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

DETECCIÓN DE PUNTOS CALIENTES EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Dany Castrillón Ocampo

Ingeniería Electrónica

Asesoras

Bonie Johana Restrepo Cuestas

Mariana Durango Flórez

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2022

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

RESUMEN

En este trabajo se propone estudiar la detección de puntos calientes, en sistemas fotovoltaicos, mediante algunos métodos, que supervisan o diagnostican el comportamiento, de los paneles fotovoltaicos, ante la aparición de sombreados parciales, lo que genera la formación de puntos calientes. Estos métodos o técnicas de detección más utilizados para la prevención de estas formaciones son las curvas I-V, termografía y electroluminiscencia, se hace un estudio de cada una de las técnicas, y una vez conocidos los métodos de detección, y los equipos que se van a utilizar en el laboratorio del parque I, se procede a realizar pruebas experimentales, para comprobar el método confiable, eficiente y fácil de implementar para la detección de puntos calientes. De los resultados se puede concluir, que el método más confiable por temas de monitoreo y diagnóstico en los paneles fotovoltaicos, es por medio de curvas I-V, porque proporciona información un poco más detallada de posibles fallos en estos sistemas.

Palabras clave: Celda solar, Modulo solar, Paneles fotovoltaicos, Arreglos de paneles solares, Curva característica I-V, Puntos calientes, Sombreado parcial, Termografía, Curvas I-V, Electroluminiscencia, Energía solar.

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

RECONOCIMIENTOS

Primero quiero agradecerle a Dios por guiarme en este camino, en lo espiritual y sabiduría. Quiero agradecer a mi familia que me han brindado mucho de su apoyo, tanto en lo moral como en sus consejos, también quiero agradecer a mis asesoras como son las profesoras Bonie y Mariana que me han ofrecido su ayuda en mis dudas y desarrollo del proyecto y tenerme paciencia en mis errores.

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

ACRÓNIMOS

T Temperatura

FS Factor sombreado

Rs Resistencia en serie

Rp Resistencia en paralelo

Voc Voltaje de circuito abierto

Pmax Potencia máxima

Imp Corriente en el punto de máxima potencia

Vmp Voltaje en el punto de máxima potencia

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

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....
2.	MARCO TEÓRICO.....
3.	METODOLOGÍA
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO
	REFERENCIAS
	APÉNDICE.....

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

1. INTRODUCCIÓN

Los efectos del calentamiento global, la creciente demanda de energía eléctrica, la explotación de recursos no renovables y la contaminación, provocan un impacto significativo alterando el equilibrio del planeta. Para mitigar este problema se propone utilizar energías renovables, para mejorar la calidad de vida. Algunas de las energías renovables más usadas para la producción de energía eléctrica son la eólica, hidráulica, solar o fotovoltaico (PV), geotérmico, mareomotriz [1].

En este caso los sistemas PV son una de las fuentes de energía eléctrica más utilizadas ya que se basan en el efecto fotoeléctrico para la conversión de energía solar a eléctrica. Los paneles solares están formados por grupos de celdas solares que pueden maximizar la conversión de energía, y de esta forma obtener una cantidad mayor de energía generada.

En los sistemas PV surgen algunos inconvenientes como son las pérdidas de energía debido a condiciones que se presentan en el medio ambiente o por fenómenos naturales; sin embargo, es posible mitigar este problema. Como ejemplo se tiene, el sombreado parcial, el cual genera que la celda sombreada no tenga las mismas condiciones eléctricas, luego se percibe un consumo de energía en la celda. Esta situación eleva su temperatura, en algunos casos es tan alta que se generan puntos calientes, provocando que estas celdas solares no funcionen correctamente. Estas sombras se pueden producir por partículas de polvo, árboles, nubes y edificaciones.

En este trabajo se propone evaluar un método para la detección de puntos calientes en los sistemas PV, considerando tecnología de bajo costo y fácil implementación de tal forma que este procedimiento sea replicado a sistemas reales.

OBJETIVOS

General

Proponer un método para la detección de puntos calientes en sistemas PV utilizando tecnología de bajo costo y de fácil implementación.

Específicos

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

- Realizar una búsqueda del estado del arte, relacionado con la detección de puntos calientes en sistemas fotovoltaicos.
- Seleccionar una técnica para la detección de puntos calientes que considere elementos de bajo costo o equipos que se puedan utilizar en los laboratorios.
- Validar la técnica seleccionada a través de un caso de estudio.

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

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describen los conceptos y definiciones referentes a los puntos calientes.

En este trabajo se realizó un análisis con relación a la detección de puntos calientes en paneles fotovoltaicos, por lo que primero se realizó el estudio de conceptos relacionados con la temática. Dichos conceptos se describen a continuación.

Celda solar:

Las celdas PV comerciales por lo general están hechas de silicio puro con adición de impurezas de ciertos elementos químicos, dichos elementos pueden producir corriente eléctrica continua mediante el efecto fotoeléctrico, captando la energía que proporciona el sol y la convierte en electricidad; es decir, cuando hay luz solar una célula o celda solar se comporta casi como una batería. Por lo general, están constituidas por dos láminas delgadas y se pueden clasificar como tipo policristalino y monocristalino. Cada una de estas celdas son capaces de producir corrientes entre 2A y 4A, a un voltaje de 0.46V a 0.48V [5].

Modulo solar:

Un módulo solar PV se construye al ensamblar varias celdas PV en serie, para aumentar el voltaje total generado por dichas celdas. Los módulos se ensamblan hasta lograr obtener un voltaje nominal de trabajo típico, por lo que se utiliza generalmente el estándar en las industrias, 36 celdas que están conectadas en serie para producir un módulo fotovoltaico de unos 21V aproximadamente [15].

Paneles fotovoltaicos:

Un panel solar se construye al conectar en paralelo varios módulos PV; con la intención de sumar la corriente que produce cada módulo, y así aumentar la potencia total producida por estos componentes, sin variar el voltaje nominal de trabajo. [6].

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

Arreglos de paneles solares:

Una celda PV produce un voltaje inalterable muy pequeño, que es fijado por las propiedades física del material con el cual se construye la celda, un panel PV produce un voltaje de salida total, que se considera nominal para muchas aplicaciones, pero igualmente hay límites a la potencia eléctrica, es por eso que recurrimos a estructuras más grandes como son los arreglos PV. En un arreglo PV se conectan paneles en serie-paralelo para producir cada vez mayores cantidades de voltajes y/o corrientes, y por ende mayores potencias eléctricas. El arreglo PV es lo que necesitamos cuando nuestro proyecto intenta abastecer el consumo eléctrico de un hogar u oficina [20].



Figura 1. Imagen de la nomenclatura de los sistemas PV [21].

Curva característica I-V de un panel PV:

La curva característica de un panel PV o también llamada curva de intensidad-voltaje, se encuentra constituida como la suma de voltajes y corrientes de las celdas fotovoltaicas, combinadas en arreglos internos del panel, medidos experimentalmente y sometidos a unas determinadas condiciones constantes de irradiación y temperatura. Una de las formas de reconstruir la curva, es usando como carga una resistencia eléctrica, variando la resistencia de carga desde cero a infinito, se pueden medir diversos valores de pares (I-V), que interpolándolos forman la curva característica. Algunos puntos importantes de la curva son [7]:

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

- **Corriente de cortocircuito (Isc):** Es la máxima corriente que produce el panel. Se produce cuando sus terminales se unen; es decir, están en corto.
- **Voltaje de circuito abierto (Voc):** Es el máximo voltaje del panel, se consigue midiendo la tensión en las terminales abiertas.
- **Potencia máxima (Pmax):** Es la máxima potencia que produce el panel.
- **Corriente en el punto de máxima potencia (Imp):** Es el valor de la corriente para Pmax.
- **Voltaje en el punto de máxima potencia (Vmp):** Es el valor de voltaje para Pmax.
- **Factor de forma (FF):** Es el valor correspondiente al cociente entre Pmax y el producto de Isc por Voc. Proporciona una idea de la calidad del dispositivo fotovoltaico.

Puntos calientes:

Es un punto, región o zona localizada en una celda, o conjunto de celdas PV cuya temperatura de funcionamiento es muy elevada, con respecto a las demás celdas de un panel, esta situación se da porque la celda o celdas sombreadas se polarizan inversamente. Al no tener las mismas características eléctricas con el resto de las celdas, en este caso el panel deja de producir energía y pasa a consumir, esto puede ocasionar pérdida del rendimiento del sistema, incluso la destrucción total del panel. [4]

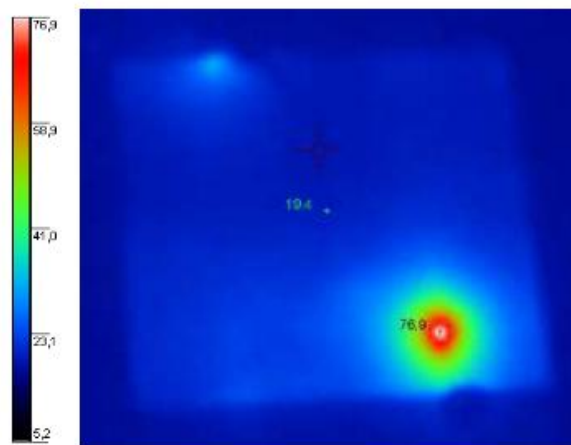


Figura 2. Imagen termográfica de punto caliente [8].

En la figura 1, se puede apreciar un punto caliente desde una celda, que aumento a 76.9 grados con respecto a los demás puntos del panel, podemos concluir que hay una

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

disminución de la potencia, debido a la circulación de corriente en sentido inverso y que por ende puede llevar al deterioro de la celda.

Causas de los puntos calientes:

Esta situación puede producirse en la mayoría de los casos por un sombreado parcial, el cual es un fenómeno causado por varios objetos que se superponen sobre el panel fotovoltaico, generando que en ciertos puntos pequeños de las celdas se exceda la temperatura nominal en relación con el resto, a esto se le conoce como punto caliente, y este tipo de deterioro ocasiona defectos de la celda como desajuste, envejecimiento, decoloración, grietas o mala calidad en la celda o puede llevar a la delaminación de la celda y lo más importante puede ocasionar la pérdida de potencia del panel [9]. Estas sombras normalmente son generadas por edificación que esta cercana al panel solar, arboles, nubes, equipos industriales, excrementos de animales o lo que es muy usual residuos de polvo [2].



Figura 3. Sombreado parcial proveniente de árboles y de objetos que están cerca de las celdas. [3]

Podemos observar que la figura izquierda presenta una sombra producida por un elemento de la estructura del edificio, mientras la figura de la derecha se debe a los árboles. Estas dos figuras presentan un sombreado parcial casi en un 50% de área de sombra en un panel fotovoltaico.

En la figura 3 se puede observar tres curvas: La de color azul representa el funcionamiento de una celda en estado normal, operando de 19V a 3.3A, sin efecto de sombra ni polvo o cualquier partícula, la curva de color verde representa una celda bajo sombreado parcial y la línea de color rojo entre puntada representa una celda con punto caliente.

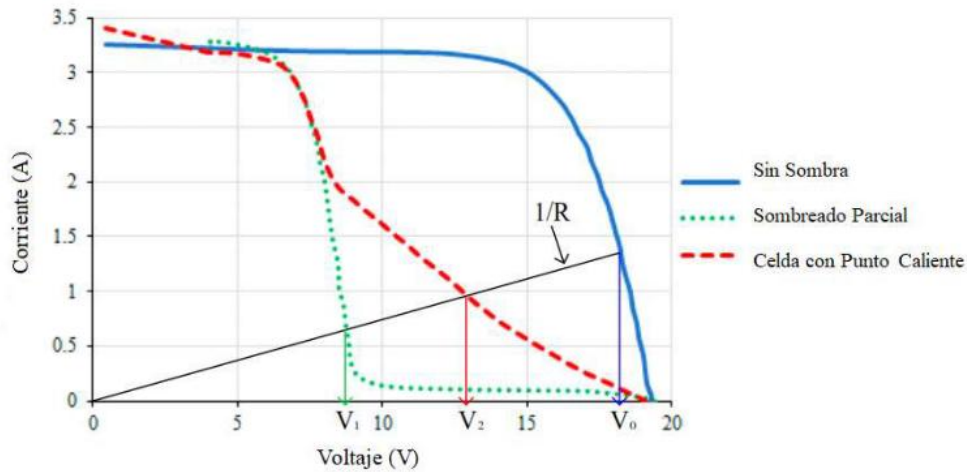


Figura 4. Curva I-V bajo efectos de condiciones anormales. Sin Sombra, Sombreado Parcial y Punto Caliente [2].

Técnicas de detección de puntos calientes:

Para evitar estos puntos calientes o para detectarlos a tiempo y que no generen un daño permanente en los paneles, se han propuesto diversas técnicas para su detección, a continuación, se identificarán en forma general:

- **Termografía:** La termografía infrarroja es una herramienta que permite definir el comportamiento térmico de los cuerpos de acuerdo con la energía térmica que emiten, se hace de forma remota y sin contacto y puede realizarse en tiempo real. Además, es una técnica que consiste en la detección de áreas con temperaturas más altas. Esta técnica de medición es no destructiva ni invasiva y proporciona una imagen en tiempo real del comportamiento térmico de la superficie de un objeto. Puede ser usado como un método sin contacto para el diagnóstico de algunos fallos térmicos y eléctricos en módulos FV. Las mediciones se pueden realizar durante la operación normal tanto para módulos FV individuales como para exploración de sistemas a gran escala. Hay que asegurar que las mediciones se realizan bajo condiciones de estado estacionario [10].
- **Curvas I-V:** La medición de curvas I-V es la técnica más utilizada para evaluar el rendimiento de una planta fotovoltaica, ya que muestra información precisa, por lo que las medidas se pueden realizar a todos los módulos de forma individual, para detectar así los posibles fallos y defectos en los paneles solares. Para realizar

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

la toma de medidas no es necesario desmontar los módulos, evitando así los tiempos de inactividad, además los riesgos y costes asociados al desmantelamiento [13].

- **Electroluminiscencia:** Es una técnica empleada en la inspección de módulos fotovoltaicos, es una tecnología que permite detectar mediante una cámara fotográfica, la emisión de luz de una celda fotovoltaica, sometida a una alimentación de voltaje en sus terminales, contrariamente a su comportamiento que es generador eléctrico, y así poder observar a través de las variaciones de luminiscencia en la superficie, un posible defecto o punto caliente. Esta técnica se realiza en condiciones de oscuridad y la cámara fotográfica cuenta con sensores CCD y CMOS [11].

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

3. METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos, se definirán algunas palabras claves y búsqueda en bases de datos especializadas en el tema, que están incluidas en la biblioteca del ITM. Además, se identificarán técnicas, modelos, formas de simulación, procedimientos, equipos especiales, que pueden ser de baja gama o equipos usados.

Se analizará la aparición de puntos calientes en los sistemas fotovoltaicos, es decir verificar si algunas celdas son más susceptibles a desarrollar puntos calientes, por su fabricación, diseño o al conectar las celdas en serie estas presentan alguna fuga o una disparidad eléctrica que conlleva a percibir una pérdida de potencia.

Se evaluará una forma de medir estas temperaturas, de acuerdo con las variables que se puedan implementar en la investigación.

Se verificarán las variables para la detección de puntos calientes, en métodos como el análisis de curvas de corriente-voltaje, la termografía y electroluminiscencia.

Se definirá un caso de estudio, utilizando alguno de los paneles disponibles en los laboratorios que estén llegando al final de su vida útil o que presenten una degradación visible.

Se aplicará esta técnica seleccionada al caso de estudio y se contrastará los resultados obtenidos, con mediciones realizadas, usando la cámara termográfica o un sensor de temperatura disponible, que permita supervisar las celdas en caso de un consumo de energía, para evitar así un cambio de una pieza o panel completo.

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

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó una revisión de la literatura para identificar las técnicas más utilizadas para la detección de puntos calientes en sistemas fotovoltaicos, con el fin de comparar las técnicas y seleccionar la más conveniente según la disponibilidad de equipos en los laboratorios de Parque i.

Técnicas que existen para la detección de puntos calientes

Para la detección de fallas de los sistemas fotovoltaicos existen unas técnicas que se clasifican de la siguiente manera; técnicas invasivas y técnicas no invasivas, las técnicas invasivas son aquellos procedimientos que requiere la desconexión de los paneles fotovoltaicos en cambio las técnicas no invasivas no requieren la desconexión del panel, esto quiere decir que se puede tomar resultados en condiciones de funcionamiento del sistema [12].

Una de las técnicas que se utiliza para la detección de fallas, son el análisis por medio de las curvas I-V y P-V, que permiten entregar parámetros eléctricos que describen el funcionamiento del dispositivo, este consiste en la aplicación de una carga en las terminales del panel para tener una repuesta de corriente y voltaje, de esta manera se analiza la respuesta por medio de las curvas, obteniendo así la recolección de datos. Los sistemas que permiten obtener la curva I-V, de manera automática de un dispositivo PV tiene el nombre de trazador, estos se clasifican de la siguiente manera.

- Trazador de resistor variable: es un dispositivo que utiliza un resistor variable, idealmente para capturar puntos de la curva, estos se utilizan en generadores fotovoltaicos.
- Trazador de carga capacitiva: es un método basado en un capacitor de alta capacitancia, el cual es cargado por el generador fotovoltaico, su función es que el sistema pase de cortocircuito a circuito abierto.
- Trazador de carga electrónica: este sistema utiliza un transistor Mosfet o IGBT, como una carga controlada para poder medir su funcionamiento en modos de corte, región óhmica o lineal y saturación [14].

Otro método más utilizado para la detección de puntos calientes en sistemas PV, es la comprobación visual con ayuda de cámaras termográficas, que nos ayuda a diagnosticar

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

rápida los cambios de los paneles. Esta técnica es basada en la captura de imágenes térmicas que aprovechan la radiación térmica de los materiales la cual se encuentra en el espectro infrarrojo, esta técnica se clasifica en no invasivas, lo que permite detectar los puntos calientes en tiempo real. Existen diferentes cámaras en el mundo, pero las más utilizadas son la marca FLIR y Fluke [3].

A continuación, en la tabla se muestra las referencias que se analizaron desde las técnicas planteadas.

Técnicas De Detección	Ref.	Procedimiento	Modos De Medición	Equipos Utilizados	Escenario de pruebas
Curva característica I-V	[1] - [2] - [5]	Es la comparación del voltaje de salida con la corriente para diferentes niveles de radiación solar y temperatura	Graficas de sombreado Parcial Puntual	Modelo en Simulink-Matlab	*La terraza del edificio *Con sombra *Simulan el sombreado con láminas de papel
	[4] - [9]	Obtención de los valores de voltaje y corriente de cada panel PV por separado en tiempo real.	Sistema de medición en campo	Arduino UNO	*Al aire libre *Con sombra *Con sombra de las edificaciones
			Tarjeta de control con un módulo	Tarjeta de red Ethernet W5100	
			Sensores de voltaje y de corriente	Transductor voltaje CELSA DMU	
[7] - [6] - [15]	Sistema de control para la visualización en tiempo real de datos experimentales de la curva	Sensores de medición de bajo costo	Arduino UNO R3	*En campo de la universidad *Sin sombra *Toman datos de acuerdo con la radiación en el momento	
	[13] - [18]	Las desviaciones de la curva pueden dar una idea del modo de deterioro que puede presentar una	Trazador de resistor variable	Solmetric, modelo PVA-600	*Azotea de la universidad Valladolid *Con sombra *Realizan pruebas con la sombra de
			Trazador de carga capacitiva		

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

		celda	Trazador de carga electrónica		la vegetación de la azotea y además simulan sombras producidas por ellos mismos.
Termografía	[3]	Obtener información sobre el comportamiento térmico de las células de un módulo antes de la aparición del punto caliente	Condiciones de irradiancia estables	Cámara, de la marca Fluke PT1000	*Estación meteorológica de la *Universidad de Cuenca *Con sombra Realizan las pruebas con el sombreado parcial de las nubes
	[8] - [16]	Permite caracterizar el comportamiento térmico de los cuerpos de acuerdo con la energía térmica emitida por los mismos	Cámaras termográficas en condiciones de estado estacionario La medida se realiza de forma remota y sin contacto La medida se realiza en tiempo real	Marca Flir Systems modelo ThermaCAM S60 Marca WIRIS, modelo Workswell 2ª gen (WIRIS 2017)	*Campo abierto *Con sombra *Utilizan una cartulina blanca para simular el sombreado parcial
	[10]	Imágenes térmicas que aprovechan la radiación térmica de los materiales, la cual se encuentra en el espectro infrarrojo	Infrarrojo térmico estático	Cámara térmica FLIR A615 - Fluke TiS20	*Campo abierto *Con sombra *La vegetación del entorno produce sombreado
	[12] - [20]	Uso de dispositivos ópticoelectrónicos para detectar y medir la radiación a partir de la cual se obtiene la temperatura de las superficies bajo estudio	Termografía Infrarroja Pasiva. Termografía Infrarroja Activa	Cámara térmica Zen muse XT de FLIR Cámara FLIR PRO DUO R Cámara Wiris EO/IR	*Universidad Central *Con sombra *Irradian el calor de los paneles

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

	[14] - [17]	Captura de imágenes térmicas que aprovechan la radiación	Infrarrojo térmico	Fluke TiS20	*Universidad *Con sombra y sin sombra *Verifican datos con sombreado parcial y sin sombra
Electroluminiscencia	[11]	Es un fenómeno óptico y eléctrico, en el cual se genera luz a partir de una corriente eléctrica.	Cámara de dispositivo acoplado cargado de silicio (CCD)	Cámaras de exploración lineal	*Laboratorio de la universidad *Sin sombra *Se toman los datos desconectando los paneles y se le aplica corriente
			Cámara InGaAs	Cámara de Área, que consta de una matriz 2D Cámara utilizada pco. 1300	
	[19]	Cámaras con sensores cercanos al infrarrojo (NIR) o de infrarrojo de onda corta (SWIR)	Sensores CCD y CMOS Sensor InGaAs	Cualquier cámara fotográfica con sensor CMOS	

Pruebas experimentales

Para realizar las pruebas experimentales se utilizaron 2 tipos de paneles fotovoltaicos, con los siguientes equipos: una carga electrónica DC (BK PRECISION 600W - 120A), para realizar el barrido de voltaje, también se utilizó un osciloscopio ROHDE&SCHWARZ RTE1204 para guardar y visualizar las curvas I-V, un Multímetro industrial Fluke 87V para comprobar que las conexiones estén correctas, un sensor de irradiación y una cámara termográfica de marca Fluke Ti90.

El escenario experimental se realizó en el laboratorio del parque I, y en las siguientes tablas se tienen los datos de los paneles PV bajo estudio.

NOMBRE	MODELO	POTENCIA PICO	CORRIENTE A LA MÁXIMA POTENCIA	VOLTAJE A LA MAXIMA POTENCIA
HYBRYTEC	HYBRYTEC-QM5-85/12	85W	4,81A	17,84V
SOLAR PLUS	SP090P	90W	5,0A	18,0V

Tabla 1. Características de los paneles solares.

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

En la figura 5, se observa que el panel de 85W, tiene conectada una carga variable, en sus terminales, para obtener respuesta de corriente y tensión, de esta manera recibimos los datos con el osciloscopio, que serán guardados, y posteriormente visualizados en Matlab.

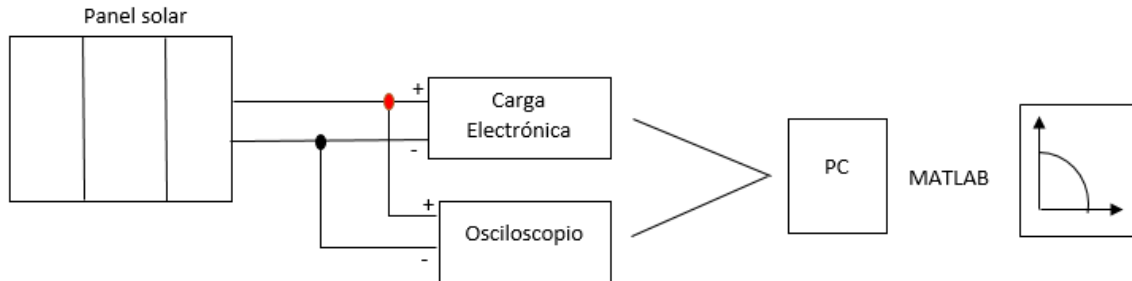


Figura 5. Diagrama de conexiones de los equipos utilizados. Fuente: Autor.

Respecto a lo que se dictó en la metodología, los casos de estudio realizados fueron obtener la curva I-V de los paneles nombrados en escenario de sombra y no sombra para observar las diferencias térmicas, utilizando la cámara térmica. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Para el primer escenario se usó panel de marca Hybrytec de 85W. Los escenarios de pruebas se resumen en las tablas, en donde se tiene en cuenta, la figura en la que se observa la curva I-V, la marca del panel, si la prueba se realizó con o sin sombra, la forma de la sombra incidente, la temperatura y la irradiación solar medidas.



Figura 6. Panel PV sin sombra. Fuente: Autor.

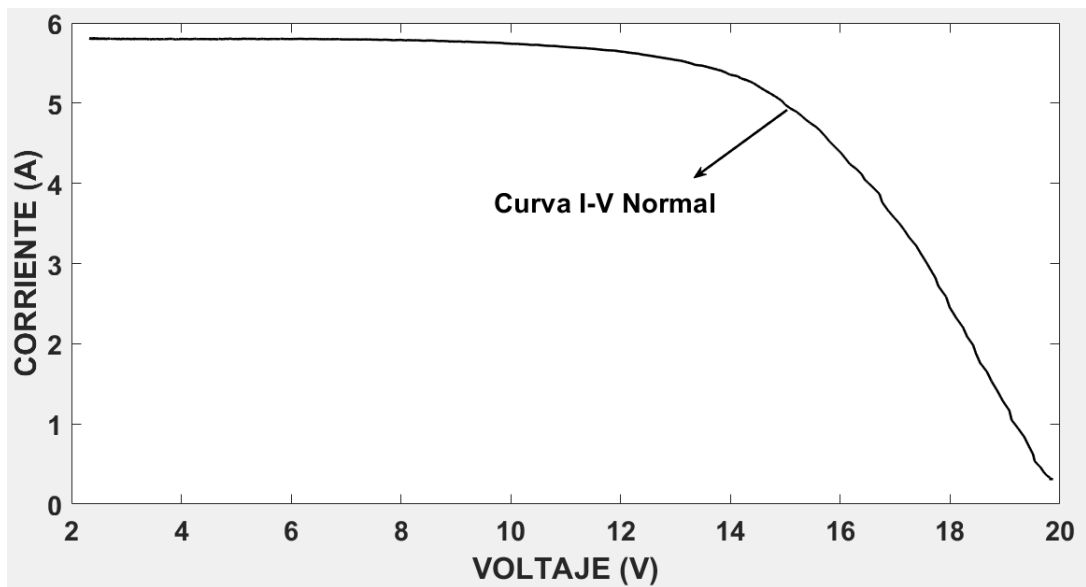


Figura 7. Curva IV sin sombra. Fuente: Autor.

FIGURA	PANEL	CONDICIÓN	TIPO DE FORMA	TEMPERATURA	IRRADIANCIA
#7	Hybrytec (85W)	SIN SOMBRA	NO APLICA	45°C	993 W/m^2

Tabla 2. Resumen de escenario de prueba número 1

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

La primera prueba experimental, se realiza sin sombra, se observa en la figura 7, que no tiene ninguna distorsión, la curva I-V es suave o normal, nos indica que el panel está trabajando en sus parámetros.

Estos resultados se obtuvieron en tiempo real, de acuerdo a los datos que genero el osciloscopio, la cual se puede observar en el apéndice A, tabla 3.

Para la segunda prueba se simulará una sombra en forma diagonal en el panel y se utilizará láminas de cartón en ella.



Figura 8. Panel PV con sombra diagonal, la simulación se realiza con cartones. Fuente: Autor.

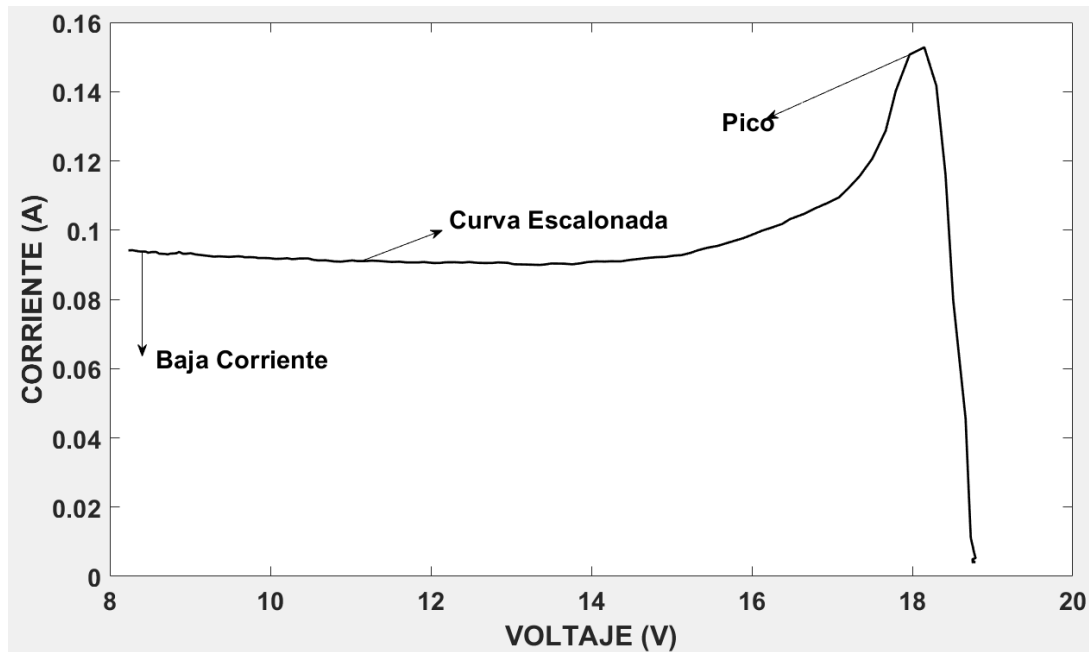


Figura 9. Curva IV del arreglo con sombra diagonal. Fuente: Autor.

FIGURA	PANEL	CONDICIÓN	TIPO DE FORMA	TEMPERATURA	IRRADIANCIA
#9	Hybrytec (85W)	CON SOMBRA	SI APLICA	50.4°C	1015 W/m^2

Tabla 4. Resumen de escenario de prueba número 2

En la figura 9, podemos observar una curva I-V escalonada, por la desviación que tiene la curva en su trayectoria, lo que nos indica que el diodo se ha activado, por un problema en el panel fotovoltaico, esto sucedió por el sombreado parcial que se le realizó. Además, se visualiza un pico, estos picos obtenidos en las curvas de corriente y voltaje aparecen cuando existe un cambio brusco en la corriente, por lo que hubo una disminución notoria de la corriente en el panel.

Estos resultados se obtuvieron en tiempo real de acuerdo con la siguiente tabla que genero el osciloscopio, la cual se puede observar en el apéndice A, tabla 5.

En la tercera prueba experimental, se simulará una sombra, pero en forma de L.



Figura 10. Panel PV con sombra en forma de L, la simulación se realiza con cartones.
Fuente: Autor.

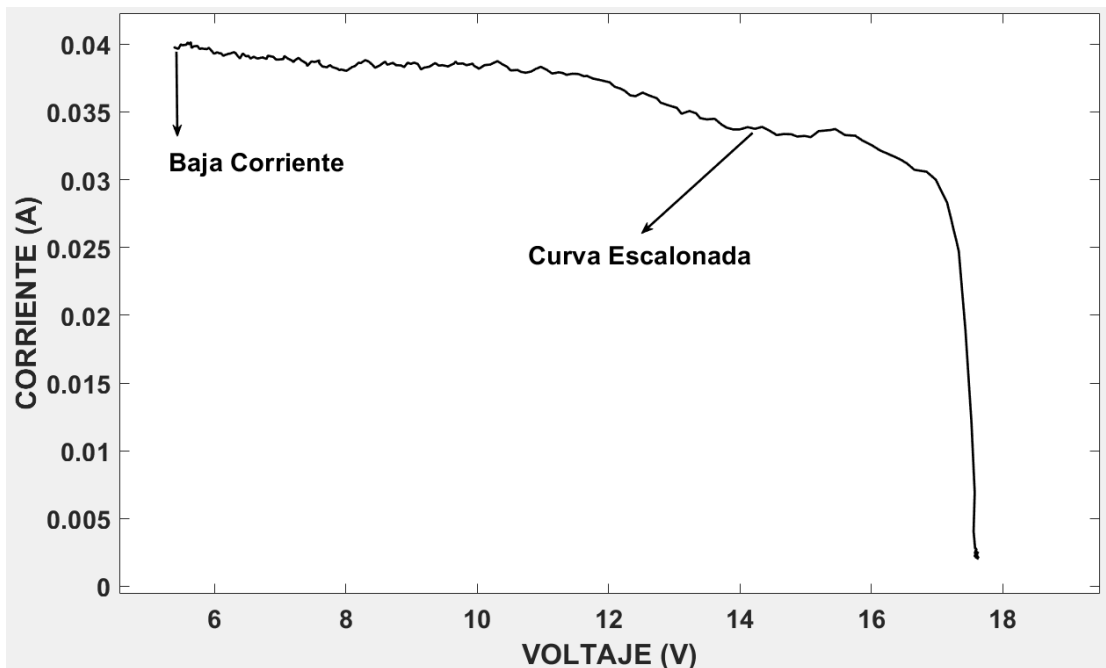


Figura 11. Curva IV del arreglo con sombra en L. Fuente: Autor.

FIGURA	PANEL	CONDICIÓN	TIPO DE FORMA	TEMPERATURA	IRRADIANCIA
#11	Hybrytec (85W)	CON SOMBRA	SI APLICA	53.5°C	982 W/m^2

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

Tabla 6. Resumen de escenario de prueba número 3

En la figura 11, se observa que posee una curva escalonada o escalera, debido al sombreado parcial que se le simulo en forma de L, además por su trayectoria en la curva, es muy común que algunas celdas estén agrietadas, también posee disminución en la corriente.

Estos resultados se obtuvieron en tiempo real de acuerdo con la siguiente tabla que genero el osciloscopio, la cual se puede observar en el apéndice A, tabla 7.

En la cuarta prueba experimental, se simulará una sombra, en la parte inferior del panel



Figura 12. Panel PV con sombra en la parte inferior, la simulación se realiza con cartones.

Fuente: Autor.

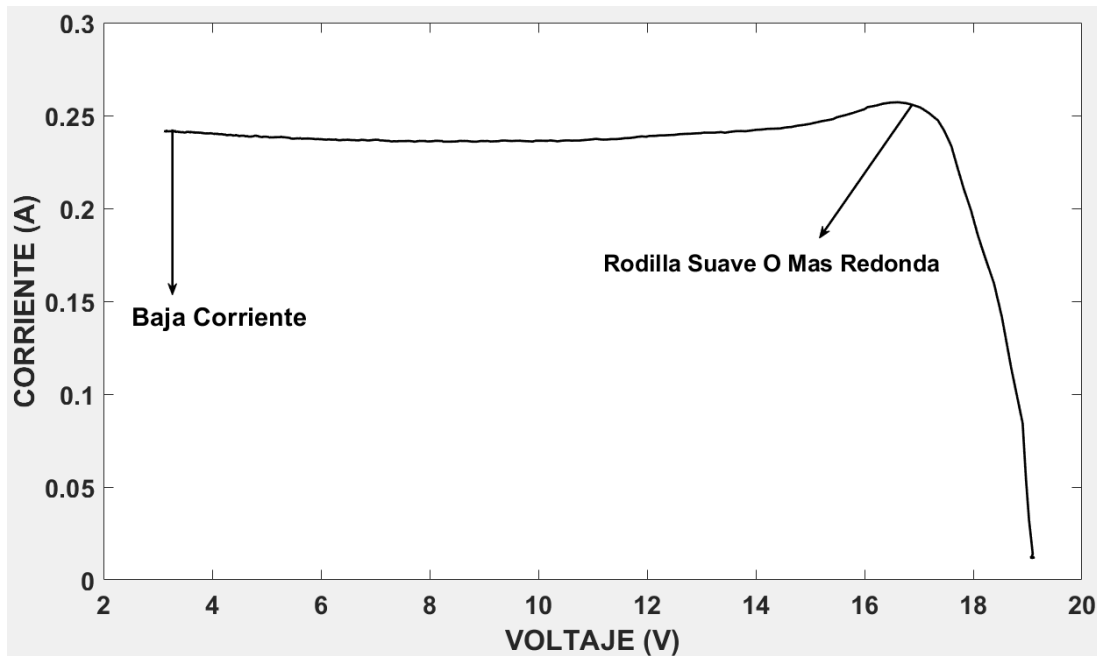


Figura 13. Curva IV del arreglo con sombra inferior. Fuente: Autor.

FIGURA	PANEL	CONDICIÓN	TIPO DE FORMA	TEMPERATURA	IRRADIANCIA
#13	Hybrytec (85W)	CON SOMBRA	SI APLICA	56.5°C	1011 W/m ²

Tabla 8. Resumen de escenario de prueba número 4

En la figura 13, observamos que, en la parte superior derecha, la curva I-V, se encuentra más redondeada, a esto se le conoce como rodilla más redonda, comparada con la gráfica 7, esto es debido por el envejecimiento del panel, además por la simulación del sombreado parcial inferior del panel, la corriente obtuvo una disminución.

Se obtiene los siguientes datos en tiempo real de acuerdo a la tabla que guarda el osciloscopio, la cual se puede observar en el apéndice A, tabla 9.

Ahora se procede a realizar las pruebas, pero con la cámara térmica, se utilizará los mismos equipos, pero con distinto panel, en este caso se utilizará el Solar Plus SP090P de 90W.

La técnica a utilizar es la de termografía, con la cámara térmica de marca Fluke Ti90, que nos proporciona el laboratorio del parque I.

Se realiza pruebas con el panel de marca Solarplus de 90W.



Figura 14. Panel PV sin sombra. Fuente: Autor.

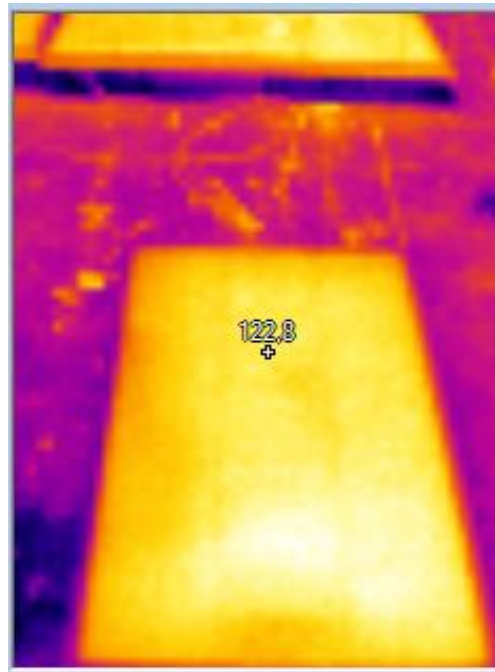


Figura 15. Imagen térmica del panel sin sombra. Fuente: Autor.

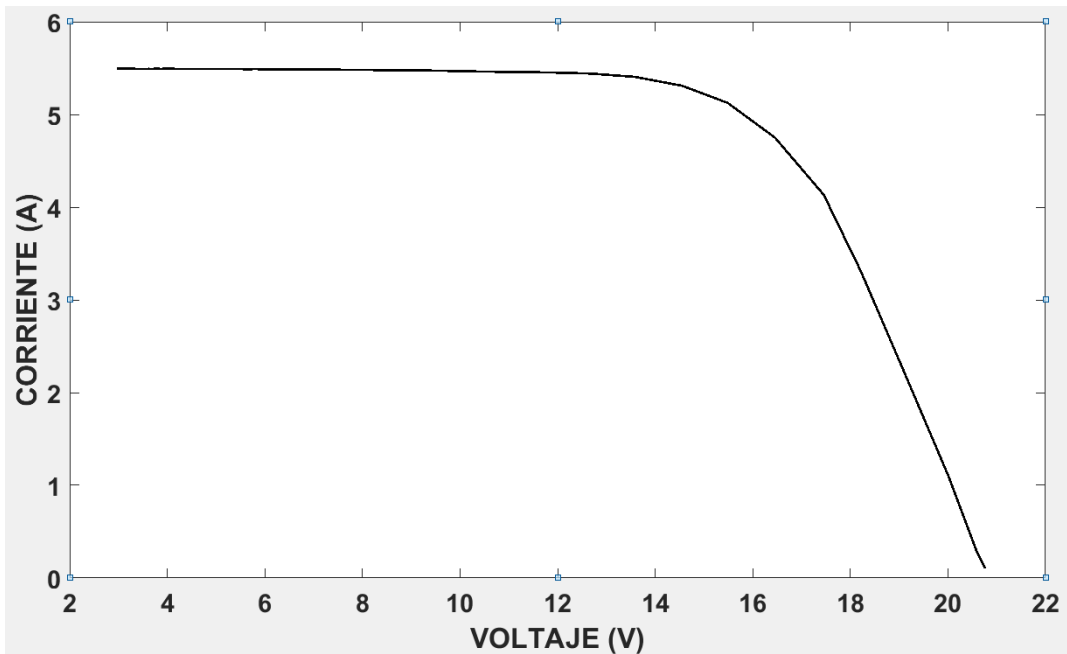


Figura 16. Curva I-V del panel sin sombra. Fuente: Autor.

FIGURA	PANEL	CONDICIÓN	TIPO DE FORMA	TEMPERATURA	IRRADIANCIA
#16	SP090P (90W)	SIN SOMBRA	NO APLICA	50.4°C	1021 W/m ²

Tabla 10. Resumen de escenario de prueba número 5.

En la figura 15, se observa la inspección visual que se realiza con la cámara térmica hacia al panel fotovoltaico, donde la temperatura del panel es de 122.8 °F, lo que en grados Celsius es 50.4°C. La figura no posee ninguna sombra, por lo que no se visualiza puntos calientes. En la Figura 16, se visualiza que la curva I-V, está trabajando en sus parámetros indicados por el fabricante, una curva normal.

Para la siguiente prueba se coloca un cartón en la parte diagonal del panel para provocar una sombra y revisar si es motivo de la aparición de un punto caliente.



Figura 17. Panel PV con sombra en la parte superior izquierda en forma diagonal. Fuente: Autor.

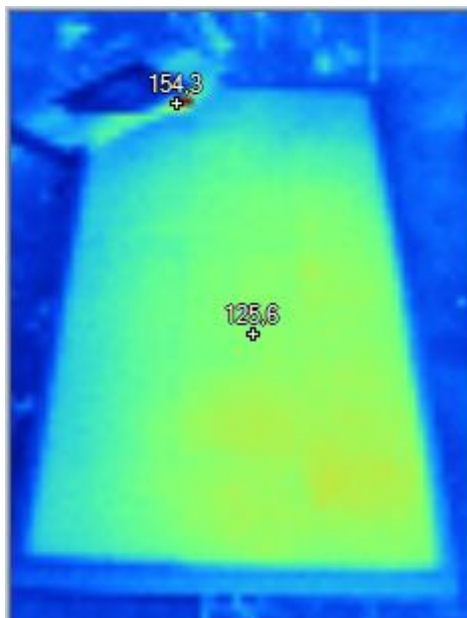


Figura 18. Imagen térmica del panel con sombra diagonal. Fuente: Autor.

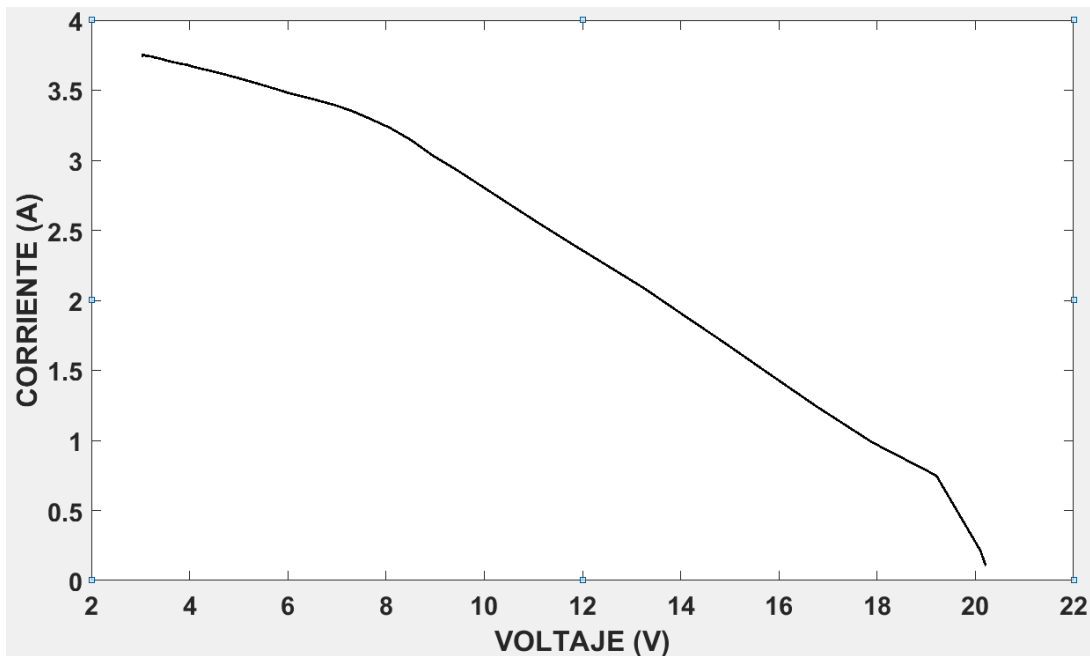


Figura 19. Curva IV del panel con sombra diagonal. Fuente: Autor.

FIGURA	PANEL	CONDICIÓN	TIPO DE FORMA	TEMPERATURA	IRRADIANCIA
#19	SP090P (90W)	CON SOMBRA	SI APLICA	67.9°C	1006 W/m^2

Tabla 11. Resumen de escenario de prueba número 6.

En la figura 18, podemos observar dos temperaturas diferentes una es de 125.6°F y la otra es de 154.3°F, que en grados Celsius sería 52°C y 67.9°C respectivamente, y en este se visualiza un punto caliente en la parte superior izquierda del panel, se puede apreciar el incremento de temperatura, por lo que una de las celdas tiene menor corriente por lo que dejó de recibir la irradiación por el sombreado, por lo cual compromete en gran medida el rendimiento del panel.



Figura 20. Panel PV sin sombra. Fuente: Autor

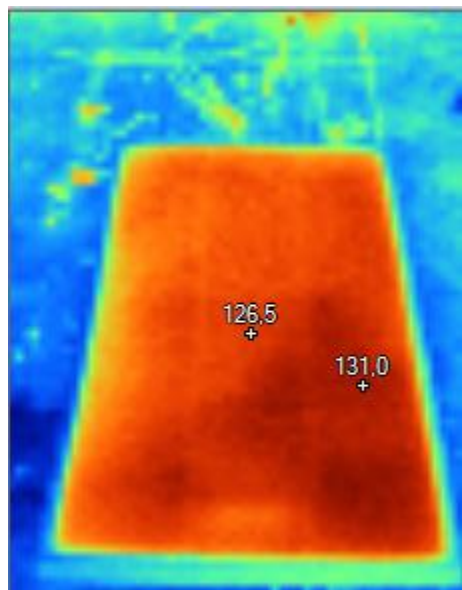


Figura 21. Imagen térmica del panel sin sombra. Fuente: Autor.

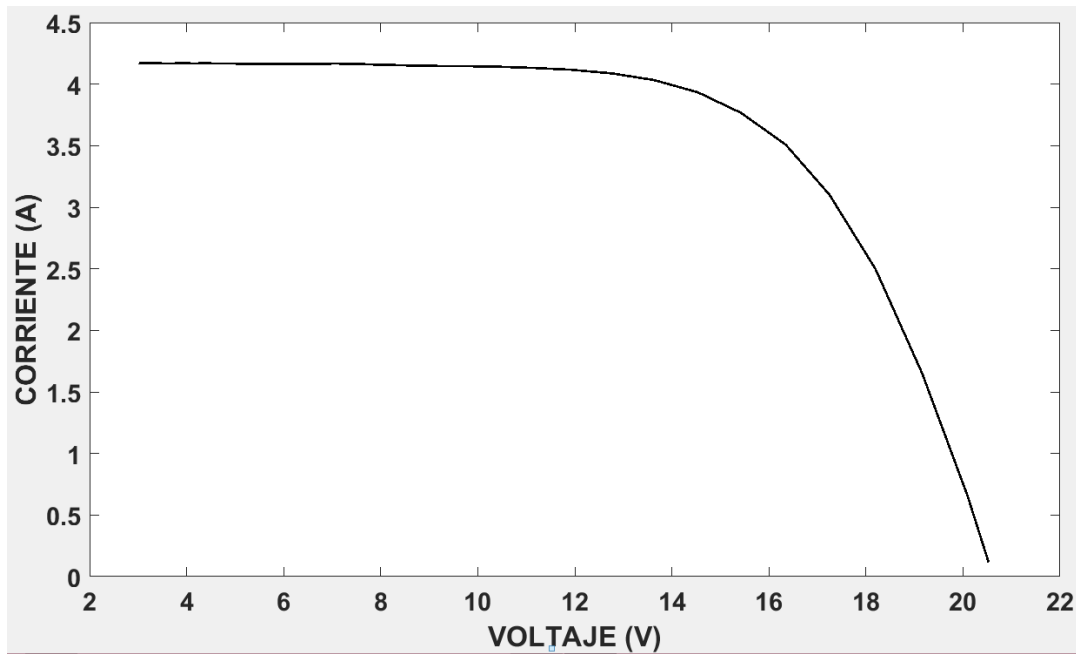


Figura 22. Curva IV del panel sin sombra. Fuente: Autor.

FIGURA	PANEL	CONDICIÓN	TIPO DE FORMA	TEMPERATURA	IRRADIANCIA
#22	SP090P (90W)	CON SOMBRA	NO APLICA	55°C	1015 W/m^2

Tabla 12. Resumen de escenario de prueba número 7.

En la figura 21, no hay simulación de sombra, pero el panel lleva mucho tiempo expuesto a la irradiancia, por lo que, en algunas zonas, se está formando puntos calientes, por lo que su corriente empieza a reducirse.

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

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

CONCLUSIONES

- En el desarrollo del proyecto, se estudiaron tres métodos de detección de puntos calientes, que son las curvas I-V, termografía y electroluminiscencia, pero solo se implementaron 2, ya que la electroluminiscencia, no fue posible realizar las pruebas experimentales, en el laboratorio del parque I, por lo que no se contaba con algunos elementos necesarios para el montaje y se determinó que el método que llega a ser más preciso, es por medio de curvas I-V, que permite obtener los datos de funcionamiento del módulo fotovoltaico de una manera más detallada, como se pudo observar, en las pruebas experimentales, por medio del osciloscopio, obteníamos las gráficas, las cuales nos indicaba el funcionamiento ideal del panel fotovoltaico, mientras que la otra técnica como la termografía se basa en la información visual o defectos a través de imágenes.
- En esta investigación de detección de puntos calientes en los sistemas fotovoltaicos, se realizó una búsqueda por medio de las bases de datos del ITM, y se llegó a la conclusión por medio de su literatura científica, que los procedimientos que utilizan para la detección de estos puntos calientes, que en su mayoría proviene de sombras parciales son visuales, esto quiere decir que utilizan cámaras termográficas o pistolas de calor, y muy pocas detallan el método de curvas, la cual nos facilita hacia el detalle del problema.
- Realizando un estudio, para identificar qué elementos se considera de bajo costo, para la detección de puntos calientes, se llega a la conclusión, que la termografía se considera de bajo costo, ya que se puede utilizar solo una pistola de calor, y tomar la medida visualmente, pero no obstante es la mejor solución, más fácil se puede utilizar como primer filtro o primera evaluación del estado de los paneles fotovoltaicos

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

RECOMENDACIONES

- El estudio de detección de puntos calientes, en sistemas fotovoltaicos, es un área de investigación muy amplia, aunque no hay muchos artículos que hablen sobre el tema, por lo que es muy reciente, en temas de investigación de posibles soluciones a los sistemas fotovoltaicos. Es necesario seguir en la investigación, de posibles nuevas formas de detección de puntos calientes o deterioro de las mismas.

TRABAJO FUTURO

- Es importante seguir con los avances de investigación, para garantizar las mejoras, en el diseño de los sistemas fotovoltaicos, para optimizar su rendimiento y vida útil de un panel fotovoltaico.
- Se propone hacer un contraste de resultados aplicando las tres técnicas encontradas para detección de puntos calientes, usando algunos escenarios de prueba que generen puntos calientes.

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

REFERENCIAS

- [1] Ponluisa Maracalla, Neisser Fernando. "Diagnóstico paramétrico predictivo de fallos de paneles solares en cadena utilizando tecnología de bajo costo." p. 59, 2021.
- [2] Bustamante Cacao, Katherine Cristina, and Bruno Bernardo Mirabá Valdiviezo. "Algoritmo de detección de puntos calientes en paneles fotovoltaicos." p 78, 2018.
- [3] A. Miguel Dávila, "Estudio de técnicas invasivas y no invasivas para evaluar el deterioro de paneles solares fotovoltaicos." p. 196, 2020.
- [4] D. E. Sistemas, "Sistema de supervisión con algoritmo de diagnóstico predictivo de puntos calientes en paneles fotovoltaicos." p. 63, 2019–2020.
- [5] Corredor, Lina. "La importancia del Uso de Modulos Fotovoltaicos o Paneles Solares como Fuente de Energia Eléctrica." p. 20-22, 2019
- [6] Díaz-Rodríguez, Jorge, Luis Pabón-Fernández, and Aldo Pardo-García. "Sistema híbrido de energía utilizando energía solar y red eléctrica." p. 69-77, 2012
- [7] Vargas, Juan Pablo, and Gonzalo Navia. "Desarrollo de un sistema de control para la captura y medición experimental de la eficiencia y curva característica iv en tiempo real de un sistema fotovoltaico utilizando labview® y arduino." p. 49-64, 2015
- [8] Iraizoz Latasa, Izaskun. "Análisis de la potencia disipada y temperatura que alcanza una célula fotovoltaica sombreada." p. 56, 2011.

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

[9] Hernández Uparela, Miguel Ángel, and Oscar Mauricio Saucedo Lince. "Esquemas alternativos de conexión de generadores FV para contribuir en el aumento de la eficiencia bajo condiciones de sombreado parcial." p. 62, 2021.

[10] Álvarez Tey, Germán. "Caracterización de instalaciones fotovoltaicas mediante técnicas de termografía infrarroja." p. 242, 2018.

[11] Ramos Palenzuela, Juan Bautista. "Análisis de defectos en paneles solares de plantas fotovoltaicas mediante termografía y electroluminiscencia." p. 137, 2022.

[12] Quiala Fuentes, Julio Antonio. "Análisis de las potencialidades de la cámara NEC-AVIO F30 instalada en el Drone x8+ para el diagnóstico de sistemas fotovoltaicos." p. 75, 2018.

[13] Sánchez Arroyo, Pablo. "Inspección de paneles solares en plantas fotovoltaicas mediante curvas corriente-voltaje (IV)." p. 84, 2021.

[14] Onrubia Moñux, Alejandro. "Caracterización de módulos fotovoltaicos mediante sus curvas IV." p. 129, 2019.

[15] Arencibia-Carballo, Gustavo. "La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica." p. 5, 2016

[16] Copa, I., Socolovsky. "Evaluación del funcionamiento de un sistema FV de 2, 8 kW con sombreado parcial." p. 7, 2014.

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

[17] Mahmoud Dhimish, Violeta Holmes, Peter Mather, Martin Sibley. "Novel hot spot mitigation technique to enhance photovoltaic solar panels output power performance." p. 8, 2018.

[18] Mahmoud Dhimish, Violeta Holmes, Bruce Mehrdadi, Mark Dales, Peter Mather. "PV output power enhancement using two mitigation techniques for hot spots and partially shaded solar cells." p. 11, 2018.

[19] Shengxue Tang, Yue Xing, Li Chen, Xiao Song, Fang Yao. "Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels." p. 51-61, 2021.

[20] E. Hernandez, "Definiciones de Celda, Módulo, Panel y Arreglo Fotovoltaico," Solar Fotovoltaico, 2020. <https://solar-fotovoltaico.com/componentes/panel-solar/definiciones-celda-modulo-panel-arreglo-fotovoltaico/>.

[21] F. Olivera, "Efecto de las sombras en un sistema fotovoltaico," Energía Solar Fotovoltaica, 2019. <https://ccee.mx/blog/energia-solar-fotovoltaica/efecto-de-las-sombras-en-un-sistema-fotovoltaico>.

APÉNDICE

APENDICE A

Tabla 3.

Voltaje	Corriente
19.819.973	0.31064722
19.806.078	0.31188241
19.799.902	0.31311759
19.849.308	0.31188241
19.835.413	0.31064722
19.827.692	0.31002966
19.810.709	0.31188241
19.816.885	0.31188241
19.836.956	0.3125
19.844.677	0.31188241
19.847.765	0.30817688
19.836.956	0.31126481
19.843.132	0.31126481
19.869.379	0.31188241
19.867.836	0.3125
19.833.868	0.31311759
1.983.078	0.31002966

Tabla 5.

Voltaje	Corriente
51.136.365	0.10227273
50.981.965	0.10224185
51.120.925	0.1023808
51.028.285	0.10236537
51.120.925	0.10231905
50.997.405	0.10221097
51.167.245	0.1020257
50.951.085	0.10213377
51.028.285	0.10213377
51.167.245	0.1023808
5.129.076	0.10225729
51.167.245	0.10230361

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

5.129.076	0.1023808
513.062	0.10259696
51.043.725	0.1025352
51.506.915	0.10227273
51.537.795	0.10218009

Tabla 7.

Voltaje	Corriente
1.759.202	0.002454916
17.595.108	0.0024857954
17.627.533	0.0027637105
17.599.741	0.0025784338
17.578.125	0.0024240366
17.582.756	0.0023005188
17.605.917	0.0023931572
17.599.741	0.0022078804
17.585.844	0.0018682065
17.612.093	0.0021924407
17.609.005	0.0022696394
17.605.917	0.0024240366
17.612.093	0.0021461216
17.601.284	0.0020380435
17.582.756	0.0017446887
17.625.988	0.0020226038
17.596.653	0.002177001

Tabla 9.

Voltaje	Corriente
74.558.425	0.23094738
7.468.194	0.23085475
7.480.546	0.23085475
7.432.683	0.23100914
7.435.771	0.23100914
7.468.194	0.23097827
7.485.178	0.23104002
74.573.865	0.2309165
746.665	0.23054595
7.421.875	0.23057683
7.435.771	0.23070034

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

7.424.963	0.23085475
7.472.826	0.23119442
746.665	0.23119442
74.635.625	0.23100914
74.959.855	0.23104002
7.488.266	0.23113266

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

FIRMA ESTUDIANTES Danny Castrillon

FIRMA ASESOR Dante J. Peonero C

 Mariana D.F

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____