



Análisis del comportamiento térmico en paneles solares mediante estudios e inspecciones termográficas con imágenes infrarrojas

Analysis of thermal behavior in solar panels through thermographic studies and inspections using infrared imaging

Autora:



Robert Andrés Chonillo Reyes¹

| rchonillo8733@utm.edu.ec



Richard Javier Macías Mera¹

| rmacias4429@utm.edu.ec



Ítalo Humberto Navarrete García¹

| italo.navarrete@utm.edu.ec

¹Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Carrera de Ingeniería Eléctrica, Portoviejo, Manabí, Ecuador

Recepción: 27 de junio de 2026 | **Aceptación:** 18 de agosto de 2026 | **Publicación:** 25 de agosto de 2026

Resumen

El estudio examina el comportamiento térmico de un sistema fotovoltaico situado en Portoviejo, Ecuador a través de inspecciones termográficas. El objetivo consistió en reconocer anomalías, variaciones de temperatura y patrones térmicos, particularmente los puntos calientes o hot spots que impactan el desempeño y la durabilidad de los módulos solares. La investigación utiliza un enfoque cualitativo y descriptivo, empleando una cámara termográfica Fluke TiS65 para la captura de imágenes térmicas. Se inspeccionaron 18 paneles solares y se comparó la temperatura máxima de las celdas con la temperatura ambiente empleando el método de contraste térmico. Se procesaron más de 45.000 datos, el análisis utilizó software especializado Smart View Classic 4.4 y se clasificaron las anomalías en función de su gravedad (normal, baja, moderada, severa o crítica). Los hallazgos indicaron que, aunque la posibilidad de que aparezcan puntos calientes es baja, su presencia tiene un efecto negativo en la eficiencia tecnológica. Se detectaron los motivos para estas anomalías térmicas, como la acumulación de suciedad, el sombreado parcial, los reflejos de luz y los daños físicos en los módulos.

Palabras clave: energía fotovoltaica; comportamiento térmico; mantenimiento predictivo; puntos calientes; termografía infrarroja

Abstract

This study examines the thermal behavior of a photovoltaic system located in Portoviejo, Ecuador, through thermographic inspections. The objective was to identify anomalies, temperature variations, and thermal patterns, particularly hot spots, that impact the performance and durability of the solar modules. The research uses a qualitative and descriptive approach, employing a Fluke TiS65 thermal imaging camera to capture thermal images. Eighteen solar panels were inspected, and the maximum cell temperature was compared to the ambient temperature using the thermal contrast method. More than 45,000 data points were processed. The analysis used specialized software SmartView Classic 4.4, and the anomalies were classified according to their severity (normal, low, moderate, severe, or critical). The findings indicated that, although the likelihood of hot spots appearing is low, their presence has a negative effect on technological efficiency. The causes of these thermal anomalies were identified, such as dirt accumulation, partial shading, light reflections, and physical damage to the modules.

Keywords: photovoltaic energy; thermal behavior; predictive maintenance; hotspots; infrared thermography



Introducción

El crecimiento sostenido de la demanda energética mundial acompañado de la necesidad de reducir las emisiones asociadas al uso de combustibles fósiles, impulsa el desarrollo de tecnologías basadas en fuentes renovables. Dentro de este contexto, la energía solar fotovoltaica se consolida como una de las alternativas más importantes debido a su disponibilidad, modularidad y capacidad de generación distribuida. Los sistemas fotovoltaicos permiten transformar directamente la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, para contribuir con la diversificación de la matriz energética y a la reducción del impacto ambiental asociado a la generación convencional (International Energy Agency [IEA], 2023).

A pesar del desarrollo tecnológico alcanzado por los módulos fotovoltaicos, su desempeño energético está condicionado por diversos factores ambientales y operativos, entre los cuales la temperatura de funcionamiento representa una variable crítica. La eficiencia de conversión de un módulo solar depende de las condiciones térmicas a las que se encuentra sometido, debido a que el incremento de temperatura provoca una disminución del voltaje de salida y consecuentemente, una reducción de la potencia eléctrica generada (Dubey et al., 2013). Por esta razón, el análisis del comportamiento térmico constituye un aspecto fundamental para evaluar el rendimiento real de los sistemas fotovoltaicos durante su operación.

Cuando un panel solar recibe radiación incidente, solamente una fracción de la energía absorbida es convertida en electricidad, mientras que el resto se transforma en energía térmica. Este fenómeno genera un aumento de temperatura en las células fotovoltaicas, encapsulantes y demás componentes estructurales del módulo. La temperatura alcanzada depende de factores como la irradiancia solar, velocidad del viento, temperatura

ambiente, orientación del panel, condiciones de montaje y características constructivas del módulo (Skoplaki y Palyvos, 2009). En consecuencia, las condiciones térmicas pueden variar de modo significativo incluso dentro de una misma instalación fotovoltaica. El incremento de temperatura no solo afecta la eficiencia inmediata del sistema, sino que puede influir en los procesos de degradación de los materiales que conforman los módulos solares. La exposición prolongada a ciclos térmicos puede favorecer fenómenos como degradación del encapsulante, fatiga mecánica, pérdida de propiedades eléctricas y reducción de la vida útil del módulo (Jordan y Kurtz, 2013). Por ello, la evaluación térmica constituye una herramienta relevante para garantizar la confiabilidad y sostenibilidad de las instalaciones fotovoltaicas.

Uno de los principales problemas asociados al comportamiento térmico irregular en paneles solares es la aparición de puntos calientes o hot spots. Estos corresponden a zonas localizadas donde la temperatura supera significativamente la temperatura promedio del módulo, generalmente debido a defectos de fabricación, daños en células fotovoltaicas, sombreado parcial, suciedad acumulada, fallas en conexiones eléctricas o problemas en los diodos de derivación (Mellit y Kalogirou, 2008). La presencia de estos puntos puede generar pérdidas de generación, acelerar procesos de deterioro y en casos extremos, representar riesgos de daño permanente en el sistema.

Tradicionalmente, la evaluación del rendimiento de los paneles fotovoltaicos se realiza mediante parámetros eléctricos como corriente, tensión, potencia máxima y curvas características corriente-voltaje (I-V). Aunque estos métodos proporcionan información importante sobre el desempeño general del módulo, presentan limitaciones para identificar la ubicación específica de fallas térmicas o eléctricas dentro de la superficie del panel (Chine et al., 2014). Por esta razón, se han desarrollado técnicas

complementarias de diagnóstico capaces de proporcionar información espacial del comportamiento del módulo.

Entre estas técnicas destaca la termografía infrarroja, una metodología no invasiva basada en la detección de la radiación térmica emitida por los objetos. Mediante la captura de imágenes de las cámaras infrarrojas es posible obtener imágenes térmicas que representan la distribución de temperatura sobre la superficie de los paneles solares, permitiendo identificar diferencias térmicas asociadas a condiciones normales de operación o posibles anomalías (Aghaei et al., 2020). Esta característica convierte a la termografía en una herramienta de gran utilidad para inspecciones rápidas, mantenimiento preventivo y evaluación del estado operativo de instalaciones fotovoltaicas.

Las imágenes infrarrojas proporcionan información visual y cuantitativa sobre la distribución térmica del módulo, permitiendo localizar zonas con temperaturas superiores al comportamiento esperado. Una distribución homogénea generalmente corresponde a un funcionamiento adecuado, mientras que patrones térmicos irregulares pueden indicar la presencia de fallas o condiciones desfavorables de operación. Según Silvestre et al. (2013), la inspección termográfica permite detectar defectos que pueden no ser evidentes mediante evaluaciones eléctricas convencionales, especialmente cuando las fallas afectan áreas específicas del módulo.

La aplicación de estudios termográficos en sistemas fotovoltaicos adquiere importancia dentro de las estrategias modernas de mantenimiento predictivo. Esta metodología permite realizar evaluaciones sin interrumpir necesariamente la operación del sistema, reduciendo tiempos de diagnóstico y facilitando la toma de decisiones técnicas. Además, su integración con mediciones eléctricas y análisis ambientales permite obtener una caracterización más completa del comportamiento de los módulos solares (Gallardo-Saavedra et al., 2016).

En regiones con alta disponibilidad de radiación solar el estudio del comportamiento térmico adquiere especial relevancia debido a que las condiciones ambientales pueden incrementar las temperaturas de operación de los módulos. Factores como elevados niveles de irradiancia, temperaturas ambientales altas, acumulación de polvo y variaciones climáticas pueden modificar la respuesta térmica de los paneles, afectando su eficiencia y confiabilidad a largo plazo (King et al., 2004). Por ello, resulta necesario evaluar los sistemas fotovoltaicos bajo condiciones reales de funcionamiento.

Aunque la termografía infrarroja ha demostrado ser una herramienta efectiva para el diagnóstico de módulos solares, aún existe la necesidad de profundizar en el análisis de los patrones térmicos obtenidos mediante imágenes infrarrojas, en especial para relacionarlos con condiciones operativas específicas y posibles pérdidas de desempeño. La interpretación adecuada de los termogramas requiere considerar variables técnicas y ambientales que permitan diferenciar comportamientos normales de condiciones anómalas.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo: analizar el comportamiento térmico en paneles solares mediante estudios e inspecciones termográficas con imágenes infrarrojas, identificando variaciones de temperatura, patrones térmicos y posibles anomalías que puedan afectar el desempeño de los módulos fotovoltaicos. La investigación busca aportar información técnica para fortalecer los procesos de evaluación, mantenimiento y optimización de sistemas solares mediante el uso de técnicas de diagnóstico no destructivas

Metodología

La investigación tiene un enfoque cuantitativo que se centra en el análisis de datos medibles relacionados con la distribución térmica y la eficiencia energética de los

módulos fotovoltaicos. El estudio es de tipo descriptivo, correlacional, no experimental, ya que las variables se observan en el contexto natural sin manipulación de las mismas.

Herramientas para el análisis térmico

Los equipos de detección permiten conocer el comportamiento térmico de toda la superficie de los módulos fotovoltaicos bajo determinadas condiciones y tomar las decisiones acertadas ante los resultados obtenidos.

La cámara termográfica permite obtener el valor de temperatura de un objeto mediante la irradiación infrarroja emitida, al tener en cuenta el ajuste correcto de los valores del factor de emisividad del objeto, la temperatura ambiente en la que se encuentra inmerso, de modo que aumenta la precisión del valor de temperatura medido.

Para el desarrollo de la investigación se utilizó la cámara termográfica modelo TiS65 de la marca Fluke, que se presenta en la figura 1.

Figura 1.

Cámara termográfica modelo TiS65



Nota. Adaptado de (Fluke Corporation, s.f.)

La cámara termográfica posee un software de análisis térmico que permite el análisis de las imágenes obtenidas mediante distintas herramientas de estudio, entre estas se encuentra la herramienta de marcación, que permite analizar zonas de interés en la imagen termográfica.

La cámara termográfica modelo TiS65 tiene incorporado el software Smart View Classic 4.4 y posee una aplicación móvil llamada Fluke Connect, que posibilita a los usuarios

realizar los análisis térmicos y brinda un enlace con los dispositivos móviles que facilita la observación de las mediciones registradas por la cámara en tiempo real, mediante una conexión Wifi.

Resultados

Sistemas solares fotovoltaicos y principios de conversión energética

La energía solar fotovoltaica constituye una de las tecnologías renovables con mayor desarrollo en las últimas décadas debido a su capacidad para transformar directamente la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Este fenómeno se fundamenta en la interacción entre la radiación electromagnética y los materiales semiconductores, principalmente silicio, donde la absorción de fotones genera pares electrón-hueco que permiten la circulación de corriente eléctrica cuando existe un campo eléctrico interno en la unión semiconductor (Green, 2019).

Los módulos fotovoltaicos están conformados por múltiples células solares conectadas eléctricamente y protegidas mediante capas de encapsulamiento, vidrio frontal, láminas posteriores y estructuras de soporte. Aunque el objetivo principal del módulo es maximizar la conversión energética, una parte considerable de la radiación solar incidente no se transforma en electricidad y se convierte en calor dentro de la estructura del panel. Esta transformación energética genera un incremento de temperatura que influye directamente sobre el comportamiento eléctrico y la eficiencia del sistema (Duffie y Beckman, 2013).

El rendimiento de un módulo fotovoltaico se expresa generalmente mediante su eficiencia de conversión, definida como la relación entre la potencia eléctrica generada y la energía solar recibida. Sin embargo, dicha eficiencia está condicionada por factores ambientales como irradiancia, temperatura ambiente, velocidad del viento y condiciones de instalación. Entre estos factores, la temperatura del módulo tiene una influencia

significativa debido a que altera las propiedades eléctricas del semiconductor (Skoplaki y Palyvos, 2009).

Influencia de la temperatura en el rendimiento de los paneles solares

El comportamiento térmico de los paneles solares representa un aspecto fundamental para comprender las pérdidas de rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. Cuando aumenta la temperatura de operación del módulo se produce una disminución del voltaje de circuito abierto, mientras que la corriente puede presentar ligeras variaciones. Como resultado, la potencia máxima entregada por el panel disminuye progresivamente con el incremento térmico (Dubey et al., 2013).

El coeficiente de temperatura es un parámetro utilizado para describir la sensibilidad del módulo fotovoltaico ante cambios térmicos. Generalmente, los fabricantes especifican este valor mediante la variación porcentual de potencia por cada grado Celsius de incremento sobre la temperatura estándar de referencia. En condiciones reales de operación, los módulos pueden superar ampliamente los valores considerados en laboratorio, provocando reducciones importantes de generación eléctrica (King et al., 2004).

Desde el punto de vista térmico, la temperatura alcanzada por un módulo depende del equilibrio entre la energía absorbida y los mecanismos de transferencia de calor hacia el ambiente. Los procesos de conducción, convección y radiación determinan la capacidad del panel para disipar la energía térmica acumulada. Por esta razón, aspectos como la separación entre el módulo y la superficie de montaje, la ventilación posterior y la orientación del panel influyen en la temperatura final de operación (Duffie y Beckman, 2013).

La acumulación de calor en los módulos no solamente afecta la eficiencia inmediata, sino que puede acelerar procesos de degradación. La exposición continua a ciclos térmicos

puede producir esfuerzos mecánicos internos, deterioro del encapsulante, aparición de microfracturas y fallas progresivas en las conexiones eléctricas (Jordan y Kurtz, 2013). Por ello, el monitoreo térmico constituye una estrategia importante para garantizar la confiabilidad y vida útil de las instalaciones fotovoltaicas.

Fenómenos térmicos asociados a fallas en módulos fotovoltaicos

Durante la operación normal de un sistema fotovoltaico pueden aparecer distribuciones térmicas no uniformes debido a diferentes condiciones de funcionamiento. Una de las anomalías más estudiadas corresponde a los denominados puntos calientes (hot spots), definidos como regiones localizadas donde la temperatura supera significativamente la temperatura promedio del módulo.

Los puntos calientes pueden generarse cuando una o varias células fotovoltaicas presentan menor capacidad de generación eléctrica que las demás células conectadas en serie. En estas condiciones, la célula defectuosa puede operar como una carga consumiendo energía producida por otras células, aumentando su temperatura y generando un proceso de calentamiento localizado (Mellit y Kalogirou, 2008).

Entre las principales causas de aparición de puntos calientes se encuentran las sombras parciales, suciedad superficial, daños mecánicos, defectos de fabricación, degradación de materiales y fallas en los diodos de derivación. Estas condiciones pueden provocar pérdidas energéticas y en situaciones extremas, daños permanentes en el módulo fotovoltaico (Silvestre et al., 2013).

La detección temprana de estas anomalías permite aplicar acciones preventivas antes de que se produzcan fallas mayores. En este sentido, el análisis térmico se convierte en una herramienta complementaria a las mediciones eléctricas tradicionales, debido a que proporciona información espacial sobre la distribución de temperatura del módulo.

Termografía infrarroja aplicada a sistemas fotovoltaicos



La termografía infrarroja es una técnica de inspección basada en la medición de la radiación infrarroja emitida por una superficie, la cual permite determinar su temperatura superficial sin necesidad de contacto físico. Las cámaras termográficas convierten la radiación térmica captada en imágenes donde cada píxel representa un valor de temperatura, generando mapas térmicos denominados termogramas (Usamentiaga et al., 2014).

En sistemas fotovoltaicos, la termografía infrarroja se utiliza para evaluar la distribución térmica de los módulos durante condiciones normales de operación. Una imagen térmica permite identificar diferencias de temperatura entre células, conexiones eléctricas y zonas específicas del panel, facilitando la localización de defectos que podrían pasar desapercibidos mediante inspecciones visuales convencionales (Aghaei et al., 2020).

Una de las principales ventajas de esta metodología es su carácter no destructivo. La inspección puede realizarse sin desmontar los módulos ni interrumpir significativamente la producción energética. Además, permite analizar grandes superficies en periodos cortos, siendo especialmente útil en instalaciones fotovoltaicas de mediana y gran escala (Gallardo-Saavedra et al., 2016).

Sin embargo, la interpretación de imágenes infrarrojas requiere considerar diferentes factores que pueden modificar la medición, como emisividad del material, distancia de observación, ángulo de captura, condiciones ambientales y nivel de irradiancia durante la inspección. Por esta razón, los estudios termográficos deben realizarse bajo criterios técnicos que garanticen la confiabilidad de los resultados obtenidos (Usamentiaga et al., 2014).

Inspección térmica como estrategia de mantenimiento predictivo

El mantenimiento de sistemas fotovoltaicos ha evolucionado desde estrategias correctivas hacia enfoques preventivos y predictivos basados en la supervisión continua del

comportamiento del sistema. Dentro de estas estrategias, la inspección termográfica representa una herramienta de diagnóstico que permite identificar cambios asociados con degradación o fallas antes de que afecten significativamente la generación energética (Chine et al., 2014).

La combinación de datos térmicos con parámetros eléctricos permite desarrollar evaluaciones más completas del estado del sistema. Mientras los parámetros eléctricos muestran el desempeño global del módulo, las imágenes infrarrojas proporcionan información localizada sobre la distribución térmica. Esta integración facilita la identificación de relaciones entre pérdidas de potencia y condiciones físicas del panel.

En la actualidad el desarrollo tecnológico de cámaras infrarrojas, sistemas automatizados de análisis de imágenes e inteligencia artificial amplia las posibilidades de aplicación de la termografía en sistemas solares. Estas herramientas permiten el proceso de grandes volúmenes de información y mejorar la precisión en la detección automática de anomalías térmicas (Aghaei et al., 2020).

En este contexto, el análisis del comportamiento térmico mediante imágenes infrarrojas representa una metodología relevante para mejorar la eficiencia operativa, aumentar la confiabilidad y extender la vida útil de los sistemas fotovoltaicos. Su aplicación permite avanzar hacia modelos de mantenimiento inteligente basados en la evaluación continua de las condiciones reales de funcionamiento.

Metodología para realizar el estudio termográfico

Información inicial

El proyecto se desarrolló en las instalaciones de un sistema fotovoltaico de 3,4 kWp ubicado en la ciudad de Portoviejo, que consta con 18 módulos fotovoltaicos de fabricación China con potencia unitaria de 190 Wp del modelo SM572-190, con una potencia global del generador de 3.420 Wp y que tributan una potencia de 3.092 Wp en

condiciones de funcionamiento, instalados en paralelo con 2 cadenas. El voltaje de máxima potencia (V_{mpp}) es de 301 V y una corriente máxima de potencia (I_{mpp}) de 10 A. La superficie total de los módulos es de 23m^2 y la superficie de las células es de $20,3\text{m}^2$. El sistema cuenta con un inversor de conexión a la red modelo Sunny Boy 3.000, del fabricante SMA, con una potencia de 3Kw AC y una tensión de funcionamiento de 220-480 V.

Para la inspección térmica de los módulos se utilizó el método del contraste térmico (Morales y Martínez, 2020) que se fundamenta en la diferencia que se establece entre la temperatura máxima que registra la celda fotovoltaica y la temperatura del ambiente al momento específico de realizar la medición. Esta técnica está consolidada como una herramienta notable dentro de la comunidad de especialistas del sector energético, en particular es apreciada por los profesionales dedicados al mantenimiento predictivo de instalaciones fotovoltaicas.

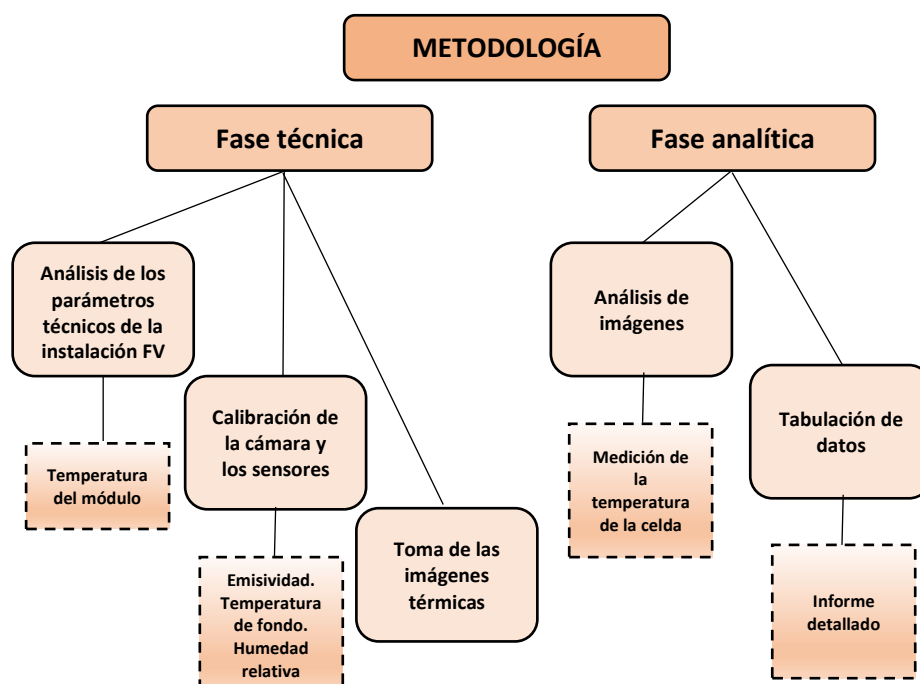
La precisión o exactitud se determina por diversos factores como:

- **Factor de emisividad:** que tiene un rango de 0,9 a 0,95. Para la investigación se usó el valor de emisividad de 0,9.
- **Temperatura ambiente:** conocida como temperatura de fondo o temperatura de segundo plano, está relacionada con el valor de temperatura alrededor de los módulos solares. Para la investigación se obtuvo el valor de temperatura ambiente mediante un termómetro que se ubicó en los límites de la instalación fotovoltaica.
- **Humedad relativa:** la humedad relativa es un valor que no afecta en gran medida a la medición de temperatura, pero es necesario conocerla. En la ciudad de Portoviejo la humedad relativa es por lo general del 80%.

En la figura 2 se expone la metodología aplicada para el análisis termográfico de la instalación fotovoltaica.

Figura 2.

Metodología para el análisis termográfico



La fase técnica como primer punto establece la recolección de datos técnicos del sistema fotovoltaico. El estudio termográfico necesita la información de la temperatura nominal del módulo para calcular la diferencia en relación con la diferencia de la temperatura medida y de esa forma poder determinar los puntos calientes.

El segundo punto se relaciona con la calibración del equipamiento técnico a través del ajuste de los parámetros técnicos, relacionados con: el factor de emisividad, temperatura ambiente y la humedad relativa. La capacitación acerca de la correcta operación de los equipos de detección termográfica.

El último punto de la fase técnica consistirá en la obtención de la imagen térmica por cada medición, de cada uno de los 18 paneles que forman parte del sistema fotovoltaico estudiado. La adquisición de imágenes térmicas se debe realizar cumpliendo ciertas condiciones que se detallan a continuación (Morales y Martínez, 2020):

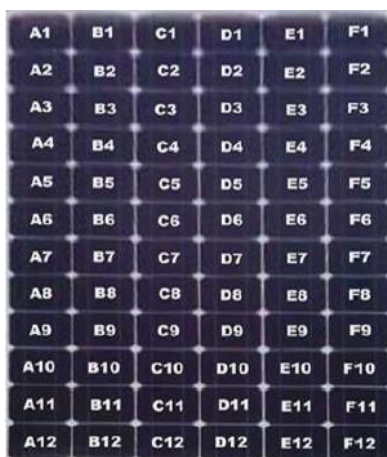
- Disponer de una cámara termográfica de calidad profesional.

- Equipamiento con accesorios apropiados para cada tipo de inspección.
- Configuración de la resolución óptima según la aplicación.
- En relación con las condiciones de iluminación se debe asegurar una radiación solar mínima de 500 W/m^2 , pero de modo ideal de debe trabajar con niveles superiores a 700 W/m^2 .
- Evitar la presencia de sombras que puedan interferir con la medición.
- Garantizar el mantenimiento de un ángulo de visión entre los valores de 5° y 60° .
- Minimizar o eliminar reflejos que puedan distorsionar las lecturas.
- Asegurar el posicionamiento de la cámara de modo adecuado respecto al objeto de estudio (Morales y Martínez, 2020).

La fase analítica consiste en el estudio de cada una de las imágenes térmicas mediante el uso del *software Smart View Classic 4.4*. Los marcadores se delimitarán en función de cada una de las celdas fotovoltaicas que forman parte de la imagen del panel solar. Cada uno de estos marcadores contiene información de la temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura promedio del área delimitada, cada marcador llevara por nombre una combinación de letras y números, como se muestra en la figura 3.

Figura 3.

Marcación de las celdas solares



Nota. Adaptado de Software Smart View Classic 4.4



La información de temperatura proporcionada por los marcadores tendrá relevancia en determinadas partes del análisis termográfico. La temperatura promedio permite reunir la información de todo el conjunto de píxeles que contienen valores de temperatura de una determinada celda. La temperatura máxima y la mínima, solo ofrece la información del píxel de la imagen térmica que tiene el mayor o menor valor de la zona delimitada.

El software Smart View Classic 4.4 permite la generación de informes de inspección térmica. Los informes muestran la información de los marcadores insertados, en las diferentes imágenes seleccionadas en tablas de acuerdo a la imagen en la que fue ubicado el marcador. La información presentada incluye datos tanto de las imágenes térmicas (fecha, hora), como de los datos de temperatura de los marcadores (máxima, mínima y promedio), emisividad, temperatura de fondo, nombre del marcador.

La identificación y posterior clasificación de los puntos calientes, se realiza a partir de la información de los marcadores presentados en las tablas de los informes térmicos. Los datos de las tablas son llevados a una hoja de cálculo de Excel, en la cual se aplican técnicas cuantitativas relacionadas con el método de contraste térmico, para determinar las celdas que presentan puntos calientes.

Los puntos calientes obtenidos son posteriormente reclasificados para determinar la gravedad de los mismos, de acuerdo a su valor de temperatura. La gravedad de estos puntos es representada en gráficos de barras, en los cuales se ve representada la incidencia de los puntos calientes en determinados paneles del sistema fotovoltaico, así como se muestra el comportamiento de los puntos calientes en determinadas condiciones a lo largo de todo el estudio térmico.

Estudio termográfico

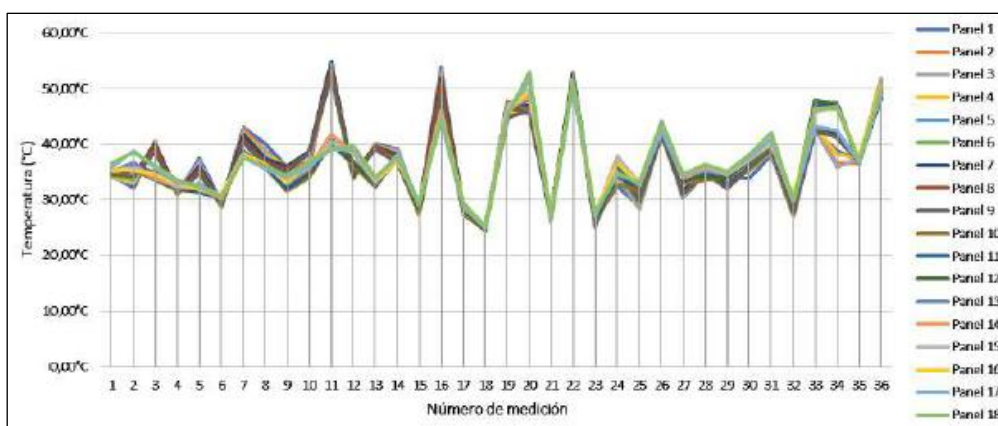
El estudio termográfico registró 36 mediciones realizadas en los meses de febrero y marzo del año 2026. Sus resultados se materializan mediante una muestra total de 45.336 datos

relacionados con los marcadores del análisis térmico y del total, 44.688 marcadores corresponden a los datos de las celdas de los paneles fotovoltaicos. Los valores restantes corresponden a los marcadores A0 de cada uno de los paneles solares.

El marcador A0 tiene como objetivo mostrar el comportamiento térmico de cada uno de los módulos fotovoltaicos. Este marcador delimita toda la superficie del panel solar. En un estudio termográfico la temperatura de un objeto viene dada por la temperatura promedio del marcador que delimita a todo el objeto medido. A continuación, se presenta la figura 4 que muestra el comportamiento térmico de los módulos solares, usando la temperatura promedio del marcador A0:

Figura 4.

Registro térmico de los módulos solares



La primera categorización establece cuáles son las celdas que tienen temperaturas altas o bajas. Para ello es necesario tomar en cuenta las temperaturas que están cerca, pero por debajo del valor nominal de trabajo del panel solar. Las altas temperaturas facilitan el análisis de la posibilidad de que aparezcan puntos calientes.

Al tomar como base la temperatura ambiente promedio de 25 °C a 35 °C en Portoviejo, se definió el siguiente rango para clasificar las temperaturas altas y bajas, según se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. *Rango de clasificación de las temperaturas*

No	Clasificación de temperaturas	Rango de valores (°C)
1	Baja temperatura.	<40
2	Alta Temperatura	≥40

La temperatura de las celdas fotovoltaicas determinará el primer análisis para detectar y clasificar los puntos calientes y en el estudio termográfico se tendrá en cuenta la medida de temperatura. La clasificación de baja o alta temperatura se basa en el promedio de la celda.

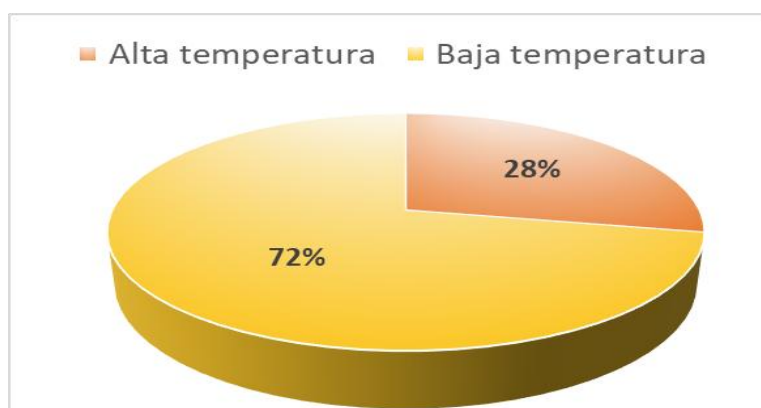
En la tabla 2 se presentan los resultados del análisis y en la figura 5 el grafico que expone los porcentajes de la clasificación obtenida.

Tabla 2. *Clasificación de temperaturas*

No	Clasificación de Temperaturas	Numero de celdas
1	Baja Temperatura	32.263
2	Alta Temperatura	12.425

Figura 5.

Comportamiento porcentual de la clasificación de las temperaturas



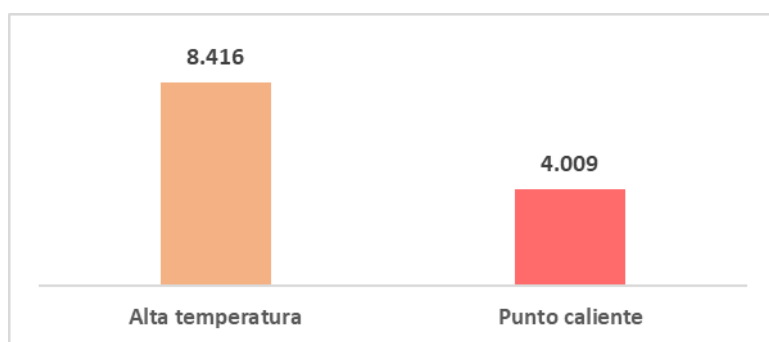
Las temperaturas elevadas no son, en todas las situaciones, puntos calientes. Esta definición va a depender del valor concreto de la temperatura registrada en el momento

de la medición. De acuerdo con el estudio realizado se determina la presencia de puntos calientes cuando la temperatura de la celda solar supera los 50 °C.

Los valores de tendencia del estudio, así como los valores de clasificación para las celdas fotovoltaicas y las altas temperaturas, se muestran en la figura 6.

Figura 6.

Clasificación de temperaturas elevadas y puntos calientes



La temperatura máxima de una zona determinada, que se encuentra en niveles altos, define la magnitud de los puntos calientes. En el caso del estudio, la temperatura máxima corresponde a la del píxel con el valor más alto de la celda fotovoltaica, que se halla indicada por un marcador instalado en dicha celda.

El método del contraste térmico es utilizado para el estudio termográfico en interés de clasificar la severidad de los puntos calientes. El método de contraste térmico es la diferencia entre la temperatura máxima en un punto caliente (T_d) y la temperatura del ambiente del panel (T_{sa}) (Morales y Martínez, 2020). En la tabla 3, se expone la escala de valores para clasificar la gravedad de un punto caliente en función del valor del contraste térmico y proporciona la clasificación de los puntos calientes.

Tabla 3. *Valores para clasificar la gravedad de un punto caliente*

No	Escala de valores	Gravedad
1	$T_d - T_{sa} \leq 10^{\circ}\text{C}$	Normal
2	$10^{\circ}\text{C} < T_d - T_{sa} \leq 20^{\circ}\text{C}$	Baja

3	$20^{\circ}\text{C} < T_d - T_{sa} \leq 40^{\circ}\text{C}$	Moderada
4	$40^{\circ}\text{C} < T_d - T_{sa} \leq 70^{\circ}\text{C}$	Severo
5	$T_d - T_{sa} > 70^{\circ}\text{C}$	Crítico

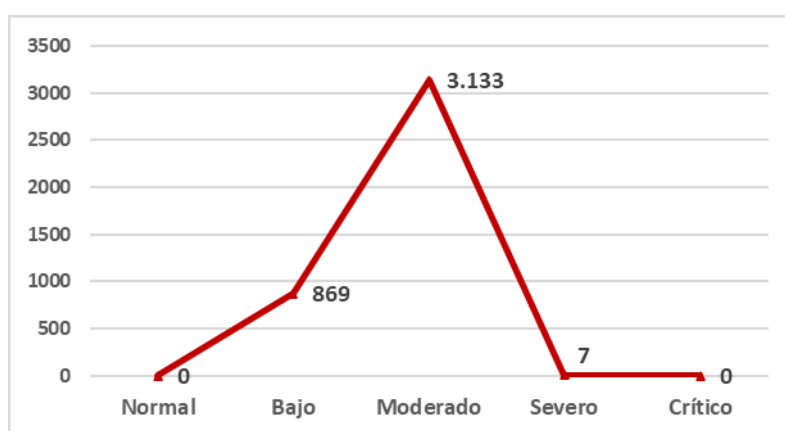
Nota. Adaptado de (Morales y Martínez, 2020)

Para encontrar soluciones inmediatas a los problemas que generan los puntos calientes y tomar decisiones apropiadas, es preciso establecer su gravedad. Las celdas solares tienen características que hacen más sencillo el análisis y la evaluación de las celdas de interés, así como los posibles motivos por los cuales no funcionan correctamente.

En la figura 7 se presenta el gráfico general con la clasificación de los puntos calientes según el análisis termográfico aplicado en el sistema fotovoltaico.

Figura 7.

Clasificación de los puntos calientes



Los puntos calientes pueden surgir en cantidades variables en cada panel solar, por lo que es preciso examinar los puntos calientes de cada módulo para tomar decisiones adecuadas. En la tabla 4 se muestra el ordenamiento de los puntos calientes correspondientes a cada panel solar.

Tabla 4. *Clasificación de puntos calientes en los paneles solares*

No de panel	Clasificación de los puntos calientes
-------------	---------------------------------------

	Normal	Bajo	Moderado	Severo	Crítico
Panel 1	0	78	234	0	0
Panel 2	0	53	252	0	0
Panel 3	0	54	242	0	0
Panel 4	0	47	242	0	0
Panel 5	0	51	229	0	0
Panel 6	0	54	210	0	0
Panel 7	0	50	213	0	0
Panel 8	0	42	188	0	0
Panel 9	0	21	162	0	0
Panel 10	0	50	123	0	0
Panel 11	0	58	129	1	0
Panel 12	0	63	152	0	0
Panel 13	0	42	123	0	0
Panel 14	0	45	97	0	0
Panel 15	0	51	119	0	0
Panel 16	0	47	120	0	0
Panel 17	0	29	136	3	0
Panel 18	0	31	162	3	0

La probabilidad de que aparezca un punto caliente en una determinada celda es muy pequeña. En función del total de puntos calientes obtenidos en el estudio, la probabilidad de un punto caliente es entre el 1,07% al 1,72%.

Para determinar las razones de los puntos calientes, es esencial la valoración del comportamiento térmico de los módulos fotovoltaicos. La temperatura tiene un rol fundamental porque debe ser lo más similar posible entre ellas para permitir la comparación de las temperaturas máximas de los puntos calientes.

A lo largo del análisis térmico, se llevaron a cabo numerosas pruebas en los módulos, vinculadas con el mantenimiento. Esto se logró mediante el examen de las imágenes térmicas y del rendimiento térmico de todos los módulos.

Los datos de la medición en los paneles 1, 9, 10 y 18 se presentan en la tabla 5, tomando en cuenta la temperatura promedio, máxima y mínima de la celda solar que genera en dicha medición.

Tabla 5. *Temperaturas y causas de los puntos calientes*

Número del No	Causas de los puntos panel calientes	Temperatura promedio	Temperatura mínima	Temperatura máxima
1	Panel 1 Suciedad	52,10	40,82	54,81
2	Panel 10 Sombra	52,06	48,11	57,92
3	Panel 9 Reflejo de luz	51,86	43,25	54,93
4	Panel 18 Daños en el panel	51,59	44,38	59,66

Dentro de las causas de la alta temperatura sobresalen los daños que existen en el panel fotovoltaico del panel 18 y el sombreado parcial en el panel 10. Estos son elementos que se deben controlar de manera sistemática y adoptar las medidas técnicas que permitan su reducción para evitar la aparición de puntos calientes que afecten la estabilidad operativa de la instalación.

Discusión

Los puntos calientes pueden surgir por diversos factores. Esta problemática afecta en primera instancia a una zona específica del panel solar, que de no tomar los correctivos necesarios puede aumentar de manera progresiva la zona afectada, hasta el punto de causar el colapso de la tecnología, de acuerdo con lo investigado por Dubey et al. (2013). El incremento de la temperatura en los paneles solares constituye un elemento técnico que debe ser vigilado de modo sistemático por sus repercusiones en la productividad

energética e incluso la estabilidad operativa de la instalación, en concordancia con el análisis realizado por Dubey et al. (2013); Skoplaki y Palyvos (2009); Jordan y Kurtz (2013).

Uno de los métodos más efectivos para realizar el control sistemático de la temperatura de los módulos fotovoltaicos, consiste en el estudio termográfico de la instalación, que permite el análisis a escala de células fotovoltaicas sobre el incremento de la temperatura y posibilita examinar las causas del desnivel térmico en la tecnología, en consonancia con lo examinado por Aghaei et al. (2020); Chine et al. (2014); Silvestre et al. (2013).

Los controles termográficos realizados en otras instalaciones demuestran las ventajas que aseguran la aplicación de la metodología desarrollada para el control termográfico de las instalaciones fotovoltaicas, lo que se comprueba en las investigaciones realizadas por Gallardo-Saavedra et al. (2016); King et al. (2004).

La metodología aplicada para el estudio termográfico puede ser aplicada en otras instalaciones fotovoltaicas, en especial lo que respecta al mantenimiento y a la eficiencia energética. La utilización de la tecnología termográfica para identificar a tiempo puntos calientes demuestra que constituye un instrumento útil para establecer estrategias de mantenimiento preventivo a las instalaciones, en consonancia con las experiencias adquiridas por Aghaei et al. (2020); Mellit y Kalogirou (2008); Usamentiaga et al. (2014).

La perspectiva del control termográfico a las instalaciones fotovoltaicas posibilita prever errores potenciales antes de que causen daños mayores en los paneles solares que no sean reparables y alargar la vida útil de las instalaciones fotovoltaicas. La habilidad para detectar anomalías que no son evidentes a simple vista evidencia el potencial de las tecnologías que se usan para realizar el control termográfico en las instalaciones fotovoltaicas Chine et al. (2014); Morales y Martínez (2020).

Conclusiones

Mediante la investigación se logró la identificación de la conducta térmica de la instalación fotovoltaica objeto del estudio, para confirmar que el método utilizado basado en la termografía con una cámara termográfica es un medio eficaz para prever y detectar precozmente puntos calientes.

El análisis termográfico reveló la existencia de diversas celdas con alta temperatura. Este análisis posibilitó establecer las bases necesarias para realizar investigaciones futuras sobre el mismo tema y proporcionar los datos obtenidos a los diversos proyectos realizados en el sistema fotovoltaico examinado. El programa Smart View Classic 4.4 se mostró como una herramienta útil para el análisis de imágenes térmicas, lo que hizo posible no solo detectar las zonas relevantes, sino que delimitar áreas concretas para extraer la información térmica dirigidas a la evaluación cuantitativa de las temperaturas registradas en cada celda fotovoltaica.

A partir de las experiencias derivadas del estudio se recomienda que la hora más eficaz para llevar a cabo las mediciones es las 12h00, cuando hay una intensa radiación solar y un escaso porcentaje de humedad relativa en el entorno, así como la medición se debe realizar cuando el sistema se encuentra generando energía eléctrica.

Referencias

Aghaei, M., Le, A. D. T., Bui, T. T., y Dhimish, M. (2020). Infrared thermography and its application in photovoltaic module inspection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110011.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110011>

- Chine, W., Mellit, A., Pavan, A. M., y Kalogirou, S. A. (2014). Fault detection method for grid-connected photovoltaic systems. *Renewable Energy*, 66, 589–598. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.019>
- Dubey, S., Sarvaiya, J. N., y Seshadri, B. (2013). Temperature dependent photovoltaic efficiency and its effect on PV production in the world: A review. *Energy Procedia*, 33, 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.072>
- Duffie, J. A., y Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Wiley.
- Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., y Duque-Pérez, O. (2016). A review of infrared thermography for the inspection of photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1324–1331. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.048>
- Green, M. A. (2019). The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(6), 458–469.
- International Energy Agency. (2023). *Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- Jordan, D. C., y Kurtz, S. R. (2013). Photovoltaic degradation rates—An analytical review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 12–29. <https://doi.org/10.1002/pip.1182>
- King, D. L., Boyson, W. E., y Kratochvil, J. A. (2004). Photovoltaic array performance model. Sandia National Laboratories.
- Mellit, A., y Kalogirou, S. A. (2008). Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(5), 574–632. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.01.001>

- Morales, G. S., y Martínez, A. (2020). Preventive diagnosis of photovoltaic facilities based on the interpretation of infrared images. https://www.researchgate.net/publication/345049289_Preventive_diagnosis_of_photovoltaic_facilities_based_on_the_interpretation_of_infrared_images
- Silvestre, S., Chouder, A., y Karatepe, E. (2013). Automatic fault detection in grid-connected PV systems. *Solar Energy*, 94, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.05.001>
- Skoplaki, E., y Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83(5), 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>
- Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., y Bulnes, F. G. (2014). Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*, 14(7), 12305–12348.