 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Clasificación de fallas en paneles fotovoltaicos: Una revisión

Mónica Marcela Vásquez Narváez

Ingeniería Mecatrónica

Directores del trabajo de grado:

Bonnie Jhoana Restrepo Cuestas

Cristian Guarnizo Lemus

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2023

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio detallado de las fallas que presentan los paneles fotovoltaicos desde una revisión de la literatura. El estudio se enfoca en las fallas por sombreado, suciedad, puntos calientes, decoloración, delaminación y grietas por medio de cuadros y gráficos comparativos que presentan la clasificación, como se analizan, herramientas de software y simulación de este tipo de fallas.

Palabras clave: Paneles fotovoltaicos, fallas, clasificación.


 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

El principal agradecimiento a Dios por la nueva oportunidad de vida que ha regalado, por darme la fortaleza para seguir adelante, por acompañarme en todos los obstáculos, dificultades y difíciles pruebas que con su ayuda he atravesado.

A mi familia por su comprensión, estímulo y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

A mis profesores, especialmente a mis asesores, Cristian y Bonie, por su gran paciencia y comprensión que facilitaron, ayudaron y fueron un apoyo total para la realización de este proyecto.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

ACRÓNIMOS

<i>SFV</i>	Sistemas fotovoltaicos	<i>LR</i>	Logistic Regression
<i>PV</i>	Panel fotovoltaico	<i>IA</i>	Artificial Intelligence
<i>ONU</i>	Organización de Naciones Unidas	<i>IRT</i>	Infrared Thermography
<i>IRENA</i>	International Renewable Energy Agency	<i>NFC</i>	Nuero-Fuzzy Classifier
<i>CSP</i>	Concentrated Solar Power	<i>XFDDS</i>	eXplainable Fault Detection and Diagnosis System
<i>OPVs</i>	Organic photovoltaic panels	<i>FDD</i>	Fault detection and diagnosis
<i>MW</i>	Mega Vattios	<i>MB</i>	Model Based
<i>ppm</i>	Partículas por millón	<i>SB</i>	Signal Based
<i>EL</i>	Electroluminescence	<i>DD</i>	Data Driven
<i>SVM</i>	Support Vector Machine	<i>SDM</i>	Single Diode Model
<i>kNN</i>	K-nearest neighbors algorithm	<i>DDM</i>	Double Diode Model
<i>ANN</i>	Artificial Neural network	<i>TDM</i>	Three Diode Model
<i>RGB</i>	Red, Green, Blue	<i>XAI</i>	eXplainable Artificial Intelligence
<i>CMY</i>	Cyan, Magenta, Yellow	<i>IB3DM</i>	Irradiance Based Three Diode Model
<i>HSV</i>	Hue, Saturation, Value	<i>PSS</i>	Post-fault stage
<i>WNS</i>	wireless sensor network	<i>SSAMs</i>	Steady-State analysis based methods
<i>OPF</i>	optimum-path forest	<i>TTDAMs</i>	Transient Time-Domain Analysis based Methods
<i>MPPT</i>	maximum power point tracking	<i>BNN</i>	Bayesian Neural Network
<i>OC</i>	Open Circuit	<i>EVA</i>	Etileno Vinil Acetato
<i>LL</i>	Line-Line		
<i>RBF</i>	Radial Basis Function		
<i>RETS</i>	Renewable Energy Technologies		


 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. MARCO TEÓRICO	9
3. METODOLOGÍA.....	16
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	29
REFERENCIAS	30
APÉNDICE.....	35

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

La tecnología solar utiliza la luz solar transformando los fotones en energía eléctrica, por medio de paneles o concentrando la radiación por medio de espejos [1]. La tecnología solar fotovoltaica en la actualidad es la de mayor crecimiento [2], pero no ha sido un camino fácil según la historia y evolución.

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX, las investigaciones en celdas fotovoltaicas se centraban en el Selenio, pero este material solo podía convertir el 0.1% de la energía solar en electricidad, bastante frustrante, por cierto; pero esto no impidió que continuaran las investigaciones y con esto darse cuenta de que había algunos materiales sólidos que podían convertir energía solar en eléctrica. En 1953, Gerald Pearson descubre el potencial del Silicio tratado comprobando que este puede producir más electricidad que el Selenio cuando es puesto bajo el sol; esto mientras trabajaba en laboratorios Bell. Después de trabajos exhaustivos el laboratorio Bell en cabeza de Pearson junto con Daaryl Chapin y Calvin Fuller, mostraron al mundo la primera celda solar que producía la electricidad suficiente para utilizar un equipo eléctrico, teniendo como fuerte que transforma la energía solar directamente en electricidad [3].

La energía solar posee como ventaja sobre las demás fuentes de energía que esta sobreabunda. La energía solar que se produce es 10 veces superior a la velocidad de consumo, por lo tanto, se vuelve el mejor candidato para aplicaciones de refrigeración, producción de calor, luz natural, energía eléctrica entre otras [1].

En el informe de las estadísticas de capacidad renovable 2022 de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), los datos obtenidos y proyectados en los periodos 2012-2021 como se muestra en la Figura 1, denotan un crecimiento exponencial en el uso de las energías renovables a nivel mundial (Solar fotovoltaica, hidroeléctrica, marina, eólica, solar termoeléctrica, geotérmica, entre otras) y el compromiso social y de políticas que faciliten la implementación y fortalecimiento de la producción eléctrica a partir de energías derivadas de fuentes naturales.

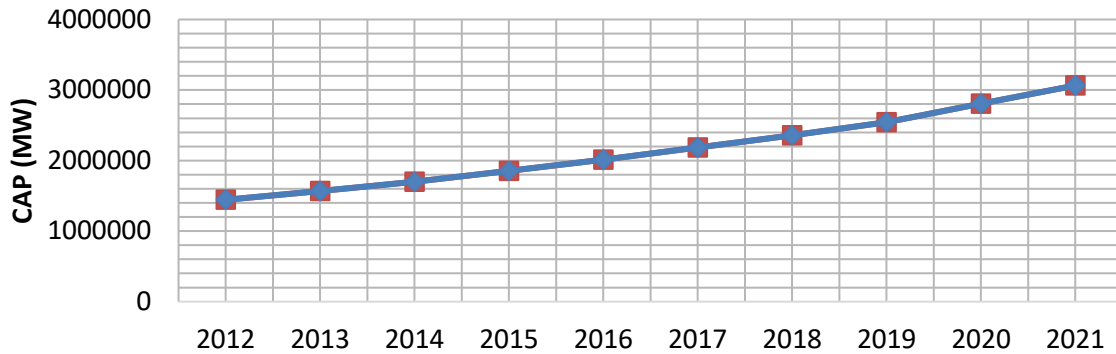


Figura 1. Capacidad total instalada de energías renovables a nivel mundial. Adaptado de [2].

Las energías renovables representaron el 38% de la capacidad instalada en el mundo finalizando el 2021 [2]. Las grandes reservas de energía no renovable se han vuelto un obstáculo para aquellos países que deben elegir desmontar centrales eléctricas que funcionan con combustibles fósiles antes de tiempo y más en los países que dependen al 100% de los combustibles fósiles. A pesar de los grandes esfuerzos y también grandes dificultades para lograr una transición energética exitosa, en el 2021 se logró aumentar el stock de energía renovable en un 9,1% a nivel mundial como lo podemos observar en la Figura 2, un hecho sin precedentes [2].

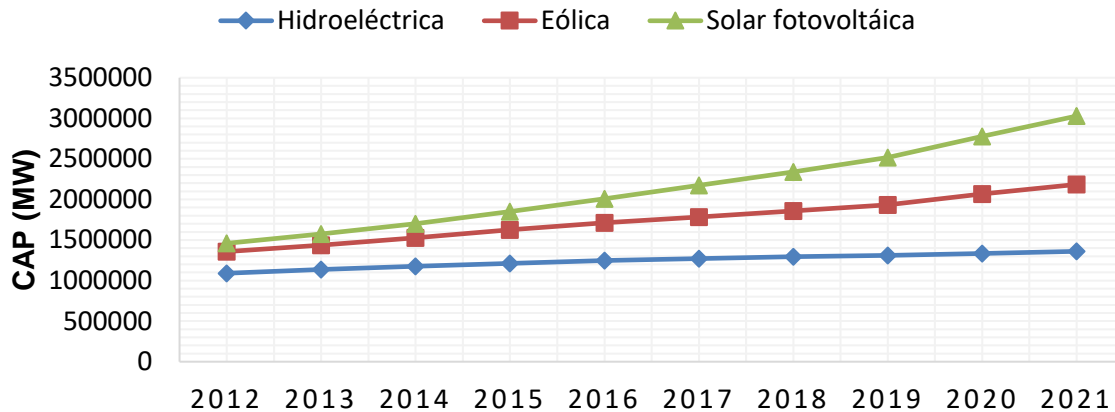


Figura 2. Capacidad Energías renovables Hidroeléctrica, eólica, Solar fotovoltaica. Adaptado de [2].

De las energías renovables, la energía solar representó una adición de 133GW un récord para el 2020, en segundo lugar, se encuentra la energía eólica con 93GW, seguido de la energía eólica marina con 21GW [2].

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Debido al alto uso de los paneles solares, se hace necesario continuar las investigaciones para alcanzar una mejoría tanto en la eficiencia como en la reducción de fallas. Dado que la mayor eficiencia alcanzada en el 2022 es de 22.8% [4], las fallas obstaculizan el alcance de dicha eficiencia. Una vez instalado los equipos se verán afectados por el sombreado, la suciedad o fallas permanentes como puntos calientes, decoloración, delaminación y grietas. El sombreado por ejemplo reduce el rendimiento de los paneles alrededor de un 35% en la producción de energía [5], por otro lado, la suciedad como el polvo, la polución, los excrementos de pájaro o capas densas de tierra o piedras, puede afectar a la propia integridad de la placa solar. Por ejemplo, suciedad muy concentrada en una zona del panel que no se limpia durante mucho tiempo, como el excremento de pájaro, puede acabar dañando la placa produciendo un punto caliente [6]. Por tanto, es necesario realizar un análisis detallado de la literatura en lo que respecta a las posibles fallas que pueden enfrentar los paneles, su clasificación, como se analizan, que herramientas de software se emplean y como se simulan este tipo de fallas.

1.2. Objetivos

1.2.1 General

Clasificar las fallas en paneles fotovoltaicos de acuerdo con el conjunto más relevante de características encontradas en la revisión de la literatura especializada.

1.2.2 Específicos

- Identificar los diferentes tipos o formas de clasificar las fallas en paneles fotovoltaicos analizadas en la literatura especializada.
- Determinar las técnicas y herramientas de detección de fallas en paneles fotovoltaicos.
- Desarrollar un esquema de clasificación de fallas a través de un cuadro comparativo conformado por las características más relevantes.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ¿Que son las energías renovables?

Son aquellos tipos de energías que provienen de fuentes naturales, las cuales se reponen más rápido de lo que se consumen, además de sobreabundar son de fácil acceso en cualquier entorno.

Caso opuesto con los combustibles fósiles como lo son el petróleo, el carbón y el gas que demoran millones de años en formarse, además que su funcionamiento se produce al quemarse, generando dióxido de carbono o gases de efecto invernadero con efectos nocivos para el ser humano y el entorno [1].

2.2. ¿Qué es un panel fotovoltaico?

Un panel solar o fotovoltaico es aquel que convierte los fotones en energía eléctrica, por medio del efecto fotoeléctrico [7].

2.3. ¿Qué partes componen un panel fotovoltaico?



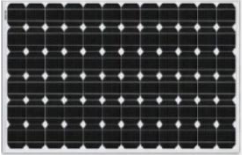
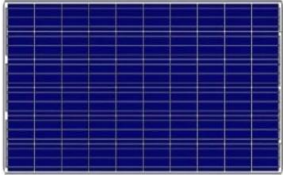

Figura 3. Partes que componen un panel fotovoltaico. Tomado de [7].

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Los paneles fotovoltaicos se componen de los siguientes materiales [7]:

- Cubierta frontal de vidrio, con la función de proteger el panel del exterior y permitir el paso de la mayor cantidad de radiación solar posible.
- El encapsulado, que consta de una especie de «sandwich» con una capa superior e inferior de etileno acetato de vinilo (EVA) y al interior incluyen las células solares. Al aplicarle calor, se produce un sellado y aislante que protege las celdas fotovoltaicas.
- El tedlar, que se encuentra en la parte posterior del panel, para aportar estanqueidad a la parte posterior del panel.
- El marco, generalmente de aluminio anodizado, que aporta robustez al grupo y facilita su montaje en estructuras.
- La caja de conexiones, que es la que se utiliza para poder extraer la electricidad del panel fotovoltaico [7].

2.4. Tipos de paneles fotovoltaicos

Paneles Monocristalinos	Los monocristalinos son más eficientes que los policristalino en condiciones estándar. Con un rendimiento de laboratorio cerca del 24% y un rendimiento comercial del 17 y 20% [8].	 <p>Figura 4. Panel Capa Fina o Amorfo. Tomado de [8]</p>
Paneles Policristalinos	Los policristalinos tienen un rendimiento de laboratorio cerca del 19% y su rendimiento comercial entre el 13 y 15%. Aunque tiene un rendimiento menor que los monocristalinos los policristalinos son más económicos y tienen un mejor comportamiento a altas temperaturas, por lo tanto, genera más energía que el resto de los paneles [8].	 <p>Figura 5. Panel Capa Fina o Amorfo. Tomado de [8]</p>
Capa fina (Amorfos)	También llamados Thin film tienen un rendimiento de laboratorio de 13% y rendimiento comercial entre 7 y 9%, se crearon para salir de la posible escasez de silicio, ocasionando que se investigara en otros materiales [8].	 <p>Figura 6. Panel Capa Fina o Amorfo. Tomado de [8]</p>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


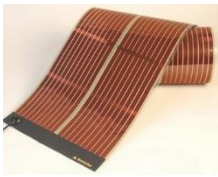
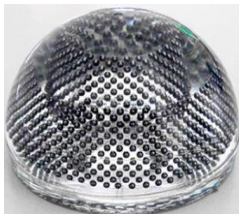


Celdas flexibles	<p>Ahora también se han desarrollado investigaciones de otras tecnologías en paneles como lo son las celdas fotovoltaicas flexibles, las cuales presentan aplicación en morrales [8].</p>	 <p>Figura 7. Panel Capa Fina o Amorfo. Tomado de [9].</p>
Celdas orgánicas	<p>Las celdas flexibles o de plástico, fabricadas en base a polímeros, estas tienen una mayor eficiencia con el aumento de la temperatura [8].</p>	 <p>Figura 8. Panel Capa Fina o Amorfo. Tomado de [10].</p>
Celdas esféricas	<p>Un nuevo avance es las celdas esféricas que es una matriz de pequeñas células que aprovechan la radiación reflejada como difusa [8].</p>	 <p>Figura 9. Panel Capa Fina o Amorfo. Tomado de [11].</p>

Tabla 1. Tipos de paneles fotovoltaicos.

Como se puede observar en la Tabla 1, es una pequeña muestra de los diferentes tipos de celdas que se manejan y las nuevas investigaciones en curso, por nombrar solo algunas, también la revista de energías limpias “Clean Energy Review” recopila la información de los paneles solares más eficientes de forma anual, donde especifican fabricante, modelo, potencia máxima y tipos de celdas, con lo cual permiten hacer una idea de los avances actuales y conocer un poco los fabricantes que lideran dicha eficiencia, como se puede observar en la Tabla 2 a continuación.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.5. Principales fabricantes de paneles fotovoltaicos a nivel mundial y eficiencia

 PANELES SOLARES MAS EFICIENTES 2023 V3.9 Mar 2023				
Fabricante	Modelo	Max Potencia (W)	Tipo de celda	Eficiencia
	Maxeon 6	440W	N-Type IBC	22.8%
	Hi-MO 6 Scientist	440W	P-Type HPBC Half-cut	22.8%
	Tiger NEO N-Type	440W	N-Type TOPcon Half-cut	22.5%
	HiHero C56R-H-AG	440W	N-Type HJT Half-Cut	22.5%
	Alpha Pure R	430W	N-Type HJT Half-Cut	22.3%
	Andromeda 2.0	400W	N-Type IBC Half-cut	22.3%
	Q.TRON-G1+	400W	N-Type TOPcon Half-cut	22.3%
	Deep Blue 4.0 X	435W	N-Type TOPcon Half-cut	22.3%
	EverVolt H	410W	N-Type HJT Half.cut	22.2%
	Vertex S +	425W	N-Type TOPcon Third-cut	21.9%
	Niwa Light	430W	N-Type TOPcon Half-cut	22.0%
	Comet	430W	N-Type TOPcon Half-cut	22.0%
	M8 IBC Ultra	400W	N-Type IBC Half.cut	22.0%
	Draco Mono-M6	430W	N-Type TOPcon Half-cut	22.0%
	Himalaya	400W	N-Type HJT Half-cut	22.0%
	N5s	430W	N-Type HJT Half-cut	22.0%
	Zebra Pro	430W	N-Type IBC Half-cut	21.8%
	Panda 3.0 Pro	425W	N-Type TOPcon Half-cut	21.8%
	White	400W	N-Type HJT Half-cut	21.7%
	Titan	450W	P-Type PERC Half-cut	21.7%

Paneles de celdas residenciales: 54, 60, 66 celdas (108, 120, 132HC) o 96 y 104 celdas completas.
 No incluye paneles comerciales >2m.

Tabla 2. Paneles solares más eficientes 2023. Tomado de [12].

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.6. ¿Cuáles son los componentes de un sistema solar fotovoltaico?

A continuación, se enunciarán los principales componentes de un sistema fotovoltaico:

- **Módulos fotovoltaicos:** Captan la energía irradiada del sol y la convierte en electricidad.
- **Estructuras de soporte de los módulos:** Permiten sostener los paneles en techos, suelo; incluso se adaptan para modificar la orientación de los paneles.
- **Convertidor:** Dispositivo para transformar la corriente de continua a alterna, algunos tienen dispositivos de protección, que cortan el flujo eléctrico por cortes o fluctuaciones en la red.
- **Cables eléctricos:** El cableado de interconexión y conexión a usuario final [13].

Estos son los componentes básicos mínimos de funcionamiento de un sistema solar fotovoltaico, pero además de estos existen otros que contribuyen a la mejora y control del sistema como lo son:

- **Sistema de monitorización:** Para la supervisión, control, manejo y desempeño a distancia de los sistemas fotovoltaicos.
- **Almacenamiento de energía:** Normalmente almacenado en baterías para el consumo cuando no hay radiación solar y no tener que interrumpir los hábitos de consumo [13].

2.7. Tipos de instalación de sistemas fotovoltaicos

Básicamente son clasificadas en:

- Off-Grid o fuera de la red eléctrica.
- On- Grid o con conexión a la red.
- Híbridos donde se realiza una combinación de la energía solar con una fuente de energía adicional que puede ser la Red Eléctrica, un generador diésel o cualquier otra fuente de energía alternativa [14].

A continuación, una breve explicación de los 3 tipos de instalación de sistemas fotovoltaicos.

2.7.1. Sistema Solar aislado (Off-Grid)

Frecuentemente utilizado en zonas remotas y con difícil acceso a la red eléctrica. Funciona básicamente captando la energía solar, almacenándola en baterías para uso posterior. El inversor transforma la corriente continua en alterna para su uso [14]. Explicado gráficamente en la Figura 10.



Figura 10. Instalación de sistema solar fotovoltaico aislado Off Grid. Tomado de [14].

2.7.2. Sistema Solar conectado a la red (On-Grid)

Posee ambos sistemas, el eléctrico convencional o red y el sistema fotovoltaico, además de estar conectado a la red no utiliza baterías para el almacenamiento, ya que al no tener energía solar simplemente se conecta a la red. Permite aprovechar la energía del sol durante el día y así reducir el consumo de red [14] tal como se expresa en la Figura 11.

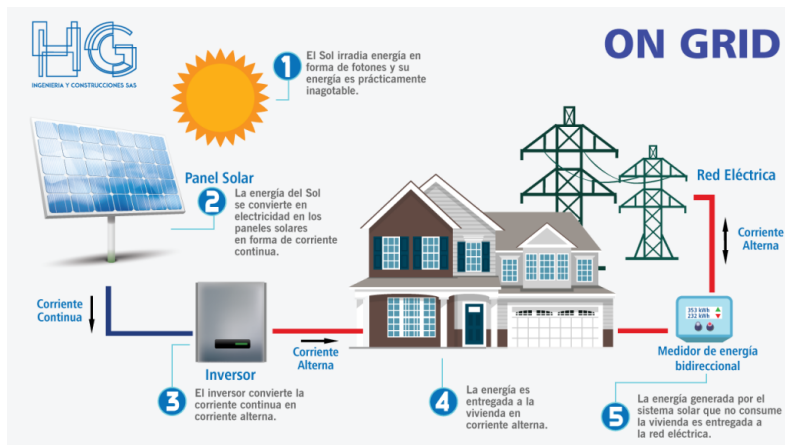


Figura 11. Instalación de sistema solar fotovoltaico conectado a la red On Grid. Tomado de [14].

2.7.3. Sistema solar híbrido

Este sistema utiliza dos fuentes de energía, la solar fotovoltaica y una fuente adicional, ya sea la red eléctrica, un generador diésel u otro tipo de fuente; esto con el fin de que el consumo generado por los paneles cubra el consumo necesario del inversor carga las baterías y en su defecto inyecta a la red eléctrica el excedente o viceversa, visto de forma evidente en la Figura 12 [14].

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

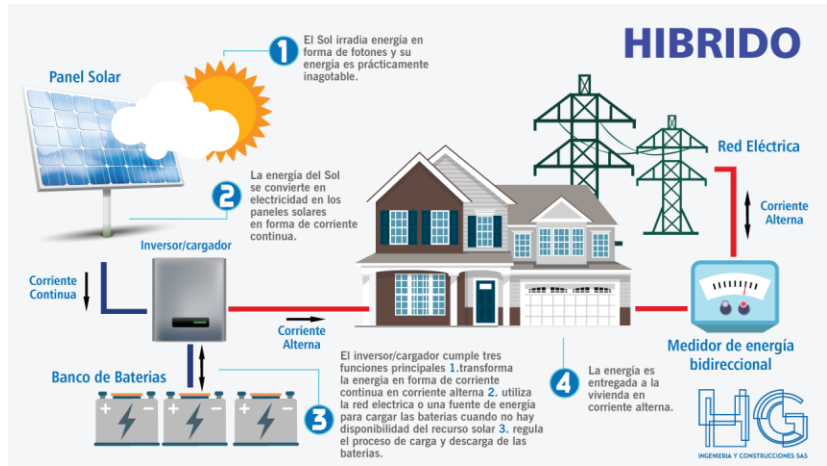


Figura 12. Instalación de sistema solar fotovoltaico Híbrido. Tomado de [14].

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

La metodología del presente trabajo se basó en las actividades a desarrollar que posibilitaron el cumplimiento de cada objetivo específico:

Objetivo Especifico 1: “Identificar los diferentes tipos o formas de clasificar las fallas en paneles fotovoltaicos analizadas en la literatura especializada”.

- Se seleccionaron las bases de datos idóneas para la investigación.
- Se establecieron las palabras claves para la búsqueda de la información.
- Se preseleccionó la documentación científica en base a los criterios de: fallas y tipos de fallas (sombreado, suciedad, puntos calientes, decoloración, delaminación y grietas)

Objetivo Especifico 2: “Determinar las técnicas y herramientas de detección de fallas en paneles fotovoltaicos”.

- Se interpretó y analizó la información, comparación, semejanzas, clasificación de las fallas, análisis, herramientas de software, simulación, planteamiento de procesos faltantes.

Objetivo Especifico 3: “Desarrollar un esquema de clasificación de fallas a través de un cuadro comparativo conformado por las características más relevantes”.

- Ejecución de análisis comparativos por medio de tablas y gráficos. Escritura del informe final.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los objetivos planteados, se preseleccionó de las diferentes bases de datos con los cuales el Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) tiene suscripción, las siguientes:

- IEEE Xplore
- Scopus
- Taylor and Francis
- SpringerLink

Para las palabras claves, se realizaron diferentes pruebas utilizando las palabras “photovoltaic panels” la cual dio como resultado una alta cantidad de artículos u otros tipos de información variada no específica a la información requerida para el presente trabajo de investigación, por lo tanto, se toma la palabra clave **“Classification faults photovoltaic panels”** la cual arroja unos resultados de búsqueda exitosos y se plantean como las palabras claves idóneas para la investigación.

4.1. Análisis de documentos encontrados en las bases de datos

Se efectuó la búsqueda con la palabra clave “Classification faults photovoltaic panels” en las bases de datos antes nombradas, se toman para la investigación IEEE Xplore y Scopus, se encontraron documentos de otras bases de datos en estas dos que referencian las otras restantes, además en las bases de datos Taylor and Francis, SpringerLink y Elsevier la búsqueda arrojó en su gran mayoría libros o capítulos de libros que hablaban sobre los paneles fotovoltaicos pero no específicamente lo solicitado, por lo tanto se descartan para la investigación.

Comparando la información contenida arrojó los resultados que se presentan en la Tabla 3.

Base de Datos	Total Documentos encontrados	Acceso Abierto
IEEE Xplore	22	22
Scopus	57	27

Tabla 3. Tabla comparativa información encontrada bases de datos para la palabra clave “Classification faults photovoltaic panels”.

En la Tabla 3 se pueden observar el número de publicaciones encontradas por año y por base de datos y la información que se encuentra con acceso abierto. Se puede apreciar que la base de datos IEEE Xplore además de generar una búsqueda precisa también se tiene acceso a la información por la suscripción del ITM a la base de datos.

En la Figura 13 se observan las tendencias de las publicaciones con respecto a la palabra clave “Classification faults photovoltaic panels”, en la cual, aunque hacia el 2011 no se registraron publicaciones, llega a su pico máximo entre el 2021 y 2022 en las bases de datos IEEE y Scopus.

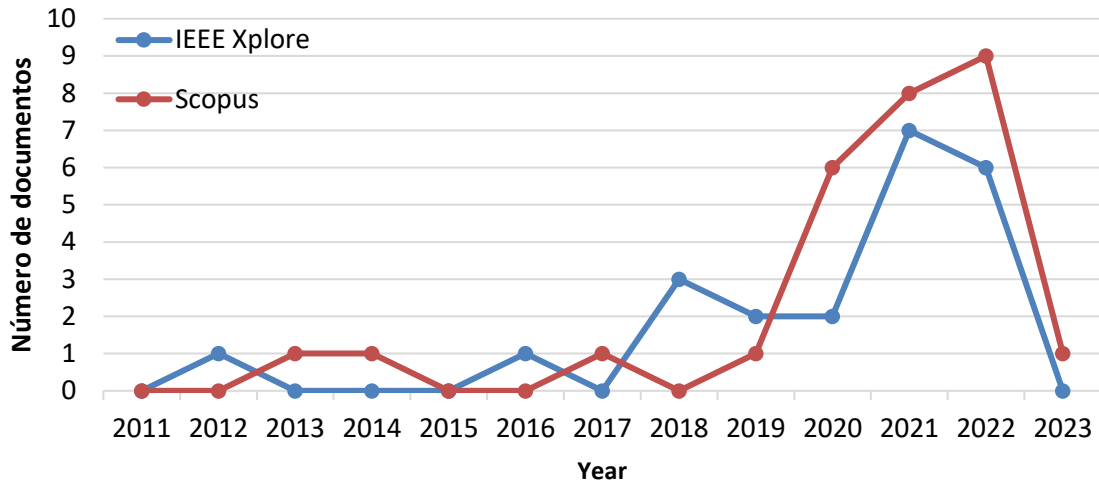


Figura 13. Tendencia de publicaciones para la palabra clave “Classification faults photovoltaic panels”, Documentos por año bases de datos IEE Xplore y Scopus 2011-2022. Adaptado de [15], [16]

En la Figura 14 se muestra el tipo de documento que se encontró en la revisión de la documentación científica para la base de datos IEE donde el 77% son conferencias.

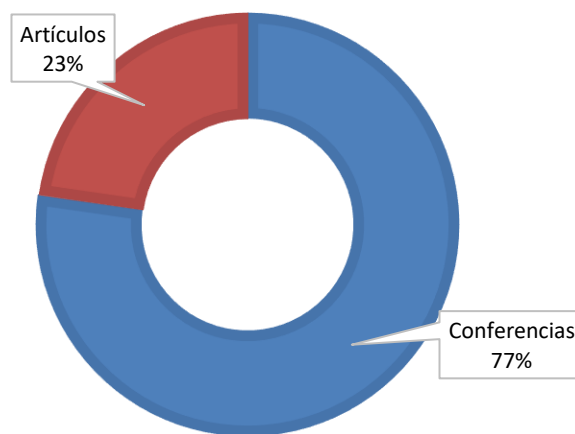


Figura 14. Filtro por tipo de documento para la palabra clave “Classification faults photovoltaic panels” base de datos IEEE Xplore 2011-2022. Adaptado de [15]

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la Figura 15 se observan la variedad de tipos de documentos encontrados para la base de datos Scopus donde la mayoría que corresponde al 54% son artículos, seguido de conferencias.

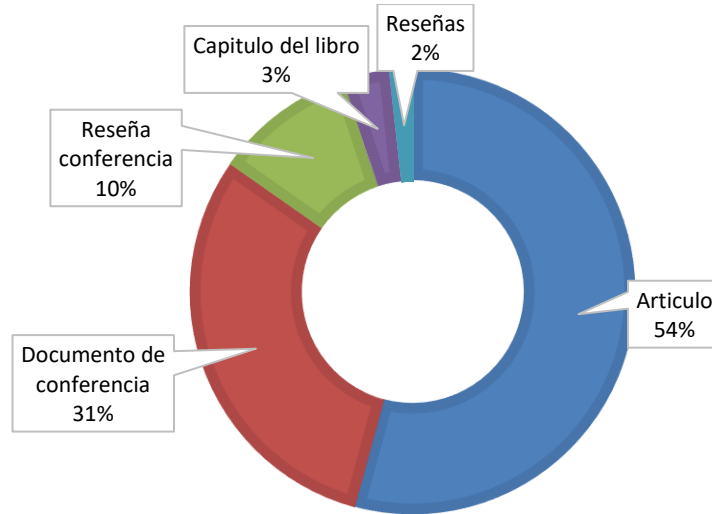


Figura 15. Filtro por tipo de documento para la palabra clave “Classification faults photovoltaic panels” base de datos Scopus 2011-2022. Adaptado de [16].

La investigación arrojó variedad en el tipo de documentación encontrada, además se puede observar cómo ha ido creciendo el número de las publicaciones en el tiempo, también la temática y profundidad con la que se analizan y las diferentes afectaciones en los paneles solares.

La revisión de la información encontrada se enfocó en fallas de discordancia como lo son: sombreado, suciedad, puntos calientes, decoloración, delaminación y grietas, de la cual el 77% de los artículos fueron relevantes y a continuación se presenta los hallazgos más idóneos e importantes.

4.2. Principales hallazgos de la revisión de la documentación científica

Las técnicas utilizadas para la detección de fallas en paneles solares, básicamente se dividen en dos: Imágenes térmicas y métodos eléctricos. Las imágenes térmicas obtenidas por cámaras desde drones, instaladas o manipuladas por los técnicos y realizando una inspección visual. Por otro lado, los métodos eléctricos toman como base las curvas de corriente, voltaje y potencia entre otros

datos. En muchos casos y ambos métodos implementan algoritmos para realizar un diagnóstico para la detección más rápida y eficiente de las fallas que presentan los paneles.

En [17] presentan las técnicas de detección de fallas en los paneles solares, uso y enfoques para el manejo de la información obtenida, tal como se indica en el esquema presentado en la Figura 16.

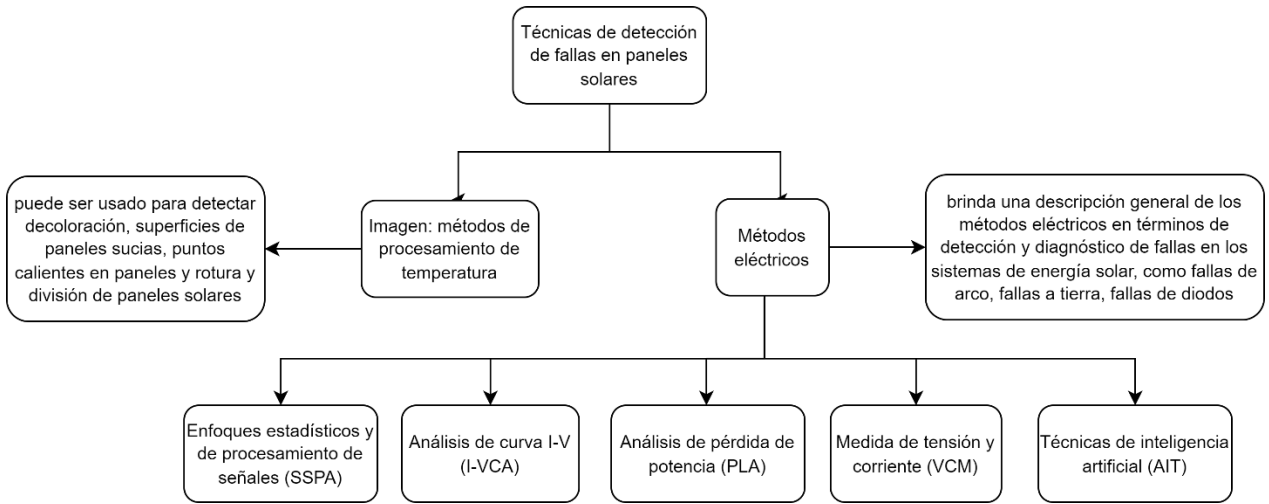


Figura 16. Técnicas de detección de fallas en paneles solares. Adaptado de [17]

Por otro lado, y como parte fundamental de esta investigación se encuentra las causas y clasificación de las fallas en los paneles. [18] plantea las causas de las fallas en los paneles dividiéndolo en físicas, ambientales y eléctricas, además nombra algunas fallas derivadas de dichas causas. Básicamente se observan las fallas de forma somera, teniendo en cuenta las más comunes, como se muestra en la Figura 17.

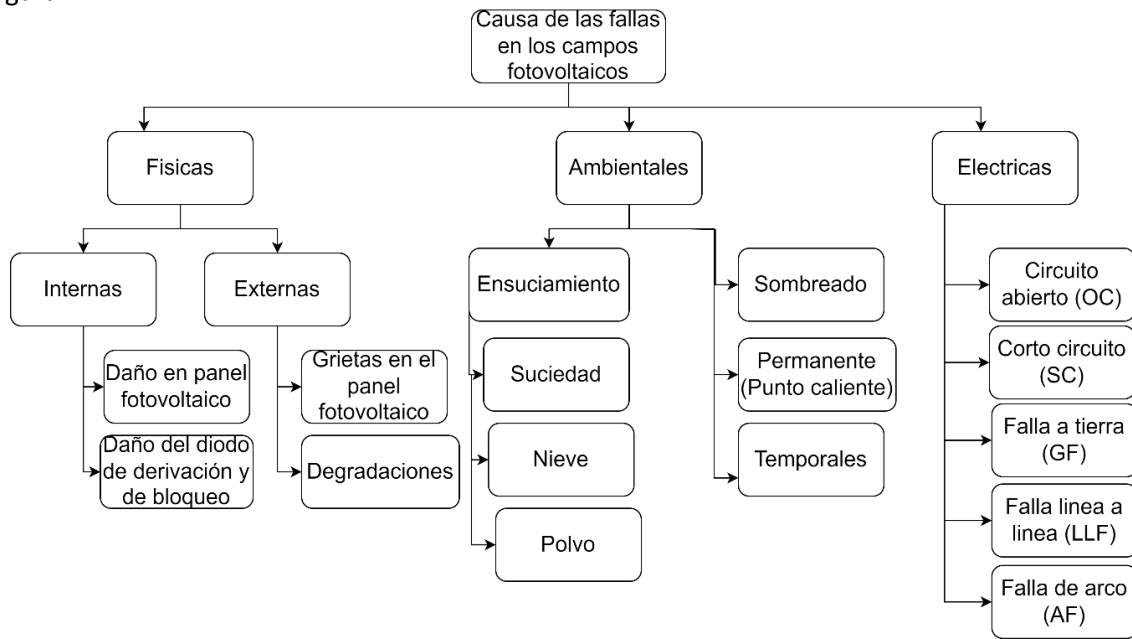


Figura 17. Causas de fallas en paneles solares fotovoltaicos. Tomado de [18]

Algunos autores como en [19] plantean esta misma clasificación un poco más completa y detallada como se muestra en la Figura 18. En este caso la clasificación se realiza, según en el lado del sistema en el que se encuentren. Por ejemplo, el lado DC las fallas en el arreglo fotovoltaico, muestran las fallas en el panel y las producidas en el cableado, mostrando también las fallas por discordancia que son en las que se enfoca esta investigación.

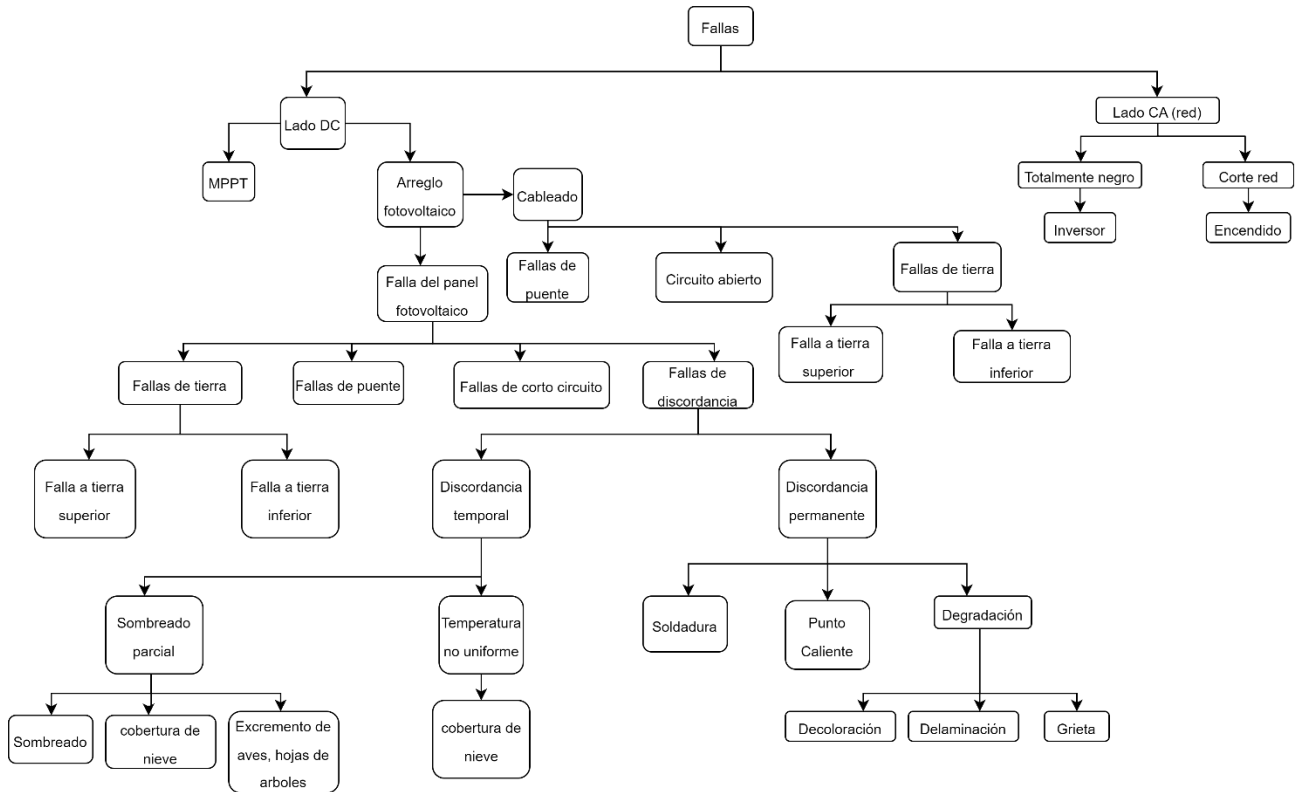


Figura 18. clasificación de fallas en el lado de CC del sistema fotovoltaico según la ubicación y las estructuras. Tomado de [19].

Otros autores, como en [20] presentan de una manera un poco más gráfica las fallas y ubicaciones de posibles fallas en el sistema fotovoltaico, tal como se muestra en la Figura 19. Allí es posible observar en que etapas se encuentran las fallas, en este caso todas las fallas son del tipo eléctrico.

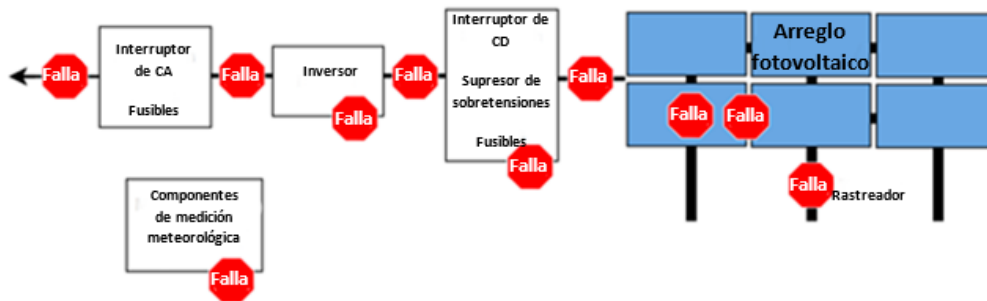


Figura 19. Diagrama de bloques de una planta fotovoltaica que muestra posibles ubicaciones de fallas. Tomado de [20].

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la revisión también se encontraron varias comparaciones de tipos de detección de fallas usando diferentes métodos y tecnología. A continuación, se muestra algunos de los más precisos según el estudio realizado por [21]. Es interesante esta comparativa y más de precisión porque nos da una idea de la eficiencia de cada método según las fallas y tecnología usada. Se puede ver como los métodos de las Máquinas de Soporte Vectorial (MVS) basándose en una imagen térmica puede detectar grietas, suciedad y sombreado con una precisión del 97%. Las máquinas de vectores son algoritmos de aprendizaje supervisado enfocados en la solución de problemas de clasificación.

Método	Tecnología	Fallas	Precisión de clasificación
MVS	Imagen térmica	Grieta celular, suciedad y punto caliente causado por sombreado	97%
Modelado de curvas y Fuzzy	Imagen térmica	Diferentes condiciones de sombreado parcial, falla en el conector	98%
ANN	Medida eléctrica (V, I y P)	Falla de conector, Corto circuito, diodo de derivación, sombreado parcial	94%
CNN	Imagen térmica	Diodo de derivación, punto caliente, suciedad, grietas y sombreado	92.5%
V-P	Medición y análisis de V-P en el lado CA	Falla línea a línea, Línea tierra, corto circuito	94.4%
Clasificación Jerárquica	Características I-V de la matriz fotovoltaica	Fallas Línea a Línea y línea a tierra	96.66%

Tabla 4. Revisión de varios Adaptado tipos de detección de fallas fotovoltaicas usando diferentes métodos y tecnología. Tomado de [20].

Asimismo, en [22] se hace una descripción general de las técnicas de diagnóstico de fallas fotovoltaicas propuestas recientemente basadas en el aprendizaje automático incluyendo el nivel de costo de implementación. Esta tabla, Tabla 5, es de las más completas, actualizadas y con más información de técnicas, tecnologías y cantidad de fallas.

Metodología	Ref.	Modelo de aprendizaje automático	Entradas	Costo de implementación	Total fallas identificadas
Comparando lo esperado y salida fotovoltaica medida	[23]	Perceptrón Multicapa	Curvas I-V	Alto	6
			Irradiancia		
			Temperatura del módulo		
	[24]	Modelo de conjunto	Imp _{pp} & V _{mpp}	Medio	2
			Irradiancia		
			Temperatura del módulo		
	[25]	Red Neuronal probabilística	Imp _{pp} & V _{mpp}	Medio	2
			Irradiancia		
			Temperatura del módulo		
	[26]	Arboles potenciados por gradientes	Imp _{pp} & V _{mpp}	Medio	4
Irradiancia					
Temperatura ambiente					
[27]	Perceptrón Multicapa	P _{mpp}	Medio	Solo detección	
		Irradiancia			
		Temperatura ambiente			
[28]	Perceptrón Multicapa	Alta frecuencia Imp _{pp} & V _{mpp}	Alto	5	
		Irradiancia			
		Temperatura ambiente			
[29]	Algoritmo de consistencia local y global	Imp _{pp} & V _{mpp}	Medio	2	
		I & V de módulos de referencia			
[30]	Red Neuronal recurrente	Imp _{pp} & V _{mpp}	Bajo	6	
		Irradiancia Satelital			
		Temperatura ambiente Satelital			

Clasificación de la curva I-V	[31]	Máquina de aprendizaje extremo del Kernel	Curvas I-V	Medio	4
	[32]	Clasificador difuso	Curvas I-V	Medio	3
	[33]	Red Neuronal convolucional	Curvas I-V	Alto	4
			Irradiancia		
[34]	ResNet	Temperatura ambiente	Alto	5	
		Curvas I-V			
		Irradiancia			
Identificación de fallas transitorias en I & V	[35]	Transformaciones de paquetes wavelet	Alta frecuencia Imp & Vmp	Alto	Solo detección
	[36]	Bosque en cascada multigrano	Alta frecuencia Imp & Vmp	Alto	3
	[37]	Red Neuronal convolucional	Alta frecuencia Imp & Vmp	Alto	2
			I & V de módulos de referencia		
[38]	Bosque aleatorio	Alta frecuencia I por subcadena	Alto	4	
		Alta frecuencia Vmp			
Comparando la salida de módulos fotovoltaicos adyacentes	[39]	Red Neuronal convolucional	Pmp por módulo	Medio	Solo detección
	[40]	Bosque aleatorio	Pmp por módulo	Medio	3
Comparando la salida de sistemas fotovoltaicos cercanos	[41]	Bosque aleatorio	Pmp	Bajo	Solo detección
		método propuesto	Imp & Vmp	Bajo	6

Tabla 5. Descripción general de las técnicas de diagnóstico de fallas fotovoltaicas propuestas recientemente basadas en el aprendizaje automático. Tomado de [21]

En la Tabla 5, se analizan cinco metodologías: comparando lo esperado y salida fotovoltaica medida, clasificación de la curva I-V, identificación de fallas transitorias en I-V, comparando la salida de módulos fotovoltaicos adyacentes y comparando la salida de sistemas fotovoltaicos cercanos. En ella se puede apreciar por ejemplo como tres metodologías utilizan el mismo modelo de aprendizaje

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

automático el de red neuronal convolucional permitiendo observar cómo diferentes entradas proporcionan distintas salidas, en dos metodologías un costo de implementación alto identificando fallas transitorias en I y V utilizando alta frecuencia de los puntos máximos de los módulos de referencia por nombrar algunos y detectando en una cuatro fallas, en otra dos y en la tercera metodología solo detección con un costo de implementación medio.

4.3. Análisis de la información

La revisión en la literatura de las fallas en paneles fotovoltaicos en lo que respecta a fallas por discordancia, las cuales son aquellas fallas que generan variaciones que afectan las curvas esperadas de I, P o V sobre las curvas obtenidas, esta diferencia manifiesta la afectación del panel. Este estudio se centrará en las fallas por sombreado, suciedad, puntos calientes, decoloración, delaminación y grietas. Se hace necesario realizar una correcta clasificación ya que esto puede generar contratiempos y sobrecostos de mantenimiento, equipo y personal, además de los daños que pudiera ocasionar al panel o la planta según corresponda.

En los resultados podemos observar las diferentes clasificaciones planteadas, ya sean textuales o ilustrativas, esta información se toma como base para una propuesta de clasificación presentada a continuación, la cual se genera tomando como origen de la falla a nivel físico, ambiental y eléctrico (En la parte eléctrica se incluyeron las fallas eléctricas del panel y las fallas de las unidades de acondicionamiento de energía) y las fallas consecuentes al no ser resuelto el problema inicial.

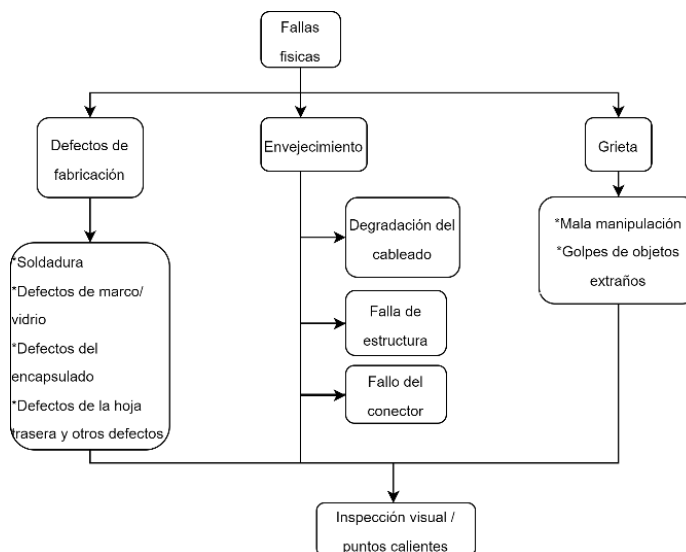


Figura 20. Clasificación de fallas de origen físico.

En las afectaciones de los paneles a nivel físico, Figura 20, se pueden observar las diferentes fallas que pueden afectarlo ya sea antes o durante la instalación, en tiempos de funcionamiento, o por fallos debido al paso del tiempo conocidos también como fallas por envejecimiento. Estas fallas se pueden detectar por medio de una inspección visual y como un punto caliente en una imagen termográfica.

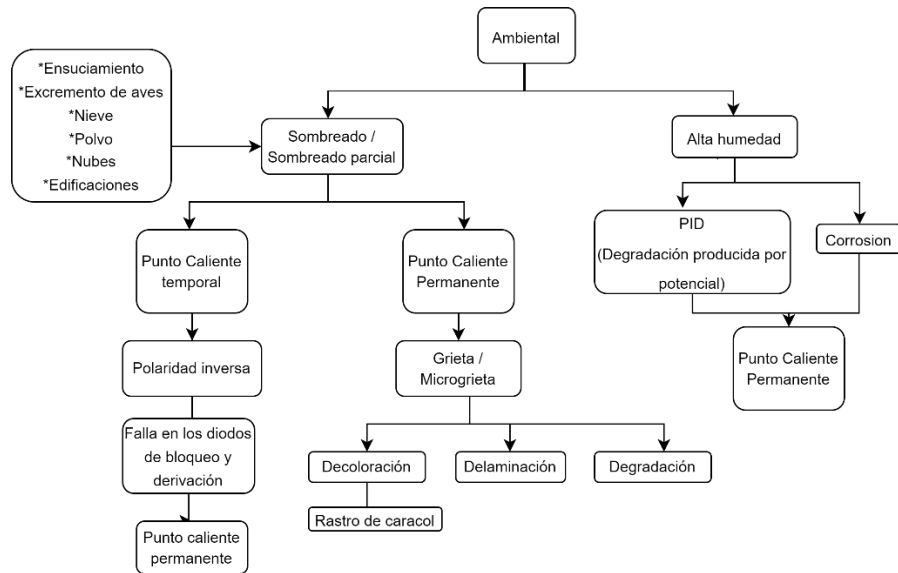


Figura 21. Clasificación de fallas de origen ambiental.

A nivel ambiental se encontró que esencialmente se dividen en dos categorías tal como se muestra en la Figura 21, que son: los sombreados, totales o parciales, ocasionados por la naturaleza en el entorno donde son instalados y la alta humedad que afecta el panel de forma interna y externa. En esta figura se especifican los daños progresivos del panel sino son corregidos a tiempo.

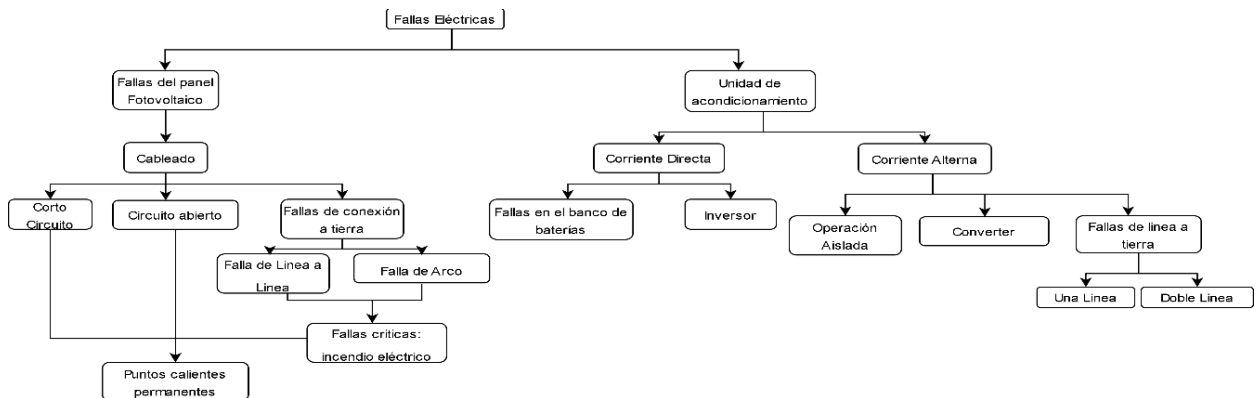


Figura 22. Clasificación de fallas de origen eléctrico.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

A nivel eléctrico Figura 22, se encuentran las fallas que se presentan durante el funcionamiento, también se incluyen las unidades de acondicionamiento de energía. Se puede observar como en el cableado ocurren múltiples fallas incluso en este se clasifican algunas como las fallas de Línea a línea y de arco como fallas críticas ya que son las principales razones detrás de los catastróficos incendios eléctricos [42]. Claramente estos aparecerán como puntos calientes permanentes que en cualquier sistema de diagnóstico y han de ser catalogados como de acción inmediata.

Con esta propuesta se busca que cuando se clasifique la falla del panel, se pueda determinar si esta requiere un especialista, técnico o limpieza, puesto que algunas fallas requieren de equipos, herramientas y personal especializado; igualmente de alertar sobre las posibles consecuencias o fallas consecuentes a lo que se presenta. Por ejemplo, si se detecta un punto caliente temporal por suciedad es necesario la limpieza ya que esto nos podría generar una polaridad inversa y terminar en un punto caliente.

También se encontró que el software más utilizado para el procesamiento de la información y clasificación de fallas es MATLAB y sus herramientas, igualmente se encuentra Python y las librerías. Matlab se vuelve el más utilizado porque la mayoría de los artículos investigativos son desarrollados en universidades, las cuales por las licencias universitarias lo convierten en el más accesible.

Hay dos métodos para la obtención de información: Método de imágenes termográficas y método de inteligencia artificial, las cuales tienen grandes ventajas y avances; incluso aunque se tomen las imágenes térmicas se realiza el análisis con inteligencia artificial dando un diagnóstico rápido y confiable; esto también ha generado que no sea necesario el uso de las cámaras termográficas ya que al analizar las curvas de corriente, voltaje, potencia u otros factores analizados por IA también permite encontrar un diagnóstico. A continuación, se comparan ambos métodos según sus ventajas y desventajas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.3.1. Método de Imágenes termográficas

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Se pueden realizar pruebas con el equipo en funcionamiento	La disponibilidad y costos en lugares remotos
Verificación de múltiples paneles en una fotografía	El alcance y distancia máxima de vuelo de un dron
No requiere una condición climática específica, ni se ve afectado por la ubicación geográfica	Error en la fotografía, desenfoque, borrosa, calidad, temperatura, ruido
No le afecta en la identificación de fallas si el panel tiene uno o varios diodos	

Tabla 6. Ventajas y desventajas del método de imágenes termográficas.

4.3.2. Método de Inteligencia Artificial

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Monitoreo en línea a grandes distancias	Alto costo de equipo y software
No requiere cámaras termográficas	Los modelos que trabajan con los puntos de máxima potencia, solo funcionan con la radiación solar en su punto máximo
	Al tener un modelo entrenado, por la latitud y longitud que varía de cada lugar se hace necesario un reentrenamiento
	Algunos algoritmos cuando se someten a una gran cantidad de datos colapsan

Tabla 7. Ventajas y desventajas del método de imágenes termográficas.

Se puede ver, en las Tablas 6 y 7, como ambos métodos son muy recomendados de acuerdo a las necesidades de cada lugar, a los equipos con los que cuentan los grupos de investigación y de acuerdo al enfoque sí se realiza para uno o varios paneles, o en una planta solar. También, como mejorando algunos aspectos se puede dar mayor proyección a un método o métodos combinados, de acuerdo a los recursos disponibles.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

En resumen en esta revisión documental se puede observar la búsqueda desde diferentes metodologías de detección y mejora de la precisión para la identificación de fallas en los paneles fotovoltaicos, utilizando herramientas desde arduinos hasta reflectómetros de tiempo, por nombrar solo algunos. También, se puede observar como se han logrado grandes avances, desde hacer todo el proceso manual, donde el técnico hace una inspección visual, ayudado por drones para la adquisición de información, seguido de una mejora computacional para la identificación de fallas por medio de algoritmos, hasta la adquisición análisis y detección de fallas realizado automáticamente por medio de la inteligencia artificial.

Las herramientas computacionales como el Matlab o Python entre otros, son flexibles y con sus componentes y librerías permiten enfocar la adquisición de datos, análisis y precisión dando un diagnóstico acertado. Con lo cual es posible hacer uso de la herramienta más accesible de acuerdo a los recursos e inversión que se pudiera realizar.

De acuerdo con la investigación realizada y teniendo en cuenta las fortalezas de cada método de adquisición de datos y procesamiento, se propone como sistema de adquisición de datos las imágenes termográficas, esto porque permiten en una fotografía el análisis de múltiples paneles y enfocar la búsqueda en los puntos claves y brindan una mayor velocidad en la clasificación de las fallas.

Viendo la viabilidad de realizar proyectos y de potenciar el método de imágenes termográficas se hace necesario abaratar los costos de las cámaras o buscar nuevos métodos, como por ejemplo técnicas de fluorescencia, imágenes de electroluminiscencia e imágenes de fotoluminiscencia. También es posible usar vehículos aéreos no tripulados; puesto que por sus ventajas es más rentable para grandes plantas solares al abarcar mayor cantidad de paneles en una sola fotografía.

Como trabajo futuro se propone enfocar el estudio a la clasificación de las fallas eléctricas en paneles solares, incluyendo información tanto eléctrica como térmica, de tal forma que se permita generar bases de datos con algunas de las fallas más comunes, detalladas en este documento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

-
- [1] Naciones Unidas, “¿Qué son las energías renovables?,” May 27, 2022. <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy> (accessed Oct. 24, 2022).
- [2] I. Renewable Energy Agency, *RENEWABLE CAPACITY STATISTICS 2022 STATISTIQUES DE CAPACITÉ RENOUVELABLE 2022 ESTADÍSTICAS DE CAPACIDAD RENOVABLE 2022*. 2022. [Online]. Available: www.irena.org
- [3] M. Martínez Bogado, “Guía didáctica Materiales y materias primas | Capítulo Silicio,” vol. 11, no. Silicio, pp. 1–33, 2011, [Online]. Available: <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL007296.pdf>
- [4] J. Svarc, “Most efficient solar panels 2022 — Clean Energy Reviews,” Jul. 28, 2022. <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels> (accessed Oct. 24, 2022).
- [5] Cambio Energético, “¿CÓMO AFECTAN LAS SOMBRAS A LAS PLACAS SOLARES?” <https://www.cambioenergetico.com/blog/como-afectan-sombras-placas-solares/> (accessed Oct. 30, 2022).
- [6] Cambio Energético, “¿Cómo afecta la suciedad a las placas solares? ¿Cada cuanto se limpian?” <https://www.cambioenergetico.com/blog/suciedad-placas-solares/> (accessed Oct. 30, 2022).
- [7] “Panel Fotovoltaico - APREAN.” <https://www.aprean.com/energia-fotovoltaica/panel-fotovoltaico/> (accessed Apr. 17, 2023).
- [8] R. Serrano, “TIPOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS - Tritec Intervento,” Aug. 18, 2017. <https://tritec-intervento.cl/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/> (accessed Oct. 26, 2022).
- [9] Solarnub, “Paneles Solares Flexibles.” <https://blog.solarnub.com/paneles-solares-flexibles/> (accessed Oct. 26, 2022).
- [10] Quetzal Ingeniería, “¿Qué son las celdas solares orgánicas (OPVs)?” <https://www.quetzalingeneria.es/que-son-las-celdas-solares-organicas-opvs/> (accessed Oct. 26, 2022).
- [11] Energía y Sostenibilidad, “Células Solares Esféricas.” <https://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2012/03/29/131517> (accessed Oct. 26, 2022).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- [12] “Most efficient solar panels 2023 — Clean Energy Reviews.” <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels> (accessed Apr. 26, 2023).
- [13] Enel X, “¿Qué es un sistema fotovoltaico y cómo funciona?” <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/how-does-a-photovoltaic-system-work> (accessed Oct. 26, 2022).
- [14] HG Ingeniería y Construcciones S.A.S, “¿Sabías que existen varios tipos de instalación de energía solar fotovoltaica?,” Aug. 13, 2018. <https://hgingeneria.com.co/tipos-de-instalacion-de-energia-solar-fotovoltaica/> (accessed Oct. 26, 2022).
- [15] “IEEE Xplore Search Results.” <https://ieeexplore.bibliotecaitm.elogim.com/search/searchresult.jsp?queryText=classification%20faults%20photovoltaic%20panels&highlight=true&returnType=SEARCH&matchPubs=true&returnFacets=ALL> (accessed Nov. 07, 2022).
- [16] “Scopus - Document search results.” <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&st1=classification+faults+photovoltaic+panels&sid=510123c185db9609cfa4ad7ff8b94878&sot=b&sdt=b&sl=56&s=TITLE-ABS-KEY%28classification+faults+photovoltaic+panels%29&origin=searchbasic&editSaveSearch=&yearFrom=Before+1960&yearTo=Present> (accessed Nov. 09, 2022).
- [17] N. T. N. Trinh, D. T. Hung, N. H. T. Dat, and P. Q. Dung, “Application of Artificial Intelligence in Detecting and Classifying Faults of Solar Panels,” Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Aug. 2022, pp. 513–518. doi: 10.1109/icce55644.2022.9852089.
- [18] P. Dhoundiyal, Y. Kumar, S. Negi, and A. Barthwal, “Fault Detection and Classification in Solar Photovoltaic Array,” Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Nov. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/globconpt57482.2022.9938265.
- [19] M. Davarifar, A. Rabhi, and A. el Hajjaji, “Comprehensive Modulation and Classification of Faults and Analysis Their Effect in DC Side of Photovoltaic System,” *Energy Power Eng*, vol. 05, no. 04, pp. 230–236, 2013, doi: 10.4236/epe.2013.54b045.
- [20] M. W. Hopwood, J. S. Stein, J. L. Braid, and H. P. Seigneur, “Physics-Based Method for Generating Fully Synthetic IV Curve Training Datasets for Machine Learning Classification of PV Failures,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 14, Jul. 2022, doi: 10.3390/en15145085.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- [21] M. Hojabri, S. Kellerhals, G. Upadhyay, and B. Bowler, “IoT-Based PV Array Fault Detection and Classification Using Embedded Supervised Learning Methods,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 6, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15062097.
- [22] J. van Gompel, D. Spina, and C. Develder, “Cost-effective fault diagnosis of nearby photovoltaic systems using graph neural networks,” *Energy*, vol. 266, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.126444.
- [23] W. Chine, A. Mellit, V. Lughi, A. Malek, G. Sulligoi, and A. Massi Pavan, “A novel fault diagnosis technique for photovoltaic systems based on artificial neural networks,” *Renew Energy*, vol. 90, pp. 501–512, May 2016, doi: 10.1016/J.RENENE.2016.01.036.
- [24] C. Kapucu and M. Cubukcu, “A supervised ensemble learning method for fault diagnosis in photovoltaic strings,” *Energy*, vol. 227, p. 120463, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.120463.
- [25] E. Garoudja, A. Chouder, K. Kara, and S. Silvestre, “An enhanced machine learning based approach for failures detection and diagnosis of PV systems,” *Energy Convers Manag*, vol. 151, pp. 496–513, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2017.09.019.
- [26] D. Adhya, S. Chatterjee, and A. K. Chakraborty, “Performance assessment of selective machine learning techniques for improved PV array fault diagnosis,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 29, p. 100582, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.SEGAN.2021.100582.
- [27] M. de Benedetti, F. Leonardi, F. Messina, C. Santoro, and A. Vasilakos, “Anomaly detection and predictive maintenance for photovoltaic systems,” *Neurocomputing*, vol. 310, pp. 59–68, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.NEUCOM.2018.05.017.
- [28] L. L. Jiang and D. L. Maskell, “Automatic fault detection and diagnosis for photovoltaic systems using combined artificial neural network and analytical based methods,” *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, vol. 2015-September, Sep. 2015, doi: 10.1109/IJCNN.2015.7280498.
- [29] Y. Zhao, R. Ball, J. Mosesian, J. F. de Palma, and B. Lehman, “Graph-based semi-supervised learning for fault detection and classification in solar photovoltaic arrays,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 30, no. 5, pp. 2848–2858, May 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2364203.
- [30] J. van Gompel, D. Spina, and C. Develder, “Satellite based fault diagnosis of photovoltaic systems using recurrent neural networks,” *Appl Energy*, vol. 305, p. 117874, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.117874.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- [31] Z. Chen, L. Wu, S. Cheng, P. Lin, Y. Wu, and W. Lin, "Intelligent fault diagnosis of photovoltaic arrays based on optimized kernel extreme learning machine and I-V characteristics," *Appl Energy*, vol. 204, pp. 912–931, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.APENERGY.2017.05.034.
- [32] S. Spataru, D. Sera, T. Kerekes, and R. Teodorescu, "Diagnostic method for photovoltaic systems based on light I–V measurements," *Solar Energy*, vol. 119, pp. 29–44, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.SOLENER.2015.06.020.
- [33] Q. Liu *et al.*, "Asynchronous Decentralized Federated Learning for Collaborative Fault Diagnosis of PV Stations," *IEEE Trans Netw Sci Eng*, vol. 9, no. 3, pp. 1680–1696, 2022, doi: 10.1109/TNSE.2022.3150182.
- [34] P. Lin *et al.*, "Compound fault diagnosis model for Photovoltaic array using multi-scale SE-ResNet," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 50, p. 101785, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.SETA.2021.101785.
- [35] B. P. Kumar, G. S. Ilango, M. J. B. Reddy, and N. Chilakapati, "Online fault detection and diagnosis in photovoltaic systems using wavelet packets," *IEEE J Photovolt*, vol. 8, no. 1, pp. 257–265, Jan. 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2770159.
- [36] W. Gao, R. J. Wai, and S. Q. Chen, "Novel PV Fault Diagnoses via SAE and Improved Multi-Grained Cascade Forest with String Voltage and Currents Measures," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 133144–133160, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3010233.
- [37] X. Lu *et al.*, "Fault diagnosis for photovoltaic array based on convolutional neural network and electrical time series graph," *Energy Convers Manag*, vol. 196, pp. 950–965, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2019.06.062.
- [38] Z. Chen *et al.*, "Random forest based intelligent fault diagnosis for PV arrays using array voltage and string currents," *Energy Convers Manag*, vol. 178, pp. 250–264, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2018.10.040.
- [39] T. Huuhtanen and A. Jung, "PREDICTIVE MAINTENANCE of PHOTOVOLTAIC PANELS VIA DEEP LEARNING," *2018 IEEE Data Science Workshop, DSW 2018 - Proceedings*, pp. 66–70, Aug. 2018, doi: 10.1109/DSW.2018.8439898.
- [40] M. Feng, N. Bashir, P. Shenoy, D. Irwin, and D. Kosanovic, "SunDown: Model-driven Per-Panel Solar Anomaly Detection for Residential Arrays," *COMPASS 2020 - Proceedings of the 2020 3rd ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies*, pp. 291–295, Jun. 2020, doi: 10.1145/3378393.3402257.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- [41] S. Iyengar, S. Lee, D. Sheldon, and P. Shenoy, "SolarClique: Detecting anomalies in residential solar arrays," *Proceedings of the 1st ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies, COMPASS 2018*, Jun. 2018, doi: 10.1145/3209811.3209860.
- [42] East China Jiaotong University et al., *A Fault Classification Method of Photovoltaic Array Based on Probabilistic Neural Network*. 2019.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

APÉNDICE

Apéndice A

Normas y estándares europeos e Internacionales para instalaciones fotovoltaicas

Normas Internacionales (IEC)

- **Norma Internacional IEC 60068-2-5:2018. Ensayos ambientales. Parte 2-5: Ensayos. Ensayo Sa:** Radiación solar simulada a nivel del suelo y guía para ensayos de radiación solar.
- **Norma Internacional IEC 60364-1:2005. Instalaciones eléctricas de baja tensión. Parte 1:** Principios fundamentales, determinación de las características generales, definiciones.
- **Norma Internacional IEC 60364-4-41:2005. Instalaciones eléctricas de baja tensión. Parte 4-41:** Protección para garantizar la seguridad. Protección contra los choques eléctricos.
- **Norma Internacional IEC 60364-4-42:2010. Instalaciones eléctricas de baja tensión. Parte 4-42:** Protección para garantizar la seguridad. Protección contra los efectos térmicos.
- **Norma Internacional IEC 60364-4-43:2008. Instalaciones eléctricas de baja tensión. Parte 4-43:** Protección para garantizar la seguridad. Protección contra las sobreintensidades.
- **Norma Internacional IEC 60364-4-44:2007. Instalaciones eléctricas de baja tensión. Parte 4-44:** Protección para garantizar la seguridad. Protección contra las perturbaciones de tensión y las perturbaciones electromagnéticas.
- **Norma Internacional IEC 60364-5-52:2009. Instalaciones eléctricas de baja tensión. Parte 5-52:** Selección e instalación de equipos eléctricos. Canalizaciones.
- **Norma Internacional IEC 60364-5-53:2019. Instalaciones eléctricas de baja tensión. Parte 5-53:** Elección e instalación de materiales eléctricos. A paramenta. Capítulo 537: Seccionamiento y maniobra.
- **Norma Internacional IEC 60364-5-54:2011+AMD1:2021 CSV. Instalaciones eléctricas de baja tensión. Parte 5-54:** Selección e instalación de los equipos eléctricos. Puesta a tierra y conductores de protección.
- **Norma Internacional IEC 60364-6:2016. Instalaciones eléctricas de baja tensión. Parte 6:** Verificación.
- **Norma Internacional IEC 61853-1:2011. Ensayos del rendimiento de módulos fotovoltaicos (FV) y evaluación energética. Parte 1:** Medidas del funcionamiento frente a temperatura e irradiancia y determinación de las características de potencia.
- **Norma Internacional IEC 61853-2:2016. Ensayos del rendimiento de módulos fotovoltaicos (FV) y evaluación energética. Parte 2:** Medidas de la respuesta espectral, el ángulo de incidencia y la temperatura de funcionamiento de los módulos.
- **Norma Internacional IEC 61853-3:2018. Ensayos del rendimiento de módulos fotovoltaicos (FV) y evaluación energética. Parte 3:** Calificación energética de los módulos fotovoltaicos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Norma Internacional IEC 61853-4:2018. Ensayos del rendimiento de módulos fotovoltaicos (FV) y evaluación energética. Parte 4:** Perfiles climáticos de referencia normativa.
- **Norma Internacional IEC 62305:2020.** Protección contra el rayo.

Normas Europeas (EN)

- **Norma Europea EN 50522:2010.** Puesta a tierra en instalaciones fotovoltaicas de tensión superior a 1 KV en corriente alterna.
- **Norma Española UNE-HD 60364-7-712:2017.** Instalaciones eléctricas de baja tensión. Parte 7-712: Requisitos para instalaciones o emplazamientos especiales. Sistemas de alimentación solar fotovoltaica (FV).

Normas y estándares europeos e internacionales para componentes fotovoltaicas

Módulos Fotovoltaicos


- **Estándar Internacional IEEE 1547-2003.** IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems.
- **Estándar Norteamericano C22.2 NO. 107.1-01 (R2011).** General Use Power Supplies.
- **Estándar Norteamericano UL 1741.** Inverters, Converters, Controllers, and Interconnection System Equipment for Use with Distributed Energy Resources.
- **Norma Internacional IEC 61215-1:2021.** Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Cualificación del diseño y homologación. Parte 1: Requisitos de ensayo.
- **Norma Internacional IEC 61215-2:2021.** Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Cualificación del diseño y homologación. Parte 2: Procedimientos de ensayo.
- **Norma Internacional IEC 61701:2020.** Ensayo de corrosión por niebla salina.
- **Norma Internacional IEC 61730-1:2016.** Cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV). Parte 1: Requisitos de construcción.
- **Norma Internacional IEC 61730-2:2016.** Cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV). Parte 2: Requisitos para ensayos.
- **Norma Internacional IEC 62716:2013.** Módulos fotovoltaicos (FV). Ensayo de corrosión por amoníaco.
- **Norma Internacional IEC TS 62804-1:2015.** Photovoltaic (PV) modules – Test methods for the detection of potential-induced degradation – Part 1: Crystalline silicon.
- **Norma Internacional IEC TS 62804-1-1:2020.** Photovoltaic (PV) modules – Test methods for the detection of potential-induced degradation – Part 1-1: Crystalline silicon – Delamination.
- **Norma Internacional IEC TS 62804-2:2022.** Photovoltaic (PV) modules – Test methods for the detection of potential-induced degradation – Part 2: Thin-film.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Inversores

- **Norma Europea BS EN 50530:2010+A1:2013.** Rendimiento global de los inversores fotovoltaicos.
- **Norma Internacional IEC 61000-4-2:2008.** Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-2: Técnicas de ensayo y de medida. Ensayo de inmunidad a las descargas electrostáticas.
- **Norma Internacional IEC 61000-4-3:2020.** Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-3: Técnicas de ensayo y de medida. Ensayos de inmunidad a los campos electromagnéticos, radiados y de radiofrecuencia.
- **Norma Internacional IEC 61000-4-4:2012.** Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-4: Técnicas de ensayo y de medida. Ensayos de inmunidad a los transitorios eléctricos rápidos en ráfagas.
- **Norma Internacional IEC 61000-4-5:2014.** Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-5: Técnicas de ensayo y de medida. Ensayos de inmunidad a las ondas de choque.
- **Norma Internacional IEC 61000-4-6:2013/COR1:2015.** Corrigendum 1 – Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-6: Técnicas de ensayo y de medida. Inmunidad a las perturbaciones conducidas, inducidas por los campos de radiofrecuencia.
- **Norma Internacional IEC 61000-4-8:2009.** Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-8: Técnicas de ensayo y de medida. Ensayos de inmunidad a los campos magnéticos a frecuencia industrial.
- **Norma Internacional IEC 61000-6-2:2005.** Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 6-2: Normas genéricas. Inmunidad en entornos industriales.
- **Norma Internacional IEC 61000-6-4:2006+A1:2010.** Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 6-4: Normas genéricas. Norma de emisión en entornos industriales.
- **Norma Internacional IEC 62109-1:2010.** Seguridad de los convertidores de potencia utilizados en sistemas de potencia fotovoltaicos. Parte 1: Requisitos generales.
- **Norma Internacional IEC 62109-2:2011.** Seguridad de los convertidores de potencia utilizados en sistemas de potencia fotovoltaicos. Parte 2: Requisitos particulares para inversores.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES  _____
 MONICA MARCELA VASQUEZ NARVAEZ
 CC. 1.037.974.232

FIRMA ASESOR Bonita J. Restrepo C
18/07/2023
 T16 : Mónica Vázquez
 Informe final Actualizado.

FIRMA ASESOR Cristian Guarnizo

FECHA ENTREGA: 18/07/2023

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____