



**Universidad Autónoma del Estado de Morelos**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**Detección de fallas en sistemas fotovoltaicos para  
mitigar pérdidas en la producción energética**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA**

**Nombre del sustentante:**

**Ing. Eduardo Trutié Carrero**

**Director: Dr. Diego Seuret Jiménez**

**Co-Director: Dr. José Antonio Marbán Salgado**

**NOMBRE DE LOS SINODALES: Dr. Jesús Escobedo Alatorre, Dr. Luis  
Manuel Gaggero Sager, Dr. Miguel Ángel Basurto Pensado**

**Cuernavaca, Morelos**

**Diciembre, 2021**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



## INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Sustentabilidad Energética



Cuernavaca, Morelos, a 05 de octubre de 2021.

**MTRA. MERLE LISBET GARCIA ESTRADA**  
**SECRETARIA EJECUTIVA DEL IICBA**  
**P R E S E N T E**

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: Detección de fallas en sistemas fotovoltaicos para mitigar pérdidas en la producción energética, que presenta el alumno **Eduardo Trutié Carrero**, para obtener el título de **Maestría en Sustentabilidad Energética**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE		
DR. MIGUEL ÁNGEL BASURTO PENSADO		
DR. LUIS MANUEL GAGGERO SAGER		
DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO		
DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ		

**PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)**

**NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.**

MLGE/nmc.

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209.  
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 6212 / correo: merle.garcia@uaem.mx





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2021-10-05 11:57:18 | Firmante**

ZgVxTM6u9EDyCc+UL4yCK8HKg1N2dJci2vUHRzyzX4ILQM66GA06w7/coSszU6nNNvJ1CUUpqn6PX3kvr5V0SgilyltdSPI+nJsCEhqe01vhNMN4v2eH3FM8AaXIYa+m1qARL5vE54am8WiBzNXLPj7LbWGAC6qSPyLc+/98LISCK7jaLP6ngFY3jNzeLbdL3mYPRBg0GywwzjMWusaTOzcGbQ4+eUtEDIOmQPhtCZiMgupamrHwVskRW5m7poqjv7nUwLNS706yS0sm3tT2dEjm5+4ML1td9erB16L5BP3t0C4mu0nZMz9xniUBZRQWmvXhi0VCC5A/LMmTKcHA==

**DIEGO SEURET JIMENEZ | Fecha:2021-10-05 12:04:02 | Firmante**

bfsuaUf4kZfQ3wgosUd0WMSrjneiGOleF+zrEn2L58sPvBhbvZfgZt5/ColSuxsvUaPxadtDyZe05JkNcOzUf/z+wXw21Y6wKpvdYU1e8AKbPdOunxVCH9Y0HRMHmpN4nJWPU CdwffPB9fSsfw5uKNFP11pnNl5rWm+hw3+WsRHRM9/qlkFnlJm3KojK4a/57HfJaQuITX3HrCRVajTyJmrTYE xaovpPfJxLiQgtQmcUESq+1ZBFuo+IFmA6tJ9ZKQLu4Mbpndl9rpO8 HsisAqXy3m04HYGHVtnwsCySgG/fTd6TOv3YtlmX4WmdF15d5XGz0IH0Q9MAx8LoFAfw==

**JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2021-10-07 13:51:10 | Firmante**

sN0AZvqhWaaqzJHjJR8OUssxa8Y6YBlf3HIHeyEHcORnhZWJ7P+URU6cFpBIKzFru6fGijqbohmfWqp/5vujfFPmpAXzE8KSLd5hieZdY9Za1iV8Dk6GvLhV5s0QSeVUstfBRcLi46 mUNKnCffmbgJG4pO/tbexZ8hxs6v8Rr7159BXwaCK5SW6RxsSlag01qdJO8pC4ijK44aS/PHogNv2zmpQA/fjqdgpYELuqjXK+h0J3WsaunZgYg2gsepwHn+L8DGGkbTCG56 1msc1hLKN2scT8hBqQ2yXJ43TlnHPWKj6d88sHMqOF2lq+JVvs+MoNauyeFG+/Nw==

**MIGUEL ANGEL BASURTO PENSADO | Fecha:2021-10-15 13:50:14 | Firmante**

ZfbDeBYWrYJUhaIwnbaXfb6GtNS6RVQK/TzWLxmNiDQdrYu/mcVEeGNfbVluVGZcl6uMIRstRYJxXMGdG0aiX6sUfnZFE1IMWv4C88baJhO/U9OPmVHinRsEpjaSU7qHhEnMXj JEapqIREDRrQGmlTmvgByjXK5HTWc2/aypUwS5Uw8OwPYH9CvV9Gm/ATRmMVBHU/lco4OS1iEPXtOngSKJo+go8WLLqRV1Jlz4/c7XPAic0PgiHZHnGQaHOAViFXTMRZDx wI0VZLTIGI975kcUEKoyKXakTDyIXv/AfFuKGP82+Ycx54u4l/UD/l4n6peP7ybpQsJHeCy82ITdZw==

**LUIS MANUEL GAGGERO SAGER | Fecha:2021-10-18 11:58:11 | Firmante**

GUe9bXHy7ZhKqNs/g8uyasbJBHMrj7nZpEKobySG+rGZWKICi3CNz81QdWzkyv/Tr9VeWbMpw1NxJLQsMetZFTvBdNBcl6/Eg0oMgUqt7c8HuTy+3G7BikXbzcO5cMFKwJ935 yj2Cj2tP0xmRNeEMhfWKGUw5WRa5D8wOjrnLUHjN+IXMJ0i92MqfOYdzC27L/wQ/es1fi2LBp9sM3br/Rt5y/QF1hKfIoZA3obbqQEu6RR5Vi7J4ByqDTVuOjkjypunev/KnF7IUDh2/6 uMUoUXXiao4+Fr7VQIECvgCvqXg+xXtsct2fQ8gXdIM3P4hbT8VdSei81HaFQtQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



**BQRO2aiGn**

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/gOI/fdkgCYxQc0xFHkOqWdd6FV5yfHcg>



## Resumen

Las fallas en los sistemas fotovoltaicos son un problema importante debido a que provocan una disminución en la producción de energía eléctrica. Hoy en día es un desafío para la comunidad científica obtener algoritmos que se adapten a los sistemas existentes reduciendo la probabilidad de falsos positivos. Esta tesis resuelve dicho problema, presentando dos aportes dirigidos a la detección de fallas en sistemas fotovoltaicos. La primera contribución se dirige a un nuevo algoritmo basado en la detección no coherente. Dicho algoritmo es adaptable a cualquier sistema fotovoltaico y utiliza el procedimiento de caja de conteo para estimar la dimensión fractal de la señal normalizada. La segunda contribución está dirigida a dos ecuaciones que permiten calcular el umbral de detección bajo una predicción de falla de dicho algoritmo. Esta predicción se basa en fijar la probabilidad de falso positivo *a priori*. El algoritmo fue validado experimentalmente utilizando 300 señales adquiridas de un sistema fotovoltaico en configuraciones en serie, paralelo y arreglo. Los resultados obtenidos muestran que el algoritmo tuvo un comportamiento superior a los reportados en la literatura, bajo una probabilidad de falso positivo del 2%.

## Abstract

Failures in photovoltaic systems are a major problem since they cause a decrease in the production of electrical energy. It is a challenge for the scientific community to obtain algorithms that adapt to existing systems, reducing the false positive probability. In this thesis, these problems are solved by presenting two contributions aimed to detect faults in photovoltaic systems. The first contribution is aimed at a new algorithm based on non-coherent detection. Such algorithm is adaptable to any photovoltaic system and uses the box-counting procedure to estimate the fractal dimension of the normalized signal. The second contribution is directed to two equations that allow calculating the detection threshold under a failure prediction of said algorithm. The prediction of failures is based on a false positive probability set *a priori*. The algorithm was experimentally validated using 300 signals acquired from a photovoltaic system in series, parallel, and array configurations. The results obtained show that the algorithm had a behavior higher than those reported in literature, under a false positive probability of 2%.

## Agradecimientos

Todo trabajo de investigación presenta la responsabilidad de una persona pero tiene el gran aporte del entorno que la rodea y los individuos que lo conforman. El autor de esta tesis (yo) no hubiese cumplido con sus objetivos si no fuera por la participación de muchas personas y un entorno favorable. Por tal motivo deseo que llegue mi más sincero agradecimiento a todos los que contribuyeron en dicha investigación:

A mi madre Teresa Carrero Garro por ser la autora intelectual y biológica de mi formación personal y profesional. A mi esposa la Mtra. Adriana Otero Blanca por cuidarme y estar siempre junto a mí apoyándome para que todo salga con la máxima calidad.

A dios por brindarme un camino en el cual pueda cumplir mis sueños académicos y no académicos.

A mis Madrinas Isabel y Odalis, a mi padrino Miguel por permitirme conocer un mundo esotérico de la mejor manera posible lleno de sabios consejos.

A mis asesores el Dr. Diego Seuret Jiménez y el Dr. José Antonio Marbán por darme la oportunidad de aumentar mis conocimientos junto a ellos.

A Rossy Gómez y Diego Dario Seuret por permitirme entrar en su familia y compartir junto a mí, momentos de migraña, curda, muela e instantes agradables bien locochones.

A mis amigas Lydia García, la princesa Aydil y Lorena Miranda por acogerme desde el primer día que nos conocimos, siendo excelentes amigas, y permitirme entrar en sus familias.

A Heli Seuret a quien cariñosamente le llamo la RAE por apoyarme con el español y siempre estar en la mejor disposición de apoyarme.

A México por brindarle abrigo a todos los emigrantes, ayudarlos y darles la posibilidad de encontrar nuevas oportunidades.

A los sinodales de esta tesis, a la Mtra Merle, la Mtra Margarita, la comunidad CIICAp y a los estudiantes de licenciatura con los cuales pude compartir momentos muy encantadores dirigidos a la enseñanza.

A mi profesora de inglés Yuliya Katkova y mi compañero de clase Jesús Alfredo Araujo León por brindarme momentos de aprendizaje y culturales memorables.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por brindarme el apoyo económico que soportó esta investigación.

## **Dedicatoria**

Este trabajo de investigación va dedicado a mi madre (mi pura linda) Teresa Carrero Garro, a mi esposa Adriana Otero Blanca y a mis Asesores.

## Tabla de contenido

1. Antecedentes .....	12
1.1 Pregunta de investigación .....	15
1.2 Objetivo .....	15
1.2.1 Objetivos específicos.....	15
1.3 Hipótesis.....	15
2. Marco teórico.....	17
2.1. Características corriente-voltaje de celdas solares.....	17
2.2. Transformada Wavelet.....	18
2.2.1. Función Wavelet.....	18
2.2.2. Transformada Wavelet continua .....	20
2.2.3. Transformada Wavelet discreta .....	21
2.3. Atenuación de ruido mediante Wavelet shrinkage.....	23
2.3.1. Regla de umbral duro.....	24
2.3.2. Regla de umbral suave .....	24
2.3.3. Selección del umbral.....	25
2.4. Dimensión de Hausdorff-Besicovitch .....	27
2.4.1. Caja de conteo .....	29
2.5. Automatización de detección .....	29
3. Desarrollo Teórico/Experimental .....	32
3.1. Efectos de la intensidad de radiación para la detección de fallas.....	34
3.2. Característica CV de la instalación empleada .....	35
3.2.1. Configuración serie .....	36
3.2.2. Configuración paralelo.....	38
3.2.3. Configuración arreglo 2 x 2 .....	40
3.2.4. Algoritmo propuesto para la detección de fallas .....	42
4. Resultados y Discusión .....	43
4.1. Detector de falla.....	43
4.2 Validación .....	46
4.2.2. Validación del algoritmo frente a las fallas .....	47
5. Conclusiones y recomendaciones.....	51
Referencias.....	52
ANEXO 1: Simulación de celda solar en Matlab .....	62

ANEXO 2: Algoritmo de caja de conteo .....	63
--	----

## Lista de tablas

Tabla 3. 1 Especificaciones eléctricas del ERDM 235TP/6. ....	32
Tabla 3. 2 VCA e IR para cada PF ERDM 235TP/6.....	33
Tabla 3. 3 Especificaciones eléctricas del SolSensor según (SolMetric, 2020).....	34
Tabla 3. 4 Especificaciones eléctricas del analizador PF (SolMetric, 2020). .....	34

## Lista de Figuras

Figura 2. 2: Representación tiempo-frecuencia para dos funciones wavelets según (Mallat, 2009). .....	20
Figura 2. 3 Árbol de descomposición Wavelet según (Park et al., 2008). 22	
Figura 2. 4: $H_s(F)$ Vs $s$ para un conjunto $F$ . La dimensión de Hausdorff-Besicovitch es el valor de $s$ para el cual ocurre el salto de $\infty$ a 0 según (Kenneth, 1990; Schwarzenberger & Falconer, 1990). .....	28
Figura 2. 5: Prueba de hipótesis para detección de señales. ....	31
Figura 3. 1: Instalación experimental. ....	32
Figura 3. 2 <i>Sol</i> /sensor inalámbrico para sistemas fotovoltaicos. ....	33
Figura 3. 3 Analizador de paneles fotovoltaicos.....	33
Figura 3. 4 Característica CV (línea continua) y PV (línea discontinua) a 25 °C en una celda solar para varias intensidades de radiación reportado por (Xiao et al., 2014). ....	35
Figura 3. 5 Esquema eléctrico de la configuración serie.....	36
Figura 3. 6 Configuración serie. ....	36
Figura 3. 7 Superposición para configuración serie. ....	37
Figura 3. 8 IR para las señales adquiridas de la Figura 3. 7 y Figura 3. 9. ....	37
Figura 3. 9 Configuración serie normalizada. ....	38
Figura 3. 10 Esquema eléctrico para configuración paralelo. ....	38
Figura 3. 11 Configuración paralelo. ....	39
Figura 3. 12 Superposición para configuración paralelo. ....	39
Figura 3. 13 IR para las señales mostradas en la Figura 3. 12.....	40
Figura 3. 14 Topología paralelo normalizada.....	40
Figura 3. 15 Esquema eléctrico para configuración arreglo 2 x 2. ....	41
Figura 3. 16 Topología arreglo 2x2. ....	41
Figura 3. 17 Superposición para topología arreglo 2x2. ....	42
Figura 3. 18 Señales mostradas en la Figura 3. 17 normalizadas. ....	42
Figura 3. 19 Algoritmo para detectar fallas en el SFV.....	43
Figura 4. 1 Función de distribución normal. ....	45
Figura 4. 2 Selección de función wavelet.....	46
Figura 4. 3 Respuesta del algoritmo para la configuración serie. ....	47
Figura 4. 4 IR que arribó a la configuración serie. ....	47

Figura 4. 5 Respuesta del algoritmo para la configuración paralelo .....	48
Figura 4. 6 IR que arribó a la topología paralelo.....	48
Figura 4. 7 Respuesta del algoritmo para la configuración arreglo 2 x 2. 49	
Figura 4. 8 IR que arribó a la topología arreglo 2 x 2.....	49

# Glosario

---

## **B**

BC, por sus siglas en inglés  
Caja de conteo · 28

---

## **C**

cA  
Coeficientes de aproximación · 22  
cD  
Coeficientes de detalle · 22  
CV  
Corriente-Voltaje · 17

---

## **D**

DF  
Dimensión fractal · 28

---

## **E**

EWMA, por sus siglas en inglés  
Media Móvil Ponderada Exponencial · 13

---

## **F**

FAR, por sus siglas en inglés  
Tasa de Falsas Alarmas · 13  
FV  
Fotovoltaica · 12

---

## **H**

H<sub>0</sub>  
Hipótesis nula · 44

---

## **I**

IEA, por sus siglas en inglés  
Agencia Internacional de Energía · 12

## **IR**

Intensidad de radiación · 32

---

## **M**

MDR, por sus siglas en inglés  
Tasa de detección de pérdida · 14  
MOO, por sus siglas en inglés  
Optimización Multi-objetivo · 14

---

## **O**

OR-KGLRT, por sus siglas en inglés  
Razón de verosimilitud generalizada de kernel  
reducido en línea · 14

---

## **P**

PF  
Panel fotovoltaico · 32  
P<sub>FP</sub>  
Probabilidad de Falsos Positivos · 13  
PV  
Potencia-voltaje · 35

---

## **S**

SFV  
Sistemas Fotovoltaicos · 12

---

## **T**

TWC  
Transformada Wavelet continua · 20  
TWD  
Transformada Wavelet discreta · 21

---

## **W**

WS  
Wavelet Shrinkage · 23

# 1. Antecedentes

A través de los años, la energía ha sido el recurso más importante para la humanidad debido a que el desarrollo tecnológico y el bienestar social exigen un mayor requerimiento de esta. Este aumento en la demanda energética surge debido al crecimiento poblacional, la rápida urbanización y la industrialización. Esta creciente demanda ha instado a las comunidades científicas a desarrollar fuentes de energía eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

(Bhattacharya et al., 2016) afirman que en las Naciones Unidas designaron el periodo 2014-2024 como la década de la energía sostenible para todos. El uso de energías limpias tiene como principal ventaja una disminución en la emisión de gases de efecto invernadero, proporcionando un ambiente más saludable. Siguiendo el escenario más optimista desarrollado por la (IEA, por sus siglas en inglés) y el reporte de (Shahbaz et al., 2020), la participación en la generación sustentable de electricidad aumentará a 39 % para 2050 causando una reducción de CO<sub>2</sub> en 50 %.

La energía solar es una de las principales fuentes de energía amigables con el medio ambiente. (Kumari & Geethanjali, 2018) afirman que entre sus principales ventajas se encuentran su bajo costo y el mantenimiento mínimo requerido por los SFV. Estas dos importantes ventajas han llevado a los investigadores a desarrollar métodos para aprovechar la energía solar, con el fin de satisfacer las crecientes demandas de energía eléctrica.

A pesar de los beneficios que los SFV proporcionan a la sustentabilidad energética, estos son vulnerables a la presencia de fallas, lo que hace que la eficiencia de conversión energética no sea máxima. Esto ha generado un gran interés en los investigadores y la industria FV para detectar la presencia de fallas.

(Belboula et al., 2019; Livera et al., 2019; Platon et al., 2012; Takashima et al., 2009; A. Woyte et al., 2013; Achim Woyte et al., 2003) establecen que las fallas pueden ocurrir debido a diferentes factores eléctricos o

ambientales, tales como errores de seguimiento del punto de máxima potencia, desconexión eléctrica, pérdidas en el cableado y envejecimiento, efectos de sombreado, polvo o nieve.

En la actualidad existen dos paradigmas para la detección de fallas en SFV. El primer paradigma se encuentra en los trabajos documentados por (Chaibi et al., 2019; Chouay & Ouassaid, 2018; Das et al., 2018; Dhimish et al., 2017; Fadhel et al., 2020; Hajji et al., 2020; Hu et al., 2017; Kumar et al., 2018; Lu et al., 2019; Mekki et al., 2016; Rouani et al., 2021; Sowthily et al., 2021; Yi & Etemadi, 2017). Los procedimientos reportados bajo este paradigma se enfocan en el uso de máquinas de aprendizaje, las cuales emplean un punto de vista de detección coherente. (Mellit et al., 2018) plantean que el principal inconveniente de los procedimientos desarrollados bajo este paradigma es que requieren habilidades muy avanzadas para implementarlos en tiempo real y bases de datos (de diferentes fallas), las cuales no siempre están disponibles.

El segundo paradigma apunta a un enfoque de no aprendizaje, es decir, un método de detección no coherente, que maximiza su adaptabilidad a cualquier SFV y no necesita un gran volumen de datos para conocer información sobre la presencia de fallas en SFV. El procedimiento desarrollado en este trabajo se basa en el segundo paradigma, donde se han encontrado las siguientes publicaciones:

(Garoudja et al., 2017) presentan un modelo enfocado a la detección de fallas producidas por sombras mediante la implementación de umbrales y paquetes wavelet. Estos investigadores emplean la (EWMA, por sus siglas en inglés) para detectar cambios incipientes en SFV. Además, explican cómo utilizan los umbrales para el proceso de decisión de fallas. El principal inconveniente del trabajo presentado es que los autores no muestran el porcentaje de FAR, por sus siglas en inglés, que en este trabajo se les llamará falsos positivos ( $P_{FP}$ ) que produce su algoritmo.

(Kumar et al., 2018) presentan un algoritmo para detectar, en línea, fallas producidas por sombra parcial utilizando paquetes wavelets. El principal

inconveniente de esta propuesta es que no utilizan una expresión matemática para calcular los umbrales de detección de fallas y no muestran la  $P_{FP}$  que presenta su algoritmo. Otro inconveniente es que no muestran un procedimiento para seleccionar la función wavelet que utilizan.

(Mansouri et al., 2018) presentan un algoritmo basado en EWMA, MOO, por sus siglas en inglés y representación wavelet. Estos investigadores indican el uso de MOO para resolver el problema de seleccionar la solución óptima de las siguientes dos funciones objetivo: (i) tasa de detección de pérdida (MDR, por sus siglas en inglés) y (ii)  $P_{FP}$ . En este trabajo se ve nuevamente la falta de un procedimiento para seleccionar la función wavelet que utilizan.

(Fezai et al., 2019) proponen una técnica basada en OR-KGLRT, por sus siglas en inglés, para mejorar la detección de fallas en SFV. Estos autores utilizan las  $P_{FP}$  como criterio de desempeño.

(Harrou et al., 2019) presentan una estrategia robusta y flexible para la detección de fallas en SFV conectados a la red basada en la representación multi-escala de datos utilizando wavelets y EWMA. Estos autores utilizan  $P_{FP}$  para evaluar el rendimiento de su algoritmo. En este trabajo tampoco muestran un procedimiento para seleccionar la función wavelet que utilizan.

(Zhao et al., 2020) presentan un método basado en la detección colaborativa de fallas en SFV utilizando técnicas de filtrado. Estos autores utilizan un método para obtener un umbral automático que les permite identificar las fallas causadas, pero no muestran la  $P_{FP}$  producida por su algoritmo.

(Eduardo Trutié-Carrero & Seuret-Jiménez, 2020) muestran un algoritmo basado en el exponente de Lipschitz para detectar, de forma no coherente, polvo en la superficie de un panel FV. Dicho trabajo tiene como inconveniente que no muestra una ecuación que justifique matemáticamente la selección del umbral.

A pesar de los avances logrados por la comunidad científica bajo el segundo paradigma, los trabajos reportados no validan sus algoritmos bajo la presencia de múltiples fallas con mediciones de campo. Tampoco tienen en cuenta los desafíos reportados por (Mellit et al., 2018) los cuales se dirigen al desarrollo de técnicas de detección que se caracterizan por su eficiencia, simplicidad en términos de implementación, adaptabilidad para diferentes tecnologías fotovoltaicas y la capacidad de detectar múltiples fallas así como nuevas fallas. Esta investigación, además de tener en cuenta los desafíos mencionados anteriormente para el algoritmo, se enfoca en hacer mínima la  $P_{FP}$  en la detección de fallas.

## 1.1 Pregunta de investigación

¿Es posible detectar de forma automática, instantánea y con baja probabilidad de falsos positivos fallas que ocurren en sistemas fotovoltaicos permitiendo mitigar las pérdidas en la producción energética?

## 1.2 Objetivo

Diseñar un algoritmo no coherente que permita detectar de forma automática fallas en sistemas fotovoltaicos haciendo mínima la probabilidad de falsos positivos.

### 1.2.1 Objetivos específicos

1. Identificar los métodos utilizados en la literatura para la detección de fallas en sistemas fotovoltaicos.
2. Diseñar y desarrollar experimentos que permitan evaluar la efectividad del algoritmo diseñado.
3. Evaluar fuera de línea el desempeño del algoritmo diseñado.

## 1.3 Hipótesis

Si se diseña un algoritmo que detecte de forma automática fallas mediante la transformada Wavelet discreta y la estimación de la dimensión

fractal es posible mitigar pérdidas en la eficiencia de conversión de los sistemas fotovoltaicos.

## 2. Marco teórico

Este capítulo brinda información sobre las bases teóricas empleadas para el diseño de un algoritmo de detección de fallas en SFV. La teoría Wavelet, la dimensión Fractal y los algoritmos inteligentes están desarrollando rápidamente campos en matemáticas aplicadas y análisis de señales. Esto se debe a que estas técnicas permiten analizar las características estocásticas presente en las señales.

### 2.1. Características corriente-voltaje de celdas solares

Una de las características principales que describen un módulo fotovoltaico es la relación CV. Esto se debe a que mediante dicha característica se puede conocer el comportamiento de una celda solar. (Morassaei et al., 2019; Nayak et al., 2019; Yuan et al., 2019; X. Zhang et al., 2020) plantean que las celdas solares son uno de los dispositivos más utilizados para producir energía limpia. La teoría de celda solar asume una celda eléctrica ideal empleando el modelo propuesto por (Shockley, 1949). La ecuación (1) muestra el comportamiento de la corriente de salida para una celda ideal.

$$I = I_{PV} - I_0 \left( \exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

donde:  $I_{PV}$  es la foto-corriente bajo iluminación,  $I_0$  es la corriente de saturación,  $V_T$  es el voltaje térmico y  $V$  voltaje de directa. (Sah et al., 1957) plantean que al modelo descrito en la ecuación (1) debe ser incluido una resistencia en serie y una resistencia en paralelo. Luego de tener en cuenta dichas consideraciones el nuevo modelo se muestra en la ecuación (2). La Figura 2. 1 muestra la característica CV de una celda solar bajo un ambiente de simulación, el Anexo 1 muestra el código MATLAB.

$$I = I_{PV} - I_0 \left( \exp\left(\frac{V + IR_s}{V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2)$$

donde:  $R_s$  es resistencia serie y  $R_p$  es resistencia en paralelo.

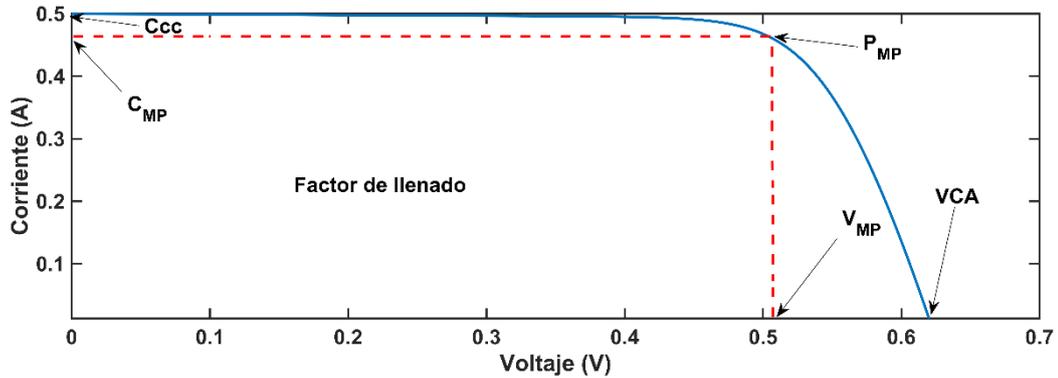


Figura 2. 1 Característica CV simulada para una celda solar en condiciones de 300 K,  $R_s = 0.1 \Omega$ ,  $R_p = 100 \Omega$ ,  $I_{PV} = 0.5$  y  $I_0 = 0.18 e^{-10}$ .

Note en la Figura 2. 1 como en el eje de las ordenadas la mayor corriente que se logra obtener corresponde a la corriente de cortocircuito, mientras que en el eje de las abscisas el mayor voltaje corresponde al voltaje a circuito abierto. Estos dos parámetros junto al  $V_{MP}$  y la  $C_{MP}$  permiten obtener el  $P_{MP}$ , que es el punto de operación en la celda solar donde la potencia de salida es máxima. Además, el  $V_{MP}$  y  $C_{MP}$  permiten conocer cuánto es el factor de llenado de una celda solar, el cual debe ser aproximadamente a 0.75 según (Jäger et al., 2016).

## 2.2. Transformada Wavelet

### 2.2.1. Función Wavelet

Una Wavelet es una función matemática que permite descomponer una función obteniendo diferentes componentes de frecuencias con diferentes resoluciones. (Chen et al., 2020; Donati et al., 2020; Mallat, 2009) plantean que la ecuación (3) define analíticamente a una función wavelet.

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (3)$$

donde:  $\psi_{s,\tau}(t)$  es la función wavelet,  $s > 0$  representa el parámetro de escala y  $\tau \in \mathbb{R}^+$  es el parámetro de traslación, ambos variantes en el tiempo. El objetivo de tener un factor de escala  $\frac{1}{\sqrt{s}}$  es asegurar que la energía de la Wavelet se conserve para diferentes escalas.

La energía ( $\Xi$ ) de la función wavelet puede ser calculada como se muestra en la ecuación (4):

$$\Xi = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi_{s,\tau}(t)|^2 dt \quad (4)$$

Sustituyendo (3) en (4),  $\Xi$  quedaría como se muestra en la ecuación (5):

$$\Xi = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \right|^2 dt \quad (5)$$

(Chui, 1997; Mallat, 2009; Welland, 2003) plantean que las funciones wavelets satisfacen la condición de admisibilidad mostrada en la condición (6).

$$\frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(f)|^2}{f} df < \infty \quad (6)$$

donde:  $\Psi(f)$  es la transformada de Fourier de  $\psi_{s,t}(t)$ . La Figura 2. 2 muestra el comportamiento de dos funciones wavelets mediante una representación tiempo-frecuencia.

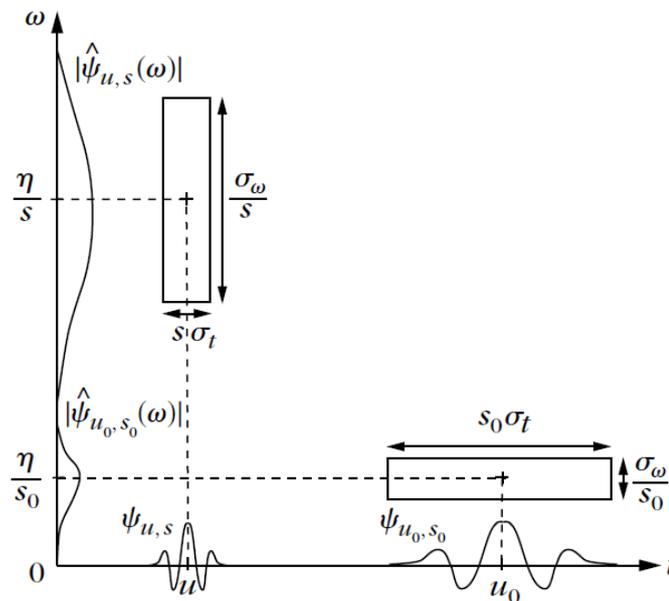


Figura 2. 2: Representación tiempo-frecuencia para dos funciones wavelets según (Mallat, 2009).

Note en la Figura 2. 2 como, a medida que existe un aumento en el parámetro de escala, la función se contrae en el tiempo mientras que en la frecuencia se dilata. Este cambio temporal para distintas escalas permite analizar señales obteniendo distinta resolución en el análisis.

### 2.2.2. Transformada Wavelet continua

(Cohen & Zayed, 2011; Gao & Yan, 2011) plantean que, mediante el uso de la función wavelet definida en la subsección 2.2.1, se obtienen dos tipos de transformadas. La TWC y su versión discreta. La ecuación (7) muestra de forma analítica la TWC.

$$W_c x(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t - \tau}{s} \right) dt \quad (7)$$

donde:  $W_c x(s, \tau)$  es la TWC de la señal  $x(t)$  y  $\psi^* \left( \frac{t - \tau}{s} \right)$  es la función complejo conjugado de  $\psi \left( \frac{t - \tau}{s} \right)$ .

### 2.2.3. Transformada Wavelet discreta

(Gao & Yan, 2011; Krivoshein et al., 2016) plantean que la versión discreta de la TW, TWD, para una señal  $x(t)$  se obtiene haciendo discreto los parámetros de escala y traslación mostrados en la ecuación (3). La ecuación (8) muestra la TWD.

$$W_d x(2^j, \mu) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*(2^{-j}t - \mu) dt \quad \forall j \in \mathbb{Z}^+ \quad (8)$$

donde:  $2^j$  y  $\mu$  son los parámetros de escala y traslación diádicos,  $j$  denota el nivel de descomposición y  $\mathbb{Z}^+$  indica los enteros positivos. (Griffel & Daubechies, 1995; Mallat, 2009) plantean que el objetivo de tener escalas y traslaciones diádicas garantiza que la función Wavelet sea una base orto-normal. El uso de bases orto-normales implica que no exista modificación en la energía de la señal que se esté analizando. (Griffel & Daubechies, 1995) plantea que a partir de la condición (9) se demuestra que la TWD no modifica la energía de la señal bajo análisis.

$$A \|x(t)\|^2 \leq \sum_{j, \mu} |\langle x(t), \psi_{j, \mu}(t) \rangle|^2 \leq B \|x(t)\|^2 \quad A, B \in \mathbb{R}^+ \quad (9)$$

donde:  $A, B$  son las fronteras del frame,  $\mathbb{R}^+$  denota los reales positivos,  $\|x(t)\|$  denota la norma de la señal  $x(t)$ ,  $\langle x(t), \psi_{j,\mu}(t) \rangle$  denota la operación producto escalar entre  $x(t)$  y  $\psi_{j,\mu}(t)$ , finalmente  $|\langle x(t), \psi_{j,\mu}(t) \rangle|$  denota el módulo de  $\langle x(t), \psi_{j,\mu}(t) \rangle$ .

La TWD permite aislar las características de la señal de forma diádica en información de detalle,  $cD$ , e información de aproximación,  $cA$ , formando un árbol de descomposición Wavelet como se muestra en la Figura 2. 3.

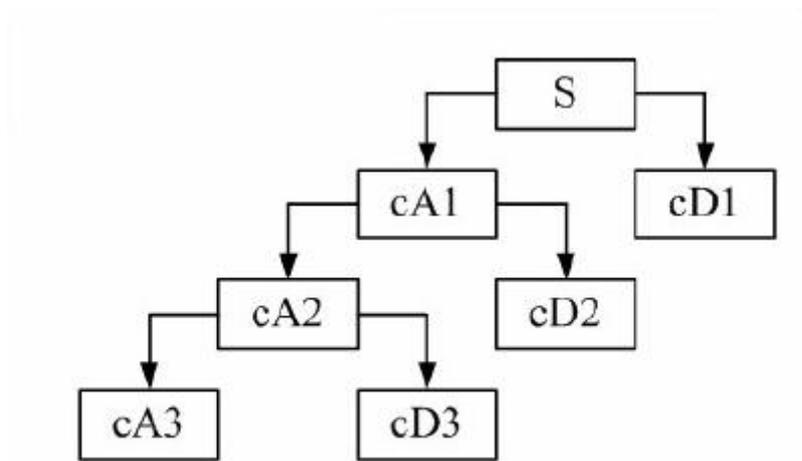


Figura 2. 3 Árbol de descomposición Wavelet según (Park et al., 2008).

La información brindada por los  $cA$  y  $cD$  se obtiene de las ecuaciones (10) y (11), respectivamente.

$$cA_n = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \phi^*(2^{-j}t - \mu) dt \quad (10)$$

$$cD_n = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*(2^{-j}t - \mu) dt \quad (11)$$

donde:  $n \in \mathbb{N}$ ,  $\phi_{j,\mu}(t)$  es la familia de funciones escala y  $\psi_{j,\mu}(t)$  es la familia de funciones wavelet.

### 2.3. Atenuación de ruido mediante Wavelet shrinkage

En el proceso de adquisición de datos, la señal es afectada por el ruido proveniente del medio en el cual se desarrolla. Por tal motivo, la distinción entre la señal y el ruido; se debe a la relación entre el fenómeno físico descrito por dicha señal y el nivel de espuria añadido. Esta medición puede ser modelada por la respuesta del sensor como se muestra en la ecuación (12).

$$\zeta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} (f(\eta) + W(\eta))\Theta(t - \eta)d\eta \quad (12)$$

donde:  $\zeta(t)$  es la señal de salida,  $f(\eta)$  es la señal que se desea recuperar,  $W(\eta)$  es el ruido acoplado, el cual presenta una distribución Gaussiana  $N(\mu, \sigma^2)$  y  $\Theta(t - \eta)$  es la respuesta del sensor.

Los trabajos reportados por (Chandra et al., 2021; Dong et al., 2021; Z. Zhang et al., 2021) resaltan la actualidad que presenta el algoritmo WS para la atenuación de ruido. Un paso importante en dicho proceso es la selección de la función wavelet. Esta selección se basa en la correlación existente entre la wavelet candidata y la característica de la señal que se desee extraer. Para el caso de las fallas producidas en los SFV, la característica a obtener se dirige a las irregularidades presentes en la característica CV tras generarse dichas fallas. Luego de seleccionar la función wavelet, el próximo paso es definir la regla de umbral que se va a emplear. Posteriormente se selecciona el umbral que permita remover los coeficientes que indiquen ruido.

### 2.3.1. Regla de umbral duro

(Griffel & Daubechies, 1995; Mallat, 2009) plantean que esta regla se basa en eliminar los coeficientes que se encuentran por debajo del umbral ( $\gamma_a$ ) seleccionado, dejando solamente los coeficientes que no fueron eliminados. La ecuación (13) y (14) muestran como es el comportamiento de dicha regla.

$$\hat{F}(n) = \sum_{n=0}^{N-1} \rho_{\zeta}(\omega_r) \psi_{j,\mu} \quad (13)$$

donde: el sub-índice  $\zeta$  denota suave (S) o duro (D).

$$\rho_D(\omega_r) = \begin{cases} \omega_r, & \text{si } |\omega_r| \geq \gamma_a \\ 0, & \text{si } |\omega_r| < \gamma_a \end{cases} \quad (14)$$

donde:  $\rho_D(\omega_r)$  son los coeficientes resultantes tras aplicar esta regla de umbral.

### 2.3.2. Regla de umbral suave

(Griffel & Daubechies, 1995; Mallat, 2009) afirman que la regla de umbral suave tiene la ventaja de brindar un refinamiento en el procedimiento de análisis. Esto se debe a que dicha regla modifica los coeficientes que se encuentren por encima de cierto umbral, utilizando el valor de dicho umbral. La ecuación (15) muestra de forma analítica como es el comportamiento de esta regla.

$$\rho_S(\omega_r) = \begin{cases} \omega_r - \gamma_a, & \text{si } \omega_r \geq \gamma_a \\ 0, & \text{si } |\omega_r| < \gamma_a \\ \omega_r + \gamma_a, & \text{si } \omega_r \leq -\gamma_a \end{cases} \quad (15)$$

### 2.3.3. Selección del umbral

La selección del umbral es un paso de suma importancia. Esto se debe a que una correcta selección permite hacer máxima la relación señal-ruido.

**VisuShrink:** (D.L. Donoho & Johnstone, 2002; Mallat, 2009; Verma & Verma, 2012) plantean que este método de selección del umbral se encuentra dentro del grupo de umbrales simples o globales, ver ecuación (16).

$$\gamma_{aV} = \hat{\sigma} \sqrt{2 \log_{10} N} \quad (16)$$

donde:  $\gamma_{aV}$  es el valor del umbral,  $\sigma$  es la desviación estándar de la señal que se estima mediante la ecuación (17) y  $N$  es la longitud de la señal.

$$\hat{\sigma} = \frac{q(|\{\omega_i\}_{i=0}^{l-1}|, \omega \in cD_1)}{0,6745} \quad (17)$$

donde:  $cD_1$  son los coeficientes de detalle del primer nivel de descomposición. Una característica presente en este método para computar el umbral es que, a medida que  $\gamma_{aV}$  incrementa, también lo hace la probabilidad de perder coeficientes correspondientes a la señal de análisis. Esto implica que para el caso donde la relación señal a ruido se aproxime a 0 dB no es conveniente emplear VisuShrink.

**RiskShrink:** (D.L. Donoho & Johnstone, 2002; Verma & Verma, 2012) plantean que el RiskShrink surge como una alternativa al umbral VisuShrink y también se encuentra dentro del grupo de umbrales simples. En dicho método el valor de  $\gamma_{aR}$  se computan empleando la ecuación (18):

$$\gamma_{aR} = \begin{cases} \sigma(0.3936 + 0.1829 \log_2 N), & N \geq 32 \\ 0, & N < 32 \end{cases} \quad (18)$$

**SureShrink:** (D.L. Donoho & Johnstone, 2002; David L. Donoho & Johnstone, 1995) plantean que este método se encuentra dentro del grupo de umbrales cuyo valor depende de los niveles de descomposición de la TWD. Dicho proceder selecciona el mínimo valor de riesgo mediante la ecuación (19) y con el vector resultante se computa el umbral empleando la ecuación (20).

$$SURE\left(\gamma_a; \frac{\omega}{\sigma}\right) = N - 2 \triangleright \left\{i: \left|\frac{\omega_i}{\sigma}\right| < \gamma_a\right\} + [\min(|\omega_i, \gamma_a|)]^2 \quad (19)$$

donde:  $\triangleright$  denota la cardinalidad del conjunto  $\left\{i: \left|\frac{\omega_i}{\sigma}\right| < \gamma_a\right\}$ .

$$\gamma_{aS} = \operatorname{argmin} SURE\left(\gamma_a; \frac{\omega}{\sigma}\right) \quad (20)$$

La desventaja que presenta este método es que, para el caso en que exista poca densidad de coeficientes wavelet, fomenta la pérdida de información.

**Heursure:** (Verma & Verma, 2012; Wang et al., 2009) plantean que este método es una mezcla SureShrink y VisuShrink. Dicho procedimiento para el cómputo del umbral no es muy deseado en escenarios donde la relación señal a ruido sea pobre. Para estos casos se fija el umbral mediante el método VisuShrink obteniendo mejores resultados. Este umbral se calcula como se muestra en la ecuación (21).

$$\gamma_{aH} = \begin{cases} \gamma_{aS}, & A < B \\ \min(\gamma_{aS}, \gamma_{aV}), & A \geq B \end{cases} \quad (21)$$

donde:  $A = \frac{s-N}{N}$ ,  $B = (\log_2 N)^{\frac{3}{2}} \sqrt{N}$ .

## 2.4. Dimensión de Hausdorff-Besicovitch

La dimensión de una señal brinda información sobre las propiedades métricas de la función que describe dicha señal, permitiendo obtener información morfológica de su desarrollo temporal.

(Kenneth, 1990; Schwarzenberger & Falconer, 1990) plantean que la medida de Hausdorff-Besicovitch  $s$ -dimensional generaliza las ideas de longitud, área y volumen. (Kenneth, 1990) plantea que la dimensión de Hausdorff-Besicovitch permite conocer como un objeto llena el espacio que lo contiene. Dicho objeto presenta una dimensión que se encuentra entre su dimensión topológica y la dimensión del espacio euclidiano en el cual está contenido.

Se define  $\{U_i\}$  una  $\delta$ -cubierta de un conjunto  $F$  como una colección finita de conjuntos (cuadrados de lado  $\delta$ ) que cubre a  $F$  como plantea (Kenneth, 1990) en la ecuación (22). Por otro lado, la Figura 2. 4 y ecuación (23) se observa que La dimensión de Hausdorff-Besicovitch es el valor de  $s$  para el cual ocurre el salto de  $\infty$  a 0.

$$H_\delta^s(F) = \inf \left\{ \sum_i |U_i|^s : \text{donde } \{U_i\} \text{ es una } \delta - \text{cubierta de } F \right\} \quad (22)$$

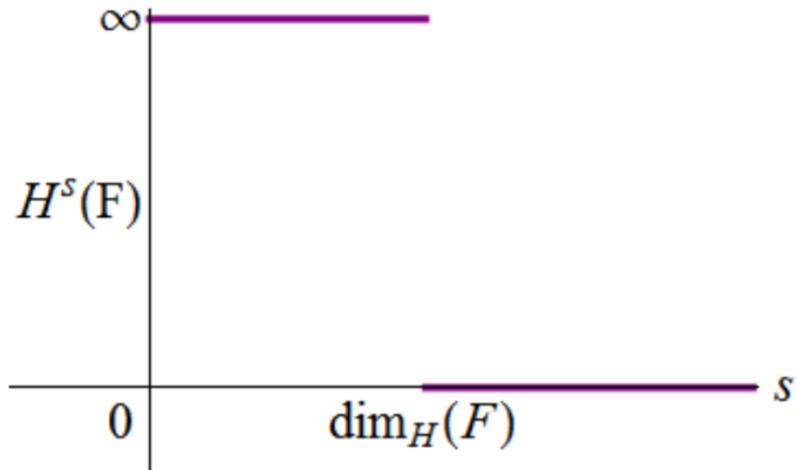


Figura 2. 4:  $H^s(F)$  Vs  $s$  para un conjunto  $F$ . La dimensión de Hausdorff-Besicovitch es el valor de  $s$  para el cual ocurre el salto de  $\infty$  a  $0$  según (Kenneth, 1990; Schwarzenberger & Falconer, 1990).

Para

$$H^s(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} H_\delta^s(F) \quad (23)$$

(Kenneth, 1990; Schwarzenberger & Falconer, 1990) definen la dimensión de Hausdorff-Besicovitch para un conjunto  $F$  a partir de la medida  $s$ -dimensional como se muestra en (24).

$$\dim_H(F) = \inf\{s: H^s(F) = 0\} = \sup\{s: H^s(F) = \infty\} \quad (24)$$

Por tanto:

$$H^s(F) = \begin{cases} \infty, & s < \dim_H(F) \\ 0, & s > \dim_H(F) \end{cases} \quad (25)$$

Para  $s = n$  entero, la medida  $s$ -dimensional de Hausdorff- Besicovitch coincide con la medida  $n$ -dimensional de Lebesgue.

La dimensión de Hausdorff- Besicovitch muestra la DF de un objeto y para su estimación se emplea el método de BC, por sus siglas en inglés, reportado por (Cimen et al., 2021; Panigrahy et al., 2020).

### 2.4.1. Caja de conteo

Como se pudo observar en la subsección 2.4, la DF es un número real que brinda información sobre la irregularidad de una señal. (Mallat, 2009) muestra el procedimiento para estimar la DF de un conjunto  $F$  acotado en  $\mathbb{R}^n$ , como el número  $N(\delta)$  necesarios para cubrir  $F$ . La ecuación (26) define la DF para un conjunto  $F$  y sigue la ley de potencia mostrada en (26).

$$N(\delta) \sim c\delta^{-s} \quad (26)$$

Aplicando logaritmos:

$$\log_{10} N(\delta) \sim \log_{10} c - s \log_{10} \delta \quad (27)$$

Despejando  $s$ :

$$s = - \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log_{10} N(\delta)}{\log_{10} \delta} \quad (28)$$

donde  $s$  es la dimensión del conjunto  $F$  y  $c$  es una constante de proporcionalidad positiva. (Schwarzenberger & Falconer, 1990) plantean que si el límite de la ecuación (28) existe, la DF se computa mediante la pendiente de la grafica  $\log_{10} s$  vs  $\log_{10} N(s)$  (ver ecuación (27)). El Anexo 2 muestra el código Matlab empleado.

## 2.5. Automatización de detección

La automatización del proceso de detección brinda gran importancia debido a que permite al algoritmo trabajar sin ser supervisado por un experto. (Fink, 1975; Sklar, 2001; Taylor, 2004) plantean que el proceso de detección de una señal se puede realizar de forma coherente o no coherente. La detección coherente tiene en cuenta características de la señal adquirida que son conocidos con anterioridad, cómo: frecuencia, fase

o morfología. Para el caso de la detección no coherente, no se disponen de conocimiento a posteriori sobre los parámetros de la señal de interés.

Estos paradigmas existentes en la detección se basan en la prueba de hipótesis donde la función densidad de probabilidades es conocida. (Sengupta & Kay, 1995) plantean que estos métodos de detección pueden estar basados en pruebas de hipótesis binaria. La ecuación (29) muestra lo planteado según (E. Trutié-Carrero et al., 2020).

$$\begin{aligned}\mathcal{H}_0: \hat{x} &= \omega, \text{ ausencia de señal} \\ \mathcal{H}_1: \hat{x} &= s + \omega, \text{ presencia de señal}\end{aligned}\tag{29}$$

donde:  $\omega$  es el ruido aditivo blanco Gaussiano,  $\mathcal{H}_0$  y  $\mathcal{H}_1$  se refieren a la hipótesis nula y alternativa, respectivamente,  $\hat{x}$  es la señal presente en cada hipótesis.

En el proceso de detección, el dato del observador ( $\hat{v}$ ) se compara con un umbral ( $\xi$ ). Esta regla de decisión trae consigo que en el proceso de detección se cometan dos tipos de errores. La probabilidad de que el detector cometa un error de tipo 1 es  $P(\mathcal{H}_1; \mathcal{H}_0)$ , lo que indica la probabilidad de decidir  $\mathcal{H}_1$  cuando  $\mathcal{H}_0$  es cierto, este error se conoce como probabilidad de falsos positivos ( $P_{FP}$ ). Para el caso relacionado con el error de tipo 2, la probabilidad sería  $P(\mathcal{H}_0; \mathcal{H}_1)$ , el cual se define como probabilidad de falsos negativos. Estos errores son totalmente inevitables y no pueden ser reducidos simultáneamente. La Figura 2. 5 muestra lo planteado.

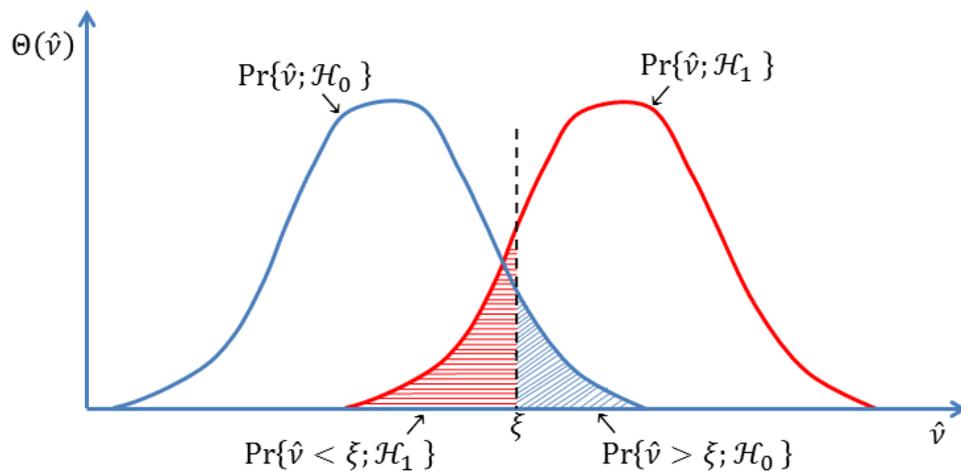


Figura 2. 5: Prueba de hipótesis para detección de señales.

Nótese en la Figura 2. 5 como se sombrea con colores azul y rojo los errores que se pueden cometer tras la selección del umbral, definiéndose en la ecuación (30) la probabilidad de error que se comete.

$$P_E = P_r\{\hat{v} > \xi; \mathcal{H}_0\} + P_r\{\hat{v} < \xi; \mathcal{H}_1\} \quad (30)$$

### 3. Desarrollo Teórico/Experimental

Para realizar la validación del algoritmo se utilizaron 3 configuraciones (serie, paralelo y arreglo). La Figura 3. 1 muestra la instalación empleada, la cual presenta 4 PF ERDM 235TP/6. Mientras que la Tabla 3. 1 muestra las características de los PF utilizados. La Tabla 3. 2 muestra las características eléctricas para cada panel ERDM 235TP/6 y la IR en el momento de la adquisición.



Figura 3. 1: Instalación experimental.

Tabla 3. 1 Especificaciones eléctricas del ERDM 235TP/6.

Parámetros	Valor
<b>Máxima potencia de salida</b>	235 W
<b>Voltaje de Circuito Abierto</b>	36.57 V
<b>Voltaje del punto de máxima potencia</b>	29.04 V
<b>Corriente de Corto Circuito</b>	8.69 A
<b>Corriente del punto de máxima potencia</b>	8.11 A

Tabla 3. 2 VCA e IR para cada PF ERDM 235TP/6.

PV	C <sub>cc</sub> (A)	I <sub>mpp</sub> (A)	VCA (V)	V <sub>mpp</sub> (V)	IR (W/m <sup>2</sup> )
1	8.367	7.21	32.8	25.407	993.09
2	8.14	7.402	32.52	24.17	958.63
3	7.585	6.79	32.46	24.15	887.45
4	6.76	5.52	33.77	25.35	807.98

Para la adquisición de datos se empleó un instrumento virtual remoto compuesto por un *Solsensor* (ver Figura 3. 2) y un analizador de PV PVA-1000S (ver Figura 3. 3) que permite obtener información sobre la característica CV de las instalaciones utilizadas. Las Tabla 3. 3 y Tabla 3. 4 muestran información del *Solsensor* y del PV PVA-1000S, respectivamente.



Figura 3. 2 *Solsensor* inalámbrico para sistemas fotovoltaicos.



Figura 3. 3 Analizador de paneles fotovoltaicos.

Tabla 3. 3 Especificaciones eléctricas del SolSensor según (SolMetric, 2020).

Parámetros	Valor
Exactitud típica de la intensidad de radiación (IR)	$\pm 2\%$ para un rango de 0 a $1500\text{ W/m}^2$
Exactitud típica de la temperatura para el panel PV	$\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$
Exactitud de inclinación	$\pm 1$ grado para un rango de 0 a 90 grados
Intervalos de medición	Niveles de radiación: 0.1 s, Temperatura 1 s

Tabla 3. 4 Especificaciones eléctricas del analizador PF (SolMetric, 2020).

Parámetros de medición	Valor
Rango de voltaje	0 - 1000 V
Rango de corriente	0 - 20 A
Exactitud de voltaje	$\pm 0.5\%$
Exactitud de corriente	$\pm 0.5\%$
Resolución de voltaje	25 mV
Resolución de corriente	500 $\mu\text{A}$
Duración de medición	4 s
Duración de barrido I-V	80-240 ms

### 3.1. Efectos de la intensidad de radiación para la detección de fallas

Para el diseño del algoritmo se estudiaron los efectos provocados en el PF por la radiación solar. Dicho estudio fue tomado en cuenta por la existencia del multi-trayecto que experimenta la radiación solar. Lo que provoca que no llegue la radiación en su totalidad de forma directa al PF. Esto se debe a que dicha radiación se refleja y dispersa por la presencia de obstáculos como: nubes, hojas de árboles, etc. (Arias-Rosales & LeDuc,

2020; Emeksiz, 2020; Foster et al., 2020; Nussbaumer et al., 2020) reportan que dicho fenómeno se conoce como radiación difusa.

(Mrabti et al., 2010; Perraki & Kounavis, 2016; Xiao et al., 2014) realizaron un estudio en celdas solares dirigido al comportamiento de la IR. Dichos autores plantean que cuando la IR decrece, el voltaje de circuito abierto lo hace ligeramente, mientras que la corriente de cortocircuito disminuye bruscamente (ver Figura 3. 4).

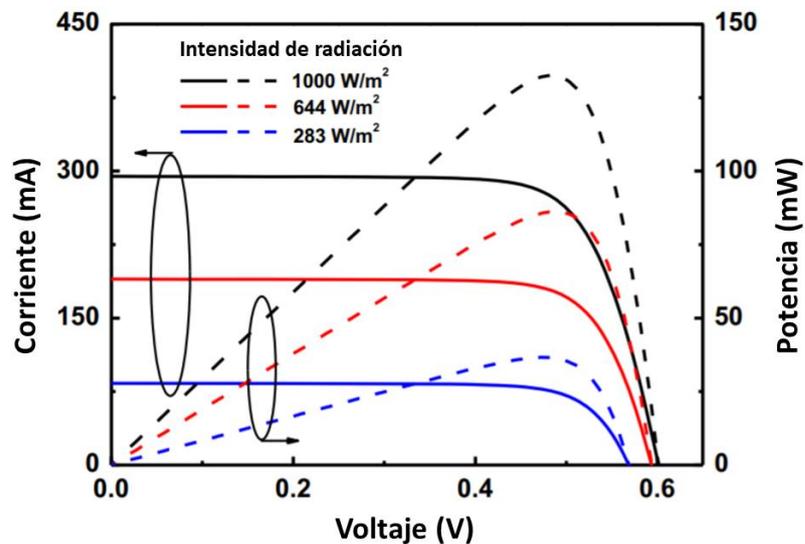


Figura 3. 4 Característica CV (línea continua) y PV (línea discontinua) a 25 °C en una celda solar para varias intensidades de radiación reportado por (Xiao et al., 2014).

Como se puede observar en la Figura 3. 4 la influencia de la radiación solar afecta el factor de llenado del PV. Esto provoca que no sea conveniente utilizar la señal cruda para la detección no coherente de fallas en PF.

### 3.2. Característica CV de la instalación empleada

Mediante tres configuraciones de conexión se caracterizaron los PF, configuración serie: la cual permite que se obtenga un incremento del voltaje según (Ma et al., 2018; Teo et al., 2018); configuración paralelo: para el incremento de la corriente según (Drissi et al., 2017; Sánchez Reinoso et al., 2013) y configuración en arreglo: logrando un incremento del voltaje y la corriente.

### 3.2.1. Configuración serie

La Figura 3. 5 muestra el esquema eléctrico para la topología serie, mientras que la Figura 3. 6 muestra la forma de la señal esperada en la característica CV, la cual, como se observa, presenta un comportamiento de auto-similitud. Note en la Figura 3. 7 como se cumple la superposición de voltaje al igual que la propiedad de auto-similitud planteada en la Figura 3. 6. La Figura 3. 8 muestra el comportamiento de la IR para las señales mostradas en la Figura 3. 7.

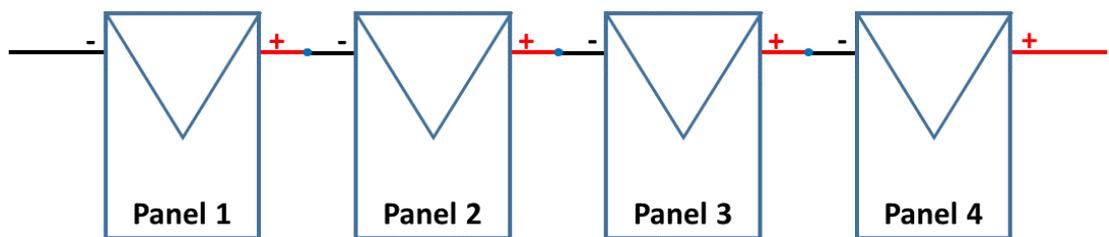


Figura 3. 5 Esquema eléctrico de la configuración serie.

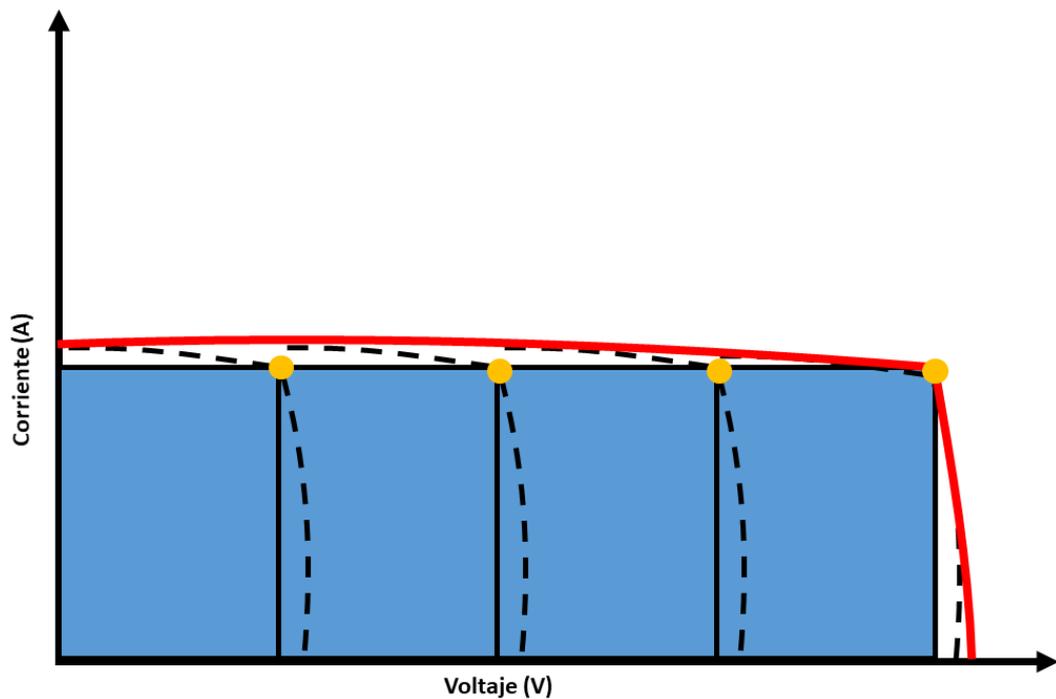


Figura 3. 6 Configuración serie.

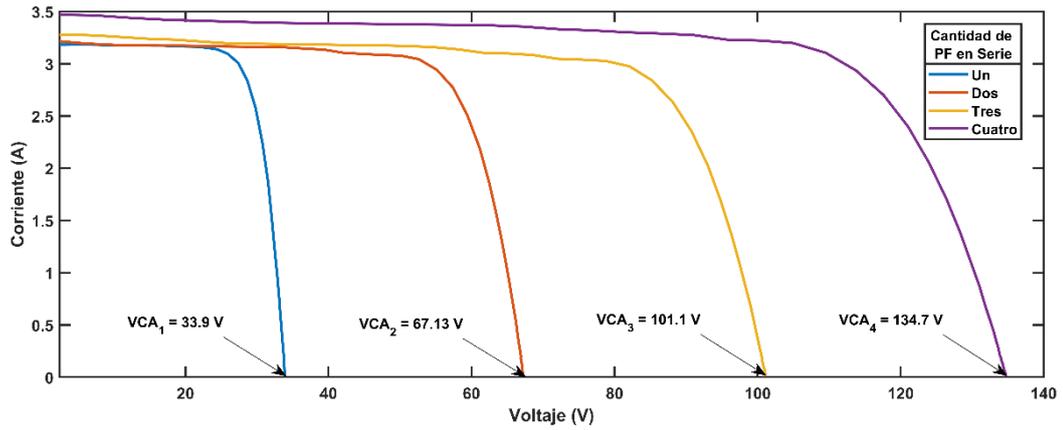


Figura 3. 7 Superposición para configuración serie.

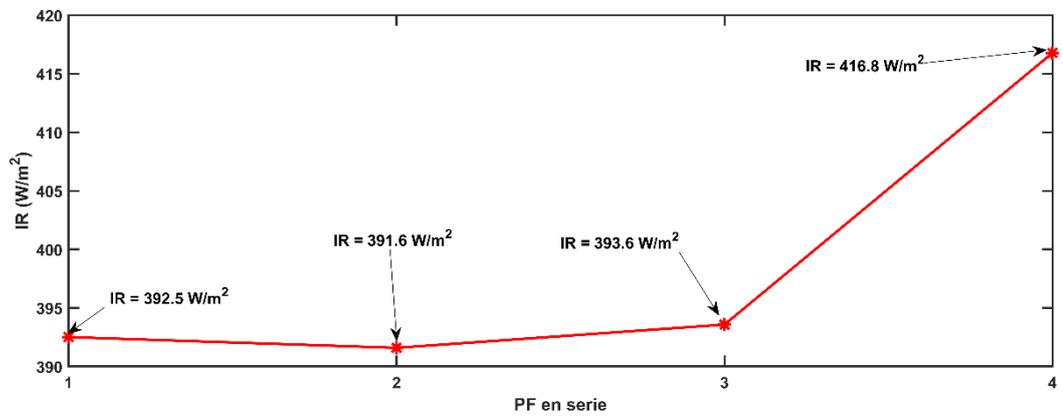


Figura 3. 8 IR para las señales adquiridas de la Figura 3. 7 y Figura 3. 9.

La variación en la corriente de corto circuito que se observa en la Figura 3. 7 se debe a que la medición se realizó bajo condiciones de campo (ver Figura 3. 8). Note en la Figura 3. 9 como, luego de normalizar la característica CV mostrada en la Figura 3. 7, estas presentan una morfología muy similar.

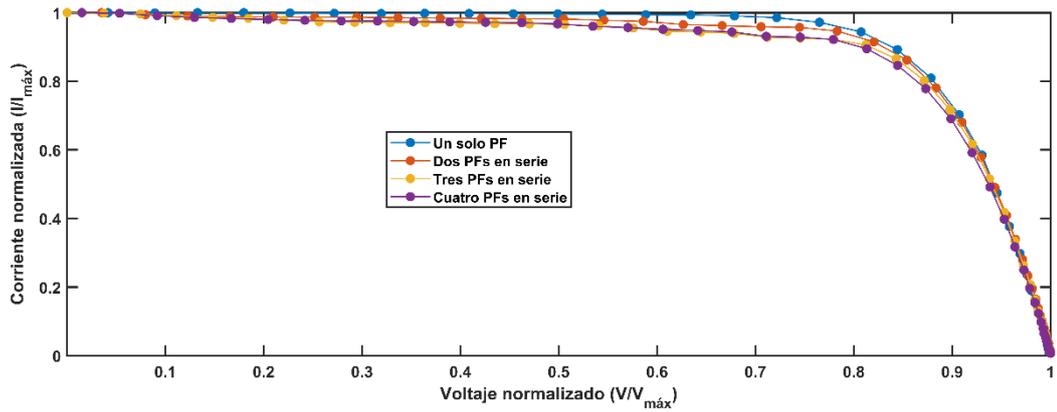


Figura 3. 9 Configuración serie normalizada.

### 3.2.2. Configuración paralelo

La Figura 3. 10 muestra el esquema eléctrico para la configuración paralelo, mientras que la Figura 3. 11 muestra la característica CV esperada y la propiedad de auto-similitud. Note en la Figura 3. 12 como se cumple el principio de superposición de corriente. La Figura 3. 13 muestra la IR para las señales mostradas en la Figura 3. 12.

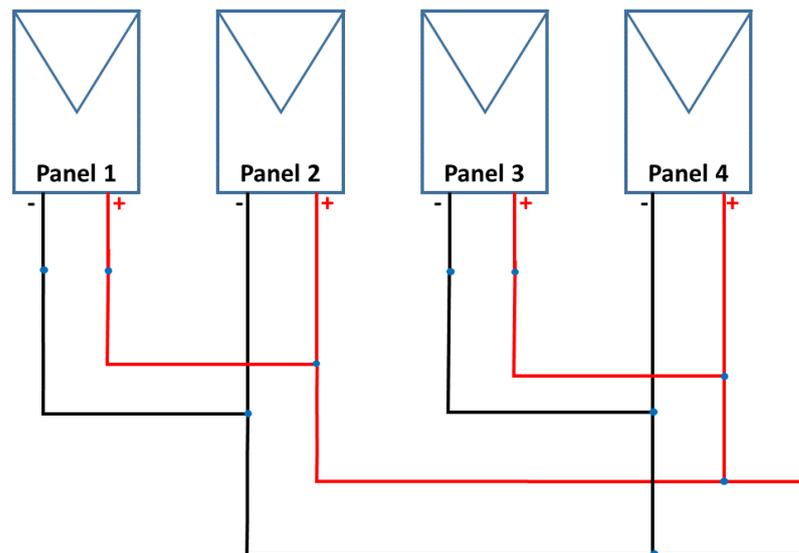


Figura 3. 10 Esquema eléctrico para configuración paralelo.

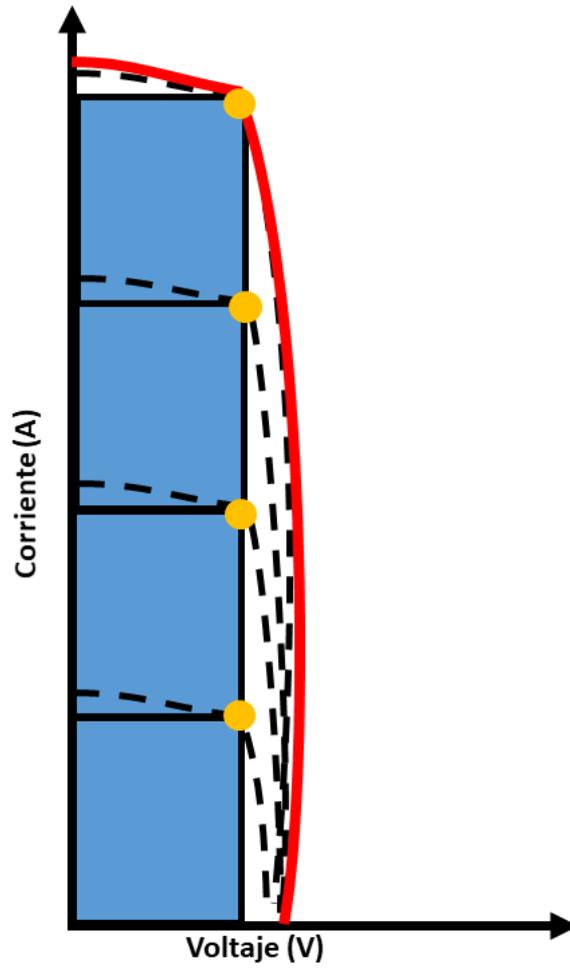


Figura 3. 11 Configuración paralelo.

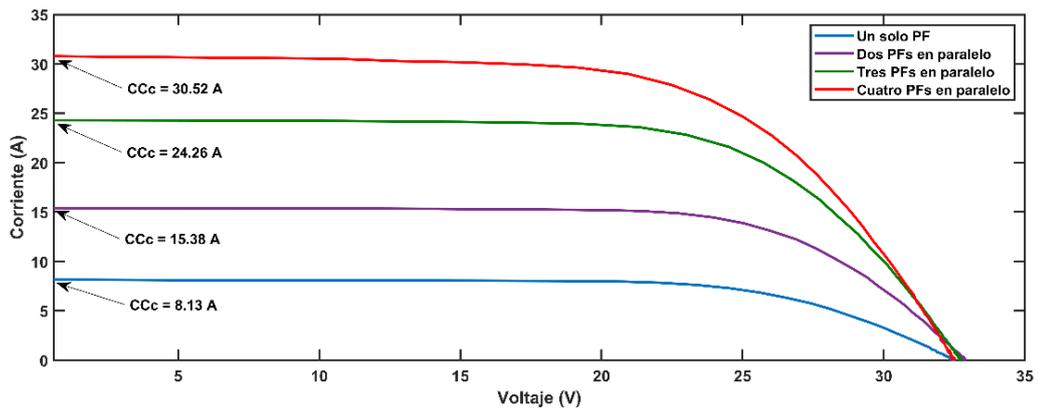


Figura 3. 12 Superposición para configuración paralelo.

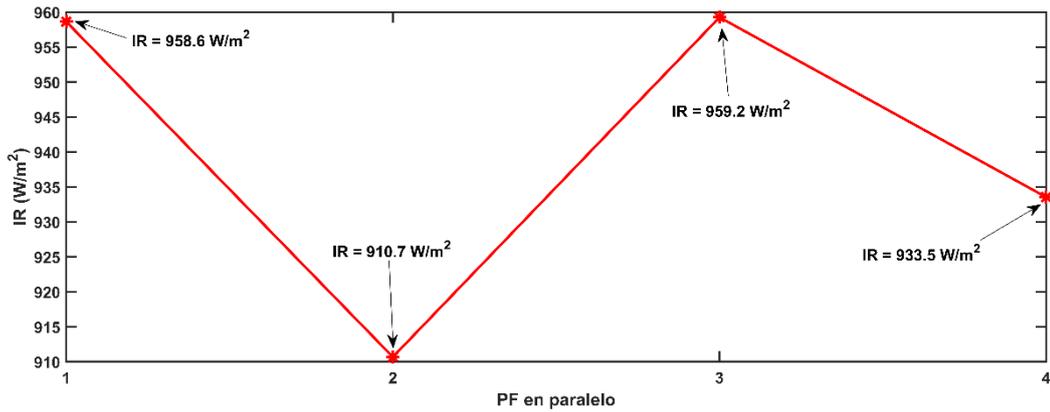


Figura 3. 13 IR para las señales mostradas en la Figura 3. 12.

Note en la Figura 3. 14 como, luego de normalizar la señal mostrada en la Figura 3. 12, estas presentan la misma morfología.

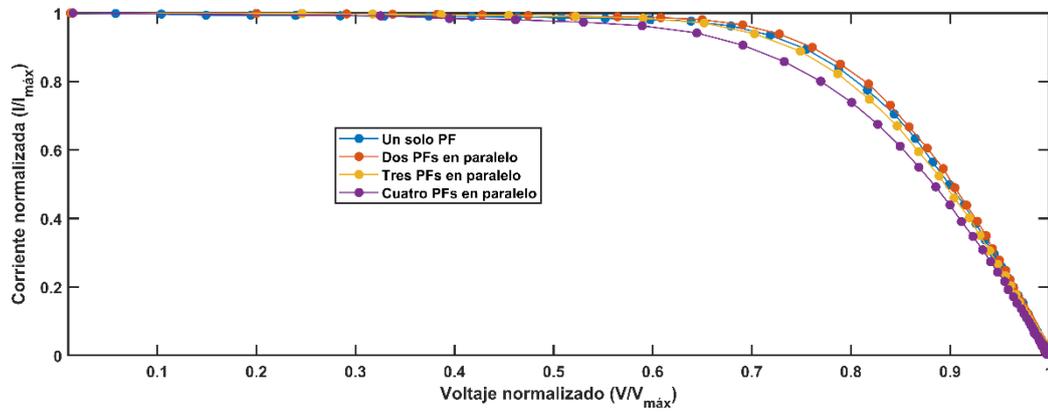


Figura 3. 14 Topología paralelo normalizada.

### 3.2.3. Configuración arreglo 2 x 2

La Figura 3. 15 muestra el esquema eléctrico para la configuración arreglo 2 x 2. Por otro lado en la Figura 3. 16 se observa la característica CV esperada, mostrando la propiedad de auto-similitud y en la Figura 3. 17 la señal adquirida para un PF. Mientras que la Figura 3. 18 muestra las señales normalizadas.

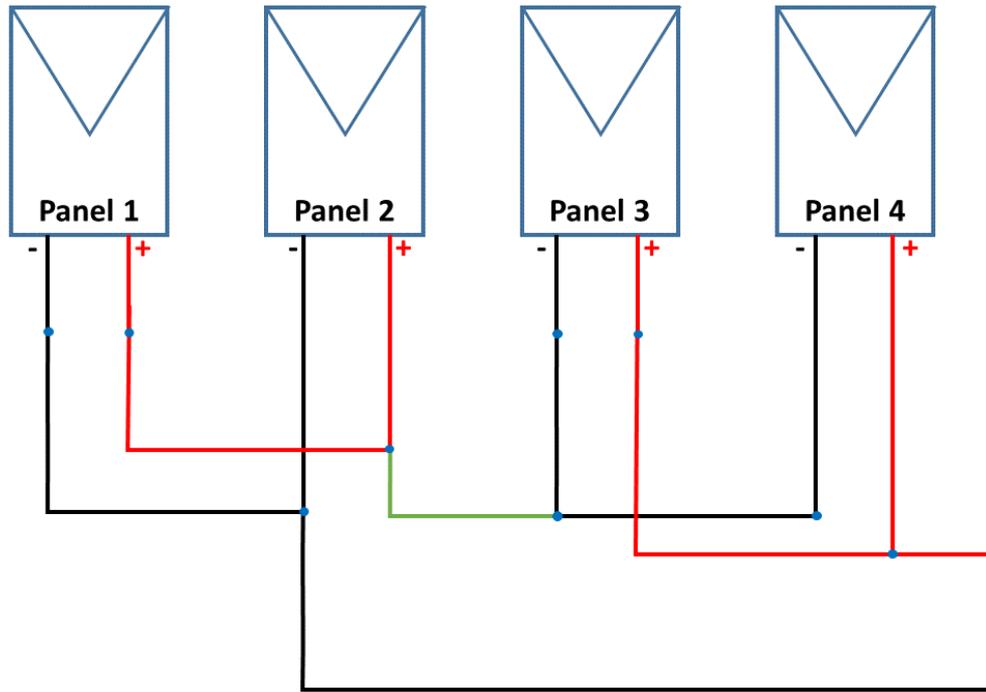


Figura 3. 15 Esquema eléctrico para configuración arreglo 2 x 2.

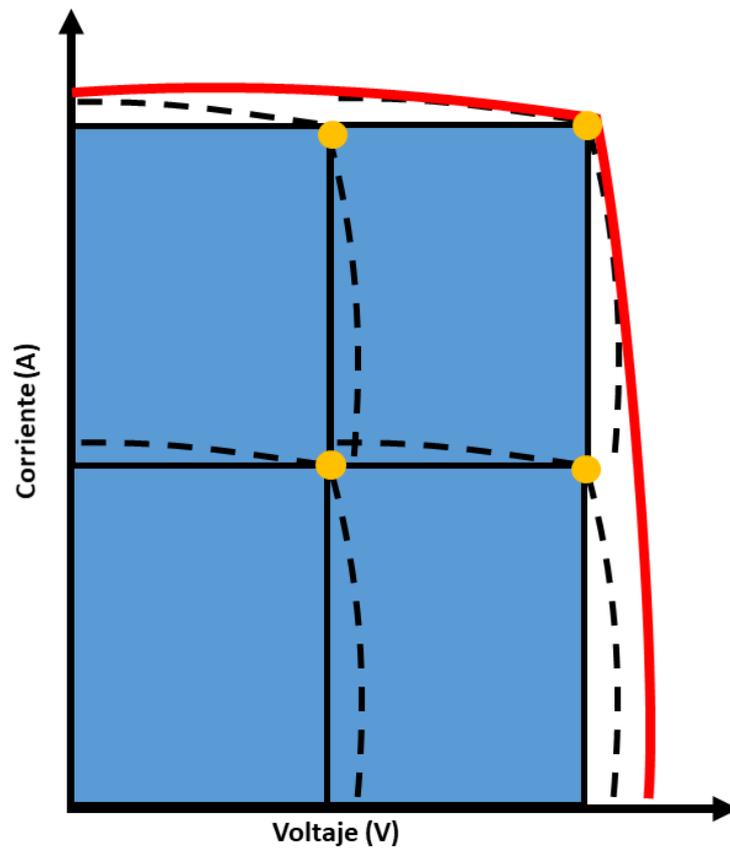


Figura 3. 16 Topología arreglo 2x2.

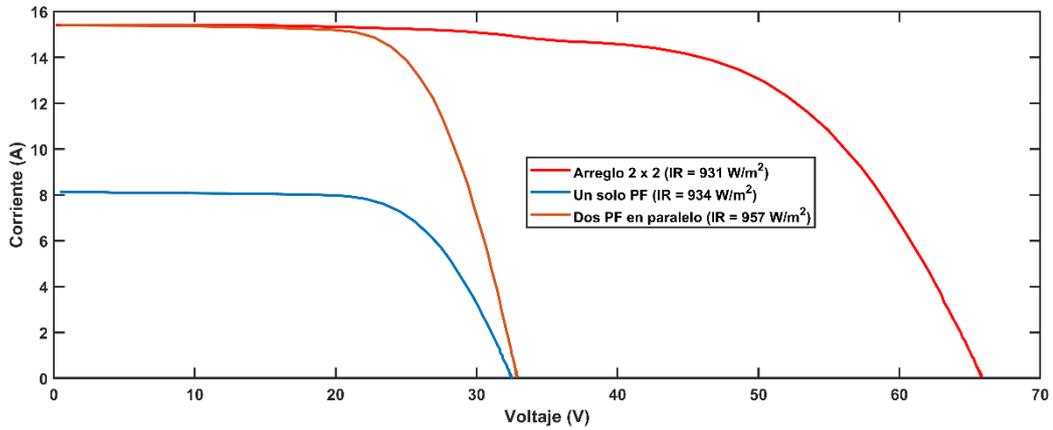


Figura 3. 17 Superposición para topología arreglo 2x2.

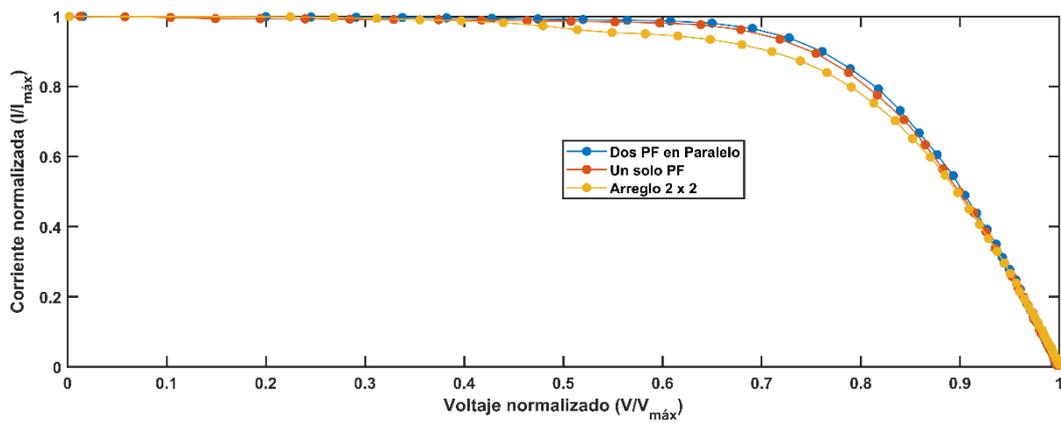


Figura 3. 18 Señales mostradas en la Figura 3. 17 normalizadas.

Note en los resultados mostrados en la subsección 3.3 cómo, independientemente de la topología de conexión empleada, la característica CV normalizada permite obtener información morfológica de la señal. Tener en cuenta la invariancia de dichas características, le permite al algoritmo trabajar frente a escenarios con IR no uniforme.

#### 3.2.4. Algoritmo propuesto para la detección de fallas

Para el desarrollo del algoritmo, el autor se basó en la información mostrada en la sección 2 y las subsecciones 3.1 y 3.2. Con el objetivo de que el algoritmo evalúe la morfología de la señal adquirida mediante la DF.

La Figura 3. 19 muestra el algoritmo propuesto para detectar fallas en el SFV.

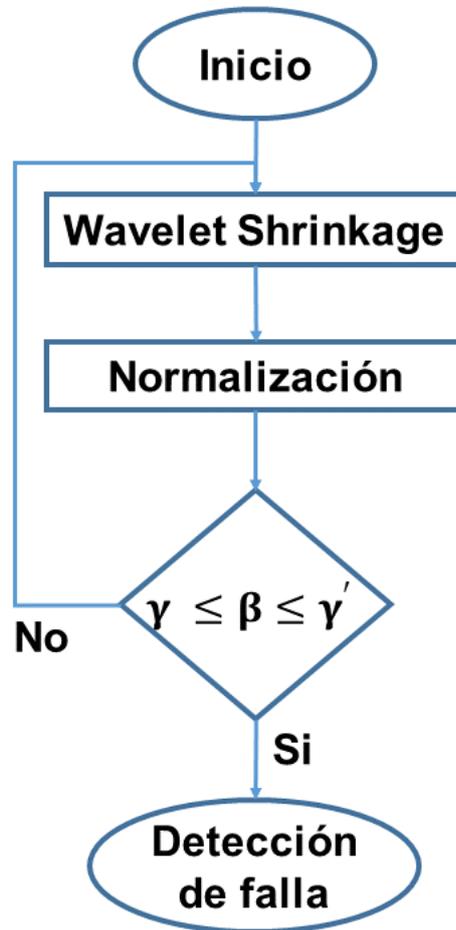


Figura 3. 19 Algoritmo para detectar fallas en el SFV.

## 4. Resultados y Discusión

### 4.1. Detector de falla

Como se planteó en la sección anterior, el algoritmo propuesto consiste en estimar la DF de la señal normalizada para luego compararlo con umbrales  $\gamma$  y  $\gamma'$  calculados bajo una  $P_{FP}$  determinada *a priori*.

La principal ventaja del algoritmo es que solo necesita conocimiento del sistema sin presencia de falla, lo que permite detectar fallas mediante la teoría de decisiones reportada por (E. Trutié-Carrero et al., 2020) pero mediante la ( $H_0$ ), la cual se describe en la ecuación (31).

$$H_0 : \beta \left( \frac{(x_q)_{q=0}^{Q-1}}{\sup(x_q)_{q=0}^{Q-1}} \right) \sim \Xi(\xi) \quad (31)$$

donde:  $\beta \left( \frac{(x_q)_{q=0}^{Q-1}}{\sup(x_q)_{q=0}^{Q-1}} \right)$  es la estimación de la DF normalizada (a partir de este momento utilizaremos la letra  $\beta$  para referirnos a DF),  $\sup(x_q)_{q=0}^{Q-1}$  denota el valor supremo para la señal  $x_q$  y  $\Xi(\xi)$  es la función de distribución para la variable aleatoria  $\xi$ .

Para obtener  $\gamma$  y  $\gamma'$ , se estimó  $\beta$  para 30 señales. Posteriormente se aplicó la prueba de bondad de ajuste  $\chi^2$  reportada por (Goual et al., 2020; Parthiban & Gajivaradhan, 2020; Rolke & Gongora, 2020). Luego de realizar dicha prueba, se mostró que los datos se ajustan a una distribución normal ( $N(\mu, \sigma)$ ). Una vez conocida la distribución a la cual se ajustan los datos, se obtuvieron dos nuevas ecuaciones que permiten calcular  $\gamma$  y  $\gamma'$  bajo una  $P_{FP}$  determinada *a priori*, siendo este resultado la segunda contribución de este trabajo. Para obtener las ecuaciones el autor se basó en la Figura 4. 1 y las ecuaciones (32) y (33) que describen a la función de distribución acumulativa y función de densidad de probabilidades, respectivamente según (Gray & Davisson, 2004).

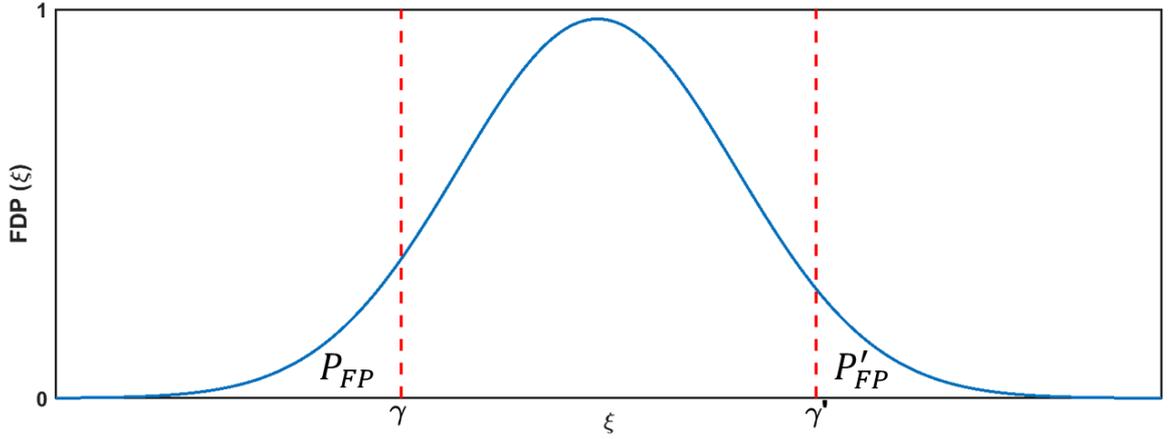


Figura 4. 1 Función de distribución normal.

$$P_{FP} = 0.5 \left( 1 + \delta \left( \frac{\gamma - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right) \quad (32)$$

$$P'_{FP} = 0.5 \left( \varphi \left( \frac{\gamma' - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right) \quad (33)$$

donde:  $\delta \left( \frac{\gamma - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right)$  y  $\varphi \left( \frac{\gamma' - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right)$  son la función error y función error complementario de acuerdo con (Jammalamadaka & Bury, 2000),  $\sigma$  denota la desviación estándar y  $\mu$  el valor medio. Mediante los despejes de la ecuación (32) y ecuación (33) se proponen dos ecuaciones para calcular  $\gamma$  y  $\gamma'$  teniendo en cuenta la  $P_{FP}$  y  $P'_{FP}$  (ver la ecuación (34) y (35))

$$\gamma = \sqrt{2}\eta(2P_{FP} - 1)\sigma + \mu \quad (34)$$

$$\gamma' = \sqrt{2}\vartheta(2P'_{FP} - 1)\sigma + \mu \quad (35)$$

donde:  $\eta(2P_{FP} - 1)$  y  $\vartheta(2P'_{FP} - 1)$  son la función error inversa y función error inversa complementario según (Jammalamadaka & Bury, 2000).

## 4.2 Validación

El primer paso en el algoritmo es la atenuación de ruido mediante Wavelet Shrinkage, utilizando la estrategia SureShrink con una regla de umbral suave. Este paso permitirá resaltar la irregularidad presente en la señal adquirida. Para llevar a cabo este procedimiento es necesario seleccionar una función wavelet que permita resaltar la característica fractal presente en la señal. Debido a esto se estudiaron la desviación estándar ( $\sigma_{\psi_{j,\tau}}^{30}$ ) y el valor medio ( $\mu_{\psi_{j,\tau}}^{30}$ ) para 30 señales correspondientes a la señal sin falla, con el objetivo de seleccionar la función wavelet que haga mínima  $\sigma_{\psi_{j,\tau}}^{30}$ . Las familias Wavelet estudiadas fueron Biorotogonal, Coiflets, Daubechies y Symlet porque forman una base Wavelet diádica, según estudios reportados por (Goswami & Chan, 2011). La Figura 4. 2 muestran los resultados obtenidos para dicho análisis mostrando en el eje x el valor medio ( $\mu_{\psi_{j,\tau}}^{30}$ ) y en y la desviación estándar ( $\sigma_{\psi_{j,\tau}}^{30}$ ) para 30 señales correspondientes a la señal sin falla.

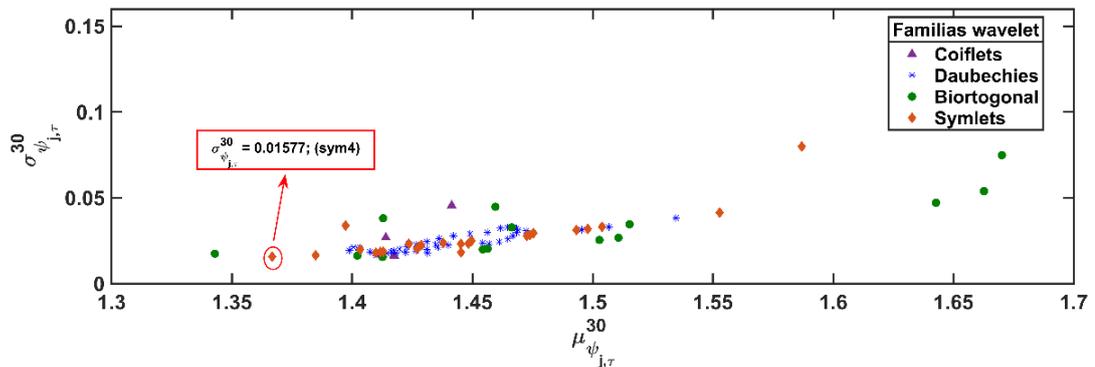


Figura 4. 2 Selección de función wavelet

En la Figura 4. 2 se resalta con un círculo rojo la función wavelet que hace mínimo el valor de  $\sigma_{\psi_{j,\tau}}^{30}$ , la cual corresponde a la familia Symlet, específicamente a la función Symlet 4. Una vez obtenida la función wavelet

para el algoritmo, se calcularon los umbrales con una  $P_{FP} = 2\%$  determinada *a priori* según la experiencia del autor.

#### 4.2.2. Validación del algoritmo frente a las fallas

Las Figura 4. 3 y Figura 4. 4 muestran los resultados obtenidos con el algoritmo para la configuración serie y la IR de cada señal adquirida, respectivamente. Los umbrales obtenidos para el proceso de detección en esta configuración fueron,  $\gamma' = 1.55$  y  $\gamma = 1.37$ , siguiendo el procedimiento mostrado en el apartado anterior.

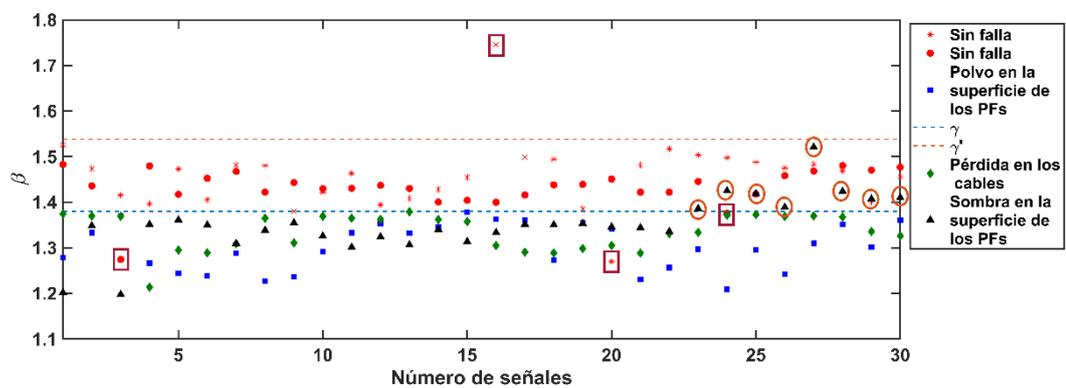


Figura 4. 3 Respuesta del algoritmo para la configuración serie.

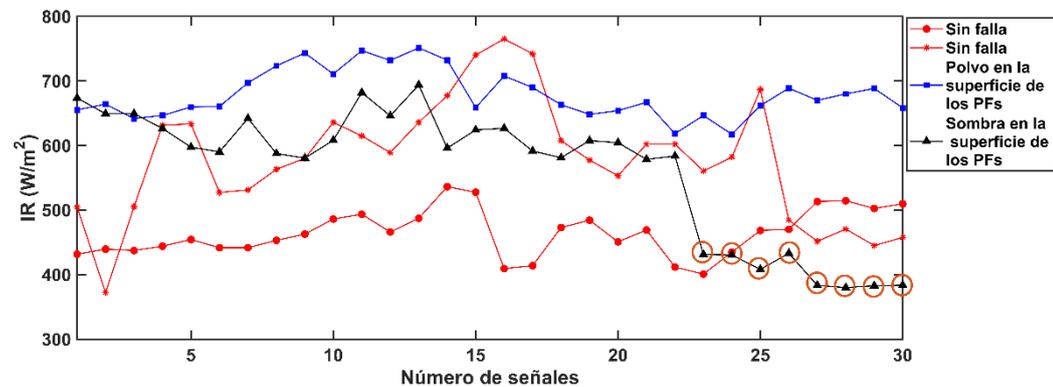
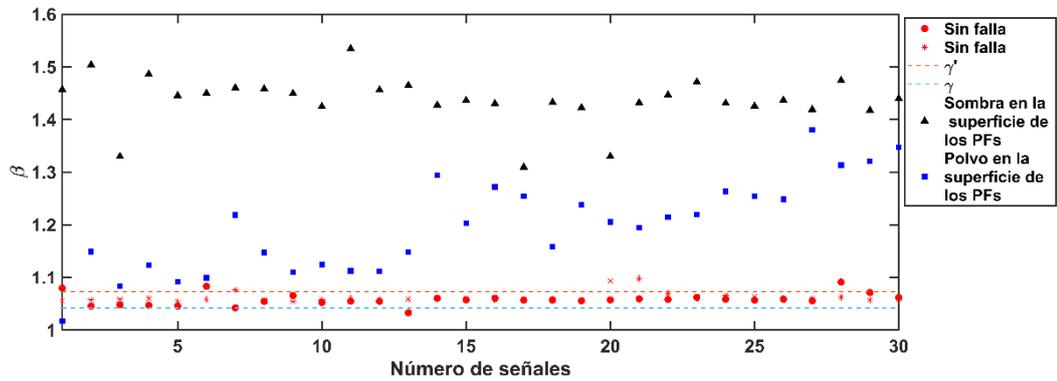


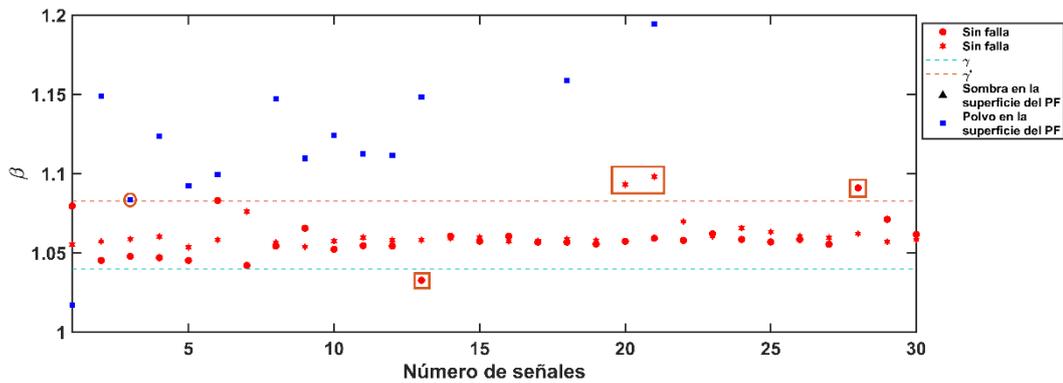
Figura 4. 4 IR que arribó a la configuración serie.

Note en la Figura 4. 3 cómo el algoritmo solo presentó 4 falsos positivos y 8 falsos negativos los cuales correspondieron a fallas producidas por sombra que presentaron una IR (W/m<sup>2</sup>) inferior a 450. De la Figura 2. 5 se observa que la ocurrencia de falsos negativos en un proceso de detección a ciego es natural.

Las Figura 4. 5 y Figura 4. 6 muestran los resultados obtenidos por el algoritmo y la IR respectivamente para la configuración en paralelo.



(a) Respuesta del algoritmo.



(b) Aumento entre los umbrales.

Figura 4. 5 Respuesta del algoritmo para la configuración paralelo

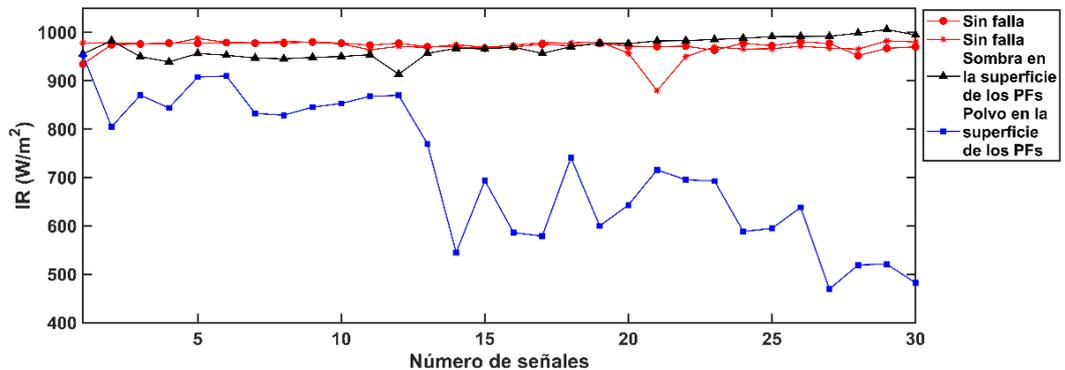


Figura 4. 6 IR que arribó a la topología paralelo.

Note en la Figura 4. 5 como solo surgen 4 falsos positivos y un falso negativo para  $\gamma' = 1.084$  y  $\gamma = 1.04$ .

Las Figura 4. 7 y Figura 4. 8 muestran los resultados obtenidos del algoritmo e IR, respectivamente. Note como para esta configuración, el algoritmo solo arrojo 4 falsos positivos y 1 falso negativo.

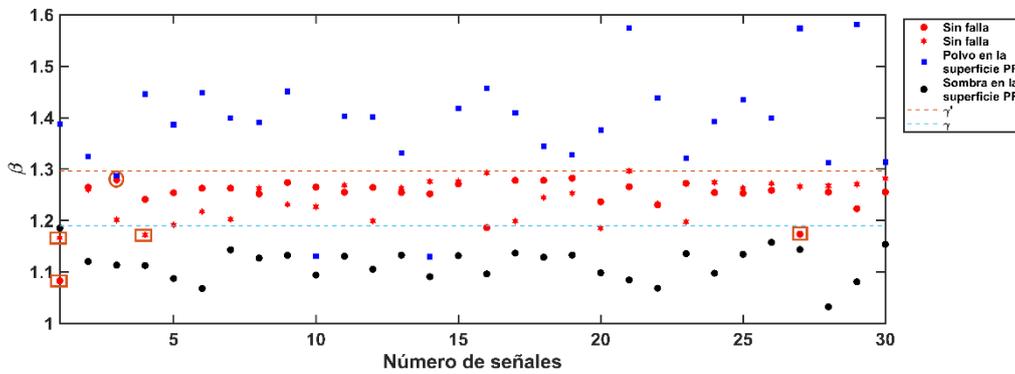


Figura 4. 7 Respuesta del algoritmo para la configuración arreglo 2 x 2.

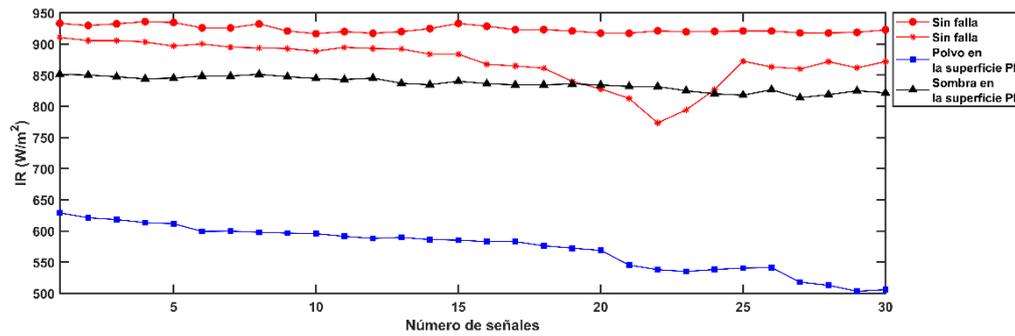


Figura 4. 8 IR que arribó a la topología arreglo 2 x 2.

El último paso en el proceso de validación se dirigió hacia la comparación de los resultados obtenidos con el algoritmo reportado en este trabajo y los algoritmos reportados por la comunidad científica. La Tabla 4. 1 muestra dicha comparación.

Tabla 4. 1: Comparación de los algoritmos frente a la  $P_{FP}$ .

$P_{FP}$ (%)	Algoritmos	Fallas
<b>2.258</b>	WOEWMA	Sombra parcial
<b>12.9630</b>	OR-KGLRT	Sombra parcial
<b>6.98</b>	WM-EWMA	Sombra parcial
<b>5</b>	WM-EWMA	Circuito abierto
<b>2</b>	Reportado en este trabajo	Sombra parcial, Polvo
<b>0</b>	Reportado en este trabajo	Circuito abierto

Observe en los resultados obtenidos, sin presencia de falla, para la configuración paralela y arreglo 2 x 2, luego de evaluar la característica CV mediante el FD, esta tiende a su dimensión topológica; mientras que la configuración serie tiende a la dimensión del espacio contenido. Este resultado implica que el algoritmo no tiene dependencia de la configuración donde se utiliza.

Es importante señalar que en el caso de un circuito abierto, que implica una desconexión eléctrica, el algoritmo creado por los autores de este trabajo es capaz de detectar este tipo de fallas, ya que como consecuencia de esta desconexión eléctrica, se genera una señal constante igual a una línea recta que tiene dimensión 1, que corresponde a la dimensión topológica de la señal. De los resultados mostrados, se observa que la  $P_{FP}$  obtenida en ambos casos es cero por ciento, lo que demuestra que nuestro algoritmo es superior a los reportados.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se presentaron dos aportes encaminados a la detección no coherente de fallas en sistemas fotovoltaicos. El primer aporte es un algoritmo que detecta múltiples fallas en los sistemas fotovoltaicos, se adapta a los sistemas existentes y hace mínima la probabilidad de fallas en el proceso de detección. La segunda contribución consta de dos ecuaciones que permiten calcular la detección del umbral teniendo en cuenta *a priori* la probabilidad de fallo del algoritmo. El proceso de normalización le da al algoritmo invulnerabilidad a la radiación no uniforme. La wavelet Symlet 4 es la función candidata para el proceso de atenuación del ruido. Mediante las dos contribuciones presentadas se detectan múltiples fallas en sistemas fotovoltaicos sin importar la tecnología ni la configuración empleada, con una probabilidad de fallo en el algoritmo inferior o igual a 2%.

Para siguientes estudios, se recomienda centrarse en una topología para llevar al cabo el proceso de clasificación mediante máquinas de aprendizaje. También sería de interés estudiar un sistema conformado por inversores y conectados a la red eléctrica, así como estudiar las topologías mostradas mediante análisis multifractal.

## Referencias

- Arias-Rosales, A., & LeDuc, P. R. (2020). Modeling the transmittance of anisotropic diffuse radiation towards estimating energy losses in solar panel coverings. *Applied Energy*, 268, 114872. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114872>
- Belboula, A., Taleb, R., Bachir, G., & Chabni, F. (2019). Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Thermoelectric Generator. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 62(1), 329–338. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-04789-4\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-030-04789-4_36)
- Bhattacharya, M., Paramati, S. R., Ozturk, I., & Bhattacharya, S. (2016). The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. *Applied Energy*, 162, 733–741. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.104>
- Chaibi, Y., Malvoni, M., Chouder, A., Boussetta, M., & Salhi, M. (2019). Simple and efficient approach to detect and diagnose electrical faults and partial shading in photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*, 196, 330–343. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.086>
- Chandra, M., Goel, P., Anand, A., & Kar, A. (2021). Design and analysis of improved high-speed adaptive filter architectures for ECG signal denoising. *Biomedical Signal Processing and Control*, 63, 102221. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102221>
- Chen, X., Yin, L., Fan, Y., Song, L., Ji, T., Liu, Y., Tian, J., & Zheng, W. (2020). Temporal evolution characteristics of PM2.5 concentration based on continuous wavelet transform. *Science of the Total Environment*, 699, 134244. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134244>
- Chouay, Y., & Ouassaid, M. (2018). An intelligent method for fault diagnosis in photovoltaic systems. *Proceedings of 2017 International Conference on Electrical and Information Technologies, ICEIT 2017, 2018-Janua*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/EITech.2017.8255225>
- Chui, C. K. (1997). *Wavelets: a mathematical tool for signal analysis*. SIAM.

- Cimen, M. E., Boyraz, O. F., Yildiz, M. Z., & Boz, A. F. (2021). A new dorsal hand vein authentication system based on fractal dimension box counting method. *Optik*, 226, 165438. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165438>
- Cohen, J., & Zayed, A. I. (2011). *Wavelets and multiscale analysis: theory and applications*. Springer Science & Business Media.
- Das, S., Hazra, A., & Basu, M. (2018). Metaheuristic optimization based fault diagnosis strategy for solar photovoltaic systems under non-uniform irradiance. *Renewable Energy*, 118, 452–467. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.053>
- Dhimish, M., Holmes, V., Mehrdadi, B., Dales, M., & Mather, P. (2017). Photovoltaic fault detection algorithm based on theoretical curves modelling and fuzzy classification system. *Energy*, 140, 276–290. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.102>
- Donati, G., Petrone, A., & Rega, N. (2020). Multiresolution continuous wavelet transform for studying coupled solute-solvent vibrations: Via ab initio molecular dynamics. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 22(39), 22645–22661. <https://doi.org/10.1039/d0cp02495c>
- Dong, X., Li, G., Jia, Y., Li, B., & He, K. (2021). Non-iterative denoising algorithm for mechanical vibration signal using spectral graph wavelet transform and detrended fluctuation analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 149, 107202. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107202>
- Donoho, D.L., & Johnstone, I. M. (2002). Threshold selection for wavelet shrinkage of noisy data. *Proceedings of 16th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 1, A24–A25. <https://doi.org/10.1109/iembs.1994.412133>
- Donoho, David L., & Johnstone, I. M. (1995). Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage. *Journal of the American Statistical Association*, 90(432), 1200–1224. <https://doi.org/10.1080/01621459.1995.10476626>
- Drissi, H., Khediri, J., Zaafrane, W., & Braiek, E. Ben. (2017). Critical factors affecting the photovoltaic characteristic and comparative study between

two maximum power point tracking algorithms. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(13), 8689–8702.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.193>

Emeksiz, C. (2020). The estimation of diffuse solar radiation on tilted surface using created new approaches with rational function modeling. *Indian Journal of Physics*, 94(9), 1311–1322. <https://doi.org/10.1007/s12648-019-01573-w>

Fadhel, S., Diallo, D., Delpha, C., Migan, A., Bahri, I., Trabelsi, M., & Mimouni, M. F. (2020). Maximum power point analysis for partial shading detection and identification in photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*, 224, 113374.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113374>

Fezai, R., Mansouri, M., Trabelsi, M., Hajji, M., Nounou, H., & Nounou, M. (2019). Online reduced kernel GLRT technique for improved fault detection in photovoltaic systems. *Energy*, 179, 1133–1154.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.029>

Fink, D. (1975). Coherent Detection Signal-to-Noise. *Applied Optics*, 14(3), 689.

<https://doi.org/10.1364/ao.14.000689>

Foster, S., Muhammad-Sukki, F., Ramirez-Iniguez, R., Raine, D. F., Deciga-Gusi, J., Abu-Bakar, S. H., Bani, N. A., Munir, A. B., Mas'ud, A. A., & Ardila-Rey, J. A. (2020). Assessment of the RACPC performance under diffuse radiation for use in BIPV system. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(10), 3552. <https://doi.org/10.3390/app10103552>

Gao, R. X., & Yan, R. (2011). Wavelets: Theory and applications for manufacturing. In *Wavelets: Theory and Applications for Manufacturing*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1545-0>

Garoudja, E., Harrou, F., Sun, Y., Kara, K., Chouder, A., & Silvestre, S. (2017). Statistical fault detection in photovoltaic systems. *Solar Energy*, 150, 485–499. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.043>

Goswami, J. C., & Chan, A. K. (2011). *Fundamentals of wavelets: theory,*

*algorithms, and applications* (Vol. 233). John Wiley & Sons.

Goual, H., M. Yousof, H., & Masoom Ali, M. (2020). Lomax inverse Weibull model: properties, applications, and a modified Chi-squared goodness-of-fit test for validation. *Journal of Nonlinear Sciences and Applications*, 13(06), 330–353. <https://doi.org/10.22436/jnsa.013.06.04>

Gray, R. M., & Davisson, L. D. (2004). *An introduction to statistical signal processing*. Cambridge University Press.

Griffel, D. H., & Daubechies, I. (1995). Ten Lectures on Wavelets. In *The Mathematical Gazette* (Vol. 79, Issue 484). Siam. <https://doi.org/10.2307/3620105>

Hajji, M., Harkat, M. F., Kouadri, A., Abodayeh, K., Mansouri, M., Nounou, H., & Nounou, M. (2020). Multivariate feature extraction based supervised machine learning for fault detection and diagnosis in photovoltaic systems. *European Journal of Control*. <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2020.03.004>

Harrou, F., Taghezouit, B., & Sun, Y. (2019). Robust and flexible strategy for fault detection in grid-connected photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*, 180, 1153–1166. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.022>

Hu, L., Ye, J., Chang, S., Li, H., & Chen, H. (2017). A novel fault diagnostic technique for photovoltaic systems based on cascaded forest. *SmartIoT 2017 - Proceedings of the Workshop on Smart Internet of Things*, 1–5. <https://doi.org/10.1145/3132479.3132482>

Jäger, K.-D., Isabella, O., Smets, A. H. M., van Swaaij, R. A., & Zeman, M. (2016). *Solar energy: fundamentals, technology and systems*. UIT Cambridge.

Jammalamadaka, S. R., & Bury, K. (2000). Statistical Distributions in Engineering. In *The American Statistician* (Vol. 54, Issue 3). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.2307/2685598>

Kenneth, F. (1990). *Fractal Geometry: Mathematical Foundation & Applications*. John Wiley and sons.

- Krivoshein, A., Protasov, V., & Skopina, M. A. (2016). *Multivariate wavelet frames*. Springer.
- Kumar, B. P., Ilango, G. S., Reddy, M. J. B., & Chilakapati, N. (2018). Online fault detection and diagnosis in photovoltaic systems using wavelet packets. *IEEE Journal of Photovoltaics*, *8*(1), 257–265.  
<https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2770159>
- Kumari, P. A., & Geethanjali, P. (2018). Parameter estimation for photovoltaic system under normal and partial shading conditions: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *84*, 1–11.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.051>
- Livera, A., Theristis, M., Makrides, G., & Georghiou, G. E. (2019). Recent advances in failure diagnosis techniques based on performance data analysis for grid-connected photovoltaic systems. *Renewable Energy*, *133*, 126–143. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.101>
- Lu, S., Sirojan, T., Phung, B. T., Zhang, D., & Ambikairajah, E. (2019). DA-DCGAN: An Effective Methodology for DC Series Arc Fault Diagnosis in Photovoltaic Systems. *IEEE Access*, *7*, 45831–45840.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909267>
- Ma, J., Pan, X., Man, K. L., Li, X., Wen, H., & On Ting, T. (2018). Detection and Assessment of Partial Shading Scenarios on Photovoltaic Strings. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *54*(6), 6279–6289.  
<https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2848643>
- Mallat, S. (2009). A Wavelet Tour of Signal Processing. In *A Wavelet Tour of Signal Processing* (Third). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374370-1.X0001-8>
- Mansouri, M., Al-khazraji, A., Hajji, M., Harkat, M. F., Nounou, H., & Nounou, M. (2018). Wavelet optimized EWMA for fault detection and application to photovoltaic systems. *Solar Energy*, *167*, 125–136.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.073>
- Mekki, H., Mellit, A., & Salhi, H. (2016). Artificial neural network-based modelling and fault detection of partial shaded photovoltaic modules.

*Simulation Modelling Practice and Theory*, 67, 1–13.

<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.05.005>

Mellit, A., Tina, G. M., & Kalogirou, S. A. (2018). Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.062>

Morassaei, M. S., Salehabadi, A., Akbari, A., & Salavati-Niasari, M. (2019). A potential photovoltaic material for dye sensitized solar cells based BaCe<sub>2</sub>(MoO<sub>4</sub>)<sub>4</sub> doped Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> nanostructures. *Journal of Cleaner Production*, 209, 762–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.296>

Mrabti, T., Ouariachi, M. El, Kassmi, K., & Tidahf, B. (2010). Characterization and modelling of the optimal performances of the marketed photovoltaic panels . *Moroccan Journal of Condensed Matter*, 12(1).

Nayak, P. K., Mahesh, S., Snaith, H. J., & Cahen, D. (2019). Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art. *Nature Reviews Materials*, 4(4), 269–285. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0097-0>

Nussbaumer, H., Janssen, G., Berrian, D., Wittmer, B., Klenk, M., Baumann, T., Baumgartner, F., Morf, M., Burgers, A., Libal, J., & Mermoud, A. (2020). Accuracy of simulated data for bifacial systems with varying tilt angles and share of diffuse radiation. *Solar Energy*, 197, 6–21. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.071>

Panigrahy, C., Seal, A., & Mahato, N. K. (2020). Image texture surface analysis using an improved differential box counting based fractal dimension. *Powder Technology*, 364, 276–299. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.053>

Park, C. S., Choi, J. H., Nah, S. P., Jang, W., & Kim, D. Y. (2008). Automatic modulation recognition of digital signals using wavelet features and SVM. *International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT*, 1, 387–390. <https://doi.org/10.1109/ICACTION.2008.4493784>

Parthiban, S., & Gajivaradhan, P. (2020). A comparative study of chi-square goodness-of-fit under fuzzy environments. *International Knowledge Sharing Platform*, 6(2).

<http://www.iiste.org/Journals/index.php/MTM/article/view/28576/29338>

- Perraki, V., & Kounavis, P. (2016). Effect of temperature and radiation on the parameters of photovoltaic modules. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8(1), 13102. <https://doi.org/10.1063/1.4939561>
- Platon, R., Pelland, S., & Poissant, Y. (2012). Modelling the Power Production of a Photovoltaic System: Comparison of Sugeno-Type Fuzzy Logic and PVSAT-2 Models. *Europe Solar Conference (ISES)*.
- Rolke, W., & Gongora, C. G. (2020). A chi-square goodness-of-fit test for continuous distributions against a known alternative. *Computational Statistics*. <https://doi.org/10.1007/s00180-020-00997-x>
- Rouani, L., Harkat, M. F., Kouadri, A., & Mekhilef, S. (2021). Shading fault detection in a grid-connected PV system using vertices principal component analysis. *Renewable Energy*, 164, 1527–1539. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.059>
- Sah, C. T., Noyce, R. N., & Shockley, W. (1957). Carrier Generation and Recombination in P-N Junctions and P-N Junction Characteristics. *Proceedings of the IRE*, 45(9), 1228–1243. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1957.278528>
- Sánchez Reinoso, C. R., Milone, D. H., & Buitrago, R. H. (2013). Simulation of photovoltaic centrals with dynamic shading. *Applied Energy*, 103, 278–289. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.040>
- Schwarzenberger, R., & Falconer, K. (1990). Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications. In *The Mathematical Gazette* (Vol. 74, Issue 469). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.2307/3619861>
- Sengupta, S. K., & Kay, S. M. (1995). Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory. In *Technometrics* (Vol. 37, Issue 4). Prentice Hall PTR. <https://doi.org/10.2307/1269750>
- Shahbaz, M., Raghutla, C., Chittedi, K. R., Jiao, Z., & Vo, X. V. (2020). The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from the renewable energy country attractive index. *Energy*, 207, 118162.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118162>

Shockley, W. (1949). The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors. *Bell System Technical Journal*, 28(3), 435–489.

<https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x>

Sklar, B. (2001). *Digital communications: fundamentals and applications*.

SolMetric. (2020). Datasheet. In *Solmetric*.

Sowthily, C., Senthil Kumar, S., & Brindha, M. (2021). Detection and Classification of Faults in Photovoltaic System Using Random Forest Algorithm. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 1176, pp. 765–773). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5788-0\\_72](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5788-0_72)

Takashima, T., Yamaguchi, J., Otani, K., Oozeki, T., Kato, K., & Ishida, M. (2009). Experimental studies of fault location in PV module strings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(6–7), 1079–1082.

<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.11.060>

Taylor, M. G. (2004). Coherent Detection Method Using DSP for Demodulation of Signal and Subsequent Equalization of Propagation Impairments. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(2), 674–676.

<https://doi.org/10.1109/LPT.2003.823106>

Teo, J. C., Tan, R. H. G., Mok, V. H., Ramachandaramurthy, V. K., & Tan, C. (2018). Impact of partial shading on the P-V characteristics and the maximum power of a photovoltaic string. *Energies*, 11(7), 1860.

<https://doi.org/10.3390/en11071860>

Trutié-Carrero, E., Cabrera-Hernández, Y., Hernández-González, A., & Ramírez-Beltrán, J. (2020). Automatic detection of burst in water distribution systems by Lipschitz exponent and Wavelet correlation criterion. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107195>

Trutié-Carrero, Eduardo, & Seuret-Jiménez, D. (2020). Detección no coherente de polvo en módulo fotovoltaico mediante exponente de Lipschitz y transformada Wavelet discreta. *Congreso Internacional de Desarrollo*

- Verma, A. K., & Verma, N. (2012). Performance analysis of wavelet thresholding methods in denoising of audio signals of some indian musical instruments. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 4(5), 0975–5462.
- Wang, G. Y., Zhao, X. Q., & Wang, X. (2009). Speech enhancement based on the combination of spectral subtraction and wavelet thresholding. *2009 International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis, ICACIA 2009*, 136–139.  
<https://doi.org/10.1109/ICACIA.2009.5361134>
- Welland, G. (2003). *Beyond wavelets* (Vol. 10). Academic Press.
- Woyte, A., Richter, M., Moser, D., Mau, S., Reich, N., & Jahn, U. (2013). Monitoring of Photovoltaic Systems: Good Practices and Systematic Analysis. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Woyte, Achim, Nijs, J., & Belmans, R. (2003). Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: Literature review and field test results. *Solar Energy*, 74(3), 217–233. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00155-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00155-5)
- Xiao, C., Yu, X., Yang, D., & Que, D. (2014). Impact of solar irradiance intensity and temperature on the performance of compensated crystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 128, 427–434.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.06.018>
- Yi, Z., & Etemadi, A. H. (2017). Fault detection for photovoltaic systems based on multi-resolution signal decomposition and fuzzy inference systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(3), 1274–1283.  
<https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2587244>
- Yuan, J., Zhang, Y., Zhou, L., Zhang, G., Yip, H. L., Lau, T. K., Lu, X., Zhu, C., Peng, H., Johnson, P. A., Leclerc, M., Cao, Y., Ulanski, J., Li, Y., & Zou, Y. (2019). Single-Junction Organic Solar Cell with over 15% Efficiency Using Fused-Ring Acceptor with Electron-Deficient Core. *Joule*, 3(4), 1140–1151.

<https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.01.004>

Zhang, X., Ang, Y. S., Du, J.-Y., Chen, J., & Ang, L. K. (2020). Graphene-based thermionic-thermoradiative solar cells: Concept, efficiency limit, and optimum design. *Journal of Cleaner Production*, *242*, 118444.

Zhang, Z., Lu, Y., Lv, C., Mao, Q., Wang, S., & Yan, S. (2021). Restoration of integrated circuit terahertz image based on wavelet denoising technique and the point spread function model. *Optics and Lasers in Engineering*, *138*, 106413. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106413>

Zhao, Y., Li, D., Lu, T., Lv, Q., Gu, N., & Shang, L. (2020). Collaborative Fault Detection for Large-Scale Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *11*(4), 2745–2754.

<https://doi.org/10.1109/TSTE.2020.2974404>

# ANEXO 1: Simulación de celda solar en Matlab

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
SIMULACIÓN DE UNA CELDA SOLAR  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
clc  
clear all  
close all  
  
C=27;  
  
k=1.38e-23;  
  
T=273+C;  
  
q=1.6e-19;  
  
I0=0.18e-10;  
  
Ipv=0.5;  
  
Vt=k*T/q;  
Rs=0.1;  
Rsh=100;  
Vd=0:1e-3:0.62;  
s=size(Vd);  
I=Ipv;  
for n=1:s(2)  
    for i=1:10  
        Id1 = Ipv-I0*exp((Vd(n)+I(i)*Rs)/Vt) -  
((Vd(n)+I(i)*Rs)/Rsh) - I(i);  
        dId1 = 0 -  
(Rs/Vt)*I0*exp((Vd(n)+I(i)*Rs)/Vt) - (Rs/Rsh) - 1;  
        I(i+1)=I(i)-Id1/dId1;  
    end  
    Id(n)=I(end);  
end  
  
[valt,post]=min(sqrt(Id.*Id));  
Id=Id(1:post);  
Vd=Vd(1:post);
```

```
P=Vd.*Id;
plot(Vd,Id)
```

## ANEXO 2: Algoritmo de caja de conteo

```
function [n,r] = boxcount(c,varargin)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CAJA DE CONTEO PARA SEÑALES QUE
PRESENTEN DIMENSION 2^N %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

error(nargchk(1,2,nargin));
% check for true color image (m-by-n-by-3
array)
if ndims(c)==3
    if size(c,3)==3 && size(c,1)>=8 &&
size(c,2)>=8
        c = sum(c,3);
    end
end
warning off
% c = logical(squeeze(c));
warning on
dim = ndims(c); % dim is 2 for a vector or a
matrix, 3 for a cube
if dim>3
    error('Maximum dimension is 3.');
```

```

width = max(size(c));    % largest size of the
box
p = log(width)/log(2);  % nbre of generations
% remap the array if the sizes are not all
equal,
% or if they are not power of two
% (this slows down the computation!)
if p~=round(p) || any(size(c)~=width)
    p = ceil(p);
    width = 2^p;
    switch dim
        case 1
            mz = zeros(1,width);
            mz(1:length(c)) = c;
            c = mz;
        case 2
            mz = zeros(width, width);
            mz(1:size(c,1), 1:size(c,2)) = c;
            c = mz;
        case 3
            mz = zeros(width, width, width);
            mz(1:size(c,1), 1:size(c,2),
1:size(c,3)) = c;
            c = mz;
    end
end
n=zeros(1,p+1); % pre-allocate the number of
box of size r

switch dim
    case 1          %----- 1D
boxcount -----%
        n(p+1) = sum(c);
        for g=(p-1):-1:0
            siz = 2^(p-g);
            siz2 = round(siz/2);
            for i=1:siz:(width-siz+1)
            c(i) = ( c(i) || c(i+siz2));
            end
            n(g+1) = sum(c(1:siz:(width-
siz+1)));

```

```

        end
    case 2          %----- 2D
boxcount -----%
        n(p+1) = sum(c(:));
        for g=(p-1):-1:0
            siz = 2^(p-g);
            siz2 = round(siz/2);
            for i=1:siz:(width-siz+1)
                for j=1:siz:(width-siz+1)
                    c(i,j) = ( c(i,j) ||
c(i+siz2,j) || c(i,j+siz2) || c(i+siz2,j+siz2)
);
                end
            end
            n(g+1) = sum(sum(c(1:siz:(width-
siz+1),1:siz:(width-siz+1))));
        end
    case 3          %----- 3D
boxcount -----%
        n(p+1) = sum(c(:));
        for g=(p-1):-1:0
            siz = 2^(p-g);
            siz2 = round(siz/2);
            for i=1:siz:(width-siz+1),
                for j=1:siz:(width-siz+1),
                    for k=1:siz:(width-siz+1),
                        c(i,j,k)=( c(i,j,k) ||
c(i+siz2,j,k) || c(i,j+siz2,k) ...
                        ||
c(i+siz2,j+siz2,k) || c(i,j,k+siz2) ||
c(i+siz2,j,k+siz2) ...
                        ||
c(i,j+siz2,k+siz2) || c(i+siz2,j+siz2,k+siz2));
                    end
                end
            end
            n(g+1) =
sum(sum(sum(c(1:siz:(width-siz+1),1:siz:(width-
siz+1),1:siz:(width-siz+1))));
        end
end
end

```

```

n = n(end:-1:1);
r = 2.^(0:p); % box size (1, 2, 4, 8...)
if any(strncmpi(varargin, 'slope', 1))
    s = -gradient(log(n)) ./ gradient(log(r));
    semilogx(r, s, 's-');
    ylim([0 dim]);
    xlabel('r, box size'); ylabel('- d ln n / d
ln r, local dimension');
    title([num2str(dim) 'D box-count']);
elseif nargin==0 ||
any(strncmpi(varargin, 'plot', 1))
    loglog(r, n, 's-');
    xlabel('r, box size'); ylabel('n(r), number
of boxes');
    title([num2str(dim) 'D box-count']);
end
if nargin==0
    clear r n
end

```