

## AVANCES SOBRE UN SIMULADOR DE PANELES SOLARES DE MEDIA CELDA Y ENSAYO BAJO CONDICIONES DE SOMBREADO ARBITRARIAS

**Juan N. Cox<sup>1,2</sup>, Rodrigo T. Mentucci<sup>1,2</sup>, Ismael H. Eyra<sup>1,3</sup>, Mariela E. Videla<sup>1</sup>  
Mónica G. Martínez Bogado<sup>1,4,5</sup>**

<sup>1</sup>Departamento Energía Solar (DES) - Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)

<sup>2</sup>Departamento de Física - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires

<sup>3</sup>Centro de Investigación, Hábitat y Energía - Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo -  
Universidad de Buenos Aires

<sup>4</sup>Instituto de Nanociencia y Nanotecnología - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y  
Técnicas (CONICET - CNEA)

<sup>5</sup>Instituto de Tecnología Prof. Jorge Sábato - Universidad Nacional de San Martín (UNSAM - CNEA)

**RESUMEN:** La integración de sistemas fotovoltaicos en entornos urbanos muchas veces se encuentra limitada por el sombreado típico del paisaje, reduciendo la eficiencia de dichos sistemas. Este trabajo, se propone aportar en el área de conocimiento mediante el desarrollo de simulaciones en diferentes condiciones de sombreado sobre una cadena de paneles solares de silicio monocristalino de media celda. Se pretende contrastar las simulaciones con curvas experimentales medidas sobre un sistema fotovoltaico instalado en el Centro Atómico Constituyentes (San Martín, Buenos Aires, Argentina) y con programas comerciales. En este avance de trabajo se empleó una metodología de medición de curvas corriente-tensión de secciones del panel a fin de extraer los parámetros del modelo de diodo único de una celda. Estos parámetros se utilizaron para simular las curvas corriente-tensión y las curvas potencia-tensión de un panel sombreado con un programa en lenguaje Python de desarrollo propio. Por último, se contrastaron las curvas simuladas con curvas medidas sobre el panel en condiciones de sombreado obteniendo concordancia en la estimación del punto de máxima potencia y errores menores o iguales al 6,5% de la potencia máxima simulada.

**Palabras clave:** media celda, diodo único, sombreado, simulación, generación distribuida.

### INTRODUCCIÓN

En el contexto de sistemas fotovoltaicos instalados en zonas urbanas, una situación habitual es la sombra que el entorno proyecta sobre un conjunto de paneles, por ejemplo: árboles, parapetos, conductos de ventilación, cableados, edificaciones cercanas o cualquier otro elemento. En esta situación el rendimiento del sistema fotovoltaico puede disminuir significativamente su producción eléctrica. Asimismo, si la sombra perdura en el tiempo, el panel puede degradarse debido al fenómeno conocido como puntos calientes.

Por lo tanto, resulta relevante estudiar métodos computacionales que permitan modelar con precisión la respuesta de los paneles fotovoltaicos bajo diversas condiciones de sombreado, con el fin de estimar tanto la disminución en su generación energética como su degradación a nivel sistema. Si bien los simuladores actuales incorporan modelos de sombreado, estos aún presentan limitaciones para

representar de manera efectiva las complejas condiciones que surgen en entornos urbanos, donde la interacción de obstrucciones edilicias y la variabilidad espacial y horaria de las sombras introducen desafíos significativos. Estos métodos de simulación -debido a su mayor precisión en la evaluación de los efectos adversos producidos por sombras- permitirían a los proyectistas o urbanistas, tomar decisiones con antelación acerca de las diferentes posibilidades de incorporación de los planos de captación en entornos urbanos: por ejemplo, modificar inclinaciones u orientaciones con mayor precisión, o reubicar los campos de captación en superficies alternativas de mayor insolación. Finalmente, los diferentes proyectistas de la industria de la construcción podrán eliminar desde las etapas previas a la edificación fuentes de sombra que -aunque intuitivamente pudieran parecer poco significativas- suelen producir efectos adversos mayores a los previstos, como son las sombras lineales que cruzan la superficie de los campos y de los paneles en forma diagonal a sus lados principales, como las producidas por cables, tubos, postes, entre otros.

Al tratarse de un trabajo en desarrollo, se pretende extender posteriormente las simulaciones a cadenas de paneles y así poder comparar con la generación que tiene un sistema fotovoltaico instalado en el edificio 42 del Centro Atómico Constituyentes (CNEA), partido de General San Martín, provincia de Buenos Aires, Argentina. Dicho sistema está compuesto por 30 paneles de silicio monocristalino de media celda. Estos están distribuidos en dos cadenas de 15 paneles en serie que se conectan, únicamente, a la red eléctrica mediante un inversor de 25kW. Cada cadena tiene su propio seguidor de punto de máxima potencia (MPP) y cuenta con un trazador de curvas corriente tensión interno que permitirá realizar evaluaciones del modelo desarrollado en este trabajo.

Los paneles de media celda que posee el sistema son marca Jinko, modelo JKM470-7RL3 (Jinko, 2022) y se utilizaron para realizar todas las mediciones de corriente tensión. Actualmente, la mayoría de los paneles que se comercializan en el mercado actual poseen iguales características; debido a esto, se lo eligió para los primeros ensayos. La Figura 1 muestra uno de ellos junto con un esquema que describe la conexión típica de los paneles de media celda. Ésta consiste, básicamente, en ramas de N medias celdas conectadas en serie. Las ramas se conectan de a pares en paralelo, y tienen un diodo de paso asociado (también en paralelo). Por último, en un panel, este tipo de configuración se repite M veces en serie. En este caso, el número de medias celdas era  $N=26$  y el de configuraciones  $M=3$ . Cabe mencionar que la respuesta eléctrica de cada media celda es equivalente a la de una celda completa, pero con una corriente fotogenerada igual a la mitad.

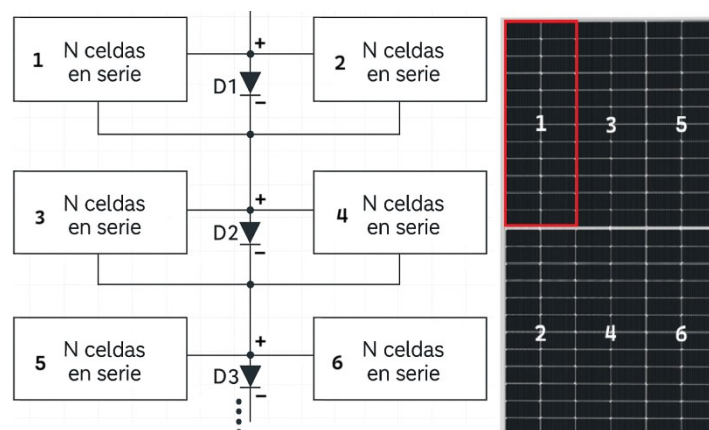


Figura 1: Esquema de conexiones eléctricas internas del panel solar de media celda.

En este trabajo se empleó una metodología de medición de 6 curvas corriente-tensión (I-V) de secciones del panel para extraer posteriormente los parámetros del modelo de diodo único de una celda (Sandia

National Laboratories, 2025). Estos parámetros se usaron para simular las curvas I-V y las curvas potencia-tensión (P-V) de un panel sombreado con un programa en lenguaje de programación Python de desarrollo propio. Por último, se compararon las curvas simuladas con curvas medidas sobre el panel en condiciones operativas normales y de sombreado.

## METODOLOGÍA

La parte experimental de este trabajo se centró en caracterizar eléctricamente un panel, simularlo y comparar estos resultados. Para la caracterización se realizaron dos tipos de experimentos: mediciones de curvas I-V del panel y medición de curva I-V del diodo de paso. Así, se extrajeron los parámetros para modelar la media celda y el diodo.

En el caso de la media celda, se empleó el modelo de diodo único. Éste propone un circuito equivalente de 4 componentes para representar una celda (Figura 2). Esos componentes son una fuente de corriente que representa la corriente fotogenerada, en paralelo con un diodo, que representa a la juntura p-n, una resistencia paralelo y una resistencia serie, asociada a pérdidas como la propia resistencia de la celda.

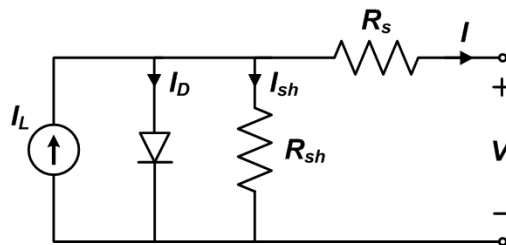


Figura 2: Circuito equivalente de una celda solar según el modelo de diodo único. (Sandia National Laboratories, 2025).

Bajo la hipótesis de homogeneidad, a igual irradiancia y temperatura cada celda tiene la misma respuesta eléctrica, se puede mostrar, por ley de Ohm, que el circuito equivalente del panel es idéntico al de la celda, a menos de factores de escala. Esta hipótesis fue fundamental para nuestro análisis porque, por un lado, permitió obtener parámetros de una media celda a partir de los parámetros de una rama de medias celdas; por otro lado, en las simulaciones, redujo el cálculo de curvas I-V sólo a aquellas medias celdas con distintas irradiancia y temperatura.

La Ec. (1) que rige el circuito equivalente del panel tiene la forma (Tian et al., 2012):

$$I = N_p I_L - N_p I_D \left[ \exp \left( \frac{V + I \frac{N_s R_s}{N_p}}{N_s a} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \frac{N_s R_s}{N_p}}{\frac{N_s R_{sh}}{N_p}} \quad (1)$$

Donde los parámetros de la celda son:

$I_L$ = corriente fotogenerada

$I_D$ = corriente inversa de saturación del diodo

$R_s$ = resistencia serie

$R_{sh}$ = resistencia paralelo

$a$ = parámetro de idealidad modificado

$N_p$ = número de ramas en paralelo del panel

$N_s$ = número de celdas en serie en cada rama.

En total se tienen 5 parámetros a determinar ( $I_L$ ,  $I_D$ ,  $a$ ,  $R_s$  y  $R_{SH}$ ); por ende, se necesitan 5 ecuaciones. Además, cuando un panel está sombreado, dista de estar en condiciones estándar. Los parámetros del modelo deben modificarse debido a su dependencia, en particular, con la irradiancia y la temperatura. En el trabajo de DeSoto et al. (2006) se propone un sistema de ecuaciones para encontrar los parámetros en condiciones estandarizadas a partir de los datos que provee el fabricante. Asimismo, incluye las ecuaciones de corrección por irradiancia y la temperatura. En este trabajo se utilizó este enfoque para determinar los parámetros de media celda y corregirlos a condiciones de sombreado.

Para las simulaciones fue necesario sumar las curvas obtenidas con la Ec. (1). Como señala Bishop (1988), el comportamiento eléctrico de un circuito de celdas queda completamente determinado por su curva I-V, la cual resulta de combinar las curvas I-V de cada uno de sus componentes.

Cuando dos celdas se conectan en *paralelo*, sus corrientes se suman a igual tensión. En cambio, si se conectan en *serie*, se suman las tensiones a igual corriente. La Figura 3 ilustra este principio utilizando dos curvas individuales, junto con sus combinaciones en serie y en paralelo. Este procedimiento puede extenderse a otros componentes, como los diodos de paso, y así recrear paneles completos.

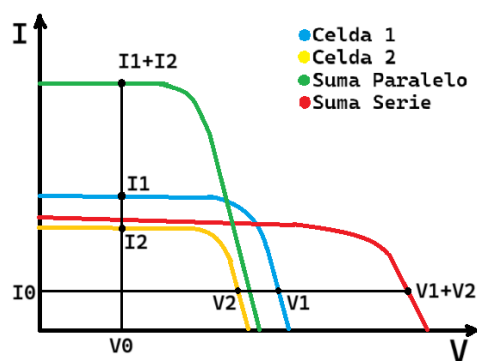


Figura 3: Suma de curvas I-V de celdas con distinta respuesta. En verde se muestra la suma de curvas en paralelo. En rojo se muestra la suma de curvas en serie.

En este trabajo se implementó este método en lenguaje Python siguiendo la arquitectura de la Figura 1. Se sumaron las curvas I-V de 26 medias celdas en serie. Luego, la curva resultante se sumó en paralelo con la de un diodo de paso. Esta última, en paralelo con la de otras 26 en serie, y así sucesivamente.

### Caracterización del panel solar

En lo que respecta a las mediciones sobre el panel, se empleó el montaje experimental mostrado en la Figura 4a. El panel fue seleccionado del sistema fotovoltaico ya mencionado. Éste no tenía defectos sobre el vidrio protector y se lo limpió previamente a realizar las mediciones. Por otra parte, debido a que dichas mediciones se realizaron en el mismo sitio, no se cumplieron las condiciones estándar de medición. Se tomaron las siguientes precauciones: realizar las mediciones en días soleados, sin nubes y en horarios donde la masa de aire relativa fuese cercana a AM1.5.

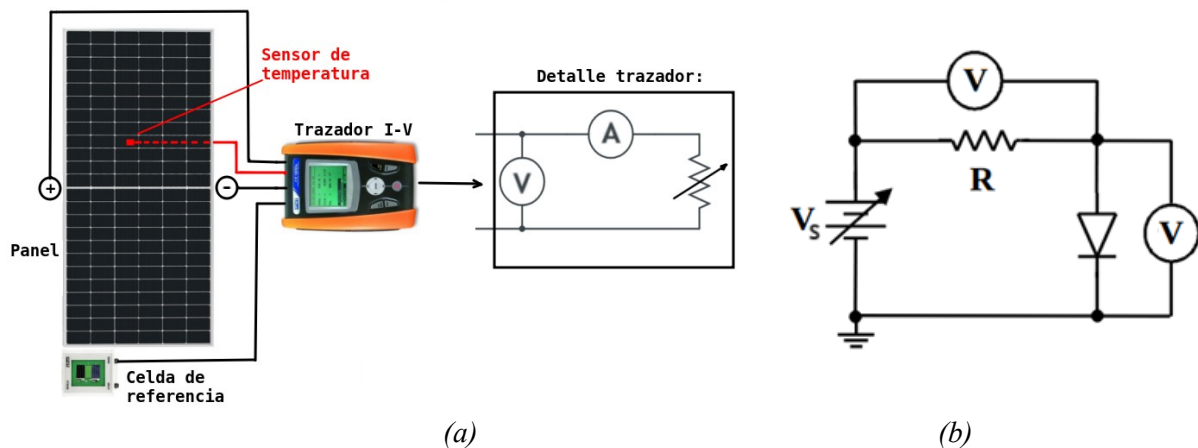


Figura 4: Esquemas experimentales para la caracterización de las ramas y los diodos de paso. (a) Esquema de la configuración experimental para medición de curvas I-V del panel. (b) Circuito de medición de la curva I-V del diodo.

La adquisición de datos se realizó con un trazador de curvas HT Solar i-V (HT, 2017). Este dispositivo se conecta a ambos bornes del panel y cuenta con una resistencia interna variable. Ésta le permite barrer las distintas rectas de carga en las que trabaja el panel solar. Para cada una de éstas mide, a cuatro terminales, la tensión y la corriente en dichos bornes. A su vez, el dispositivo cuenta con una celda de referencia calibrada (para medir irradiancia) y un sensor de temperatura. La celda de referencia se colocó sobre un panel aledaño, obteniendo así misma inclinación ( $20^\circ$ ) e irradiancia. El sensor de temperatura se adhirió a la cara posterior de una celda en la zona central del panel.

Las curvas I-V se corrigieron a condiciones estándar con las ecuaciones de la normativa IRAM (2018). En ellas, los valores de  $R_s$  y  $K$  (factor de corrección de curva) son necesarios para corregir la tensión, pero no estaban disponibles *a priori*. Por ello, se asumió  $R_s \sim 1\Omega$  en base a paneles similares (National Renewable Energy Laboratory, 2025) y se despreciaron los términos con  $K$ , ya que el efecto sobre la tensión resultaba despreciable en el rango de temperaturas de trabajo. Dichas correcciones eran de orden  $\leq 10^{-2}$ .

Por otra parte, se caracterizó al diodo de paso con un circuito como el de la Figura 4b. Dicho diodo se extrajo de otro panel del mismo modelo. En este caso, los distintos puntos de la curva se obtuvieron con una fuente de tensión regulable ( $V_s$ ). Esto permitió conocer el comportamiento del diodo tanto en polarización directa como inversa, pudiendo observarse la tensión de ruptura. A partir de ésto se eligió un modelo adecuado para la simulación.

#### **Determinación de parámetros para modelado**

Se exploraron tres formas de medir curvas I-V para obtener los parámetros del modelo de diodo único de las celdas. Una de ellas era caracterizar cada media celda por separado. Sin embargo, medir 156 curvas era excesivo para una aplicación práctica. La segunda opción fue medir curvas del panel entero, pero estas curvas incluían el efecto de los diodos de paso y suponían la misma respuesta eléctrica en cada rama del panel. Finalmente, se decidió medir la curva I-V de cada rama por separado, tapando las 5 restantes. Así, se mide sobre 26 medias celdas en serie, minimizando el efecto de los diodos de paso y permitiendo variaciones en la respuesta eléctrica entre ellas. Entonces, en total se obtuvieron 6 mediciones.

A continuación, se calcularon los parámetros de cada rama resolviendo el sistema de 5 ecuaciones presentadas en DeSoto et al. (2006). Para ello, se emplearon los tres puntos característicos de la curva I-V: el punto de máxima potencia, y los extremos ( $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ). Estos últimos se obtuvieron por extrapolación lineal ya que debido a las correcciones (IRAM, 2018) no se podían inferir directamente. Un ejemplo de curva medida, junto con su ajuste, se muestra en la Figura 5, en la sección de Resultados.

La optimización de parámetros se resolvió con una rutina en Python basada en la función `root()` del módulo `scipy.optimize` (Virtanen et al., 2020). Como condición inicial se utilizaron los valores sugeridos por la función `fit_desoto()` de la librería `pvl` (Anderson et al., 2023). Se empleó el algoritmo de Levenberg-Marquardt, dado que fue el único que logró convergencia sistemática a valores físicamente razonables, comparables con valores correspondientes a paneles similares reportados en la literatura (National Renewable Energy Laboratory, 2025).

### ***Efectos del sombreado y simulaciones***

En cuanto al efecto del sombreado, se ensayaron diversas configuraciones: desde la obstrucción parcial de unas pocas celdas, hasta la obstrucción completa de varias zonas del panel en simultáneo. Para cada configuración se registraron la curva I-V, la temperatura del panel y la irradiancia. Las obstrucciones se realizaron con láminas de membrana asfáltica, únicamente orientándolas longitudinal o transversalmente, al igual que la distribución de celdas en el panel. Si bien no representan la variedad de sombras reales, sí permitieron estudiar la respuesta y sensibilidad del simulador de manera controlada. Además, este método es relativamente sencillo de reproducir en comparación con una sombra urbana arbitraria. Por otro lado, en términos de máxima potencia, un panel al 50 % de irradiancia es equivalente a la mitad del mismo panel a plena irradiancia.

Es necesario aclarar que, en este estudio, la duración del sombreado no se tuvo en cuenta. Por lo tanto, se asumió que la temperatura en todas las celdas era la misma que la del módulo. En el momento de simular, el único parámetro que se modificó para estimar la curva I-V de la media celda es la irradiancia que ésta recibía. La variación de sus parámetros se hizo según las ecuaciones de DeSoto et al. (2006).

Por último, obtenidos los parámetros de media celda y diodo, se reconstruyó la curva del panel, sumando celda por celda como se describió previamente. Debido a que la Ec. (1) es implícita para I, se requirió encontrar puntos fijos para obtener cada punto (V, I). La hipótesis de homogeneidad permitió resolver dicha ecuación sólo para las medias celdas con distinta irradiancia. Se incrementó la densidad de puntos en la región de máxima potencia dado que a fines prácticos es la región que más interesa describir. La suma de curvas a igual irradiancia se obtuvo multiplicando la curva individual por la cantidad de celdas. La suma de curvas con distinta irradiancia se hizo interpolando linealmente cada una de ellas.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones realizadas, una breve discusión de los valores obtenidos y la comparación de las mediciones con las simulaciones.

### ***Parámetros para las simulaciones***

Se obtuvieron los parámetros del modelo para las seis ramas de 26 medias celdas en serie que tiene un panel. Para obtener los parámetros de media celda, se aplicaron las relaciones de escalado de la Ec. (1), considerando  $N_S = 26$  y  $N_P = 1$ :  $a_{26} = 26a$ ,  $R_{S-26} = 26R_S$  y  $R_{SH-26} = 26R_{SH}$ . En la Figura 5 se muestra como ejemplo la curva I-V corregida de una rama junto con su ajuste.

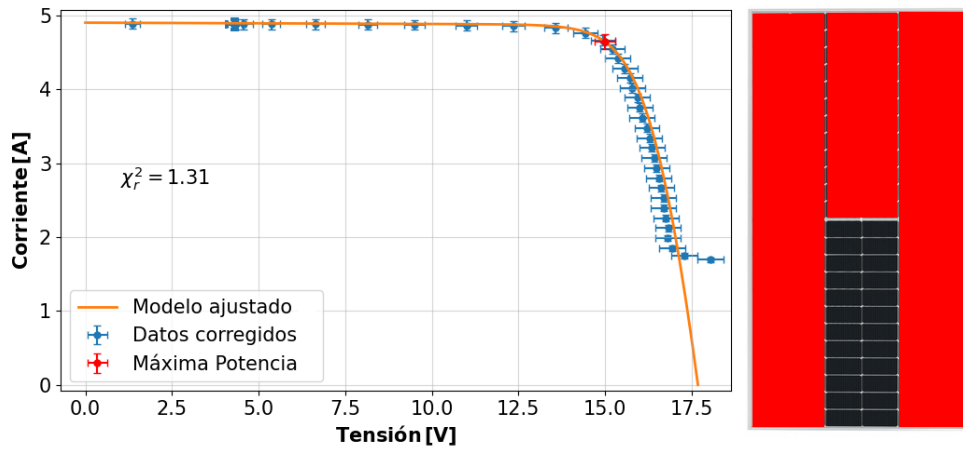


Figura 5: Curva I-V corregida (por irradiancia y temperatura) de un conjunto de 26 medias celdas, junto con el ajuste correspondiente al modelo de diodo único. A la derecha se muestra el patrón de sombreado utilizado para obtener esa medición.

La optimización numérica convergió en todos los casos, arrojando parámetros del orden de magnitud y comparables con valores reportados para paneles similares (National Renewable Energy Laboratory, 2025). Las soluciones de cada rama se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de media celda para cada rama del panel. La última fila corresponde a la media y error estándar que se obtienen para cada parámetro.

Rama	$I_L$ [A]	$I_D$ [A]	$a$ [mV]	$R_s$ [m $\Omega$ ]	$R_{SH}$ [ $\Omega$ ]
1	5,02	$7,36 \times 10^{-12}$	25,2	6,82	6,42
2	4,74	$6,98 \times 10^{-12}$	25,0	7,32	12,91
3	5,22	$7,65 \times 10^{-12}$	24,8	7,29	6,93
4	4,90	$7,23 \times 10^{-12}$	24,9	5,86	21,64
5	4,84	$7,08 \times 10^{-12}$	24,8	5,00	4,94
6	5,13	$7,58 \times 10^{-12}$	25,0	9,11	30,14
<b>Media y Error</b>	<b><math>5,0 \pm 0,2</math></b>	<b><math>(7,3 \pm 0,3) \times 10^{-12}</math></b>	<b><math>25,0 \pm 0,2</math></b>	<b><math>7 \pm 1</math></b>	<b><math>14 \pm 10</math></b>

Se puede observar de la última fila de la Tabla 1 que la resistencia paralelo presenta una dispersión comparable a su media. Esto podría deberse a que las celdas no son homogéneas. No obstante, como indica Green (1995), una forma de evaluar cuánto afecta este parámetro a la curva de la celda es compararlo con la resistencia característica de la celda,  $(V_{OC}/I_{SC})_{celda} \sim 0,14\Omega$ . Para la menor de las resistencias paralelo (fila 5, Tabla 1) se tiene que es mayor a 30 veces la resistencia característica. Por lo tanto, en general se supondrá que su influencia es pequeña. De este modo, y como las mediciones de cada rama se consideraron equivalentes, se decidió simular cada media celda empleando los parámetros promedio de la Tabla 1 (fila 7).

Por otra parte, se midió la curva I-V del diodo de paso para seleccionar un modelo adecuado para la simulación. La Figura 6a muestra dicha curva. Se observó la tensión de ruptura del diodo en  $(-54,0 \pm 0,5)$  V. Además, la mayor tensión a la que puede someterse un diodo en polarización inversa es la de 26 medias celdas en serie ( $\sim 18V$ ). Por lo tanto, se encuentra fuera del rango de ruptura. Esto permitió utilizar un modelo más simple como el de Shockley (Alley y Atwood, 1973), que no contempla este fenómeno.

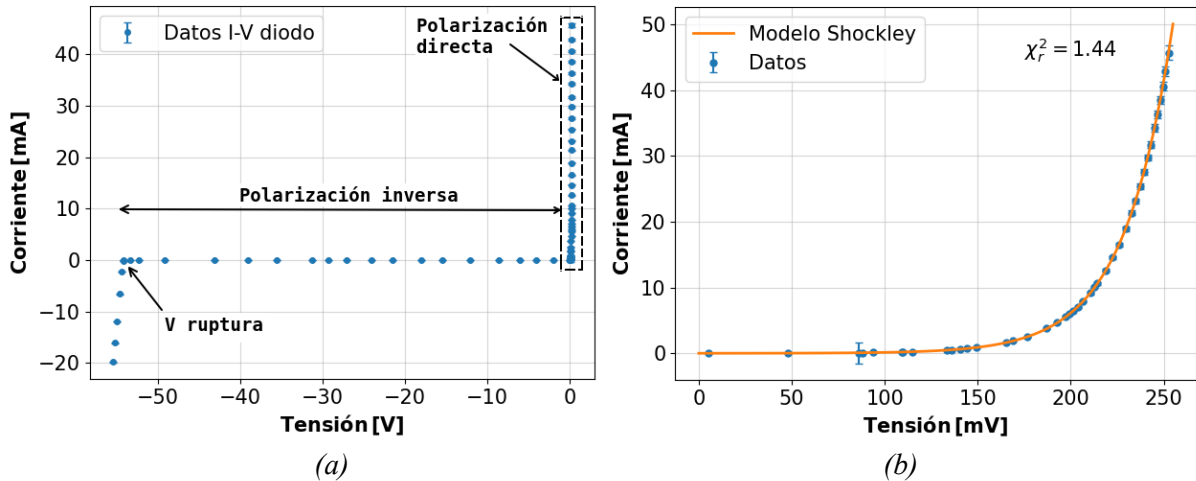


Figura 6: Caracterización del diodo de paso. (a) Curva I-V completa del diodo de paso. (b) Curva I-V en región de polarización directa y ajuste con modelo de Shockley.

Entonces, la región de interés de la curva I-V para la simulación es la asociada a la polarización directa (Figura 6b). Se realizó un ajuste no lineal de los datos con la ecuación  $I=I_0[\exp(V/nV_{th})-1]$  (Shockley). Los parámetros obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de diodo de paso empleados para simulaciones.

$I_0$ [A]	$\frac{1}{nV_{th}}$ [V <sup>-1</sup> ]
$(3,04 \pm 0,02) \times 10^{-6}$	$38,10 \pm 0,05$

Finalmente, ya teniendo caracterizados ambos componentes constitutivos del panel, se pudieron realizar simulaciones sobre el panel completo y compararlas con las mediciones de curva I-V.

### Simulaciones con sombreado

Se realizaron seis tipos de obstrucción distintas del panel para representar una variedad de casos no realistas, pero que permitieran probar el potencial alcance de la simulación. En las Figuras 7 y 8 se comparan dos de las curvas I-V, P-V medidas con las simuladas.

La Figura 7 muestra el caso de un panel con unas pocas celdas sombreadas parcialmente. La obstrucción parcial permitió estudiar la sensibilidad de la simulación serie dentro de una rama del panel. A su vez, la repetición del patrón en otras ramas da más generalidad y permitió estudiar la sensibilidad de la simulación al acoplamiento de las ramas en paralelo.

La Figura 8 es un caso que permitió estudiar la respuesta de la simulación cuando la diferencia de corriente generada por las distintas ramas en paralelo es más significativa. Además, esta figura permite apreciar el efecto de los diodos de paso simulados.

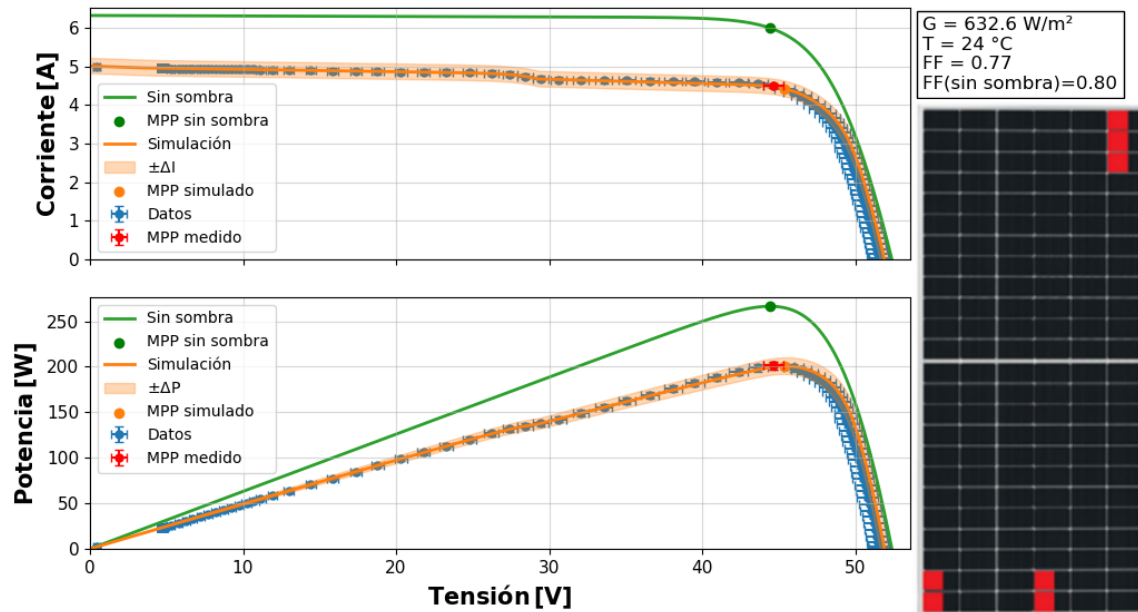


Figura 7: Curva I-V (superior) y P-V (inferior) con su correspondiente esquema de medias celdas cubiertas a la derecha. En ambos se identifica en rojo su punto de máxima potencia.

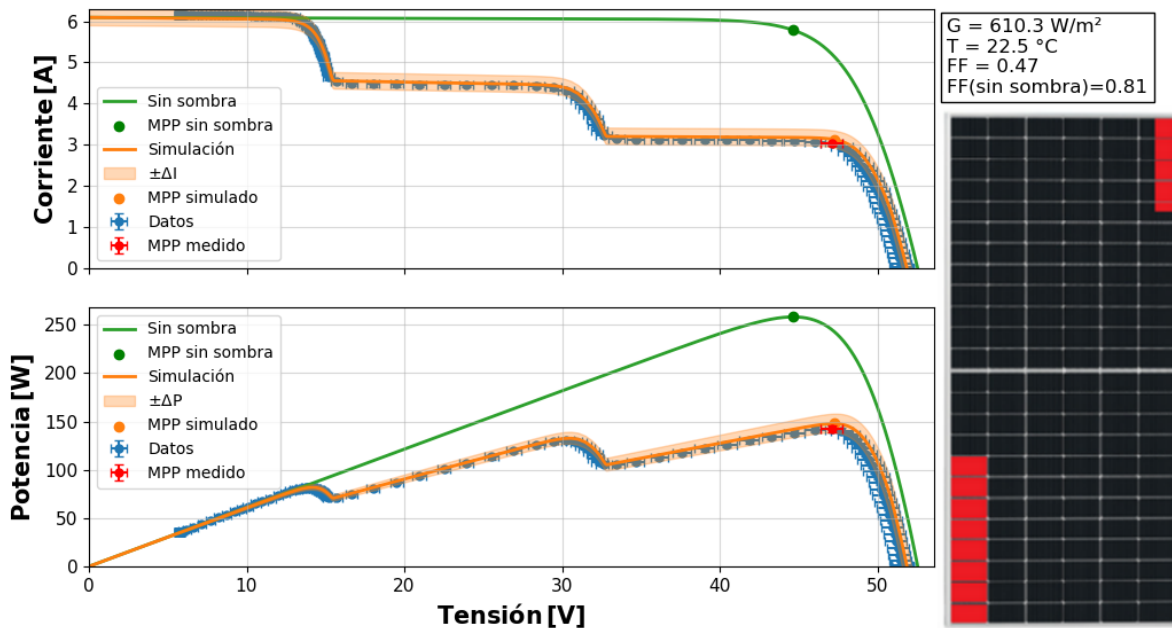


Figura 8: Curva I-V (superior) y P-V (inferior) con su correspondiente esquema de medias celdas cubiertas a la derecha. En ambos se identifica en rojo su punto de máxima potencia.

Para la medición de la Figura 7 se obtuvo una potencia máxima simulada de  $(201 \pm 9)$  W, mientras que para la medición de la Figura 8 se obtuvo una potencia máxima simulada de  $(150 \pm 10)$  W. Además, en dichas Figuras se puede ver que los puntos de máxima potencia ( $V_{MPP}$ ,  $P_{MPP}$ ) se encontraron dentro del rango de incerteza de la máxima potencia medida con el trazador (puntos rojos de las Figuras 7 y 8). Lo mismo ocurrió para el resto de las configuraciones de sombreado probadas; estos resultados se pueden observar en la Tabla 3. Cabe agregar que los errores de las potencias simuladas se calcularon asumiendo máxima precisión en la tensión, y propagando linealmente los errores a partir de la Ec. (1) y utilizando las incertezas de los parámetros encontradas en la Tabla 1. Estos fueron como máximo 6,5% de  $P_{MPP}$ .

Tabla 3: Comparación entre los puntos de máximas potencias medidas y simuladas para las seis configuraciones probadas.

<b>P<sub>MPP</sub> Medida [W]</b>	<b>P<sub>MPP</sub> Simulada [W]</b>	<b>V<sub>MPP</sub> Medida [V]</b>	<b>V<sub>MPP</sub> Simulada [V]</b>
<b>201 ± 4</b>	<b>201 ± 9</b>	<b>44,6 ± 0,6</b>	<b>45,3</b>
<b>142 ± 3</b>	<b>150 ± 10</b>	<b>47,1 ± 0,7</b>	<b>47,2</b>
<b>207 ± 4</b>	<b>210 ± 9</b>	<b>45,2 ± 0,7</b>	<b>45,3</b>
<b>131 ± 3</b>	<b>139 ± 9</b>	<b>43,2 ± 0,6</b>	<b>44,4</b>
<b>170 ± 4</b>	<b>173 ± 6</b>	<b>28,7 ± 0,5</b>	<b>29,3</b>
<b>135 ± 3</b>	<b>141 ± 9</b>	<b>45,2 ± 0,7</b>	<b>45,9</b>

## CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un procedimiento experimental y computacional para simular la respuesta de un panel solar de media celda bajo diversas condiciones de sombreado a partir del modelo de diodo único. Para esto, se realizaron 6 mediciones de curvas I-V en las distintas ramas del panel. Los parámetros del modelo de diodo único se obtuvieron resolviendo el sistema propuesto por DeSoto et al. (2006), utilizando como entrada los puntos característicos de la curva ( $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  y máxima potencia) corregidos por irradiancia y temperatura, según las recomendaciones de la norma IRAM (2018). Si bien los ajustes dieron parámetros físicamente razonables, comparables con otros módulos reportados (National Renewable Energy Laboratory, 2025), se observó una dispersión significativa en el parámetro de  $R_{SH}$ . Esto podría mejorarse midiendo múltiples veces las curvas I-V de cada rama, lo que permitiría reducir el error estándar de la celda promedio. Otra opción podría ser emplear el método de determinación de  $R_S$  de la IRAM (2018) y obtener el resto de parámetros con 4 ecuaciones. Más aún, podrían usarse otros conjuntos de cinco puntos de la curva obtenida con el trazador de curvas I-V. Sin embargo, como la menor de las resistencias paralelo encontradas era mayor a 30 veces la resistencia característica de la media celda, los parámetros promedio resultaron útiles para una primera aproximación del comportamiento eléctrico del panel.

Con los parámetros característicos ya definidos, se desarrolló un programa en lenguaje Python que simula la curva I-V completa del panel a partir de su arquitectura interna. El programa desarrollado logró simular adecuadamente las curvas I-V de distintas configuraciones de sombreado y para el caso particular del punto de máxima potencia, en todas las configuraciones de sombreado probadas, el resultado obtenido se encontró en concordancia con las potencias máximas medidas. No obstante, cabe mencionar que los errores de dichas simulaciones alcanzaron el 6,5% del valor de  $P_{MPP}$ . Una forma de mejorarlo, nuevamente, sería aumentar el muestreo de curvas I-V de cada rama y reducir el error estándar de los parámetros del modelo de diodo único.

En conjunto, los resultados indicaron que este enfoque permitiría reproducir el comportamiento de un panel solar parcialmente sombreado, utilizando 5 parámetros y sin requerir una descripción detallada de cada celda individual. Esto podría resultar útil tanto para el análisis de rendimiento como para la predicción de escenarios críticos de degradación o sobrecarga térmica del panel sombreado.

Entre otros trabajos futuros se plantea extender las simulaciones a cadenas de paneles, contrastarlas empíricamente con sombras urbanas típicas en el sistema fotovoltaico del Centro Atómico Constituyentes y también comparar su respuesta con la de los programas comerciales.

## AGRADECIMIENTOS

Al Departamento Energía Solar – CNEA, en especial, Juan C. Plá, Elena M. Godfrin, Julio C. Durán y Alejandro Krautner por su asesoramiento a lo largo de todo el proceso de confección de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Alley, C. y Atwood, K. (1973). Ingeniería Electrónica, 3<sup>a</sup> Edición, Capítulo 3: Diodos. Limusa.
- Anderson, K. et al. (2023). Pvlib python: update 2023 [consulta: julio de 2025]. Pvlib Python Development Team. <https://pvlib-python.readthedocs.io/>
- Bishop, J. W. (1988). Computer Simulation of the Effects of Electrical Mismatches in Photovoltaic Cell Interconnection Circuits. *Solar Cells*, 25, 73-89.
- DeSoto, W., Klein, S. A., & Beckman, W. A. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, 80(1), 78-88.
- Green, M. A. (1995). *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Prentice Hall.
- HT. (2017). Solar I–Vw, Solar I-Ve User Manual [Manual de usuario del trazador].
- IRAM. (2018). Energía solar, Módulos fotovoltaicos, Parte 6-comportamiento en condiciones de ensayo normalizadas - STC(MQT 06.1). Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Jinko Solar. (s.f.). Tiger Mono-facial 450-470 Watt [Hoja de datos del panel].
- NREL. (2025). PV Performance Modeling & Data [consulta: julio de 2025]. National Renewable Energy Laboratory. <https://github.com/NREL/SAM/tree/patch/samples/CEC%5C%20Module%5C%20and%5C%20Inverter%5C%20Libraries/CEC%5C%20Modules/CEC%5C%20Modules%5C%202024-11-14>
- Vitrenan, P. et al. (2020). SciPy: Scientific Computing Tools for Python [consulta: julio de 2025]. SciPy Community. <https://www.scipy.org>
- SNL. (2025). Single-Diode Model of Solar Cell [consulta: julio de 2025]. Sandia National Laboratories. <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/2-dc-module-iv/single-diode-equivalent-circuit-models/>
- Tian, H. et al. (2012). A Detailed Performance Model for Photovoltaic Systems: Preprint.

## PROGRESS ON THE DEVELOPMENT OF A HALF-CELL SOLAR MODULE SIMULATOR AND TESTING UNDER ARBITRARY SHADING CONDITIONS

**ABSTRACT:** The integration of photovoltaic systems in urban environments is often limited by typical landscape shading, which reduces their efficiency. This work aims to contribute to this area of knowledge by developing simulations under different shading conditions on a string of half-cell monocrystalline silicon solar panels. The objective is to compare the simulations with experimental curves measured on a photovoltaic system installed at the Constituyentes Atomic Center (San Martín, Buenos Aires, Argentina) and with commercial software. In this work, a methodology for measuring current-voltage curves of panel sections was used to subsequently extract the parameters of the single-diode model of a cell. These parameters were used to simulate the current-voltage and power-voltage curves of a shaded panel using a proprietary Python program. Finally, the simulated curves were compared with curves measured on the panel under shaded conditions, obtaining high agreement in the estimation of the maximum power point and errors less than or equal to 6.5% of the simulated maximum power.

**Keywords:** half-cell, single-diode, shading, simulation, distributed generation.