

Tipo de Documento : **Procedimiento**  
Nombre del Documento : **Procedimiento de pruebas para medición de curvas I-V en módulos fotovoltaicos**  
Fecha : 04 de octubre de 2022  
Autores : Dr. Edward Fuentealba, Dr. Jorge Rabanal-Arabach, Ing. Javier Astudillo  
Coautores :



**CDEA**  
**CENTRO DESARROLLO**  
**ENERGÉTICO ANTOFAGASTA**  
UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA



Nivel de diseminación		
PU	Público	
PP	Restringido a los autores y a personal de CDEA	
RE	Restringido a un grupo específico de personas definido por coautores	
CO	Confidencial (únicamente a un grupo de personas definido por los autores)	X

Historia			
Versión	Autor	Modificación	Fecha
1	Javier Astudillo	Creación	01/12/2021
2	Edward Fuentealba	Integración de contenido	01/02/2022
3	Javier Astudillo	Modificación de contenido	28/04/2022
4	Jorge Rabanal-Arabach	Modificación de contenido	07/05/2022
5	Javier Astudillo	Modificación de contenido	23/08/2022
6	Jorge Rabanal-Arabach	Modificación de contenido	04/10/2022

Aprobación		
Fecha	Nombre	V.B
01/02/2022	Edward Fuentealba V.	O.K
07/05/2022	Jorge Rabanal Arabach	OK
25/08/2022	Jorge Rabanal-Arabach	OK

DECLARACION DE DERECHOS DE PROPIEDAD

Este documento contiene información, que es propiedad del CDEA. Este documento ni la información contenida en este documento se utilizarán, duplicarán ni comunicarán por ningún medio a un tercero, en su totalidad o en partes, excepto con el consentimiento previo por escrito del CDEA.

## TABLA DE CONTENIDO

1	DEFINICIONES .....	2
2	DESCRIPCIÓN .....	4
2.1	Requerimientos de medición .....	4
2.2	Equipos y material a ser empleados .....	6
3	PROCEDIMIENTO.....	8
3.1	Ejecución de la prueba.....	9
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	11
5	RECOMENDACIONES.....	17
6	BIBLIOGRAFÍA.....	18
7	ANEXOS.....	19
7.1	Planilla de procedimiento: Medición de Curva I-V .....	19

## 1 DEFINICIONES

Absortividad	: Fracción de la radiación incidente que es absorbida, en determinado rango de frecuencias, para una temperatura dada.
Barra de Soporte / Support bars	: Barras de soporte de aluminio anodizado transversales para dar soporte a la estructura del MFV. Usualmente empleadas en MFV de gran área o en algunos que reemplazan el vidrio frontal por polímeros o usan vidrios de espesor inferior a 2 mm.
Cable / Cable	: Cable solar de conexión entre la caja de conexión (junction box) y el conector (MC4) que conecta eléctricamente los módulos. Su longitud estándar es de 1.2 m (uno para el terminal positivo y otro para el terminal negativo). Usualmente, el calibre es de 4 mm <sup>2</sup> de espesor, pero depende de la corriente del MFV.
Caja de empalme / Juntion Box	: Caja de conexiones donde se conectan los string de celdas a los cables externos. En ellas se encuentran los diodos de bypass (normalmente 3) para la protección del módulo. Su protección es IP67.
Celda / Cell	: Sección unitaria de conversión de energía del MFV. Un MFV está habitualmente compuesto de 60, 72, 144 o más celdas.
Conectores / Connectors	: Conector que se ubica en el extremo del cable para interconectar los MFV. Su nomenclatura estandarizada es MC4 o nombre de fantasía según fabricante. Definido para operar en 1000/1500 V, 30 A, IP68 y acorde a la sección cruzada del cable.
DC	: Corriente directa / continua, del inglés <i>Direct Current</i> .
DUT	: Dispositivo bajo prueba, del inglés <i>Device Under Test</i> .

Emisividad	: Intensidad de la radiación emitida por un cuerpo, en determinado rango de frecuencias, para una temperatura dada.
Marco / Frame	: Estructura metálica de los MFV. Construido de aluminio anodizado para la protección mecánica del módulo. En el mercado se dispone de MFV sin marco metálico (“frameless”), empleado en algunas tecnologías vidrio/vidrio.
MFV / PVM	: Módulo Fotovoltaico. Dispositivo de conversión de energía que transforma la luz solar en energía eléctrica de corriente directa.
Parte trasera / Backsheet	: Cara trasera del módulo fabricada usualmente apilando varios polímeros y revestimientos. En módulos monofaciales puede ser de color blanco. En módulos bifaciales puede ser un polímero transparente o un vidrio templado.
PID	: Degradación inducida por potencial eléctrico, del inglés <i>Potential Induced Degradation</i> . Corresponde a una degradación electroquímica de la celda solar causada por la polarización eléctrica a la que está sometida. Usualmente aparece en sistemas que operan a tensión eléctrica superior a 800 V.
SNR	: Relación señal/ruido, del inglés <i>Signal-to-Noise Ratio</i> .
Vidrio / Glass	: Vidrio templado que brinda estabilidad mecánica al MFV y protección a las celdas. Tiene usualmente un espesor de 2 a 4 mm. El vidrio puede incorporar o no capas antirreflejo (ARC) y/o antipolvo (ASC).

## 2 DESCRIPCIÓN

El procedimiento, a grandes rasgos, consta de exponer el módulo fotovoltaico a un haz de luz, sea éste generado con simulador solar o luz natural, y conectar sus terminales a un trazador de curvas, el cual hace un barrido de la tensión eléctrica de operación, midiendo a la vez la corriente que genera el MFV. Esto permite obtener la curva I-V de dicho módulo de manera automática y precisa.

Un trazador de curva I-V es un dispositivo electrónico que produce un barrido de voltaje, que es aplicado al módulo fotovoltaico bajo inspección, el cual responde con una intensidad de corriente acorde al nivel de voltaje, y a la irradiancia y temperatura de operación a la que está sometido.

Los MFV por probar deben de haber aprobado previamente una inspección visual y prueba de aislación. Adicionalmente, ambos cables del módulo deben de estar en buen estado y contar con sus respectivos conectores MC4 (o equivalente). Este procedimiento es aplicable a módulos mono y bifaciales.

Este procedimiento de prueba se basa en los lineamientos establecidos en los estándares IEC 60904-1 e IEC 60904-1-1.

### 2.1 Requerimientos de medición

El IEC 60904-1 indica los requisitos generales de medición para realizar esta prueba:

- Las mediciones de irradiancia deben ser realizados mediante un dispositivo de referencia, ya sea éste de tecnología fotovoltaica o un piranómetro, calibrados. Al primero se le denomina usualmente “celda de referencia”.
- La temperatura del dispositivo de referencia y del DUT deben ser medidos con un instrumento cuya precisión sea de  $\pm 1$  °C y con una repetibilidad de  $\pm 0.5$  °C. Si la temperatura del dispositivo de referencia varía más de 2 °C respecto a la temperatura a la cual fue calibrado, el valor de la calibración debe ser ajustado a la temperatura medida. En el caso de un piranómetro la medición y corrección de temperatura no son necesarios

- La superficie activa del DUT debe ser coplanar con  $\pm 2^\circ$  con la superficie activa del dispositivo de referencia.
- Voltajes y corrientes deben de ser medidos con un instrumento cuya precisión sea de  $\pm 0.2\%$  del voltaje de circuito abierto y corriente de cortocircuitos, medidas utilizando los cables propios del instrumento (no los del módulo) y manteniéndolos lo más cortos posible.
- La corriente de cortocircuito debe ser medida a voltaje 0, usando preferentemente un trazador con carga electrónica activa (*electronic variable bias*) para compensar la caída de voltaje sobre las resistencias en serie externas. De manera alternativa, la corriente de cortocircuito puede ser extrapolada desde la característica voltaje-corriente. La curva es extrapolada en el voltaje 0 siempre que la caída de voltaje no sea mayor a 3% del voltaje de circuito abierto, y que exista una relación lineal entre voltaje y corriente.
- La precisión del procedimiento para corrección de temperatura e irradiancia, en conformidad con IEC 60891, debe ser revisada periódicamente mediante la comparación de las mediciones con un DUT de referencia, a determinadas temperaturas e irradiancia, y compararlos con los resultados con los datos extrapolados en la norma IEC 60904-10.

El equipamiento requerido para la medición de una curva I-V en condiciones de luz naturales, acorde al estándar IEC 60904-1 [1], es:

- Un dispositivo de referencia fotovoltaico o piranómetro que cumpla los requisitos mencionados anteriormente.
- Algún medio para medir la temperatura del dispositivo de referencia que cumpla con los requisitos mencionados anteriormente.
- Equipamiento para determinar la temperatura del DUT como se mencionó anteriormente, o bien utilizando el método de Temperatura Equivalente de Celda especificado en IEC 60904-5.
- (opcional) Dispositivo de seguimiento en 2 ejes, capaz de seguir al sol con una precisión de  $\pm 5^\circ$ .

- (opcional) Un espectro-radiómetro capaz de medir el espectro de irradiancia de la luz solar en el rango de respuesta espectral del DUT y el dispositivo de referencia, en caso de que sean necesarias correcciones espectrales.

Las condiciones ambientales necesarias para realizar la prueba son:

- Irradiancia global,  $G$ , de al menos  $800 \text{ W/m}^2$ .
- La fluctuación de irradiancia global no puede variar más de  $\pm 1\%$  durante las mediciones.

## **2.2 Equipos y material a ser empleados**

En la Tabla 2.1 se listan los materiales necesarios para la realización de esta prueba.

Tabla 2.1. Materiales requeridos.

N°	Nombre	Requisitos/Comentarios	Cantidad
1	Estructura de soporte	Debe permitir que el módulo quede orientado al norte con una inclinación de entre 20° y 30° de inclinación.	1
2	Lámina o superficie negra opaca (no reflectante)	Requerida para los MFV bifaciales, para cubrir la cara posterior.	1
3	Paño de limpieza	Microfibra o similar.	1
4	Agua desmineralizada	Cantidad suficiente para limpiar adecuadamente los sensores de irradiancia. En algunos casos podría ser necesario también limpiar la cara frontal y trasera del módulo.	1
5	Inclinómetro	Debe de tener un error no mayor a $\pm 2^\circ$ .	1
6	Trazador de curvas	Debe tener un error no mayor a $\pm 0.2\%$ en la medición de $V_{OC}$ e $I_{SC}$ .	1
7	Celda de referencia	Es recomendado que tenga la misma respuesta espectral que los módulos basados en tecnologías del silicio.	1
8	Estructura de soporte de la celda de referencia	Debe permitir instalar la celda de referencia al marco del MFV, de manera coplanar al montaje del módulo.	1
9	Sensor de temperatura del módulo	Debe de tener un error no mayor a $\pm 1^\circ\text{C}$ .	3
10	Planilla de procedimiento	Adjunta en el Anexo 7.1 del documento de procedimiento para medición de curva I-V.	1

### 3 PROCEDIMIENTO

Los procesos de medición de la curva y análisis de resultados se encuentran ilustrados en dos diagramas de flujo, uno para cada parte del procedimiento, los cuales se muestran a continuación en la Figura 3.1 y Figura 3.2, respectivamente.

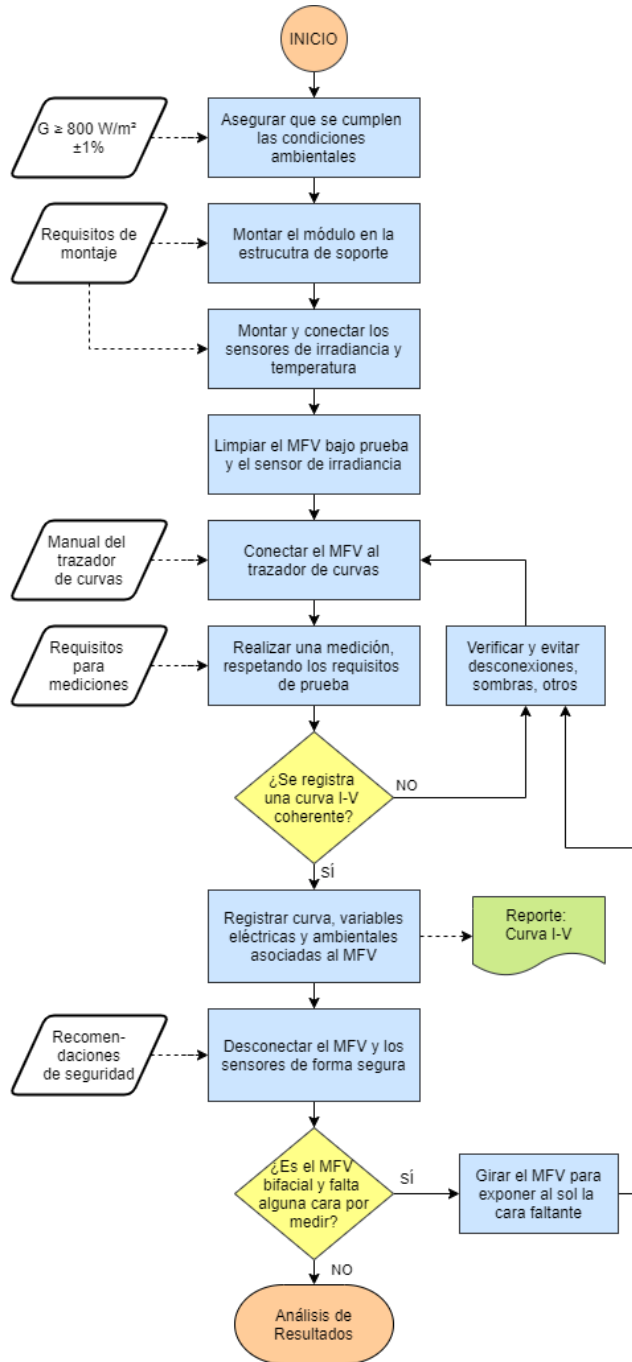


Figura 3.1. Diagrama de flujo del procedimiento de medición de curvas I-V.

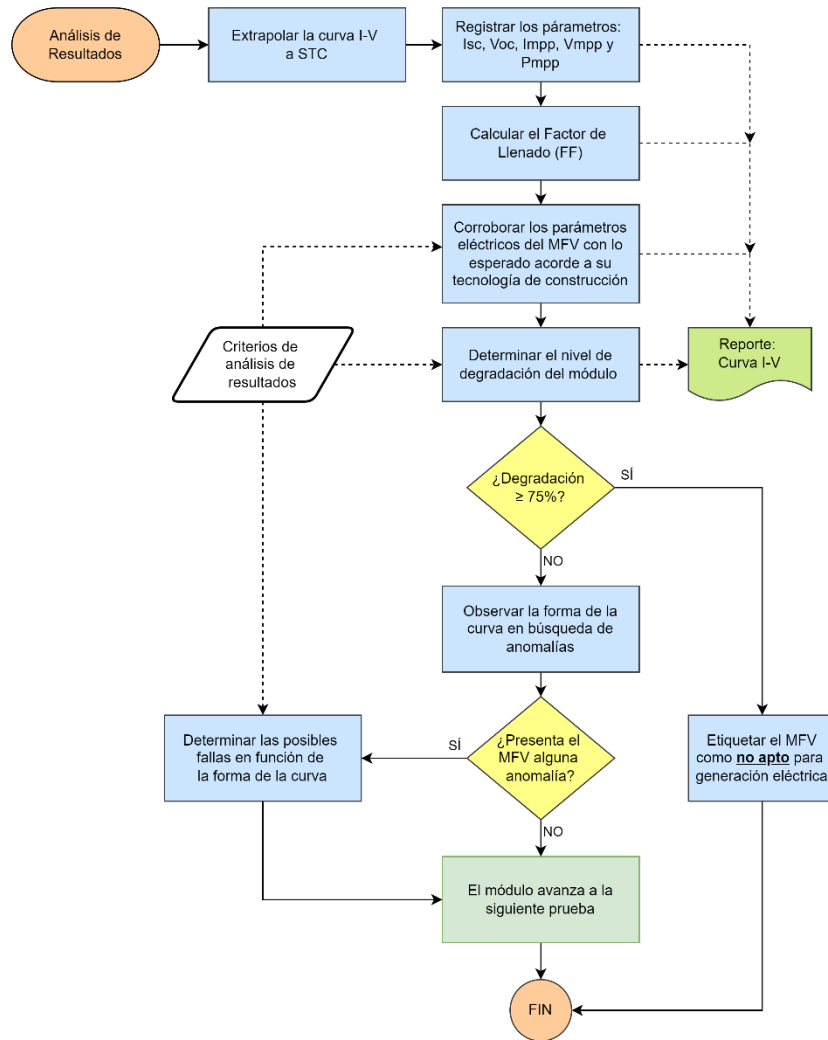


Figura 3.2. Diagrama de flujo del proceso de evaluación de resultados.

### 3.1 Ejecución de la prueba

1. Procurar incorporar el ID del MFV en el software del trazador para mantener un registro y seguimiento de los datos a registrar.
2. **-CONFIGURACIÓN PREVIA DEL TRAZADOR DE CURVAS-**
3. Montar el módulo fotovoltaico en la estructura de soporte.

Se requiere de una estructura de soporte para los módulos, esta debe permitir que los módulos a probar queden orientados hacia el norte con una inclinación de entre 20° y 30°.

Nota: Para módulos bifaciales, la cara que apunta hacia el suelo debe ser cubierta con una superficie color negro opaco, con una reflectancia muy baja.

4. Montar la celda de referencia lo más cerca posible al módulo, asegurándose de que quedé coplanar con este, con una desviación no mayor a  $\pm 2^\circ$
5. Instalar los sensores de temperatura en la parte posterior del DUT.  
Nota: Para módulos bifaciales, es necesario cubrir la cara posterior (con una superficie color negro opaco) después de instalar los sensores de temperatura.
6. Limpiar el DUT y la celda de referencia. La celda de referencia es un sensor delicado, por lo que la limpieza debe ser con el paño de microfibra, realizando movimientos suaves.
7. Conectar la celda de referencia, los sensores de temperatura y el MFV (DUT) al trazador de curvas.
8. **-OPERACIÓN DEL TRAZADOR DE CURVAS-** Asegurarse de que durante la toma de mediciones las temperaturas del DUT y la celda de referencia se mantienen relativamente constantes, con no más de  $\pm 1^\circ\text{C}$  de variación, y que la irradiancia medida por la celda de referencia tiene una variación no mayor a  $\pm 1\%$ .
9. Verificar que se logra un registro exitoso de las variables. De lo contrario, verificar las conexiones o sombras indeseadas, y volver al punto 5.
10. Desconectar los sensores y el módulo del trazador de curvas
11. Desmontar los sensores y el MFV en el orden inverso al cual fueron montados.
12. Si el módulo es bifacial y una de las caras no ha sido medida aún, entonces se debe repetir el proceso de medición, volviendo al punto 5, pero esta vez con el MFV montado con la cara posterior (o aquella aún no medida) apuntando hacia el cielo.

## 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En primer lugar, es deseable extrapolar la curva medida a condiciones estándar de pruebas (STC), ya que todos los datos de referencia son entregados bajo estas condiciones. Las correcciones se realizan de acuerdo con lo expuesto en IEC 60891 (para dispositivos lineales). Para dispositivos no lineales, referirse a IEC 60904-10 para determinar en qué rango el dispositivo puede ser considerado lineal.

Luego, es posible realizar inferencias de los datos obtenidos tan sólo si:

- La corriente de cortocircuito es consistente con el área de las celdas, la tecnología utilizada y las conexiones de las celdas dentro del módulo (número de celdas en serie y paralelo).
- El voltaje de circuito abierto es consistente con la tecnología utilizada y las conexiones de las celdas dentro del módulo (número de celdas en serie y paralelo).
- El factor de llenado es consistente a lo esperado para la tecnología con la que el módulo fue construido.

Valores de referencia para estos puntos se muestran en la Tabla 4.1, a continuación:

Tabla 4.1. Valores eléctricos típicos para MFV basados en c-Si a STC [2].

	Celda de silicio policristalino	Celda de silicio monocristalino	Valor esperado para el módulo FV
$J_{SC}$ : Densidad de corriente [mA/cm <sup>2</sup> ]	28 – 33	30 – 35	$A \cdot J_{SC}$
$V_{OC}$ : Voltaje de circuito abierto [mV]	550 – 600	600 – 700	$N_S \cdot V_{OC}$
$FF$ : Factor de llenado	0.75 – 0.80	0.80 – 0.85	--

$A$ : área total que cubren las celdas solares.

$N_S$ : cantidad de celdas conectadas en serie.

Además, contando con la información eléctrica acerca del módulo (presente en la etiqueta) o bien una medición de otro módulo de iguales características, hecha bajo

condiciones y con equipamiento comparable, es posible determinar el nivel de degradación, fallas y otros problemas técnicos.

Para calcular el porcentaje de degradación del módulo se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{MPP} = \frac{P_{MPP,R}}{P_{MPP,0}} - 1 \quad (4.1)$$

donde,

$P_{MPP,0}$ : Potencia a STC indicada por etiqueta del MFV (de fábrica).

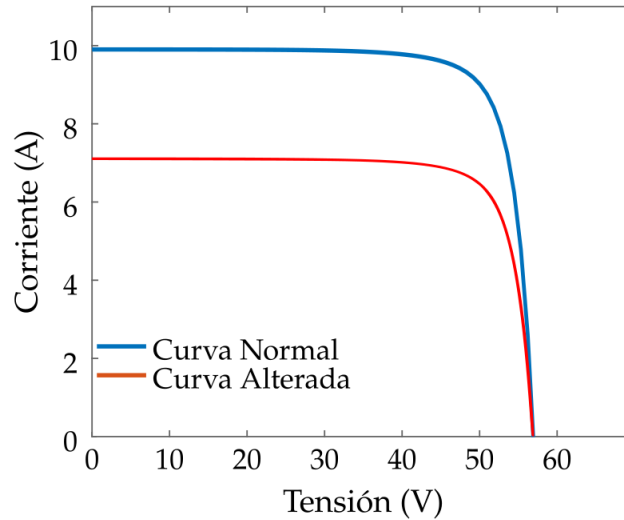
$P_{MPP,R}$ : Potencia medida extrapolada a STC.

El valor de  $\Delta P_{MPP}$  usualmente es negativo, indicando una degradación del MFV. Si por alguna razón es mucho mayor a 1.0, puede ser debido a un error en la extrapolación (e.g., causado por coeficientes de temperatura erróneos), en el registro o en la medición.

Por otra parte, es posible observar la forma de la curva en búsqueda de anomalías. Las diversas formas que se pueden encontrar son características de determinados tipos de fallas. A continuación, se presentan las anomalías más comunes de la curva I-V junto con sus posibles causas:

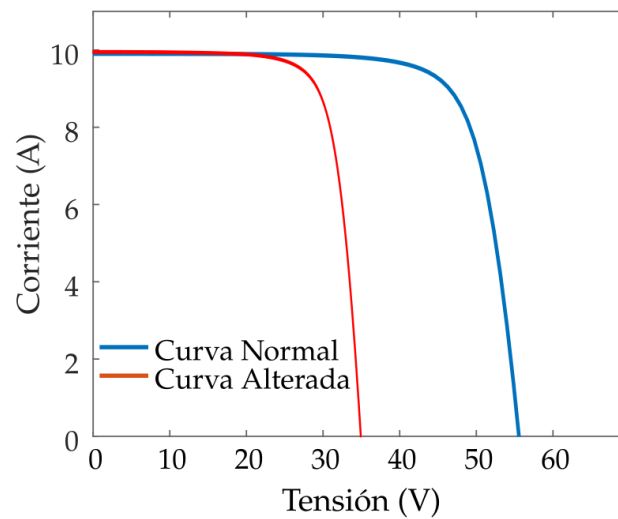
- Una corriente de cortocircuito ( $I_{SC}$ ) más baja de lo esperado puede estar causada por:
  - pérdida de transparencia del encapsulante (tinción café o amarilla),
  - degradación del vidrio frontal,
  - delaminación,
  - corrosión del tratamiento antirreflejo, y/o
  - celdas rotas/agrietadas.

Dependiendo de cuan uniformes (o no) sean las fallas la forma de la curva se verá afectada de diferente manera. A continuación, en la Figura 4.1, se presenta una curva con esta anomalía a modo de ilustración:

Figura 4.1. Curva I-V con disminución de  $I_{sc}$ .

- Un voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) más bajo de lo esperado puede estar causado por:
  - degradación de las celdas,
  - *shunts* entre celdas,
  - fallas (cortocircuito) en los diodos de *bypass*, y/o
  - degradación inducida por potencial, PID.

En la Figura 4.2, se presenta una curva con esta anomalía:

Figura 4.2. Curva I-V con disminución de  $V_{oc}$ .

- Un incremento de la resistencia en serie del módulo ( $R_S$ ) se manifiesta como una disminución de la pendiente de la curva I-V cerca del  $V_{OC}$ . Esto puede estar causado por:
  - desconexión parcial o total de los electrodos (*ribbons*),
  - corrosión en las conexiones de la *junction box*,
  - corrosión de las interconexiones, y/o
  - conexiones sueltas (mal contacto).

En la Figura 4.3 se presenta una curva con esta anomalía a modo de ilustración:

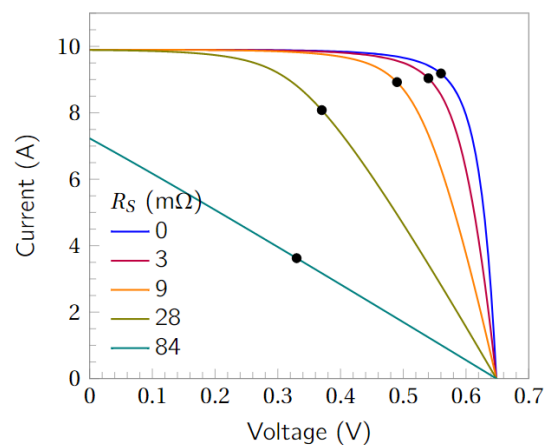


Figura 4.3. Curva I-V con pendiente disminuida cerca a  $V_{OC}$  debido a  $R_S$  [3].

- Una disminución de la resistencia en paralelo del módulo ( $R_{Sh}$  o  $R_P$ ) se manifiesta como un incremento de la pendiente de la curva I-V cerca de la  $I_{SC}$ . Esto puede estar causado por *shunts* dentro de las celdas (cortocircuitos internos) y/o sus interconexiones o ligeras disparidades entre las celdas. Las mismas fallas que causan una disminución de  $I_{SC}$  pueden manifestarse de esta manera cuando son leves y poco uniformes. A modo de ilustración, en la Figura 4.4 se presenta una curva con esta anomalía.

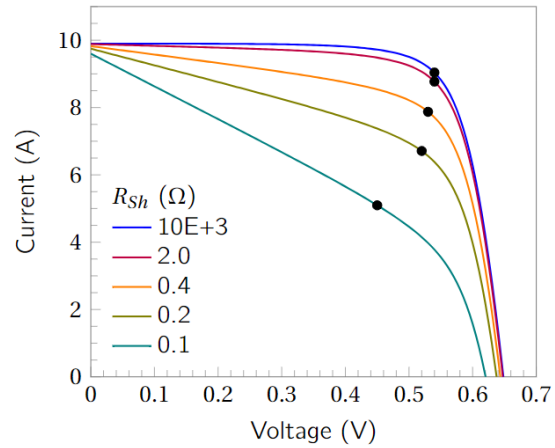


Figura 4.4. Curva I-V con pendiente aumentada cerca de  $I_{sc}$  debido a una disminución de  $R_{sh}$  [3].

- La curva I-V presenta escalones cuando existen:
  - defectos en los diodos de bypass,
  - celdas rotas o
  - una gran disparidad entre las celdas.

En la Figura 4.5, se presenta una curva con esta anomalía a modo de ilustración:

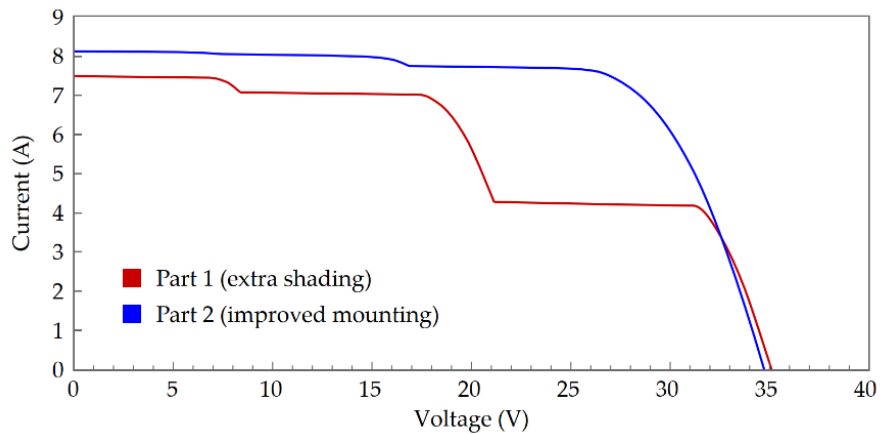







Figura 4.5. Curva I-V con escalones.

Así, dicho lo anterior, un MFV será etiquetado de la siguiente forma:

Etiqueta	Veredicto	Criterio
	El MFV <b>pasa</b> la prueba	No presenta anomalías en su curva I-V y presenta una degradación de potencia inferior al 40% ( $P \geq 0.60 \times P_{etiqueta}$ )
	El MFV <b>pasa</b> la prueba <b>con observaciones</b>	Presenta anomalías en su curva I-V con una degradación de potencia inferior al 40% ( $P \geq 0.60 \times P_{etiqueta}$ )
	El MFV <b>pasa</b> la prueba <u>Podría ser reparado</u>	Presenta una degradación de potencia inferior al 75% ( $P \geq 0.25 \times P_{etiqueta}$ ) Y siempre y cuando la relación de corriente y voltaje sean mayor o igual a : $\frac{V_{OC,medido}}{V_{OC,etiqueta}} \geq 0.2$ $\frac{I_{SC,medido}}{I_{SC,etiqueta}} \geq 0.8$ Se cataloga de “podría ser reparado” en caso de observar: $0.6 \leq \frac{V_{OC,medido}}{V_{OC,etiqueta}} < 0.9 \rightarrow 1 \text{ diodo dañado}$ $0.2 \leq \frac{V_{OC,medido}}{V_{OC,etiqueta}} < 0.6 \rightarrow 2 \text{ diodos dañados}$
	El MFV <b>no es apto para generación</b>	Presenta una degradación de potencia igual o superior al 75% ( $P < 0.25 \times P_{etiqueta}$ ) siendo el valor de relación de voltaje mayor o igual al 35% $\frac{V_{OC,medido}}{V_{OC,etiqueta}} \geq 0.35$
	El MFV <b>no pasa</b> la prueba, <u>Podría ser reparado</u>	Se cataloga de “podría ser reparado” si la relación de voltaje es menor al 35% $\frac{V_{OC,medido}}{V_{OC,etiqueta}} < 0.35$

## 5 RECOMENDACIONES

Se recomienda conocer de antemano los valores característicos del MFV en condiciones estándar (indicados en el datasheet). De esta forma se tendrá una idea de los niveles de corriente, voltaje y potencia esperados. Esto también permite configurar adecuadamente los parámetros en aquellos trazadores de curva que así lo requieren.

Se recomienda tener cuidado con los valores de calibración del sensor de referencia. Un valor errado podría incurrir en un error en la extrapolación. En algunas ocasiones los valores mostrados por el trazador de curva son directamente traducidos a STC (extrapolados). Si existe una gran desviación entre lo que mide el sensor de referencia y la corriente que entrega el MFV (DUT), la extrapolación entregará valores de corriente superior al 10% del etiquetado (incluso 50% o más).

Se recomienda visualizar tanto los valores medidos actuales (real medidos), y no sólo observar los valores extrapolados a STC.

Se recomienda usar el siguiente formato para nombrar a las fotografías:

I"Últimos5digitosdelINS"-AAMMDD\_hhmm

Ilustrado con un ejemplo, el nombre del archivo de una fotografía tomada el 02 de enero de 2022 a las 10:15, a un MFV cuyo número de serie es 19130B151021120016090204, sería:

I90204-220102\_1015

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEC, «IEC 60904-1 Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics,» International Electrotechnical Commission, Geneva, Suiza, 2006.
- [2] IEA-PVPS, «Review of Failures of Photovoltaic Modules,» IEA-PVPS, 2014.
- [3] J. Rabanal-Arabach, «Development of a c-Si Photovoltaic Module for Desert Climates,» Universität Konstanz, Konstanz, Alemania, 2019.
- [4] Ossila Ltd., «Measuring and Analysing an I-V Curve,» [En línea]. Available: <https://www.ossila.com/pages/iv-curves-measurement>. [Último acceso: 19 Enero 2022].
- [5] Ossila Ltd., «Solar Cells: A Guide to Theory and Measurement,» [En línea]. Available: <https://www.ossila.com/pages/solar-cells-theory>. [Último acceso: 2022 Enero 20].

## 7 ANEXOS

### 7.1 Planilla de procedimiento: Medición de Curva I-V

Número de serie del MFV:
Nombre del archivo de la medición:

Parámetro	Valor medido	Unidad
$V_{OC}$		V
$I_{SC}$		A
$V_{MPP}$		V
$I_{MPP}$		A
$P_{MPP}$		W
$FF.$		(adim.)

Parámetro	Valor medido	Unidad
$T_{Mod}$		°C
G		W/m <sup>2</sup>

¿Presenta alguna anomalía la curva I-V?

(de presentar, dibujar la curva)

<hr/> <hr/> <hr/> <hr/>	
-------------------------	--

Comentarios:

--