

## Portada Externa de Tesis

2022 Metodología para la identificación y caracterización de fallas en paneles fotovoltaicos basada en técnicas heurístico-estadísticas. Ing. Eduardo Pérez Anaya



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de ingeniería.

Metodología para la identificación y caracterización de fallas en paneles fotovoltaicos basada en técnicas heurístico-estadísticas.

Que como parte de los requisitos para obtener el diploma/grado de Maestro en Ciencias en mecatrónica.

Presenta

Ing. Eduardo Pérez Anaya

---

Dirigido por:

Dr. David Alejandro Elvira Ortiz

---

Co-Director:

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar

---

Querétaro, Qro. a 30 de agosto.



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de ingeniería  
Maestría en Ciencias en Mecatrónica.

Metodología para la identificación y caracterización de fallas en paneles  
fotovoltaicos basada en técnicas heurístico-estadísticas.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias en Mecatrónica.

**Presenta**

Ing. Eduardo Pérez Anaya

---

**Dirigido por:**

Dr. David Alejandro Elvira Ortiz

---

Co-Director:

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar

---

SINODALES

Dr. David Alejandro Elvira Ortiz

Presidente

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar

Secretario

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

Vocal

Dr. Juan José Saucedo Dorantes

Suplente

Dr. Luis Morales Velázquez

Suplente

Centro Universitario Querétaro, Qro.  
Fecha de aprobación por el consejo Universitario junio 2022  
México

## RESUMEN

La producción de energía eléctrica mediante tecnologías basadas en fuentes renovables, tal como la generación fotovoltaica, se han hecho más comunes tanto para el uso industrial como el doméstico. Pero estos sistemas están sometidos a inclemencias climáticas como partículas de polvo, arena o lluvia que obstruyen o limitan la capacidad de absorción del espectro electromagnético proveniente de la radiación solar. Debido a la fuerte relación que presenta el comportamiento eléctrico de un panel fotovoltaico con factores ambientales como la temperatura y la irradiancia, el presente trabajo propone una metodología para determinar diversos niveles de acumulación de polvo, así como ruptura del panel, mediante el análisis de señales de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia. Dicha metodología hace uso de indicadores estadísticos, aplica el análisis de la discriminante lineal (LDA) y usa un clasificador neuronal para separar las diferentes condiciones del sistema fotovoltaico. Puesto que el número y tipo de indicadores utilizados pueden influir en el resultado, se implementa un algoritmo heurístico que hace la selección óptima de los indicadores estadísticos buscando maximizar la separación entre grupos obtenidos por el LDA. La metodología propuesta se prueba en una instalación aislada localizada en el Campus Tequisquiapan de la Universidad Autónoma de Querétaro, demostrando un alto porcentaje de efectividad en la clasificación de los fallos seleccionados, aun ante la presencia de disturbios.

## SUMMARY

The production of electrical energy through technologies based on renewable sources such as photovoltaic generation have become more common for both industrial and domestic use. But these systems are subject to inclement weather such as particles of dust, sand or rain that obstruct or limit the absorption capacity of the electromagnetic spectrum from solar radiation. Due to the strong relationship that the electrical behavior of a photovoltaic panel presents with environmental factors such as temperature and irradiance, this paper proposes a methodology to determine various levels of dust accumulation, as well as panel rupture, by analyzing signals of voltage, current, temperature and irradiance. This methodology makes use of statistical indicators, linear discriminant analysis (LDA) and a neural classifier to separate the different conditions of the photovoltaic system. Since the number and type of indicators used can influence the result, a heuristic algorithm is implemented for making the optimal selection of the statistical indicators to maximize the separation between the groups obtained by the LDA. The proposed methodology is tested in an isolated facility located in the Tequisquiapan Campus of the Universidad Autónoma de Querétaro, demonstrating a high percentage of effectiveness in the classification of the selected failures, even in the presence of disturbances

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi familia, que sin sus consejos y apoyo no sería posible llevar a cabo este trabajo de investigación, agradezco al grupo de trabajo, con el cual fue posible el desarrollo de esta investigación, en especial a mi director de tesis el Dr. David Alejandro Elvira Ortiz y Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar. Gracias a su guía y apoyo fue posible desarrollar mi proyecto de posgrado de manera satisfactoria.

Agradezco a mis profesores y sinodales que gracias al conocimiento que me impartieron fue posible el desarrollo del presente trabajo. Así como su dedicación en las mejoras y formas de aclarar los conceptos con las cuales fue posible la redacción del presente informe.

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
Contenido	
Portada Externa de Tesis .....	i
RESUMEN.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
INTRODUCCIÓN .....	1
I. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
1.1. Beneficios y eficiencia de sistemas fotovoltaicos .....	3
1.2. Efectos de la acumulación de polvo en paneles fotovoltaicos.....	4
1.3 Cristal roto en cubierta del panel fotovoltaico.....	11
1.4 Recomendaciones y métodos predictivos para aumentar el rendimiento de los módulos fotovoltaicos.....	12
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	14
2.1 Panel fotovoltaico .....	14
2.2. Espectro electromagnético .....	19
2.3 Fallas en paneles fotovoltaicos .....	20
2.3.1 Falla por acumulación de polvo.....	20
2.4 Falla por alta temperatura .....	22
2.5 Tipos de instalaciones (tipo Isla o conectada a la RED) .....	23
2.6 Posición del sol y radiación solar .....	24
2.7. Algoritmos heurísticos - Métodos evolutivos algoritmo genético .	25
2.7.1 Elección por ranking.....	27
2.7.2 Operación genética de recombinación .....	27
2.7.4 Método de selección por mutación.....	28
2.8 Indicadores Estadísticos .....	29
2.9 Análisis discriminante lineal.....	31
2.10 Análisis de Clúster.....	34
2.12 Clasificador por red Neuronal.....	35
2.13. Tipos de mantenimiento Industrial/residencial y sus clasificaciones .....	37

III.	METODOLOGÍA.....	38
	3.1 Hipótesis.....	38
	3.2 Objetivo general y objetivos particulares .....	38
	3.3 Esquema general de la metodología propuesta .....	39
	3.4 Banco de pruebas experimental.....	39
	3.5 Medición y sistema de adquisición de datos .....	41
	3.6 Procesamiento en PC .....	41
	3.6.1 Procesamiento de datos- Cálculo de indicadores estadísticos .....	41
	3.6.2 Selección de indicadores estadísticos mediante algoritmos genéticos.....	43
	3.6.3 Clasificador Neuronal.....	47
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
	4.1 Puesta del banco de pruebas.....	48
	4.2 Adquisición y procesamiento de datos .....	51
	4.3 Resultados de la evaluación de la condición de falla ante metodología desarrollada.....	53
	4.4 Conclusiones.....	61
	Referencias Bibliográficas .....	62

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Página</b>
Tabla 1 Calendario recomendado para un sistema fotovoltaico, Saxena y Mishra (2013). .....	13
Tabla 2. Ecuaciones estadísticas propuestas para evaluar los sistemas estacionarios en el dominio del tiempo, usadas para caracterizar cada una de las señales seleccionadas, (autoría propia).....	31
Tabla 3 Especificaciones eléctricas de panel fotovoltaico Kyocera .....	40
Tabla 4 Características ambientales y físicas con las cuales se llevó a cabo la experimentación. ....	52
Tabla 5 Configuración de algoritmo genético, con el que se obtuvieron los resultados. ....	53
Tabla 6 Datos estadísticos generados mediante la aplicación desarrollada (Figura 25), con configuración en el algoritmo genético (Tabla 5), (autoría propia). ....	54
Tabla 7 Respuesta de clasificación ante una condición de falla con ruido. ...	59
Tabla 8 Respuesta de clasificación ante perturbación de la señal .....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1 Panel limpio y panel con acumulación de polvo, Memiche et al. (2020). .....	5
Figura 2 Comparación de I- V para ambas características, módulos limpio y con concentración de polvo, Al-hasan y Ghoneim (2005). .....	7
Figura 3 Temperatura de salida en diferentes concentraciones de densidades de polvo, a) $0.2gm^2$ , b) $2.2gm^2$ c) $4gm^2$ , d) $2gm^2$ y a) $8gm^2$ , Salari y Fard (2019). .....	9
Figura 4 Temperaturas pico en °C sobre la superficie del cristal y mostrando corte trasversal de la superficie del punto caliente sobre panel fotovoltaico, Solheim et al.(2013).....	11
Figura 5 Elementos que componen a un panel fotovoltaico, (INNTecsol, 2022). .....	15
Figura 6 Curva de corriente entregada por un panel fotovoltaico I-V. Fuente Sánchez y Sócala (2015).....	17
Figura 7 Longitud de onda de la radiación solar Flores y Domínguez (2017). .....	19
Figura 8 Pérdida en la eficiencia en un panel fotovoltaico por acumulación de polvo a lo largo de 180 días. Fuente Said (1990). .....	21
Figura 9 Reducción de radiación solar en panel fotovoltaico vs disposición de polvo. Fuente Maní y Pillai (2010). .....	21
Figura 10 Comportamiento de corriente y voltaje de un sistema sucio vs uno limpio. Fuente Jha y Tripathy (2019). .....	22
Figura 11 Tipos de conexión para un sistema fotovoltaico a) sistema interconectado a la Red, b) Sistema aislado. Cárdenas et al, (2019).....	23
Figura 12 Radiación solar en una superficie inclinada. Fuente Sánchez y Sócala (2015). .....	24
Figura 13 Estructura básica para un algoritmo evolutivo básico, Sancho (2019). .....	26
Figura 14 Metodología para la correcta aplicación de la técnica LDA, frente a la evaluación de dos clases, (autoría propia). .....	34
Figura 15 Interacción de la proyección entre clases generadas al aplicar la técnica LDA, (autoría propia).....	34
Figura 16 Representación gráfica de dos sistemas mediante clúster de variables Varianza- Media, (autoría propia).....	35

Figura 17 Estructura básica de red neuronal, (autoría propia). .....	36
Figura 18 Diagrama a bloques de metodología aplicada, (autoría propia). ..	39
Figura 19 Configuración del sistema, en a) arquitectura del sistema de monitoreo y en b) diagrama de conexión eléctrica aislada del sistema, (autoría propia). .....	40
Figura 20 Sensores utilizados en sistema de adquisición. ....	41
Figura 21 Toma de datos por técnica de creación de ventanas, para el preprocesamiento de los datos, (autoría propia). ....	42
Figura 22 Metodología aplicada para el cálculo de los 15 indicadores estadísticos, (autoría propia). ....	42
Figura 23 Procedimiento para realizar la normalización entre clases, (autoría propia). ....	44
Figura 24 Diagrama de flujo que fue aplicado en la optimización de selección de los indicadores estadísticos, mediante Algoritmo Genético, (autoría propia). ....	46
Figura 25 Diagrama de flujo para algoritmo genético, basado en la optimización de indicadores mediante la técnica LDA, complementado mediante clasificador NN, (autoría propia). ....	47
Figura 26 Ubicación Geográfica del banco de pruebas, características geográficas del área, (autoría propia). ....	48
Figura 27 Instalación de banco de pruebas en lugar designado por Asesor del proyecto, (autoría propia). ....	49
Figura 28 Diseño de base de sensor de irradiancia e instalación de registros y base de concreto para instalación de equipos, (autoría propia). ....	49
Figura 29 Instalación física del banco de pruebas para sistema fotovoltaicos, (autoría propia) .....	50
Figura 30 Prueba de los sistemas ante las diferentes condiciones a evaluar, (autoría propia). ....	50
Figura 31 Preparación y aplicación de capa de polvo, que será aplicada a los paneles fotovoltaicos, (autoría propia). ....	51
Figura 32 Señales adquiridas a) voltaje, b) corriente y c) sistema, comparando condiciones del sistema limpio color azul y sistema con leve acumulación de polvo color rojo, (autoría propia). ....	51
Figura 33 Señales adquiridas a) voltaje, b) corriente y c) sistema, comparando condiciones del sistema limpio color azul y sistema con moderada acumulación de polvo color rojo, (autoría propia). ....	52
Figura 34 Señales adquiridas a) voltaje, b) corriente y c) sistema, comparando condiciones del sistema limpio color azul y sistema con moderada acumulación de polvo color rojo, (autoría propia). ....	52

Figura 35 Aportación en porcentaje por cada uno de los indicadores evaluados., (autoría propia).....	55
Figura 36 Proyecciones generadas mediante técnica LDA, a) Proyección generada con matriz 832X60, b) Proyección generada con matriz 832X38 “optimizada mediante metodología”, (autoría propia). ....	56
Figura 37 Configuración de Red neuronal, (autoría propia).....	56
Figura 38 Matriz de confusión obtenida por la red neuronal, a) Tabla de confusión obtenida mediante matriz 832X60. b) Tabla de confusión obtenida mediante matriz 832X38, (autoría propia). ....	57
Figura 39 Respuesta de sistema “saludable/Limpio” ante afectación “Nube”, ante cada uno de los sensores instalados para el monitoreo del sistema, (autoría propia). ....	58
Figura 40 Respuesta de sistema “Moderada acumulación de polvo” ante afectación “Nube constante”, ante cada uno de los sensores instalados para el monitoreo del sistema, (autoría propia). ....	60
Figura 41 respuesta del software donde se desarrolló la metodología de identificación, (autoría propia). ....	61

## INTRODUCCIÓN

La generación de electricidad para el consumo ya sea de uso doméstico o industrial se ha vuelto una preocupación a nivel mundial. Esto debido a los altos costos ecológicos que han resultado de la utilización desmedida de energías no renovables, que se basan en la quema de carbón o algunos otros derivados del petróleo que contienen un alto índice energético, pero su utilización genera problemas ambientales debido a la emisión de gases producto de la combustión. Lo anterior desde la revolución industrial, lo cual representa alrededor de 200 años en la historia en los que se ha demostrado que el cambio climático que ha ocurrido a lo largo de las décadas es consecuencia de la actividad humana y la generación eléctrica ha contribuido a esto en gran medida (Fernández y Martínez, 2006).

Debido a las evidencias ante el cambio climático y al encarecimiento de los combustibles derivados del petróleo o carbón, se ha optado por la búsqueda de la obtención de energía a través de recursos naturales. De estas, se ha destacado la energía solar, por ser la más abundante y que puede ser aprovechada en casi cualquier parte del planeta (Jacobson y Delucchi, 2011). Debido a su fácil instalación y bajos costos de operación, los equipos fotovoltaicos se han vuelto muy populares tanto en el ámbito empresarial como en el doméstico, que con el incremento en el uso de equipos tanto eléctricos como electrónicos a aumentado su demanda a nivel mundial.

La implementación correcta de celdas fotovoltaicas ha demostrado tener grandes beneficios para los usuarios, proveyendo una larga vida de operación así como un rendimiento prometedor según el estudio realizado en Japón por Oozeki et al., (2010). De igual manera en el ámbito monetario se ha demostrado la factibilidad del uso de este tipo de tecnología, como lo menciona *Aguayo (2020)*, el cual mediante un modelo matemático propone resolver un problema de distribución eléctrica en la zona industrial de Querétaro, el cual prevé ganancias superiores a los 16.24 millones de USD (dólares estadounidenses), durante la vida útil estimada de este tipo de equipos.

No obstante, una de las afectaciones con mayor repercusión en estos sistemas son las condiciones climáticas y/o ambientales que, entre otras cosas, pueden obstruir parcial o totalmente la incidencia de radiación electromagnética en las celdas fotovoltaicas. Estas afectaciones podrán afectar de manera diversa a los quipos donde pueden ir desde la reducción en su rendimiento, a fallas que pueden dañar físicamente a el equipo, provocando que este sea inoperable (Oozeki et al. (2010). Este tipo de afectaciones han sido estudiados ampliamente teniendo trabajos como el de El-Shobokshy y Hussein (1993), en este estudio fue posible analizar la pérdida en la eficiencia que puede presentar un sistema al estar sin ningún tipo de mantenimiento en este caso limpieza por acumulación de polvo, demostrando una pérdida en la eficiencia que puede llegar al 20% dependiendo de la densidad de polvo sobre la superficie.

Por lo antes mencionado, se puede inferir que estos sistemas requieren de un constante monitoreo para asegurar un correcto funcionamiento. Pero debido a que se recomienda para su instalación áreas libres de cualquier objeto que pueda proyectar cualquier tipo de sombra sobre la superficie de los equipos, estos tienden a instalarse en azoteas o techumbres complicando la revisión visual por parte del usuario, así como un mantenimiento efectivo de estos. Esto provoca que el usuario desconozca la condición de suciedad sobre el panel y por lo tanto un olvido, y no se les realiza mantenimiento alguno. Este fenómeno de acumulación de polvo no solo puede afectar la eficiencia si no que, en algunas ocasiones, puede reducir la vida útil estimada de los equipos al afectar la temperatura normal de operación de la celda fotovoltaica, así como los parámetros de diseño en su producción eléctrica (Oozeki et al., 2010). Entonces, el objetivo del presente trabajo es desarrollar una metodología que sea adaptativa e indique de forma correcta al usuario cuando el equipo requiere realizar una intervención en el equipo, reduciendo de esta forma costos por mantenimientos no necesarios y manteniendo al sistema de paneles fotovoltaicos trabajando en óptimas condiciones.

## I. REVISIÓN DE LITERATURA

Actualmente, la generación de energía es una de las principales preocupaciones mundiales pues se depende en gran medida de recursos no renovables tales como carbón o derivados del petróleo, que al incrementar la demanda de consumo han incrementado su costo significativamente; más aún, las formas convencionales de generación eléctrica se basan en la combustión, por lo que se genera una gran cantidad de gases contaminantes y de efecto invernadero, originando problemas como la mala calidad del aire y el cambio climático. Es por estas razones que en los últimos años se ha optado por la utilización de los recursos naturales renovables para la generación de energía eléctrica, tales como: energía eólica, energía hidráulica y la energía solar. Según Jacobson y Delucchi (2011) estas energías tienen la ventaja de ser prácticamente inagotables dada la naturaleza de las mismas. En el caso de la energía obtenida por medio de paneles fotovoltaicos, esta ha mostrado ser una de las más prometedoras y populares ya que utiliza la radiación solar como materia prima que es accesible prácticamente en cualquier ubicación del planeta. A continuación, se mencionarán algunos beneficios y afectaciones que pueden presentarse en los sistemas fotovoltaicos.

### 1.1. Beneficios y eficiencia de sistemas fotovoltaicos

Dicha radiación puede ser aprovechada por medio de celdas fotovoltaicas que por el efecto fotoeléctrico son capaces de generar una diferencia de potencial eléctrico, mismo que se aprovecha para la generación de energía eléctrica. En el estudio realizado en Japón por Oozeki et al. (2010), se ha podido comprobar la eficacia de estos equipos. Este trabajo con una duración aproximada de 5 años tiene la finalidad de realizar una estimación de la fiabilidad de los sistemas fotovoltaicos instalados para una carga útil de  $10kW$  en un ambiente doméstico, y contó con la muestra de 93 sitios. En él, se logró estimar un factor del 80% de confiabilidad de los equipos, y la mayor parte de los problemas que se presentaron durante el estudio fueron por mal manejo por parte del usuario y no por fallas de fabricación, sin embargo dadas las condiciones de operación propias de un sistema fotovoltaico

pueden llegar a introducirse fallos o anomalías en su funcionamiento, por lo que, resulta importante detectar de manera oportuna comportamientos fuera de lo normal en el proceso de generación eléctrica de éstos sistemas. Así mismo, estudios realizados por investigadores de la Universidad Autónoma de Querétaro han desarrollado modelos económicos, con los cuales ha sido posible una mejor interpretación de la información y realizar proyecciones acertadas como por ejemplo lo visto en el trabajo desarrollado por Aguayo (2020), el cual propone resolver el problema de generación distribuida con el uso de paneles fotovoltaicos para la zona industrial de Santiago de Querétaro, resultando en un costo-beneficio mayor a 16.24 millones de USD en un periodo de 25 años, al utilizar 509 paneles fotovoltaicos monocristalinos. Lo anterior, tomando en cuenta parámetros de pérdidas y costos por mantenimientos rutinarios, demostrando el beneficio que este tipo de sistemas pueden proveer cuando son correctamente proyectados.

## 1.2. Efectos de la acumulación de polvo en paneles fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos, como lo han demostrado trabajos anteriormente citados, requieren mantenimiento para operar de manera óptima, lo cual magnifica el beneficio que estos sistemas ofrecen. Pero es importante definir qué tipo de fallas se pueden presentar en un panel fotovoltaico las cuales son diversas y de distinta naturaleza, están aquellas debidas a una mala instalación del panel, o las debidas a una selección incorrecta o incompatible de los periféricos del panel. Se tienen también aquellas debidas a un desperfecto en la fabricación, o debido al deterioro por tiempo. Así mismo, se pueden encontrar fallas debidas a factores externos al dispositivo, como condiciones climáticas desfavorables o fallas en el sistema de red al que están conectadas. Entre las afectaciones que se tomarán en cuenta para el presente trabajo de tesis estarán las causadas por acumulación de polvo, así como la ruptura de cristal dado que ha mostrado un comportamiento similar a la falla por acumulación de polvo (Figura 1) (Memiche et al., 2020). Para el propósito de esta investigación se describirán solo estas últimas.



Figura 1 Panel limpio y panel con acumulación de polvo, Memiche et al. (2020).

En la actualidad se han estudiado profundamente los efectos de la acumulación de polvo y suciedad en los paneles solares, a continuación, se presentarán y discutirán algunos trabajos que abordan este tema. Hottel y Woertz (1942) realizaron un experimento en tres diferentes equipos los cuales se instalaron a un ángulo de  $30^\circ$ . Obtuvieron una pérdida de 4.7% en el rendimiento de cada uno de los paneles con una acumulación de polvo moderado con concentraciones de  $6\text{ g/m}^2$  a  $8\text{ g/m}^2$ , siendo este el registro más antiguo de un estudio de este tipo. A través de los años se han realizado diferentes estudios sobre el tema y en un estudio contemporáneo como lo es el llevado por El-Shobokshy y Hussein (1993), se ha mostrado una pérdida en la eficiencia que puede llegar hasta un 20% por mes, esto dependiendo del ambiente al que está sometido el equipo, que en este estudio se realizó en un ambiente semiárido, donde dicho ecosistema se caracteriza por sus altas temperaturas y elevadas concentraciones de polvo en el ambiente. Por otra parte, Memiche et al. (2020) mostraron que la acumulación de partículas de polvo en la superficie de un panel fotovoltaico tiene una relación estrecha con su rendimiento, de igual manera esto depende del tipo de polvo que se esté acumulando sobre el panel. Esto debido a diferencias tanto en su composición física como química, que provocan variaciones en la eficiencia eléctrica del panel fotovoltaico obteniendo mayores pérdidas con partículas cercanas a  $100\mu\text{m}$  dada su capacidad para cubrir

de manera más uniforme la superficie del panel fotovoltaico.

Dichos estudios han permitido establecer el precedente de que estos sistemas se ven afectados por la acumulación de polvo o suciedad en un tiempo determinado, cuando a los paneles fotovoltaicos no se les realiza ningún tipo de limpieza o mantenimiento. Según los datos obtenidos por Memiche et al. (2020), se han registrado pérdidas en la eficiencia que van desde 16% - 4.7% con respecto a la potencia normal entregada en condiciones óptimas de limpieza en los equipos. Ahora, conociendo este precedente se ha aceptado la hipótesis de que la acumulación de polvo es una de las principales afectaciones hacia los sistemas fotovoltaicos. En estudios posteriores algunos investigadores se han enfocado en encontrar las diferencias entre los tipos de polvo y sus peculiaridades. Por ejemplo Kaldellis et al. (2011) realizaron experimentos con diferentes tipos de sustancias como cemento, tierra, arena, sal, yeso, y ceniza, para comprobar las diferencias entre estos materiales y cómo afectaban al sistema. La arena y la ceniza fueron los elementos que tuvieron mayor afectación en el rendimiento de los equipos donde se alcanzó una pérdida de hasta el 16%, por lo cual es importante contar con un sistema de monitoreo que sea capaz de detectar la condición correctamente dada la aleatoriedad con la que se puede ver afectado el sistema. Con todo lo anteriormente comentado, se establece que el tamaño de la partícula de polvo tendrá una repercusión en el porcentaje de pérdida de eficiencia y la rapidez con la que esta se pueda presentar. En este sentido, el trabajo realizado por Mekhilef et al. (2012), pudo establecer que un tamaño promedio de partícula de polvo de  $500 \mu m$  de diámetro. Ya puede inferir en pérdidas entre el 7% al 20% en la eficiencia de un panel fotovoltaico.

Según el estudio realizado por Al-hasan y Ghoneim (2005), se ha detectado que cuando existe una concentración cercana a  $1 g/m^2$ , el panel puede presentar una caída significativa en su eficiencia pero, a concentraciones mayores a  $1.5 g/m^2$ , (Figura 2), el comportamiento de la corriente de corto circuito empieza a mostrar una menor caída en su magnitud debido a que con mayores cantidades de polvo menor es la cantidad de partículas que se pueden acumular unas sobre otras permitiendo que estas sean retiradas de manera más fácil por otras condiciones ambientales tales

como el viento o la lluvia, lo cual dificulta que la densidad de la capa de polvo incremente de manera exponencial. Esto dependiendo de las características que pueda tener cada uno de los materiales que compongan la partícula de polvo. Algunas características como la inercia entre las partículas, puede generar mayor acumulación de ciertas sustancias como lo es el cemento o la cal, impidiendo que factores como la lluvia o el viento puedan desplazar más fácilmente este exceso de partículas.

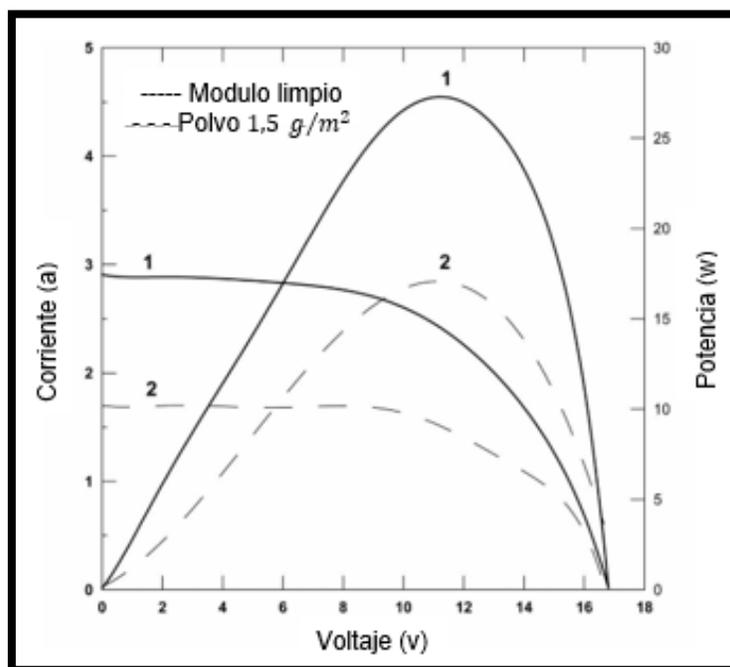


Figura 2 Comparación de I- V para ambas características, módulos limpio y con concentración de polvo, Al-hasan y Ghoneim (2005).

Un comportamiento peculiar en la acumulación de polvo se da cuando las partículas tienden a amontonarse unas sobre otras, y no directamente sobre la superficie del panel fotovoltaico, creando menor superficie de sujeción y provocando que sea más fácil que estas sean retiradas por fuerzas externas. Esto se corresponde con el estudio realizado por Kaldellis et al. (2011), que concluye que los materiales con menor tamaño de partícula tales como ceniza y cal demuestran mayor índice de afectación. Esta conclusión es respaldada por el estudio de Abderrezek y Fathi (2017), donde se compararon diferentes tipos de suciedad llegando al mismo

resultado. En un estudio realizado en la Universidad Autónoma de Querétaro por Vorobieb (2006), se demostró un incremento en la eficiencia de sistemas auto orientados de hasta un 35% contra los sistemas fijos, tomando en cuenta lo anteriormente mencionado donde al modificar la inclinación en periodos cortos de tiempo reduce el índice de acumulación de polvo mejorando el rendimiento del sistema. Así como este incrementa su eficiencia a través de una mejor captación de la radiación solar.

La pérdida en la eficiencia energética puede llegar hasta el 50% en algunos casos dependiendo de la cantidad de polvo que este pueda acumular sobre la superficie del panel fotovoltaico, esto de igual forma dependerá de la zona climática donde se instalaron los módulos. Es de gran importancia la limpieza constante de los módulos, los cuales pueden requerir ser limpiados constantemente dependiendo de las condiciones climáticas, esto según lo observado en los experimentos de Adinoyi y Said (2013). Los estudios anteriores, fueron desarrollados en una zona árida, donde se llegaban a experimentar eventos tales como tormentas de arena o similares, que llegaron a reportar una pérdida significativa de hasta un 50% en el rendimiento en la entrega de potencia de estos equipos.

Es de vital importancia el conocer las características del polvo que se pueden aplicar según sea la zona climática donde se planea una instalación de celdas fotovoltaicas. Por ejemplo, en el estudio realizado por Sulaiman et al. (2014), además de comparar el rendimiento de los equipos con diferentes tipos de polvo se realizó la estimación de otro tipo de afectación como lo es el moho, el cual resultó tener una afectación aproximada de hasta el 80% en el rendimiento del equipo siendo esta la mayor afectación encontrada hasta el momento para estos equipos.

Puesto que muchas instalaciones están en lugares poco accesibles dado el espacio que suelen requerir para su correcta instalación, estas pueden quedar en lugares donde su limpieza no se puede llevar a cabo fácilmente. Resultará de gran utilidad el contar con herramientas que permitan determinar el momento adecuado para dar limpieza oportuna a un sistema fotovoltaico, evitando de esta manera posibles accidentes y pérdidas tanto humanas como materiales.

La afectación que es generada por capas de polvo sobre la superficie de un

panel fotovoltaico no solo afecta la cantidad de irradiancia que puede absorber el panel, si no que de igual manera afecta a la temperatura interna del panel. Es decir, se trata de uno de los factores más importantes en los sistemas fotovoltaicos con lo que respecta a su eficiencia, debido a que los sistemas fotovoltaicos al estar conformados por semiconductores como componente principal se ven influenciados por la temperatura. Por lo tanto, la temperatura está estrechamente relacionada con la acumulación de polvo como lo demuestra el estudio realizado por Salari y Fard (2019), (Figura 3), donde se pudo comprobar que la eficiencia de los paneles fotovoltaicos se ven altamente afectados, y una acumulación de polvo cercana a  $3 \text{ g/m}^2$  puede tener una afectación térmica del panel fotovoltaico que genere una disminución en la eficiencia de alrededor del 16.36%. Lo anterior quiere decir que se reduce la capacidad del panel para disipar la temperatura hacia el medio ambiente generando mayores temperaturas en la superficie del panel, este fenómeno ha sido ampliamente estudiado sobre todo en áreas donde la concentración de polvo es alta.

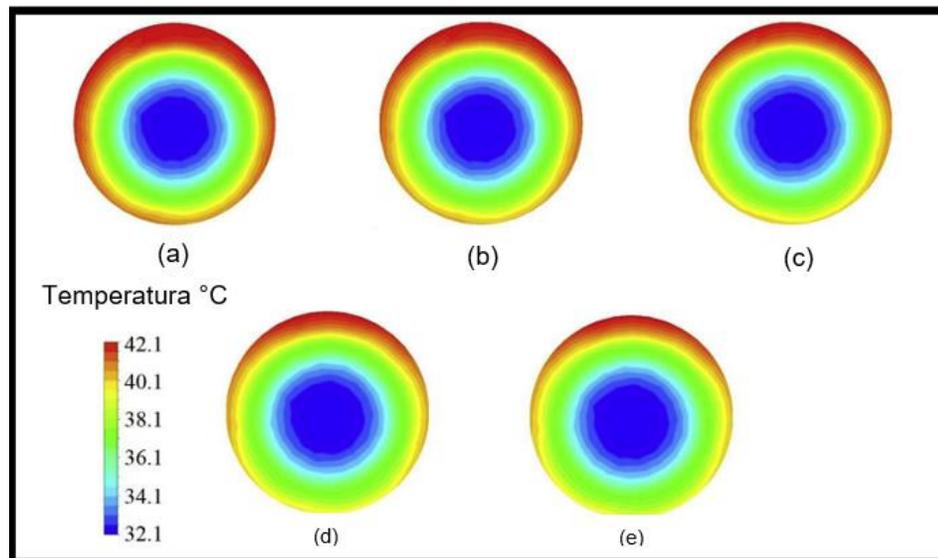


Figura 3 Temperatura de salida en diferentes concentraciones de densidades de polvo, a)  $0.2 \text{ g/m}^2$ , b)  $2.2 \text{ g/m}^2$  c)  $4 \text{ g/m}^2$ , d)  $2 \text{ g/m}^2$  y a)  $8 \text{ g/m}^2$ , Salari y Fard (2019).

En un estudio realizado en Argelia por Memiche et al. (2020), ellos estiman que la eficiencia en la conversión térmica de los sistemas puede verse afectada del 6% al 14% de un panel con polvo a uno limpio. Esta situación aumenta la temperatura en la superficie del panel fotovoltaico lo que tiene un doble efecto: un incremento de

la corriente eléctrica, pero reduciendo el voltaje del sistema considerablemente, lo cual resulta en una caída en la potencia. El efecto combinado de estos dos factores, tanto la acumulación de polvo y la alta temperatura en la superficie del panel fotovoltaico, ocasiona una pérdida aun mayor en ambas variables al estar relacionadas de forma exponencial entre sí, lo que tendrá mayores repercusiones en su desempeño causando posibles fallas en el sistema. El aumento de temperatura en la celda fotovoltaica si este supera en algunos casos  $64^{\circ}\text{C}$ , puede llegar a ocasionar una pérdida de hasta el 69% de su capacidad de producción eléctrica y por lo tanto de su rendimiento.

La acumulación de polvo se puede dar en diferentes zonas del panel y en diferentes cantidades, lo cual genera efectos diferentes en el comportamiento en las celdas fotovoltaicas. Esto ha sido estudiado por Solheim et al. (2013),(Figura 4), quienes han reportado que los puntos pequeños de acumulación de polvo o sombra en los paneles fotovoltaicos desarrollan mayores temperaturas que los puntos grandes, asumiendo que la corriente es la misma debido a la densidad y el flujo de la corriente en un panel fotovoltaico. También, se pudo notar que los puntos calientes generados cerca de las orillas generan temperaturas mayores que los puntos calientes localizados en la parte central de la celda, lo cual hace referencia al estudio de Abderrezek y Fathi (2017), donde se obtuvieron datos que indicaban una mayor pérdida de la eficiencia del sistema cuando el polvo se concentraba en la parte inferior de los paneles. Haciendo una correlación, se puede inferir que la concentración de polvo en las periferias de un panel fotovoltaico genera mayor temperatura dentro del sistema, perdiendo mayor capacidad de producción eléctrica por este fenómeno. Además, de acuerdo con los resultados obtenidos por Xu et al. (2020), se muestra que son mucho mayores las temperaturas que se encuentran en una superficie sucia que en una superficie limpia, sobre todo en la parte superior del cristal lo cual incrementa la temperatura total del sistema. A diferencia de la temperatura ambiente que normalmente es la que predomina en sistemas limpios, en sistemas sucios siempre se estima una temperatura mayor, lo cual demuestra la importancia de optimizar la limpieza de este tipo de sistemas. Lo que es posible sí se cuenta con las

herramientas necesarias para una correcta detección de fallas y, por lo tanto, un mantenimiento oportuno a los paneles fotovoltaicos.

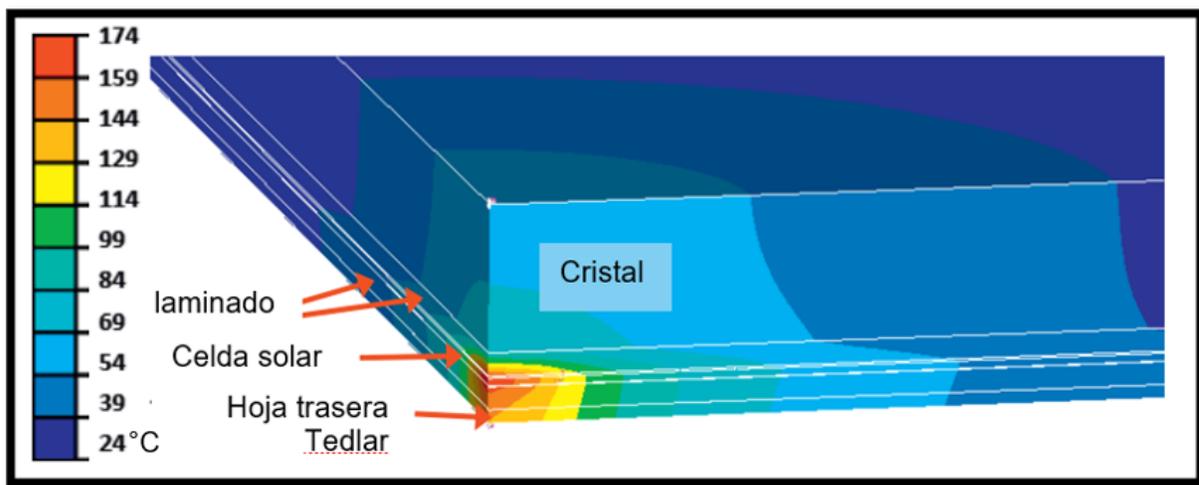


Figura 4 Temperaturas pico en °C sobre la superficie del cristal y mostrando corte trasversal de la superficie del punto caliente sobre panel fotovoltaico, Solheim et al.(2013)

### 1.3 Cristal roto en cubierta del panel fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos cuentan con una cubierta de cristal templado, la cual tiene la función de proteger a las celdas fotovoltaicas de las condiciones ambientales a las que puedan estar sometidas. Estos cristales, al contar con un proceso de templado, tienen una alta dureza y resistencia tanto a cambios de temperatura como a impactos físicos. Este material, por las características anteriormente mencionadas, es ampliamente utilizado para la protección de los sistemas de celdas fotovoltaicas. Sin embargo, estos cristales no están exentos de sufrir una ruptura que se presenta, principalmente, de dos formas: en diagonal o en forma de pequeñas rupturas circulares alrededor de un impacto asemejando una telaraña. En el estudio llevado a cabo por Gupta et al. (2019) se demostró que los paneles fotovoltaicos se pueden ver afectados hasta en un 60% en la cantidad total en la energía generada, dependiendo de la localización y el porcentaje de ruptura que cubra al panel fotovoltaico, esto tomando en cuenta que según lo encontrado en el estudio, el comportamiento que presenta esta afectación se asemeja a la acumulación de polvo permanente en el área afectada. Por lo cual, dependiendo de la gravedad de la ruptura deberá ser necesario el reemplazo del módulo dañado si

en el sistema se detecta un bajo rendimiento en general. De lo contrario, se puede llegar a afectar algún otro componente del sistema y de ahí la importancia de contar con las herramientas necesarias para un constante monitoreo de la operación del equipo que cuente con la capacidad para mostrar diferentes grados de falla, y el usuario pueda actuar según sea necesario para corregir la condición detectada.

#### 1.4 Recomendaciones y métodos predictivos para aumentar el rendimiento de los módulos fotovoltaicos

Los trabajos anteriormente mencionados resultan de mucha utilidad puesto que es posible realizar estimaciones aproximadas de si en ciertas áreas es viable o no, la instalación de sistemas fotovoltaicos, dado que en algunas zonas estos requerirán de un mantenimiento más frecuente, encareciendo el sistema y reduciendo los beneficios económicos que este pueda ofrecer haciendo que la instalación de este equipo sea poco redituable. Otros acercamientos para mejorar el rendimiento es el monitoreo constante de sus variables tales como la corriente y el voltaje con los cuales se puede realizar una estimación de la potencia que produce el equipo en tiempo real. Como en el trabajo desarrollado por Dhimish et al. (2016), donde por medio de un sistema basado en Matlab, se realiza un monitoreo constante tanto del voltaje como de la corriente generada por el sistema, y mediante un protocolo desarrollado en Arduino se pueden mostrar los resultados en una página web desarrollada para este mismo fin. Esto permite un constante monitoreo de las señales obtenidas por el sistema el cual muestra el estado real del panel fotovoltaico, y en caso de percibir una caída abrupta en su producción poder realizar alguna acción para revertir la alteración causante de la anomalía en la operación. Por otro lado, en el estudio de Santhakumari y Sagar (2019) se pueden apreciar varias metodologías con las cuales se pueden reducir las afectaciones causadas por la acumulación de polvo y altas temperaturas, las cuales pueden ir desde sistemas de refrigeración, hasta planes de mantenimiento establecidos según estimaciones hechas por el personal de mantenimiento (Tabla 1). En este sentido, Saxena y Mishra (2013), mostraron la importancia de contar con personal capacitado en la detección de fallas, el cual pueda determinar y actuar rápidamente para la reparación o detección de la

anomalía. Una correcta solución a las fallas detectadas por el usuario extenderá la vida útil de estos equipos. Por ello, aunque se tenga el precedente de los trabajos anteriormente revisados, y estos sientan las bases para determinar la importancia de revisar los niveles de acumulación de polvo y/o rupturas en la cubierta de los paneles fotovoltaicos, hace falta el desarrollo de metodologías que permitan establecer momentos oportunos y acertados donde se indique cuando estos niveles de afectación pueden llegar a ser perjudiciales para los sistemas. Como ejemplo de ello tenemos el trabajo de Vilariño (2017), quien presentó una metodología basada en análisis de varianza e impulsada por el método de Tukey a un conjunto de sistemas fotovoltaicos que mediante la comparación de estado entre sistemas era posible observar cual sistema se desviaba de una operación normal y de esta manera programar la revisión a este equipo. Pero este acercamiento no entregaba un diagnóstico como tal de la falla en la que se encontraba el sistema, habiendo una incertidumbre por parte del usuario respecto a que tipo de rutina de mantenimiento tendría que ser aplicada para mitigar la falla atrasando el tiempo de respuesta para mitigar la falla detectada. Otra metodología que se ha aplicado para mitigar las fallas que se puedan presentar es la implementación de rutinas de mantenimiento como se muestra en la (Tabla 1).

Tabla 1 Calendario recomendado para un sistema fotovoltaico, Saxena y Mishra (2013).

Actividad de mantenimiento	Tiempo recomendado
Limpieza de módulos.	Cada tres meses.
Revisión por cableado o conexiones sueltas y daños aparentes sobre los paneles.	Cada tres meses.
Revisión de la integridad física de la estructura.	Cada tres meses.
Revisión de salidas en voltaje y corriente, en cada panel instalado, en el arreglo en paralelo. Comparar el voltaje entregado según las condiciones climatológicas.	Cada seis meses.
Revisión de sombras creadas por nuevas construcciones alrededor de la instalación.	Cada seis meses.

## II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1 Panel fotovoltaico

Una celda solar es un componente electrónico que convierte directamente la radiación solar en potencial eléctrico. Este proceso requiere, en primer lugar, un material en el que la absorción de la radiación eleva un electrón a un estado de energía positiva y, la diferencia de potencial eléctrico que se genera al conectar una carga eléctrica externa. El electrón entonces se desplaza en una carga eléctrica externa y vuelve a la celda solar. Existe una variedad de materiales y procesos que pueden satisfacer los requisitos para la conversión de energía fotovoltaica, pero en la práctica se utilizan materiales semiconductores en forma de una unión PN (Sanchez y Sócola, 2015). En la actualidad los materiales semiconductores más utilizados son los siguientes.

- 1) Celda monocristalina: Se compone de un elemento con base en silicio cristalizado con todos sus elementos perfectamente alineados. En este modelo de celda se encuentra con un rendimiento cercano del 16%.
  
- 2) Celda policristalina: Se compone de una celda con base en un elemento de silicio, pero este no cuenta con una estructura definida en su composición cristalina. El rendimiento de estos paneles está cerca del 14%.
  
- 3) Celda de silicio amorfo (TFS): Esta estructurado con sales de silicio, pero en su estructura no muestra ninguna formación cristalina, su eficiencia alcanza el 5%.

Estos sistemas son los que más se encuentran comercialmente hablando y están conformados por los siguientes componentes (Figura 5):

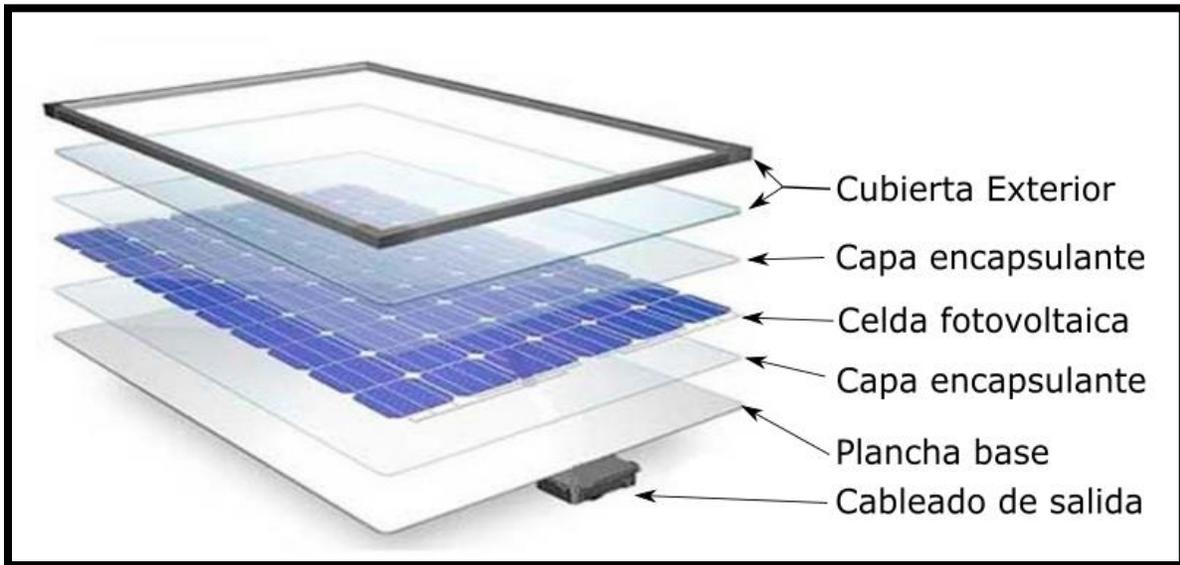


Figura 5 Elementos que componen a un panel fotovoltaico, (INNTECSOL, 2022).

- 1) Cubierta exterior o cristal templado: Protege tanto a la capa encapsulante como a las celdas fotovoltaicas de las condiciones climáticas. Resistente a impactos y cambios de temperatura.
- 2) Capa encapsulante. A base de silicona, encapsula a las celdas fotovoltaicas mejorando la captación de la radiación solar.
- 3) Celda fotovoltaica: Se realizan con base en cristales de silicio, con el que se generan láminas las cuales son el componente principal en la generación de potencial eléctrico.
- 4) Plancha base: Es un componente comúnmente en aluminio, el cual su principal función es ser el marco y la estructura donde se montarán los demás elementos.
- 5) Cableado de salida: Es el componente por el cual se transmite la energía generada por las celdas fotovoltaicas.

Para el cálculo de la generación eléctrica se muestran en las ecuaciones (1) y (2); la (1) es para el cálculo de la energía que puede ser generada en un solo panel fotovoltaico ( $E_{panel}$ ) y la (2) es para el cálculo de la energía que puede ser generada

por un sistema de paneles fotovoltaicos ( $E_{\text{Generador-fotovoltaico}}$ ), donde  $I_{\text{Panel}}$  y  $V_{\text{Panel}}$  corresponden a corriente y tensión máximas del panel, HSP son las horas sol pico que son proyectadas por el sol en la zona geográfica donde se tiene instalado el sistema fotovoltaico. Esta se podrá consultar en sitios especializados en el tema. El valor de 0.9 sería el coeficiente del rendimiento del panel típicamente de 85-90% al descontar ya las pérdidas inherentes del sistema.

$$E_{\text{Panel}} = I_{\text{Panel}} * V_{\text{Panel}} * HSP * (0.9) \quad (1)$$

$$E_{\text{Generador-fotovoltaico}} = I_{\text{generador fotovoltaico}} * V_{\text{generador fotovoltaico}} * HSP * (0.9) \quad (2)$$

En la mayoría de los proyectos de paneles fotovoltaicos, dependiendo de la capacidad del sistema, será necesario realizar diferentes tipos de conexiones entre los paneles para lograr los niveles de voltajes o corrientes necesarios para la correcta operación de los equipos de potencia. Estas conexiones se explican a continuación.

- Conexión en paralelo: Los módulos deberán interconectarse por sus polos positivos y, por separado, los polos negativos. Con lo que, se consigue aumentar la corriente generada y se mantiene la misma tensión.
- Conexión en serie: Para esta interconexión se conecta el polo positivo, con el polo negativo del siguiente modulo, así sucesivamente hasta totalizar los módulos que componen al sistema fotovoltaico. Con esto se aumenta la tensión y se mantiene el mismo valor de corriente.

Cuando se hace referencia a la operación de un sistema fotovoltaico. Con lo que respecta su operación en la interacción entre el voltaje y la corriente se puede explicar ampliamente por medio de la curva V-I, en la (Figura 6), muestra la corriente que un panel proporciona en función del voltaje, así como su comportamiento ante la corriente de corto circuito como el voltaje en corto circuito. Estos datos son dados por el fabricante y sirven para realizar pruebas de operación y funcionamiento de los paneles fotovoltaicos.

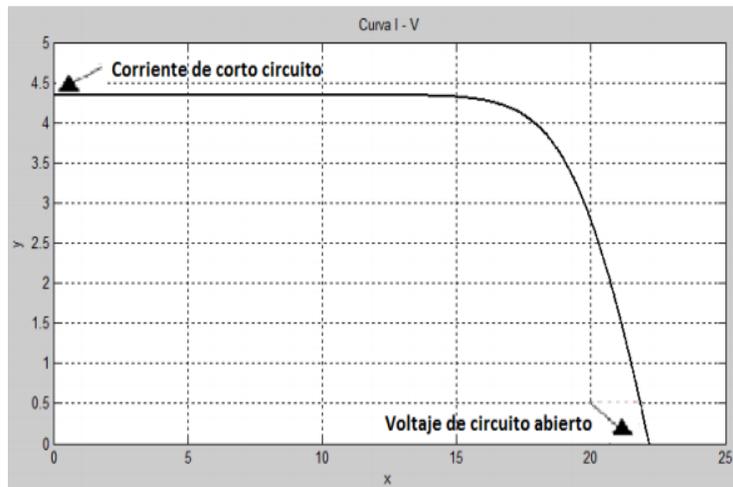


Figura 6 Curva de corriente entregada por un panel fotovoltaico I-V. Fuente Sánchez y Sócala (2015).

La Figura 6 muestra el comportamiento eléctrico de un panel fotovoltaico, que principalmente dependen de la temperatura y de la irradiancia solar a la que este expuesto. La curva característica del panel se determina variando la carga que se encuentre en la salida del panel, como resultado dará los valores de potencia del panel ( $P_{panel}$ ) que utiliza los valores de voltaje ( $V_{panel}$ ) y corriente ( $I_{panel}$ ) y se puede calcular mediante la ecuación (3).

$$P_{panel} = I_{panel} * V_{panel} \quad (3)$$

La corriente de cortocircuito es uno de los parámetros más importantes a analizar en un panel fotovoltaico, este parámetro se refiere a la corriente máxima puede generar un panel fotovoltaico. Y este dato será siempre dado por el fabricante puesto servirá para verificar la correcta operación del panel fotovoltaico.

El voltaje de circuito abierto es uno de los parámetros principales a considerar en los sistemas fotovoltaicos. Este parámetro es la tensión máxima disponible de un panel fotovoltaico, a condiciones de circuito abierto. Estos dos parámetros debido a su importancia en la descripción del funcionamiento del panel fotovoltaico normalmente estarán descritos en la placa de datos de los paneles para el

conocimiento del usuario conforme a sus capacidades de operación.

El punto de potencia máxima ( $P_{max}$ ) es el punto donde un panel solar fotovoltaico expresa el punto de potencia entregada máxima, se obtiene multiplicando el voltaje máximo el cual está dado por la variable ( $V_{OC}$ ) que representa el voltaje de circuito abierto, por la corriente máxima ( $I_{SC}$ ) que representa a la corriente en corto circuito, el cual se multiplicará por el factor de eficiencia ( $FF$ ) que entrega el sistema por lo que la potencia máxima entregada se calcula como lo muestra la ecuación 4.

$$P_{max} = I_{SC} * V_{OC} * FF \quad (4)$$

Por otro lado, la eficiencia ( $\eta$ ) de un panel fotovoltaico es un parámetro de suma importancia que indica qué porcentaje de la energía recibida realmente se aprovecha a la salida. Este factor se ha ido incrementado a través de los años y es uno de los principales parámetros a mejorar en la fabricación de paneles fotovoltaicos. Este parámetro de la eficiencia ( $\eta$ ) se obtiene dividiendo la potencia máxima que el panel puede entregar para la potencia de irradiancia solar incidente ( $P_{in}$ ) sobre el panel, esto como lo ejemplifica la ecuación 5.

$$\eta = \frac{I_{SC} * V_{OC} * ff}{P_{in}} \quad (5)$$

Donde ( $V_{OC}$ ) es la tensión en circuito abierto, ( $I_{SC}$ ) es la corriente de cortocircuito, ( $ff$ ) es el factor de llenado este puede estar entre los valores 0.7 y 0.8,  $P_{in}$  es la potencia que incide en el panel.

Para el cálculo de la corriente total ( $I_{PH}$ ) que puede generar un sistema fotovoltaico se corresponde con la ecuación 6.

$$I_{PH} = \frac{G}{G_{STC}} [\text{área} * J_{SC} + \alpha J_{SC} (T - T_{STC})] \quad (6)$$

Donde:

- $G$  es el valor de la irradiancia en condiciones dadas  $[\frac{W}{m^2}]$ .
- $G_{STC}$  es el valor de la irradiancia en condiciones estándar  $[\frac{W}{m^2}]$ .
- $\text{área}$  es el área de la celda  $[cm^2]$ .
- $J_{SC}$  es la densidad de corriente de cortocircuito de la celda  $[\frac{A}{cm}]$ .
- $\alpha J_{SC}$  es el coeficiente de temperatura de la densidad de corriente de cortocircuito  $[A/^{\circ}C]$ .
- $T$  es la temperatura bajo condiciones dadas  $[^{\circ}C]$ .
- $T_{STC}$  es la temperatura bajo condiciones estándar  $[^{\circ}C]$ .

## 2.2. Espectro electromagnético

La energía que se transforma en potencial eléctrico en los sistemas fotovoltaicos utiliza un amplio espectro electromagnético (Figura 7). El espectro electromagnético se compone principalmente en radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja, estos factores se engloban en un factor conocido como irradiancia, la cual se mide en  $\frac{W}{m^2}$ , este parámetro marcará la generación eléctrica de un panel fotovoltaico, (Flores y Domínguez, 2017).

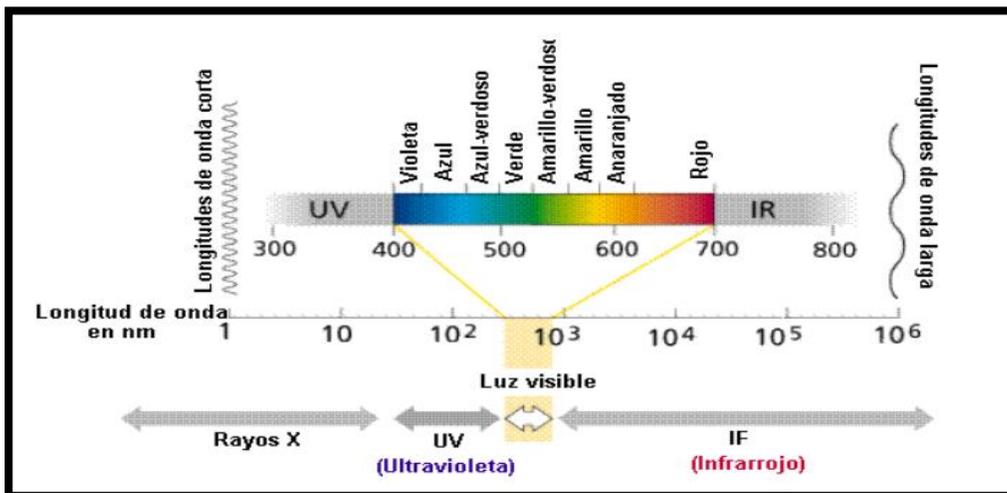


Figura 7 Longitud de onda de la radiación solar Flores y Domínguez (2017).

### 2.3 Fallas en paneles fotovoltaicos

Siendo un equipo eléctrico como lo son los sistemas fotovoltaicos es imposible garantizar que se mantendrá en un estado óptimo durante toda su vida de operación. Una falla en los equipos puede ser detectada en el momento o puede presentarse de manera atenuada dependiendo del tipo de falla y su localización. Debido a la naturaleza de estos equipos en algunas ocasiones es complicado clasificar las fallas de manera correcta, dado al tiempo que estas tardan en presentar mayores afectaciones en el sistema y cuando estas ya logran ser detectadas, en muchos casos, pueden provocar daños permanentes en los equipos. Es por ello que el tiempo de vida estimado del equipo puede alargarse o acortarse dependiendo de si ha tenido un régimen de mantenimiento, y que este se haya llevado a cabo de manera correcta según lo revisado por Saxena y Mishr (2013).

Actualmente no existe un estándar o clasificación unificado de fallas en los paneles fotovoltaicos, y estas pueden ser estimadas bajo diferentes criterios, así como el origen de la falla el cual puede derivarse de factores ambientales como factores internos del sistema.

#### 2.3.1 Falla por acumulación de polvo

Los sistemas fotovoltaicos, al depender de la incidencia solar tienden a presentar una capacidad plena cuando la cubierta exterior se encuentra libre de cualquier obstrucción que pueda ver afectada la cantidad de radiación solar a la celda fotovoltaica. Estos equipos, por su propia naturaleza, necesitan ser instalados en la intemperie lo que los hace susceptibles a la acumulación de polvo en su superficie. Este fenómeno dependiendo de la cantidad de polvo que se acumule en su superficie será proporcional a la pérdida de eficiencia producida por el panel fotovoltaico como lo registrado en la (Figura 8), (Said ,1990).

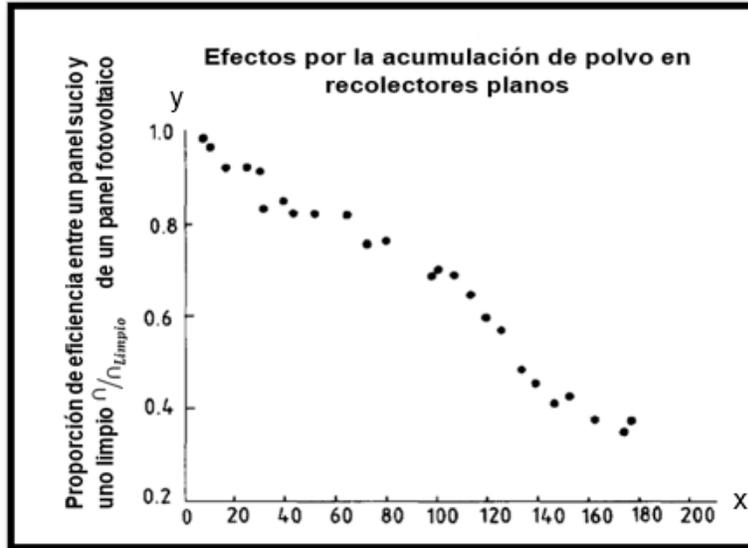


Figura 8 Pérdida en la eficiencia en un panel fotovoltaico por acumulación de polvo a lo largo de 180 días. Fuente Said (1990).

Otro factor importante que se deberá tener en consideración en la acumulación de polvo es con referencia al tamaño de la partícula de polvo a la que pueda estar expuesto el panel fotovoltaico, puesto que en varios estudios ha demostrado ser uno de los factores a considerar en este tema, según lo reportado por Mani y Pillai (2010), donde se puso a prueba diferentes tipos de polvo obteniendo los resultados que se muestran en la (Figura 9).

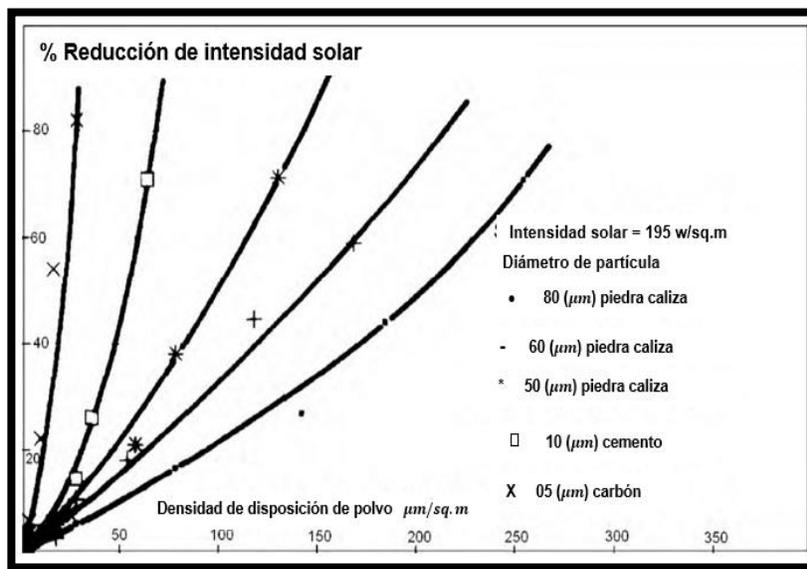


Figura 9 Reducción de radiación solar en panel fotovoltaico vs disposición de polvo. Fuente Mani y Pillai (2010).

## 2.4 Falla por alta temperatura

El componente principal de las celdas fotovoltaicas es un semiconductor, y es por esta propiedad física-eléctrica que es posible la generación de una diferencia de potencial eléctrico. Una de las características principales de estos materiales es que tienden a presentar un comportamiento particular a diferentes temperaturas, donde a mayores temperaturas aumenta la corriente emitida, pero disminuye en gran medida el voltaje de salida del sistema, ocasionando una pérdida considerable en la potencia del sistema. Según lo reportado por Jha y Tripathy (2019), donde se reporta este fenómeno con gran detalle según lo que se puede observar por la (Figura 10).

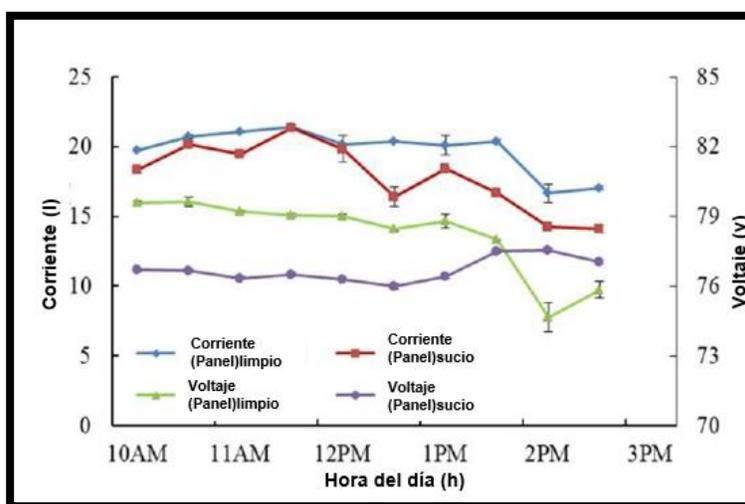


Figura 10 Comportamiento de corriente y voltaje de un sistema sucio vs uno limpio. Fuente Jha y Tripathy (2019).

Como se puede observar en la (Figura 9), el comportamiento que muestra el panel fotovoltaico a la acumulación de polvo es muy parecido al efecto descrito por alta temperatura, esto es debido a que a mayor acumulación de polvo tiende a generar mayor temperatura sobre la superficie del panel lo que ocasiona el efecto antes mencionado. La combinación del aumento de temperatura con la obstrucción de la radiación solar a las celdas fotovoltaicas es una de las razones principales por la cual la acumulación de polvo tiene una gran importancia en los estudios realizados para aumentar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos debido a su efecto doble en el comportamiento del sistema que tiende a ocasionar.

## 2.5 Tipos de instalaciones (tipo Isla o conectada a la RED)

En la práctica se realizan dos tipos de interconexión para sistemas fotovoltaicos. En el primero se realiza una interconexión con el proveedor del servicio eléctrico convencional donde la energía generada se entrega a este proveedor y este realizara los cálculos para descontar del recibo de luz del usuario la energía generada por el sistema instalado Figura 11 (a). En el segundo caso se realiza una conexión aislada de cualquier proveedor externo, por lo que la energía generada será utilizada en su totalidad por el usuario y el exceso normal mente será almacenado en bancos de baterías (Cárdenas et al, 2019). En este trabajo se usará el sistema aislado o llamado tipo isla, dado que proporciona independencia en la carga eléctrica, este tipo de conexión cuenta con los siguientes componentes:

- Regulador de voltaje: Equipo especializado que suministra el voltaje adecuado a las baterías, así como suministrar el voltaje al inversor.
- Banco de baterías: Sistema de 1 o más baterías que suministran la energía al sistema cuando los paneles fotovoltaicos no alcanzan a suministrar la energía al inversor del sistema.
- Inversor de voltaje: Sistema electrónico que se encarga de transformar la señal de corriente directa (DC) a corriente alterna (AC), para el suministro de la energía de equipos de uso común.

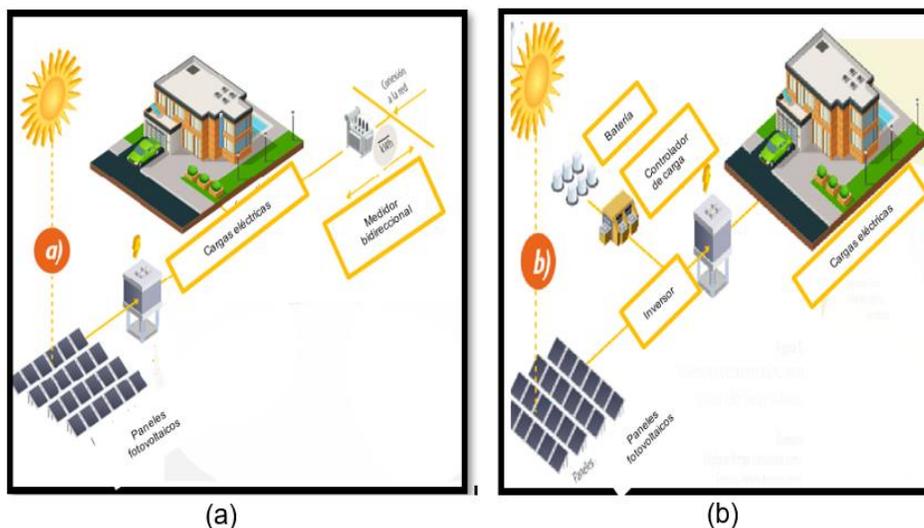


Figura 11 Tipos de conexión para un sistema fotovoltaico a) sistema interconectado a la Red, b) Sistema aislado. Cárdenas et al, (2019).

## 2.6 Posición del sol y radiación solar

Los sistemas fotovoltaicos al ser sistemas que requieren de la radiación solar en la generación de energía eléctrica deberán, en consecuencia, ajustarse lo mejor posible para una correcta captación de dicha radiación solar. Por lo que, es necesario tener en cuenta que para una correcta absorción solar se recomienda, según estudios, un ángulo que sea igual a la latitud de la zona donde se instalarán los equipos, que es donde se obtendrá la mejor absorción de la radiación solar. Por lo cual se considerará lo siguiente: para lo largo del día lo que importa es la orientación y para lo largo del año lo que importa es la inclinación del sistema. En caso contrario donde el sistema no sea posible de ajustar, se recomienda que el sistema deberá apuntar hacia el sur geográfico y deberá tener un ángulo aproximado a la altitud de la ubicación de la instalación esto según lo descrito en (Mani y Pillai, 2010).

Los datos sobre la radiación solar están disponibles generalmente para superficies horizontales, se debe entonces modificar esta información para conocer la radiación sobre superficies inclinadas ( $G_t$ ) como lo muestra la ecuación 7. Una superficie inclinada recibe radiación directa ( $G_{Bt}$ ), radiación difusa ( $G_{Dt}$ ) y radiación reflejada por la tierra ( $G_{Gt}$ ) (Sanchez y Sócola, 2015); se tiene entonces que:

$$G_t = G_{Bt} + G_{Dt} + G_{Gt} \quad (7)$$

Donde  $G_t$  es la radiación total sobre una superficie inclinada  $\left[\frac{w}{m^2}\right]$ . A partir de la (Figura 12).

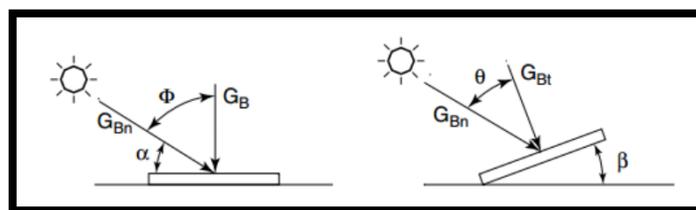


Figura 12 Radiación solar en una superficie inclinada. Fuente Sánchez y Sócala (2015).

La unidad que caracteriza a la radiación solar es la irradiancia. La irradiancia es la densidad de potencia instantánea en unidades de  $\left[\frac{w}{m^2}\right]$ . Varía a lo largo del día

desde 0 a un máximo de aproximadamente 1000 dependiendo de la ubicación y el clima local.

## 2.7. Algoritmos heurísticos - Métodos evolutivos algoritmo genético

Los algoritmos heurísticos son unos términos que derivan de la palabra griega *heuriskein* que significa encontrar o descubrir y se usa en el ámbito de la optimización para descubrir una clase de algoritmos de resolución de problemas (Martí Cunqueiro, 2007). Los algoritmos genéticos, se inspiran en la mecánica de la selección natural y al evolucionar una población inicial hacia una población que contenga los genes deseados y que sean más acordes a las necesidades en específico para la supervivencia de la población. La evolución de la población se realiza mediante la aplicación de operadores genéticos que requieren conocer la función objetivo de la población y al no requerir ningún valor adicional hace que sea un método ideal para el análisis de grandes bases de datos (Valencia, 1997).

Los algoritmos genéticos son métodos de búsqueda, que permiten la optimización de bases de datos, donde el objetivo es encontrar un conjunto de parámetros que se ajusten a una función objetivo mediante la adaptación (fitness)  $P(T)$ . Estos algoritmos operan con una población inicial de individuos como lo muestra la ecuación 8.

$$P(T) = \{X_1^t, \dots, X_n^t\} \quad (8)$$

Para cada interacción de (t), donde cada individuo ( $X_1^t$ ) representa un punto de búsqueda en el espacio de las soluciones potenciales a un problema dado y ( $X_n^t$ ) e. La estructura del algoritmo evolutivo básico es la siguiente según lo mostrado por Valencia (1997) y donde se muestra un ejemplo de la lógica sugerida en la (Figura 13).

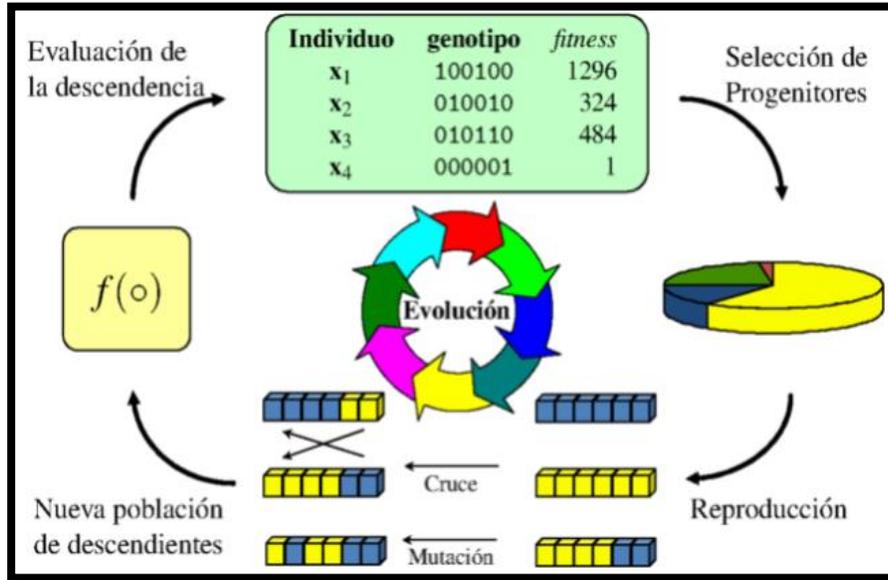


Figura 13 Estructura básica para un algoritmo evolutivo básico, Sancho (2019).

Los algoritmos genéticos pueden ser abordados desde diferentes ángulos y puede dar una gran variedad de modelos, dependiendo de cómo se especifiquen la representación de los individuos y los operadores genéticos a utilizar. Una de las aproximaciones más comunes se muestra en la ecuación 9, con la cual se definen los dominios de estos operadores genéticos.

$$\min f(X_{k1}, X_{k2}, \dots, X_{kn}) \quad (9)$$

$$x_{ki} \in [l_i, u_i] \in \mathfrak{R}, \quad l_i < u_i, \quad \forall i = 1, \dots, n,$$

Donde la componente  $X_{k1}$  tiene un dominio definido por una cota inferior ( $l_i$ ) y una cota superior ( $u_i$ ), y por lo tanto el espacio de búsqueda es un subconjunto de  $\mathfrak{R}$ . El algoritmo genético considera una población inicial de  $M$  tiras binarias de largo  $l$ , generadas aleatoriamente. Para evaluar el desempeño de estos individuos se requiere decodificar cada componente representada en binario al entero correspondiente entre 0 y  $2^b - 1$ , donde  $b$  es el tamaño de la cadena binaria que tendrá nuestro componente, y luego rescatarlo en el intervalo real correspondiente. Durante el proceso evolutivo, el algoritmo genético genera una nueva población de tamaño  $M$  a partir de la población actual y evalúa el desempeño de los nuevos individuos.

Los métodos de selección evolutiva como lo es el algoritmo genético permiten la búsqueda de los resultados óptimos, y con mayor índice de adaptación observada hasta el momento. La operación continua del algoritmo que permite la evolución de una población inicial, que cuya evolución primeramente está basada en una selección a lazar y donde posteriormente, por medio de una función *Fitness* es posible seleccionar cuales individuos son los más aptos según las necesidades evolutivas establecidas.

### 2.7.1 Elección por ranking

El algoritmo de selección por ranking es como sigue:

- 1) Ordenar la población del mejor individuo ( $x = 1$ ) al peor ( $x = M$ ).
- 2) Asignar un número de copias esperadas ( $\eta^+$ ) y su descendencia ( $\eta^-$ ) según sea lo esperado por la ecuación 10.

$$\alpha(x) = \eta^+ - (\eta^+ - \eta^-) \frac{(x-1)}{(M-1)} \quad (10)$$

Donde:

$$\alpha(x) = M, \quad 1 \leq \eta^+ \leq 2, \quad \eta^- = 2 - \eta^+.$$

### 2.7.2 Operación genética de recombinación

El operador de recombinación (crossover) es el operador de búsqueda más importante en los algoritmos genéticos. Este es un operador sexuado que intercambia el material genético de un par de padres produciendo descendientes que normalmente difieren de sus padres este proceso se observa en la (Figura 13) en la parte de la Reproducción. La idea central es que segmentos distintos de padres diferentes con alta adaptación deberían combinarse en nuevos individuos que tomen ventaja de esta combinación.

Este operador de recombinación funciona con probabilidad  $P_c$  (esto permite que en algunos casos no haya recombinación y se mantengan los padres). Dado ( $p$ ) que representa al padre 1 en la ecuación 11 y ( $q$ ) que representa a el padre 2 en la ecuación 12 de este par de padres, de largo ( $n$ ) bits, se escoge aleatoriamente un punto  $E \in \{1, \dots, l - 1\}$  y se intercambian los bits a la derecha de esa posición entre ambos individuos, obteniéndose los descendientes ( $s$ ) en la ecuación 13 y ( $v$ ) en la ecuación 14, como se indica a continuación:

$$p = (p_1, \dots, p_{k-1}, p_k, \dots, p_\ell) \quad (11)$$

$$q = (q_1, \dots, q_{k-1}, q_k, \dots, q_\ell) \quad (12)$$

$$s = (p_1, \dots, p_{k-1}, q_k, \dots, q_\ell) \quad (13)$$

$$v = (q_1, \dots, q_{k-1}, p_k, \dots, p_\ell) \quad (14)$$

El operador (crossover) de un punto, descrito más arriba, sufre de un sesgo posicional ya que un bit cercano al extremo derecho de la tira tiene una alta probabilidad de intercambio, mientras que un bit en el extremo izquierdo tiene una baja probabilidad de intercambio.

#### 2.7.4 Método de selección por mutación

Este operador de mutación juega un papel secundario, invirtiendo ocasionalmente un bit. Un operador de mutación pequeño garantiza que un individuo no difiera mucho de sus padres en el genotipo. La mutación sirve para incrementar la diversidad puesto que el algoritmo tiende a converger a un cierto valor y por tanto no puede perder la posibilidad de una recombinación con mayor margen de operación. El operador de mutación invierte cada bit de la tira binaria sobre una base bit a bit con probabilidad ( $m'_{\{p_m\}}$ ). Como se muestra en la ecuación 15.

$$m'_{\{p_m\}}(q_1, q_2, \dots, q_\ell) = (q'_1, q'_2, \dots, q'_\ell), \quad \forall i \in \{1, \dots, \ell\}, \quad (15)$$

Donde:

$$q'_i = \begin{cases} q_i & \text{si } r > p_m \\ 1 - q_i & \text{si } r \leq p_m \end{cases}$$

Y  $r \in [0,1]$  uniformemente aleatorio, distinto para cada bit  $q_i$ .

El algoritmo genético simple converge a una sola solución debido al tamaño finito de población y a la acumulación de errores estocásticos de muestreo.

## 2.8 Indicadores Estadísticos

Los indicadores estadísticos son una de las herramientas más utilizadas para el análisis de datos, ya que es posible una rápida evaluación a un bajo coste en carga computacional. De tal manera que, el conocer cómo aplicarlos e interpretarlos adecuadamente, ayuda a una toma rápida de decisiones y permite optimizar los resultados de las tareas.

Conocer el uso y la correcta aplicación de los diferentes indicadores estadísticos, ha dado grandes avances en la calidad de vida. Puesto que, en diferentes campos como el económico, social o poblacional e incluso en la vida cotidiana de las personas son aplicados, ya que dichos indicadores permiten resumir la compleja realidad que nos rodea, para su análisis (Aguilar, 2004). La estadística se divide en dos grandes áreas:

- **Estadística Descriptiva:** Comprende las técnicas de recolección, presentación y descripciones de los datos numéricos, pueden ser gráficos o incluir análisis mediante cálculos.
- **Estadística Inferencial:** Comprende las técnicas a través de las cuales se puede tomar decisiones sobre una población a partir de los resultados surgidos de una muestra.

El análisis por medio de indicadores estadístico es ampliamente utilizado para el análisis de detección de fallas o comportamientos anormales en los sistemas y puede ser aplicado en una gran variedad de aplicaciones como lo demostrado por Vilariño et al. (2017), quienes por medio del análisis de una base de datos por medio del indicador estadístico varianza fue posible la comparación de varios centros de transformación de centrales fotovoltaicas, obteniendo resultados rápidos y confiables con los cuales fue posible la identificación rápida de comportamientos anómalos. Ya que, se redujo en gran medida la información que era necesario analizar para observar este fenómeno

A continuación, se presentarán los datos estadísticos que serán evaluados en este trabajo Tabla 2, esta tabla contiene 15 indicadores estadísticos. Estos indicadores son los recomendados según la literatura para el análisis de sistemas en estado estacionario, cada indicador obtiene diferentes características siendo unos insensibles al ruido y otros centrados en tendencia central y dispersión en los datos, y en su conjunto describen el comportamiento de un sistema. Y por lo tanto serán los indicadores seleccionados para el análisis del sistema fotovoltaico que será sometido a prueba.

Tabla 2. Ecuaciones estadísticas propuestas para evaluar los sistemas estacionarios en el dominio del tiempo, usadas para caracterizar cada una de las señales seleccionadas, (autoría propia).

EC*	ID	Indicador Estadístico	Expresión matemática	EC*	ID	Indicador Estadístico	Expresión matemática
16	1	Media del valor Absoluto	$T_1 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n  x_k $	24	9	Factor Cresta	$T_9 = \frac{\hat{x}}{RMS}$
17	2	Valor máximo	$T_2 = \max(x)$	25	10	Factor Latitud	$T_{10} = \frac{\hat{x}}{SRM}$
18	3	Raíz cuadrada de la media RMS	$T_3 = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n (x_k)^2}$	26	11	Factor Impulso	$T_{11} = \frac{\hat{x}}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n  x_k }$
19	4	El cuadrado de la raíz de la media. SRM	$T_4 = \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \sqrt{ x_k }\right)^2$	27	12	Skewness	$T_{12} = \frac{\sum[(x_k - \bar{x})^3]}{\sigma^3}$
20	5	Desviación Estándar	$T_5 = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}$	28	13	Kurtosis	$T_{13} = \frac{\sum[(x_k - \bar{x})^4]}{\sigma^4}$
21	6	Varianza	$T_6 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2$	29	14	Quinto momento	$T_{14} = \frac{\sum[(x_k - \bar{x})^5]}{\sigma^5}$
22	7	Factor de forma RMS	$T_7 = \frac{RMS}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \sqrt{ x_k }}$	30	15	Sexto momento	$T_{15} = \frac{\sum[(x_k - \bar{x})^6]}{\sigma^6}$
23	8	Factor de forma SRM	$T_8 = \frac{SRM}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \sqrt{ x_k }}$				

EC\* Sigue la numeración de las ecuaciones según el documento.

ID\* Numeración para indicar los 15 indicadores estadísticos que serán utilizados.

Donde  $n$  es el número de datos,  $\sigma$  es la desviación estándar,  $x$  es vector de datos y  $\bar{x}$  es la media de los datos,  $\mu$  es el momento ordinario de primer orden.yt

## 2.9 Análisis discriminante lineal

El análisis de discriminante lineal (LDA) permite reducir la dimensionalidad de los datos, maximizar la separación lineal entre las clases, así como preservar la información discriminatoria de los datos (Saucedo-Dorantes et al, 2021). El proceso

para la correcta aplicación de la técnica LDA cuenta con 5 principales pasos que se enumeran a continuación.

1. Calcular las medias ( $\mu_i$ ) de cada vector d-dimensional para cada clase.
2. Calcular las matrices de covarianza ( $S_w, S_b$ ) para cada clase y entre las clases.
3. Resolver el problema de eigenvalores y eigenvectores para las matrices de covarianza ecuación 31.

$$S_w^{-1}S_b = \lambda w \quad (31)$$

4. Ordenar los eigenvectores por valor decreciente y elegir la dimensión( $k$ ) del nuevo espacio reducido, ecuación 32.

$$W = K \times d \quad (32)$$

5. Usar el vector  $W$  para transformar el espacio original  $X$  en el nuevo espacio, de acuerdo con la ecuación 33.

$$Y = X \times W \quad (33)$$

Por lo que la técnica maximiza la distancia entre clases y minimiza la distancia entre cada una de ellas siguiendo los pasos anteriormente mencionados, esto siguiendo el criterio, de la ecuación 34.

$$FDR = J(W) = \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{\sigma_1^2 - \sigma_2^2} \quad (34)$$

Donde ( $\mu_1, \mu_2$ ) son las medias calculadas de cada clase y ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) son las varianzas calculadas en cada clase,  $W$  es el vector que representa la solución óptima que se obtiene con la ecuación 35.

$$j(w) = \frac{w^T S_b W}{w^T S_w W} \quad (35)$$

Donde ( $S_w$ ) representa la matriz obtenida al aplicar la covarianza dentro de la misma clase y ( $S_b$ ) representa la aplicación de la covarianza entre las clases que se van a evaluar, cada una de estas se muestra en las ecuaciones (36) y (37), así como las variables dependientes de estas, Matriz de covarianza ( $S_i$ ), vector de medias ( $m_i$ ), ecuaciones (38) y (39).

$$S_w = \sum_{i=1}^c S_i \quad (36)$$

$$S_b = \sum_{x \in D_i}^c N_i (x - m_i)(x - m_i)^T \quad (37)$$

$$S_i = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{x \in D_i}^c (x - m_i)(x - m_i)^T \quad (38)$$

$$m_i = \frac{1}{n_i} \sum_{x \in D_i}^c x_k \quad (39)$$

Donde ( $x \in D_i$ ) hace referencia a todos los valores que pertenecen a la clase evaluada y ( $C$ ) hace referencia al número de clases. Posteriormente se aplicarán los pasos 4 y 5 según lo marca el procedimiento establecido para aplicar la técnica. La metodología descrita se muestra en la (Figura 14), y la interacción entre estas variables resultante de la proyección se muestra en la (Figura 15).p

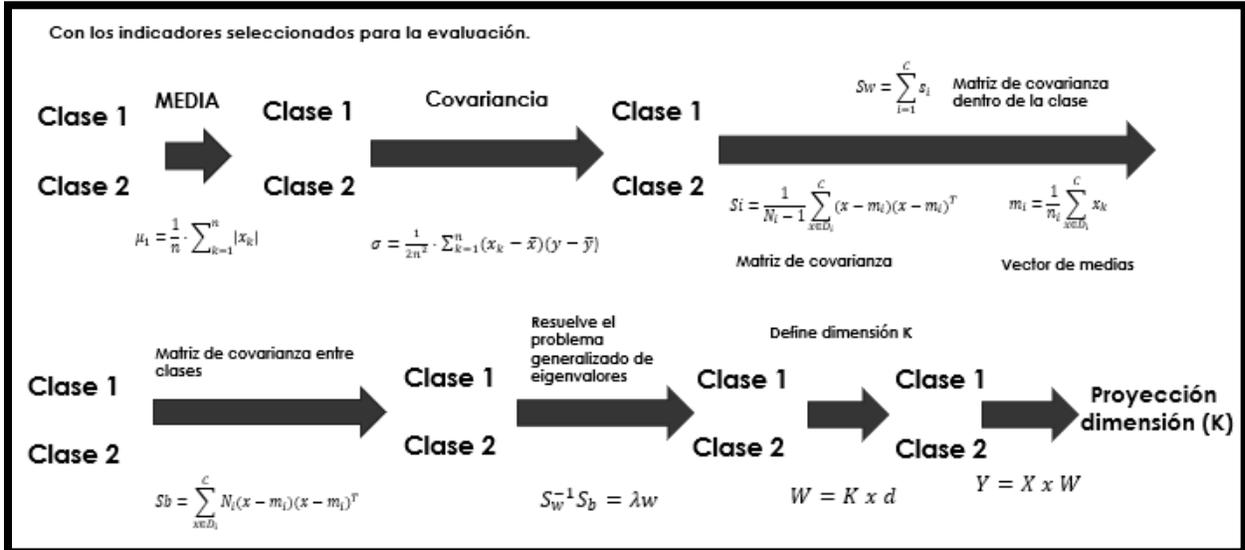


Figura 14 Metodología para la correcta aplicación de la técnica LDA, frente a la evaluación de dos clases, (autoría propia).

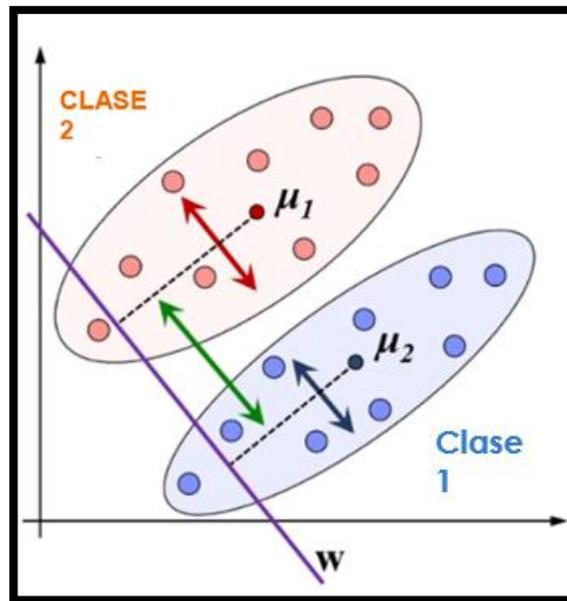


Figura 15 Interacción de la proyección entre clases generadas al aplicar la técnica LDA, (autoría propia).

## 2.10 Análisis de Clúster

El análisis de Clúster, conocido como Análisis de Conglomerados es una técnica estadística multivariante que busca agrupar elementos o variables (De la Fuente, 2008). Este proceso analítico intenta organizar en grupos relativamente

homogéneos a los que se llama conglomerados (clúster). Para poder aglomerar individuos es necesario contar con algunas características que estos mismos individuos compartan entre sí. Cada una de estas características reflejaran la asociación o un sentido de pertenencia en cada grupo. Esta medida de asociación puede ser una distancia o una similitud. Estas se explican a continuación.

- Cuando existe una distancia pequeña entre los individuos, pensando en una representación gráfica, donde es posible observar la cercanía entre diferentes individuos y que estos tienden a estar cercanos unos a los otros. Se puede percibir cierta pertenencia a este grupo de datos y estos formarán un clúster.
- Cuando existe una similitud en las características ya sean numéricas, físicas, o biológicas. Este grupo de individuos se considerará a fin, y naturalmente formaran un clúster de datos.

Esto como se muestra en la Figura 16, las características más representativas se muestran en un plano de dos dimensiones en las cuales se separan sus respectivas características.

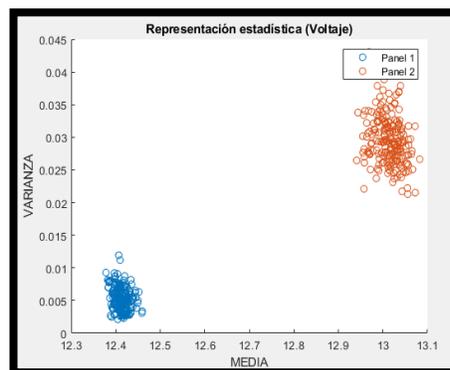


Figura 16 Representación gráfica de dos sistemas mediante clúster de variables Varianza-Media, (autoría propia).

## 2.12 Clasificador por red Neuronal

Los algoritmos de reconocimiento de patrones son cada vez más utilizados en la vida cotidiana, ya que la constante automatización de herramientas o aparatos de uso común como lo son (lavadores, hornos, aires acondicionados, etc. Por lo que,

la implementación de clasificadores de baja complejidad de procesamiento como lo son las redes neuronales feedforward, son ampliamente utilizadas en sistemas de clasificación, y pueden ser utilizados para la identificación de patrones de comportamiento como lo demuestra los trabajos desarrollados por Botero-Valencia et al. (2009), donde se demostró que la clasificación de patrones con funciones discriminantes no lineales o no conexas, se puede realizar sin utilizar métodos complejos y costosos computacionalmente, ya que se pueden lograr un mapeo de los datos obteniendo una separabilidad lineal y por lo tanto una correcta clasificación. Por lo que estas metodologías son altamente recomendadas para utilizarse en la clasificación de información.

Una red neuronal es un modelo computacional evolucionado a partir de 3 componentes principales, 1) Neurona de entrada. 2) Capa Oculta. 3) Capa de salida. Cada capa está interconectada por medio de unos enlaces. Estos enlaces conectan las neuronas unas a las otras haciendo un efecto tipo escalera donde la salida de la neurona anterior es multiplicada por un valor de peso y es pasado a la siguiente neurona. Estos pesos en los enlaces pueden incrementar o inhibir el estado de activación de las neuronas adyacentes. Una red neuronal tiene como objetivo resolver la información que es ingresada como lo realiza el cerebro humano en la búsqueda de patrones, este proceso es posible mediante la comparación entre los patrones de la información que ingresa a la red y mediante las funciones de búsqueda de las neuronas llegar a un patrón de comportamiento deseado donde es posible el aprendizaje del sistema y la correcta clasificación de la información que le es ingresada. La estructura básica de un clasificador por red neuronal se puede observar en la (Figura 17).

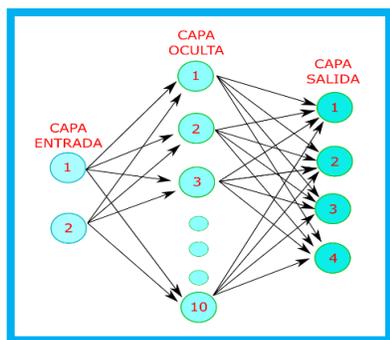


Figura 17 Estructura básica de red neuronal, (autoría propia).

### 2.13. Tipos de mantenimiento Industrial/residencial y sus clasificaciones

El concepto de mantenimiento surge de la problemática hacia las fallas que presentaban los equipos ya sea mecánicos, eléctricos o químicos, que pueden sufrir algún tipo de degradación en sus componentes o rendimiento. Existen tres principales acciones las cuales se comentan a continuación.

- **Mantenimiento Preventivo:** Es aquel que se realiza de manera metódica y periódica, este puede ser determinado por el fabricante o por las condiciones de operación del equipo.
- **Mantenimiento Correctivo:** Es la acción que conlleva a una modificación o a un cambio en los equipos, general mente se realiza cuando el equipo ya presento una falla o un comportamiento anómalo que impide la correcta operación del equipo.
- **Mantenimiento Predictivo:** Se realiza cuando el operador o usuario tiene un amplio conocimiento del comportamiento del quipo, con lo que es posible programar mantenimientos preventivos a piezas o componentes de manera arbitraria previendo la falla que se pueda presentar por la vida útil del equipo o el tiempo de operación.

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1 Hipótesis

Mediante el procesamiento de señales internas como voltaje y corriente provenientes de un panel fotovoltaico, y señales externas como radiación solar y temperatura ambiente, así como a través del uso de técnicas heurísticas e indicadores estadísticos, es posible identificar y caracterizar diferentes niveles de fallo relacionados a ruptura y suciedad.

#### 3.2 Objetivo general y objetivos particulares

Proponer y diseñar una metodología automatizada que, haciendo uso de técnicas heurístico-estadísticas, permita identificar y caracterizar fallos en paneles fotovoltaicos, tomando en cuenta las condiciones ambientales y potencia entregada por el sistema para lo cual se tienen los siguientes objetivos particulares:

- Realizar una búsqueda de metodologías de detección de fallas por ruptura de cristal y acumulación de polvo en paneles fotovoltaicos mediante la revisión en la literatura, para definir aquellas que puedan ser útiles.
- Definir las técnicas, metodologías, algoritmos e indicadores que será utilizado para el diseño y propuesta de detección de fallas.
- Diseñar una o más metodologías que integren las técnicas heurístico-estadísticas que permitan identificar las fallas de paneles fotovoltaicos.
- Realizar un banco de pruebas en el cual se realice la adquisición de señales de diferentes configuraciones de fallas de los paneles fotovoltaicos, los cuales serán establecidos conforme a lo encontrado en trabajos anteriores, con lo cual se tratará de establecer un estándar en las configuraciones posibles en las estimaciones de las fallas, dichas afectaciones serán medidas mediante las señales de corriente y voltaje para su procesamiento en la metodología definida.
- Implementar la metodología de algoritmos genéticos, así como las técnicas heurístico-estadísticas en software (Python), al ser un software de fácil acceso y aprendizaje, el cual cuenta con poderosas herramientas con las cuales será posible el desarrollo de la o las metodologías que se quieren desarrollar a lo largo de este proyecto. Y cuenta con la ventaja de ser un software de carácter libre lo cual facilita la implementación de la metodología en futuros trabajos.
- Validar la metodología propuesta, usando los datos correspondientes de la corriente y el voltaje, los cuales serán procesados mediante la metodología en condiciones controladas en laboratorio y condiciones reales.

### 3.3 Esquema general de la metodología propuesta

La metodología propuesta para el desarrollo de este trabajo estará compuesta de cuatro etapas. Del diagrama en la (Figura 18), se observan estas cuatro etapas principales que son: Banco de pruebas, Medición, Sistema de adquisición de datos y Procesamiento en PC. En la primera etapa que es el banco de pruebas, está compuesto del sistema fotovoltaico, el cual se explicará en detalle en la descripción de banco de pruebas experimental. En la etapa de medición se define el uso de los sensores tanto para las características eléctricas y ambientales del sistema fotovoltaico. En cuanto al sistema de adquisición se describe a detalle el proceso del procesamiento de las señales adquiridas por medio de los sensores anterior mente mencionados y como estos se alistarán para su postproceso en la ultima etapa. En esta última etapa es donde se procesará la información por medio de las técnicas y métodos que serán desarrollados y aplicados en Python.

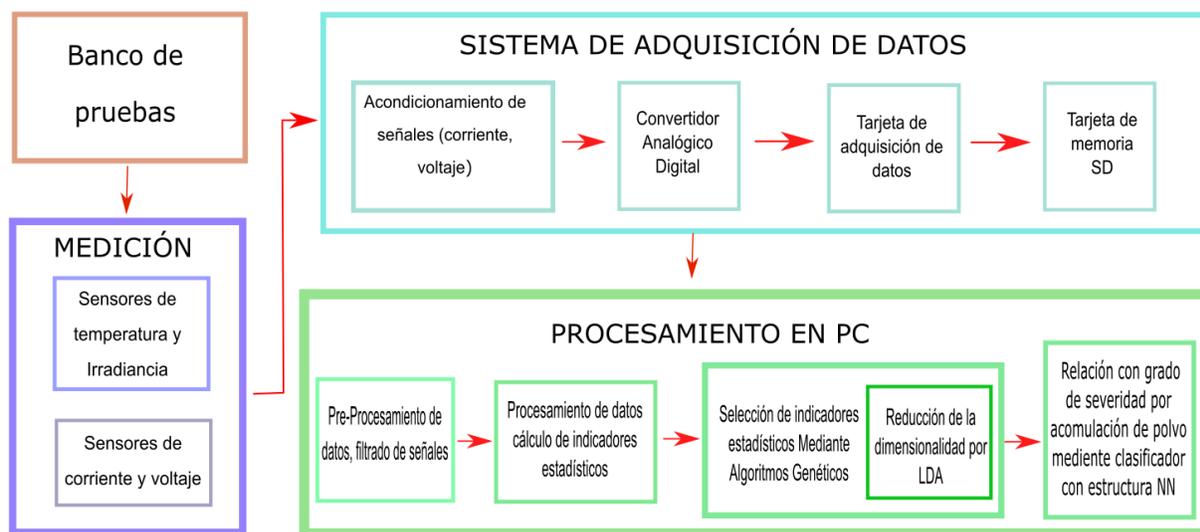


Figura 18 Diagrama a bloques de metodología aplicada, (autoría propia).

### 3.4 Banco de pruebas experimental

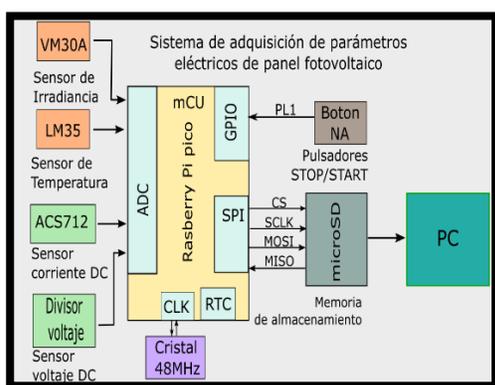
El banco de pruebas consistirá en 1 sistema fotovoltaico conectado en modalidad aislada y en un sistema de adquisición Figura 19 (a) integrado en una tarjeta Raspberry PI-pico. El sistema fotovoltaico estará compuesto por paneles marca Kyocera y sus especificaciones eléctricas se presentan en la Tabla 3, una batería, un regulador de voltaje y una carga eléctrica estática compuesta por 300

watts resistivos y un motor de 150 watts, todos estos componentes serán conectados según el diagrama de conexión de la Figura 19 (b). En este sistema se realizan las siguientes pruebas, tomando en cuenta que según la literatura citada los sistemas con panel roto presentan un comportamiento similar a un panel con acumulación de polvo y es por ello que se realizarán las siguientes pruebas.

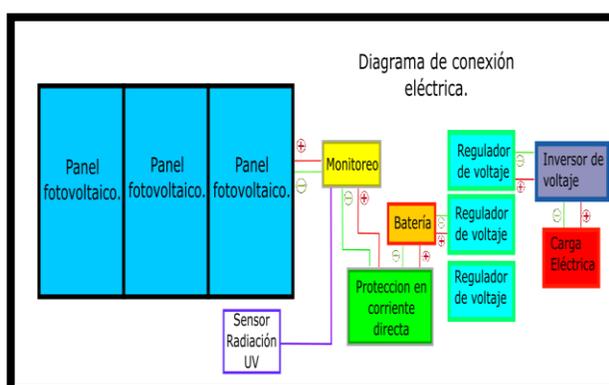
- Sistema en óptimas condiciones de limpieza.
- Sistema con acumulación leve de polvo en superficie.
- Sistema con acumulación moderada de polvo en superficie.
- Sistema con un panel roto.

Tabla 3 Especificaciones eléctricas de panel fotovoltaico Kyocera

Especificaciones	Valor
Poder máximo en la salida (Pmax)	130 w
Voltaje máximo de salida (Vmpp)	17.6 V
Corriente máxima de salida (Impp)	7.39 A
Voltaje de corto circuito	21.9 V
Corriente de Corto circuito	8.02 A
Voltaje máximo del sistema	600 V



(a)

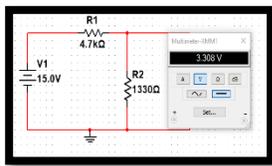


(b)

Figura 19 Configuración del sistema, en a) arquitectura del sistema de monitoreo y en b) diagrama de conexión eléctrica aislada del sistema, (autoría propia).

### 3.5 Medición y sistema de adquisición de datos

El sistema contará con los sensores mostrados en la Figura 19, los cuales se encargará se monitorizar las señales que se utilizarán para el análisis del sistema, estos son: por la parte del voltaje contará con un circuito divisor de voltaje, ya que en el voltaje en la entrada del sistema hay 12 a 15  $V_{cc}$  y nuestro sistema de adquisición opera a rangos de 0 a 3.3  $V_{cc}$  (Figura 20, a); por la parte de la corriente se contará con un Sensor de Corriente ACS72 con un rango de operación de 0 a 20  $Amp$ , Microsystems (2017) (Figura 20, b); para la medición de la irradiancia se tomará el sensor VM30A, (Guide ,2005) (Figura 20, C) y, por último, para la medición de temperatura sensor LM35 (Texas Instruments, 2017), (Figura 20, d). Con estos sensores se realizarán pruebas de 10 min con tiempos de muestreo de 16.666 muestras por segundo generando en total 10,000 muestras en los 10 min de duración de la prueba.



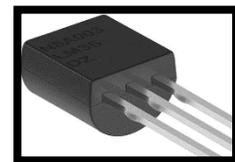
(a) Divisor de Voltaje.  
15.0  $V_{cc}$  a 3.3  $V_{cc}$



(b) Sensor corriente (ACS72)  
0 a 20A.



(c) Sensor ultravioleta VM30A  
200nm-450nm.



(d) Sensor temperatura LM35.  
-55°C a 150°C

Figura 20 Sensores utilizados en sistema de adquisición.

### 3.6 Procesamiento en PC

A continuación, se describirá a mayor profundidad el bloque correspondiente a procesamiento en PC y las técnicas aplicadas a las señales obtenidas mediante los sensores instalados en el banco de pruebas según la metodología desarrollada.

#### 3.6.1 Procesamiento de datos- Cálculo de indicadores estadísticos

Del sistema, como se ha mencionado con anterioridad, contó con cuatro diferentes sensores para cada una de las señales de interés voltaje, corriente,

temperatura e irradiancia. Para procesar esta información se usó el método de ventanas (Figura 21), donde para cada variable se obtuvieron 208 ventanas que contenían 48 muestras. A cada una de estas se aplicó el cálculo de los 15 indicadores estadísticos descritos en la (Tabla 2), generando una matriz de 15x208 para cada variable medida esto como se muestra en la (Figura 22). Una de las ventajas al utilizar este método es que las señales no necesitan un preprocesamiento tal como lo puede ser la aplicación de algún tipo de filtro, ya sea pasa bajas o pasa altas, lo que reduce la carga computacional de la metodología en su totalidad.

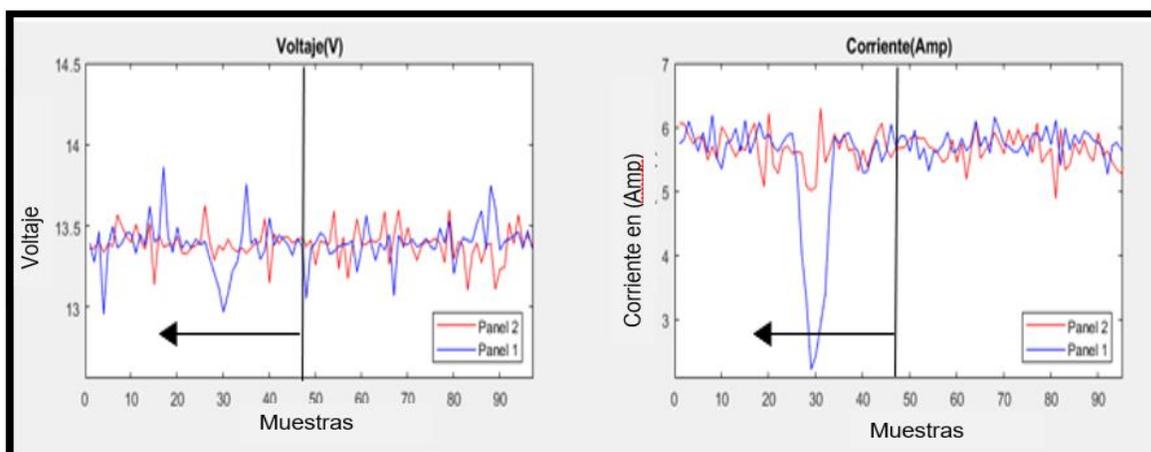


Figura 21 Toma de datos por técnica de creación de ventanas, para el preprocesamiento de los datos, (autoría propia).

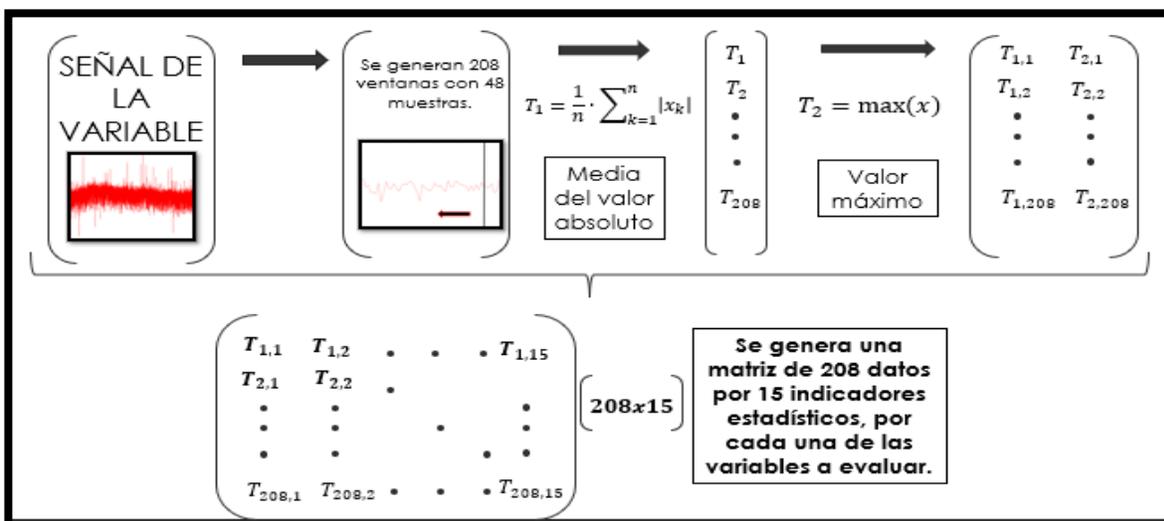


Figura 22 Metodología aplicada para el cálculo de los 15 indicadores estadísticos, (autoría propia).

### 3.6.2 Selección de indicadores estadísticos mediante algoritmos genéticos

Mediante la aplicación de técnicas de reducción LDA es posible adquirir la información más representativa de un conjunto de datos y generar un vector proyección que contendrá la información más relevante. En este caso será aplicada a los datos obtenidos del sistema, una matriz de 208X60 datos por cada panel instalado que con tiene las cuatro variables “voltaje, corriente, temperatura e irradiancia” a evaluar, la estructura de esta matriz se muestra en la Figura 22. Cuando se forma esta matriz con los datos de un sistema fotovoltaico limpio, esta representa y describe nuestra clase en óptimas condiciones, por lo que este proceso se repetirá para cada una de las condiciones de falla que serán evaluadas. Que en este estudio serán las siguientes.

- Panel en condiciones sana o limpio.
- Panel con ligera acumulación de polvo.
- Panel con moderada acumulación de polvo.
- Panel roto.

Una vez que se obtienen las matrices de cada una de las clases o estados que se evaluarán se procede a realizar una normalización de los datos esto como lo muestra la Figura 23, este proceso se realiza a través de la ecuación (40), en la que se realiza la media entre cada una de las clases ( $\mu_{clase}$ ) y se divide entre la varianza de la clase a la cual se realizara la normalización( $\sigma_{clase}$ ).

$$N = \frac{(\mu_{clase1} - \mu_{clase2})}{(\sigma_{clase1})} \quad (40)$$

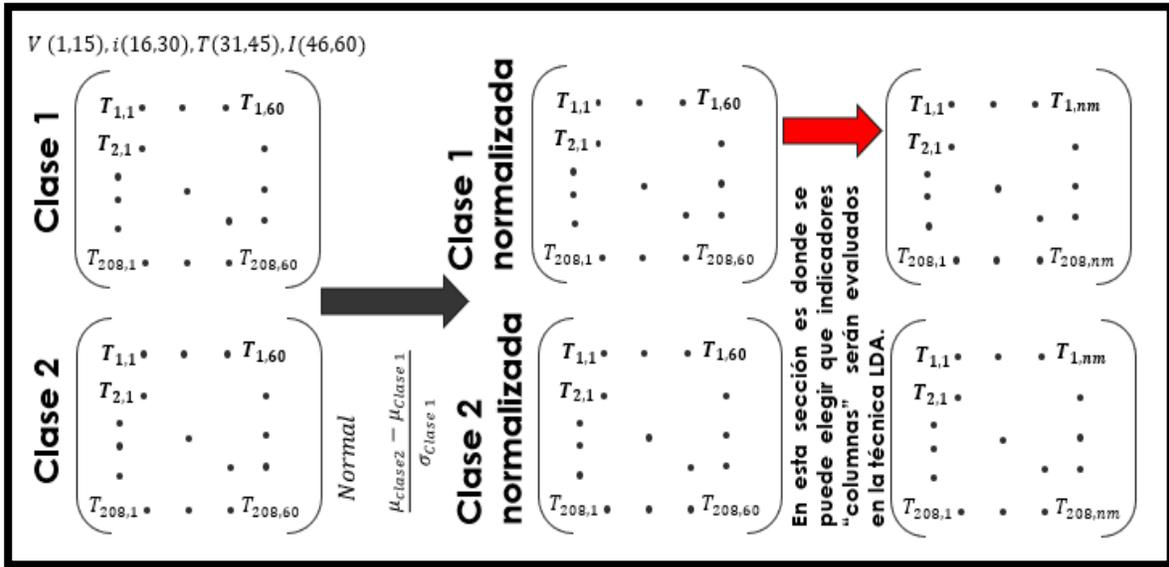


Figura 23 Procedimiento para realizar la normalización entre clases, (autoría propia).

Dada la gran cantidad de indicadores, en este caso 60, y tomando en cuenta que dependiendo la información que sea ingresada a la técnica LDA, esta puede dar un mejor o peor resultado. Lo anterior pensando en la separación de las clases resultantes al aplicar la técnica, surge la necesidad de seleccionar los mejores indicadores estadísticos. Pero realizar este proceso de eliminación y de combinación, sería una tarea muy compleja y podría representar una alta carga computacional. Por esta razón se utilizó un algoritmo genético con el cual fue posible optimizar la selección de estos indicadores. La técnica LDA, nos permite generar una función objetivo para nuestro algoritmo genético, que constara de la separación entre clases que es calculado por la ecuación (41), que mide la distancia entre el centro de masa dos clúster mediante la aplicación de las medias en el eje  $x$  ( $\mu_x$ ) y medias en el eje de las  $y$  ( $\mu_y$ ), nos dará la distancia entre las clases y entre mayor sea esta mejor será el resultado entregado por el algoritmo. Puesto se infiere una mejor separación entre las clases que se están evaluando en la metodología.

$$D = \sqrt{(\mu_{x-clase2} - \mu_{x-clase1})^2 - (\mu_{y-clase2} - \mu_{y-clase1})^2} \quad (41)$$

Como se observa en la ecuación 41, la referencia entre  $\mu_{clase2}$  y  $\mu_{clase1}$  en los dos ejes x y eje y, hace referencia al conjunto de coordenadas obtenidas al aplicar la técnica LDA en cada uno de los casos de estudio, que pueden ser para clase1: Panel limpio y clase2: Panel con leve acumulación de polvo. Mediante la aplicación del algoritmo genético se buscará la mejor separación entre clases, que tendrá como objetivo encontrar el mejor vector de indicadores estadísticos que en este caso engloba las 60 columnas de la matriz que contiene las 2 clases a evaluar por ejemplo “Sistema limpio vs Leve acumulación de polvo”, por lo que a lo largo del proceso siempre serán evaluadas dos clases. Este procedimiento se muestra en la (Figura 24), y se describe a continuación:

1. Inicialización de la población: Los cromosomas que fueron definidos para la utilización del algoritmo genético serán los indicadores estadísticos que componen a las clases a evaluar. Para realizar el proceso de optimización se colocan 20 vectores como población inicial y cada uno de ellos contará con diferentes tamaños, en los elementos que lo componen, estos tomarán y mezclarán los 60 indicadores estadísticos de las cuatro variables del sistema que serán evaluados en la técnica LDA. En esta evaluación se considerará por lo menos que se cuente con 2 elementos o dos indicadores estadísticos, para asegurar una combinación entre los indicadores y de esta manera generar una población aleatoria de indicadores, que serán sometidos al proceso de decodificación. Una vez generada la población inicial se procederá al paso 2.
2. Reproducción: El algoritmo genético realizará el procedimiento de cruce entre los vectores seleccionados en este caso, llevará a cabo la cruce entre dos vectores que fueron generados en el paso 1, permitiendo la constante evolución de los vectores. La variabilidad del sistema está basada en una distribución gaussiana, así como el punto de mutación del 30% que será fijo para cada cromosoma. Ya generada la descendencia de éstas dos padres, se procederá al paso 3.
3. Evaluación de la población: La función de adaptabilidad del algoritmo genético estará basada en la distancia obtenida mediante la ecuación (41) por los clúster

generados al aplicar la técnica LDA, en la cual fue evaluada la distancia entre los núcleos de los clúster que son obtenidos entre las dos condiciones evaluadas, una condición Sana vs Condición con afectación, Una vez encontrada la mejor combinación de indicadores mediante la selección de población (Ranking) se sustituirán en la población inicial, lo que al continuar con el proceso de iteraciones eliminará a los vectores menos aptos, dejando los vectores que contendrán los mejores indicadores estadísticos.

4. Criterio de finalización: Este está definido por dos parámetros; el primero fue definido por una cantidad fija de generaciones evolutivas del algoritmo genético, y la segunda cuando se alcance la máxima varianza en la distancia entre los clústeres evaluados en el algoritmo. Cuando se cumplan cualquiera de estas condiciones el algoritmo parará y de lo contrario seguirá en bucle hasta encontrar la máxima variación del sistema.

Una vez encontrado el vector con los mejores indicadores se aplica una última vez la reducción de la dimensionalidad por medio de una técnica LDA, a la matriz, pero con el vector optimizado el cual contiene la información más representativa lo que facilitará la aplicación de un clasificador neuronal, el cual será alimentado con la información obtenida por la metodología desarrollada y gracias a este podrá reducir el error que pueda existir al clasificar.

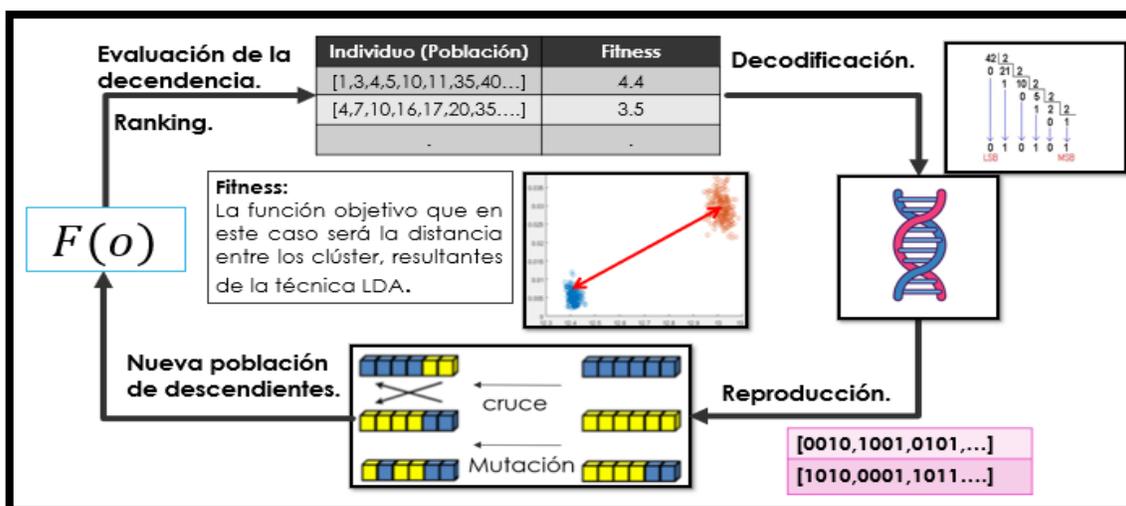


Figura 24 Diagrama de flujo que fue aplicado en la optimización de selección de los indicadores estadísticos, mediante Algoritmo Genético, (autoría propia).

### 3.6.3 Clasificador Neuronal

Una vez identificados los mejores indicadores estadísticos para cada señal del sistema y aplicada la reducción de la dimensionalidad, se procede a utilizar un clasificador neuronal (Figura 17), el cual estará basado en tres capas, donde la capa de entrada estará compuesta por 2 neuronas que recibirán la proyección generada mediante la técnica LDA y en la capa oculta contendrá 10 neuronas que son las recomendadas en varios trabajos clásicos de clasificación neuronal (Saucedo-Dorantes et al., 2021). Finalmente, la capa de salida estará conformada por 4 neuronas que representan las 4 condiciones que se busca clasificar: “Limpio”, “Ligera capa de polvo”, “Moderada capa de polvo” y “Panel Roto”. Por lo que la totalidad de la metodología a aplicar se muestra en la Figura 25.

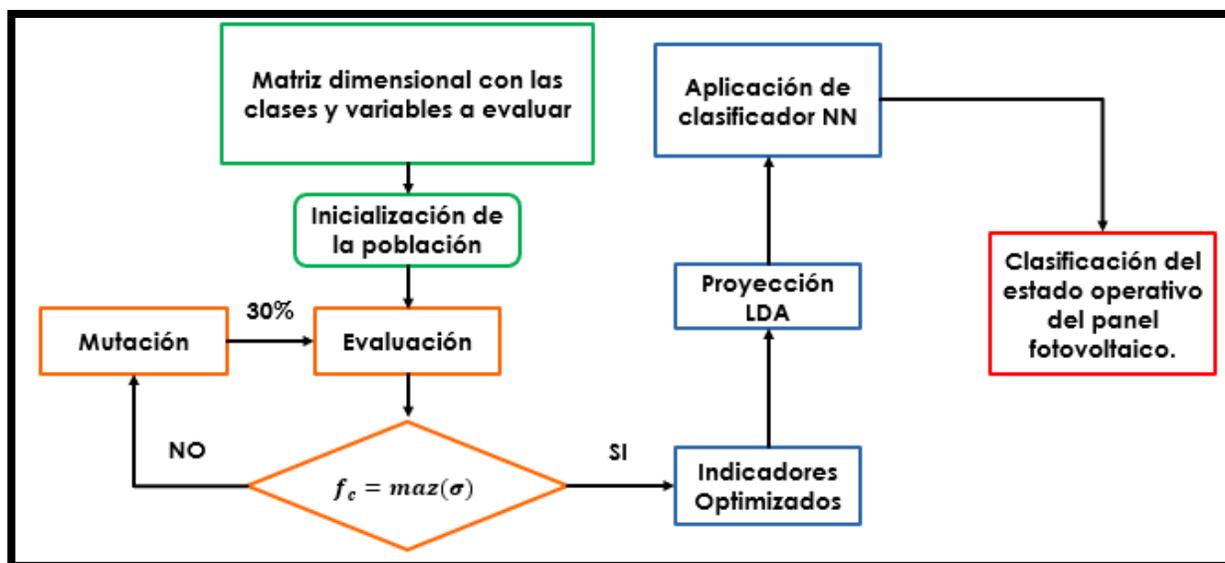


Figura 25 Diagrama de flujo para algoritmo genético, basado en la optimización de indicadores mediante la técnica LDA, complementado mediante clasificador NN, (autoría propia).

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Puesta del banco de pruebas

El banco de pruebas fue instalado físicamente en el campus Tequisquiapan a un costado del edificio CATAS, la ubicación geográfica se muestra en la Figura 26 (a), en esta área geográfica se tienen las características mostradas en la Figura 26 (b).

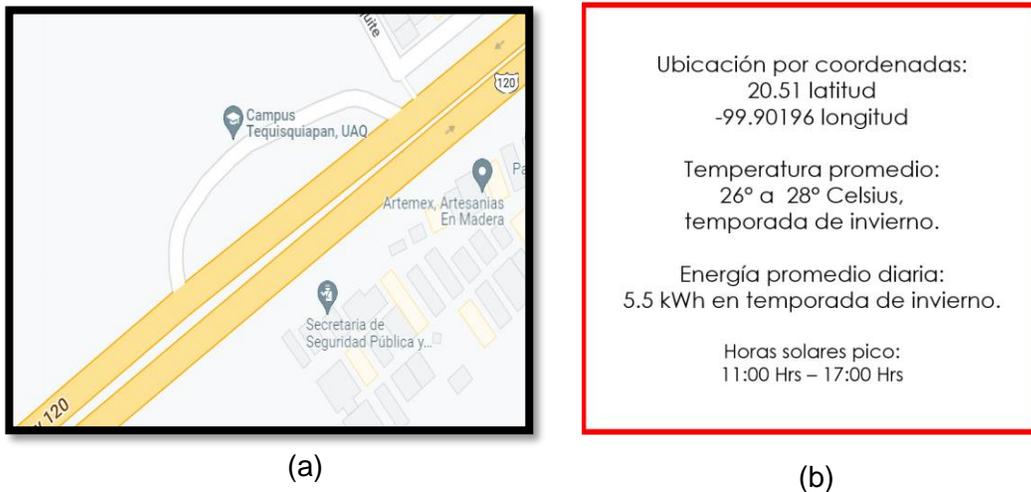


Figura 26 Ubicación Geográfica del banco de pruebas, características geográficas del área, (autoría propia).

Una vez que se comprobó el área de instalación, se procedió a realizar la colocación de la estructura como se muestra en la Figura 27 (a). Del mismo modo se instaló una base de concreto para poder instrumentar correctamente el sistema Figura 27 (b). Posteriormente se diseñó la base para poder colocar el sensor de irradiancia y temperatura que se utiliza a lo largo de las pruebas Figura 28 (a). Una vez terminada la instalación de la plancha de concreto, fue necesario la colocación de registros y protecciones térmicas para los cables de alimentación hacia el sistema de monitoreo, esto como se muestra en la Figura 28 (b).

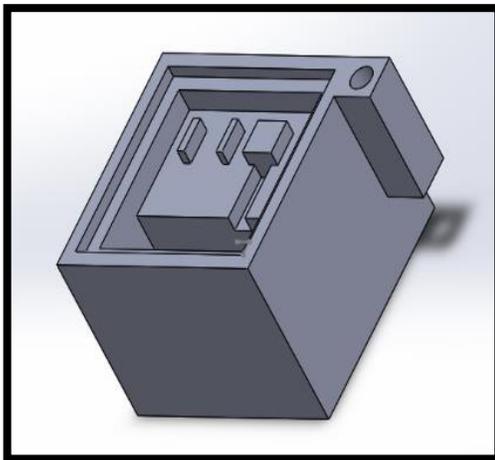


(a)



(b)

Figura 27 Instalación de banco de pruebas en lugar designado por Asesor del proyecto, (autoría propia).



(a)



(b)

Figura 28 Diseño de base de sensor de irradiancia e instalación de registros y base de concreto para instalación de equipos, (autoría propia).

Ya instalada la base metálica para sostener los paneles fotovoltaicos cuyos datos eléctricos se observan en la Tabla 3, así como todos los accesorios para la correcta instalación de los equipos eléctricos y electrónicos se procedió a realizar las pruebas de funcionamiento del sistema para comprobar la correcta operación de este, esto como se muestra en la Figura 29.



Figura 29 Instalación física del banco de pruebas para sistema fotovoltaicos, (autoría propia)

Realizadas las comprobaciones al sistema se procedió a realizar las pruebas de los paneles fotovoltaicos ante las 4 condiciones a evaluar. Figura 30 (a) Sistema con acumulación leve de polvo en superficie. Figura 30 (b) Sistema con acumulación moderada de polvo en superficie, Figura 30 (c) Sistema con un panel roto.

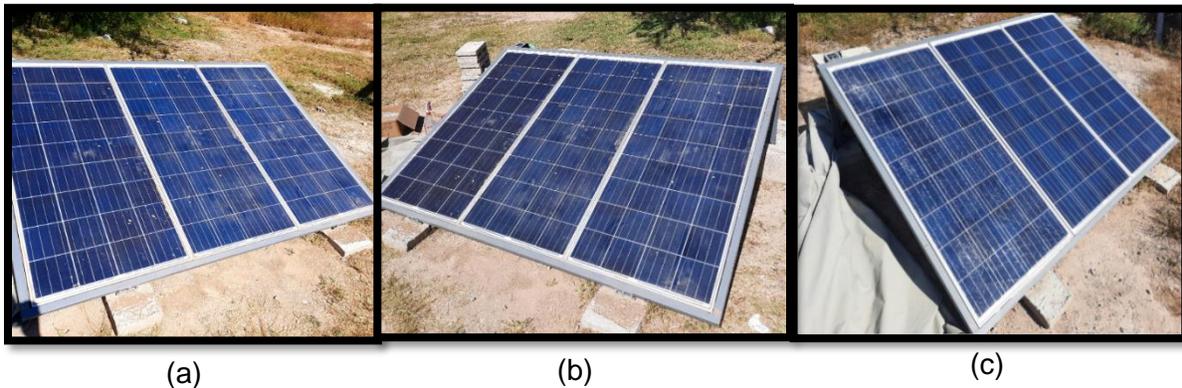


Figura 30 Prueba de los sistemas ante las diferentes condiciones a evaluar, (autoría propia).

En la realización de las pruebas se aplicó una capa de polvo lo más uniforme posible sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos, en las pruebas de ligera capa de polvo se recogió 4 gramos de polvo y se distribuyó en la superficie que tiene el panel instalado Kyocera con una superficie de  $0.929 \text{ m}^2$  por lo cual quedaría una densidad promedio de  $3 \text{ g/m}^2$  y en el caso de acumulación moderada se aplicaron en promedio 8 gramos para dar una densidad promedio de  $6 \text{ g/m}^2$ . Que son las densidades que en anteriores estudios se mostraron como las densidades típicas sobre este tipo de

sistemas, esto como se muestra en la Figura 31.

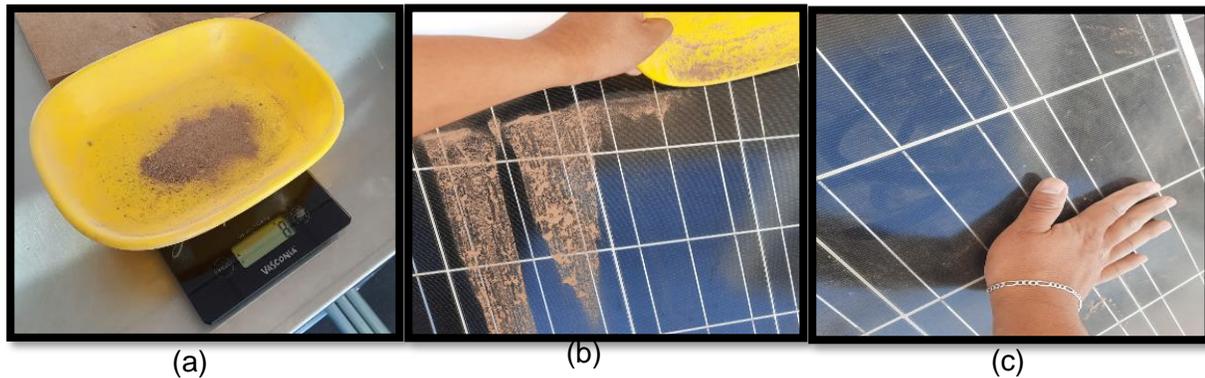


Figura 31 Preparación y aplicación de capa de polvo, que será aplicada a los paneles fotovoltaicos, (autoría propia).

#### 4.2 Adquisición y procesamiento de datos

A continuación, se muestran las comparaciones de las señales eléctricas obtenidas de los sistemas que serán sometidos a las 3 condiciones de falla, esta prueba tendrá una duración de 10 min, y se cuenta con un total de 10,000 muestras por prueba. En esta comparación se muestran las adquisiciones de datos, que fueron adquiridas en el banco de pruebas y fueron sometidos a la metodología descrita por el diagrama de la Figura 25.

- Figura 32 Limpio vs Ligera acumulación de polvo.
- Figura 33 Limpio vs Moderada acumulación de polvo.
- Figura 34 Limpio vs Panel Roto.

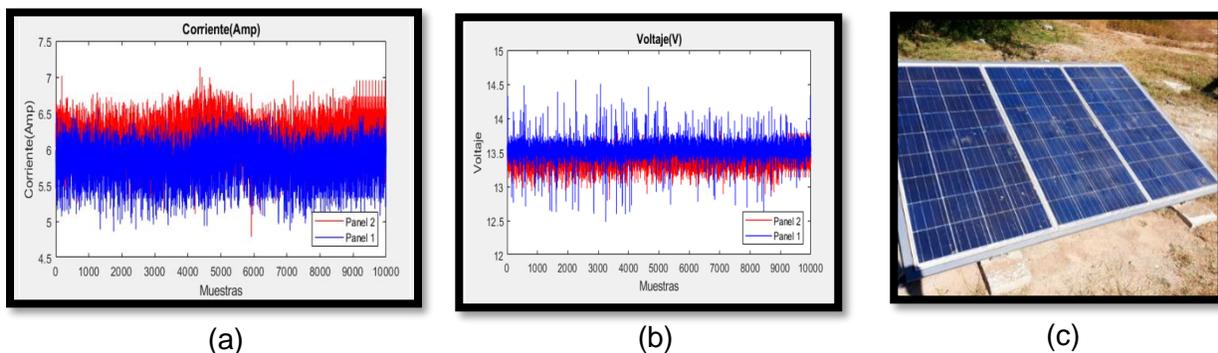


Figura 32 Señales adquiridas a) voltaje, b) corriente y c) sistema, comparando condiciones del sistema limpio color azul y sistema con leve acumulación de polvo color rojo, (autoría propia).

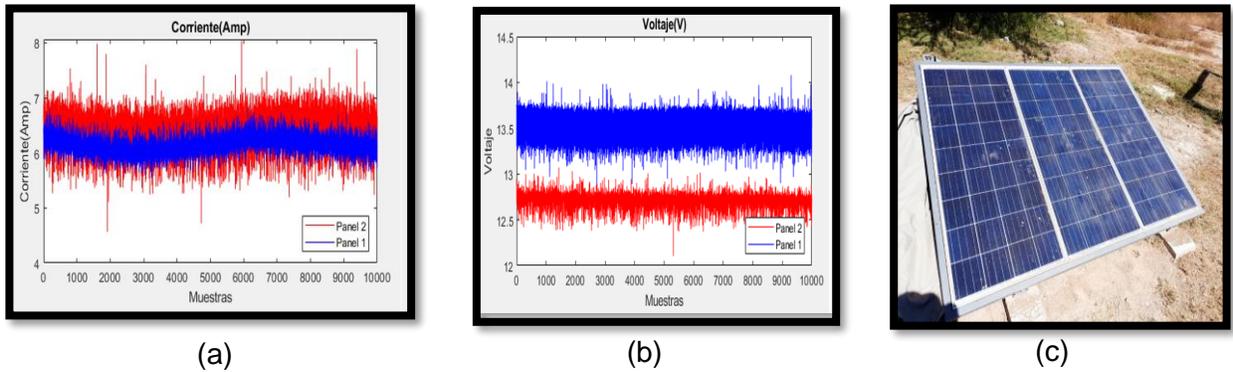


Figura 33 Señales adquiridas a) voltaje, b) corriente y c) sistema, comparando condiciones del sistema limpio color azul y sistema con moderada acumulación de polvo color rojo, (autoría propia).

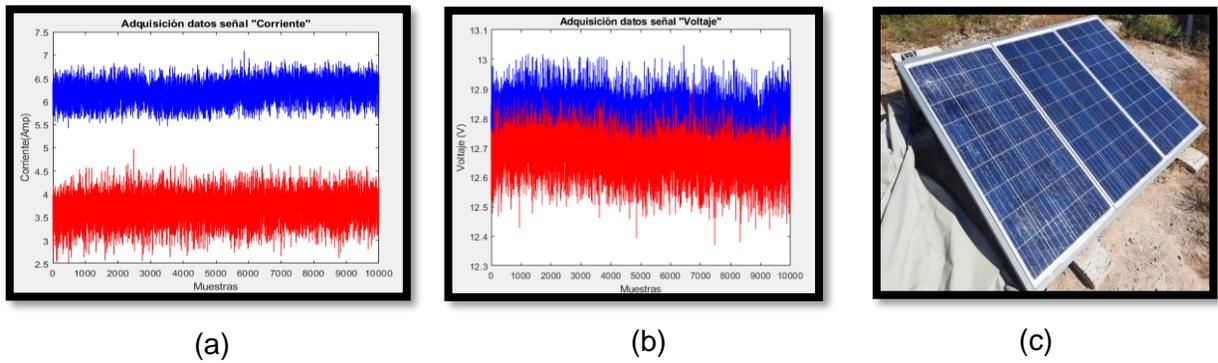


Figura 34 Señales adquiridas a) voltaje, b) corriente y c) sistema, comparando condiciones del sistema limpio color azul y sistema con moderada acumulación de polvo color rojo, (autoría propia).

Estas pruebas fueron realizadas bajo las condiciones ambientales y de acumulación de polvo que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 Características ambientales y físicas con las cuales se llevó a cabo la experimentación.

Consideraciones ambientales	Consideraciones físicas
Las pruebas se realizarán en el rango de temperatura de 26°C a 28°C. Temporada de invierno.	Leve acumulación de polvo: Concentración de $4 \text{ g/m}^2$
El equipo tendrá una inclinación de 23°.	Leve acumulación de polvo: Concentración de $8 \text{ g/m}^2$
Se realizarán las pruebas en horario solar pico: 11:00 hrs a 15:00 hrs.	Para la prueba de panel roto se instalará un módulo con ruptura de cristal en el sistema.

#### 4.3 Resultados de la evaluación de la condición de falla ante metodología desarrollada

Una vez obtenidos los valores por cada una de las señales tanto de potencia como ambientales para cada uno de los paneles, se procedió a realizar el análisis estadístico por medio de ventanas de datos, como se mencionó en la sección de metodología. Por lo tanto, se aplican los 15 diferentes operadores estadísticos obteniendo una matriz de 208x15 datos, por clase y variable en la que se realizará el análisis. Esto como se muestra en la Figura 22, con lo cual se concatenan las 4 variables voltaje, corriente, temperatura e iluminación y las 4 clases para dar como resultado una matriz de **208x60** indicadores.

Ya con la matriz de 208x60 que contendrá 1 clase y 4 variables, es necesario concatenar las cuatro clases o condiciones a evaluar: Limpio, ligera acumulación de polvo, moderada acumulación de polvo y panel roto. Con esto se genera una matriz de 832X60 indicadores y se procede al procesamiento mediante el algoritmo genético desarrollado con el cual se planea encontrar la mejor combinación de indicadores para cada una de las condiciones de falla. Un ejemplo de este proceso se muestra en la Figura 24. Por lo cual, siguiendo la metodología desarrollada en la Figura 25, se obtienen los siguientes indicadores optimizados mediante el algoritmo genético que tienen las siguientes configuraciones, según lo que se muestra en la Tabla 5. Y una vez aplicada esta configuración, la metodología nos generó el vector de indicadores que se muestra en la Tabla 6.

Tabla 5 Configuración de algoritmo genético, con el que se obtuvieron los resultados.

Configuración de Algoritmo Genético	
<b>Generaciones</b>	200
<b>Población Inicial</b>	100
<b>Longitud de Cadena binaria</b>	40
<b>Probabilidad de Mutación</b>	30%
<b>Probabilidad de elección de descendencia</b>	50%

Tabla 6 Datos estadísticos generados mediante la aplicación desarrollada (Figura 25), con configuración en el algoritmo genético (Tabla 5), (autoría propia).

Tabla de correspondencia Indicadores Estadísticos						
Vector Optimizado		2,4,5,7,9,10,12,13,14,15,16,17,20,22,24,25,26,27,28,29,33,34,37,38,39,41,43,44,45,47,48,49,50,51,54,56,57,58.				
Indicadores Estadísticos		Voltaje	Corriente	Temperatura	Irradiancia	%
1	Media del valor Absoluto		1			25%
2	Valor máximo	2	2		2	75%
3	Raíz cuadrada de la media RMS			3	3	50%
4	El cuadrado de la raíz de la media SRM	4		4	4	75%
5	Desviación Estándar	5	5		5	75%
6	Varianza				6	25%
7	Factor de forma RMS	7	7	7		75%
8	Factor de forma SRM			8		25%
9	Factor Cresta	9	9	9	9	100%
10	Factor Latitud	10	10			50%
11	Factor Impulso		11	11	11	75%
12	Skewness	12	12		12	75%
13	Kurtosis	13	13	13	13	100%
14	Quinto momento	14	14	14		75%
15	Sexto momento	15		15		50%

Cada indicador estadístico aporta un porcentaje como se puede visualizar en la Figura 35. Esta nos ayuda a visualizar de manera más cómoda la aportación o en cuales variables (voltaje, corriente, temperatura e irradiancia), estos indicadores estadísticos hicieron un impacto en la implementación de la técnica LDA.

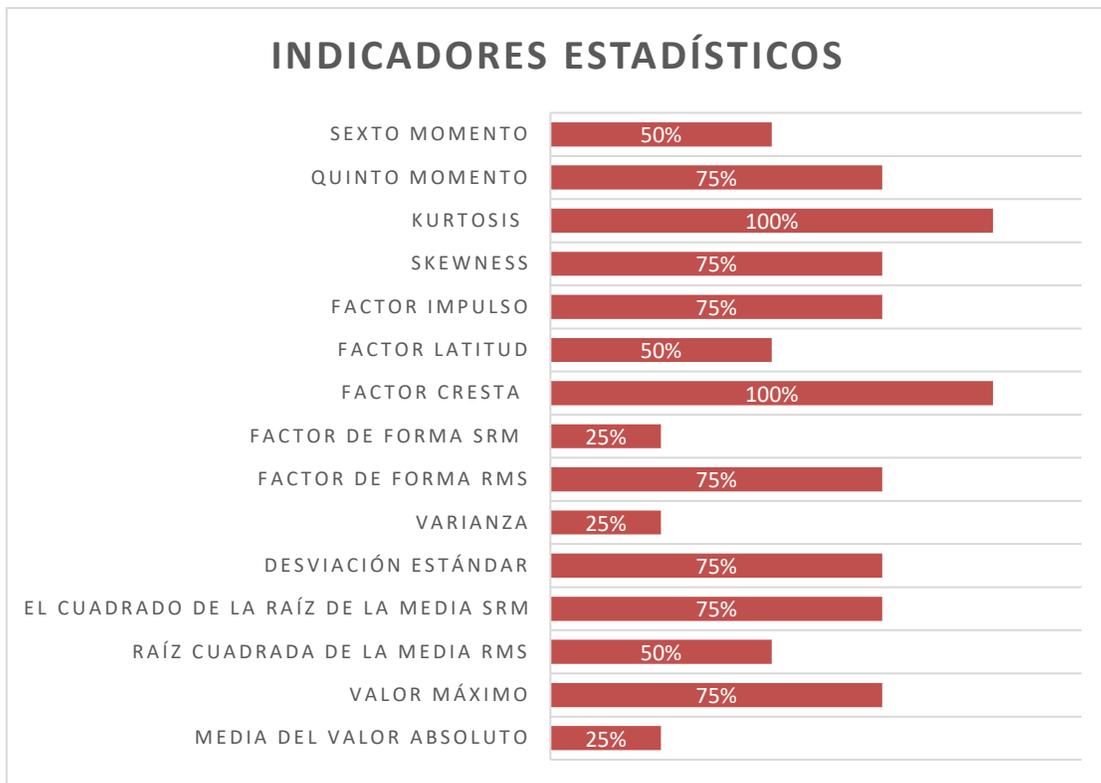


Figura 35 Aportación en porcentaje por cada uno de los indicadores evaluados., (autoría propia).

Seguendo el diagrama de la metodología (Figura 25), se aplicó el vector optimizado y el resultado se muestra en la Figura 36 (b), que ilustra la proyección generada por la técnica LDA, la cual contiene el 63.33% de los datos totales obtenidos de las cuatro clases a evaluar. Por lo que se podría intuir que la aplicación de esta metodología ha reducido la cantidad y mejorado la calidad de los datos procesados que de igual manera como se ilustra en la Figura 36 (a), cuando se ingresan los indicadores sin optimizar los 60 indicadores por lo que las clases se enciman entre sí lo que dificulta la clasificación de estas al aplicar la red neuronal. En esta comparación es posible observar de manera gráfica la mejora que existe al realizar la metodología Figura 36 (b), al seleccionar los mejores indicadores para cada una de las variables, y el resultado observado es evidente, ya que se distinguen cada una de las clases y sus diferencias entre sí, a simple vista.

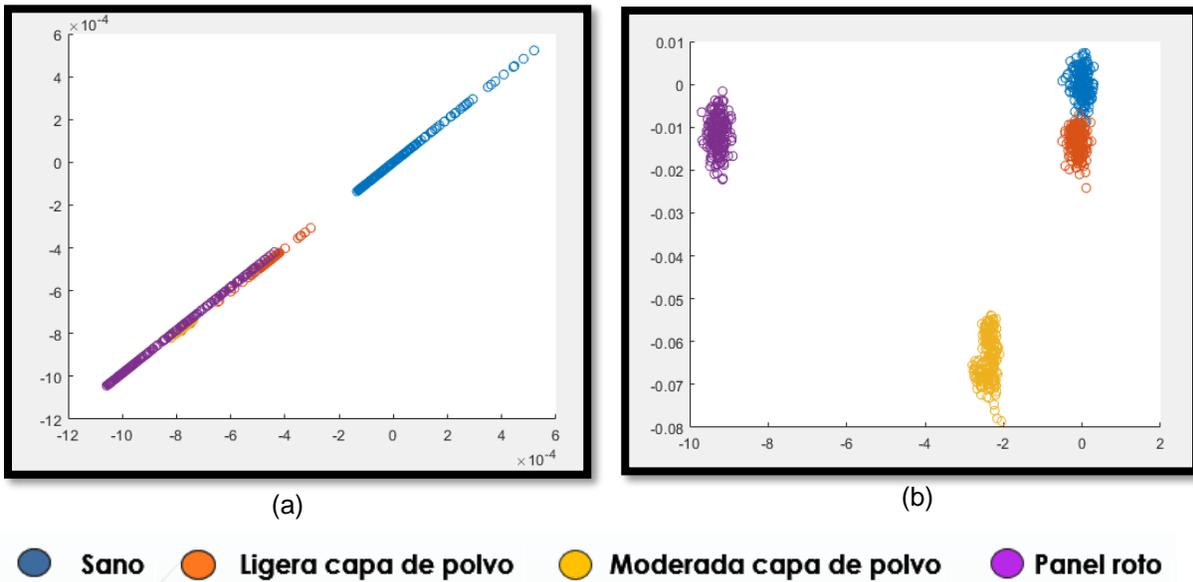


Figura 36 Proyecciones generadas mediante técnica LDA, a) Proyección generada con matriz 832X60, b) Proyección generada con matriz 832X38 "optimizada mediante metodología", (autoría propia).

Según lo que se muestra en la metodología (Figura 25), la proyección que resultó del proceso de optimización del algoritmo genético es la que fue evaluada en el clasificador neuronal para realizar el entrenamiento de la red neuronal, en la cual se integrará la estructura interna descrita en la Figura 37.

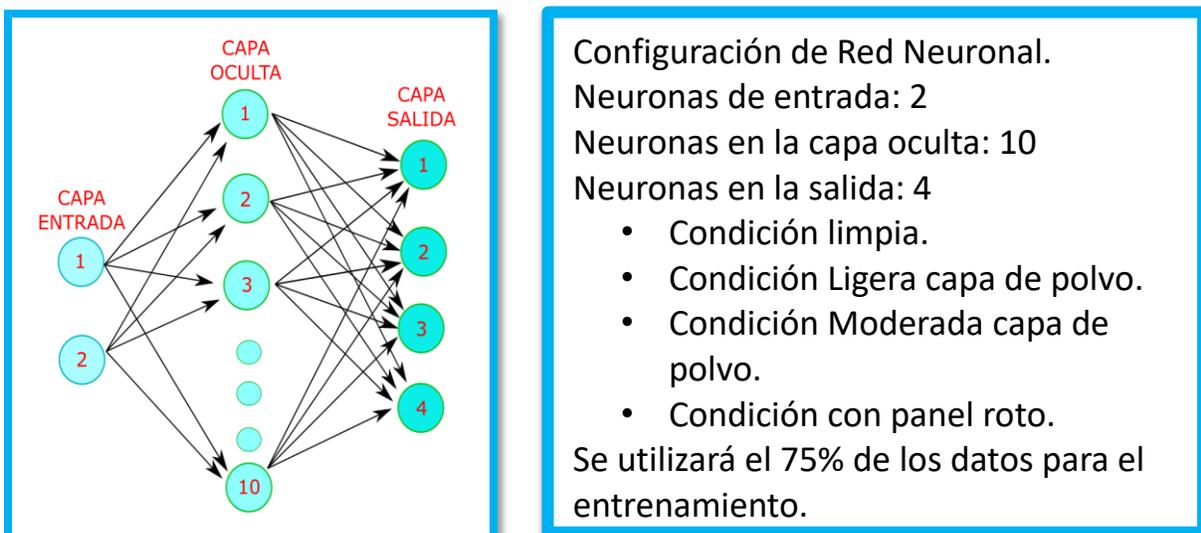


Figura 37 Configuración de Red neuronal, (autoría propia).

Dicha estructura consiste en 2 neuronas en la entrada, 10 neuronas en la capa oculta, según las recomendaciones de diversos trabajos realizados para la clasificación de datos, y 4 neuronas en la capa de salida, que representan cada uno de los estados evaluados a lo largo de este trabajo. Los resultados de la clasificación de los datos obtenidos mediante la proyección de la selección de indicadores de la matriz 832x38 se muestra a continuación en la Figura 38 (b) y en la Figura 38 (a) se muestran los resultados obtenidos de la aplicación del clasificador a la proyección obtenida de los datos en su totalidad 832x60 sin ningún tipo de optimización.

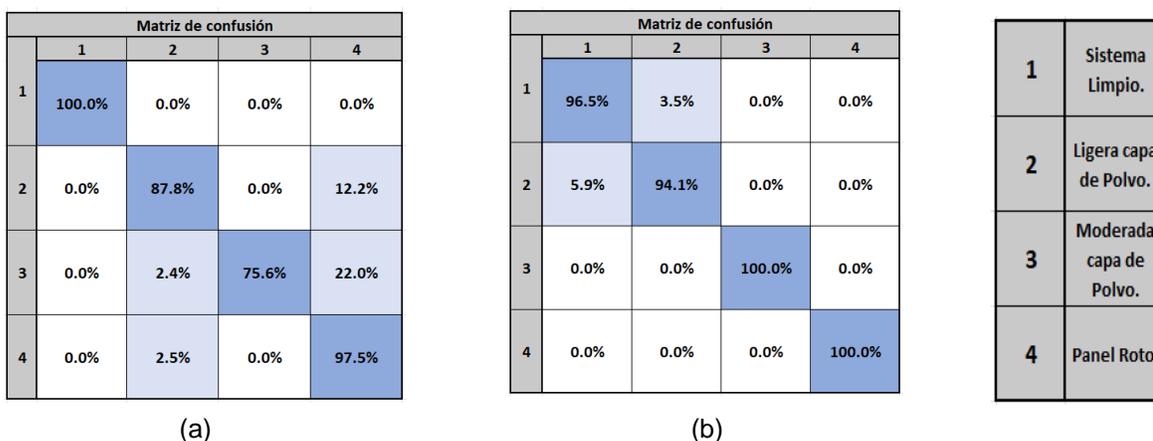


Figura 38 Matriz de confusión obtenida por la red neuronal, a) Tabla de confusión obtenida mediante matriz 832X60. b) Tabla de confusión obtenida mediante matriz 832X38, (autoría propia).

En las matrices de confusión obtenidas se pueden observar diferentes comportamientos, dependiendo de la calidad de datos con las cuales fueron creadas, en el caso de la clasificación con los datos optimizados, se observa que en las condiciones “(3) Moderada acumulación de polvo” y “(4) Panel Roto” un porcentaje del 100% de acierto en la clasificación y en la “(2) Leve acumulación de polvo” y “(1) Sistema Limpio” un porcentaje mayor al 90% que nos indica una confiabilidad mayor en el conjunto del 97.5%. Y en la zona que se muestra confusión es por la misma naturaleza del sistema, que en estas condiciones se encuentran muy cercanas entre ellas como se muestra en la (Figura 33, a, b) señal azul y naranja, que muestran un comportamiento muy similar entre ellos. En el caso de la matriz de confusión (Figura 38, a), que fue generada con la totalidad de índices estadísticos de las 4 variables,

se observan valores sobre el 95% en las condiciones “(1) Panel Limpio” y “(4) Panel Roto”, sin embargo, el margen de error es bastante alto en las dos “Ligera acumulación de polvo” y “Moderada acumulación de polvo” que pueden tener altos porcentajes de error llegando hasta el **22.0%** en algunos casos. Lo que este tipo de errores en la clasificación entre fallas puede confundir al usuario y perder la confianza que pueda generar al entregar un diagnóstico erróneo. Es por ello por lo que la metodología deberá ser robusta y se comprobó con los casos que se muestran en la Figura 39, en la cual se somete el sistema saludable ante una señal que tuvo la afectación por una nube en los primeros 2 minutos de la prueba, mostrando las siguientes respuestas en voltaje (Figura 39, a), corriente (Figura 39, b), Irradiancia (Figura 39, c) y temperatura (Figura 39, d).

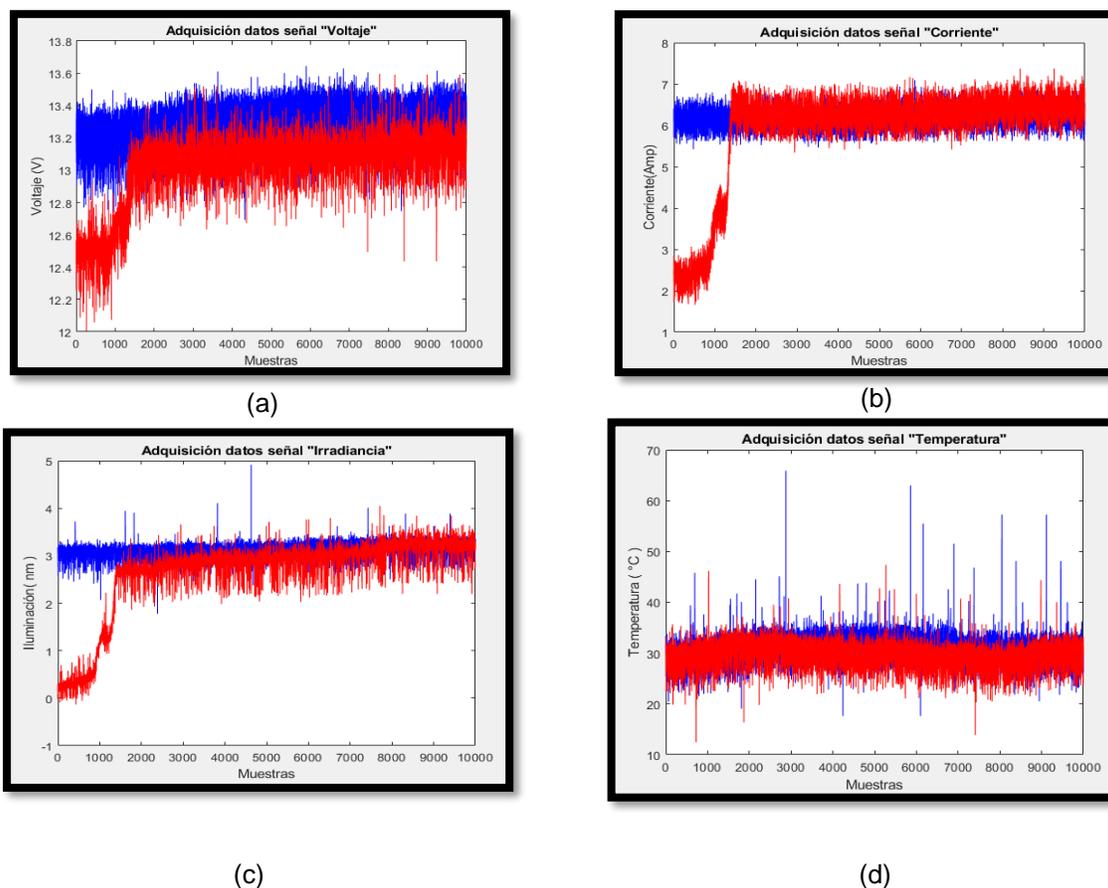


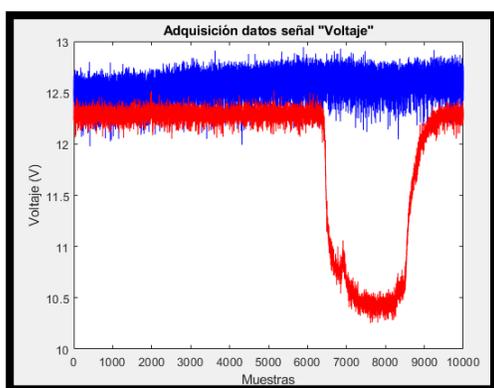
Figura 39 Respuesta de sistema “saludable/Limpio” ante afectación “Nube”, ante cada uno de los sensores instalados para el monitoreo del sistema, (autoría propia).

Para realizar la evaluación de la metodología se generó la proyección del nuevo estado con la perturbación Figura 39, la cual se evaluó ante la red neuronal ya entrenada (Figura 38, b), para poder comprobar la clasificación de este nuevo estado el cual fue clasificado en un 86% en Sistema limpio Tabla 7 . Demostrando que la metodología es robusta, esto al obtener un gran porcentaje de acierto aun ante una perturbación importante en 3 de las señales que componen al sistema en su conjunto.

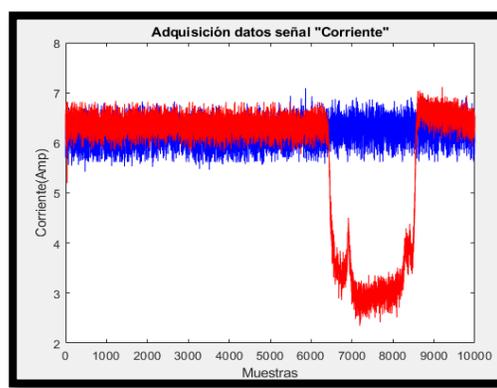
Tabla 7 Respuesta de clasificación ante una condición de falla con ruido.

Matriz de confusión "ANTE NUEVA CONDICIÓN"				
	1	2	3	4
1	86.0%	6.2%	6.7%	1.4%

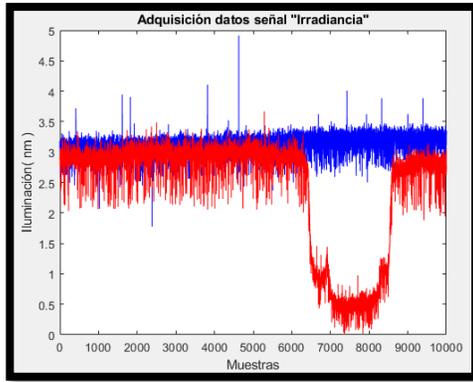
Dentro de este mismo ámbito se probó nuevamente el sistema ante una entrada con una mayor cantidad de perturbación en este caso una serie de obstrucciones por nubes. El sistema se encontraba en condiciones moderadas de acumulación de polvo, como se muestra en la Figura 40.



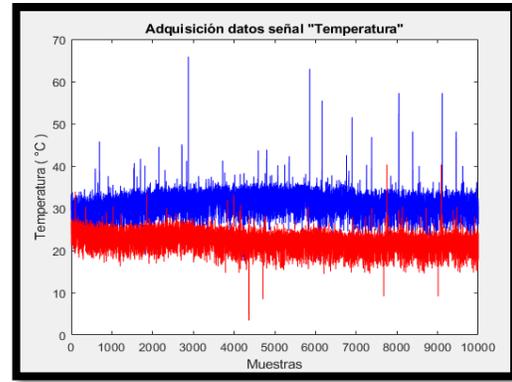
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 40 Respuesta de sistema “Moderada acumulación de polvo” ante afectación “Nube constante”, ante cada uno de los sensores instalados para el monitoreo del sistema, (autoría propia).

Se realizó el mismo procedimiento que en la comprobación de la perturbación anterior y se comprobó que la metodología obtuvo un buen porcentaje de acierto aun teniendo en cuenta el nivel de ruido en tres de las señales que lo componen Tabla 8. Por lo que se puede confirmar que la metodología es lo suficientemente robusta y se adapta a las condiciones climatológicas entregando clasificaciones acertadas.

Tabla 8 Respuesta de clasificación ante perturbación de la señal

Matriz de confusión "ANTE NUEVA CONDICIÓN"				
	1	2	3	4
1	32.0%	67.0%	0.0%	0.0%

La metodología desarrollada entregará al usuario las siguientes indicaciones/ recomendaciones según la condición en la que se encuentre el sistema.

1. Condición Óptima: El sistema no requiere ningún tipo de acción se encuentra trabajando en condiciones normales.
2. Condición ligera acumulación de polvo: El sistema requiere limpieza y es necesario programar limpieza en los próximos días.
3. Condición moderada acumulación de polvo: El sistema requiere limpieza y es necesario programar limpieza inmediata.

4. Condición panel roto: El sistema requiere atención inmediata, se recomienda cambio de la unidad dañada.

El sistema al dar una recomendación “Indicación”, en lugar de un dato estadístico o porcentaje en pérdida en la eficiencia asegura una mejor acción por parte del usuario al eliminar una incorrecta interpretación de un porcentaje y/o indicador numérico de pérdida y evitando la negligencia por parte del usuario al subestimar el indicador por falta de información respecto a la correcta operación de un sistema fotovoltaico. La respuesta del sistema se muestra en la Figura 41, en la cual se muestra la respuesta obtenida al ingresar un sistema en condiciones con “Ligera acumulación de polvo”.

```
In [32]: runfile('C:/Users/epa_g/Desktop/MAESTRIA/Tesis/Archivos texto/
Pruebas_tesis/Pruebas buenas/Programas Finales/Finales comparacion/Pyton/
Analisis_Se.py', wdir='C:/Users/epa_g/Desktop/MAESTRIA/Tesis/Archivos texto/
Pruebas_tesis/Pruebas buenas/Programas Finales/Finales comparacion/Pyton')
Reloaded modules: Func
2
Condición Ligera acumulación de polvo: El sistema requiere limpieza y es necesario
programar limpieza en los próximos días.
```

Figura 41 respuesta del software donde se desarrolló la metodología de identificación, (autoría propia).

#### 4.4 Conclusiones

La metodología desarrollada demostró la correcta identificación de fallas en los paneles fotovoltaicos, gracias a la combinación de técnicas cuya base se obtuvo mediante la aplicación de indicadores estadísticos a las diferentes señales. Con los que fue posible obtener la información más relevante y con la menor carga computacional, al ser operaciones no complejas y de fácil implementación, al compararse con algunas otras técnicas de procesamiento de señales. La técnica LDA permitió la combinación de señales como lo son voltaje, corriente, temperatura e iluminación, que a primera instancia no contienen una relación en sí y son de diferente naturaleza, pero al ser procesadas mediante la técnica LDA se obtuvo una reducción confiable que engloba las cuatro variables lo que permitió que aun en condiciones climatológicas variables y adversas obtener un diagnóstico confiable. La aplicación de una técnica heurística como lo son los algoritmos genéticos favoreció el desarrollo de una metodología adaptativa y robusta, que podrá obtener la mejor combinación

de indicadores estadísticos no importando la ubicación geográfica y ambiental donde se vaya a implementar obteniendo una configuración personalizada para cada locación. Por lo tanto, será posible una correcta interpretación de las condiciones en las que se encuentra actualmente el sistema, y gracias a la alta capacidad adaptativa es posible ofrecer un correcto diagnóstico para el usuario. Una de las desventajas que presenta la implementación de algoritmos genéticos con una técnica LDA como su función objetivo, son los altos consumos computacionales que se requieren en su implementación, ya que al procesar la información de las cuatro variables y sus posibles combinaciones representan un cálculo matemático que demanda una cantidad considerable de recursos computacionales lo que limita en este momento la implementación de esta metodología a microprocesadores de baja capacidad. Pero esto se compensa ya que la metodología desarrollada, que combina las 4 señales más importantes en el comportamiento de un sistema fotovoltaico podrá ser utilizado para la identificación de nuevas fallas, sin necesidad de modificar el algoritmo en sí, con el simple hecho de adquirir la información de la nueva falla que, por ejemplo: daño en diodos, falso contacto, sombras sobre el panel, suciedad por aves, cortos circuitos internos en las celdas, etc. Con esta información será posible incrementar la capacidad de detección del sistema que esté integrado con la metodología haciéndolo cada vez más robusto sin la necesidad de modificar la metodología en sí. Otra de las ventajas es que podrá ser implementado en sistemas que ya cuenten con los datos de adquisición de estas cuatro señales sin necesidad de cambiar o modificar los sensores, ya que podrá ser aplicado directamente a estas señales. Lo que abre inmensamente la aplicación tanto en la industria como en el campo doméstico. Que, a su vez, al ser desarrollada en un software de carácter libre permitirá un mayor acceso por parte de la población y posible implementación de esta.

### Referencias Bibliográficas

Abderrezek, M., & Fathi, M. (2017). Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield. *Solar Energy*, 142, 308–320. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.040>

Adinoyi, M. J., & Said, S. A. M. (2013). Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 60, 633–636. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.014>

Aguilar, M. A. S. (2004). *Construcción e interpretación de indicadores Estadísticos*. (Lima, Juni). INEI. [https://issuu.com/matilez/docs/construccion\\_e\\_interpretacion\\_de\\_in](https://issuu.com/matilez/docs/construccion_e_interpretacion_de_in)

Al-hasan, A. Y., & Ghoneim, A. A. (2005). A new correlation between photovoltaic panel's

efficiency and amount of sand dust accumulated on their surface. *International Journal of Sustainable Energy*, 24(4), 187–197. <https://doi.org/10.1080/14786450500291834>

Botero-Valencia, J. S., Sánchez-Giraldo, L. G., & Delgado-Trejos, E. (2009). Clasificador no Lineal Basado en Redes Neuronales con Funciones de Base Radial para Implementación en Sistemas de Punto Fijo. *TecnoLógicas*, 22, 11. <https://doi.org/10.22430/22565337.223>

Cárdenas, V., Álvarez, R., & González, M. (2019). Inversores inteligentes en sistemas de energía solar fotovoltaica. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 24–29.

CATA SANCHEZ, J. E., & RODRIGUEZ SÓCOLA, F. M. (2015). Análisis Matemático De Un Panel Solar Fotovoltaico De Silicio. *Tesis Previa a La Obtencion Del Titulo De Ingeniero Eléctrico*, 113. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10250/1/UPS-GT001338.pdf>

De la Fuente, S. (2008). Análisis de Conglomerados (Análisis Cluster). *Técnicas de Análisis Multivariante de Datos*, 14.

Dhimish, M., Holmes, V., & Mehrdad, B. (2016). Grid-connected PV monitoring system (GCPV-MS). *4th International Symposium on Environment Friendly Energies and Applications, EFEA 2016*. <https://doi.org/10.1109/EFEA.2016.7748772>

El-Shobokshy, M. S., & Hussein, F. M. (1993). Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. *Solar Energy*, 51(6), 505–511. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90135-B](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90135-B)

Fernando Sancho Caparrini. (2019). Algoritmos Genéticos. *NetLogo*. <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=65>

Flores, N., & Domínguez, M. (2017). “ Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio .” *Centro de Investigación En Materiales Avanzados, S.C. Posgrados*, 84. [https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/215/1/Tesis MER Norma Rosario Flores Rivera y Mioguel Ángel Dominguez Ramírez.pdf](https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/215/1/Tesis%20MER%20Norma%20Rosario%20Flores%20Rivera%20y%20Miguel%20Ángel%20Dominguez%20Ramírez.pdf)

Guide, P. (2005). *A Practical Guide for UV sensor Application*.

Gupta, V., Sharma, M., Pachauri, R. K., & Dinesh Babu, K. N. (2019). Comprehensive review on effect of dust on solar photovoltaic system and mitigation techniques. *Solar Energy*, 191(May), 596–622. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.079>

Hottel, H; Woertz, B. (1942). Performance of flat-plate solar-heat collectors. *Trans.ASME (AM.SOC.MECH.ENG)*, 64(Performance of solar plate collectors).

INNTecsol. (2022). *No Title*. ¿Cuáles Son Los Componentes de Los Paneles Solares? <https://www.inntecsol.mx/energia-solar/componentes-paneles-solares/>

Jacobson, M. Z., & Delucchi, M. A. (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*, 39(3), 1154–1169. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.040>

Javier Vilariño García, D. H. F. M.-M. (2017). Análisis estadístico del índice de relación de comportamiento del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica. *SCIELO*. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852017000200005](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852017000200005)

Jha, A., & Tripathy, P. P. (2019). Heat transfer modeling and performance evaluation of photovoltaic system in different seasonal and climatic conditions. *Renewable Energy*, 135, 856–865. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.032>

Kaldellis, J. K., Fragos, P., & Kapsali, M. (2011). Systematic experimental study of the pollution deposition impact on the energy yield of photovoltaic installations. *Renewable Energy*, 36(10), 2717–2724. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.004>

LM35. (2017). LM35 Precision centigrade temperature sensors. Retrieved September 13th, November, 1–13. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>

Mani, M., & Pillai, R. (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3124–3131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>

Martí Cunqueiro, R. (2007). Algoritmos Heurísticos en Optimización Combinatoria. *Mdereg1-Fercarpetass.Googlecode*. ..., 1–27. <http://yalma.fime.uanl.mx/~roger/work/teaching/mecbs5122/1-Introduction/Intro-by-RafaMarti.pdf>

Martinez, F. J. U. S. J. (2006). *Más allá del cambio climático: las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global*. (Del deport). <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=vvUoRldp2nkC&oi=fnd&pg=PA13&dq=cambio+ambiental+global&ots=VIViZDL2Rv&sig=I6W4E3ptoRbpSAb1ZEPee3bgFUE#v=onepage&q&f=false>

Mekhilef, S., Saidur, R., & Kamalisarvestani, M. (2012). Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2920–2925. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.012>

Memiche, M., Bouzian, C., Benzahia, A., & Moussi, A. (2020). Effects of dust, soiling, aging, and weather conditions on photovoltaic system performances in a Saharan environment—Case study in Algeria. *Global Energy Interconnection*, 3(1), 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2020.03.004>

Microsystems, A. (2017). *High Accuracy , Dual Fault , Galvanically Isolated Current Sensor in SOIC16 Widebody Package ACS720 High Accuracy , Dual Fault , Galvanically Isolated*. 1–26.

Oozeki, T., Yamada, T., Otani, K., Takashima, T., & Kato, K. (2010). An analysis of reliability in the early stages of photovoltaic systems in Japan. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 18(5), 363–370. <https://doi.org/10.1002/pip.925>

Pérez, L. M. A., Flores, J. A. de L., & Antonio, C. G. (2019). *Estrategia para la optimización de la generación distribuida con paneles fotovoltaicos en la ciudad de Santiago de Querétaro* (pp. 1–90).

Said, S. A. M. (1990). Effects of dust accumulation on performances of thermal and photovoltaic flat-plate collectors. *Applied Energy*, 37(1), 73–84. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(90\)90019-A](https://doi.org/10.1016/0306-2619(90)90019-A)

Salari, A., & Hakkaki-Fard, A. (2019). A numerical study of dust deposition effects on photovoltaic modules and photovoltaic-thermal systems. *Renewable Energy*, 135, 437–449. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.018>

Santhakumari, M., & Sagar, N. (2019). A review of the environmental factors degrading the performance of silicon wafer-based photovoltaic modules: Failure detection methods and essential mitigation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110(June 2018), 83–100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.024>

Saucedo-Dorantes, J. J., Jaen-Cuellar, A. Y., Delgado-Prieto, M., Romero-Troncoso, R. de J., & Osornio-Rios, R. A. (2021). Condition monitoring strategy based on an optimized selection of high-dimensional set of hybrid features to diagnose and detect multiple and combined faults in an induction motor. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 178(April), 109404. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109404>

Saxena, A., & Mishra, S. K. (2013). Review of System Maintenance and Troubleshooting of Solar PV Grid Connected System. *International Journal of Emerging Science and Engineering*, 1(4), 67–68.

Solheim, H. J., Fjær, H. G., Sørheim, E. A., & Foss, S. E. (2013). Measurement and simulation of hot spots in solar cells. *Energy Procedia*, 38(1876), 183–189. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.266>

Sulaiman, S. A., Singh, A. K., Mokhtar, M. M. M., & Bou-Rabee, M. A. (2014). Influence of dirt accumulation on performance of PV panels. *Energy Procedia*, 50, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.006>

Valencia, P. E. (1997). Optimización mediante algoritmos genéticos. *Anales Del Instituto de Ingenieros de Chile*, Agosto, 83–92.

Vorobieb, P. (2006). *Diseño De Un Sistema De Orientación Automática Hacia El Sol, De Un Calentador Solar Plano Y Panel Fotovoltaico*. 69.

Xu, L., Li, S., Jiang, J., Liu, T., Wu, H., Wang, J., & Li, X. (2020). The influence of dust deposition on the temperature of soiling photovoltaic glass under lighting and windy conditions. *Solar Energy*, 199(November 2019), 491–496. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.036>