



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en FÍSICA

**CARACTERIZACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS DE
SILICIO MEDIANTE CURVAS I-V A SOL REAL:
PROCEDIMIENTO DE MINIMIZACIÓN DE INCERTIDUMBRE
ASOCIADA A $P_{m\acute{a}x}$**

**Autor: Gonzalo Sánchez Álvarez
Tutores: Óscar Martínez Sacristán, Iván Santos Tejido
Año: 2023**

ÍNDICE

RESUMEN — ABSTRACT	1
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	2
2. FUNCIONAMIENTO DE UNA FOTOCÉLULA.....	4
2.1. Funcionamiento de una fotocélula ideal	4
2.2. Curvas I-V y P-V de una fotocélula ideal.....	6
2.3. Efectos resistivos en fotocélulas reales	8
2.4. Importancia de las condiciones de medida y justificación de este trabajo.....	9
3. PROCEDIMIENTOS PARA LA TRASLACIÓN DE CURVAS I-V	12
3.1. Procedimientos de traslación según la norma IEC 60891:2021.....	12
3.1.1. Primer Procedimiento.....	12
3.1.2. Segundo Procedimiento	13
3.1.3. Tercer Procedimiento	13
3.1.4. Cuarto Procedimiento.....	14
3.2. Elección del procedimiento más adecuado y justificación.....	14
3.3. Desarrollo teórico del Cuarto Procedimiento.....	17
4. METODOLOGÍA	21
4.1. Instrumentos, montaje y procedimiento experimental.....	21
4.2. Medición en el exterior de los parámetros η y R_S	24
4.3. Medición en el exterior del parámetro α_{rel}	25
4.4. Traslación de las curvas I-V medidas en el exterior.....	27
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
5.1. Resultados de η y de R_S	29
5.2. Traslación de las curvas I-V y medida del error relativo en P_{max}	30
5.2.1. Distribución del error en función de la irradiancia.....	30
5.2.2. Distribución del error en función de la temperatura.....	31
5.2.3. Distribución del error en función de G y de T.....	32
5.3. Comparación visual de las curvas I-V trasladadas	34
6. CONCLUSIONES.....	37
6.1. Conclusiones	37
6.2. Limitaciones y consideraciones de este estudio.....	37
6.3. Futuras líneas de investigación.....	38
I. BIBLIOGRAFÍA	I
II. LISTAS DE FIGURAS Y TABLAS.....	III
II.A. Lista de figuras	III
II.B. Lista de tablas	IV

RESUMEN — ABSTRACT**Castellano**

En este trabajo se establecen las bases del funcionamiento de una fotocélula para entender la curva I-V de un módulo solar y, a partir de ella, obtener la potencia máxima de dicho módulo. También se estudia cómo varía esta curva en función de los parámetros ambientales de su medida: la irradiancia y la temperatura. Posteriormente, se examinan los distintos procedimientos establecidos por la norma internacional IEC 60891:2021 para la traslación de curvas I-V de las condiciones ambientales de medida a otras condiciones objetivo, y se determina cuál de esos procedimientos es el más apropiado para su aplicación en el exterior. Además, se realiza el desarrollo tanto teórico como experimental del denominado Cuarto Procedimiento de la norma IEC 60891:2021, y se estudian las traslaciones resultantes. Finalmente, empleando el valor nominal del parámetro α y midiendo los parámetros R_S y η , hemos obtenido las las curvas I-V trasladadas y, para un módulo fotovoltaico de silicio policristalino; obtenemos un error relativo en la potencia máxima inferior al ± 1 % en un rango de $950 - 1200 \text{ W/m}^2$ y $24 - 47 \text{ }^\circ\text{C}$ para curvas medidas en el exterior.

English

In this work, the bases of the performance of a photovoltaic cell are established in order to understand de I-V curve of a solar module and, from it, to obtain the maximum power of a module. In addition, the variations of this curve are also studied as a function of the environmental parameters of the measurement: the irradiance and the temperature. Afterwards, the different procedures established by the IEC 60891:2021 international standard for the translation of I-V curves from the measuring environmental conditions to other target conditions are examined, and it is determined which of those procedures is the most suitable for its application outside. Furthermore, both the theoretical and experimental development of the denominated Fourth Procedure of the IEC 60891:2021 standard is performed, and the resulting translations are studied. Finally, employing the nominal value of the parameter α and measuring the parameters R_S and η , we have obtained the translated I-V curves and, for a polycrystalline silicon photovoltaic module; we obtain a relative error in the maximum power lower than ± 1 % in a range of $950 - 1200 \text{ W/m}^2$ and $24 - 47 \text{ }^\circ\text{C}$ for curves measured outside.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Una célula solar fotovoltaica es un dispositivo electrónico capaz de transformar la energía de la luz del sol en energía eléctrica. Normalmente, las células solares (dispositivos de varios cm^2) son conectadas en serie en unas placas denominadas módulos solares (de algo más de un m^2), que son la unidad básica de cualquier instalación fotovoltaica, desde instalaciones particulares hasta plantas generadoras.

Debido al auge, tanto en popularidad como en desarrollo e investigación, de esta tecnología, se hace cada vez más necesario un método de evaluación de los módulos solares que nos permita comprobar cómo de degradado está un módulo de forma sencilla y precisa. Concretamente, uno de los parámetros que más nos interesa conocer con exactitud es la potencia máxima que podemos extraer del módulo solar, P_{max} , para así poder saber si se ha degradado lo suficiente con el tiempo (por el uso, daños u otros posibles defectos), siendo quizá necesario su reemplazo.

Uno de los métodos de evaluación del rendimiento de un módulo solar, y el único capaz de determinar su potencia máxima, es trazar su curva I-V. La curva I-V de un dispositivo es la representación de la Intensidad de corriente que circula por dicho dispositivo en función de su Voltaje. Similarmente, la curva P-V es la representación de la potencia en función del voltaje, siendo la potencia $P = I \cdot V$. La forma de estas curvas se explicará y mostrará en el [apartado 2.2](#).

La medida de las curvas I-V de módulos solares fotovoltaicos es ampliamente usada debido a que nos permite obtener la **potencia máxima** que podemos extraer del módulo, lo cual nos permite compararlo con el valor nominal de la potencia de dicho módulo, dado por el fabricante, y así poder medir la degradación que ha sufrido el módulo.

Las curvas I-V suelen acompañarse de otras técnicas de evaluación, como termografías infrarrojas o electroluminiscencias, para complementar la evaluación del módulo. Sin embargo, la ventaja que tienen las curvas I-V sobre estas otras técnicas es que nos permite un diagnóstico rápido de posibles defectos en el módulo, como por ejemplo la activación de algún diodo de *bypass*¹ y el sombreado parcial.

Sin embargo, como veremos más adelante, los parámetros de la curva I-V, incluida la potencia máxima, dependen de la temperatura e irradiancia a las que se trace la curva (*Operational Conditions*, OPC). Por tanto, para facilitar su comparación, se han establecido unas condiciones estándar de medida: STC (*Standard Test Conditions*), las cuales son una irradiancia de $1000 W/m^2$ y una temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$ [1].

Para poder comparar curvas I-V trazadas en distintas condiciones, existen una serie de procedimientos que nos permiten extrapolar las curvas I-V de unas condiciones de irradiancia y temperatura a otras condiciones distintas [2], a lo cual se le denomina traslación de la curva I-V. Estos procedimientos han sido ampliamente examinados, si bien en general se han estudiado mediante el uso de curvas I-V medidas en laboratorio o incluso simuladas [3].

Estas traslaciones requieren el uso de una serie de parámetros. Estos parámetros pueden ser medidos en laboratorio, aunque tienen valores nominales dados por el fabricante.

¹ Un diodo de *bypass* es un dispositivo que permite que la corriente evite una determinada zona del módulo, activándose cuando las células de esa región no funcionan correctamente. Generalmente, hay tres en cada módulo. [8, secc. 7.4]

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Normalmente, en el estudio del estado de plantas fotovoltaicas suelen utilizarse los valores nominales de estos parámetros para así evitar caracterizar cada módulo. Esto se debe a que, si quisiéramos obtener los parámetros de cada módulo, para una planta promedio de 50 MW de producción necesitaríamos caracterizar más de cien mil módulos.

Sin embargo, el valor real de estos parámetros puede variar debido a la degradación del módulo. Por eso, consideramos interesante también estudiar la posibilidad de obtener estos parámetros mediante medidas al aire libre.

Actualmente, lo habitual a la hora de trazar la curva I-V de un módulo es desmontarlo y llevarlo a un laboratorio para poder medir su curva I-V en condiciones STC, pero esto supone un gran coste de transporte, mano de obra y tiempo durante el cual el módulo no está produciendo energía. El interés por parte de una empresa del sector fotovoltaico de recortar estos gastos ha motivado la realización de este Trabajo de Fin de Grado, con el fin de estudiar la posibilidad de analizar un módulo solar en la propia planta fotovoltaica.

Entonces, la utilidad de este trabajo es realizar un estudio de la viabilidad de la caracterización de un módulo solar fotovoltaico desde cero a partir de su curva I-V trazada en el exterior y su posterior traslación a condiciones STC, sin necesidad de transportar el módulo a un laboratorio para así tratar de detener la producción durante el menor tiempo posible.

Por tanto, **los objetivos de este trabajo serán:**

- tratar de obtener un método que nos permita, mediante la medida de una curva I-V en la propia localización del módulo (esto es, fuera de las condiciones y facilidades de un laboratorio), caracterizar completamente un módulo solar;
- estudiar los distintos procedimientos de la norma internacional para la traslación de curvas I-V, entendiendo los distintos parámetros que se emplean en cada procedimiento;
- analizar la viabilidad de los distintos procedimientos que nos permiten trasladar curvas I-V a las condiciones STC partiendo de las curvas medidas en el exterior; y en particular, estudiar la posibilidad de medida en el exterior de los parámetros necesarios, en lugar de tomar sus valores nominales;
- desarrollar las ecuaciones de la norma a partir de las ecuaciones básicas de la célula solar, ya que su desarrollo está ausente o incompleto tanto en la norma como en la bibliografía consultada;
- obtener, a partir de las traslaciones, la potencia máxima del módulo en condiciones STC para poder determinar su degradación; y
- cuantificar el error relativo cometido en la medida de esta potencia máxima.

2. FUNCIONAMIENTO DE UNA FOTOCÉLULA

2.1. Funcionamiento de una fotocélula ideal

Una fotocélula es básicamente una unión p-n, la cual está formada por un semiconductor con un dopado de tipo aceptor unido a otro semiconductor con dopado de tipo donador, como se muestra en el esquema de la [Figura 2.1](#), donde también se muestra la barrera de potencial que se forma en el borde de la unión. Recordemos que el campo eléctrico va desde potenciales altos hacia potenciales bajos.

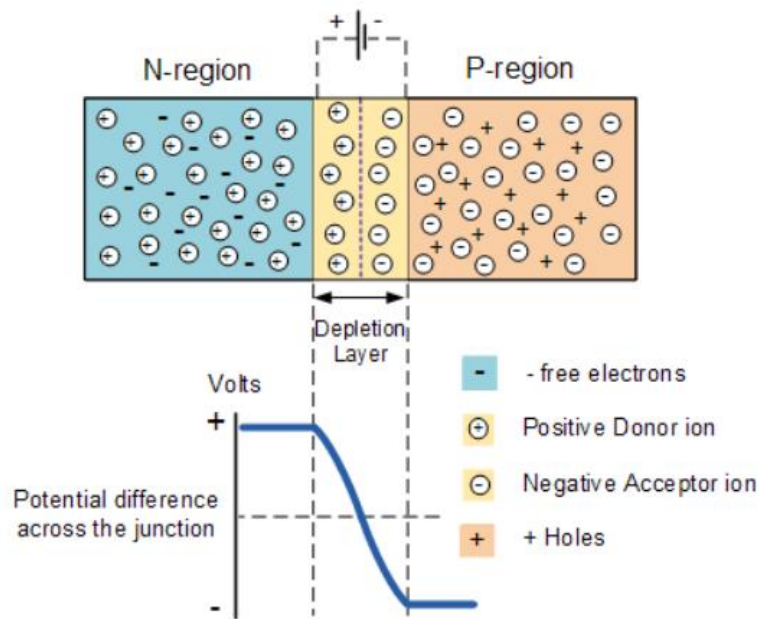


Figura 2.1: Esquema de funcionamiento de una unión p-n [4].

Si aplicamos un voltaje externo positivo en el lado P respecto del lado N, disminuirá la barrera de potencial, y por tanto también el campo eléctrico que impide el paso de portadores libres, por lo que tendremos una corriente de electrones, negativos, del lado N al P (positiva) y otra corriente de huecos, positivos, del lado P al N (positiva también), de forma que la corriente total será positiva. Por el contrario, un voltaje negativo en el lado P respecto del lado N impedirá el paso de corriente al aumentar la barrera de potencial, salvo por una pequeña corriente de fuga debida a efectos térmicos.

En un diodo de unión p-n, la relación entre la intensidad i y el voltaje v de la corriente eléctrica que circula a través de él viene dada idealmente por una función exponencial² [5, secc. 2.3.1; 6, secc. 3.4.1], la cual según el modelo de Shockley es la siguiente:

$$i = i_s \left(e^{\frac{v}{\eta V_T}} - 1 \right), \quad (1)$$

donde

² Realmente, con una tensión muy negativa se produce el fenómeno de ruptura, obteniéndose una corriente negativa muy alta [5, secc. 2.4]. Como no vamos a trabajar con voltajes negativos, podemos obviar este efecto.

2. FUNCIONAMIENTO DE UNA FOTOCÉLULA

- i_s es la corriente de saturación, esto es, la corriente debida la generación térmica de portadores minoritarios y su difusión en las regiones neutrales de la unión. Es casi constante con el voltaje, pero varía con la temperatura y depende de la concentración de impurezas [5, secc. 2.3.1]. Es del orden de 10^{-12} A/m^2 , multiplicado por el área de la unión [6, secc. 3.4.1], y es proporcional a T^3 [5, secc. 2.3; 7];
- $V_T = kT/q$ es el voltaje térmico, con k la constante de Boltzmann, T la temperatura y q la carga del electrón. A 20 °C, su valor está en torno a 25 mV; y
- η es el factor de idealidad del diodo. Si todas las recombinaciones de electrones y huecos ocurriesen de banda a banda en las zonas neutras del diodo, tendríamos que $\eta = 1$. Sin embargo, también podemos tener otros tipos de recombinación y/o pueden darse en zonas menos óptimas, de forma que generalmente tendremos $\eta \in [1,2]$ [8, secc. 4.4].

Cuando un fotón es absorbido por un diodo de unión p-n, se genera un par electrón-hueco. Si este par es generado cerca de la unión, el campo eléctrico debido a las barreras de potencial separará la pareja de portadores, produciéndose una corriente fotogenerada o fotocorriente, i_{ph} [5, secc. 13.2]:

$$i_{ph} = q \left(\varepsilon \frac{P_{opt}}{h\nu} \right), \quad (2)$$

donde

- ε es la eficiencia cuántica (esto es, cuántos portadores se generan por cada fotón);
- $P_{opt} = G \cdot s$ es la potencia óptica, esto es, la irradiancia G incidente multiplicada por la superficie s del diodo;
- $h\nu$ es la energía del fotón, la cual tiene que ser mayor que la energía del *gap* del semiconductor, E_g .

Entonces, una fuente de luz (en nuestro caso, el sol), es equivalente a una fuente de corriente i_{ph} . Debido a la dirección del campo eléctrico (del lado N al P) los electrones fotogenerados crean una corriente del lado P, positivo, al lado N, negativo; y similarmente los huecos fotogenerados avanzarán del lado N al P, luego la corriente de electrones y huecos fotogenerados es una corriente negativa.

Podemos incorporar esta corriente fotogenerada a la ecuación [Ec.1](#) del diodo de Shockley, obteniendo una exponencial desplazada hacia corrientes negativas en presencia de iluminación [6, secc. 10.2.2]:

$$i = i_s \left(e^{\frac{v}{\eta V_T}} - 1 \right) - i_{ph}. \quad (3)$$

Como podemos observar en la [Figura 2.2](#), al tener una fotocorriente entramos en el cuarto cuadrante, donde $I < 0$ y $V > 0$; de forma que la potencia $P = VI$ es negativa, o lo que es lo mismo, podemos extraer energía del sistema. Esto se debe al desplazamiento hacia intensidades negativas provocado por la fotocorriente.

2. FUNCIONAMIENTO DE UNA FOTOCÉLULA

Respecto a la energía, la extraeremos mediante una resistencia de valor R_L conectada en serie con la fotocélula. Teniendo en cuenta que la corriente circula del polo negativo al positivo, en sentido opuesto al convencional, la ley de Ohm ($V = IR$) nos dice que estaremos trabajando en el punto de la [Ec.3](#) tal que coincida con la siguiente recta [[6](#), secc. 10.2.2]:

$$i = \frac{-1}{R_L} v. \quad (4)$$

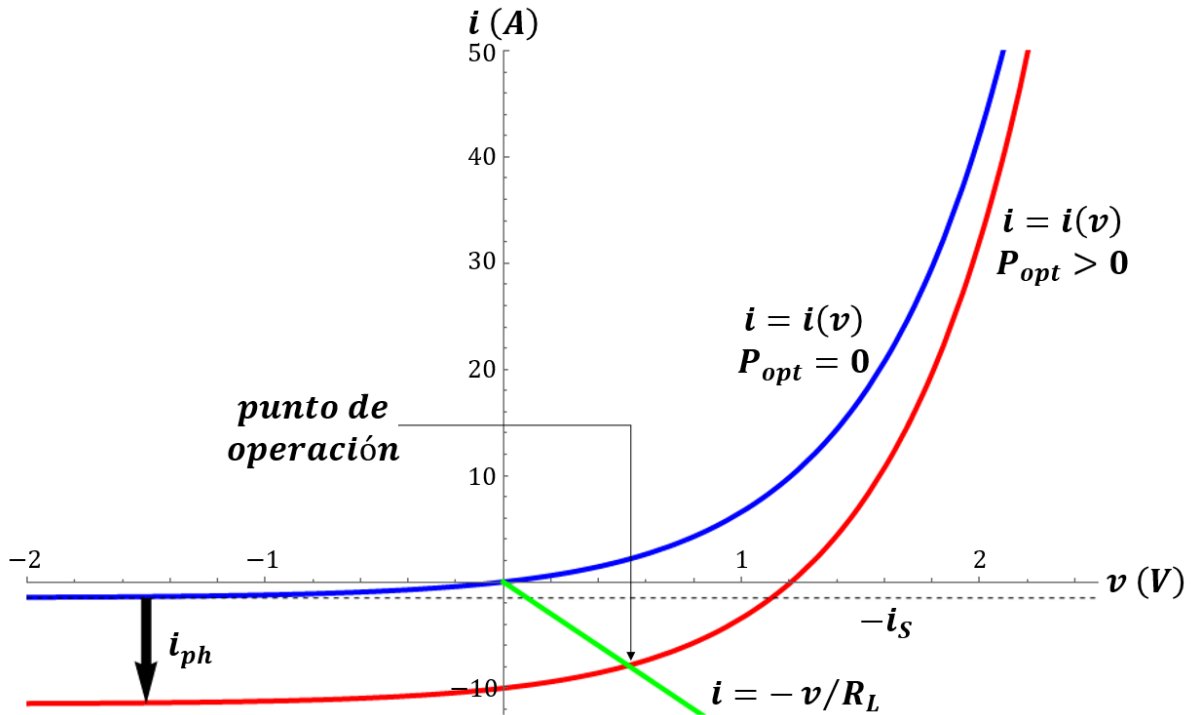


Figura 2.2: Intensidad en función del voltaje para una fotocélula según la ecuación de Shockley. Se ha exagerado el valor de i_s para que sea apreciable.

2.2. Curvas I-V y P-V de una fotocélula ideal

El principal recurso a la hora de caracterizar una fotocélula es representar la intensidad que circula por ella en función del voltaje entre sus extremos, es decir, su curva o característica I-V. Por convenio, se invierte el signo de la corriente para representar la curva I-V en el primer cuadrante, de forma que la [Ec.3](#) queda como:

$$i = i_{ph} - i_s \left(e^{\frac{v}{\eta V_T}} - 1 \right). \quad (5)$$

También suele representarse la curva P-V, donde $p = iv$ es la potencia:

$$p = i_{ph} v - i_s v \left(e^{\frac{v}{\eta V_T}} - 1 \right). \quad (6)$$

2. FUNCIONAMIENTO DE UNA FOTOCÉLULA

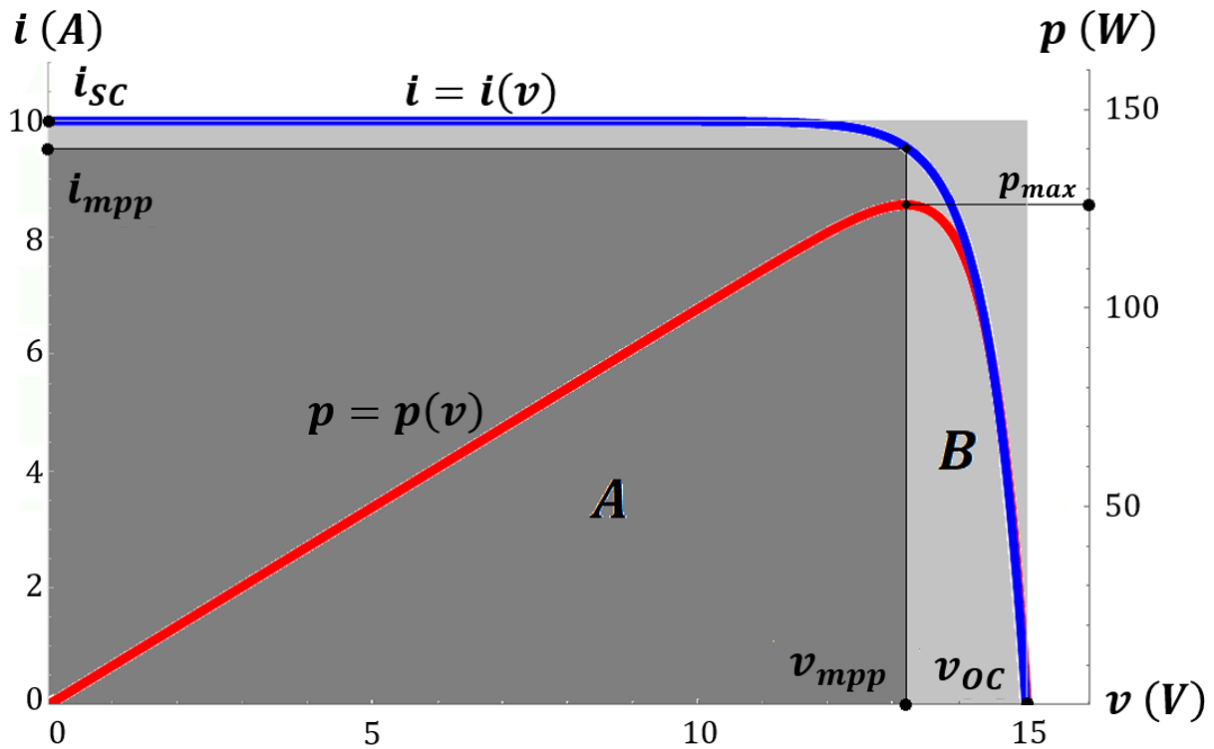


Figura 2.3: Curvas I-V (eje izquierdo) y P-V (eje derecho) de una fotocélula y sus parámetros.

Las curvas I-V y P-V están caracterizadas por una serie de parámetros, como puede verse en la [Figura 2.3](#):

- i_{sc} es la intensidad de cortocircuito (*ShortCut*, en inglés). Es el valor de la corriente que circula por la fotocélula cuando no hay diferencia de voltaje entre sus bornes. Ya que en exteriores $i_{ph} \gg i_s$, de la [Ec.5](#), tenemos que

$$v = 0 \Rightarrow i_{sc} = i_{ph} - i_s \approx i_{ph} \propto P_{opt} \propto G, \quad (7)$$

por lo que i_{sc} dependerá principalmente de la irradiancia, aunque depende también de la temperatura [\[7\]](#) a través de la eficiencia cuántica ε ([Ec.2](#));

- v_{oc} es el voltaje de circuito abierto (*Open Circuit*, en inglés). Es el valor del voltaje para el cual no hay paso de corriente. De la [Ec.5](#) observamos que esto sucede cuando la corriente que circula por el diodo es igual, pero de signo contrario, a la corriente fotogenerada, de forma que

$$i = 0 \Rightarrow v_{oc} = \eta V_T \ln \left(\frac{i_{ph}}{i_s} + 1 \right), \text{ con } V_T \propto T \text{ y } i_s \propto T^3, \quad (8)$$

luego v_{oc} dependerá de la iluminación a través de i_{ph} , pero dependerá más fuertemente de la temperatura;

- p_{max} es el valor máximo que alcanza la potencia. Es el punto en el que nos interesa que trabaje la célula, ya que así podremos extraer la mayor cantidad posible de energía;
- i_{mpp} y v_{mpp} son, respectivamente, la corriente y el voltaje en el punto de máxima potencia (*Maximum Power Point*, por sus siglas en inglés); y
- FF es el factor de llenado (*Fill Factor*, en inglés). Se define como [\[6, secc. 10.2.3\]](#)

2. FUNCIONAMIENTO DE UNA FOTOCÉLULA

$$FF \equiv \frac{i_{mpp} v_{mpp}}{i_{sc} v_{oc}}, \quad (9a)$$

y se corresponde con el ratio entre el rectángulo A , formado por i_{mpp} y v_{mpp} , y el B , formado por i_{sc} y v_{oc} . Este factor da la eficiencia de la célula para convertir la potencia de la luz incidente en potencia eléctrica:

$$eficiencia = FF \frac{i_{sc} v_{oc}}{p_{Incidente}}. \quad (9b)$$

2.3. Efectos resistivos en fotocélulas reales

En una fotocélula real, se producen una serie de fenómenos que disminuyen el factor de llenado. Estos efectos pueden ser modelados mediante una resistencia en serie, R_S , y una resistencia *shunt* o de deriva en paralelo, R_{sh} . Los efectos de ambas resistencias están representados en la [Figura 2.4](#).

Por un lado, la resistencia en serie se debe principalmente a la resistencia en las zonas neutras de la unión p-n y en conexiones entre el cuerpo de la fotocélula y los contactos metálicos [8, secc. 4.3]. El efecto de esta resistencia es especialmente notable en la región de circuito abierto, y puede observarse en la curva I-V como un “redondeo” de la misma, esto es, una curvatura menos pronunciada; produciendo que el punto de potencia máxima esté más alejado del punto (v_{oc}, i_{sc}) [9], lo cual reduce el factor de llenado y, por tanto, la potencia máxima. Típicamente, una célula no muy degradada presentará una $R_S = 0,5 \sim 1,3 \Omega$ [8, secc. 4.3].

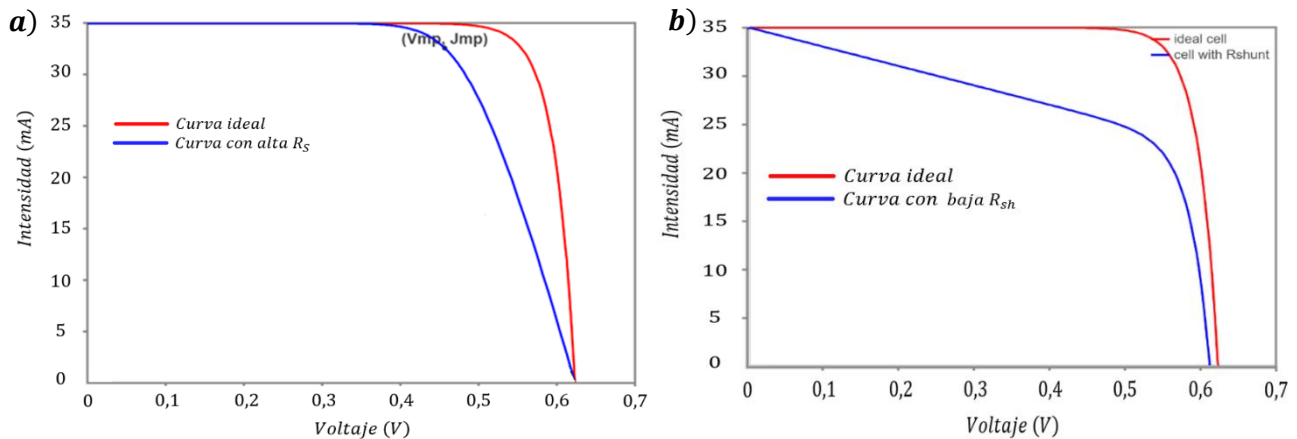


Figura 2.4: Curvas I-V ideales (**rojas**) comparadas con (a) las curvas con alta R_S (2Ω , **azul**); y (b) con baja R_{sh} (50Ω , **azul**) [8, secc. 4.3].

Por otro lado, la corriente *shunt* es aquella que, por determinados defectos de fabricación o conexión de la célula, consigue evitar la unión p-n y no produce energía, sino que se disipa como calor [11]; por ello, interesa que esta resistencia shunt sea lo más alta posible, para que no circule corriente por ella y por lo tanto no se disipe la energía generada. El efecto de esta resistencia en la curva I-V es también un “redondeo” de la misma, pero es más notable en la región de cortocircuito en lugar de la de circuito abierto. Típicamente, una célula no muy degradada presentará una R_{sh} suficientemente alta como para considerarla infinita [11].

2. FUNCIONAMIENTO DE UNA FOTOCÉLULA

Estos efectos resistivos pueden modelarse según el siguiente circuito equivalente:

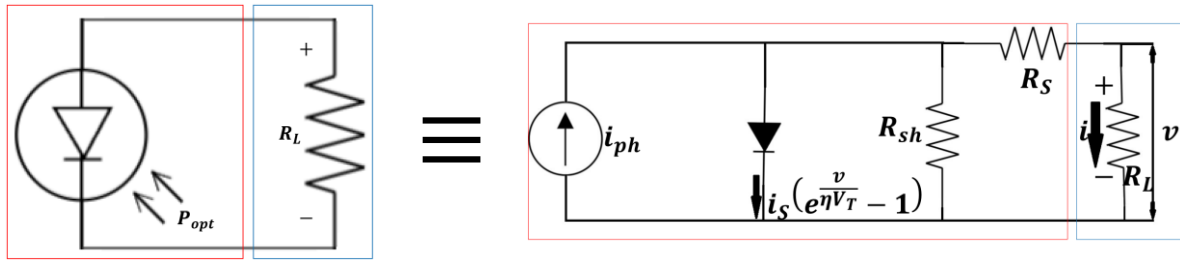


Figura 2.5: Circuito equivalente de una fotocélula. Nótese que se representa el sentido real de la corriente.

Respecto a las ecuaciones, los efectos resistivos pueden considerarse añadiendo ciertos términos en la [Ec.5](#) [12]:

$$i = i_{ph} - i_s \left(e^{\frac{v+iR_S}{\eta V_T}} - 1 \right) - \frac{v + iR_S}{R_{sh}}. \quad (10)$$

Pasemos ahora de la curva I-V de una fotocélula a la de un módulo entero.

Para denotar que ahora estamos hablando de módulos, marcaremos las corrientes, los voltajes y las potencias con letras mayúsculas. Un módulo solar fotovoltaico es un conjunto de N_c fotocélulas conectadas en serie, de forma que la corriente que las recorre es la misma, mientras que el voltaje se reparte entre todas ellas. Por tanto, la curva I-V será [11; 13; 14]:

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+IR_S}{N_c \eta V_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_{sh}}, \quad (11)$$

donde $i \mapsto I$, ya que se mantiene la corriente; $v + iR_S \mapsto (V + IR_S)/N_c$, ya que se divide el voltaje; y $R_{sh} \mapsto R_{sh}/N_c$, ya que $R_{total}^{paralelo} = 1/\sum(1/R_i)$.

2.4. Importancia de las condiciones de medida y justificación de este trabajo

La curva I-V es muy importante en el diagnóstico de posibles defectos en el módulo. Por ejemplo, nos permite comprobar visualmente de forma rápida si las resistencias en serie o *shunt* son excesivamente alta o baja, respectivamente (ver [Figura 2.4](#)). Además, nos permite obtener la potencia máxima a la que puede trabajar el módulo, lo cual a su vez nos sirve para medir su posible degradación, comparando este valor con el valor nominal ofrecido por el fabricante.

Sin embargo, como hemos mencionado, **los parámetros de la curva I-V dependen de las condiciones externas de la medida, esto es, de la irradiancia G incidente sobre el módulo y de la temperatura T del mismo.** Cualitativamente, tenemos que I_{SC} aumenta muy ligeramente con T (debido a que la energía del *gap* del semiconductor disminuye con T , lo cual reduce el denominador de I_{ph} ([Ec.2](#)) y por tanto aumenta I_{SC} ([Ec.7](#)) [7; 8, secc. 4.4]), y

2. FUNCIONAMIENTO DE UNA FOTOCÉLULA

aumenta de forma importante con G (Ec.2 y Ec.7). Por otro lado, V_{OC} disminuye con la temperatura (Ec.8) y se ve muy poco afectado por la irradiancia. La dependencia de V_{OC} con G es logarítmica (Ec.8), pero en el rango de irradiancias en el que vamos a trabajar ($900 \sim 1200 \text{ W/m}^2$) la irradiancia apenas producirá variaciones de un par de décimas de voltio [14; 15].

En la Figura 2.6 puede observarse como el papel de la irradiancia es modificar la intensidad y muy ligeramente el voltaje; mientras que el papel de la temperatura es modificar el voltaje sin prácticamente cambiar la intensidad, como se muestra en la Figura 2.7.

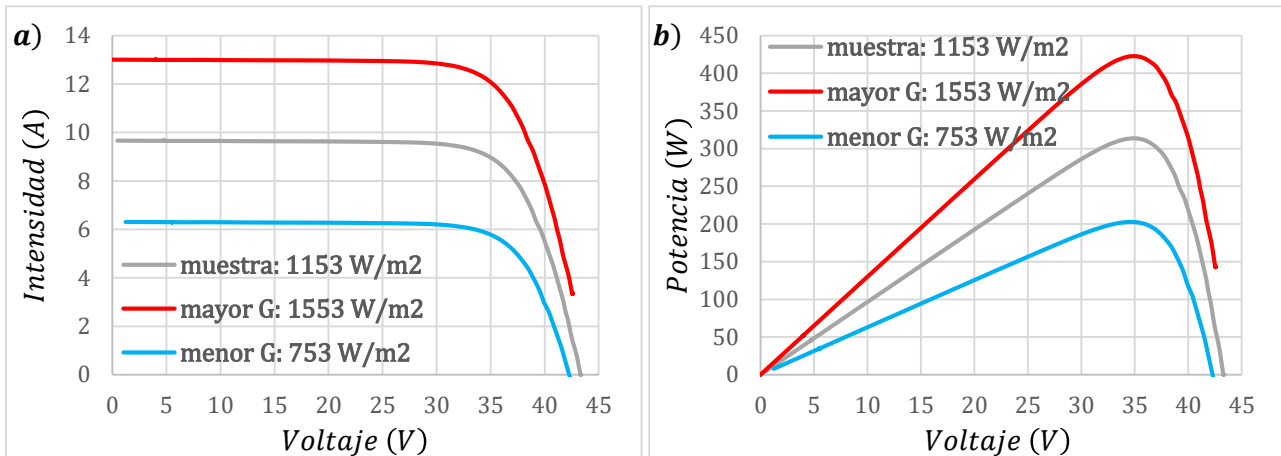


Figura 2.6: Curvas I-V (a) y P-V (b) de muestra a 1153 W/m^2 y $36 \text{ }^\circ\text{C}$ (gris), y sus traslaciones a 1553 W/m^2 (roja) y a 753 W/m^2 (azul), manteniendo la temperatura constante.

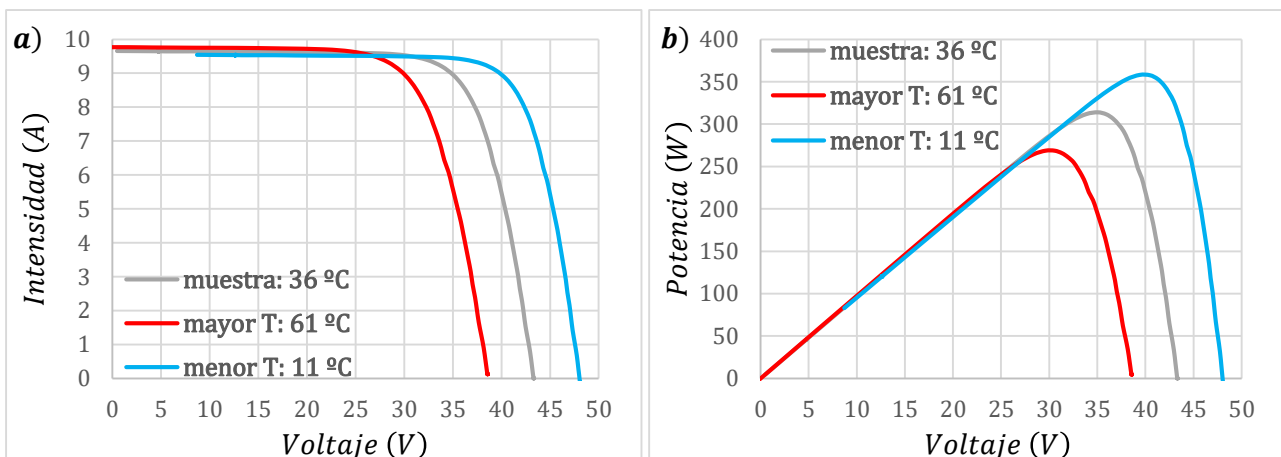


Figura 2.7: Curvas I-V (a) y P-V (b) de muestra a 1153 W/m^2 y $36 \text{ }^\circ\text{C}$ (gris), y sus traslaciones a $61 \text{ }^\circ\text{C}$ (roja) y a $11 \text{ }^\circ\text{C}$ (azul), manteniendo la irradiancia constante.

Respecto a las resistencias, R_{sh} disminuye con la temperatura [16; 17] y con la irradiancia [14], aunque se mantiene en valores suficientemente altos; mientras que R_s es constante con la irradiancia [14] y aumenta muy ligeramente con la temperatura [17]. Dado que en este trabajo emplearemos R_s como parámetro para las traslaciones, debido a su dependencia con los cambios en la irradiancia y la temperatura, tomaremos la resistencia de cada curva en lugar de considerarla constante.

2. FUNCIONAMIENTO DE UNA FOTOCÉLULA

En cuanto al factor de idealidad, en el rango de temperaturas en el que trabajaremos (de 25 a 75 °C) disminuye ligeramente con la temperatura [18], mientras que aumenta más significativamente con la irradiancia [14].

Debido a todos estos factores, tal y como podemos ver en las Figuras 2.6 y 2.7, por lo general la potencia máxima disminuye con la temperatura [19; 20], mientras que aumenta significativamente con la irradiancia [20]. Por esto, si queremos comparar distintas curvas I-V, es necesario o bien medirlas en las mismas condiciones, o bien trasladar dichas curvas a unas condiciones dadas. Generalmente, los fabricantes dan los valores nominales del módulo en unas condiciones denominadas **condiciones de test estándar, STC: $G = 1000 \text{ W/m}^2$ y $T = 25 \text{ °C}$** [1].

3. PROCEDIMIENTO PARA LA TRASLACIÓN DE CURVAS I-V

3. PROCEDIMIENTOS PARA LA TRASLACIÓN DE CURVAS I-V

A la hora tanto de medir curvas I-V como de trasladarlas a otras condiciones, existe una norma internacional, la norma IEC 60891:2021, de la *International Electrotechnical Commission* [2], que nos ofrece cuatro procedimientos para la traslación de curvas I-V distintos entre los que elegir, cada uno con sus ventajas y desventajas y con una serie de parámetros a determinar.

Primero, veamos la definición de coeficiente de temperatura: los coeficientes de temperatura absoluto C y relativo C_{rel} de una magnitud f se definen como [21]:

$$\frac{df}{dT} = C \text{ y } \left. \frac{1}{f} \frac{df}{dT} \right|_{T_0} = C_{rel}. \quad (12)$$

Podemos fijar una determinada temperatura T_0 (por ejemplo, $T_0 = 25 \text{ °C}$) para integrar la segunda expresión de la [Ec.12](#) entre T_0 y T para obtener:

$$f(T) = f(T_0)e^{C_{rel}(T-T_0)} \Rightarrow \frac{\ln(f(T_0))}{\ln(f(T))} = C_{rel}(T_0 - T), \quad (13)$$

lo cual nos permite, mediante un ajuste lineal, medir el valor de C_{rel} .

Para trasladar las curvas de las condiciones (G_1, T_1) a (G_2, T_2) , todos los procedimientos de la norma se basan en considerar que cada punto de la curva I-V será trasladado a $(I_2 = I_1 + \Delta I, V_2 = V_1 + \Delta V)$, siendo (I_1, V_1) los puntos de la curva original. Además, es común entre los distintos métodos el uso de los siguientes coeficientes de temperatura:

$$\frac{dI_{SC}}{dT} = \alpha \text{ y } \frac{dV_{OC}}{dT} = \beta. \quad (14)$$

Considerando lineales las dependencias de I_{SC} y V_{OC} con T en el rango en el que vamos a estudiarlas, esto es, $df/dT = cte.$; podemos combinar las expresiones de la [Ec.12](#) [13; 21]:

$$C_{rel} = \left. \frac{1}{f} \frac{df}{dT} \right|_{T_0} = \left. \frac{1}{f} \right|_{T_0} \frac{df}{dT} = \frac{C}{f(T_0)}; \quad (15)$$

de forma que podemos medir los coeficientes α y β mediante regresiones lineales de los valores de I_{SC} y V_{OC} a distintas temperaturas según la [Ec.13](#).

3.1. Procedimientos de traslación según la norma IEC 60891:2021

3.1.1. Primer Procedimiento

En el Primer Procedimiento de traslación se sugieren las siguientes ecuaciones [2]:

3. PROCEDIMIENTOS PARA LA TRASLACIÓN DE CURVAS I-V

$$\begin{cases} I_2 = I_1 + I_{SC,1} \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha(T_2 - T_1), & (16a) \\ V_2 = V_1 - R_S(I_2 - I_1) - \kappa I_2(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1), & (16b) \end{cases}$$

donde

- $(G_2/G_1) - 1 = \Delta G/G_1$, que multiplicado por $I_{SC,1}$ da la variación de la corriente con la irradiancia, ya que $I \propto I_{ph} \propto G$;
- $\alpha(T_2 - T_1) = \frac{dI_{SC}}{dT}(T_2 - T_1)$ da la variación de la corriente con la temperatura;
- R_S es la resistencia en serie del diodo, y $R_S(I_2 - I_1)$ da la variación del voltaje debida a la variación de la corriente. Existen distintos métodos para medir R_S [10; 22];
- κ es el factor de corrección de la curva y da cuenta de la variación de R_S con T . La norma nos sugiere que su valor sea obtenido probando distintos posibles valores hasta encontrar el que mejor ajuste las curvas [2]; y
- $\beta(T_2 - T_1) = \frac{dV_{OC}}{dT}(T_2 - T_1)$ da la variación del voltaje con la temperatura.

Por lo tanto, este procedimiento requiere conocer α , β , R_S (los cuales se pueden medir) y κ (el cual es complejo de determinar).

3.1.2. Segundo Procedimiento

En el Segundo Procedimiento de traslación se sugieren las siguientes ecuaciones, las cuales son semi-empíricas y están basadas en el modelo del diodo único simplificado (Ec.5) [2]:

$$\begin{cases} I_2 = I_1 \frac{G_2(1 + \alpha_{rel}(T_2 - 25))}{G_1(1 + \alpha_{rel}(T_1 - 25))}, & (17a) \\ V_2 = V_1 - R_{S,1}(I_2 - I_1) - \kappa I_2(T_2 - T_1) + \\ + V_{OC}^{STC} \left\{ \beta_{rel}[f(G_2)(T_2 - 25) - f(G_1)(T_1 - 25)] + \frac{1}{f(G_2)} - \frac{1}{f(G_1)} \right\}, & (17b) \end{cases}$$

donde

- las dependencias de la corriente y el voltaje incluyen los mismos parámetros que el procedimiento anterior, pero de forma mucho más detallada; y
- $f(G) = B_2 \left[\ln \left(\frac{1000}{G} \right) \right]^2 + B_1 \ln \left(\frac{1000}{G} \right) + 1$ es un factor cuadrático dependiente de la irradiancia, que da cuenta del factor de idealidad del diodo, con B_1 y B_2 sus factores de corrección [2], que deben de ser determinados en un laboratorio con condiciones bien controladas.

3.1.3. Tercer Procedimiento

El Tercer Procedimiento sugerido se basa en la interpolación lineal entre dos curvas I-V en distintas condiciones para obtener una tercera en unas condiciones intermedias, y tiene las siguientes ecuaciones [2]:

3. PROCEDIMIENTOS PARA LA TRASLACIÓN DE CURVAS I-V

$$\begin{cases} I_3 = I_1 + a(I_2 - I_1), \\ V_3 = V_1 + a(V_2 - V_1), \end{cases} \quad (18a)$$

con (I_1, V_1) y (I_2, V_2) tales que $I_2 - I_1 = I_{SC,2} - I_{SC,1}$, y siendo a una constante que liga G_3 con T_3 :

$$\begin{cases} G_3 = G_1 + a(G_2 - G_1), \\ T_3 = T_1 + a(T_2 - T_1). \end{cases} \quad (18b)$$

Debido a la [Ec.18b](#), que liga la irradiancia objetivo con la temperatura objetivo, este procedimiento no nos permite corregir una única curva I-V a las condiciones que deseamos, sino que, por cada pareja de curvas I-V medidas, nos permite obtener la curva o bien en la temperatura T_3 que deseemos (quedando determinada una irradiancia G_3), o bien en la irradiancia G_3 que deseemos (quedando determinada la temperatura T_3) [\[2\]](#).

3.1.4. Cuarto Procedimiento

En el Cuarto Procedimiento de traslación, desarrollado por Y. Hishikawa et al. en 2019 [\[2; 13; 22\]](#), se sugieren las siguientes ecuaciones:

$$\begin{cases} I'_1 = I_1 + I_{SC,1} \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right), \\ V'_1 = V_1 - R_S(I'_1 - I_1), \end{cases} \quad (19a)$$

$$\quad (19b)$$

donde (I'_1, V'_1) son un paso intermedio en el que solo se han considerado las variaciones de V_1 e I_1 debidas al efecto de la irradiancia. Si $I'_{SC,1}$ es la traslación en irradiancia de $I_{SC,1}$, se considera que el efecto de la temperatura es el siguiente:

$$\begin{cases} I_2 = I'_1 + \alpha_{rel} \cdot I'_{SC,1}(T_2 - T_1), \\ V_2 = V'_1 + \frac{(T_2 - T_1)}{T_1} \left(V'_1 - \frac{N_c \eta E_g}{q} \right), \end{cases} \quad (20a)$$

$$\quad (20b)$$

donde $\eta E_g/q$ es una constante dependiente del dispositivo, con E_g la energía del *gap* del semiconductor (por ejemplo, en nuestro caso tenemos que, para el silicio, $E_g = 1,12 \text{ eV}$ [\[6, secc. 1.4.3\]](#)). Generalmente, unos valores de $\eta \approx 1,1$ y $\eta E_g/q \approx 1,232 \text{ V}$ son aceptados para dispositivos de silicio [\[13\]](#).

3.2. Elección del procedimiento más adecuado y justificación

El primer método que descartamos fue el Tercer Procedimiento, ya que para obtener una curva I-V eligiendo a la vez la irradiancia y la temperatura es necesario tomar un mínimo de cuatro curvas, las cuales preferiblemente deben de cubrir un rango de irradiancia y

3. PROCEDIMIENTOS PARA LA TRASLACIÓN DE CURVAS I-V

temperaturas tales que incluyan la G y T elegidas [2], lo cual no es siempre posible de obtener en un entorno no controlado, como puede ser una planta fotovoltaica en el exterior. Además, este procedimiento no nos permite obtener más parámetros del módulo. Por tanto, hemos decidido descartar este procedimiento, ya que requiere múltiples curvas y ni siquiera da una caracterización completa del módulo.

Respecto al Primer Procedimiento, si no queremos emplear los valores nominales de α y β dados por el fabricante, tendremos que determinarlos experimentalmente. Si bien este fue el primer procedimiento con el que intentamos trabajar, no es viable determinar α fuera del laboratorio, como veremos en el [apartado 4.3](#). Además, tendremos que medir R_S y determinar κ posteriormente a las medidas. Por estas razones, decidimos descartar este Primer Procedimiento.

En cuanto al Segundo Procedimiento, al igual que el Primero, este procedimiento requiere la determinación empírica de α , β y R_S , o bien aceptar los valores nominales dados por el fabricante; además de la determinación numérica posterior de κ , B_1 y B_2 . Por los mismos motivos que el Primer Procedimiento, y debido también a la excesiva complejidad de sus ecuaciones, este Segundo Procedimiento también queda descartado para su aplicación en el exterior.

Finalmente, **nos queda el Cuarto Procedimiento**. La diferencia de este con los mencionados anteriormente es que, si bien este también requiere medir α (o aceptar el valor nominal dado por el fabricante), el resto de parámetros (η y R_S) pueden determinarse empíricamente, al contrario que aquellos coeficientes que requieren un estudio posterior a las medidas. Por este motivo, hemos elegido este Cuarto Procedimiento para el estudio de su efectividad para trasladar curvas I-V medidas en el exterior.

En un estudio reciente, se analizó el error cometido en la traslación de curvas I-V usando los Procedimientos Primero, Segundo y Cuarto que acabamos de presentar [3]. En la [Figura 3.1](#), se muestra la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de la traslación de curvas, simuladas en el rango de irradiancias y temperaturas dado por los ejes, a condiciones STC por el Cuarto Procedimiento. Esta RMSE es una medida de la desviación entre los valores de la corriente obtenidos por traslación respecto de los obtenidos por simulación a STC; esto es, la escala de color nos muestra el error en I que comete la traslación. Si bien podemos observar que el Cuarto Procedimiento ofrece una menor precisión, como se ve en la [Figura 3.1](#) este error es bastante pequeño en la región de $G \in (900, 1200) \text{ W/m}^2$ y $T \in (20, 50) \text{ }^\circ\text{C}$, por lo que cuando vayamos a medir en el exterior debemos asegurarnos de estar en estos rangos de temperatura e irradiancia.

En este mismo estudio [3], se midieron también los errores relativos de $P_{m\acute{a}x}$, FF , V_{OC} , e I_{SC} cometidos al trasladar las curvas I-V según el Procedimiento Cuatro, respecto a los valores de estos parámetros en las curvas de referencia simuladas. Los resultados se muestran en la [Figura 3.2](#) en función de la irradiancia. Observamos que el error en el valor de la $P_{m\acute{a}x}$ obtenida por este procedimiento al trasladar las curvas I-V simuladas es de en torno al 1 % en el rango de irradiancia que podemos esperar en el exterior, esto es, $G > 800 \text{ W/m}^2$ [3].

Consideramos que, dado que no vamos a poder minimizar demasiado el error al no tener unas condiciones de medida controladas en el exterior, podemos aceptar este error ligeramente mayor con respecto a otros procedimientos, siempre que lo cuantifiquemos.

3. PROCEDIMIENTOS PARA LA TRASLACIÓN DE CURVAS I-V

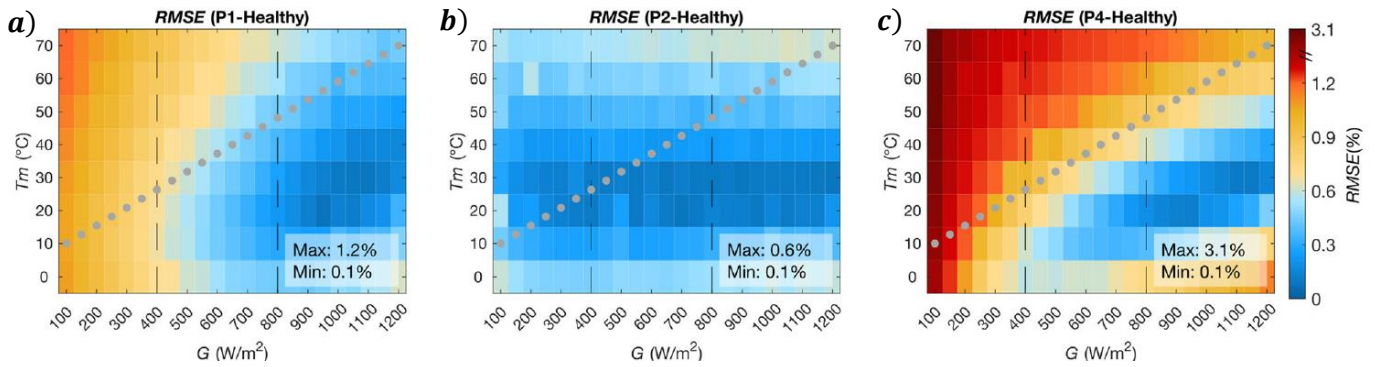


Figura 3.1: Raíz del error cuadrático medio (RMSE, Root Mean Square Error) en la intensidad cometida por los Procedimientos Primero (a), Segundo (b) y Cuarto (c) [3].

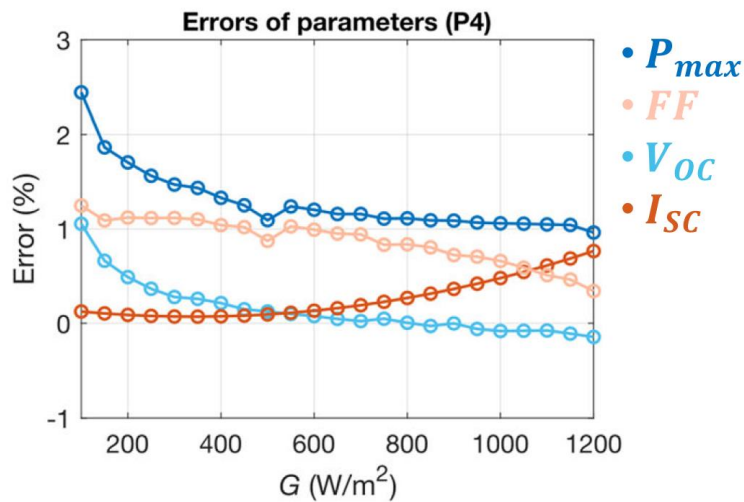


Figura 3.2: Error relativo de los valores de ciertos parámetros al trasladar las curvas I-V por el Cuarto Procedimiento [3].

Cabe mencionar que el Cuarto Procedimiento en concreto actúa mucho peor que los otros en condiciones de sombra parcial sobre el módulo y/o cuando está activado un diodo de *bypass* [3]. Sin embargo, estos fallos son fácilmente detectables mediante un estudio previo de la placa que incluya una revisión visual y otras técnicas de inspección del módulo, como una termografía infrarroja o una electroluminiscencia.

Otro punto a mencionar es que el Cuarto Procedimiento es mucho más robusto que los otros dos frente a degradación de la resistencia en serie [3]. Esto es debido a que la resistencia en serie es tomada como un valor constante en los Primer y Segundo Procedimientos, mientras que es calculada independientemente para cada curva I-V en el Cuarto Procedimiento, como veremos en el apartado 4.2. Respecto a la degradación de la resistencia *shunt*, el Segundo Procedimiento es bastante peor en condiciones de baja irradiancia [3], ya que los Procedimientos Primero y Cuarto tienen en cuenta la irradiancia a través de I_{SC} . Estos dos problemas son mucho más difíciles de detectar mediante una inspección previa y forman parte de la degradación propia del módulo, que es lo que queremos estudiar en este trabajo.

Por las razones anteriormente mencionadas, resumidas en la Tabla 3.1, hemos considerado que el Cuarto Procedimiento de la norma IEC 60891:2021 es el más apropiado para el estudio en el exterior de la degradación de módulos fotovoltaicos.

3. PROCEDIMIENTOS PARA LA TRASLACIÓN DE CURVAS I-V

Tabla 3.1: Ventajas y desventajas de emplear el Cuarto Procedimiento en lugar del Primer o Segundo Procedimientos de la norma IEC 60891:2021.

Ventajas	Desventajas
No requiere la determinación de coeficientes posterior a las medidas	Mayor error
Todos los coeficientes necesarios podrían ser medidos	
Ecuaciones sencillas	Menor robustez frente a las condiciones de medida
Bajo error en las condiciones de trabajo en el exterior	
Robustez frente a degradación de las resistencias del módulo	
Requiere la determinación de menos parámetros	

3.3. Desarrollo teórico del Cuarto Procedimiento

Como se explica en la publicación original [22], partimos de la ecuación del módulo fotovoltaico según el modelo de diodo único (Ec.11). Si R_{sh} es suficientemente alta (esto es, la conducción *shunt* es suficientemente baja), podemos desprestigiar su efecto. Además, si tenemos más de $\sim 0,2 V$ por célula, para $T \in (25, 75) ^\circ C$, el término exponencial será mucho mayor que la unidad, a diferencia de a temperaturas mayores. Por último, consideremos la Ec.7 donde $I_{ph} \gg I_s$. Por tanto, la Ec.11 se transforma en:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } R_{sh} \gg V + R_S I \\ \text{si } T \in (25, 75) ^\circ C \rightarrow \exp \left[\frac{q(V + R_S I)}{N_c \eta k T} \right] \gg 1 \\ \text{si } I_{ph} \gg I_s \rightarrow I_{SC} \approx I_{ph} \end{array} \right\} \Rightarrow I \approx I_{SC} - I_s \exp \left[\frac{q(V + R_S I)}{N_c \eta k T} \right]. \quad (21)$$

En el artículo original donde se publicó este procedimiento [22] se muestran las ecuaciones inicial (Ec.21) y final (Ec.19 y Ec.20), omitiéndose la mayoría del desarrollo. Para poder entender de dónde vienen estas ecuaciones y qué consideraciones estamos haciendo, en este trabajo vamos a detallar todo el procedimiento. Empecemos por la Ec.21 y reordenémosla:

$$\begin{aligned} I &= I_{SC} - I_s \exp \left[\frac{q(V + R_S I)}{N_c \eta k T} \right], \\ \exp \left[\frac{q(V + R_S I)}{N_c \eta k T} \right] &= \frac{I_{SC} - I}{I_s}, \\ V + R_S I &= \frac{N_c \eta k T}{q} \ln \left(\frac{I_{SC} - I}{I_s} \right), \\ V &= \frac{N_c \eta k T}{q} \ln \left(\frac{I_{SC} - I}{I_s} \right) - R_S I. \end{aligned} \quad (22)$$

3. PROCEDIMIENTOS PARA LA TRASLACIÓN DE CURVAS I-V

Esta [Ec.22](#) solo es válida para puntos cercanos al voltaje de circuito abierto, ya que recordemos que hemos supuesto despreciable el efecto de R_{sh} y voltaje suficientemente alto. Entonces, si tomamos dos puntos cualesquiera de la región de circuito abierto de la curva I-V, (V_a, I_a) y (V_b, I_b) , estos deben cumplir la [Ec.22](#), por lo que si los restamos tendremos que

$$\begin{aligned}
 V_a - V_b &= \left[\frac{N_c \eta k T}{q} \ln \left(\frac{I_{SC} - I_a}{I_S} \right) - R_S I_a \right] - \left[\frac{N_c \eta k T}{q} \ln \left(\frac{I_{SC} - I_b}{I_S} \right) - R_S I_b \right], \\
 V_a - V_b &= \frac{N_c \eta k T}{q} \left[\ln \left(\frac{I_{SC} - I_a}{I_S} \right) - \ln \left(\frac{I_{SC} - I_b}{I_S} \right) \right] - R_S (I_a - I_b), \\
 \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} &= \frac{N_c \eta k T}{q (I_a - I_b)} \ln \left(\frac{(I_{SC} - I_a)/I_S}{(I_{SC} - I_b)/I_S} \right) - R_S, \\
 -\frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} &= -\frac{N_c \eta k T}{q (I_a - I_b)} \ln \left(\frac{I_{SC} - I_a}{I_{SC} - I_b} \right) + R_S, \\
 -\frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} &= -\frac{N_c \eta k T}{q} \frac{\ln(I_{SC} - I_a) - \ln(I_{SC} - I_b)}{I_a - I_b} + R_S \rightarrow Y = \frac{N_c \eta k T}{q} X + R_S. \quad (23)
 \end{aligned}$$

Por tanto, **podemos usar los distintos puntos de la curva I-V para ajustarlos a una recta de pendiente $N_c \eta k T / q$ y ordenada R_S .**

Una vez obtenida una forma de medir R_S y $N_c \eta k T / q$ (de donde podemos despejar η), volvamos ahora a la ecuación del diodo simple sin efectos resistivos ([Ec.5](#)). Consideremos de nuevo que, para voltajes suficientemente altos y $T \in (25, 75)^\circ\text{C}$, el término exponencial será mucho mayor que la unidad. Tomemos también la expresión explícita de $I_S = A \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$, donde A es un factor del diodo dependiente de la temperatura y E_g es la energía del *gap* del semiconductor [[5](#), secc. 2.3]. Entonces, la [Ec.5](#) se escribe como:

$$\begin{aligned}
 I &\approx I_{ph} - A \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{N_c \eta k T}\right), \\
 I &\approx I_{ph} - A \exp\left(\frac{qV}{N_c \eta k T} - \frac{E_g}{kT}\right), \\
 I &\approx I_{ph} - A \exp\left[\frac{q}{N_c \eta k T} \left(V - \frac{N_c \eta E_g}{q}\right)\right]. \quad (24)
 \end{aligned}$$

Derivemos ahora la [Ec.24](#) con respecto a T . Tenemos que tanto I como I_{ph} son prácticamente constantes con respecto a T , y consideramos que las variaciones de A y E_g con la temperatura son despreciables a raíz de los resultados obtenidos en estudios que sí han considerado la dependencia con la temperatura de todos los términos [[7](#); [13](#); [23](#)]. Entonces, tenemos que:

3. PROCEDIMIENTOS PARA LA TRASLACIÓN DE CURVAS I-V

$$\begin{aligned}
\frac{dI}{dT} &= \frac{\partial I_{ph}}{\partial T} - \left\{ \frac{\partial A}{\partial T} \exp \left[\frac{q}{N_c \eta k T} \left(V - \frac{N_c \eta E_g}{q} \right) \right] + A \frac{\partial}{\partial T} \left(\exp \left[\frac{q}{N_c \eta k T} \left(V - \frac{N_c \eta E_g}{q} \right) \right] \right) \right\} \approx 0, \\
\frac{\partial I_{ph}}{\partial T} &\approx 0 \text{ y } \frac{\partial A}{\partial T} \approx 0 \implies \frac{\partial}{\partial T} \left(\exp \left[\frac{q}{N_c \eta k T} \left(V - \frac{N_c \eta E_g}{q} \right) \right] \right) = 0, \\
\frac{\partial E_g}{\partial T} &\approx 0 \implies \exp \left[\frac{q}{N_c \eta k T} \left(V - \frac{N_c \eta E_g}{q} \right) \right] \left[\frac{-q}{N_c \eta k T^2} \left(V - \frac{N_c \eta E_g}{q} \right) + \frac{q}{N_c \eta k T} \frac{\partial V}{\partial T} \right] = 0, \\
\exp \left[\frac{q}{N_c \eta k T} \left(V - \frac{N_c \eta E_g}{q} \right) \right] \frac{q}{N_c \eta k T} \left[\frac{\partial V}{\partial T} - \frac{1}{T} \left(V - \frac{N_c \eta E_g}{q} \right) \right] &= 0, \\
\exp \left[\frac{q}{N_c \eta k T} \left(V - \frac{N_c \eta E_g}{q} \right) \right] \frac{q}{N_c \eta k T} > 0 \forall T &\implies \frac{\partial V}{\partial T} = \frac{1}{T} \left(V - \frac{N_c \eta E_g}{q} \right). \quad (25)
\end{aligned}$$

Acabamos de obtener una expresión para la variación del voltaje con la temperatura. Consideremos ahora una curva I-V tomadas dos veces a la misma irradiancia pero a distinta temperatura. Por la [Ec.16a](#), el cambio en la corriente será igual para todos los puntos:

$$I_2 = I_1 + \alpha(T_2 - T_1); \quad (26)$$

por lo que todos los puntos de la curva I-V, al variar la temperatura sin variar la irradiancia, se desplazarán una misma cantidad. En concreto, podemos tomar las corrientes de cortocircuito como referencia, de forma que de la [Ec.26](#) tenemos que

$$I_{SC,2} = I_{SC,1} + \alpha(T_2 - T_1) \implies \alpha(T_2 - T_1) = I_{SC,2} - I_{SC,1}. \quad (27)$$

Por tanto, al variar la temperatura con irradiancia constante, un punto (V_1, I_1) se desplazará hasta $(V_2, I_2 = I_1 + (I_{SC,2} - I_{SC,1}))$. Entonces, tomemos dos curvas I-V a igual irradiancia pero distinta temperatura y definamos un nuevo coeficiente de temperatura para el voltaje, TC , tal que

$$TC \equiv \Delta V / \Delta T = (V_2 - V_1) / (T_2 - T_1), \quad (28)$$

donde 1 y 2 sean puntos en cada una de las curvas tales que cumplan que $I_2 - I_1 = I_{SC,2} - I_{SC,1}$ [\[13\]](#). La elección de estos puntos se muestra en la [Figura 3.3](#).

Haciendo ahora la aproximación $\Delta V / \Delta T \approx dV / dT$, podemos unir la [Ec.25](#) con la [Ec.28](#) para obtener [\[22\]](#)

$$TC = \frac{V_2 - V_1}{T_2 - T_1} \approx \frac{1}{T} \left(V - \frac{N_c \eta E_g}{q} \right). \quad (29)$$

3. PROCEDIMIENTOS PARA LA TRASLACIÓN DE CURVAS I-V

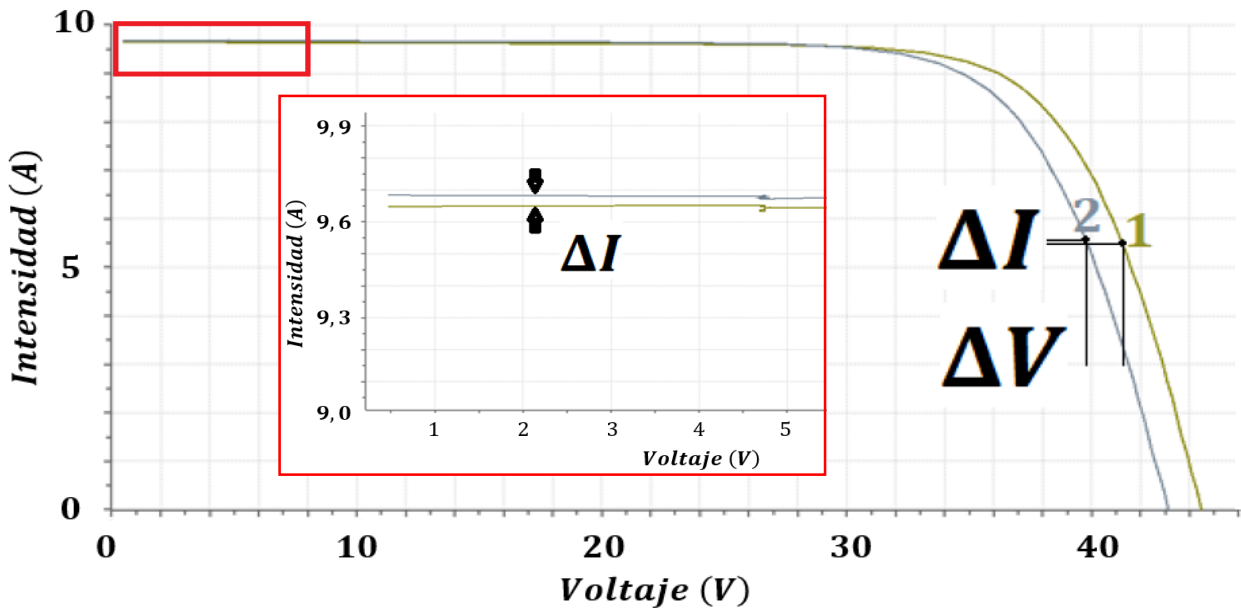


Figura 3.3: Dos curvas I-V tomadas a la misma irradiancia pero distinta temperatura que muestran los puntos 1 y 2 para la [Ec.28](#), y el detalle de la región de I_{sc} .

Para obtener las ecuaciones de traslación de la curva I-V, haremos la traslación en dos pasos. Primero, tomamos la [Ec.16](#) del Primer Procedimiento de la norma para realizar una traslación solo en G (esto es, manteniendo la misma temperatura):

$$\begin{cases} I'_1 = I_1 + I_{sc,1} \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right), & (30a) \\ V'_1 = V_1 - R_s (I'_1 - I_1). & (30b) \end{cases}$$

Ahora, realizaremos la traslación en T ; considerando que el único coeficiente de temperatura necesario para trasladar el voltaje es el que acabamos de obtener en la [Ec.29](#):

$$\begin{cases} I_2 = I'_1 + \alpha_{rel} \cdot I'_{sc,1} (T_2 - T_1), & (31a) \\ V_2 = V'_1 + (T_2 - T_1) \frac{1}{T_1} \left(V'_1 - \frac{N_c \eta E_g}{q} \right). & (31b) \end{cases}$$

Podemos observar que las [Ec.30](#) y [Ec.31](#) son las que habíamos presentado anteriormente como [Ec.19](#) y [Ec.20](#), respectivamente.

4. METODOLOGÍA

Revisemos las ecuaciones del Cuarto Procedimiento ([Ec.19](#) y [Ec.20](#)), que son las que vamos a usar para las traslaciones:

$$\begin{cases} I'_1 = I_1 + I_{SC,1} \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right), & (19a) \\ V'_1 = V_1 - R_S(I'_1 - I_1), & (19b) \end{cases}$$

y

$$\begin{cases} I_2 = I'_1 + \alpha_{rel} \cdot I'_{SC,1}(T_2 - T_1), & (20a) \\ V_2 = V'_1 + (T_2 - T_1) \frac{1}{T_1} \left(V'_1 - \frac{N_c \eta E_g}{q} \right). & (20b) \end{cases}$$

Vemos que tenemos tres parámetros a determinar: R_S , α_{rel} y η . N_c es el número de células del módulo, y para E_g tomaremos los valores de la literatura ($E_g = 1,12 \text{ eV}$ para el silicio [[6](#), secc. 1.4.3]).

4.1. Instrumentos, montaje y procedimiento experimental

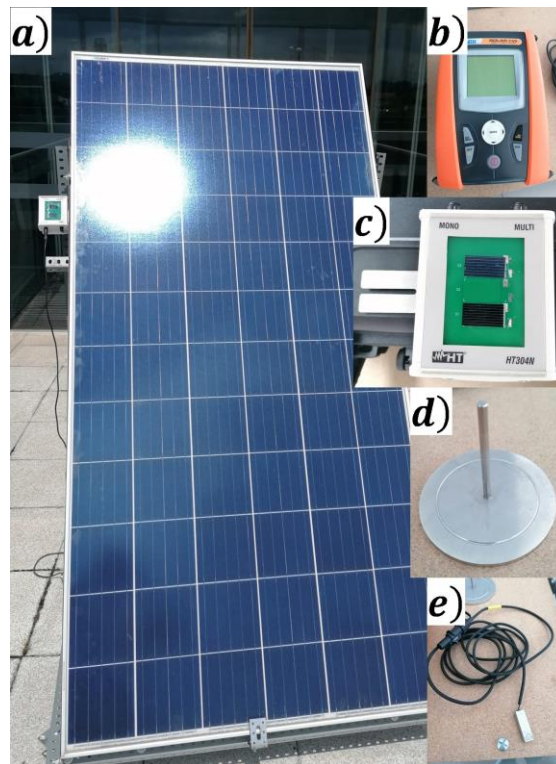
- **MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO:** es el módulo que queremos caracterizar. En nuestro caso, utilizaremos un módulo modelo ND-AR330H (silicio policristalino) de la marca Sharp [[24](#)] como el de la [Figura 4.1.a](#). Este módulo ha sido usado en la azotea del edificio LUCIA, en el Campus Miguel Delibes de la Universidad de Valladolid, por lo que es de esperar que haya una cierta degradación debido al uso y posibles daños meteorológicos. Antes de tomar este módulo para el desarrollo de este trabajo, hemos comprobado, mediante una electroluminiscencia, que no estuviese físicamente dañado ni tuviese ningún diodo de *bypass* activado;
- **TRAZADOR DE CURVAS I-V:** es el principal aparato de medida con el que trabajaremos. En nuestro caso, utilizaremos un trazador modelo SOLAR I-Ve de la marca HT [[25](#)] como el de la [Figura 4.1.b](#). Este trazador nos permite tomar curvas I-V de hasta 15 A y 1000 V , lo cual es más que suficiente para caracterizar incluso un *string* de módulos (esto es, varios módulos conectados en serie). Este modelo viene con una serie de accesorios, entre los cuales están los siguientes instrumentos que hemos utilizado:
- **MEDIDOR DE IRRADIANCIA:** es el dispositivo que nos permite saber a qué irradiancia estamos midiendo las curvas I-V. En nuestro caso, utilizaremos una fotocélula calibrada modelo HT304N de la marca HT [[26](#)] como el de la [Figura 4.1.c](#). Este dispositivo sigue los estándares marcados por IEC y nos permite medir la irradiancia en un rango de 50 a 1400 W/m^2 con una precisión de $\pm 3 \%$;
- **INCLINÓMETRO:** es el dispositivo que nos permite conocer, de manera aproximada, el ángulo con el que está incidiendo la radiación solar. En nuestro caso,

4. METODOLOGÍA

utilizaremos un inclinómetro modelo M304 de la marca HT como el de la [Figura 4.1.d](#). Este dispositivo nos permite saber que el ángulo de incidencia de la radiación no está excediendo los 45°; y

- **TERMÓMETRO:** es el dispositivo que nos permite conocer la temperatura. En nuestro caso, utilizaremos un termopar modelo PT300N de la marca HT [27] como el de la [Figura 4.1.e](#). Esta sonda nos permite medir temperaturas en un rango de -50 a 105 °C.

El montaje está detallado en la [Figura 4.2](#). Primero, colocaremos el módulo en un soporte móvil y limpiaremos su superficie para asegurarnos de que no haya polvo o similares. Después, realizaremos las conexiones pertinentes entre el módulo y el trazador (4.2.a). A continuación, fijaremos el termopar en el centro de la parte trasera del módulo mediante cinta adhesiva (4.2.b) y lo conectaremos al trazador. Finalmente, fijaremos el medidor de irradiancia al soporte móvil mediante un tornillo (4.2.c), asegurándonos de que quede paralelo a la superficie del módulo (4.2.d), y lo conectaremos al trazador, asegurándonos de usar, en nuestro caso, la conexión marcada como MULTI, ya que nuestro módulo es de silicio policristalino.



Figuras 4.1.a,b,c,d,e: Fotografías del módulo solar (a), del trazador I-V (b), del medidor de irradiancia (c), del inclinómetro (d), y del termopar (e).

Una vez finalizado el montaje, llevaremos el módulo al exterior, colocando el inclinómetro sobre la superficie del módulo para asegurarnos de que el ángulo de incidencia de la radiación no está excediendo los 45°.

A continuación, realizaremos un análisis previo del módulo solar: nos aseguraremos de que no haya ninguna sombra sobre el módulo ni ningún daño físico mediante una inspección visual y, mediante cámaras especializadas, tomaremos una termografía, electroluminiscencia o

4. METODOLOGÍA

fotoluminiscencia para descartar daños internos y la posible activación de algún diodo de *bypass*.

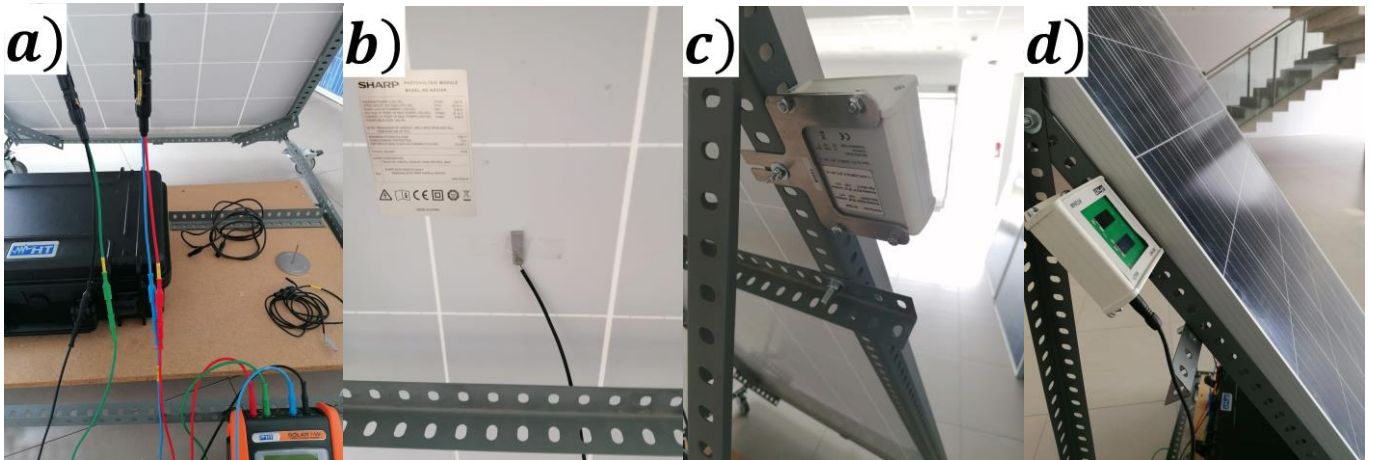


Figura 4.2.a,b,c,d: Fotografías del montaje experimental: conexiones (a), posición del termopar (b) y fijación del medidor de irradiancia (c) y (d).

Finalmente, antes de comenzar a tomar curvas I-V, es necesario asegurarnos de una serie de condiciones [2; 28]:

- La irradiancia debe superar el rango de interés (1000 W/m^2 en nuestro caso, ya que pretendemos trasladar las curvas a STC). Esto se logra en cualquier día soleado si el módulo está correctamente orientado, salvo quizás en invierno [3];
- La irradiancia debe fluctuar menos de un $\pm 2 \%$ del total. Esto es perfectamente viable si no hay excesiva nubosidad, ya que el trazador toma cada curva I-V en apenas unos segundos, lo cual es suficientemente rápido;
- La velocidad del viento debe ser inferior a 2 m/s . Si bien esta condición es fácil de cumplir en verano, es posible que no lo sea en otras estaciones de meteorología más inestable;
- La temperatura debe ser estable, variando menos de $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. De nuevo, el trazador toma las curvas I-V suficientemente rápido como para que se cumpla esta condición; incluso cuando el módulo aún no ha alcanzado una temperatura de equilibrio con el exterior; y
- La temperatura en todo el módulo debe ser homogénea. Para comprobar esto, tenemos dos opciones: o bien colocar más termómetros en distintos lugares del módulo, o bien comprobar que la variación es suficientemente pequeña mediante una termografía.

Es conveniente tomar más de una sola curva I-V, ya que es posible que la curva I-V no sea trazada correctamente. Si bien una fluctuación rápida en la temperatura no es algo que suela suceder debido a la lentitud de los procesos térmicos, cualquier cambio en la nubosidad o una posible sombra sí que puede producir cambios bruscos en la irradiancia durante la medida. También es posible que, eventualmente, el propio trazador falle. Por ambas razones, es necesario que inspeccionemos visualmente las curvas I-V para descartar aquellas que estén claramente defectuosas.

4. METODOLOGÍA

4.2. Medición en el exterior de los parámetros η y R_S

Lo primero que tenemos que hacer para obtener los parámetros de la traslación es obtener η y R_S . Para ello, como se ha mencionado en el apartado 3.3, tanto η como R_S pueden determinarse para cada curva I-V mediante la regresión lineal de la Ec.23. Entonces, simplemente necesitamos tomar la propia curva I-V que vayamos a trasladar una vez el módulo haya alcanzado unas condiciones de operación estables; esto es, cuando ni la irradiancia ni la temperatura varíen más de un $\pm 1\%$ ni $\pm 1^\circ\text{C}$, respectivamente [2; 28].

$$-\frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} = -\frac{N_c \eta k T}{q} \frac{\ln(I_{SC} - I_a) - \ln(I_{SC} - I_b)}{I_a - I_b} + R_S \rightarrow Y = \frac{N_c \eta k T}{q} X + R_S \quad (23)$$

La representación de la Ec.23 presenta bastante desviación cuando tomamos puntos A y B consecutivos, debido a que los valores de $V_a - V_b$ e $I_a - I_b$ son bastante pequeños y son comparables con las fluctuaciones de los puntos de la regresión [22]. Por tanto, como la Ec.23 es válida para toda la región de circuito abierto, podemos tomar los puntos A y B tales que $V_a - V_b$ e $I_a - I_b$ sean suficientemente grandes comparados con las fluctuaciones.

Sin embargo, tampoco podemos espaciar demasiado estos puntos, ya que recordemos de nuevo que la Ec.23 solo es válida en la región de circuito abierto. Hemos observado, cualitativamente, que el mejor ajuste posterior de las curvas trasladadas se logra si para esta regresión tomamos los puntos A y B tales que haya un incremento en la corriente de $|I_a - I_b| \approx 1\text{ A}$ y un incremento en el voltaje de $|V_a - V_b| \approx 2\text{ V}$, aproximadamente.

Para terminar de acotar la región de circuito abierto, el criterio que utilizamos en este trabajo es eliminar los puntos de menor voltaje, hasta alcanzar una $R^2 > 0,995$ en la regresión, pero manteniendo un mínimo de quince puntos. Si no fuese posible cumplir ambas condiciones para una determinada curva I-V, desecharemos esa curva.

La Figura 4.3 muestra este proceso de selección de puntos. En la 4.3.a, tenemos la regresión de la Ec.23 en el caso en que $V_a - V_b$ e $I_a - I_b$ son similares a las fluctuaciones de los puntos; mientras que en la 4.3.b hemos considerado los límites que hemos impuesto a $I_a - I_b$ y $V_a - V_b$ y hemos eliminado los puntos de mayor voltaje hasta obtener una correlación suficiente. Podemos observar que los puntos se asemejan mucho más a una recta. Para lograr la gráfica 4.3.b, hemos descartado los once puntos de menor voltaje, pero seguimos teniendo en cuenta otros veintisiete puntos.

Una vez hemos considerado qué puntos vamos a emplear, realizaremos una regresión lineal entre ambas magnitudes de la Ec.23, de forma que obtendremos una recta de pendiente $m = N_c \eta k T / q$ y ordenada en el origen R_S .

Finalmente, ya que hemos medido la temperatura a la que hemos trazado la curva, podemos tomar la pendiente m de la regresión lineal y despejar $\eta = m q / N_c k T$.

4. METODOLOGÍA

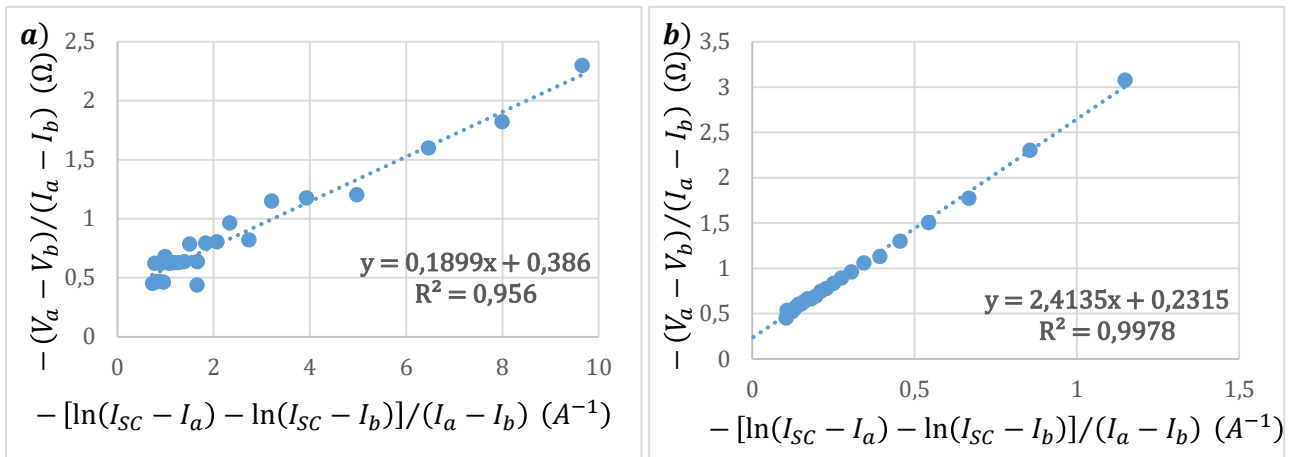


Figura 4.3: Ejemplo de medida de η y R_S con $V_a - V_b$ e $I_a - I_b$ similares a las fluctuaciones (a) y con $V_a - V_b$ e $I_a - I_b$ mayores que las fluctuaciones (b).

4.3. Medición en el exterior del parámetro α_{rel}

La medida del coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito, α , es el principal problema que hemos encontrado a la hora de obtener todos los parámetros de un módulo solar mediante medidas en el exterior. La dificultad de su medición radica en la fuerte dependencia lineal de I_{SC} con G (recordemos las [Ec.2](#) y [Ec.7](#)), la cual opaca cualquier dependencia con T . No hay una fórmula explícita para $\partial I_{SC}/\partial T$ [7], pero sus valores experimentales son muy inferiores a los obtenidos para $\partial I_{SC}/\partial G$ [7; 14].

Esto se debe a que, mientras que V_{OC} depende más fuertemente de la temperatura que de la irradiancia, en el caso de I_{SC} sucede al revés. La relación entre la corriente de cortocircuito y la irradiancia es lineal, y es tan importante que opaca cualquier efecto térmico. Este efecto sucede incluso cuando la irradiancia es prácticamente constante; **esto hace que la medición de α en el exterior no sea posible.**

La [Figura 4.4](#) muestra cómo, incluso bajo irradiancias prácticamente constantes (cuando $T < 40$ °C), la dependencia de I_{SC} con G es lineal y tan fuerte que evita que podamos observar ninguna tendencia de I_{SC} con T . La tanda de medidas mostrada es una de las que tiene una G más constante de entre todas las que hemos tomado (solo tenemos un rango de ± 40 W/m^2). Incluso quitando los puntos a alta temperatura, en los cuales se desvía más la irradiancia (mostrados en **naranja**), se sigue observando el efecto mencionado: I_{SC} sigue siendo lineal con G , y G es independiente de T , haciendo que I_{SC} también lo sea.

Debido a estas observaciones, en este trabajo hemos tomado el valor nominal del α_{rel} del módulo en lugar de medirlo, aunque esto introduzca un error en la traslación, ya que el α_{rel} real posiblemente haya variado debido a la degradación. Sin embargo, por completitud, a continuación vamos explicar el enfoque que hemos probado en este estudio para tratar de obtener una medida de α_{rel} , y los resultados obtenidos bajo distintas condiciones ambientales de irradiancia.

4. METODOLOGÍA

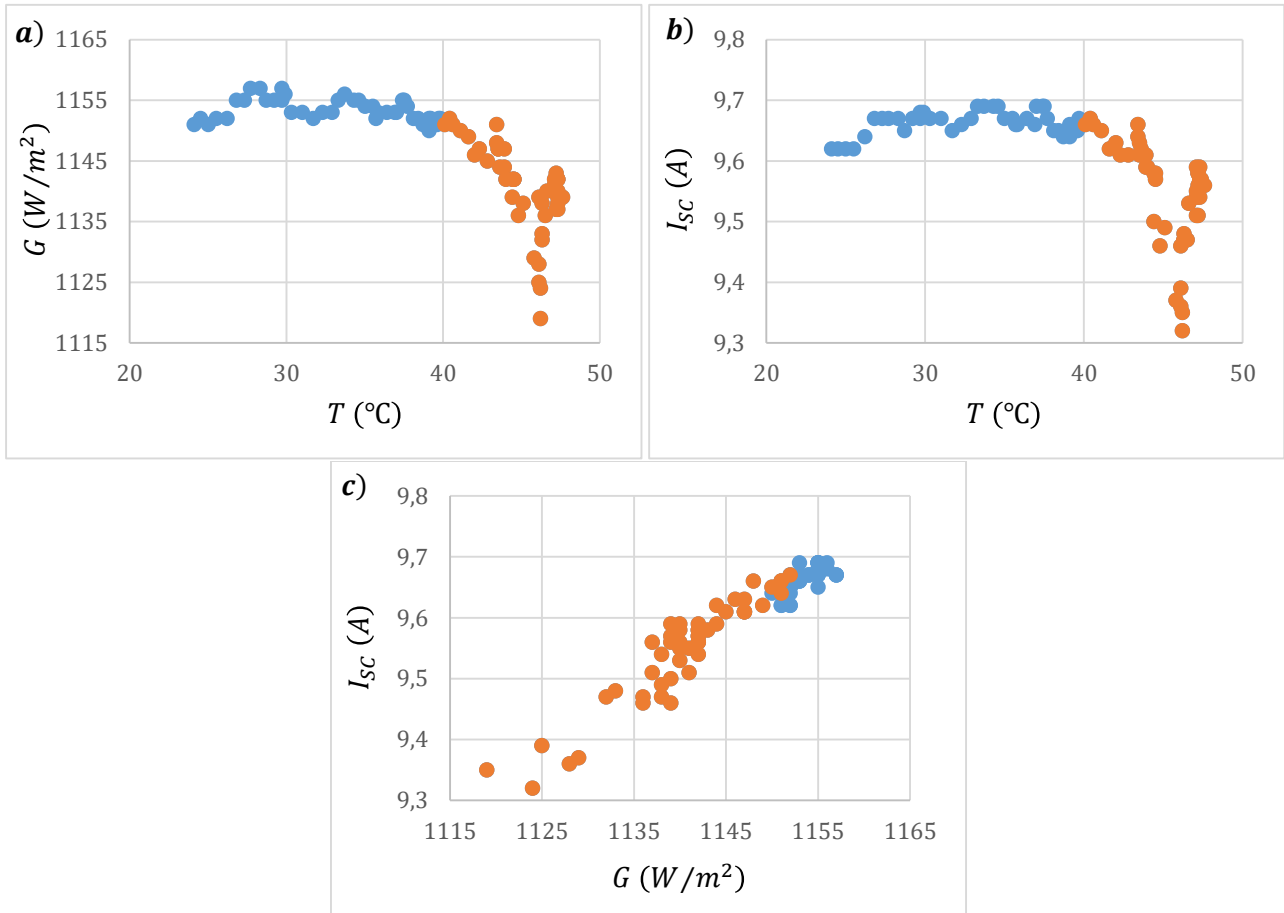


Figura 4.4: Para una serie de medidas a distintas temperaturas e irradiancias (a), la relación de I_{sc} con la temperatura (b) y con la irradiancia (c).

Nuestro enfoque para obtener una medida de α_{rel} fue realizar una regresión lineal a partir de las [Ec.13](#) y [Ec.14](#). Para ello, fijamos una curva trazada a temperatura T_0 para que marque el valor de $I_{sc}(T_0)$, de forma que

$$\ln \frac{I_{sc}(T_0)}{I_{sc}} = \alpha_{rel}(T_0 - T); \quad (32)$$

La [Figura 4.5](#) muestra las condiciones de irradiancia y temperatura en las que se ha realizado este ajuste lineal, mientras que la [Figura 4.6](#) muestra los resultados. Podemos observar que I_{sc} ignora completamente cualquier posible dependencia con T .

La regresión lineal de la [Ec.32](#) ([Figura 4.6](#)) nos da valores de α_{rel} completamente erróneos e incluso negativos ($\alpha_{rel} = 0,0005 \text{ °C}^{-1}$ para este modelo de módulo [\[24\]](#)). Todo esto nos sugiere que mediante la [Ec.32](#) no podemos aislar la influencia de la temperatura en I_{sc} de la de la irradiancia.

Dicho de otra forma: α_{rel} , y por tanto α , solo podrían ser medidos si lográramos una irradiancia constante, lo cual es perfectamente factible en un laboratorio, pero resulta imposible en las condiciones del exterior.

4. METODOLOGÍA

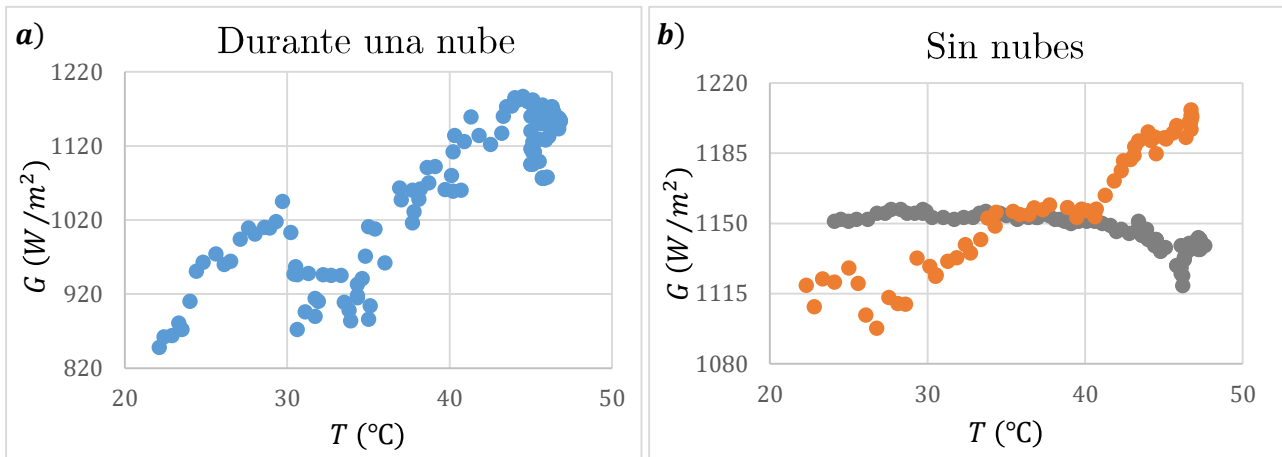


Figura 4.5: Distribución de condiciones de irradiancia y temperatura de las medidas de curvas I-V en un día nublado (a) y en un día despejado (b). Cada color corresponde a una tanda de medidas distinta. Nótese que la gráfica a contiene un rango de irradiancias mucho menor que la gráfica b.

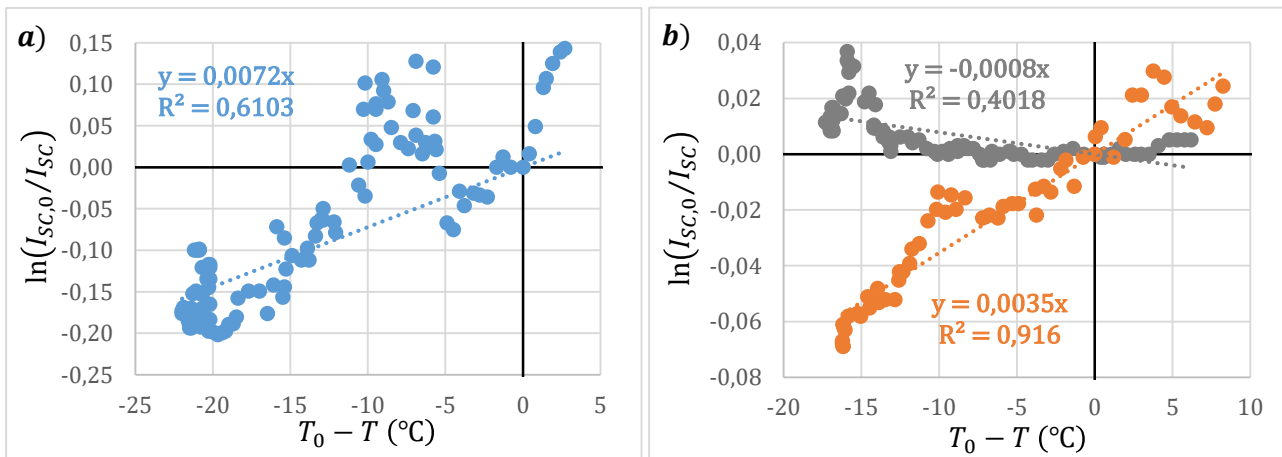


Figura 4.6: Regresión lineal de la [Ec.32](#) en un día nublado (a) y en un día despejado (b). Los colores de cada regresión corresponden con la tanda de medidas del mismo color de la [Figura 4.5](#). Nótese que la pendiente de las regresiones debería ser el valor de α_{rel} .

4.4. Traslación de las curvas I-V medidas en el exterior

Ya hemos determinado los valores de η y de R_S en la [sección 4.2](#), y hemos tomado el valor nominal de α_{rel} en la [sección 4.3](#) (para este módulo con el que estamos ejemplificando, $\alpha_{rel} = 0,0005 \text{ °C}^{-1}$ [[24](#)]). Lo único que falta es llevar las curvas a la condición deseada. Si bien generalmente vamos a querer llevar la curva a las condiciones STC, para poder comprobar la efectividad del procedimiento que estamos realizando vamos a ver un ejemplo: vamos a tomar una de las curvas medidas y la vamos a llevar a las condiciones de otra curva que también hayamos medido mediante las [Ec.19](#) y [Ec.20](#), para así poder observar el error cometido en la traslación. Los valores concretos para este ejemplo están detallados en la [Tabla 4.1](#); donde R_S y η son los obtenidos en la [Figura 4.3.b](#).

En la [Figura 4.7](#) se muestran este ejemplo: las curvas I-V y P-V medidas en (G_1, T_1) , sus traslaciones a (G_2, T_2) , y las curvas I-V y P-V medidas a (G_2, T_2) .

4. METODOLOGÍA

Tabla 4.1: Datos para la traslación que vamos a mostrar como ejemplo.

G_1 (W/m^2)	1151,4	η	$1,24 \pm 0,02$	G_2 (W/m^2)	1156,8
T_1 ($^{\circ}C$)	40,07	R_S (Ω)	$0,23 \pm 0,02$	T_2 ($^{\circ}C$)	28,27

Los valores de η y de R_S se refieren a los obtenidos para la curva trazada en (G_1, T_1) .

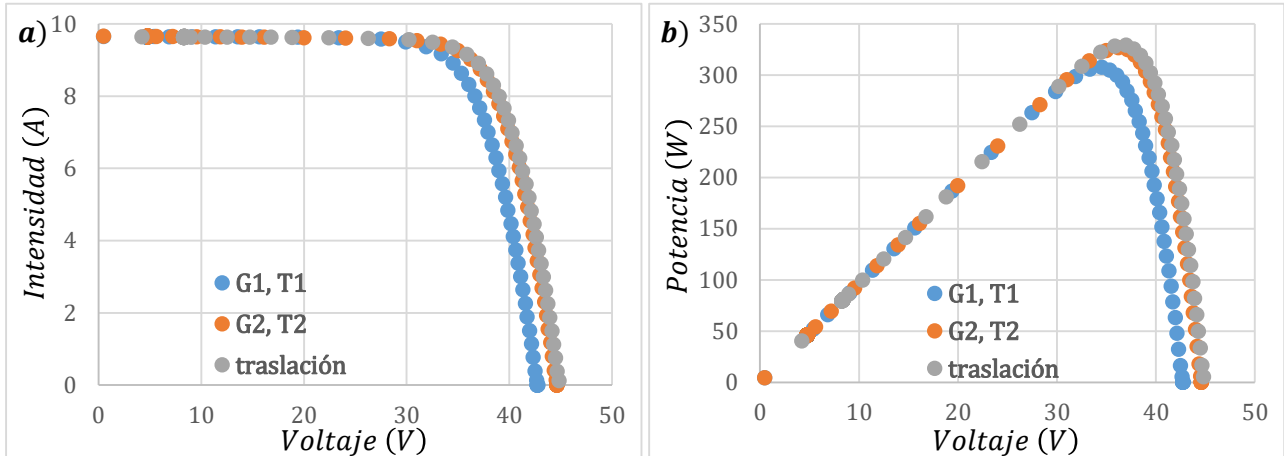


Figura 4.7: Curvas I - V (a) y P - V (b) medidas en las condiciones iniciales (*azul*), trasladadas a las condiciones finales (*gris*) y medidas en las condiciones finales (*naranja*).

Podemos observar que la traslación dada por este procedimiento se aproxima bastante a los datos experimentales en las condiciones finales. Por tanto, a falta de cuantificar el error en el valor de $P_{m\acute{a}x}$ en el [apartado 5.2](#), este procedimiento parece ser apropiado para su aplicación en el exterior.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados de η y de R_S

Como comentamos en el [apartado 4.2](#), tomaremos los puntos A y B de la curva I-V tales que haya un incremento en la corriente de $|I_a - I_b| \approx 1 A$ y un incremento en el voltaje de $|V_a - V_b| \approx 2 V$, y realizaremos una regresión lineal según la [Ec.23](#). Además, eliminaremos los puntos de menor voltaje, hasta obtener una $R^2 > 0,995$ pero manteniendo un mínimo de quince puntos.

$$-\frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} = -\frac{N_c \eta k T}{q} \frac{\ln(I_{SC} - I_a) - \ln(I_{SC} - I_b)}{I_a - I_b} + R_S \quad (23)$$

Para estudiar los parámetros obtenidos, vamos a mostrar los resultados para cada una de las curvas I-V medidas. Los resultados obtenidos se muestran en la [Figura 5.1](#), y el promedio de los resultados obtenidos se incluyen en la [Tabla 5.1](#). Si bien **para realizar la traslación emplearemos las R_S y η propias de cada curva**, los valores medios presentados a continuación son apropiados a nivel orientativo para hacernos una idea de los valores de los parámetros con los que estamos trabajando; y nos sirven como caracterización del módulo independientemente de su temperatura.

Tabla 5.1: *Valores medios de R_S y de η para una tanda de medidas tomada un día despejado.*

R_S (Ω)	η
$0,225 \pm 0,003$	$1,254 \pm 0,003$

Observamos que el valor medio de R_S es más bajo de lo que cabe esperar (por lo menos $0,5 \Omega$ [[8](#), secc. 4.3]), lo cual es un suceso habitual en la medida directa de R_S mediante este procedimiento [[3](#)]. Vemos también que el valor medio de $\eta = 1,254$ está por encima del valor sugerido por los desarrolladores de este procedimiento [[13](#); [22](#)]. Esto se debe a que el factor de idealidad depende tanto de la tecnología del módulo como de la degradación de dicho módulo [[8](#), secc. 4.4], **por lo que tenemos ya un primer indicador de que es posible que el módulo presente cierta degradación.**

En la [Figura 5.1](#) se han representado los valores de R_S y de η para cada curva I-V en función de las condiciones de medida, G y T . Observando esta figura podemos estudiar el comportamiento de estos parámetros. Por un lado, respecto a la dependencia con T , podemos observar un ligero incremento de R_S y un ligero descenso de η , lo cual está de acuerdo con la literatura [[17](#); [18](#)]. Por otro lado, respecto a la dependencia con G , tenemos que R_S es prácticamente constante, mientras que η experimenta un aumento (aunque presenta mucho ruido), lo cual de nuevo vuelve a estar de acuerdo con la literatura [[14](#)].

Observamos que, si bien varían ligeramente, tanto R_S como η son prácticamente constantes dentro del rango de temperaturas e irradiancias en el que estamos trabajando, como evidencian las bajas correlaciones. Sin embargo, para reducir el error en la traslación, vamos a tomar los valores de R_S y de η para cada curva I-V.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

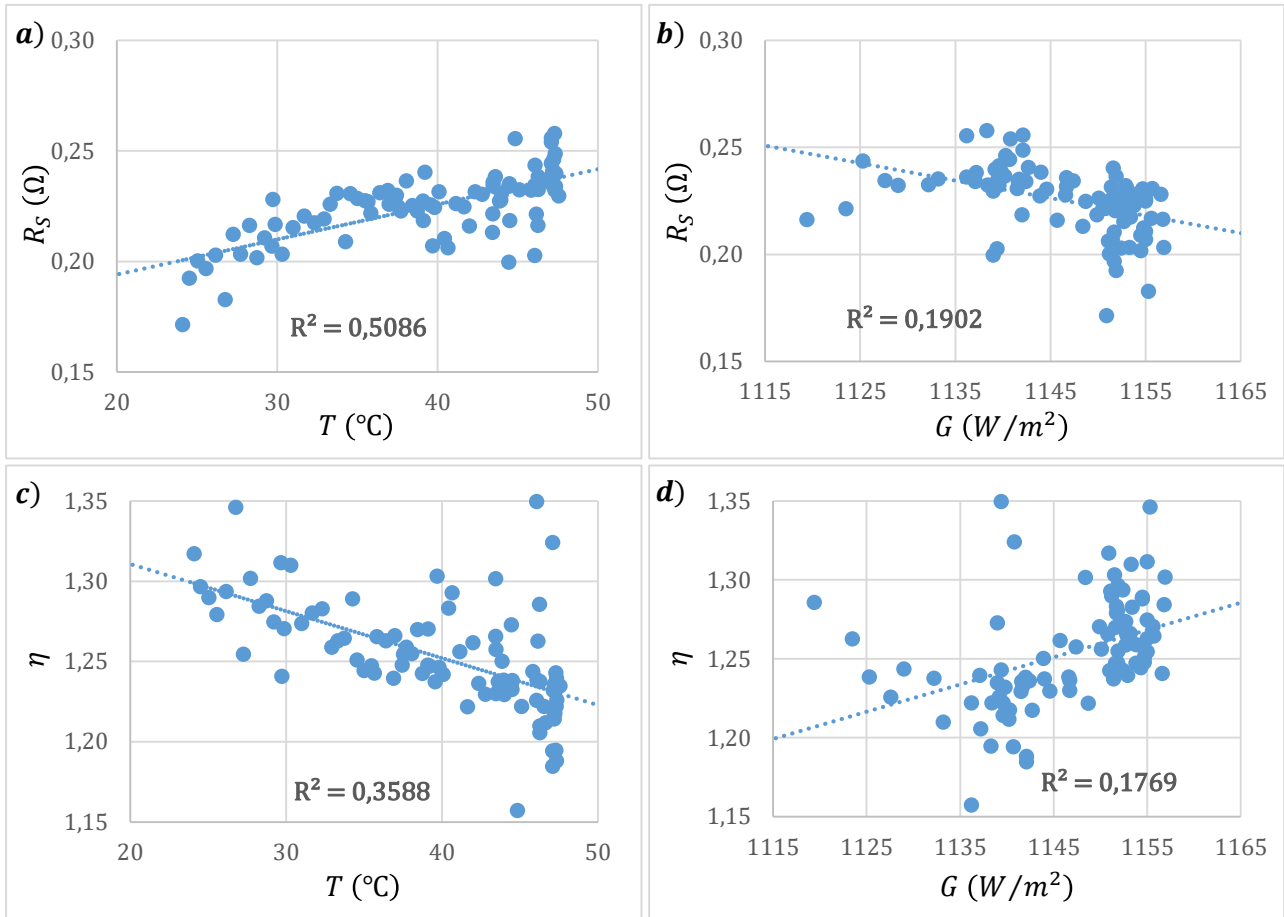


Figura 5.1: Variación de R_S en función de la temperatura (a) y de la irradiancia (b); y de η en función de la temperatura (c) y de la irradiancia (d).

5.2. Traslación de las curvas I-V y medida del error relativo en P_{max}

A continuación, vamos a trasladar distintas tandas medidas de curvas I-V, cada una a unas mismas condiciones. Para poder observar qué sucede cuando trasladamos las curvas en un rango amplio de irradiancias y de temperaturas, primero trasladaremos toda una tanda de curvas I-V trazadas a temperatura constante a una misma irradiancia objetivo; y posteriormente trasladaremos otra tanda de curvas trazadas a irradiancia constante a una misma temperatura objetivo. Finalmente, veremos la distribución del error relativo de las P_{max} , obtenido según la [Ec.33](#), en función de la irradiancia y de la temperatura:

$$err_{rel}(x) = \frac{err_{abs}}{x_{objetivo}} = \frac{x_{traslación} - x_{objetivo}}{x_{objetivo}} \quad (33)$$

5.2.1. Distribución del error en función de la irradiancia

Para estudiar la dependencia del error en P_{max} con la irradiancia, emplearemos una tanda de veintiocho curvas I-V trazadas desde los $940,2$ hasta los $1175 \text{ W}/\text{m}^2$, y a una temperatura prácticamente constante ($\Delta T = 3,25 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este caso, el valor medio de las irradiancias es de 1103 W/m^2 . Por tanto, trasladaremos todas las curvas a $G_0 = 1103,5 \text{ W/m}^2$ y $T_0 = 42,29 \text{ }^\circ\text{C}$, que son las condiciones de la curva que hemos medido más cercanas.

Podemos ver en la [Figura 5.2](#) que el error relativo es bastante simétrico (igual valor para irradiancias mayores y menores que la objetivo). Si bien tenemos pocos puntos, **la distribución parece ser bastante aleatoria**, aunque con una mayor tendencia a infravalorar la potencia máxima.

Entonces, podemos decir que, al menos en el rango de irradiancias en el que hemos trabajado en el exterior (de 900 a 1200 W/m^2), la irradiancia no es un factor importante en el error cometido en la medida de P_{max} .

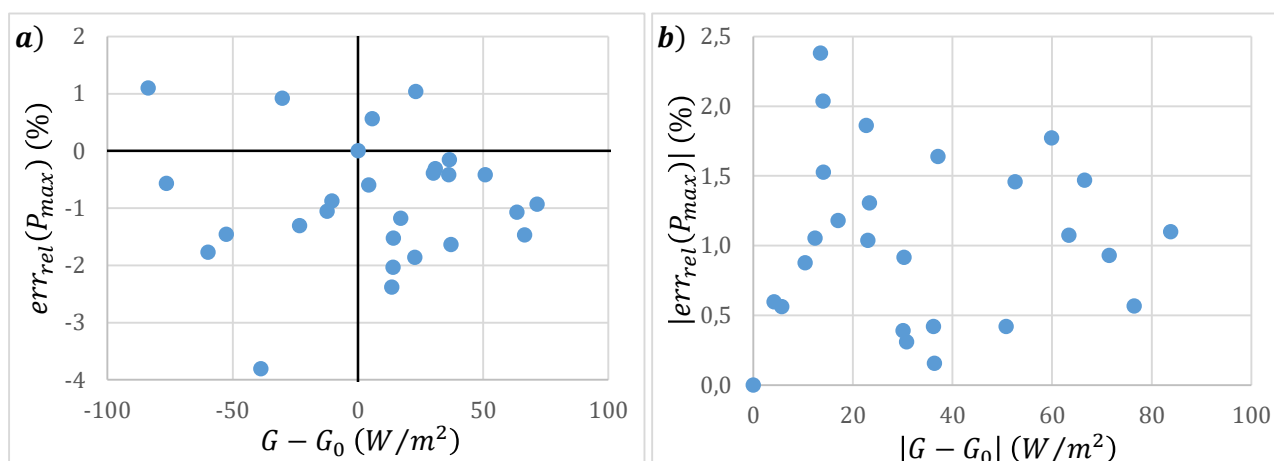


Figura 5.2: Distribución del error relativo con signo (a) y en valor absoluto (b) de P_{max} en función de la irradiancia.

5.2.2. Distribución del error en función de la temperatura

Para estudiar la dependencia del error en P_{max} con la temperatura, emplearemos una tanda de setenta y cuatro curvas I-V trazadas desde los $24,11$ hasta los $47,33 \text{ }^\circ\text{C}$, y a una irradiancia prácticamente constante ($\Delta G = 18 \text{ W/m}^2$).

En este caso, el valor intermedio del rango de las temperaturas es de $35,85 \text{ }^\circ\text{C}$. Por tanto, trasladaremos todas las curvas a $G_0 = 1152,8 \text{ W/m}^2$ y $T_0 = 35,82 \text{ }^\circ\text{C}$, que son las condiciones de la curva que hemos medido más cercanas a la media de las temperaturas.

Podemos ver en la [Figura 5.3](#) que **el error relativo es de nuevo bastante simétrico** (teniendo en cuenta que tenemos más datos en el semieje X positivo que en el negativo). Al contrario que en el caso de la irradiancia, esta vez sí que **apreciamos una tendencia en la distribución de los datos**: al trasladar hacia temperaturas superiores (semieje X negativo) subestimamos el valor de la potencia máxima; y al trasladar hacia temperaturas inferiores, lo sobrestimamos.

De forma muy aproximada, podemos decir que, **por cada $10 \text{ }^\circ\text{C}$ que nos separemos de la temperatura objetivo, aumentamos el error relativo en torno a un 1% (en valor absoluto)**, obteniendo un error similar al caso de la irradiancia.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

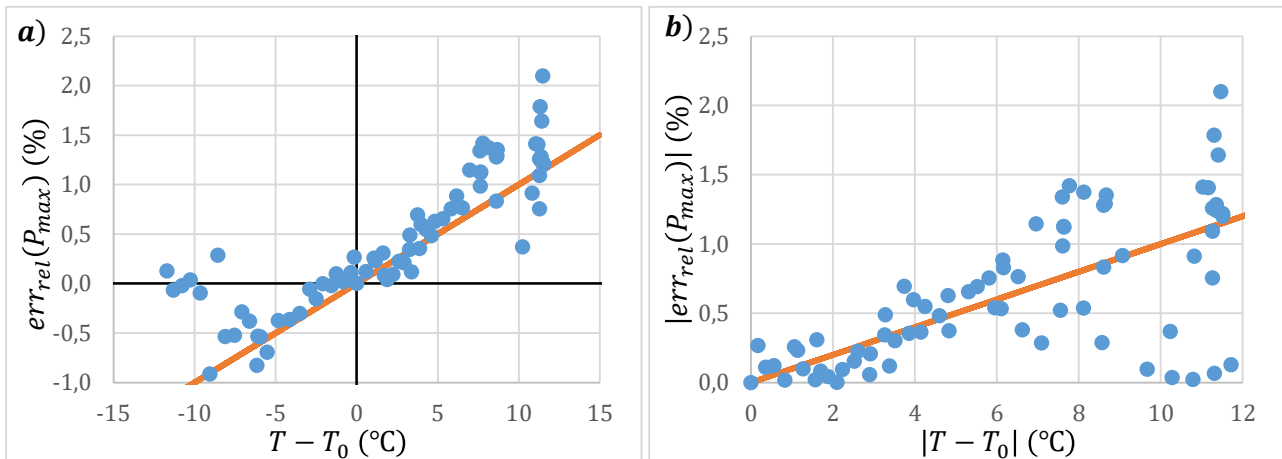


Figura 5.3: Distribución del error relativo con signo (a) y en valor absoluto (b) de P_{max} en función de la temperatura (puntos azules) y aproximación cualitativa del error (línea naranja).

Comparemos ahora las dependencias del error relativo en P_{max} . Observamos, comparando las Figuras 5.2 y 5.3, que la temperatura a la que trazamos las curvas I-V influye en similar medida a la irradiancia, produciendo ambos efectos en torno a un 1 % de error en la medida.

Además, sería recomendable caracterizar el módulo a partir de múltiples curvas I-V y tomar la media de las P_{max} obtenidas, ya que como observamos en las Figuras 5.2 y 5.3 el error fluctúa bastante.

5.2.3. Distribución del error en función de G y de T

Finalmente, tomemos una tanda entera de curvas tomadas a distintas irradiancias y temperaturas, como se muestra en la Figura 5.4, y traslademos todas estas ciento veinte curvas a las condiciones STC.

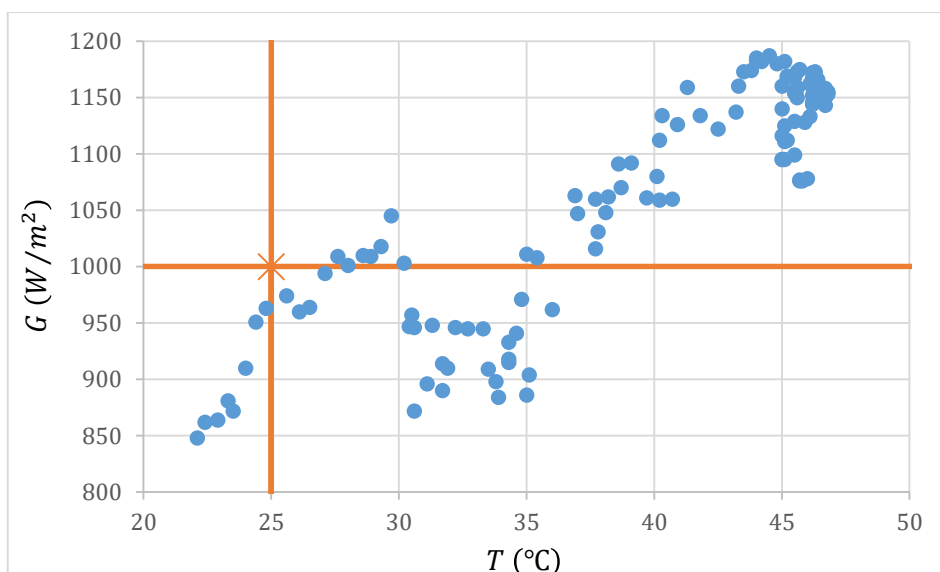


Figura 5.4: Distribución de irradiancias y temperaturas para la traslación de curvas a STC. Se ha detallado la posición del punto STC.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ya que no tenemos ninguna curva medida a exactamente STC, tomaremos la media de las potencias máximas obtenidas en la traslación como referencia para calcular el error relativo cometido.

En la [Figura 5.5](#) se detalla el error relativo en la potencia máxima en función de la irradiancia y de la temperatura. De nuevo, tenemos que **la dependencia con la irradiancia parece ser aleatoria** y simétrica; pero esta vez **no observamos ninguna tendencia del error con la temperatura**, lo cual probablemente se deba a los efectos de la variación en la irradiancia.

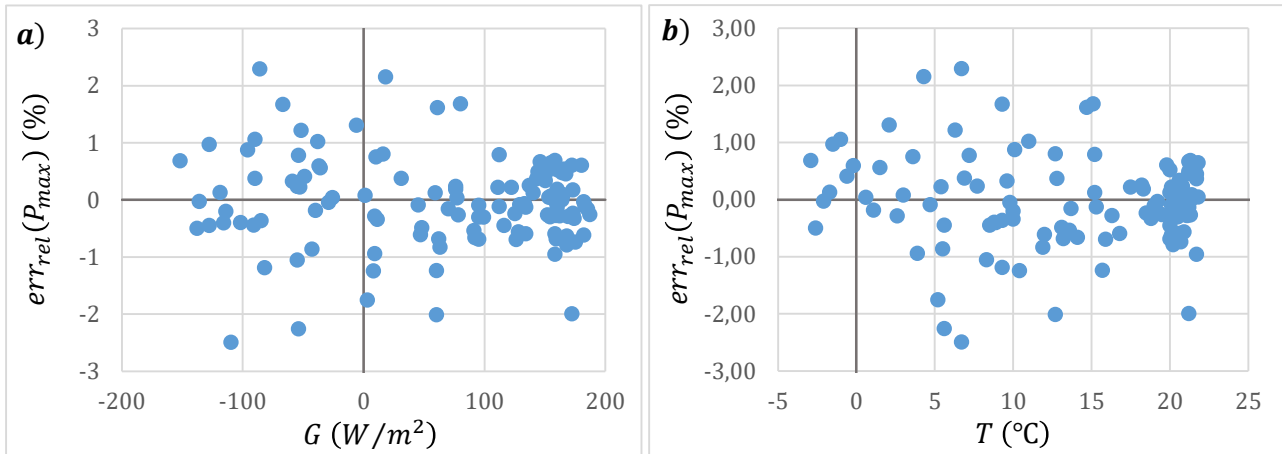


Figura 5.5: *Error relativo con signo de la potencia máxima en función de la irradiancia (a) y de la temperatura (b).*

En la [Figura 5.6](#) se muestra el error relativo de la potencia máxima en valor absoluto en función de la irradiancia y de la temperatura. Podemos observar que, aunque hay algunos puntos que se desvían en mayor medida, **la mayoría de traslaciones de la potencia máxima nos dan valores con un error relativo inferior al 1% (en valor absoluto)**, lo cual es un resultado similar al obtenido en el error relativo de la potencia a partir de curvas I-V trazadas en interior y/o simuladas trasladadas mediante este procedimiento [3; 13; 22].

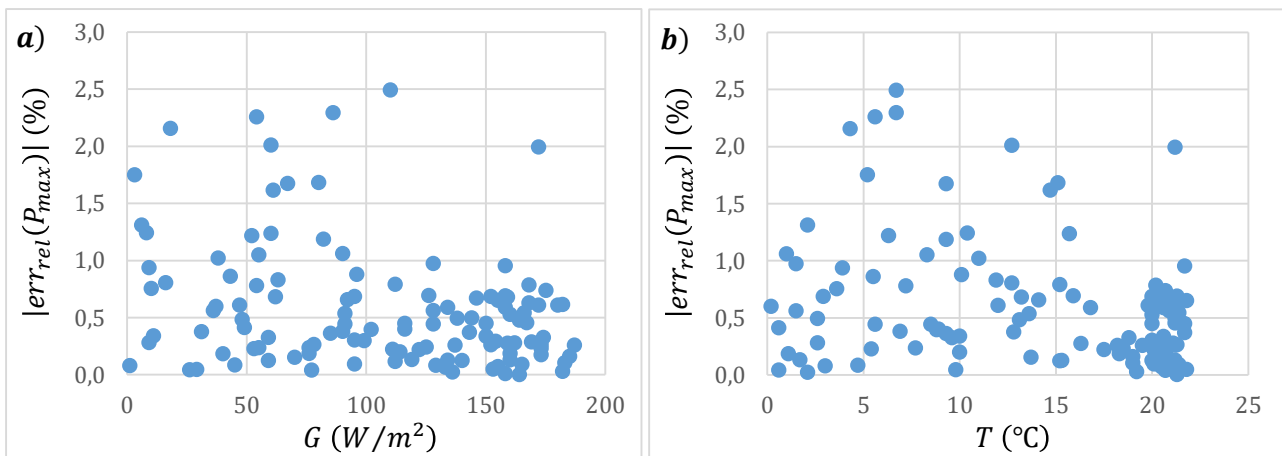


Figura 5.6: *Error relativo en valor absoluto de la potencia máxima en función de la irradiancia (a) y de la temperatura (b).*

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor medio que hemos obtenido para la potencia máxima en STC de este módulo es de $290,81\text{ W}$ con un error promedio del $0,6\%$, luego el valor de esta potencia máxima será de $290,8 \pm 1,7\text{ W}$. En la hoja de especificaciones, el valor nominal es de 330 W [24]. Por tanto, podemos afirmar que este módulo ha sufrido una degradación del $11,9 \pm 0,5\%$.

5.3. Comparación visual de las curvas I-V trasladadas

Veamos ahora cómo son las curvas que hemos trasladado en la última sección del apartado anterior. En la Figura 5.7 se muestran las curvas I-V trasladadas. La curva verde es la curva con menor error relativo en la potencia, mientras que las curvas azul y roja son las que presentan un mayor error relativo de signo positivo y de signo negativo, respectivamente. Podemos ver que la principal fuente de error es un mal ajuste del valor de I_{SC} . A pesar de este desajuste en I_{SC} , vemos que la región de P_{max} se ajusta bien a la curva objetivo.

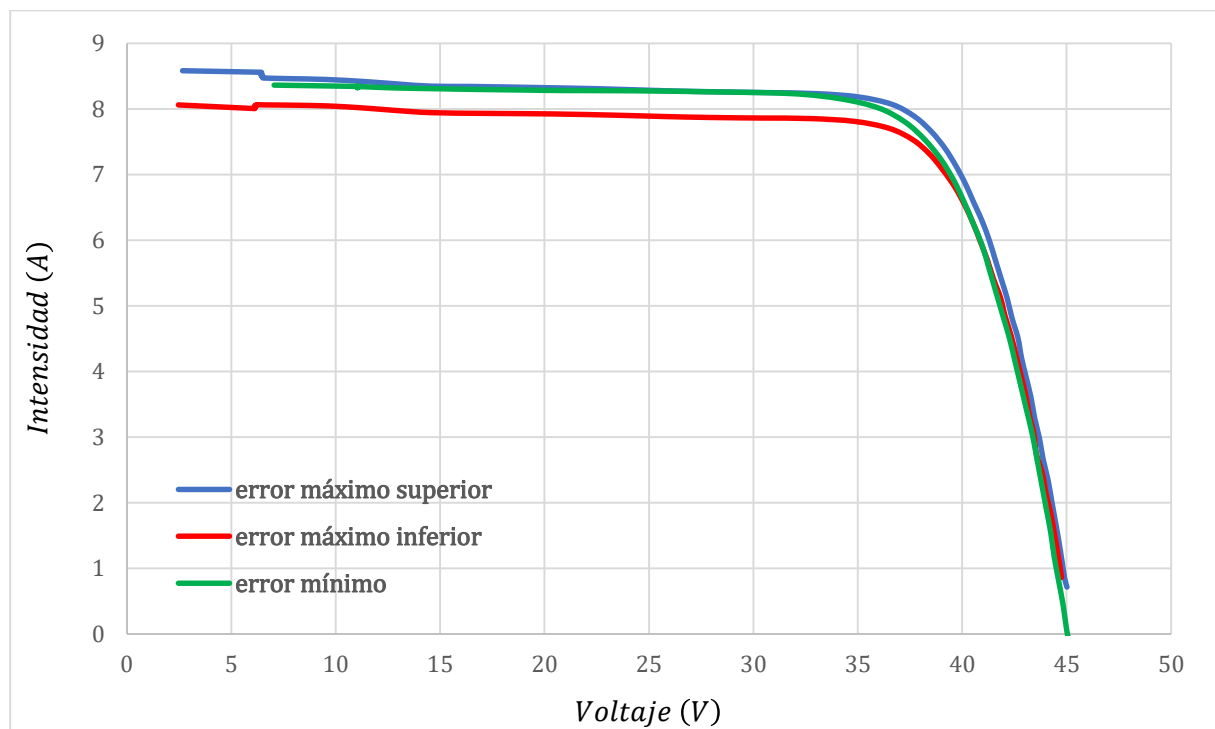


Figura 5.7: Curvas I-V trasladadas.

Similarmente, en la Figura 5.8 se muestran las curvas P-V, con un detalle del pico de potencia. De nuevo, la curva verde es la curva con menor error relativo en la potencia, mientras que las curvas azul y roja son las que presentan un mayor error relativo de signo positivo y negativo, respectivamente. Podemos ver que, en los casos de mayor desviación, el pico de máxima potencia se desvía un máximo 5 W , esto es, en torno al 2% .

Por todo lo comentado en este apartado de resultados, podemos concluir que este procedimiento es apto para la caracterización de la potencia máxima de módulos solares mediante la traslación a STC de su curva I-V tomada en el exterior; ya que obtenemos un error promedio bastante pequeño, inferior al 1% , y similar al obtenido para curvas trazadas en interior y/o simuladas (ver Figuras 3.1 y 3.2) [3; 13; 22].

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

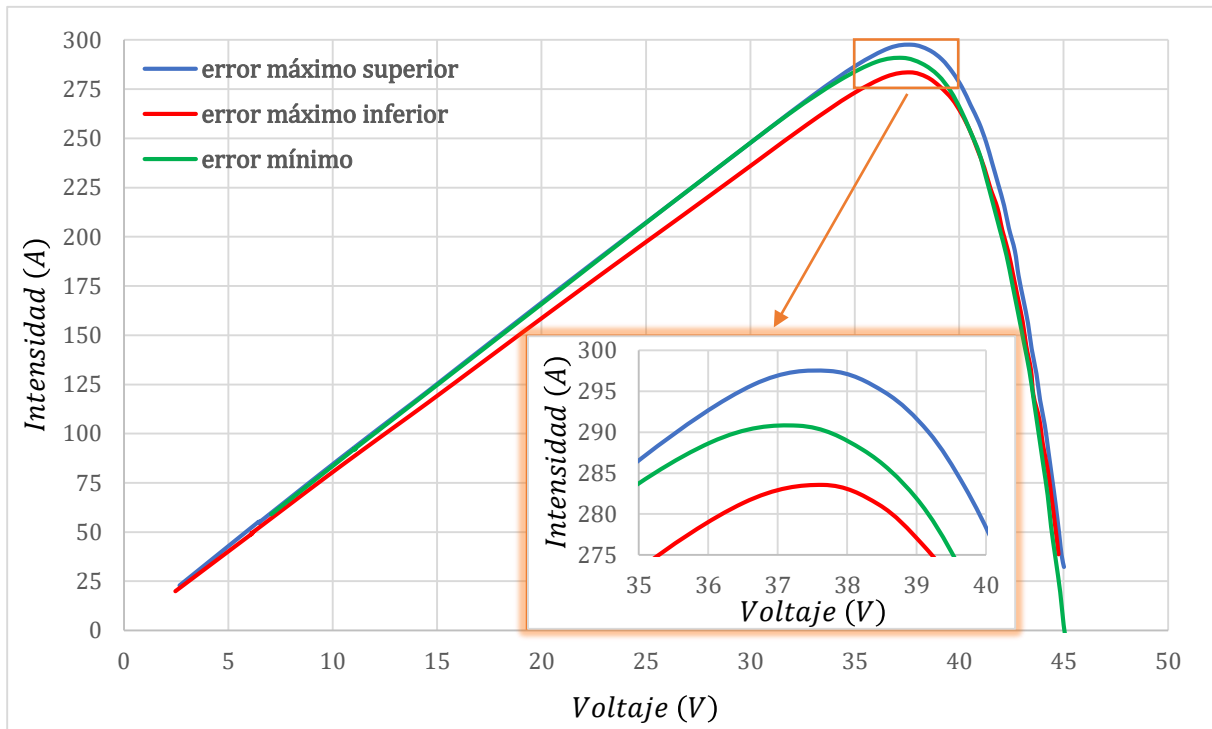


Figura 5.8: Curvas P-V trasladadas.

Por completitud, veamos ahora cómo se han trasladado las curvas I-V de los [apartados 5.2.1](#) y [5.2.2](#), que recordemos que fueron tomadas a temperatura constante y a irradiancia constante, respectivamente.

En la [Figura 5.9](#) observamos el caso en el que estudiamos el error en P_{max} en función de la irradiancia. Están representadas la curva de referencia en **verde** (a cuyas condiciones hemos trasladado el resto de curvas), y la curva con mayor error relativo en P_{max} , en **rojo**. **Podemos observar que el principal aporte de la irradiancia al error es el desajuste en I_{SC}** , lo cual concuerda con todo lo que hemos visto en este trabajo sobre cómo la irradiancia modifica en gran medida esta corriente de cortocircuito sin alterar demasiado V_{OC} (recordemos particularmente los [apartados 2.4](#) y [4.3](#)).

Similarmente, en la [Figura 5.10](#) observamos el caso en el que estudiamos el error en P_{max} en función de la temperatura. De nuevo, están representadas la curva de referencia en **verde** y la curva con mayor error relativo en P_{max} en **rojo**. **Podemos observar que el principal aporte de la temperatura al error es el desajuste en V_{OC}** , lo cual concuerda con todo lo que hemos visto en este trabajo sobre cómo la temperatura modifica en gran medida este voltaje de circuito abierto sin alterar demasiado I_{SC} (recordemos de nuevo los [apartados 2.4](#) y [4.3](#)).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

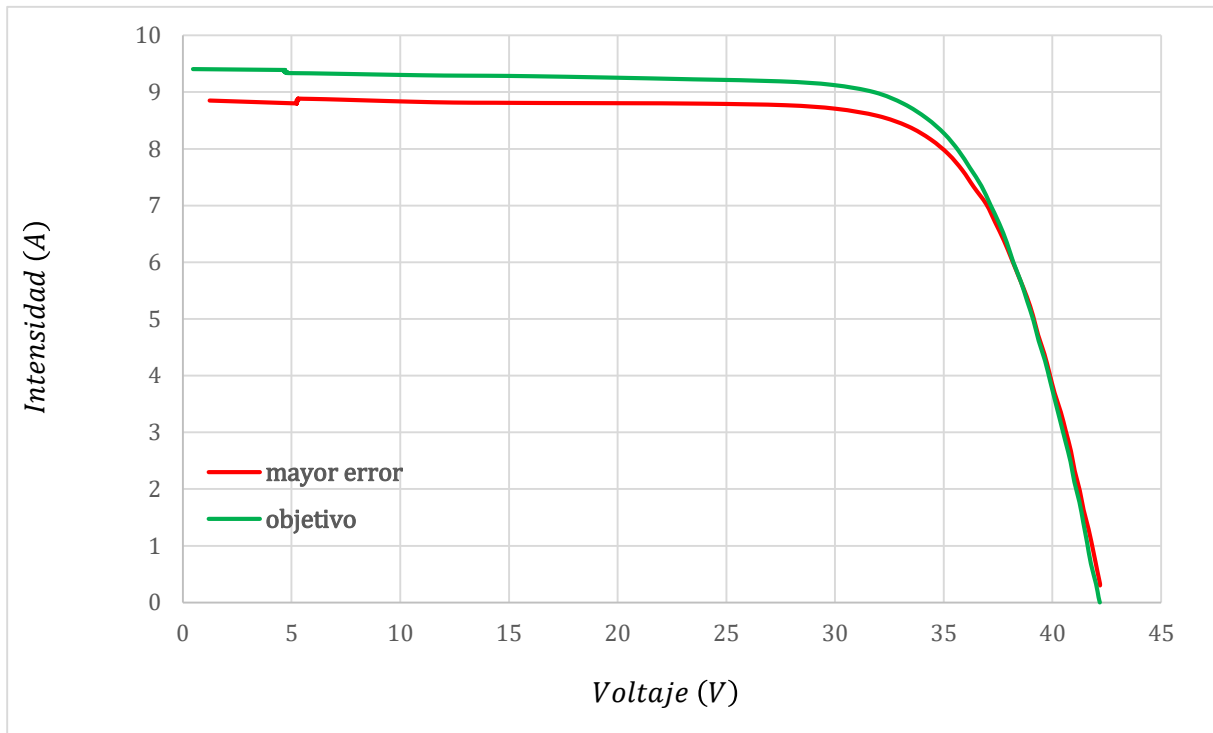


Figura 5.9: Curvas I-V de referencia (*verde*) y de mayor error relativo (*roja*) tomadas a temperatura constante, variando la irradiancia.

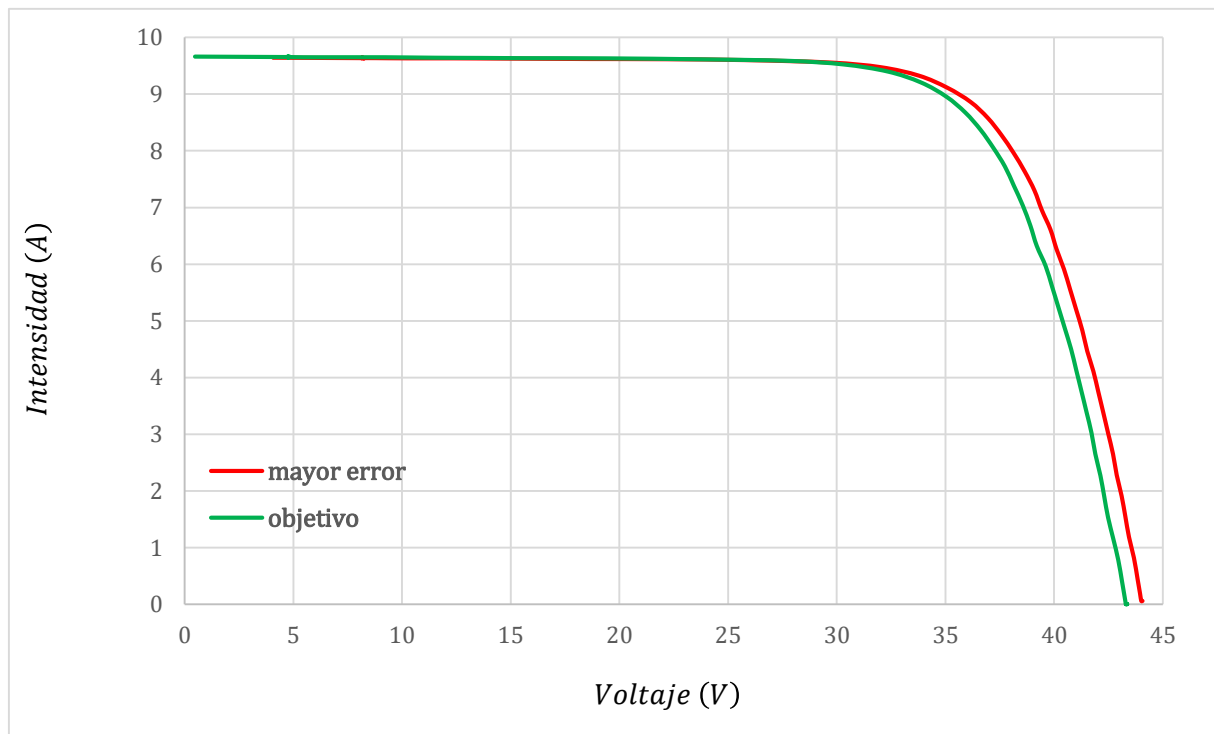


Figura 5.10: Curvas I-V de referencia (*verde*) y de mayor error relativo (*roja*) tomadas a irradiancia constante, variando la temperatura.

6. CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones

En este trabajo hemos estudiado la posibilidad de caracterizar un módulo solar de forma completa a partir de su curva I-V trazada en el exterior, para así evitar la necesidad de llevarlo a un laboratorio. Hemos puesto especial atención en el error cometido en la traslación de la potencia máxima, ya que es el parámetro más importante de un módulo solar. Además, hemos estudiado los distintos procedimientos que nos permiten obtener estas traslaciones.

La principal conclusión que podemos extraer de este estudio es que sí es posible obtener una medición de la potencia máxima de un módulo solar de forma precisa en el exterior. Los resultados obtenidos en este trabajo implican que podemos trazar la curva I-V de un módulo en su propio lugar de trabajo, sin necesidad de llevarlo a un laboratorio, y obtener su potencia máxima en condiciones STC **con un error inferior al 1 %**. Este error es algo mayor que el obtenido para curvas simuladas y también es ligeramente mayor que el obtenido por otros procedimientos [3], pero no lo suficientemente grande como para impedir la medida de la potencia máxima de un módulo en el exterior.

Por lo tanto, concluimos que el Cuarto Procedimiento detallado por la norma IEC 60891:2021 es perfectamente apto para la traslación de la potencia máxima de un módulo en cualquier par de condiciones (G, T) , incluyendo condiciones STC, sin necesidad de llevar el módulo a un laboratorio; o lo que es lo mismo, este método nos permite ahorrar costes, tiempo, mano de obra y posibles daños al módulo a la hora de medir su potencia máxima sin cometer un error excesivamente grande.

Además, hemos obtenido un desarrollo teórico completo del Cuarto Procedimiento expuesto en la norma IEC 60891:2021 y un desarrollo práctico detallado para la determinación de sus parámetros.

Sin embargo, cabe mencionar que **una caracterización completa del módulo no es posible en el exterior** ya que, como hemos visto en el [apartado 4.3](#), no es posible determinar el parámetro α fuera de un laboratorio.

6.2. Limitaciones y consideraciones de este estudio

Este estudio ha tenido múltiples limitaciones. A continuación, se comentan las más importantes, y se enumerara una serie de consideraciones a tener en cuenta.

La primera limitación es que, debido a que el objetivo del estudio son las medidas en el exterior, no hemos podido aislar los efectos de los cambios en la irradiancia de los efectos en los cambios en la temperatura. Esto ha supuesto, entre otras cosas, no poder determinar el parámetro α y por tanto tener que usar su valor nominal. En otros estudios [20] se han propuesto métodos para tratar de controlar tanto la irradiancia como la temperatura cuando se mide en el exterior.

La segunda limitación ha sido el rango de temperaturas e irradiancias disponibles para el estudio, debido también a la falta de control sobre las condiciones ambientales. De nuevo, se han propuesto métodos para variar estos parámetros en el exterior [20].

6. CONCLUSIONES

La tercera limitación ha sido el número de medidas. Algunas gráficas (como las de la [Figura 5.2](#)) tienen una menor cantidad de datos de la deseable. Esto se debe principalmente a una meteorología adversa al realizar este estudio (demasiados días nublados) y al hecho de que todas las medidas y su tratamiento, los cuales requieren una cantidad significativa de tiempo, han sido realizados por una única persona.

Una primera consideración a tener en cuenta es la resolución de los aparatos de medida. Si bien el medidor de irradiancia y el termopar empleados parecen tener suficiente resolución, una mayor resolución por parte del trazador, especialmente en la región de P_{max} , podría darnos unos resultados más precisos.

Otra consideración es que este estudio ha sido realizado con un único módulo en bastante buen estado, y es posible que la precisión del procedimiento detallado en este estudio pueda variar ligeramente en función de la tecnología del módulo y de su degradación.

Una consideración final es la exactitud del valor de R_S . Como se ha visto en otros estudios [\[10\]](#), este parámetro es complicado de estimar de forma apropiada mediante aproximaciones de primer orden (esto es, suponer $R_S \propto V/I$). Concretamente, el método que hemos usado en este trabajo suele dar resistencias en serie más bajas que el valor real de las mismas [\[3\]](#). De hecho, un análisis a nivel cualitativo empleando una R_S mayor que la obtenida ofrece unas curvas I-V trasladadas mejor ajustadas a la curva objetivo, especialmente en la región de circuito abierto.

A pesar de estas limitaciones, y teniendo en cuenta estas consideraciones, **consideramos que este estudio ha sido lo suficientemente amplio y profundo como para afirmar las conclusiones anteriormente mencionadas.**

6.3. Futuras líneas de investigación

Una opción para incrementar la precisión de este estudio sería realizarlo con aparatos de medida con mayor resolución y con módulos solares nuevos, sin degradación.

El siguiente paso en esta investigación sería analizar cómo afectan los distintos defectos a este procedimiento. Si bien esto ya ha sido estudiado con curvas simuladas [\[3\]](#), es posible que distintos defectos, como daños físicos en el módulo o degradación de las resistencias, introduzca efectos no incluidos en las simulaciones. Similarmente, sería de gran interés repetir este estudio con módulos de distintas tecnologías, para observar si el cambio en η es de especial importancia a la hora de determinar P_{max} con precisión.

Otra posible línea de investigación sería llevar este procedimiento a una escala mayor, esto es, tratar de aplicarlo a una planta entera de producción energética fotovoltaica. Un *string* de módulos es un conjunto de módulos conectados en serie, de forma que en las ecuaciones empleadas simplemente habría que multiplicar N_c por el número de módulos del *string*. Después, habría que realizar un análisis estadístico de cuántos *strings* es necesario analizar para obtener una muestra significativa del estado de la planta.

Otra línea también interesante sería estimar el ahorro en tiempo y costes de este procedimiento frente al análisis en laboratorio, y estudiar si ese ahorro compensa el error cometido al obtener P_{max} .

I. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Sinovoltaics.** (s.f.). *Standard Test Conditions (STC)*. Recuperado el 24 de Junio de 2023, de *definition and problems*: <https://sinovoltaics.com/learning-center/quality/standard-test-conditions-stc-definition-and-problems/>
- [2] **International Electrotechnical Commission.** (2021). *IEC 60891:2021*. Estándar internacional, TC 82 - Solar photovoltaic energy systems
- [3] **Li, B. et al.** (2021). Evaluation and improvement of IEC 60891 correction methods for I-V curves of defective photovoltaic panels. *Solar Energy*, 216, 225-237. doi:10.1016/j.solener.2021.01.010
- [4] **Electronics Tutorials.** (s.f.). Recuperado el 21 de Junio de 2023, de PN Junction Theory: https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_2.html
- [5] **S. M. Sze & Kwok K. Ng.** (2006). *Physics of Semiconductor Devices* (Tercera ed.). Nueva York, EE. UU.: John Wiley & Sons, Inc
- [6] **S. M. Sze & M. K. Lee.** (2012). *Semiconductor Devices: Physics and Technology* (Tercera ed.). Nueva York, EE. UU.: John Wiley & Sons, Inc
- [7] **Fan, J. C.** (1986). Theoretical temperature dependence of solar cell parameters. *Solar Cells*, 17(2-3), 309-315. doi:10.1016/0379-6787(86)90020-7
- [8] **C. B. Honsberg & S. G. Bowden.** (2019). *Photovoltaics Education Website*. Recuperado el 03 de Junio de 2023, de <https://www.pveducation.org/>
- [9] **Wolf, M. & Rauschenbach, H.** (1963). Series resistance effects on solar cell measurements. *Advanced Energy Conversion*, 3(2), 455-479. doi:10.1016/0365-1789(63)90063-8
- [10] **Hansen, C. W. & King, B. H.** (10 de Diciembre de 2018). Determining Series Resistance for Equivalent Circuit Models of a PV Module. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(2). doi:10.1109/JPHOTOV.2018.2883703
- [11] **Dhass, A. D.; Natarajan, E. & Ponnusamy, L.** (2012). Influence of shunt resistance on the performance of solar photovoltaic cell. *2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM)*, (págs. 382-386). Chennai, India. doi:10.1109/ICETEEEM.2012.6494522
- [12] **El-Adawi, M. & Al-Nuaim, I.** (2001). A method to determine the solar cell series resistance from a single I-V. Characteristic curve considering its shunt resistance - New approach. *Vacuum*, 64, 33-36. doi:10.1016/S0042-207X(01)00370-0
- [13] **Hishikawa, Y. et al.** (Enero de 2018). Voltage-Dependent Temperature Coefficient of the I-V Curves of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(1), 48-53. doi:10.1109/JPHOTOV.2017.2766529
- [14] **Cheegar, M. & et al.** (2013). Effect of Illumination Intensity on Solar Cells Parameters. *Energy Procedia*, 36, 722-729. doi:10.1016/j.egypro.2013.07.084
- [15] **Mirzaev, U. & Abdullaev, E.** (Abril de 2020). Experiment of Open-circuit Voltage in "EPH 2 Advanced Photovoltaics Trainer" Laboratory and Types of PV Cell. *International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS)*, 4(4), 41-46.
- [16] **Banerjee, S. & Anderson, W. A.** (7 de Julio de 1986). Temperature dependence of shunt resistance in photovoltaic devices. *Applied Physics Letter*, 49(1), 38-40. doi:10.1063/1.97076

I. BIBLIOGRAFÍA

- [17] **Dhass, A. D.; Lakshmi, P. & Natarajan, E.** (2016). Investigation of Performance Parameters of Different Photovoltaic Cell Materials using the Lambert-W Function. *Energy Procedia*, 90, 566-573. doi:10.1016/j.egypro.2016.11.225
- [18] **Modi, B. P. & Dhimmar, J. M.** (2012). The temperature dependent ideality factor effect on I-V characteristics of Schottky diode. *2012 1st International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication & Networking*, 1-6. doi:10.1109/ET2ECN.2012.6470063
- [19] **EcoFlow.** (20 de Abril de 2023). *ECOFLOW / BLOG*. Recuperado el 5 de Junio de 2023, de <https://blog.ecoflow.com/us/effects-of-temperature-on-solar-panel-efficiency/>
- [20] **Nasrin, R.; Hasanuzzaman, M. & Rahim, N. A.** (8 de Septiembre de 2017). Effect of high irradiation on photovoltaic power and energy. *International Journal of Energy Research*, 42(1), 1-17. doi:10.1002/er.3907
- [21] **Tudor Cotfas, D. & et al.** (2018). Study of Temperature Coefficients for Parameters of Photovoltaic Cells. *International Journal of Photoenergy*, 2018. doi:10.1155/2018/5945602
- [22] **Hishikawa, Y. & et al.** (Septiembre de 2019). Translation of Solar Cell Performance for Irradiance and Temperature From a Single I-V Curve Without Advance Information of Translation Parameters. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(5), 1195-1201. doi:10.1109/JPHOTOV.2019.2924388
- [23] **Green, M. A.; Blakers, A. W.; & Osterwald, C. R.** (1 de Diciembre de 1985). Characterization of high-efficiency silicon solar cells. *Journal of Applied Physics*, 58(11), 4402-4408. doi:doi.org/10.1063/1.336286
- [24] **SHARP Electronics GmbH.** (s.f.). *ND-AR330H*. Recuperado el 4 de Junio de 2023, de https://secure.sharp.eu/cps/rde/xber/documents/documents/Marketing/Datasheet/1901_N_DAR330H_Poly_Datasheet_ES_v1.pdf
- [25] **HT Italia.** (s.f.). *Solar I-Ve*. Recuperado el 4 de Junio de 2023, de <https://www.ht-instruments.com/en/products/photovoltaic-testers/performance-check/solar-i-ve/>
- [26] **HT Italia.** (s.f.). *HT304N*. Recuperado el 4 de Junio de 2023, de https://www.ht-instruments.com/media/filer_public/43/3b/433b18da-59bc-4f66-b186-e5e7e5dd1c6c/pdf_ht304n_en1-00.pdf
- [27] **HT Italia.** (s.f.). *PT300N*. Recuperado el 4 de Junio de 2023, de https://www.ht-instruments.com/media/filer_public/f7/59/f7592597-cf68-4b89-8f48-f46d300cc531/pt300n_ce.pdf
- [28] **International Electrotechnical Commission.** (2020). *IEC 60904-1:2021*. Estándar internacional, TC 82 - Solar photovoltaic energy systems

II. LISTAS DE FIGURAS Y TABLAS

II.A. Lista de figuras

Si no se especifica la fuente, es porque la figura es original de este trabajo.

Nº.	Nombre	Fuente	Pág.
2.1	Esquema de funcionamiento de una unión p-n	[4]	4
2.2	Intensidad en función del voltaje para una fotocélula según la ecuación de Shockley	---	6
2.3	Curvas I-V y P-V de una fotocélula y sus parámetros	---	7
2.4	Curvas I-V y P-V ideales comparadas con las curvas con alta R_S y baja R_{sh}	[8]	8
2.5	Circuito equivalente de una fotocélula	---	9
2.6	Curva I-V de muestra y sus traslaciones en irradiancia manteniendo la temperatura constante	---	10
2.7	Curva I-V de muestra y sus traslaciones en temperatura manteniendo la irradiancia constante	---	10
3.1	Raíz del error cuadrático medio en la intensidad cometido por los Procedimientos Primero, Segundo y Cuarto	[3]	16
3.2	Error relativo de los valores de ciertos parámetros al trasladar las curvas I-V por el Cuarto Procedimiento	[3]	16
3.3	Dos curvas I-V tomadas a la misma irradiancia pero distinta temperatura que muestran los puntos 1 y 2 para la Ec.28, y el detalle de la región de I_{SC}	---	20
4.1	Fotografías del módulo solar, del trazador I-V, del medidor de irradiancia, del inclinómetro y del termopar	---	22
4.2	Fotografías del montaje experimental	---	23
4.3	Ejemplo de medida de η y R_S con $V_a - V_b$ e $I_a - I_b$ similares a las fluctuaciones y con $V_a - V_b$ e $I_a - I_b$ mayores que las fluctuaciones	---	25
4.4	Para una serie de medidas a distintas temperaturas e irradiancias, la relación de I_{SC} con la temperatura y con la irradiancia	---	26

II. LISTAS DE FIGURAS Y TABLAS

4.5	Distribución de condiciones de irradiancia y temperatura de las medidas de curvas I-V en un día nublado y en un día despejado	---	27
4.6	Regresión lineal de la Ec.32 en un día nublado y en un día despejado	---	27
4.7	Curvas I-V y P-V medidas en las condiciones iniciales, trasladadas a las condiciones finales y medidas en las condiciones finales	---	28
5.1	Variación de R_S en función de la temperatura y de la irradiancia; y de η en función de T y de G	---	30
5.2	Distribución del error relativo de P_{max} en función de la irradiancia	---	31
5.3	Distribución del error relativo de P_{max} en función de la temperatura	---	32
5.4	Distribución de irradiancias y temperaturas para la traslación de curvas a STC	---	32
5.5	Error relativo de la potencia máxima en función de la irradiancia y de la temperatura	---	33
5.6	Error relativo en valor absoluto de la potencia máxima en función de la irradiancia y de la temperatura	---	33
5.7	Curvas I-V trasladadas	---	34
5.8	Curvas P-V trasladadas	---	35
5.9	Curvas I-V objetivo y de mayor error relativo tomadas a temperatura constante	---	36
5.10	Curvas I-V objetivo y de mayor error relativo tomadas a irradiancia constante	---	36

II.B. Lista de tablas

Nº.	Nombre		Pág.
3.1	Ventajas y desventajas de emplear el Cuarto Procedimiento en lugar del Primer o Segundo Procedimientos de la norma IEC 60891:2021		17
4.1	Datos para la traslación que vamos a mostrar como ejemplo		28
5.1	Valores medios de R_S y de η para una tanda de medidas tomada un día despejado		29