

Tipo de Documento : **Procedimiento**
 Nombre del Documento : **Procedimiento de pruebas para detección de fallas en módulos descartados**
 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	CEA-Liten	Observaciones al documento	12/07/2022
6	Javier Astudillo	Modificación de contenido	23/08/2022
7	Jorge Rabanal-Arabach	Integración 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

DECLARACIÓN 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.

PRÓLOGO

El presente corresponde a los procedimientos de pruebas para determinar el estado de un módulo fotovoltaico, siendo organizada en seis documentos. El primer corresponde al documento principal general (este documento), el cual entrega definiciones, da las directrices generales y resume los procedimientos, indicando los equipos y materiales necesarios para completar el total de las pruebas.

Los otros cinco documentos corresponden a:

1. Documento sobre procedimiento de Inspección Visual.
2. Documento sobre procedimiento para medición de Aislación Eléctrica.
3. Documento sobre procedimiento para medida de Curva I-V.
4. Documento sobre procedimiento para ensayo de Termografía.
5. Documento sobre procedimiento para ensayo de Electroluminiscencia.

Cada documento incorpora una planilla de registro (lista de comprobación), siendo la planilla incorporada en el presente documento, la de ingreso general del módulo, donde se debe detallar la fecha de ingreso al procedimiento, el sistema en que estuvo montado y sus características de etiqueta. El resto de las planillas de registro están integradas en el documento respectivo de cada prueba y solicitan información específica necesaria en cada prueba.

TABLA DE CONTENIDO

1	DEFINICIONES	4
2	DESCRIPCIÓN	7
2.1	Módulo Fotovoltaico	7
2.2	Celda Fotovoltaica.....	9
2.3	Vidrio Frontal (monofaciales) y/o Trasero (bifaciales)	10
2.4	<i>Backsheet</i>	11
2.5	Marco	11
2.6	Caja de conexiones.....	12
2.7	Cable de interconexión.....	14
2.8	Conectores.....	14
2.9	Etiqueta	15
2.10	Medición de Resistencia de Aislación Eléctrica	16
2.11	Medición de Curva I-V.....	17
2.12	Termografía	18
2.13	Electroluminiscencia	19
3	PROCEDIMIENTO.....	21
3.1	Inspección Visual	21
3.2	Medición de aislación eléctrica.....	21
3.3	Medición de la curva I-V.....	21
3.4	Ensayo de termografía	21
3.5	Ensayo de electroluminiscencia	22
3.6	Listas de comprobación	23
3.7	Equipos y material necesarios.....	23

4	RECOMENDACIONES.....	30
5	BIBLIOGRAFÍA.....	31
6	ANEXOS.....	33
6.1	Planilla de registro electrónico.....	33

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 ² 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).

Este documento ha sido confeccionado bajo las recomendaciones de la ISO 80000-1 para estandarizar tanto el separador de decimales como el agrupador de miles. Así, se usa un punto (.) para lo primero, y un espacio concatenado para lo segundo. Esto

en pro de evitar confusiones con ciertas discrepancias de lenguaje, especialmente con aquellos usados para base de datos y herramientas computacionales.

2 DESCRIPCIÓN

Este procedimiento está pensado para la detección de fallas en módulos, basados en tecnologías del silicio, dados de baja de centrales fotovoltaicas. El objetivo de este procedimiento es poder identificar la gravedad o compromiso de las fallas que un módulo fotovoltaico (MFV) presenta, con la finalidad de identificar aquellos que sean aptos para poder volver a emplearlos en la generación de energía eléctrica.

Para este fin se han seleccionado cinco pruebas, luego de consultar documentación técnica, reportes y normas, las cuales se han dispuesto en una secuencia lógica, completando un procedimiento selectivo basado en el descarte. Gracias a esto, los MFV con las fallas más severas quedarán eliminados del proceso en las etapas tempranas. Se espera que todos aquellos módulos que llegan al final del proceso tengan fallas a lo más moderadas y que no presenten riesgos, tales como: descarga eléctrica o ignición. Los MFV que sean rechazados se consideran no aptos para ser reutilizados en aplicaciones de generación de electricidad y podrán emplearse en otras aplicaciones o ser desechados conforme sea exigido por las leyes y regulaciones vigentes.

Las pruebas han sido basadas en recomendaciones internacionales confeccionadas y validadas por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), reportes técnicos emitidos por la IEA-PVS y recomendaciones de los fabricantes de los equipos utilizados en las pruebas, lo que permite validar la realización de las pruebas y los resultados obtenidos de ellas.

2.1 Módulo Fotovoltaico

Los módulos fotovoltaicos aprovechan la energía solar para convertirla en energía eléctrica, a través del efecto fotovoltaico. Existen diversas tecnologías fotovoltaicas, pero este procedimiento se centra en las tecnologías de silicio cristalino, c-Si (ver Figura 2.1). Estas tecnologías se componen por obleas (*wafers*) de diversos tamaños, como se presenta en la Figura 2.2. Estas obleas se transforman en celdas fotovoltaicas

después de un proceso de metalización y otras etapas que entregan las celdas para ser agrupadas en la formación de un módulo fotovoltaico.

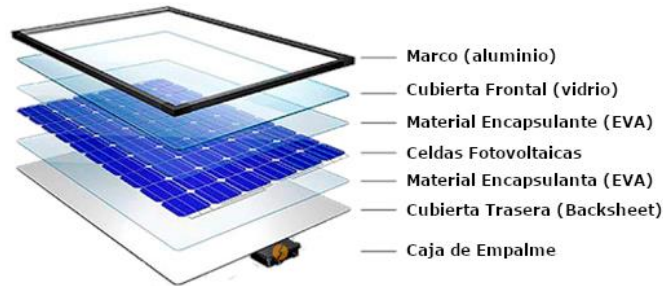


Figura 2.1 Composición de un módulo fotovoltaico¹

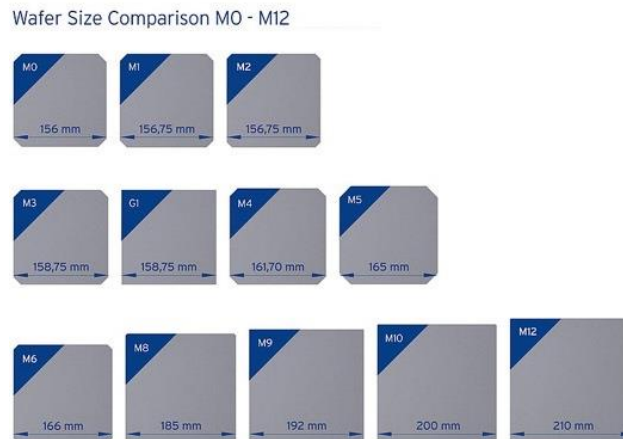


Figura 2.2. Diversos tamaños de obleas²

Existen diversas tecnologías de módulos fotovoltaicos en el mercado, las cuales se componen de un número variado de celdas, las cuales pueden ser de tamaño completo o cortadas (HC: *half-cut cells*), como presenta la Figura 2.3.

¹ Fuente : <http://www.roofway.com>

² Fuente : <https://www.novergysolar.com>

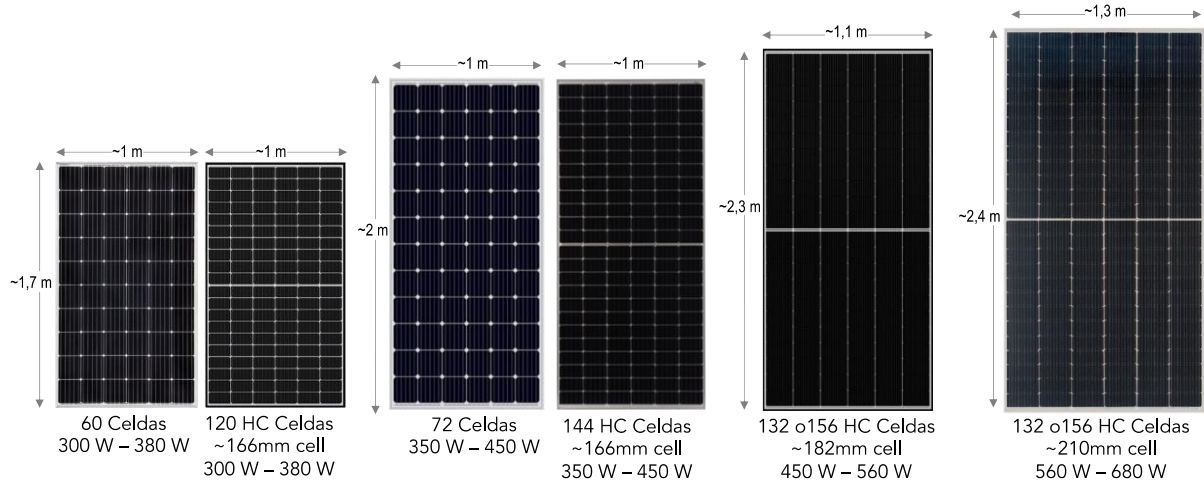


Figura 2.3. Módulos fotovoltaicos comerciales.

La misión de los materiales que encapsulan el módulo (capa frontal y trasera, y encapsulante) es aislar el conjunto de celdas de las inclemencias del ambiente, dejando pasar la mayor cantidad de fotones hacia la celda. Los principales componentes de un módulo fotovoltaicos son:

- a) Celda fotovoltaica
- b) Vidrio Frontal y/o Trasero
- c) *Backsheet*
- d) Marco
- e) Caja de conexiones
- f) Cable
- g) Conectores
- h) Etiqueta

2.2 Celda Fotovoltaica

La celda fotovoltaica es la encargada de convertir la luz solar en energía eléctrica y está compuesta por la oblea de silicio tratada e impresa de conductores de plata llamados *busbar* y *fingers*.

Los *Busbar* son unas barras metálicas que conducen la electricidad, que van impresas sobre las caras de la celda. Un tamaño apropiado permite disminuir las pérdidas por

efecto Joule, aprovechando así en mayor medida la potencia generada por las celdas, mejorando la capacidad de producción del MFV.

En las celdas de silicio cristalino, se pueden apreciar una cantidad de líneas muy finas que cruzan toda la celda. Estas líneas, denominadas “*fingers*”, tienen como función recoger los portadores de carga generados por las celdas y canalizarlos hacia el *busbar*, donde se conecta el *ribbon* por medio de una soldadura de estaño. Este *ribbon* o *tabbing wire*, es un conductor, usualmente de cobre recubierto de plata y estaño, que conecta cada celda con las demás formando una serie eléctrica.

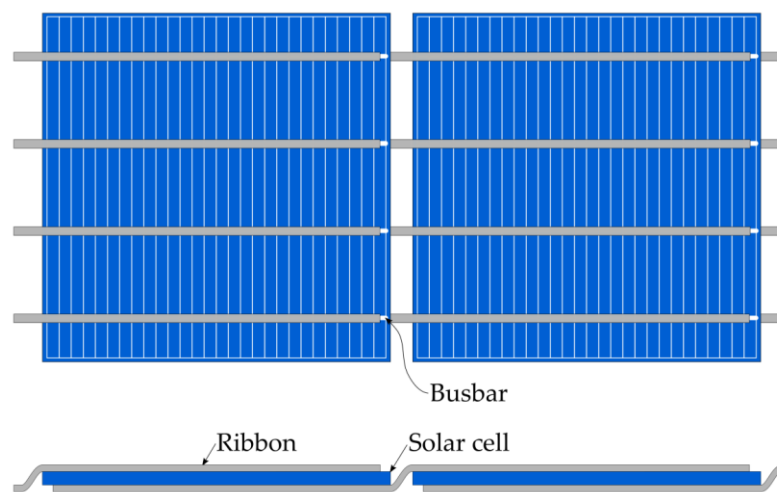


Figura 2.4. Celda solar. [10]

Existe también la opción de conectar los *busbar* con los *ribbons* usando pegamento eléctricamente conductivo (ECA, el inglés *electrical conductive adhesive*).

2.3 Vidrio Frontal (monofaciales) y/o Trasero (bifaciales)

El vidrio fotovoltaico es de bajo contenido de hierro para mejorar su transmisividad, además de ser templado para resistir a impactos y fuerzas de torsión provocadas por el viento. Se fabrica usualmente con espesores de 2.0 a 3.2 mm (ver Figura 2.5).

El vidrio trasero es de similares condiciones que el frontal. Para tecnologías bifaciales, el espesor del vidrio puede disminuir para reducir el peso del módulo, pero sin sacrificar su resistencia. Es usual ver configuraciones de doble vidrio con espesores de 2.0 mm por cada cara.

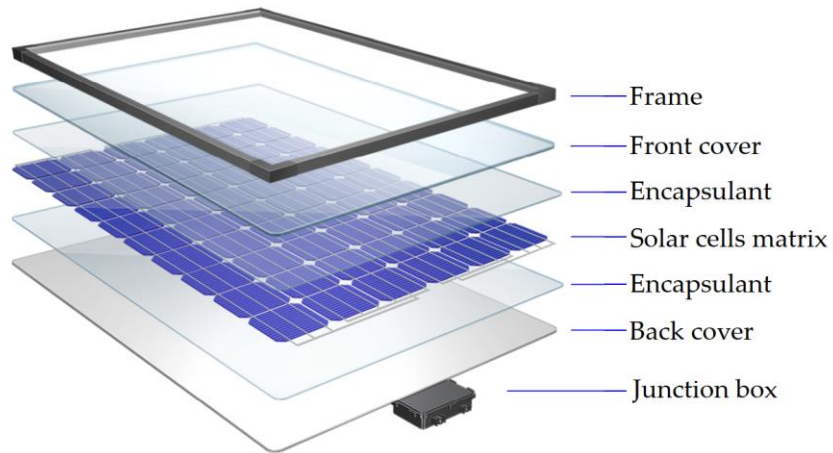


Figura 2.5. Composición de MFV, donde se presenta el vidrio templado frontal. [10]

2.4 Backsheet

La parte trasera de los módulos se conoce como *backsheet*. Es usualmente una lámina polimérica de tipo TPT o PVF (poliéster y polivinilos) de color blanco. Esta superficie es la más frágil del MFV.

2.5 Marco

El marco de aluminio anodizado cumple la función de dar resistencia al MFV para su traslado, instalación y operación, además de ofrecer un punto metálico de conexión para drenar a tierra la estática generada por el roce del viento, reduciendo los fenómenos de PID. En el mercado existen MFV con marco y sin marco metálico. El marco permite la sujeción del MFV a la estructura de soporte, a través de clip metálicos de sujeción. Ejemplos de estos se muestran en la Figura 2.6. También presenta perforaciones para montar el MFV en superficies sin uso de clips metálicos y drenajes para evitar acumulación de rocíos y/o de sarro.

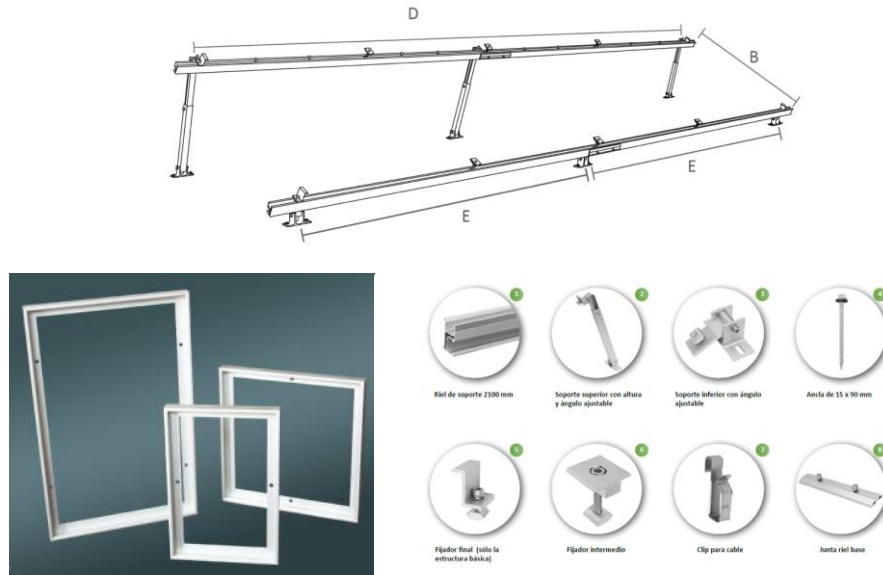


Figura 2.6. Marco metálico de un MFV y accesorios de montaje³.

2.6 Caja de conexiones

La caja de conexiones o Junction Box (j-box) se ubica en la cara trasera superior de los módulos monofaciales y bifaciales de celdas sin cortar. Cuando las celdas son cortadas, la caja de conexiones se ubica usualmente en la parte trasera central del MFV (ver Figura 2.7), para evitar pérdidas por sombreadamiento. La caja de conexiones permite unir los string de celdas y generar un polo positivo y negativo del módulo total. Además, internamente se ubican los diodos de *bypass* para reducir las pérdidas por sombreadamiento o daños parciales del MFV. Cuando el MFV está fabricado con celdas cortadas a la mitad, la caja de conexiones se ubica en la parte central del MFV, evitando así que la resistencia serie de la conexión de celdas incremente considerablemente. Ejemplo de j-box al centro del MFV se muestra en la Figura 2.8.

Los diodos de protección que van instalados en la caja de protección (ver Figura 2.9) tienen como función evitar los **puntos calientes y sombreados**, que pueden afectar negativamente al rendimiento del panel. El punto caliente (o *hot spot*) tiene lugar cuando en una serie de células una tiene un defecto de fabricación o se encuentra parcialmente sombreada, que es el caso más corriente y que presenta mayor riesgo

³ Fuente : <http://bmassolar.com/>

en una instalación fotovoltaica, especialmente cuando el número de módulos en serie es elevado [1].

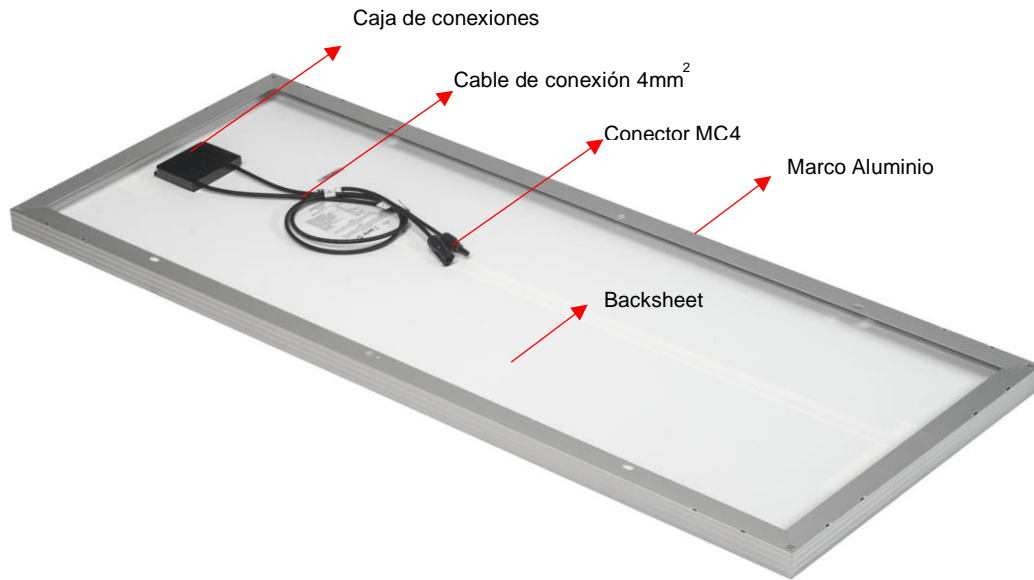


Figura 2.7. Descripción de parte MFV monofaciales, parte trasera.

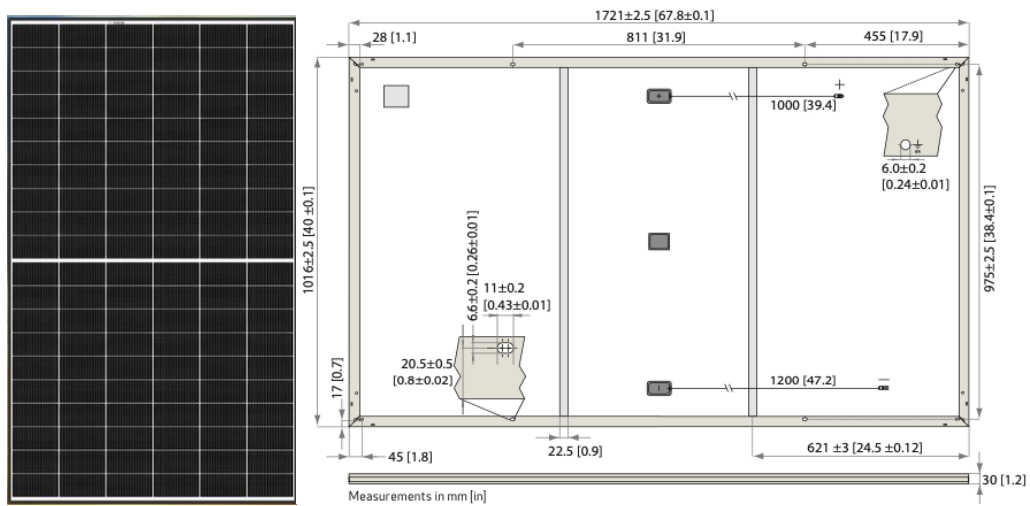


Figura 2.8. Módulo REC 380 Wp, Serie Alpha.



Figura 2.9. Caja de conexión y punto de conexión diodos de *bypass* [2].

2.7 Cable de interconexión

El cable empleado para interconectar los MFV (terminal positivo y terminal negativo) se conoce usualmente como cable solar⁴. Normalmente su dimensión es de 1 a 1.2 m de largo, con 4 mm² de espesor. Existen de diversos colores, pero en el módulo son de color negro. Este cable tiene una protección para radiación ultravioleta, pero no se aconseja exponerlo directo al sol (considerando la vida útil del proyecto).



Figura 2.10. Cable solar [2].

2.8 Conectores

Los conectores se emplean para generar una conexión fiable, y fácilmente reversible, entre los módulos y el resto del circuito. Actualmente el estándar es el MC4 (Figura 2.11), el cual es necesario emplear una crimpadora para remover el aislante del cable y presionar éste con el conector metálico. Luego, se cierra el conector, y se aprieta

⁴ Cable con mejores capacidades de resistir la radiación UV debido a la composición de sus materiales. Este cable presenta mayor durabilidad al exponerse directamente al Sol que otros conductores del mercado.

mediante la rosca del conector, generalmente con la ayuda de una herramienta adicional, diseñada para este fin. Esto se puede apreciar en la Figura 2.12.



Figura 2.11. Tipo de conectores MC4 [2].



Figura 2.12. Crimpadora, herramienta de apriete y forma de armar conector.

2.9 Etiqueta

La etiqueta del MFV se ubica en la parte trasera. Esta debe contener toda la información técnica del MFV en condiciones STC^5 (*Standard Test Conditions*) las cuales considera T_{celda} a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, Irradiancia recibida por la celda $1\ 000\ \text{W/m}^2$ y una

⁵ Corresponden a la irradiancia y al espectro de la luz solar que incide en un día claro sobre una superficie orientada al sol a 37° con el sol a un ángulo de $41,81^{\circ}$ sobre el horizonte. Esta condición representa aproximadamente el mediodía solar cerca de los equinoccios de primavera y otoño en los Estados Unidos continentales con la superficie de la célula orientada directamente al sol. Sin embargo, estas condiciones rara vez se dan en el mundo real. Las mediciones de rendimiento basadas en el STC se aplican en las pruebas de flash de muchos fabricantes.

masa de aire (AM) igual a 1.5. Las características más destacadas son: P_{max} , potencia máxima del módulo, tolerancia de salida (+5%), Corriente y tensión máximas a condiciones MPPT, corriente de corto circuito y tensión de vacío. Un ejemplo de etiqueta se muestra en la Figura 2.13. Opcionalmente se puede incorporar las características del MFV bajo condiciones nominales de operación, NMOT. Todos estos parámetros son empleados en la modelación del módulo fotovoltaico y sirven para dimensionar el campo solar. En ningún caso esta etiqueta deberá estar borrosa o despegada del MFV.



Figura 2.13. Formato de etiquetas de MFV.

2.10 Medición de Resistencia de Aislación Eléctrica

La resistencia eléctrica de un MFV es un parámetro de gran importancia para la operación de estos. Una baja aislación permite que se produzcan fallas a tierra, al mismo tiempo que son un riesgo de seguridad para las personas que entran en contacto con los MFV. Con el paso del tiempo, la resistencia de la aislación eléctrica va disminuyendo, viéndose afectada por factores eléctricos, mecánicos, térmicos, químicos y ambientales.

Esta resistencia de aislación es sensible tanto a temperatura como a humedad ambiental, por lo que estos factores se deben considerar para poder realizar un proceso adecuado de medición de la resistencia de aislación eléctrica. Una correcta medición permite determinar el nivel de desgaste de la aislación, tanto en términos de resistencia como en disminución del voltaje resistido antes de sufrir una ruptura dieléctrica.

2.11 Medición de Curva I-V

Una curva I-V es una representación gráfica de la relación existente entre el voltaje aplicado a un dispositivo y la corriente que fluye por él. La forma de la curva permite entender de mejor manera la operación del dispositivo que la generó. Existen tantos tipos de curvas I-V como existen tipos de componente electrónicos, por lo cual estas curvas pueden tener formas muy diferentes entre ellas.

Un aspecto básico de la operación de un componente electrónico puede ser deducido a partir de la posición de la curva en el plano I-V. Dicho plano se puede dividir en 4 cuadrantes, dependiendo de en qué cuadrante se encuentre la curva se podrá saber si el dispositivo es activo o pasivo. Los cuadrantes se pueden observar en la Figura 2.14(a). Un dispositivo que opere en el primer o tercer cuadrante, en donde el voltaje y la corriente tienen la misma polaridad, es un dispositivo pasivo, es decir, consumen potencia eléctrica. Por otra parte, aquellos dispositivos que operan en el segundo o cuarto cuadrante, en donde la corriente y el voltaje tienen polaridades opuestas, es un dispositivo activo, los cuales generan potencia eléctrica

Las celdas solares en la oscuridad se comportan de manera idéntica a un diodo, pero al ser expuestas a luz su curva I-V se desplaza hacia el cuarto cuadrante (Figura 2.14(b)), volviendo a la celda en un dispositivo activo, entregando energía al circuito en el cual se conecte. Varias propiedades importantes de las celdas solares pueden ser extraídas a partir de su curva I-V: el voltaje de circuito abierto y la corriente de cortocircuito son los puntos en los cuales la curva intercepta a los ejes X e Y respectivamente. Adicionalmente, es posible utilizar el gradiente de la curva en dichos puntos de intercepción para estimar los valores de resistencia en serie y paralelo [3].

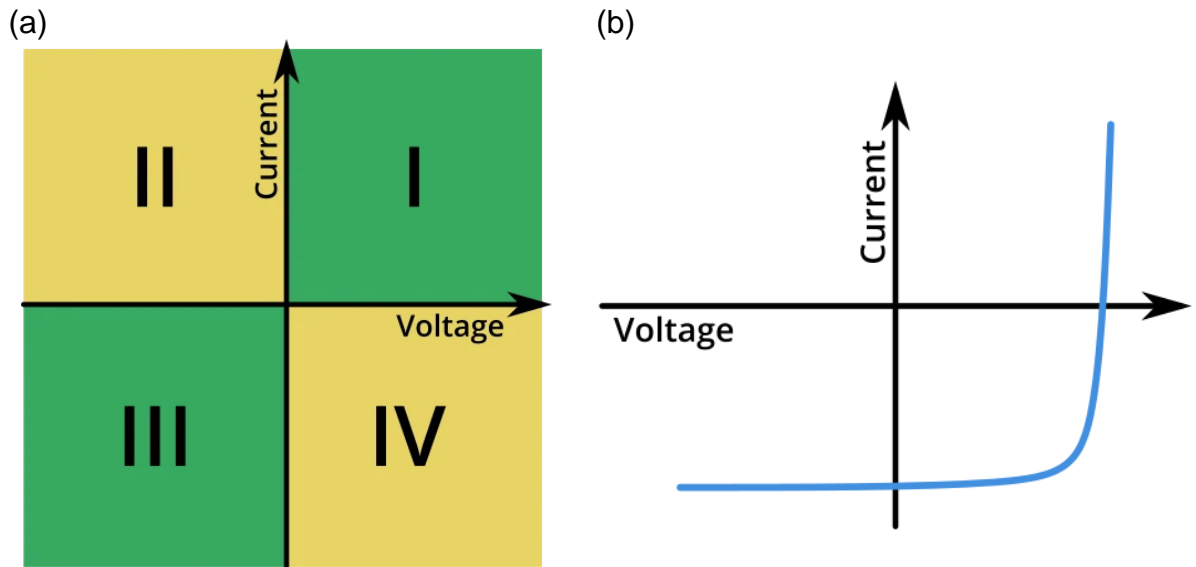


Figura 2.14. (a) Plano I-V y sus cuadrantes⁶ ; (b) curva I-V típica.

2.12 Termografía

La radiación electromagnética que interactúa con la materia también alcanza un estado de equilibrio térmico con una temperatura definida, este tipo de radiación electromagnética es llamado radiación térmica. Un cuerpo que se encuentra en equilibrio térmico se encuentra constantemente emitiendo y absorbiendo radiación. Aquel cuerpo que es un perfecto absorbente de radiación se denomina cuerpo negro, y es con este cuerpo teórico con el que se comparan los objetos reales para estudiar sus emisividades. [4]

La termografía es una técnica que utiliza cámaras termográficas para detectar dicha radiación electromagnética, la cual se encuentra en el rango infrarrojo, y producir imágenes a partir de esta radiación térmica. A medida que la temperatura de un objeto aumenta, también lo hace la cantidad de radiación térmica que este irradia, lo que significa que mediante termografía es posible observar las variaciones de temperatura. Al utilizar una cámara termográfica aquellos cuerpos que generan calor contrastan con el fondo a temperatura ambiente, lo que permite aplicar termografías sin importar la hora del día.

⁶ <https://www.ossila.com/pages/iv-curves-measurement>

Es posible distinguir entre termografías activas y pasivas. La termografía pasiva es aquella que utiliza la temperatura natural de un objeto para crear una imagen, mientras que la activa involucra calentar al objeto para luego observar como este calor se disipa. [5]

En un módulo fotovoltaico promedio, entre un 16-22% de la radiación solar es absorbida y convertida en electricidad, mientras que el resto se disipa en forma de calor, o bien no es absorbida pero reflejada de vuelta al entorno. Uno de los factores que inciden en el calentamiento son las áreas de panel que no son celdas fotovoltaicas, ya que estas zonas no generan electricidad y toda la energía que absorben la disipan como calor. Esto se ve influenciado fuertemente por el material y color de la capa trasera. Adicionalmente, la radiación infrarroja en rango espectral entre 700-1200 nm contribuye a la generación de energía eléctrica mientras que el resto al calentamiento del dispositivo FV.

Por otra parte, el punto de operación del módulo fotovoltaico también afecta en el calentamiento de este mismo, ya que toda energía eléctrica que el módulo no entrega es disipada sobre este mismo. [6] [7]

2.13 Electroluminiscencia

La teoría de bandas explica la conductividad de los materiales identificando la existencia de un nivel de energía mayor, ubicado por sobre los orbitales de valencia, denominado banda de conducción. Aquellos electrones ubicados en esta banda son capaces de moverse libremente en ciertos niveles de energía del material.

Existe una banda prohibida (*bandgap*) entre la última banda de valencia y la primera banda de conducción, representando el ancho de esta la energía necesaria para que el electrón pueda liberarse y pasar a la banda de conducción. Luego que el electrón es excitado y se desplaza en la banda de conducción debe de volver a las bandas de valencia. Al ocurrir la recombinación radiativa, el electrón libera la energía remanente en forma de fotón, cuya energía está directamente relacionada con el ancho de la banda prohibida, y de esta energía depende la longitud de onda (color) de este fotón.

Dependiendo del material, la energía necesaria aumenta o disminuye. En el caso de metales, la banda prohibida es irrelevante. Para los materiales aislantes, el *bandgap* es muy alto como para liberar electrones usando energía solar. Así, las celdas fotovoltaicas son fabricadas con materiales semiconductores, con una banda prohibida intermedia, emitiendo luminosidad al ser excitadas por una fuente externa, ya sea eléctrica o lumínica. En el caso particular del silicio, dicha luminosidad es emitida en el espectro de los infrarrojos, entre unos 950 nm a 1300 nm [8], haciéndola invisible al ojo humano, y debiendo de ser captadas por cámaras capaces de detectar luz en estas frecuencias.

Por otra parte, debido a que las celdas no están optimizadas para la emisión de dicha luminosidad (dopaje, construcción, etc..) la luz emitida es débil, haciéndose esta más difícil de captar.

3 PROCEDIMIENTO

Este procedimiento consta de cinco pruebas, las cuales son: (1) Inspección visual, (2) prueba de aislación, (3) medición de curva I-V, (4) termografía en estado estacionario (*outdoor*), y (5) electroluminiscencia (*indoor*). El orden de las pruebas y flujo general de este procedimiento se muestra en la Figura 3.1.

3.1 Inspección Visual

Basada en los estándares IEC 61215-1 e IEC 61215-2, la inspección visual es una prueba no destructiva que busca identificar ciertas fallas en el MFV, visibles al ojo humano, como lo son defectos de fábrica, degradación de los materiales o fallas que tengan una manifestación física observable a simple vista, como grandes grietas en las celdas, roturas de las celdas o del marco, quemaduras, entre otros.

3.2 Medición de aislación eléctrica

Referenciando a los estándares IEC 61215-1 e IEC 61215-2, la medición de aislación corresponde a una prueba de seguridad que permite comprobar si un MFV presenta una aislación adecuada entre sus partes conductoras y el exterior, determinando así la existencia de fugas de corriente.

3.3 Medición de la curva I-V

La prueba de medición de curva I-V se usa para conocer las características eléctricas del MFV, siendo necesaria para determinar la potencia que se puede extraer del dispositivo y compararla con los niveles indicados en su etiqueta. Con ello es posible conocer la degradación en términos de potencia del MFV. Esta medición debe ser realizada acorde al estándar IEC 60904-1.

3.4 Ensayo de termografía

Basado en el estándar IEC 62446-3, el ensayo de termografía (IRT) permite determinar puntos o áreas calientes en el MFV, lo cual puede ser un indicador de una falla grave.

3.5 Ensayo de electroluminiscencia

Basado en el estándar IEC 60904-13, el ensayo de electroluminiscencia (EL) permite complementar al ensayo de IRT para determinar ciertas fallas y degradaciones en el MFV que podrían llegar a ser graves.

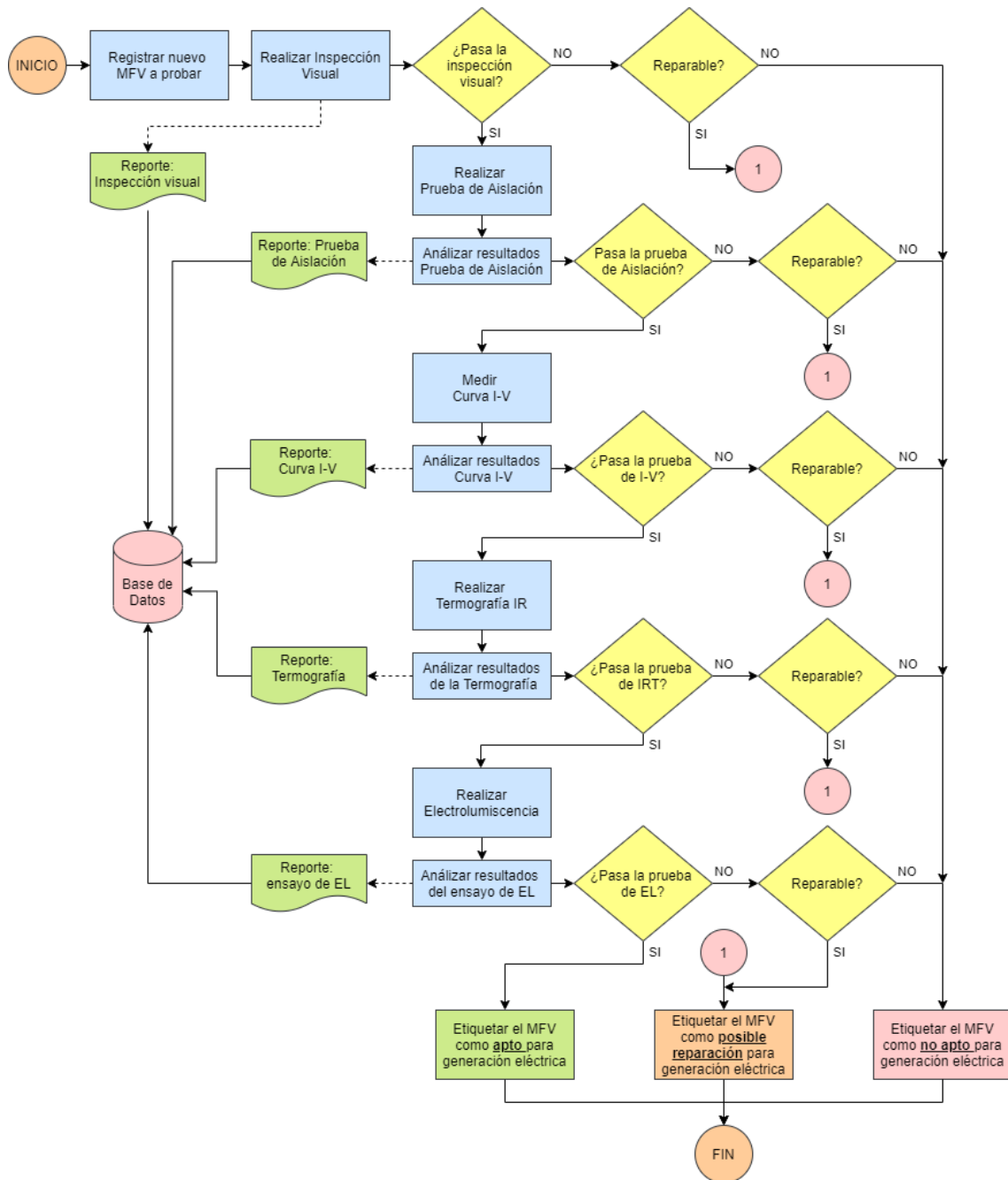


Figura 3.1. Diagrama de flujo general del procedimiento.

3.6 Listas de comprobación

Se recomienda usar listas de comprobación agrupadas de forma tal que se pueda mantener un historial del módulo o dispositivo bajo prueba. Se recomienda organizar las listas de comprobación de la forma:

- Historial del módulo. **Datos generales del módulo FV.**
 - Lista de comprobación para **Inspección Visual.**
 - Lista de comprobación para **medición de Aislación Eléctrica.**
 - Lista de comprobación para **medida de Curva I-V.**
 - Lista de comprobación para **ensayo de Termografía.**
 - Lista de comprobación para **ensayo de Electroluminiscencia.**

3.7 Equipos y material necesarios

En las tablas presentadas a continuación, se listan los materiales necesarios para la realización de todas las pruebas.

- Inspección Visual: Tabla 3.1.
- Medición de Aislación: Tabla 3.2.
- Medición de Curva I-V: Tabla 3.3.
- Ensayo de Termografía: Tabla 3.4.
- Ensayo de Electroluminiscencia: Tabla 3.5.

Información detallada acerca de los materiales se encuentra en la documentación de cada prueba.

Las condiciones ambientales necesarias para la realización de cada prueba están definidas en sus respectivos documentos.

Tabla 3.1. Equipos y materiales para inspección visual.

N°	Nombre	Requisitos/Comentarios	Cantidad
1	Estructura de soporte (ej: Mesón)	Tamaño suficiente para acomodar apropiadamente MFV de hasta 72 celdas o 144 HC (2.3 m x 1.3 m).	1
2	Accesorios de sujeción	Elementos que permitan una sujeción adecuada del módulo a la estructura de soporte	-
3	Destornillador de paleta	Cabeza de ¼" o 3/8".	1
4	Paño de limpieza	Microfibra o similar.	2
5	Agua desmineralizada	Cantidad suficiente para limpiar adecuadamente el módulo por ambas caras.	1
6	Planilla de inspección visual	Formato físico o digital, ya sea PDF o en plataforma digital.	1
7	Flexómetro	Para medidas lineales.	1
8	Regla	De mínimo 20 cm.	1
9	Reflector	Reflector, foco o similar, para garantizar los requerimientos de iluminación requeridos por esta prueba. Idealmente debe de ser una fuente de luz difusa.	1
10	Cámara Fotográfica Digital	Resolución mínima de 12 MPx, con relación 16:9 o equivalente en formato ancho. Capacidad de ajustar manualmente los parámetros básicos de la fotografía.	1

Tabla 3.2. Equipos y materiales para medición de aislación.

N°	Nombre	Requisitos/Comentarios	Cantidad
1	Elemento de soporte (ej: Mesón)	Tamaño suficiente para acomodar apropiadamente MFV de hasta 72 celdas o 144 H-C (2.3 m x 1.2 m).	1
2	Paño de limpieza	Microfibra o similar.	2
3	Brocha	Brocha, cepillo o similar. Para limpiar lugares difíciles de alcanzar.	1
4	Alcohol Isopropílico	Cantidad suficiente para los contactos eléctricos u otras suciedades según sea necesario. Al menos al 70%.	1
5	Voltímetro	Debe ser capaz de medir tensión en corriente continua, hasta al menos 100 Volts y con una precisión de al menos $\pm 5\%$.	1
6	Megaóhmetro	Debe ser capaz de medir resistencia de aislación con los siguientes niveles de voltaje: 500 V, 1000 V, 1500 V, 2000 V, 3000 V y 4000 V. Debe de ser capaz de realizar las mediciones por una duración de 1 y 2 minutos.	1
7	Cables del Megaóhmetro	Deben de soportar las tensiones eléctricas de la prueba (usualmente sobre 3 kV). Deben de ser punta caimán.	1
8	Adaptador MC4 a caimán	Debe conectar ambos terminales del MFV, con capacidad para soportar las tensiones eléctricas de la prueba (usualmente sobre 4 kV).	2
9	Sensor de temperatura	Debe medir temperatura ambiente con precisión de al menos ± 1 K.	1
10	Higrómetro, humedad ambiental relativa	Debe medir humedad relativa con precisión de al menos $\pm 1\%$.	1

N°	Nombre	Requisitos/Comentarios	Cantidad
11	Planilla de procedimiento	Adjunta en el Anexo 7.1 del documento de procedimiento para medición de aislación.	1

Tabla 3.3. Equipos y materiales para medición de curva I-V.

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	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

Tabla 3.4. Equipos y materiales para ensayos de termografía.

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 elevación.	1
2	Paño de limpieza	Microfibra o similar.	1
3	Agua desmineralizada	Cantidad suficiente para limpiar adecuadamente la cara frontal y trasera del módulo, y los sensores.	1
4	Anemómetro	Debe ser capaz de medir velocidades desde 0 km/h hasta 28 km/h.	1
5	Piranómetro	Debe tener una precisión de $\pm 5\%$. ISO 9060 Spectrally Flat Class A.	1
6	Sensor de temperatura ambiente	Debe contar con una cubierta que lo proteja de la luz solar directa y el viento. Debe tener una precisión de ± 2 K.	1
7	Cámara termográfica	Ver requerimientos en el anexo 7.1 del procedimiento.	1
8	Cámara Fotográfica Digital	Debe tener al menos 30 veces la resolución de la cámara termográfica empleada. (Mínimo 1 MPx).	1
9	Planilla de procedimiento	Adjunta en el Anexo 7.4 del documento de procedimiento de medición de termografía infrarroja.	1

Tabla 3.5. Equipos y materiales para ensayos de electroluminiscencia.

N°	Nombre	Requisitos/Comentarios	Cantidad
1	Bastidor para sujeción del módulo	Debe sujetar al módulo de manera firme y perpendicular al suelo.	1
2	Paño de limpieza	Microfibra o similar.	1
3	Agua desmineralizada	Cantidad suficiente para limpiar adecuadamente la cara frontal y trasera del módulo, y los sensores.	1
4	Cámara DSLR (con filtro infrarrojo)	Debe ser capaz de captar radiación infrarroja entre los rangos de 1 000 nm a 1 200 nm. Resolución de al menos 24 MPx	1
5	Trípode	Compatible con la cámara, idealmente debe permitir a la cámara estar a una altura de entre 1 m y 1.2 m.	1
6	Cable de conexión USB	Para conectar la cámara al computador, debe de ser un largo suficiente como para conectar a ambos y no quedar tirante. Si el cable excede 5 m, entonces se debe incorporar un extensor de rango.	1
7	Fuente de alimentación DC	Debe entregar 80 V y 20 A, siendo ambos regulables.	1
8	Aire acondicionado	Debe tener la capacidad de mantener la temperatura de la habitación en el rango de 20 °C a 25 °C.	1
9	Computadora con software de control	Computadora básica, con el software de control previamente instalado. (Se recomienda DigiCamControl)	1
10	Planilla de procedimiento	Adjunta en el anexo 7.3 del procedimiento	1

4 RECOMENDACIONES

Los operadores deben de utilizar todos los EPP necesarios para evitar sufrir accidentes durante el desarrollo de las pruebas y las actividades previas y posteriores a estas, por consiguiente, se recomienda que los operadores ocupen:

- Lentes de seguridad
- Guantes de seguridad multiuso
- Cascos de seguridad
- Zapatos de seguridad dieléctricos con punta dura

Adicionalmente, por la naturaleza de los MFV hay una alta probabilidad de exposición a altos niveles de radiación solar por periodos prolongados, por lo cual se recomienda que los operadores cuenten con:

- Ropa adecuada (polera manga larga, pantalón largo, etc....)
- Bloqueador solar (UVA/UVB y FPS de al menos 30)
- Lentes con filtro UV
- Cubre nuca
- Hidratación adecuada

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «<https://www.sfe-solar.com>,» 06 07 2021. [En línea]. Available: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/modulo-fotovoltaico-caja-conexiones-diodos-proteccion-bypass/>. [Último acceso: 06 07 2021].
- [2] <https://www.solar-junction-box.com>, «<https://www.solar-junction-box.com>,» 06 07 2021. [En línea]. Available: https://www.solar-junction-box.com/product_category/31695.html. [Último acceso: 06 07 2021].
- [3] 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].
- [4] D. Kondepudi y I. Prigogine, Modern thermodynamics : from heat engines to dissipative structures, Chichester ; New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [5] TWI Global, «What is thermography in engineering?,» TWI Global, [En línea]. Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-thermography-in-engineering>. [Último acceso: 17 Enero 2022].
- [6] D. D. Rooij, «Heat Generation in PV Modules,» SinoVoltaics, [En línea]. Available: <https://sinovoltaics.com/learning-center/basics/heat-generation-in-pv-modules/>. [Último acceso: 17 Enero 2022].
- [7] PV Education, «Heat Generation in PV Modules,» PV Education, [En línea]. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/heat-generation-in-pv-modules>. [Último acceso: 17 Enero 2022].
- [8] A. Petraglia y V. Nardone, «Electroluminescence in photovoltaic cell,» Second University of Naples, Department of Environmental Science, Napoli, 2011.

[9] BET-SOLAR, «<https://betsolar.es>,» 06 07 2021. [En línea]. Available: <https://betsolar.es/la-tecnologia-bus-bar-en-los-paneles-fotovoltaicos/>. [Último acceso: 06 07 2021].

6 ANEXOS

6.1 Planilla de registro electrónico

DATOS DE REGISTRO DEL MFV

Fecha :	(yyyy-mm-dd)
Nombre del evaluador :	
Empresa dueña :	
Ubicación :	
Latitud :	
Longitud :	
Altura :	(m.s.n.m.)
Fecha aprox. de montaje :	(yyyy-mm-dd)
ID (en la empresa) del MFV :	

DATOS DEL SISTEMA

Diseño del sistema: Módulo único Varios módulos (a.) Desconocido

(a.) Sistema de varios módulos: No aplica.

Tensión eléctrica del sistema : _____

Locación del módulo / número en la serie (desde el negativo): _____

Cantidad de módulos en serie :
(string) _____

Cantidad de strings en paralelo:
(array) _____

Cantidad de diodos bypass :
(en string) _____

Cantidad de módulos por diodo
bypass: _____

Polarización del sistema: Circuito abierto Carga resistiva MPPT

Corto circuito Desconocido

Conexión a tierra: Aterrizada (a.) Sin aterrizarse Desconocido

(a.) Negativo Positivo Centro del string Desconocido

DATOS EL MÓDULO

- Tecnología:** Monofacial Bifacial
 mono Si multi Si amorfo-Si
 PERT PERC PERL HIT HJT
 nPERT IBC CdTe CIGS/CIS
 otra: _____

Celda:

Ancho _____ mm Alto _____ mm
Espaciado entre celdas : _____ mm
Espaciado desde celda al borde del MFV : _____ mm

- Certificación:** Desconocida UL 1703 UL 61730
 IEC 61215 IEC 61646 IEC 61730
 otra: _____

Fecha estimada de certificación: _____

Información de etiqueta/placa de identificación:

Fabricante: _____

Modelo #: _____

Serie #: _____

Ancho _____ cm Alto _____ cm

Placa de identificación: Desprovisto / Desaparecida

P_{max} : _____ V_{oc} : _____ I_{sc} : _____

V_{MPP} : _____ I_{MPP} : _____

Diodo bypass : _____

Fusible serie : _____

Tensión máxima permisible de sistema : _____