

# Fault detection in photovoltaic panels of a solar farm

## Detección de fallas en paneles fotovoltaicos de una granja solar

David Manuel Ramos-Sánchez<sup>1</sup>, Joel Salome-Baylon<sup>\*1</sup>, Adrián Tintos-Gómez<sup>1</sup>, and Juan Antonio Díaz-Gómez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica de Manzanillo, Energías Renovables,  
Av. Paseo San Gerardo 207, Fracc. San Gerardo, Aguascalientes, Ags. México, 20342.  
{david-ramos, joel-salome, adrian-tintos, juan-diaz}@utem.edu.mx

### Abstract

The Photovoltaic systems have their maximum performance under optimal operating conditions, due to this, extensive research has been carried out on several techniques for detecting faults in solar panels. In this work, three of the fault identification methods are used: visual inspection, infrared thermography, and inverter output power analysis applied to a photovoltaic farm as a case study.

**Keywords**— Solar panel, fault identification, thermography

### Resumen

Los sistemas fotovoltaicos tienen su máximo rendimiento bajo condiciones de funcionamiento óptimo, debido a esto se ha desarrollado amplia investigación sobre distintas técnicas de detección de fallas en paneles solares. En este trabajo se utilizan tres de los métodos de identificación de fallas: inspección visual, termografía infrarroja y análisis de potencia de salida de inversores aplicados a una granja fotovoltaica como caso de estudio.

**Palabras clave**— Panel solar, identificación fallas, termografía

## I. Introducción

Con la creciente demanda de fuentes de energía renovables, el uso de sistemas de energía solar está creciendo rápidamente y es cada vez más importante. Como resultado, la industria fotovoltaica ha realizado esfuerzos considerables para reducir el costo de la energía fotovoltaica. Esto depende del costo de fabricación del sistema, su eficiencia y su vida útil.

\* Autor de correspondencia

En este sentido, la durabilidad de los paneles fotovoltaicos (PV, por sus siglas en inglés) es un aspecto clave para la viabilidad económica. Los fabricantes dan garantías de buen rendimiento a la energía fotovoltaica de 20 a 25 años basándose únicamente en pruebas de certificación de calidad y no en pruebas que evalúen su fiabilidad a largo plazo [1], por ello se ha observado que PV certificados fallan en campo antes de lo estimado. Estas fallas pueden ocurrir durante la fabricación, el transporte, el montaje y la operación. Las fallas deben detectarse en la instalación y los sistemas deben revisarse periódicamente durante su funcionamiento, para proteger los componentes contra daños y reducir los riesgos.

## II. Causas de reducción del rendimiento y fallas fotovoltaicas

### II.1. Tecnología fotovoltaica

La configuración más común de los PV se muestra en la Figura 1, donde se muestra que está compuesto por una cubierta frontal de vidrio, encapsulante EVA (Etileno Vinil Acetato), celdas solares interconectadas, encapsulante, hoja posterior, caja de interconexiones y en el caso de la tecnología de silicio (Si) un marco de aluminio. Para los de película delgada el marco de aluminio no es necesario.

La Tabla 1 proporciona un resumen de las principales tecnologías fotovoltaicas. Se observa que la mayoría de las tecnologías tienen una buena vida útil al aire libre. Esta propiedad, en combinación con la economía de escala, provoca que se pueda generar electricidad a un nivel de costo muy competitivo.

### II.2. Causas de degradación de paneles

La vida útil de los PV es afectada por diversos efectos externos donde fueron instalados. Por lo cual es necesario

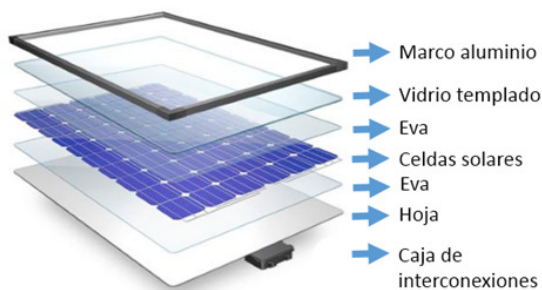


Figura 1: Configuración más común de los módulos fotovoltaicos [2]

Tabla 1: Comparación de tecnologías fotovoltaicas [2]

Tecnología	% Mercado 2020	% eficiencia	Tiempo de vida años
Silicio Monocristalino	66	26.7	>20
Silicio Policristalino	28.4	24.4	>20
Telururo de cadmio (CdTe)	4.1	22.1	>20
Seleniuro de galio, indio y cobre (CIGS)	0.8	23.4	>20
Silicio Amorfo	0.1	14.0	>20
Celdas solares por colorante	-	12.3	<2
Celdas orgánicas	-	17.5	2
Celdas Perovskita	-	25.5	<.5

establecer la severidad de las condiciones para cada escenario específico. Algunos de estos factores se muestran en la Tabla 2.

### II.3. Fallas de PV

Los equipos solares fotovoltaicos están diseñados para un funcionamiento seguro durante toda la vida útil del producto. A pesar de ello, se producen defectos de fabricación y defectos prematuros que pueden afectar el rendimiento de manera considerable. Las técnicas de producción en masa y un control de baja calidad pueden introducir defectos de fabricación en las celdas y los paneles. El transporte y la instalación pueden provocar daños. En las tablas 3 - 5 se muestran las principales fallas.

Tabla 2: Causas de degradación de paneles [2]

Causa	Descripción
Irradiancia	Aunque la región de ultravioleta (280-400nm) corresponde solo al 4.6 % de $1000 W/m^2$ , sus fotones son los más perjudiciales para los materiales poliméricos, provocando que se vuelva frágil y se decolore.
Temperatura	Puede afectar el rendimiento eléctrico, acelera la difusión y velocidad de reacción en los materiales. También induce estrés mecánico, debido a las diferencias en los coeficientes de expansión térmica de las piezas del panel, provocando deformaciones, fatiga, delaminación y en algunos casos agrietamiento de las celdas.
Humedad	Puede deteriorar las uniones adhesivas, resultando delaminación, pérdida de pasivación y revestimientos, lo cual conduce a la corrosión de elementos metálicos.
Carga mecánica	Pueden surgir diversas tensiones mecánicas en los módulos fotovoltaicos debido a procesos de fabricación, transporte, manipulación durante la instalación, viento, granizo, nieve y cargas termomecánicas. Podrían producirse agrietamientos o fracturas.
Suciedad	Puede surgir de la acumulación de polvo, la contaminación del aire, microbios, crecimiento de algas y excrementos de pájaros en la superficie del panel. Los primeros pueden afectar el rendimiento del panel, pero el último además puede causar puntos calientes, ya que puede actuar como un sombreado parcial.
Productos químicos	Algunas especies químicas naturales o producidas industrialmente puede causar la corrosión de los módulos fotovoltaicos. Los más comunes son la niebla salina en áreas marinas (especialmente dañina en climas tropicales), el amoníaco en zonas rurales agrícolas y ácido sulfúrico y nítrico en zonas industriales. Estos factores de estrés pueden degradar varios componentes de los módulos fotovoltaicos, tales como láminas posteriores, selladores de bordes, cajas de conexiones, cableado y conectores

Tabla 3: Fallas de paneles parte 1 [3, 4]

Causa	Descripción
Vidrio roto	Se ha encontrado que representa hasta un tercio de las fallas en sitio de los PV, la ruptura puede ocurrir durante el transporte, la instalación y durante la operación debido a tensiones térmicas o mecánicas como: puntos calientes y cargas estáticas o dinámicas. Debido a esto ya no actúa como una barrera impermeable a la humedad o como aislante eléctrico, provocando degradación del encapsulante y otros componentes.
Fallo de interconexión entre las celdas	Las celdas solares se interconectan en serie con cintas de interconexión para obtener un voltaje más alto. Estas cintas son muy propensas a romperse por: una soldadura deficiente en el proceso de producción, una formación demasiado intensa durante la fabricación, el estrés físico durante el transporte del PV, ciclo térmico y puntos calientes por sombreado parcial. Cuando las láminas EVA reaccionan con la humedad, forman ácido acético que acelera el proceso de corrosión de los componentes del módulo fotovoltaico. Esto puede atacar a todos los contactos de plata y afectar la producción de la celda. Cuando se localiza un fallo en el EVA, también se ve afectado todo el encapsulante. Cuando se produce este fallo, la celda de silicio puede entrar en contacto con el aire. El oxígeno del aire dará lugar a la formación de dióxidos de silicio, produciéndose el efecto de la oxidación. Esto supone una decoloración, es decir, ese color marrón que aparece en las células.
Decoloración del encapsulante	

### III. Detección de fallas

Muchas de las fallas de los PV se pueden identificar mediante una inspección visual. Esta inspección puede llevarse a cabo en el laboratorio, antes y después de las pruebas o durante la operación en campo [5, 6]. En la Tabla 6 se describen las fallas que comúnmente se revisan. La sola inspección no permite identificar algunas otras fallas o condiciones previas a la falla, para ello se puede recurrir a realizar una inspección termográfica, la cual

Tabla 4: Fallas de paneles parte 2 [3, 4]

Causa	Descripción
Delaminación	Consiste en la separación del encapsulante del vidrio o la celda. La delaminación del vidrio frontal puede ocurrir debido a una mala adherencia de EVA o procedimientos de limpieza de vidrio deficientes durante el proceso de fabricación. Este defecto puede evitar que algo de luz llegue al PV. El problema puede ser más grave si la humedad se acumula en el vacío y crea cortocircuitos cerca de los cables de soldadura. Este defecto puede ser grave porque cuando se crea una burbuja de aire en el laminado, existe la posibilidad de acumulación de humedad y generación de cortocircuitos. Un recubrimiento antirreflectante (AR) aumenta la captura de luz y, por lo tanto, aumenta la conversión de la potencia del módulo. La delaminación por AR ocurre cuando el recubrimiento antirreflectante sale de la superficie de silicio de la célula. Las grietas en los PV pueden desarrollarse en diferentes etapas de su vida. Durante la fabricación la soldadura induce grandes tensiones en las celdas. El manejo y las vibraciones en el transporte pueden inducir o expandir grietas. Finalmente, también pueden generarse en el campo, ya que experimentan cargas mecánicas debido al viento (presión y vibraciones) y a la nieve (presión). Las grietas pueden traer consigo una pequeña reducción del rendimiento debido a las partes de la celda afectadas, pero también pueden suponer problemas graves, que implican una disminución de la corriente de cortocircuito y una caída sustancial en la eficiencia de la celda.
Agrietamiento celular	La caja de conexiones se define como un contenedor fijado en la parte posterior del PV. Generalmente contiene los diodos de derivación para proteger las celdas de una cadena en caso de que aparezcan puntos calientes o sombras. Las fallas más comunes son: mala fijación de la caja, cajas abiertas o mal cerradas, cableado deficiente que puede causar arcos de voltaje y problemas en los contactos de las interconexiones.
Caja de Conexiones	

**Tabla 5:** Fallas de paneles parte 3 [3, 4]

Causa	Descripción
Defectos en la hoja posterior	La hoja posterior de un PV sirve tanto para proteger los componentes electrónicos de la exposición directa al medio ambiente, como para proporcionar un funcionamiento seguro en presencia de altos voltajes de corriente continua. Lo más común es encontrarse con una lámina posterior compuesta de una estructura laminada con un polímero altamente estable y resistente a los rayos ultravioleta UV. Este tipo de láminas ofrecen un buen comportamiento frente al calor, la humedad, el estrés mecánico. El problema es cuando se detecta una delaminación, ya que aumentará la temperatura al no disiparse el calor.
Puntos Calientes	Las causas que pueden dar lugar a puntos de calor son bastante variadas, desde defectos estructurales en la fabricación de los paneles solares (ej. conexiones mal soldadas, delaminación, defectos del material de la célula) a daños mecánicos fruto de un mal manejo o transporte (ej. Las microrroturas, marco metálico doblado, etc.). De especial interés resulta también el efecto negativo del sombreado permanente, que puede dar lugar también a puntos de calor al reducir la capacidad de las celdas sombreadas con respecto a las otras.
Degradación Inducida por Potencial (PID)	Conocido como degradación por potencial inducido, es una degradación debida a la presencia de corrientes parásitas en los mismos. Su efecto potencial puede hacer caer la potencia del equipo hasta en un 30%. La causa de estas corrientes es la presencia de diferencias de potencial entre el PV y la tierra. Esto hace que se generen unas corrientes de fuga entre las células del panel y el resto de los componentes.

nos brinda un análisis más detallado, no invasivo y al mismo tiempo económico.




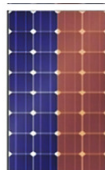
Hay muchas causas de fallas y fallas en los paneles fotovoltaicos que se pueden conocer de acuerdo con un patrón térmico como se muestra en las tablas 7 y 8 [7, 8].

Así también, el monitoreo en tiempo real de los sistemas fotovoltaicos de diferentes tamaños y aplicaciones es

**Tabla 6:** Identificación de fallas visualmente [5, 6]

Componente del PV	Falla en el PV
Frente del PV	Burbujas, delaminación, Amariamiento
Celdas	Celda rota, celda agrietada, delaminación del antirreflectante
Conexiones celdas	Quemada, oxidada
Marco aluminio	Doblado, roto, rayado, desalineado
Parte trasera del PV	Delaminación, burbujas, amariamiento, arañazos, quemaduras
Caja de conexiones	Suelta, oxidada, con corrosión
Cables - conectores	Desprendidos, frágiles, partes eléctricas expuestas

**Tabla 7:** Patrones de fallas fotovoltaicas mediante termografía parte 1 [7, 8]

Posible falla	Descripción	Patrón
Saludable	Sin fallas	
Circuito abierto	Todo el PV parece más caliente que otros. Nota: Se requiere una medición eléctrica adicional para mostrar su capacidad de operación.	
Circuito abierto	Un área del PV se identifica más caliente.	
Cortocircuito o diodo de derivación	Una o más filas están más calientes que otras en el mismo PV.	

necesario para mantener su porcentaje de rendimiento. Este proporciona información sobre la producción redu-

**Tabla 8:** Patrones de fallas fotovoltaicas mediante termografía parte 2 [7, 8]

Posible falla	Descripción	Patrón
Corto-circuito o diodo de derivación	Algunas celdas separadas tienen diferentes temperaturas, también se conoce como patrón de mosaico.	
Derivaciones masivas	Algunas celdas separadas y las cercanas al marco son más cálidas que el resto del mismo PV. Eso puede ser causado por polarización o degradación inducida por potencial.	
Celda defectuosa, celda delaminada o completamente sombreada)	Una celda está más caliente que todo el panel.	
Sombra parcial	Calentamiento poco puntual.	
Celda rota	Parte de una celda está más caliente que la otra parte y todo el PV.	

esperados) o fallas puntuales, que pueden detectarse más fácilmente por una fuerte reducción en la potencia de salida del sistema, pero no son fáciles de localizar si el sistema es muy grande.

En este sentido se pueden proponer dos grupos principales de técnicas de monitoreo: el primero está orientado al cálculo “predictivo” de la energía que producirá el sistema y el segundo está enfocado a la detección rápida y en tiempo real de fallas, comparando señales medidas simultáneamente en diferentes partes del sistema, lo que puede considerarse como una monitorización de “correlación cruzada”.

En ambos casos, el propósito es brindar información a los usuarios del sistema para realizar un correcto procedimiento de mantenimiento y/o reparación con el fin de mantener el índice de desempeño lo más alto posible. La principal diferencia entre los métodos predictivo y de correlación cruzada es que el primero requiere la medición de parámetros ambientales, mientras que el segundo solo utiliza datos térmicos o eléctricos medidos en los módulos fotovoltaicos o inversores [9, 10, 11].

#### IV. Inspección de granja fotovoltaica

La granja fotovoltaica inspeccionada se encuentra dentro de las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Manzanillo la cual se localiza a 19°08'22.2" N 104°18'57.5" W. Está constituida por 700 paneles de 390 Wp modelo JAM72S09 -390/PR, 88 paneles de 445 Wp modelo JAM78S10 -445/PR y 4 inversores de 62 kW modelo Sunny Tripower CORE1 62-US, cada inversor tiene conectado 78 kW de potencia en su entrada, pudiéndose conectar hasta un máximo de 93.7 kW, obteniéndose un sobredimensionamiento del 125 % de la potencia pico de los paneles con respecto a la potencia nominal del inversor, para compensar las pérdidas eléctricas de la instalación. El inicio de operación de la granja fotovoltaica se da el 21 de mayo del 2021, mientras que la inspección tuvo lugar el 19 de marzo del 2022 y fue realizada por profesores de tiempo completo y 10 estudiantes de 5to cuatrimestre de la carrera de energías renovables. La distribución del sistema se muestra en la Figura 2.



**Figura 2:** Distribución de granja fotovoltaica

cida (reducciones ligeras en comparación con los valores



#### IV.1. Inspección visual

Los puntos que se observan en la revisión como deficiencias se muestran a continuación.

Una estructura se encuentra vencida lo cual hace que los paneles no estén alineados (ver Figura 3).



Figura 3: Estructura desalineada

Se identifica que el edificio contiguo proyecta sombra en una parte de la instalación fotovoltaica (ver Figura 4).

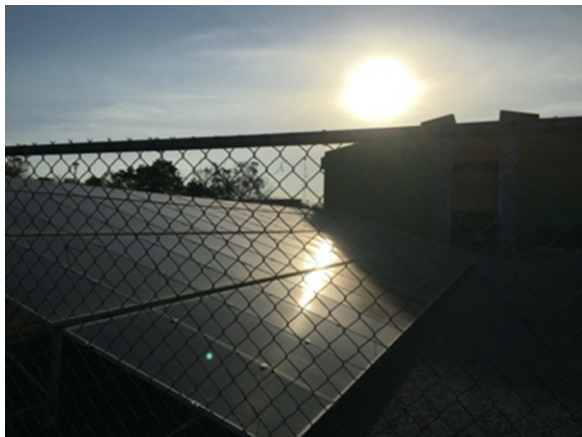


Figura 4: Sombra del edificio

Se observan varias sombras de la malla ciclónica proyectadas sobre los paneles (ver Figura 5).

Se descubren varios paneles con delaminación de anti-reflectante (ver Figura 6).



Figura 5: Sombra de malla



(a)



(b)

Figura 6: Delaminación de anti-reflectante

#### IV.2. Inspección termográfica

Para la prueba de inspección con cámara termográfica se utiliza la cámara FLIR-I7. Se detectan algunos paneles con patrones de falla como delaminación, puntos calientes y falla de diodo, estas se muestran en las figuras 6-13



Figura 7: Delaminación de panel

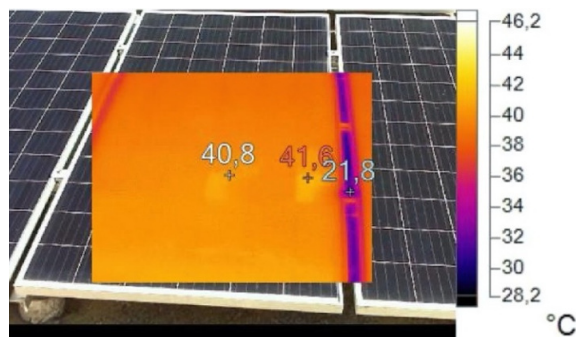


Figura 11: Delaminación, celda ligeramente calentada

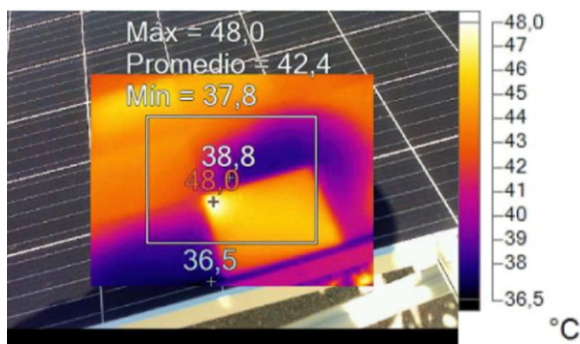


Figura 8: Puntos calientes

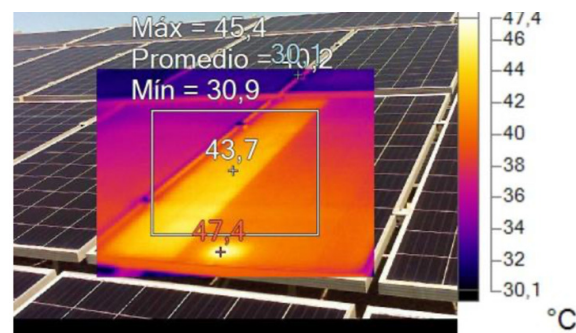


Figura 12: Diodo defectuoso

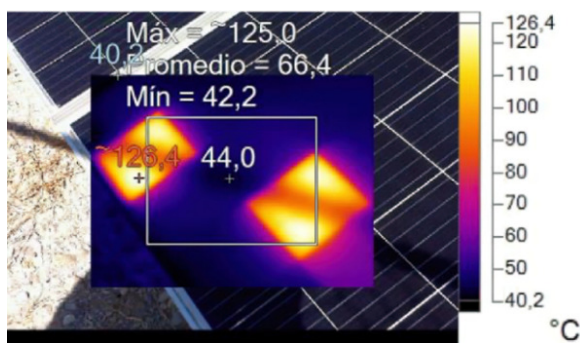


Figura 9: Puntos calientes por malla

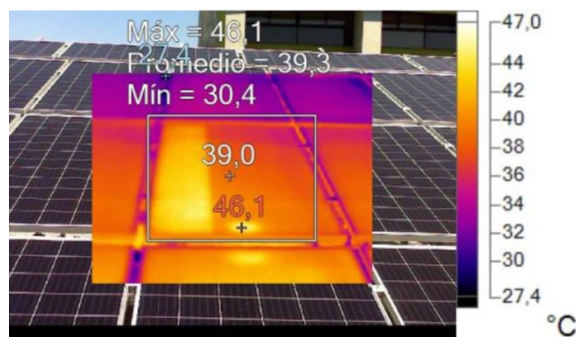


Figura 13: Diodo defectuoso

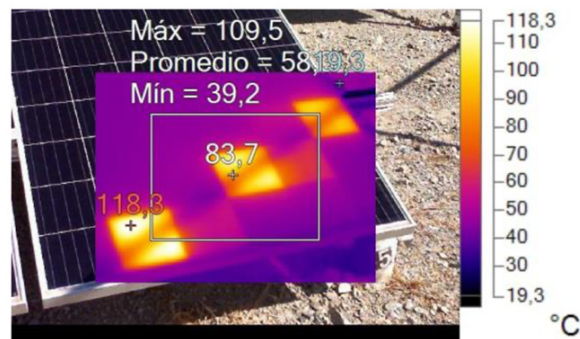


Figura 10: Puntos calientes por malla

### IV.3. Monitoreo

Los inversores cuentan con un sistema de monitoreo, de donde se extraen los datos que se grafican en las figuras 14-17. En las figuras 14 y 15 se muestra la potencia de salida de los inversores cada 15 minutos, se observa que en las primeras horas del día, el inversor 1 tiene menor producción que los otros 3 inversores, esto es porque el edificio contiguo proyecta sombra sobre esos paneles. Cuando no existen sombras la producción en los 4 inversores es similar

En la Figura 16 se muestra la producción de energía por día. Se despliegan los datos del mes de febrero del 2022, el inversor 1 sufre una desconexión el 1 de febrero, por lo cual tiene una menor producción que los inversores



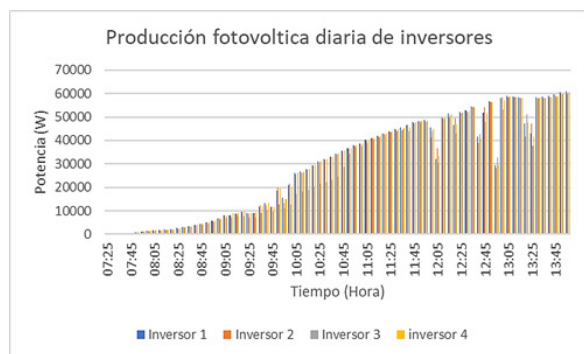


Figura 14: Producción fotovoltaica cada 15 minutos en inversores

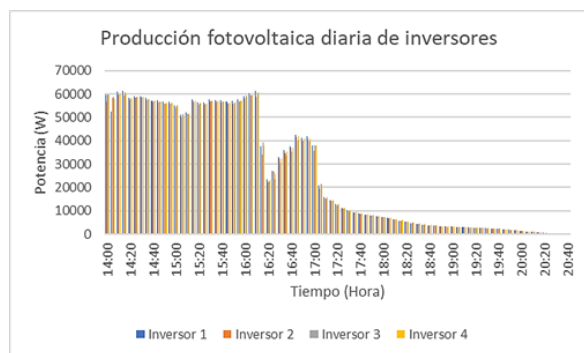


Figura 15: Producción fotovoltaica cada 15 minutos en inversores

restantes. Cuando no existe alguna falla la producción de energía en los 4 inversores es semejante.

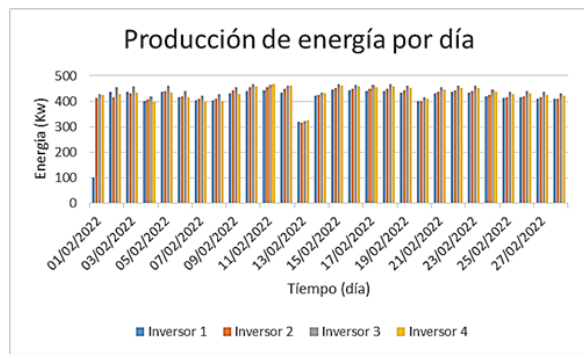


Figura 16: Producción de energía por día

En la Figura 17 se indica la producción de energía por mes. De septiembre 2021 a enero 2022 el inversor 1 es deshabilitado debido a una falla en una protección, por lo cual no cuenta con producción de energía. Cuando no existe alguna falla, la producción mensual de energía en los 4 inversores es semejante.

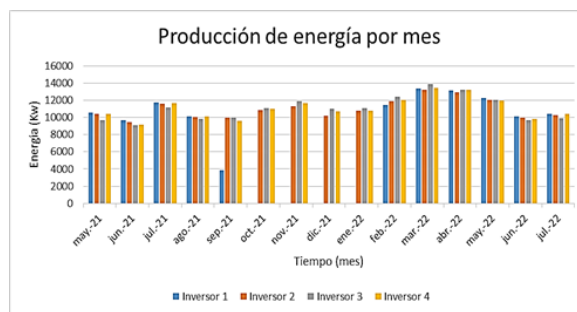


Figura 17: Producción de energía por mes

## V. Resultados

De las inspecciones realizadas se obtienen 6 paneles con delaminación del antirreflectante, dos paneles con delaminación de celda, 4 paneles con puntos calientes por sombras y 2 paneles con diodo defectuoso.

## VI. Conclusiones

Este artículo muestra 3 métodos de identificación de fallas en PV, donde el principal objetivo del estudio es identificar y proporcionar una colección de datos de degradación y modos de falla que ocurren en una granja solar, para ayudar a las empresas de instalación y fabricación a mejorar sus procesos.

Los resultados obtenidos (paneles con delaminación, puntos calientes y diodo defectuoso) concuerdan con otros estudios de campo expuestos en la literatura. Finalmente se puede concluir que la termografía es una técnica simple, económica, instantánea y fácil para la detección y diagnóstico de sistemas fotovoltaicos.

## Referencias

- [1] Georgios Goudelis, Pavlos I Lazaridis y Mahmoud Dhimish. «A review of models for photovoltaic crack and hotspot prediction». En: *Energies* 15.12 (2022), pág. 4303.
- [2] M Aghaei et al. «Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 159 (2022), pág. 112160.
- [3] Juan Bautista Ramos Palenzuela et al. «Análisis de defectos en paneles solares de plantas fotovoltaicas mediante termografía y electroluminiscencia.» En: (2022).
- [4] Marc Kontges et al. «Review of failures of photovoltaic modules». En: *Report IEA-PVPS T13-01* (2014), págs. 1-140.



- [5] G Cipriani et al. «Application of thermographic techniques for the detection of failures on photovoltaic modules». En: *2019 IEEE international conference on environment and electrical engineering and 2019 IEEE industrial and commercial power systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. IEEE. 2019, págs. 1-5.
- [6] Ahmed Bouraiou et al. «Experimental investigation of observed defects in crystalline silicon PV modules under outdoor hot dry climatic conditions in Algeria». En: *Solar Energy* 159 (2018), págs. 475-487.
- [7] AW Kandeal et al. «Infrared thermography-based condition monitoring of solar photovoltaic systems: A mini review of recent advances». En: *Solar Energy* 223 (2021), págs. 33-43.
- [8] Xing Wang et al. «Intelligent monitoring of photovoltaic panels based on infrared detection». En: *Energy Reports* 8 (2022), págs. 5005-5015.
- [9] Md Momtazur Rahman, Imran Khan y Kamal Alameh. «Potential measurement techniques for photovoltaic module failure diagnosis: A review». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151 (2021), pág. 111532.
- [10] Tarek Berghout et al. «Machine learning-based condition monitoring for PV systems: State of the art and future prospects». En: *Energies* 14.19 (2021), pág. 6316.
- [11] Carlos Toledo et al. «Measurement of thermal and electrical parameters in photovoltaic systems for predictive and cross-correlated monitorization». En: *Energies* 12.4 (2019), pág. 668.