

Tipo de Documento : **Procedimiento**
Nombre del Documento : **Procedimiento de pruebas de termografía en estado estacionario 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	Equipos y material a ser empleados	5
3	PROCEDIMIENTO	7
3.1	Ejecución de la prueba	8
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	11
5	RECOMENDACIONES	14
6	BIBLIOGRAFÍA	15
7	ANEXOS	16
7.1	Requisitos de la cámara termográfica	16
7.2	Resolución geométrica de la cámara	17
7.3	Emisividad de materiales encontrados en módulos FV	18
7.4	Planilla de procedimiento: Ensayo de Termografía IR	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 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).

2 DESCRIPCIÓN

El principal uso de la termografía en módulos FV es el diagnóstico de fallas térmicas y eléctricas. Puede ser usado de noche o de día, tanto en módulos individuales como en sistemas completos. Los módulos pueden ser de c-Si monofaciales o bifaciales, o de tipo capa fina.

Existen tres tipos de termografía, sin embargo, la que será utilizada es la llamada “en estado estacionario”, ya que es la que requiere de equipamiento menos especializado, y por consiguiente más barato. Esta técnica es aplicada con el módulo funcionando en estado estacionario. La termografía muestra diferencias de temperaturas inducidas por la luz solar. Este tipo de termografía permite detectar zonas de alta temperatura que pudieran ser producidas por grietas en los paneles o interconexiones rotas, y que podrían derivar en burbujas en el encapsulante, decoloración del mismo y de la celda, entre otros defectos.

Los módulos fotovoltaicos por probar deben de haber aprobado previamente una inspección visual y una medición de aislación. Adicionalmente, ambos cables del módulo deben de estar en buen estado y contar con sus respectivos conectores MC4. Los módulos deben de tener su cara frontal limpia y libre de suciedades. Este procedimiento es posible de aplicar en todo tipo de MFV basado en tecnologías del silicio.

El estándar IEC TS 62446-3 indica los requisitos de los equipos a utilizar para la realización de esta prueba. Los requisitos de la cámara termográfica se encuentran en la Tabla 3 en la sección de anexos.

Todas las anomalías térmicas deben ser fotografiadas de cerca, además de tomar una foto (de espectro visual) en paralelo con cada imagen termográfica que se realice. La cámara fotográfica (visual) debe tener una resolución de unas 30 veces la resolución de la cámara termográfica y un ángulo de visión similar.

Respecto al equipo para medir las condiciones ambientales, es necesario:

- Sensor de irradiancia (celda de silicio cristalino o piranómetro), con una precisión de $\pm 5\%$.

- Sensor de temperatura (protegido de la luz solar directa y el viento), con una precisión de ± 2 K.
- Anemómetro o escala de Beaufort (visual).
- Cámara fotográfica (puede ser la misma a utilizar para la inspección visual).

Las condiciones ambientales necesarias para realizar la prueba son:

- Irradiancia global, G , mínima de 600 W/m^2 .
- Velocidad de viento, w , máxima de 28 km/h o Beaufort 4.
- Nubosidad máxima de 2 oktas de nubes cúmulo.

Para más detalles, consultar el estándar IEC 62446-3:2016 [1].

2.1 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 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 de 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

3 PROCEDIMIENTO

El procedimiento se centra en realizar una inspección simplificada a módulos basados en tecnologías de silicio, tanto monofaciales como bifaciales, con tal de focalizar el análisis en las diferencias relativas de temperatura entre los componentes, para así determinar patrones y contrastar con datos conocidos. Los procesos de toma de imágenes y análisis de resultados se encuentran ilustrados en dos diagramas de flujo: Figura 3.1 y Figura 3.2, respectivamente.

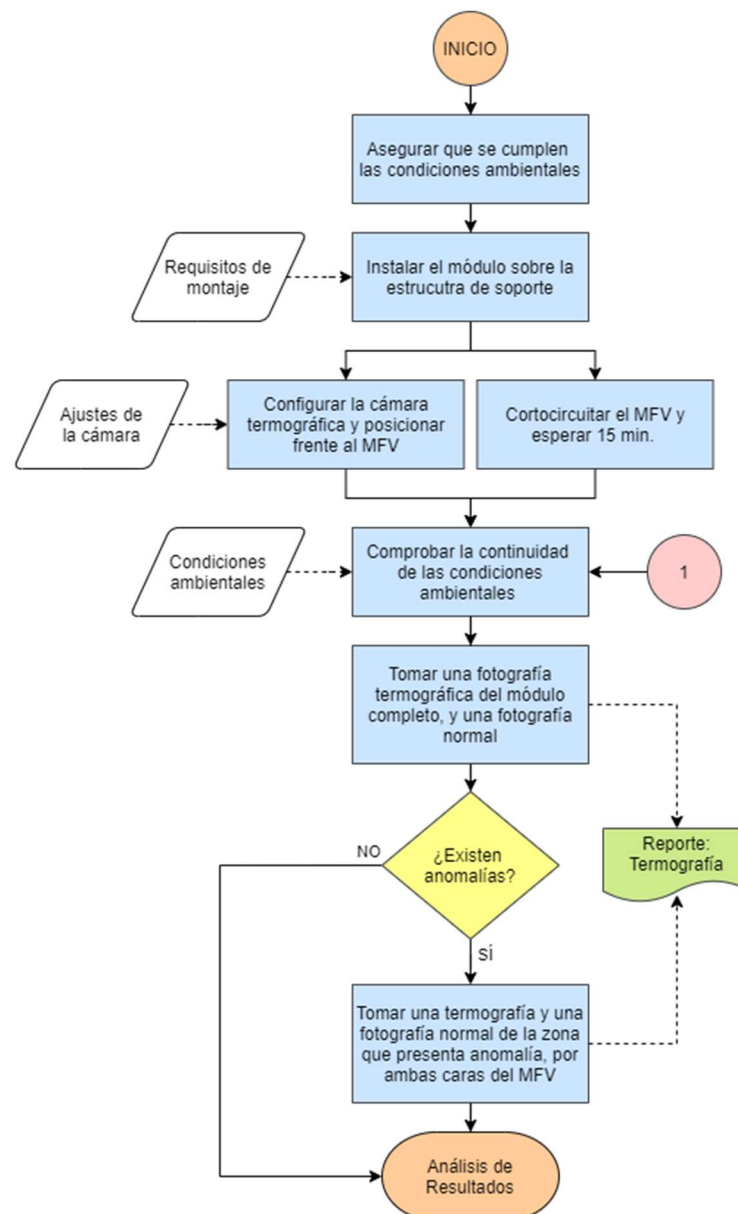


Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso de toma de imágenes termográficas.

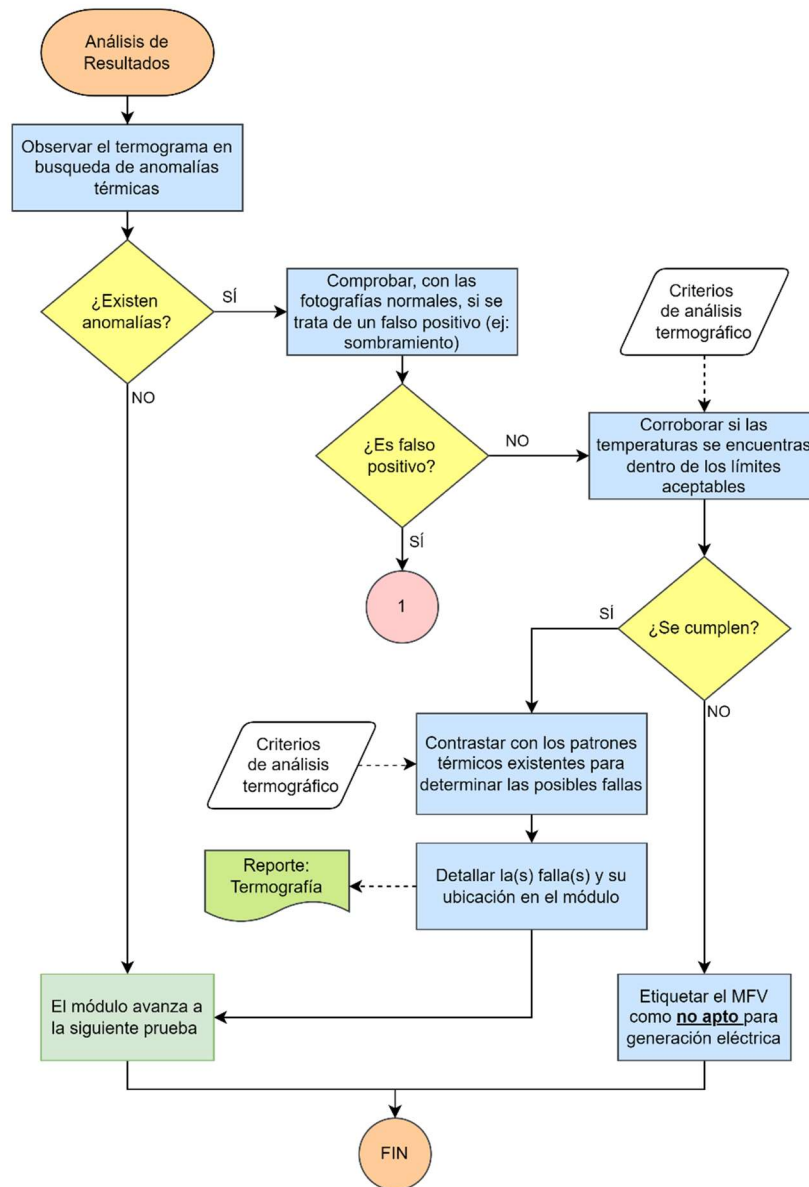


Figura 3.2. Diagrama de flujo del proceso de evaluación de resultados.

3.1 Ejecución de la prueba

1. Cerciorarse de que se cumplen las condiciones ambientales mediante el uso de los equipamientos de medición correspondientes a cada variable.
2. Limpiar los MFV por ambas caras.
3. Montar los MFV sobre la estructura de soporte (previamente ensamblada).
El soporte debe permitir que los MFV queden orientados hacia el norte, con una elevación de entre 20 y 30 grados.

4. Cortocircuitar las terminales del MFV. Se recomienda hacer la conexión cubriendo la totalidad de la cara frontal del MFV con un elemento que evite la generación de electricidad durante el procedimiento de cortocircuitado.

5. Configurar la cámara IR.

La emisividad de la cámara IR debe de ser ajustada en función de la superficie del objeto a investigar (Vidrio frontal, plástico de la junction box, etc.). Para ejemplos de emisividad de materiales, véase el anexo 7.3.

6. Esperar a que la temperatura se normalice (usualmente hasta 15 minutos después de haber montado el MFV).

Posicionarse frente al MFV cumpliendo los requisitos de resolución geométrica y ángulo. La distancia a la que se debe posicionar la cámara debe respetar los requerimientos de resolución geométrica. Para información adicional, referirse al anexo 7.2.

El ángulo que forma la cámara con la cara frontal del panel debe ser lo más cercano posible a 90 grados, y nunca menor a 30 grados (ver Figura 3.3). Se debe minimizar la reflexión de edificios o árboles cercanos, de objetos calientes (como el sol), de la cámara y del operador que toma la termografía.

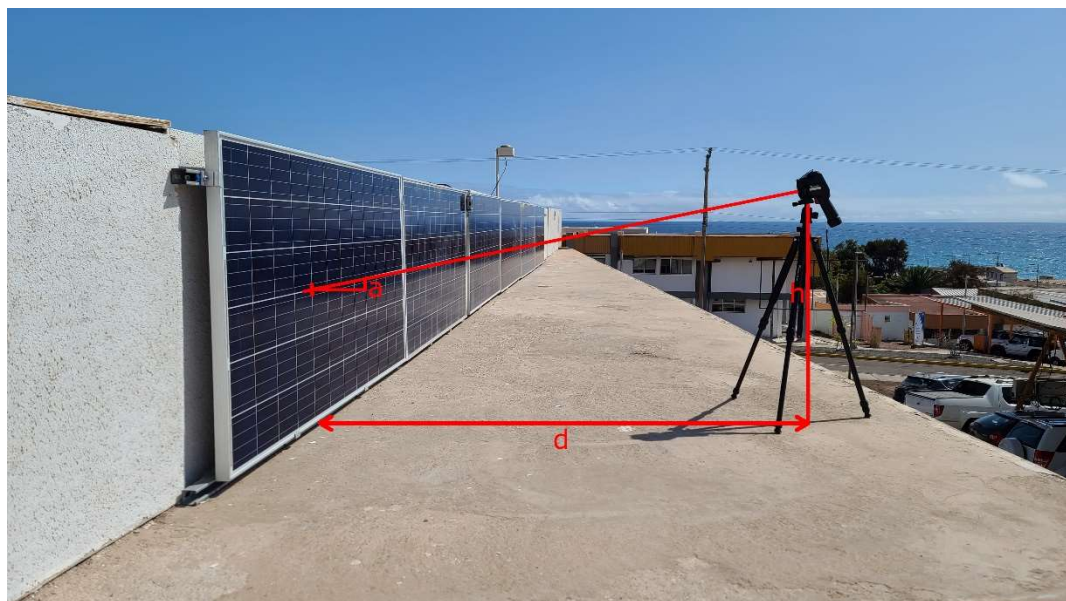


Figura 3.3. Ejemplo de posicionado de cámara IR respecto al MFV.

7. Asegurarse de que las condiciones ambientales no hayan cambiado y tomar al menos dos fotografías del módulo: una con la cámara IR y otra con la cámara normal.
8. En caso de observarse anomalías térmicas:
 - a. tomar una fotografía termográfica y una normal de cerca de cada anomalía por la cara frontal del MFV.
 - b. tomar una fotografía (normal) de cerca de cada anomalía por la cara trasera del MFV.
9. Registrar nombre ID de la fotografía en planilla del procedimiento.
10. Analizar las imágenes termográficas usando los patrones de anomalía mostrados en la sección 4.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En un módulo sano, la diferencia de temperatura entre celdas no debería ser mayor a unos pocos grados. En caso de haber defectos es posible observar grandes diferencias de temperatura entre módulos. También es importante considerar que en un módulo existe un gradiente de temperatura que corresponde a convección, por lo cual las celdas de la parte superior suelen estar ligeramente más calientes que las de la parte inferior. Esta diferencia de temperatura depende de la temperatura ambiente, pero acorde con [2], se definen como celdas con comportamiento normal de temperatura a aquellas cuyo gradiente de temperatura en la celda es inferior a 10 K (10 °C).

Celdas con diferencia de temperatura en el rango de 10 K a 20 K son consideradas no problemáticas, pero deben ser monitoreadas con mayor frecuencia, pues podrían desarrollar problemas de operación en el futuro.

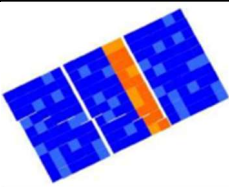
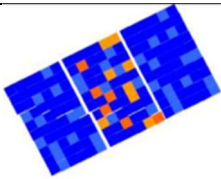
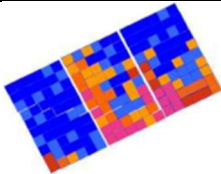
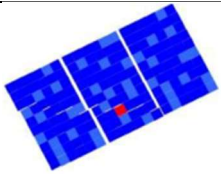
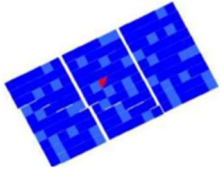
Cuando la diferencia de temperatura excede los 20 K, se considera que esa zona tiene un hotspot, y por ende es de esperar que cause degradación de la potencia de salida del MFV, e incluso de los materiales que componen el MFV. Se puede considerar un hotspot grave cuando esta diferencia de temperatura exceda 30 K.

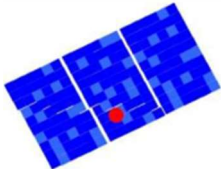
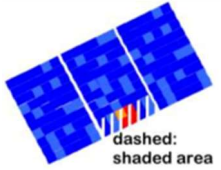
Acorde con [3], existe una serie de patrones térmicos que se repiten de manera constante en módulos con fallas y están relacionados con tipos de anomalías en específico, sirviendo éstos a la hora de diagnosticar posibles fallas en un MFV. Los patrones términos más comunes se muestra en la Tabla 4.1.

Adicionalmente, es fundamental que los resultados de las imágenes infrarrojas sean contrastados con las imágenes normales, ya que existe la posibilidad de “falsos positivos” como por ejemplo un punto caliente que sea causado por la sombra de un cuerpo externo.




Cabe destacar que, si existe una diferencia de temperatura entre el punto más cálido y el punto más frío de más de 30 K o la temperatura absoluta de cualquier punto es mayor a 70°C, el módulo se considera no apto debido al potencial riesgo de incendios.

Tabla 4.1. Patrones térmicos comunes.

Patrón	Descripción	Posible falla
	Una columna (sub-string) del módulo está más caliente que los demás	El sub-string se encuentra cortocircuitado, posiblemente por: <ul style="list-style-type: none"> • Diodo de derivación cortocircuitado • Shunt interno
	Celdas individuales están más calientes, sin crear ningún patrón en particular	El módulo completo se encuentra cortocircuitado, posiblemente por: <ul style="list-style-type: none"> • Todos los diodos de derivación cortocircuitados • Conexión incorrecta
	Celdas individuales están más calientes, estando más calientes aquellas cercanas al borde y en la parte inferior del módulo	Shunts internos causados posiblemente por: <ul style="list-style-type: none"> • PID • Polarización de las celdas
	Una sola celda más caliente que el resto	<ul style="list-style-type: none"> • Celda sombreada • Celda defectuosa • Celda delaminada
	Parte de una celda está más caliente que el resto	<ul style="list-style-type: none"> • Celda rota • Rotura de la cinta de interconexión de strings

Patrón	Descripción	Posible falla
	Un punto en el panel está más caliente que el resto	<ul style="list-style-type: none"> Sombra causada por un cuerpo externo Artefacto visual/digital en la imagen
	Parte de un sub-string está más caliente que otros sub-string bajo las mismas condiciones de sombreado	Diodo de derivación defectuoso (abierto)

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

Etiqueta	Veredicto	Criterio
	El MFV pasa la prueba	No presenta anomalías térmicas y cumple las restricciones de temperatura
	El MFV pasa la prueba, con observaciones	Presenta alguna anomalía térmica y se cumplen las restricciones de temperatura
	El MFV no es apto para generación	Existen puntos cuya diferencia de temperatura es mayor a 30 K o la temperatura de un punto cualquiera es mayor a 70 °C

5 RECOMENDACIONES

Al producirse un cambio en las condiciones de operación, por ejemplo, una variación de irradiancia (ej: debido a nubes cirro), de más de 10% por minuto, un tiempo de espera de 15 minutos es recomendado para restaurar las condiciones de estado estacionario.

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

T"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:

T90204-220102_1015

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEC, «IEC TS 62446-3 Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 3: Photovoltaic modules and plants - Outdoor infrared thermography,» International Electrotechnical Commission, Geneva, Suiza, 2017.
- [2] IEA-PVPS, «Review on Infrared and Electroluminiscence imaging for PV field applications,» IEA-PVPS, 2018.
- [3] IEA-PVPS, «Review of Failures of Photovoltaic Modules,» IEA-PVPS, 2014.

7 ANEXOS

7.1 Requisitos de la cámara termográfica

Tabla 7.1. Requisitos mínimos para cámara termográfica.

N °	Característica	Requerimientos Mínimos
1	Respuesta espectral	De 8 a 14 micrómetros
2	Rango de temperatura	-20 °C a +120 °C
3	Temperatura de operación	-10 °C a +40 °C
4	Sensibilidad térmica	NETD \leq 0.1 K a 30 °C
5	Resolución geométrica	<ul style="list-style-type: none"> •Celdas: 5×5 pixeles para una celda de 6". •Conexiones eléctricas: 3×3 pixeles dentro del área más pequeña a medir.
6	Error absoluto de medición	Menor a ± 2 K
7	Parámetros ajustables	Emisividad (ϵ) y Temperatura reflectada (T_{ref})
8	Funciones ajustables	Foco, rango y nivel de temperatura
9	Funciones de medición	Medición puntual y medición de área con temperaturas máximas y promedio
10	Calibración	El sistema de medición (cámara, lente, apertura y filtro) deben ser calibradas cada 2 años. La calibración debe de ser documentada
11	Documentación	Las imágenes infrarrojas deben de ser guardadas junto con toda la información radiométrica necesaria para poder determinar temperaturas absolutas. Imágenes no radiométricas solo se pueden utilizar para identificar patrones y diferencias de temperatura

7.2 Resolución geométrica de la cámara

Todas las mediciones realizadas, sin importar su ángulo, deben de respetar una resolución mínima de 5×5 píxeles para cada celda del módulo fotovoltaico. Se conoce la siguiente relación:

$$L = IFOV \cdot D \quad (7.1)$$

donde:

- L: Longitud del píxel proyectada sobre el borde del módulo FV, en milímetros.
- IFOV: Campo de visión instantáneo de la cámara termográfica, en mrad.
- D: Distancia de la cámara al módulo FV, en metros.

Considerando que el valor del IFOV es un parámetro fijo de la cámara, y conociendo de antemano las dimensiones de una celda fotovoltaica, es posible calcular la distancia máxima a la que se puede posicionar determinada cámara al módulo FV a ser estudiado.

A modo de ejemplo, si se cuenta con una celda cuya longitud lateral es de 156 mm y una cámara cuyo IFOV es de 7.6 mrad es posible realizar los siguientes cálculos para obtener la distancia máxima.

1. Ya que la resolución mínima debe de ser de 5×5 píxeles por celda, es posible calcular el valor de L, el cual sería 1/5 de la longitud lateral de la celda FV.
2. Conociendo el valor de L y IFOV simplemente se debe de despejar el valor de D el cual, con los datos del ejemplo, sería igual $156 / (5 \times 7.6)$ m, i.e., 4.1 m.

Es decir, la cámara posicionada a una distancia de 4.1 metros tendría la resolución mínima para cada celda FV. En base a esto, es recomendable utilizar distancias menores a la obtenida, ya que se tendrían imágenes de mayor calidad. Sin embargo, también se debe considerar que se debe observar la totalidad del módulo dentro de la imagen, por lo que existiría una distancia “mínima” dictada por las dimensiones físicas del módulo y el ángulo de visión de la cámara.

7.3 Emisividad de materiales encontrados en módulos FV

La emisividad de la cámara IR debe de ser ajustada en función de la superficie del objeto a investigar (Vidrio frontal, plástico de la junction box, etc.).

- Materiales tales como metales sin oxidar o aluminio pulido tienen emisividades muy bajas, entre $\epsilon = 0.1$ a $\epsilon = 0.3$, por lo que no es posible determinar de manera precisa la temperatura de estos.
- Aluminio oxidado, de aspecto tosco, del marco, estructura de soporte y otros elementos similares tienen una emisividad de alrededor de $\epsilon = 0.4$ a $\epsilon = 0.7$.
- El vidrio tiene emisividades aprox. de $\epsilon = 0.85$. Vidrio con una superficie rugosa, vidrio texturado o vidrio con altos niveles de suciedad pueden alcanzar $\epsilon = 0.9$.
- En vidrios no ferrosos, la emisividad disminuye con el ángulo de visión de manera tal que alrededor de los 45 grados la emisividad será de $\epsilon = 0.8$ y a 30 grados puede llegar a $\epsilon = 0.75$ o menor. Véase la Figura 7.1.
- La mayoría de los materiales de aislación (sintéticos) y cerámicas tienen una emisividad de alrededor de $\epsilon = 0.9$.

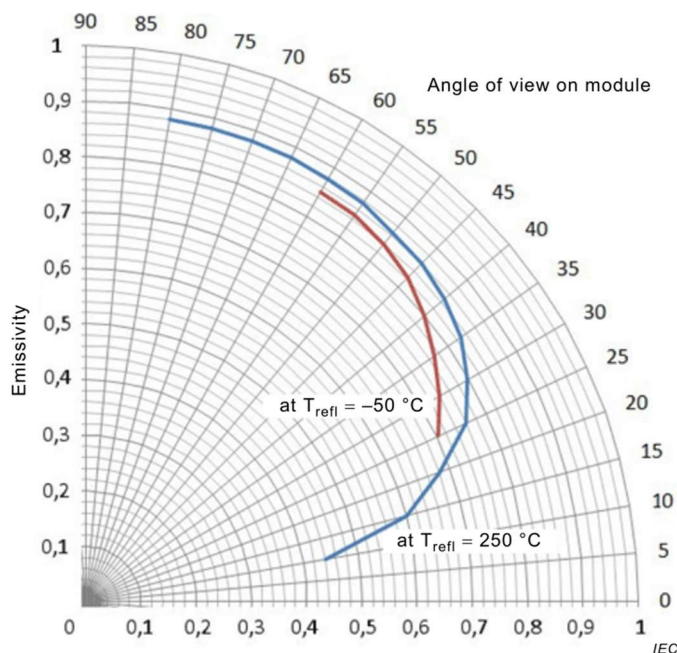


Figura 7.1. Relación entre la emisividad del vidrio y el ángulo de visión ¹

¹ IEC 62446-3

7.4 Planilla de procedimiento: Ensayo de Termografía IR

Número de serie del MFV:
Nombre archivo de termografía (módulo completo):
Nombre archivo fotografía complementaria (módulo completo):
Máxima diferencia de temperatura registrada (°C):
Máxima temperatura absoluta registrada (°C):

¿Presenta alguna anomalía térmica? ☐ No ☐ Sí

Anomalía :	
Temperatura máxima :	
Archivo de termografía :	
Archivo de fotografía (visual) :	
Anomalía :	
Temperatura máxima :	
Archivo de termografía :	
Archivo de fotografía (visual) :	
Anomalía :	
Temperatura máxima :	
Archivo de termografía :	
Archivo de fotografía (visual) :	
Anomalía :	
Temperatura máxima :	
Archivo de termografía :	
Archivo de fotografía (visual) :	

Anomalía :	
Temperatura máxima :	
Archivo de termografía :	
Archivo de fotografía (visual) :	

Comentarios:

--

Tabla 7.2. Tabla de referencia de emisividades de vidrio de un MFV, para mediciones con ángulos distintos a 90.

Ángulo	Emisividad (ϵ)
30°	0.80
40°	0.85
50°	0.86
60°	0.87
70°	0.88
80°	0.88
90°	0.90

Para materiales sintéticos (ej: Backsheet) la emisividad es de 0.9.