamente eficaz. Como resultado, sus curvas I-V exhibieron transiciones suaves con regiones de codo claramente definidas y factores de relleno que oscilaron entre 0,55 y 0,57, lo cual sugiere un comportamiento eficiente de conversión en el entorno de prueba.

**Los dispositivos monocromáticos con LED rojos fueron los que presentaron mejor balance**, con una  $V_{oc} \approx 0,20$  V, una  $I_{sc} \approx 2,5$  mA y una  $P_{m\acute{a}x} \approx 0,29$  mW. El rendimiento anterior pone en evidencia la ventaja de la banda prohibida relativamente estrecha ( $\sim 1,9$ - $2,0$  eV), que se corresponde estrechamente con el pico de intensidad de la fuente de iluminación de banda ancha, lo que permite

una generación de portadora más potente en comparación con dispositivos con una banda prohibida más alta.

**Los LED amarillos mostraron una respuesta moderada pero muy estable con una  $V_{oc}$  de  $\approx 0,26$  V y una  $I_{sc}$  de  $\approx 2,0$  mA.** Se sitúan en la zona del visible medio, y su comportamiento enlaza la transición entre los LED rojos y los verdes. Su salida se muestra consistente en reiteradas ejecuciones, lo que evidencia la robustez del algoritmo ante condiciones de iluminación estandarizadas.

**Los LED verdes y azules mostraron voltajes más altos de circuito abierto (0,22-0,23 V)** junto con corrientes de cortocircuito notablemente más bajas (1,5-1,8 mA), características de sus más amplias energías de banda prohibida (2,4-2,7 eV). Las pendientes más pronunciadas de los I-V y los valores de  $P_{m\acute{a}x}$  reducidos indican una menor eficiencia de absorción de fotones y una generación más limitada de portadores de carga bajo la iluminación visible de banda ancha utilizada en este estudio.

**Los LED ultravioleta (UV) generaron la fotorrespuesta más débil,** con  $V_{oc} \approx 0,15$  V e  $I_{sc} \approx 0,8$  mA. Esto era previsible dado el mínimo contenido de UV en el espectro de emisión del sistema de iluminación y la respuesta inherentemente baja de los dispositivos AlGaN de banda ancha bajo excitación con dominio visible. Los LED RGB mostraron un comportamiento intermedio, con el subcanal rojo aportó con la mayor parte de la corriente generada, mientras que el funcionamiento combinado en "modo blanco" resultó en curvas más suaves y equilibradas en todo el espectro visible, lo que demuestra el efecto de la mezcla espectral en la salida eléctrica general.

Análisis de repetibilidad e incertidumbre.

Para evaluar la fiabilidad de las mediciones, cada DUT se analizó por triplicado ( $n = 3$ ). Se calcularon la media, la desviación estándar ( $\sigma$ ) y el coeficiente de variación (CV%) para  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  y  $P_{m\acute{a}x}$ . La Tabla 7 presenta las métricas de reproducibilidad.

**Tabla 7** *Análisis de repetibilidad de parámetros eléctricos (N=3, Valores CV%).*

DUT	CV% Voc	CV% Isc	CV% Pmáx	Observaciones
LED blancos (2,4 W)	2,3 %	3,8 %	4,9 %	Alta estabilidad; curvas suaves y reproducibles.
LED rojos	2,5 %	3,5 %	5,1 %	Respuesta estable con bajo ruido eléctrico.
LED verdes	3,0 %	4,2 %	6,0 %	Repetibilidad moderada; pequeña deriva entre ejecuciones.
LED azules	3,5 %	5,0 %	6,8 %	Variación ligeramente mayor; sensible a los cambios de irradiancia.
Amarillo LED	2,8 %	4,0 %	5,5 %	Coherente nivel medio estabilidad.
LED UV	4,5 %	6,5 %	8,0 %	Mayor variación debido a señales de corriente débiles.
Tira de LED (10-30 W)	2,0 %	3,0 %	4,0 %	Muy estable; excelente repetibilidad en todas las ejecuciones.
LED RGB	3,2 %	4,8 %	6,2 %	Canal rojo estable; canales verde/azul menos consistentes.

**Nota.** Elaboración propia.

En general, la mayoría de los dispositivos bajo prueba (DUT) presentaron valores de coeficiente de variación (CV%) inferiores al 5% tanto para Voc como para Isc, lo que indica un alto grado de estabilidad y repetibilidad en el protocolo de medición. La matriz de LED blancos, la matriz de LED rojos y la tira de LED fueron las configuraciones más consistentes, con una dispersión mínima en repetidas ejecuciones. Este comportamiento refleja sus altos niveles de señal, su mayor absorción espectral y su menor sensibilidad a pequeñas perturbaciones de irradiancia.

Los LED verdes, azules y amarillos mostraron una variabilidad ligeramente superior. Estos dispositivos funcionan alrededor de la región media-alta en energía del espectro visible, donde la generación de fotocorriente es más sensible a pequeños cambios en la distribución de irradiancia, incidencia angular, temperatura de unión. Por lo tanto, sus valores de CV% permanecieron bajos, aunque claramente más altos que los de los dispositivos de banda ancha y con emisión roja.

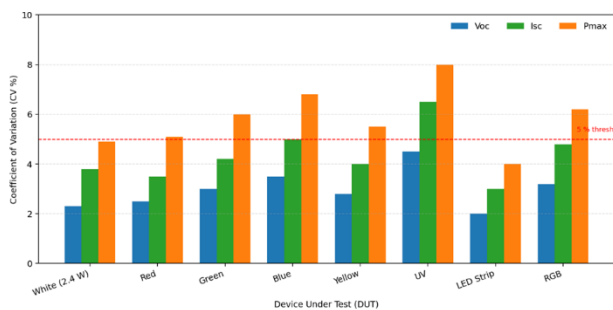
Los LED UV presentaron las mayores desviaciones de todos los DUT, con variaciones de Pmáx del 6-8 %. Esta dispersión más amplia se debe sobre todo a sus bajos niveles de fotocorriente inherentes y al muy limitado componente ultravioleta emitido por el sistema de iluminación. Bajo estas condiciones, incluso pequeñas aportaciones de ruido o pequeñas fluctuaciones de intensidad se traducen en variaciones proporcionalmente mayores en la respuesta eléctrica medida.

Los LED RGB mostraron un comportamiento mixto: el canal rojo se comportó estable y reproduciblemente, mientras que los canales verde y azul mostraron fluctuaciones algo mayores.

Esta tendencia coincide con su menor eficiencia cuántica y el desajuste espectral bajo iluminación mixta. Al trabajar en RGB completo (modo blanco), la respuesta combinada suavizó algunas de estas variaciones, pero se observaron desequilibrios menores debido a que cada canal de color contribuyó de forma desigual.

En la Figura 6 se muestra el coeficiente de variación (CV %) de Voc, Isc y Pmáx para todos los DUT basados en LED. La mayoría de los dispositivos mantuvieron valores de CV por debajo del umbral del 5%, lo que indica una alta repetibilidad del procedimiento de medición. Los emisores de banda ancha, como la matriz y la tira de LED blancos, mostraron un comportamiento más estable, mientras que los dispositivos con mayor ancho de banda, especialmente los LED UV, presentaron una mayor dispersión en función de los niveles más bajos de fotocorriente y la limitada excitación espectral. Los LED RGB mostraron una variabilidad intermedia, siendo las fluctuaciones asociadas principalmente a los canales verde y azul.

**Figura 6** Coeficiente de Variación para los Parámetros Eléctricos en el Dispositivo Bajo Prueba.



**Nota.** Elaboración propia. Variabilidad porcentual de la tensión de circuito abierto (Voc), la corriente de cortocircuito (Isc) y la potencia máxima (Pmáx) obtenida en las tres réplicas por configuración LED.

## Discusión

Los resultados experimentales demostraron variaciones significativas en el comportamiento fotovoltaico de las diferentes configuraciones de LED al operar como fotodiodos bajo iluminación

controlada. La divergencia identificada en los perfiles de las curvas I-V y P-V se asocian de forma directa con la respuesta espectral, el ancho de banda prohibida de la unión y la geometría de cada dispositivo; estos factores aportan perspectivas tanto prácticas como analíticas para la optimización de sistemas de caracterización solar. Estos parámetros determinan la capacidad ante condiciones de carga variables, lo cual aporta perspectivas analíticas para la optimización de sistemas de caracterización solar.

### **Influencia de la banda prohibida espectral**

Al comparar los dispositivos a lo largo del espectro visible, emergió una tendencia clara y consistente con los antecedentes teóricos del estado sólido. Los LED fabricados con materiales de banda prohibida estrecha, como los arreglos rojos y amarillos ( $\sim 1,9-2,2$  eV), produjeron las corrientes de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) más altas debido a su superposición favorable con la emisión visible de banda ancha del simulador, esta coincidencia espectral facilitó que una mayor fracción de fotones incidentes propiciara la generación de portadores, lo que dio lugar a transacciones eléctricas suaves y puntos de máxima potencia ( $P_{m\acute{a}x}$ ) elevados.

Por el contrario, los dispositivos con banda prohibida amplia, como los LED azules y ultravioleta (UV), exhibieron tensiones de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) elevadas por fotocorrientes significativamente más débiles, este comportamiento es consistente con su reducida eficiencia de absorción bajo una iluminación dominada por el rango visible, lo cual evidencia las limitaciones de los semiconductores de banda ancha ( $3,2-3,4$  eV) cuando se excitan fuera de su región espectral óptima.

### **Efecto de la arquitectura del dispositivo**

La geometría del dispositivo y la topología de las uniones desempeñaron un papel decisivo en el rendimiento general de la conversión energética, más allá de las propiedades intrínsecas del material. La tira LED (10 W) y el módulo COB superaron a los demás DUT en términos de potencia de salida ( $P_{m\acute{a}x}$ ). Su amplia superficie iluminada, combinada con múltiples uniones dispuestas en arreglos serie-paralelo sobre un sustrato de aluminio, facilitó una generación de fotocorriente sustancialmente mayor y mantuvo estables los niveles de  $V_{oc}$  durante los ensayos. El área activa extendida mitigó la saturación de corriente localizada, mientras que el respaldo reflectante integrado incrementó la eficiencia en el reciclaje de fotones.

También, la configuración modular multiunión de la tira proporcionó una redundancia eléctrica que suavizó las inconsistencias derivadas de las tolerancias de fabricación entre diodos. Esto



produjo curvas I-V y P-V altamente uniformes, con puntos de potencia máxima bien definidos y una reducción notable del ruido de los datos registrados; atribuidos que son característicos de los paneles fotovoltaicos profesionales. La excelente reproductibilidad observada ( $CV\% < 3\%$ ) destaca el potencial de estos conjuntos para servir como bancos de pruebas escalables.

Por su parte, los LED RGB permitieron explorar los efectos de la partición espectral dentro de un único dispositivo optoelectrónico. El canal rojo dominó la generación de energía debido a su banda prohibida estrecha ( $\sim 1,9 \text{ eV}$ ) alineada con el espectro de la caja de luz. En contraste, los canales verde y azul produjeron fotocorrientes débiles y pendientes *I-V* más pronunciadas por su menor solapamiento espectral. Al activar los tres canales en “modo blanco”, la salida resultante exhibió un comportamiento intermedio, lo cual demuestra cómo la mezcla espectral redistribuye la generación de portadores en todo el rango visible.

Desde un punto de vista educativo, esta proforma demostró ser una alternativa eficaz y económica a los simuladores solares convencionales. Su diseño modular de código abierto permitió la visualización de los principios fotovoltaicos clave dentro de un sistema accesible. De la misma manera, la consistencia en las mediciones validó la estabilidad de la configuración y fiabilidad de la cadena de adquisición basada en la interfaz ESP2-INA226, lo cual refuerza la viabilidad de emplear hardware de bajo coste para la caracterización eléctrica cuantitativa.

### **Comparación con la literatura y las aplicaciones**

Los resultados de este trabajo fueron puestos en contexto comparándolos con trabajos anteriores correspondientes a semestres anteriores en los cuales se evaluaron dispositivos LED reciclados de iluminaria desechadas bajo luz solar natural. Estos proyectos de referencia indicaron valores aproximados de 140 mV para un solo LED, 1,3 V para nueve unidades y 3,2 V para un conjunto de veintisiete componentes, pero no realizaron la caracterización de las curvas de corriente -voltaje y la respuesta térmica.

En este trabajo se amplió sustancialmente dicha línea base, implementando un entorno de iluminación estandarizado, adquisición autorizada de alta resolución y extracción sistemática de métricas estadísticas ( $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{m\acute{a}x}$ , FF). Mientras que los antecedentes estudiaron únicamente LED blancos recuperados, esta investigación incorporó variantes monocromáticas, dispositivos multicanal RGB, módulos COB y tiras LED, ampliando así la comprensión del impacto de la topología de la unión de conversión fotoeléctrica.

Finalmente, el uso de una cámara de iluminación controlada eliminó la variabilidad climática y angular intrínseca de la irradiancia solar ambiental empleada en el pasado. Esto resultó en coeficientes de variación muy bajos ( $CV\% < 5\%$ ), coherentes con la literatura reciente que subraya la necesidad de entornos espectrales estables para experimentos de fotodetección. La integración de la cadena ESP32+INA226 permitió lecturas calibradas y sincronizadas en el tiempo, superando las mediciones simples con multímetro de los proyectos previos y dando pie a la investigación de un marco de caracterización con un sólido rigor científico.

## Conclusiones

El presente trabajo demostró la viabilidad de emplear diodos emisores de luz (LED) como dispositivos fotovoltaicos mediante una caracterización eléctrica sistemática bajo condiciones controlada de irradiación. La plataforma desarrollada, fundamentada en hardware de código abierto y bajo coste, permite extraer parámetros fotovoltaicos clave y revela correlaciones directas entre las propiedades ópticas del material, la topología de la unión y la respuesta energética final. De los resultados conseguidos, se derivan las siguientes conclusiones principales:

- La fotorrespuesta eléctrica de los LED está determinada por la banda prohibida del semiconductor y su alineación con el espectro de la fuente. Los dispositivos de banda estrecha (rojos y amarillos) generan las mayores fotocorrientes por su superposición con la luz visible, mientras que los arreglos de banda ancha (azules y UV) exhiben tensiones de circuitos abiertos ( $V_{oc}$ ) elevadas pero salidas de corriente mínimas al operar fuera de su región óptima de excitación.
- La arquitectura geométrica y la topología multiunión de los dispositivos desempeñan un papel crítico en la eficiencia de conversión. Las configuraciones de gran área y arreglos serie-paralelo (tiras LED y módulos COB) optimizan la captura de irradiancia y reducen la saturación de corriente localizada, alcanzando los puntos de potencia máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ) más estables y robustos del estudio.
- La cadena de adquisición basada en la interfaz ESP32 e INA226 valida su alta repetibilidad y fiabilidad estadística, registrando coeficientes de variación ( $CV\%$ ) inferiores del 5% en la mayoría de los ensayos. Este rendimiento consolida al sistema de instrumentación como



una alternativa cuantitativa, económica y almacenable en formato digital frente a los simuladores comerciales de costo elevado.

### Referencias Bibliográficas

- Bourgeois, A., Nicot-Senneville, Z., Hadiwidjaja., A., & Ye, J. (2026). Accesible spectral calibration of multi-LED solar simulators for tandem I-V measurement. *EPJ Photovoltaics*, 17,8. <https://doi.org/DOI:10.1051/epjpv/2026008>
- Colace, L., Assanto, G., & De Iacovo1, A. (2024). Light-Emitting Diodes for Energy Harvesting. *Electronics*, 13(8), 1587. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/electronics13081587>
- Dirnberger, D., & Kräling, U. (2013). Uncertainty in PV Module Measurement - Part I: Calibration of Crystalline and Thin Film Modules. *IEEE Journal of Photovoltaic*, 3(3), 1016-1026. <https://doi.org/DOI: 10.1109/JPHOTOV.2013.2260595>
- González, I., Portalo, J., & Calderón, A. (2021). Configurable IoT Open-Source Hardware and Software I-V Curve Tracer for Photovoltaic Generators. 21(22), 7650. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s21227650>
- Green, M., Dunlop, E., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefer, G., . . . Hao, X. (2024). Solar cell efficiency tables (Version 64). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pip.3831>
- Hwang, S., y Yasuda, T. (2022). Indoor photovoltaic energy harvesting based on semiconducting  $\pi$ -conjugated polymers and oligomeric materials toward future IoT applications. 55(4). <https://doi.org/DOI:10.1038/s41428-022-00727-8>
- International Electrotechnical Commission, IEC 60904-1:2020. (2020). *otovoltaic devices - Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics*. [https://webstore.iec.ch/en/publication/32004?utm\\_source](https://webstore.iec.ch/en/publication/32004?utm_source)
- Polman, A., Knight, W., Garnett, E., Ehrler , B., & Sinke, W. (2026). Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges. *Science*, 352. <https://doi.org/DOI: 10.1126/science.aad4424>
- Ranilović, B., Filipović, P., Davió, D., & Horvat, I. (2024). Design methodology of a low-cost solar simulator. 71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103974>
- Sara, I., Betts, T., & Gottschalg, R. (2014). Determining spectral response of a photovoltaic device using polychromatic filters. *IET Renewable Power Generation*, 8(5), 467.



[https://www.researchgate.net/publication/270591603\\_Determining\\_spectral\\_response\\_of\\_a\\_photovoltaic\\_device\\_using\\_polychromatic\\_filters](https://www.researchgate.net/publication/270591603_Determining_spectral_response_of_a_photovoltaic_device_using_polychromatic_filters)

Schubert, F., & Spinner, D. (2016). Solar Simulator Spectrum and Measurement Uncertainties.

*ScienceDirect*, 92, 205-210. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.059>

Sengupta, M., Habte, A., Wilbert, S., Gueymard, C., & Remund, J. (2021). Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Third Edition. *Suggested Citation*.

[https://docs.nlr.gov/docs/fy21osti/77635.pdf?utm\\_source](https://docs.nlr.gov/docs/fy21osti/77635.pdf?utm_source)

Sze, S., Li, Y., & Ng, K. (2021). Physics of Semiconductor Devices, 4th Edition. ISBN: 978-1-119-42911-1. <https://www.wiley.com/en-us/Physics+of+Semiconductor+Devices%2C+4th+Edition-p-9781119429111>

Texas Instruments. (2024). *INA226 36V, 16-Bit, Ultra-Precise I2C Output Current, Voltage, and Power Monitor With Alert*. <https://www.ti.com/product/INA226>

Yamaguchi, M., Dimroth, F., Geisz, J., & Ekins-Daukes, N. (2021). Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency. *Revista de Física Aplicada*, 129(4), 240901. <https://doi.org/DOI: 10.1063/5.0048653>

#### **Conflicto de intereses:**

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

#### **Financiamiento:**

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

#### **Agradecimiento:**

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios por brindarme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesaria para cumplir esta importante etapa de mi formación profesional. A mis padres y mis hermanos, porque creyeron en mí y me ayudaron a sobresalir, porque gracias a ellos hoy puedo ver alcanzada una meta más y a mi universidad, ingeniero y compañeros que de una u otra manera aportaron constructiva y moralmente para el desarrollo de este artículo.

#### **Nota:**

El artículo no es producto de una publicación anterior.