



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA METROPOLITANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD
ESCUELA DE ELECTRONICA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS EN RELACION A FALLAS TIPO HOTSPOT

TRABAJO DE TITULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO

AUTOR:
COÑA MIRA, PEDRO

PROFESOR GUIA:
DURNEY WASAFF, HUGO

INGENIERO GUIA:
CAAMAÑO ARANEDA, JAVIER
CERÓN CORDOVA, JOSÉ

SANTIAGO-CHILE
2024

Autorización para la reproducción del trabajo de titulación

1. Identificación del trabajo de titulación

Nombre del alumno: Pedro Angel Coña Mira

Correo: pcona@utem.cl

Título de la tesis: Estudio Experimental del comportamiento de placas fotovoltaica en relación a fallas tipos hotspot.

Escuela: Universidad Tecnológica Metropolitana

Carrera: Ingeniero Civil en Electrónica.

Título al que opta: Ingeniero Civil en Electrónica

2. Autorización de reproducción

Se autoriza la reproducción total o parcial de este trabajo de titulación, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica que acredita al trabajo y a su autor.

En consideración a la anterior, se autoriza su reproducción de forma (Marque con una X)

<input checked="" type="checkbox"/>	Inmediatamente
<input type="checkbox"/>	A partir de la siguiente fecha _____ (Mes/año)

Fecha _____

Firma  _____

Esta autorización se otorga en el marco de la ley N°17.336 sobre Propiedad Intelectual, Con carácter gratuito y no exclusivo para la institución.

NOTA OBTENIDA:

Firma y timbre de la Autoridad
responsable

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es el resultado de un arduo trabajo que sin el apoyo constante de muchas personas no habría sido posible desarrollar.

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por los valores que me han enseñado durante estos años, a mis padres Pedro y Angelica, mis hermanos Sebastián, Camilo y Paulina por el apoyo constante durante mi formación Universitaria. A mi tata Pedro por el amor que me ha dado durante todos estos años y a mi abuelita Adriana por todo el cariño, el apoyo que brindo hasta los últimos días de su vida. A mi polola Tamara por confiar en mi y motivarme a ser mejor persona y profesional, a mi amigo Sebastián por siempre darme una mano para salir adelante.

A mi profesor guía Hugo Durney, al ingeniero Guía Javier Caamaño y José Cerón por su apoyo y por haber confiado en mí para ser parte del Programa de Energías Renovables No Convencionales para desarrollar este proyecto y formarme como futuro profesional.

Finalmente Agradecer a mis compañeros del Programa de Energía Renovables no convencionales Pablo, Javier por su apoyo, y mis amigos de universidad Josué, Cesar por su amistad incondicional durante mi formación académica.

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Objetivos.....	4
1.1.1	Objetivo General.....	4
1.1.2	Objetivos Específicos	4
1.2	Metodología experimental propuesta.....	5
2	Marco teórico	6
2.1	Sistema fotovoltaico.....	6
2.1.1	Componentes principales de un sistema fotovoltaico.....	7
2.1.2	Panel fotovoltaico	11
2.1.3	Tipos de paneles	13
2.1.4	Estructura del panel fotovoltaico.....	16
2.1.5	Parámetros eléctricos.....	18
2.1.6	Eficiencia	22
2.2	Hotspot	24
2.2.1	Definiciones Técnicas.....	24
2.2.2	Parámetros eléctricos afectados por la temperatura	25
2.2.3	Fallas que provocan un hotspot.....	27
2.2.4	Métodos y tecnología para detección de hotspot	30
2.2.5	Soluciones propuestas para medición y análisis de los parámetros eléctricos.....	33
3	Implementación de las pruebas	35
3.1	Dispositivos de monitoreo en CC.....	35
3.1.1	Componentes del dispositivo.....	35
3.1.2	Esquema Eléctrico.....	37
3.1.3	Desarrollo del software y herramienta on-line de captura, transmisión y almacenamiento de datos.....	39
3.1.4	Diseño y metodología de pruebas a realizar	48

3.2	Instrumento para la detección de hotspot.....	52
4	Resultados y análisis experimental.....	53
4.1	Primera prueba.....	54
4.2	Segunda prueba.....	57
4.3	Tercera prueba (generación de hotspot sin carga).....	60
4.3.1	Primer experimento sin carga.....	61
4.3.2	Segundo experimento sin carga.....	65
4.4	Cuarta prueba (generación hotspot con carga).....	71
4.4.1	Primer experimento con carga.....	71
4.4.2	Segundo experimento con carga.....	75
4.5	Quinta prueba (aplicación de fuente de calor externa).....	81
4.5.1	Primer experimento.....	82
5	Conclusiones.....	86
5.1	Trabajo futuro.....	90
6	Bibliografía y referencia.....	92

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cuadro comparativo de los paneles monocristalino y policristalino, construido a partir de la referencia (Jiang, Sun, Wang, & Yang, 2020).....	16
Tabla 2: Características eléctricas del panel fotovoltaico. Datos adquiridos de la referencia (Rubilar, 2023)].....	49
Tabla 3: Características específicas de la cámara termográfica TI-160, datos adquiridos de la referencia (ULIRvision, 2014).	53

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Sistema Fotovoltaico con sus componentes eléctricos y Electrónicos.	7
Ilustración 2: Panel o modulo fotovoltaico de 170 W, 12 V (imagen editada para señalar la celda solar).....	8
Ilustración 3: Regulador de carga MPPT 75V 15A 12/24V.....	9
Ilustración 4: en el lado izquierdo se observa un batería diseñado para un sistema fotovoltaico básico, mientras que en el lado derecho se observa un batería diseñado para un sistema fotovoltaico de alta complejidad. (Imagen editada).....	10
Ilustración 5: Inversor marca Growatt Off Grid SPF 6000 ES Plus.	11
Ilustración 6: Panel monocristalino de 300-350 W, fabricado a partir de silicio cristalino.....	14
Ilustración 7: Panel policristalino fabricado a partir de silicio cristalino.	15
Ilustración 8: Estructura detallada de un panel fotovoltaico.	17
Ilustración 9: Grafico superpuesto de las curvas I-V (marrón) y P-V (verde), que describe el comportamiento del panel fotovoltaico.	21
Ilustración 10: MI 3115 PV Analyser que permite pruebas según la norma IEC 62446.....	21
Ilustración 11: Visualización de un hotspot a través de una imagen térmica. ..	24
Ilustración 12: banda de los semiconductores (Imagen editada).	27
Ilustración 13: Panel fotovoltaico que presenta la degradación tipo delaminación.....	28
Ilustración 14: Imágenes de un mismo panel fotovoltaico. La imagen de la derecha fue obtenida a partir de la técnica de electroluminiscencia y permite detectar microfracturas.	29

Ilustración 15: Panel fotovoltaico con sombra.....	29
Ilustración 16: Medidor PZEM-017con su respectiva resistencia shunt (imagen editada).....	36
Ilustración 17: Interfaz RS485.....	36
Ilustración 18: Microcontrolador ESP32.....	37
Ilustración 19: Esquema de conexión que permite la comunicación entre los componentes ESP32 y PZEM-017 a través de la interfaz RS48.	38
Ilustración 20:Esquema eléctrico que permite la medición del panel fotovoltaico utilizando el PZEM-017.....	39
Ilustración 21:Diagrama de flujo asignación de dirección al esclavo.	44
Ilustración 22: Diagrama de flujo medición del PZEM-017 y comunicación con Google Script.	45
Ilustración 23: Diagrama de flujo que permite visualizar los datos en Google Sheet.	47
Ilustración 24 Sistema fotovoltaico Off Grid instalado en dependencias del PERNC.	48
Ilustración 25: Paneles fotovoltaicos conectado en seria modelo JKM335PP-72.	49
Ilustración 26 Esquema del dispositivo instalado en los terminales del panel fotovoltaico. Fuente: Imagen propia.....	50
Ilustración 27: Componentes electrónicos del dispositivo dentro de la caja estanca. Fuente: Imagen propia.	51
Ilustración 28: Conectores MC4 que permite conectarse al arreglo fotovoltaico. Fuente: Imagen propia.....	51
Ilustración 29: cámara térmica TI-160 de la marca ULIRvision.....	52
Ilustración 30: Prueba de conexión entre el dispositivo y la red Wifi.....	54

Ilustración 31: Gráfico de línea de voltaje, Corriente y potencia. Medición realizada durante 50 minutos.....	56
Ilustración 32: Grafico de línea del voltaje del panel luego de ser limpiado.	56
Ilustración 33: Grafico obtenidos a partir de los 241 datos medidos durante 22 minutos aproximado. Se observa el aumento del voltaje de salida según se iban descubriendo secuencialmente las filas de celdas al ir retirando la placa metálica que bloqueaba la radiación solar.	58
Ilustración 34: Grafico obtenidos a partir de los 109 datos registrados durante 22 minutos aproximado. Se observa el aumento del voltaje de salida según se iban descubriendo secuencialmente las columnas de celdas al ir retirando la placa metálica que bloqueaba la radiación solar.	59
Ilustración 35: Imagen térmica del panel fotovoltaico sin hotspot.	61
Ilustración 36: Imagen térmica del hotspot transitorio provocado de manera intencional exponiendo el panel a una sombra parcial sobre una de sus celdas. La temperatura en la zona del hotspot llega a 48.5°C.	62
Ilustración 37: Grafico del voltaje de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se forma un hotspot de 48,3°C.....	63
Ilustración 38: Grafico de la corriente de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se forma un hotspot de 48,3°C.....	64
Ilustración 39: Grafico de la potencia máxima en función del tiempo en el momento en que se forma un hotspot de 48,3°.	65
Ilustración 40: Imagen térmica del hotspot provocado de manera intencional en la mitad de la celda exponiendo el panel a una sombra, llegando a 41,9°C.....	66
Ilustración 41: Grafico del voltaje de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se forma un hotspot de 41,9°C.....	67
Ilustración 42: Grafico de la corriente de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se forma un hotspot de 41,9°C.....	68
Ilustración 43: Grafico de la potencia máxima en función del tiempo en el momento en que se forma un hotspot de 41,9°C.....	69

Ilustración 44: Imagen térmica del hotspot provocado de manera intencional en la mitad de la celda exponiendo el panel a una sombra, llegando a los 60,6°C.	72
Ilustración 45: Grafico del voltaje de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se genera un hotspot de 60,6°C.....	73
Ilustración 46: Grafico de la corriente de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se genera un hotspot de 60,6°C.....	74
Ilustración 47: Grafico de la potencia máxima en función del tiempo en el momento en que se genera un hotspot de 60,6°C.....	75
Ilustración 48: Imagen térmica del hotspot provocado de manera intencional en tres cuarto de la celda exponiendo el panel a una sombra, llegando a los 73,7°C.....	76
Ilustración 49: Grafico del voltaje de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se genera un hotspot de 73,7°C.....	77
Ilustración 50: Grafico de la corriente de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se genera un hotspot de 73,7°C.....	78
Ilustración 51: Grafico de la potencia máxima en función del tiempo en el momento en que se genera un hotspot de 73,7°C.....	79
Ilustración 52: Imagen térmica del hotspot generado a partir de una fuente de calor externa.	82
Ilustración 53: Voltaje de máxima potencia del panel cuando se genera un hotspot con una fuente externa. Fuente: Google sheets.	83
Ilustración 54: Corriente de máxima potencia del panel cuando se genera un hotspot con una fuente externa. Fuente: Google sheets	83
Ilustración 55: Corriente de máxima potencia del panel cuando se genera un hotspot con una fuente externa. Fuente: Google sheets.	84

RESUMEN

Los hotspot son una de las principales causas de degradación de los paneles fotovoltaicos de tipo monocristalino y policristalino, provocando una disminución en los parámetros eléctricos de generación de energía de estos

sistemas, y generando zonas que presentan temperaturas tan elevadas que pueden derivar en daños incluso permanentes en la estructura y materiales de estos dispositivos. Debido a las altas temperaturas que presentan los hotspot, esto pueden causar daños irreversibles a los paneles fotovoltaicos, en consecuencia, causando un daño completo al arreglo fotovoltaico. Algunos estudios realizados en Inglaterra, Marruecos, Pakistán, e India demostraron que debido a la presencia del hotspot se disminuye de manera constante la capacidad de generación de energía de los paneles fotovoltaicos, siendo los paneles policristalinos los más afectados.

Considerando la importancia de contar con desarrollo de conocimiento y experiencia técnica de elaboración propia a nivel de la especialidad en materias que, como esta, cuentan con poco material de generación local disponible, este trabajo de título aporta un estudio sistematizado sobre el tema para insumar y fortalecer el desarrollo y postulaciones de proyectos de I+D+i. para el Programa de Energía Renovable No Convencionales (PERNC), que tiene como objetivo desarrollar un estudio experimental del comportamiento de paneles fotovoltaicos en relación con la generación de energía, considerando alteraciones provocadas por fallas de tipo puntos calientes “hotspot” en sus celdas. Para llevar a cabo este trabajo, se utilizará una cámara termográfica con el fin de verificar y medir la aparición de hotspots en los paneles de prueba disponibles en laboratorio. Sin embargo, si los paneles no presentan un hotspot, serán expuestos a una sombra de manera intencional para provocar uno y detectar las zonas donde se produce temperaturas elevada. De esta manera se busca provocar una alteración en los parámetros eléctricos para obtener medidas de generación.

Para lograr dichas medidas, se adaptará y aplicará un dispositivo simple de medición en CC disponible en el laboratorio. Además, aprovechando un sistema de monitoreo en línea previamente desarrollado en un proyecto de titulación anterior en su versión básica, se buscará medir y visualizar los datos en tiempo real obtenidos con el dispositivo de medición en CC.

Una vez desarrollado el sistema, se procede finalmente al estudio del comportamiento de los paneles fotovoltaico, realizando una comparativa en el panel con y sin falla hotspot utilizando gráficos de los datos medidos que están disponibles en la base de datos utilizada para esta investigación.

Pera cabe, destacar que debido a la limitación de tiempo y carencia de instrumental específico que permita medir las condiciones climáticas ambientales de Santiago, radiación solar, presión atmosférica, etc. Dichos factores se tomarán en consideración solo si es necesario en los análisis posteriores y serán consultados en la literatura.

Palabras claves: Hotspot, paneles fotovoltaicos, Temperatura, Voltaje, Corriente, Potencia.

Abstract

Hotspots are one of the main causes of degradation of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic panels, causing a decrease in the electrical parameters of energy generation of these systems, and generating areas with such high temperatures that they can lead to even permanent damage to the

structure and materials of these devices. Due to the high temperatures presented by hotspots, this can cause irreversible damage to photovoltaic panels, consequently causing complete damage to the photovoltaic array. Some studies carried out in England, Morocco, Pakistan, and India showed that due to the presence of hotspots, the energy generation capacity of photovoltaic panels is constantly reduced, with polycrystalline panels being the most affected.

Considering the importance of having the development of knowledge and technical experience of own elaboration at the level of the specialty in subjects that, like this one, have little locally generated material available, this thesis provides a systematized study on the subject to contribute to and strengthen the development and applications of R&D&I projects for the Non-Conventional Renewable Energy Program (PERNC), which aims to develop an experimental study of the behavior of photovoltaic panels in relation to energy generation, considering alterations caused by hot spot type failures in their cells. To carry out this work, a thermographic camera will be used in order to verify and measure the appearance of hotspots in the test panels available in the laboratory. However, if the panels do not have a hotspot, they will be intentionally exposed to shade to cause one and detect the areas where high temperatures occur. In this way, an alteration in the electrical parameters is sought to be caused to obtain generation measurements.

In order to achieve these measurements, a simple DC measurement device available in the laboratory will be adapted and applied. In addition, taking advantage of an online monitoring system previously developed in a previous degree project in its basic version, the aim will be to measure and visualize the data in real time obtained with the DC measurement device.

Once the system has been developed, the behavior of the photovoltaic panels is finally studied, making a comparison of the panel with and without hotspot failure

using graphs of the measured data that are available in the database used for this research.

However, it should be noted that due to the time limitation and lack of specific instruments that allow measuring the environmental climatic conditions of Santiago, solar radiation, atmospheric pressure, etc. These factors will be taken into consideration only if necessary in subsequent analyses and will be consulted in the literature.

Keywords: Hotspot, photovoltaic panels, Temperature, Voltage, Current, Power.

1 INTRODUCCIÓN

La energía solar es una de las principales fuentes de energía renovable, limpia y natural que es utilizada por los sistemas fotovoltaicos que están diseñados para generar y suministrar electricidad. Estos sistemas cuentan con distintos elementos como baterías, inversor, regulador de carga y paneles fotovoltaicos o también conocidos como paneles solares. Es importante mencionar que los paneles fotovoltaicos son uno de los elementos fundamentales de un sistema fotovoltaico, ya que son los encargados de transformar la energía solar en energía eléctrica.

Los paneles fotovoltaicos cumplen una función fundamental en la generación eléctrica, por lo que es importante comprender los distintos tipos de degradación que pueden afectar su rendimiento energético. En la literatura y en diverso estudio la degradación se refiere a la disminución gradual en la capacidad de producción de energía de un panel fotovoltaico por el desgaste y agotamiento natural del material tras mucho tiempo en funcionamiento (Reguera,2015). Un estudio realizado por la Unidad de Investigación de Energía Renovable en el Medio del Sahara identificó que existen distintos factores de degradación que puede afectar el rendimiento energético de los paneles fotovoltaicos como son la delaminación, decoloración, baba de caracol o rastro de caracol, hotspot (Kherici, Cheghib, Kahoul, Youness, Affari & Hazem, 2020), esto lo corrobora las siguiente referencia (Alam, Islam ,Mansur, 2024) y también (Sameera, Tariq, Rihan, 2022). El término “hotspot” se refiere a un área del panel fotovoltaico que presenta una temperatura elevada que podría dañar el panel fotovoltaico (Kherici, Cheghib, Kahoul, Youness, Affari & Hazem, 2020). Similarmente, el otro estudio realizado en Marruecos sobre los tipos de degradación en los paneles fotovoltaicos de tipo policristalino y monocristalino reveló la presencia de grietas y micro fisuras, como la degradación de las interconexiones celulares y hotspot, este último fue el tipo

de degradación más preponderante y perjudicial para los paneles policristalino y monocristalino (Bouaichi, Merrouni, Hajjaj, Messaoudi, Ghennioui & Benlarabi, 2019). Esto lo corrobora Ahsan, Niazi, Khan & Yang (2018), publicado por la Universidad De Ciencias de las Administración de Lahore de Pakistán, la cual realizó una comparativa del rendimiento de los paneles fotovoltaicos de silicio cristalino y de película delgada ante la degradación tipo hotspot. Este artículo concluyó que el hotspot resultó ser más perjudicial para los paneles de tipo silicio cristalino. Además, el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos que se especializa en la investigación, desarrollo de energía renovable y eficiencia energética publicó un artículo (Jordan, Silverman, Khan & yang,2017) sobre los modos de degradación y falla que se presentan en los paneles fotovoltaicos de silicio cristalino que fueron instalados los últimos 10 años. Esta investigación concluyo que los hotspot resultaron ser una de las degradaciones más importantes, debido a la disminución significativa que produce en el rendimiento energético (Jordan, Silverman, Khan & yang,2017).

En la actualidad los paneles fotovoltaicos son sometidos a distintas pruebas de certificación para poder entrar al mercado. Dentro de estas pruebas que se realizan se ha documentado el comportamiento de los paneles fotovoltaicos frente a distintos tipos de degradación. Como se indica en [Ferrera & Philipp, 2012] entre los años 2006-2009 se realizaron 297 proyectos de certificación, donde se documenta que la prueba de degradación más perjudicial para los paneles de silicio cristalino son los denominado “hotspot” ya que provocan múltiples fallas como son la desintegración del encapsulado, formación de burbujas en la parte posterior y delantera del panel debido a las altas temperaturas que genera el hotspot. Además del daño físico que genera el hotspot, el estudio realizado por (Bouaichi, Merrouni, Hajjaj, Messaoudi, Ghennioui & Benlarabi 2019) calculó la tasa de degradación de la potencia de los paneles por año debido a la hotspot. Dicho estudio determinó que los paneles monocristalinos presentan una tasa de degradación que varía 2,41% - 2,76% por

año, mientras que los paneles tipo policristalino presentó una tasa de degradación de 3,24% por año esto se debe principalmente por la caída de voltaje de circuito abierto que presentaron los paneles fotovoltaicos después de 3 años de exposición., con este resultado el estudio concluyó que los hotspot pueden provocar una disminución de manera acelerada en la vida útil del panel

En otro estudio, realizado en Reino Unido, se analizaron 2850 paneles fotovoltaicos que presentaron hotspot. En este caso se evidenció el impacto significativo de los hotspot en el rendimiento energético (Dhimish, Mather & Holmes, 2018). Esta investigación concluyó que, a medida que aumenta la cantidad de hotspot en el panel, mayor será la caída en la potencia de salida. Esto quiere decir que existe una relación linealmente proporcional a la cantidad de hotspot y la disminución en la potencia. Un estudio semejante llevado a cabo en la India, tras 22 años de instalación de los paneles fotovoltaicos de tipo monocristalino, corroboró una disminución en el rendimiento energético a medida que aumentaba la cantidad de hotspot, lo que se veía reflejado en una disminución en la capacidad de generar corriente de los paneles (Rajput, Tiwari, Sastry, Bora & Sharma, 2016).

Además, el artículo de Dhimish, Mather & Holmes (2018) calculó el porcentaje de pérdida de potencia, identificando que los paneles que presentaron 5 o más hotspot, puede llegar a perder el 11% de su potencia, Asimismo, el artículo de Rajput, Tiwari, Sastry, Bora & Sharma (2016) demostró que 4 hotspot puede disminuir la potencia del panel en 2,16% por año, lo que significó que después de 22 años de exposición la potencia el panel fotovoltaico disminuyo en un total de 47,57%, debido a que el hotspot disminuyó la corriente de corto circuito.

Por otra parte, en 1990, el Centro de Investigación de Energía Schatz estudio los 192 paneles instalados en el laboratorio Marino HSU Telonicher en la ciudad costera de Trinidad (California), con el objetivo de comparar el rendimiento

energético de los paneles fotovoltaicos durante un transcurso de 25 años, realizando pruebas en los parámetros eléctricos. Estas pruebas evidenciaron que los hotspot alteran principalmente la corriente de corto circuito (Rada, Chamberlin, Lehman & Jacobson, 2017).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Desarrollar un estudio experimental del comportamiento de paneles fotovoltaicos en relación con la generación de energía, considerando alteraciones provocadas por fallas de tipo puntos calientes “hotspot” en sus celdas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Recopilar y sistematizar información actualizada relativa a los “Hotspot” en placas fotovoltaicas, identificando particularmente cómo este tipo de falla afecta la generación eléctrica en paneles fotovoltaicos.
- Diseñar y desarrollar pruebas experimentales, adaptando y aprovechando instrumentos y plataformas de medición, disponibles en el Programa de Energías Renovables no Convencionales del Departamento de Electricidad, para verificar y analizar la presencia de Hotspots en paneles fotovoltaicos seleccionados como muestra representativa.
- Registrar resultados y realizar un análisis comparativo respecto de los datos de los paneles fotovoltaicos entregados por los fabricantes en condiciones estándar (STC y NOCT), para dimensionar el impacto y proponer buenas prácticas en la operación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos respecto de este tipo de anomalías.

1.2 Metodología experimental propuesta

- a) Recopilar y documentar información respecto a la degradación tipo Hotspot.
- b) Documentar comprensiva y sintéticamente el cómo y el por de qué la temperatura afecta la eficiencia de los paneles fotovoltaicos.
- c) Definir el entorno y condiciones donde se realizarán pruebas de medición a efectos de minimizar errores de medición y controlar la mayor cantidad posible de factores que determinan la objetividad de las medidas.
- d) Documentar hallazgos prácticos de este tipo de fallas en paneles de distinta fabricación y condiciones de uso acumulado disponibles en el laboratorio.
- e) Adaptar y aplicar un dispositivo simple de medición en CC disponible en el laboratorio, que permita obtener medidas de generación de energía eléctrica en paneles con y sin fallas tipo Hotspot directamente sobre el segmento de conexión entre paneles e inversor/cargador.
- f) Adaptar y aprovechar un sistema de monitoreo en línea, previamente desarrollado en un proyecto de titulación anterior en su versión básica, para medir y visualizar en tiempo real los datos obtenidos con el dispositivo de medición en CC adaptado.
- g) Desarrollar y registrar pruebas de medición experimental, realizadas con el dispositivo de medición con paneles que presentan fallas tipo Hotspot, versus paneles que no presentan estas fallas.

2 Marco teórico

2.1 Sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico (Ilustración 1) es un conjunto de componentes eléctricos y electrónicos que están diseñados para producir energía a partir de la radiación solar, que es considerada una fuente renovable e inagotable de energía. En estos sistemas, se pueden encontrar los siguientes componentes principales:

- Panel o módulo fotovoltaico
- Regulador de carga
- Baterías
- Inversor

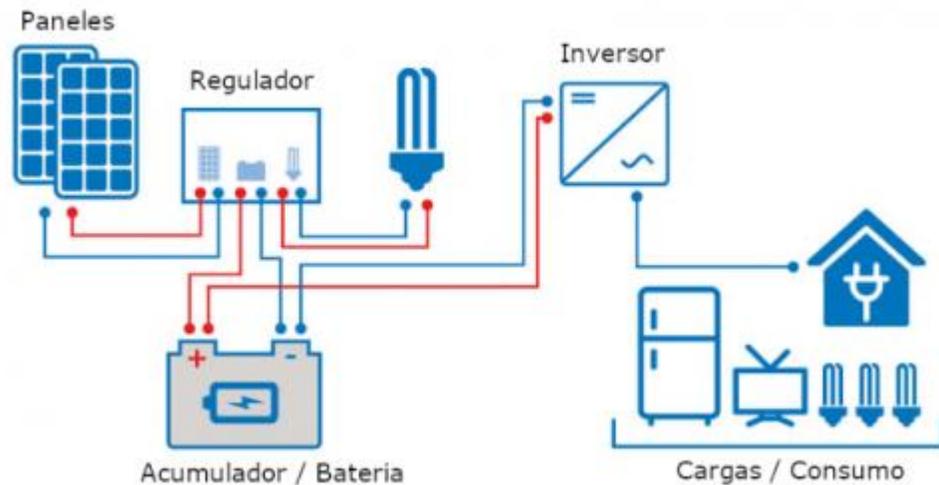


Ilustración 1: Sistema Fotovoltaico con sus componentes eléctricos y Electrónicos. Fuente: <https://www.helioesfera.com/instalacion-fotovoltaica-aislada/>.

2.1.1 Componentes principales de un sistema fotovoltaico

Panel o módulo fotovoltaico

Son módulos (Ilustración 2) que pueden estar conectados en serie o paralelo o paralelo-serie para generar la corriente y el voltaje requerido. Para generar dicha corriente y voltaje es necesario conocer los parámetros eléctricos del panel fotovoltaico los cuales son corriente de máxima potencia (I_{mp}), voltaje de máxima potencia (V_{mp}), de voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y corriente de corto circuito (I_{sc}). Esto permite dimensionar el sistema fotovoltaico de acuerdo con los requerimientos de energía considerados para cada caso. Los paneles están compuestos por un conjunto de celdas (destacado en amarillo en ilustración 2) interconectadas que están fabricadas primordialmente por semiconductores. Estas celdas son las encargadas de transformar la radiación solar en energía

eléctrica. Este es el componente eléctrico más destacado dentro del sistema fotovoltaico ya que es el responsable de la transformación energética.

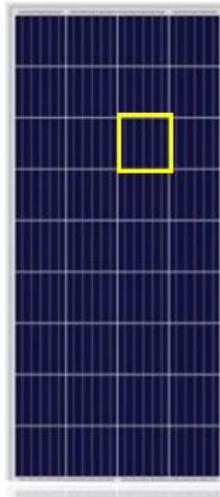


Ilustración 2: Panel o modulo fotovoltaico de 170 W, 12 V (imagen editada para señalar la celda solar). fuente: <https://www.solarstore.cl/producto/panel-solar-170w-12v-poly-resun/>.

Regulador de carga

El regulador de carga (Ilustración 3) desempeña la función de regular de manera eficiente la energía suministrada del panel fotovoltaico hacia las baterías. Esto permite controlar el ciclo de carga y descarga del banco de batería, esto permite prevenir una sobrecarga o sobre descarga, así garantizando la vida útil de las baterías. Para definir el regulador adecuado que se utilizará en un sistema fotovoltaico, se debe determinar el tipo de regulador de carga, ya que existe de dos tipos: MPPT y PWM.

El MPPT tiene la capacidad de regular el voltaje y la corriente de máxima potencia, para trabajar en el punto máximo de potencia del panel fotovoltaico de esta manera, poder regular y cargar las baterías o banco de batería de manera más eficiente, debido a estas características presentan un costo elevado en el mercado. Por otra parte, la tecnología PWM disminuye el voltaje del panel fotovoltaico para igualar el voltaje de la batería o del banco de batería, esto quiere

decir, que al disminuir el voltaje de panel fotovoltaico no se obtiene la máxima potencia, disminuyen su eficiencia, presentando un bajo costo en el mercado.

En este mismo sentido se debe considerar los siguientes parámetros: potencia máxima, y voltaje máximo que entregan los paneles fotovoltaicos, tipo de batería o banco de baterías, el voltaje de la batería o banco de baterías y la corriente máxima de carga de la batería o banco de baterías.



Ilustración 3: Regulador de carga MPPT 75V 15A 12/24V. Fuente: <https://www.naturaenergy.cl/product/regulador-de-carga-victron-bluesolar-75v-15a-12-24v-mppt>.

Baterías

Dentro de un sistema fotovoltaico se pueden encontrar baterías de plomo-acido o alcalinas las cuales están diseñadas para almacenar la energía eléctrica. Dentro de un sistema fotovoltaico las baterías (Ilustración 4) son utilizadas para almacenar la energía eléctrica generada por el sistema fotovoltaico. Este componente es necesario, ya que suministra energía eléctrica a la instalación durante los horarios en que la luz es insuficiente. A la hora de elegir las baterías para un sistema fotovoltaico es necesario considerar las siguientes especificaciones que permitirán el almacenamiento de la energía:

Capacidad de la batería, que se mide en Ah la cual indica la cantidad de energía que es capaz de ser almacenada en la batería y eventualmente entregada a una carga. Permite determinar cuánta energía está almacenada y

evaluar durante cuánto tiempo el sistema de baterías podría estar entregando energía eléctrica a una carga que demanda determinada potencia. Otros datos son el régimen de carga y descarga que admite la batería (ej. ciclo profundo), la esperanza de vida y voltaje nominal de la batería.



Ilustración 4: en el lado izquierdo se observa un batería diseñado para un sistema fotovoltaico básico, mientras que en el lado derecho se observa un batería diseñado para un sistema fotovoltaico de alta complejidad. (Imagen editada). Fuente: <https://deltavolt.pe/general/cuales-son-las-mejores-baterias-para-energia-solar/>. <https://ematchile.com/categoria-producto/baterias/>

Inversor

Trasforma la corriente continua (DC) generada por los paneles fotovoltaicos o dispuesta desde un banco de baterías a corriente alterna (AC) que es utilizada por los componentes eléctricos convencionales. Esta corriente debe poseer las mismas características que la corriente utilizada en la red eléctrica (220 V) y a una frecuencia de 50 Hz. Asimismo, el inversor (Ilustración 5) es el responsable de optimizar la conversión de la energía suministrada por el panel fotovoltaico y/o el banco de baterías y entrega una protección al sistema en caso de que exista una falla eléctrica en algunos de sus elementos. A la hora de elegir un inversor es necesario conocer el tipo de sistema fotovoltaico que se está instalando, ya sea para sistemas aislados de la red (off grid), sistemas conectados a la red de distribución (on grid) o sistemas híbridos que complementan ambas alternativas. En este sentido, a la hora de elegir o caracterizar un inversor para un sistema fotovoltaico se deberán considerar los siguientes aspectos: potencia máxima de transformación (que determina la potencia máxima en AC que podrá entregar a las cargas el inversor), eficiencia máxima del inversor (que indicará el porcentaje

de conversión efectiva CC/AC que ofrece el sistema), sistema/plataforma de monitoreo (que define posibilidades adicionales más allá del uso básico del inversor, tales como monitoreo histórico y en tiempo real, configuración flexible, temporización, interconexión con otros sistemas, etc.).



Ilustración 5: Inversor marca Growatt Off Grid SPF 6000 ES Plus. Fuente: <https://ematchile.com/producto/inversor-growatt-off-grid-spf-6000-es-plus/>.

2.1.2 Panel fotovoltaico

Como se menciona anteriormente existen diversos elementos que son fundamentales para el funcionamiento de un sistema fotovoltaico. Pero cabe destacar que el panel fotovoltaico es considerado el componente esencial dentro de un sistema fotovoltaico, dado que la ausencia de este, el sistema es incapaz de generar energía eléctrica, en consecuencia, los otros componentes no son capaces de cumplir su funcionamiento debido a que dependen de la energía producida por el panel. Como ya es sabido para que el panel genere electricidad utiliza la radiación que incide sobre él, por lo tanto y dada su importancia dentro del sistema es esencial explicar cómo funciona un panel fotovoltaico.

El denominado efecto fotoeléctrico se origina cuando los fotones procedentes de la radiación solar impactan sobre la celda solar transfiriendo la energía al material semiconductor. Esto ocasiona que el electrón, que está unido

al núcleo a través del enlace de valencia, se libere dejando un espacio denominado "Hueco" con carga contraria, pero con la misma magnitud que el electrón. Este fenómeno físico permite que los electrones libres circulen a través del semiconductor utilizando los espacios libres, denominado "huecos". Debido a los electrones libres se produce la corriente eléctrica, que da lugar al efecto fotovoltaico. Para comprender este último efecto, es necesario conocer y entender los semiconductores, puesto que son utilizados para la elaboración de las celdas solares.

Los semiconductores son elementos que poseen la capacidad de ser tanto conductor como aislante. Debido a sus propiedades en la actualidad los semiconductores son fundamentales en la elaboración de distintos componentes electrónicos y la fabricación de las celdas solares. Entre los semiconductores más utilizados para la fabricación de las celdas solares encontramos el silicio, debido a sus diversas propiedades y también por ser el elemento más abundante en la tierra. Los semiconductores se pueden clasificar en dos tipos: intrínsecos y extrínsecos.

Semiconductores intrínsecos son aquellos que poseen un solo tipo de átomo dentro de su estructura atómica. Para aumentar su capacidad conductiva se añaden impurezas a la estructura atómica del semiconductor este proceso es denominada dopaje. Esto da origen a los semiconductores extrínsecos, donde encontramos 2 tipos:

Semiconductores extrínsecos tipo P: Se obtiene cuando se reemplazan algunos átomos de silicio por Boro, Galio al enlace de valencia con el fin de aumentar la cantidad de "huecos".

Semiconductores extrínsecos tipo N: Se obtiene al agregar átomo de Fósforo, Azufre o Arsénico al enlace de valencia del Silicio para aumentar la cantidad de electrones libre.

Como se mencionó anteriormente el silicio es el elemento principal para la fabricación de las celdas solares. Gracias al proceso de dopaje los semiconductores aumentan su capacidad de conducir corriente, mientras que el efecto fotovoltaico utiliza los electrones libres para generar corriente eléctrica.

Para entender cómo se genera un flujo de corriente eléctrica, es esencial conocer cómo están compuestas las celdas solares. Las celdas solares están fabricadas a partir de dos láminas de semiconductor una de tipo P y una de tipo N. Además, utilizando un conductor externo que es empleado para unir estas láminas se genera un campo electromagnético entre las dos láminas que es aprovechado por los electrones libres en la zona N para moverse a través del conductor y ocupar los espacios libres en la zona P (los huecos), así generando un flujo de corriente.

Para más información respecto del principio de operación y física de los materiales que constituyen los paneles fotovoltaicos, podemos sugerir las referencias (Mangalaraja, 2023, Acevedo, 2016)

2.1.3 Tipos de paneles

Existen varios tipos de paneles fotovoltaicos, cada uno fabricados con distintos materiales semiconductores. A continuación, se presentan los principales tipos de paneles fotovoltaicos:

- **Panel Monocristalino**

Están fabricados a partir de una lámina de material único de alta pureza (silicio cristalino) y se distinguen por su color negro (Ilustración 6). A pesar de su alto costo en el mercado debido a su lento proceso de fabricación, cuenta con la mayor eficiencia en comparación a otros paneles, que rodea el 20%.



Ilustración 6: Panel monocristalino de 300-350 W, fabricado a partir de silicio cristalino. Fuente: <https://www.xindunpower.com/es/product/monocrystalline-solar-panels-300w-350w/>

- **Panel Policristalino**

Los paneles policristalinos (Ilustración 7) están fabricados a partir de múltiples cristales de silicio cristalinos los que se elaboran mediante un proceso de moldeo, en el que se funde el silicio y luego se vierte sobre moldes. Una vez que el material se ha solidificado, se corta en delgadas láminas que poseen un color azulado. Este proceso de moldeo es menos costoso en comparación al panel monocristalino ofreciendo un menor costo en el mercado, pero entrega una menor eficiencia de aproximado del 13% al 15%.



Ilustración 7: Panel policristalino fabricado a partir de silicio cristalino. Fuente: <https://www.solarstore.cl/producto/panel-solar-170w-12v-poly-resun/>.

A continuación, se presenta el siguiente cuadro comparativo entre los paneles monocristalino y policristalino. Cabe destacar que según la referencia (Jiang, Cui, Sun, Wang, & Yang, 2020). indica que el panel monocristalino es superior al panel policristalino debido a su estructura interna, su alta eficiencia en la conversión de la radiación solar, y la pureza del material utilizado para su fabricación.

Tipo de panel	Monocristalino	Policristalino
Método de fabricación	Método Czochralsk	Colado de lingote
Microestructura	Estructura cristalina Ordenada	Combinación de pequeñas partículas de cristal.
Color	Oscuro	Azul claro o azul
Eficiencia de la conversión de la radiación solar	Mayor	Menor

Costo de fabricación	Mayor	Menor
----------------------	-------	-------

Tabla 1: Cuadro comparativo de los paneles monocristalino y policristalino, construido a partir de la referencia (Jiang, Sun, Wang, & Yang, 2020).

2.1.4 Estructura del panel fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos son un conjunto de celdas solares conectadas en serie. Estas celdas solares es el componente esencial que convierte la radiación solar en electricidad, por eso, la estructura que forma el panel debe proteger y aislar de cualquier agente externo que pueda provocar algún daño a la celda y además de las condiciones ambientales a las que están expuesto.

Las partes de un panel fotovoltaico, que se pueden observar en la ilustración 8, son:

- Marco: Proporciona la unión de todos los componentes que forman un panel fotovoltaico entregando firmeza a la estructura. Además, el marco entrega una base resistente para ser instalado en la superficie requerida.
- Cubierta exterior: Lámina de vidrio templado que cubre y protege la celda de agentes externos como son la abrasión, el agua, el vapor y la suciedad que tienen la capacidad de causar algún daño en la celda. Además, esta lamina al tener una baja reflectividad permite una mayor absorción de luz.
- Encapsulado: Material aislante fabricado con Etil-Vinill-Acetato (EVA), que cumple la función de evitar el ingreso de aire y humedad encapsulando la celda. Igualmente, permite que las celdas solares se puedan adherir a la cubierta exterior y posterior.

- Celda Solar: Es el núcleo del panel, que está formado por material semiconductor. Es el causante de generar energía eléctrica al estar expuesto a la energía solar.
- Cubierta posterior: Lamina de vidrio o aluminio cubierto de polímero termoplástico que está instalada en la parte posterior del panel con el fin de protegerlo de agentes externos y entregar soporte estructural. Además, proporciona aislamiento eléctrico lo que permite un flujo de corriente controlado.
- Caja de conexión eléctrica: Se ubican en la parte posterior del panel, fabricado de material resistente a la humedad y la suciedad con el fin de proteger los terminales que permite la continuidad del circuito. Estos terminales son dos cables uno positivo y negativo que son utilizados para formar una red de paneles solares.

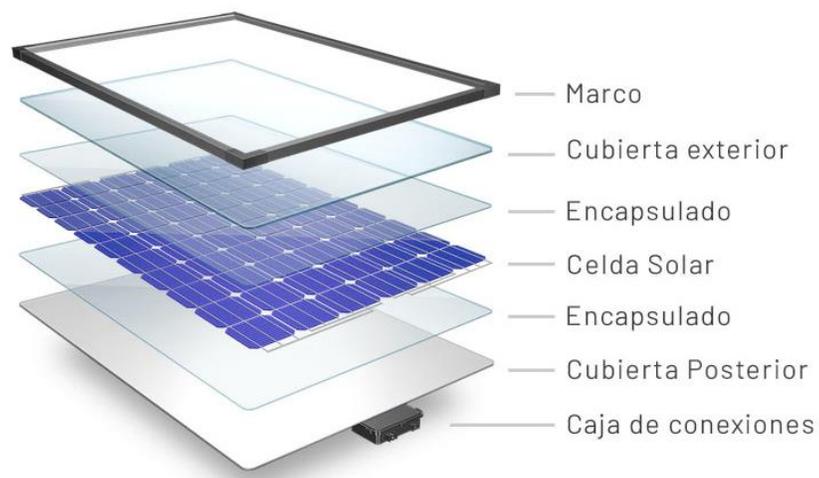


Ilustración 8: Estructura detallada de un panel fotovoltaico. Fuente: <https://teslaenergy.cl/paneles-solares/lo-que-necesita-saber-y-mas/>.

2.1.5 Parámetros eléctricos

Para caracterizar de manera homologable (que permite comparar paneles de distintos fabricantes, modelos, tamaños, capacidades, etc.) el funcionamiento y rendimiento de los paneles fotovoltaicos, es crucial conocer los principales parámetros eléctricos, los cuales están determinados por dos condiciones específicas: STC y NOCT.

- Standard Test Condition (STC)

Se emplea para obtener características específicas del rendimiento máximos del panel en condiciones ideales. Las condiciones de prueba son (Bracamontes, 2020, Perpiñan Lamigueiro, 2023):

- Irradiación: $1000 \left(\frac{W}{m^2}\right)$
- Masa de aire: 1,5
- Temperatura (de la celda fotovoltaica): 25 (°C)

- Nominal Operation Cell Temperatura (NOCT):

Se emplea para obtener las características específicas del rendimiento del panel en relación con la temperatura que posee. Las condiciones de pruebas son (Bracamontes, 2020, Perpiñan Lamigueiro, 2023):

- Irradiación: $800 \left(\frac{W}{m^2}\right)$
- Masa de aire: 1,5
- Temperatura (ambiente): 20 (°C)
- Flujo de aire homogéneo sobre la superficie del panel de 1m/s.

Teniendo en cuenta estas condiciones, se puede obtener las variables eléctricas que presenta un panel fotovoltaico. Conocer el valor de estos variables es esencial, ya que permite diseñar y dimensionar un sistema fotovoltaico.

De hecho, a partir de la NOCT, que es un dato que normalmente se esperaría esté informado por el fabricante de los paneles fotovoltaicos, existen modelos para aproximar la temperatura de operación de una celda fotovoltaica. Por ejemplo:

$$T_c = T_{amb} + \frac{(TONC - 20^{\circ}C)}{800 \frac{W}{m^2}} \cdot G$$

(Ec. 1)

Que ha sido tomado de la siguiente fuente <https://www.helioesfera.com/que-significan-las-siglas-stc-y-noct/>

En el presente trabajo no ha sido posible efectuar medidas durante un período muy extenso de tiempo, con lo cual, resulta importante considerar el modelo de la ecuación (Ec. 1) ya que las medidas y evaluaciones efectuadas sobre paneles han sido desarrolladas en condiciones climáticas propias de las estaciones de otoño-invierno en Santiago de Chile. Esto supone una necesidad importante de que en un trabajo futuro se puedan replicar las medidas en época estival donde las condiciones de humedad y temperatura ambiente son considerablemente diferentes.

Independiente de lo anterior, todo panel fotovoltaico es caracterizado en condiciones de fábrica de manera de proveer parámetros comunes para su utilización en el diseño de sistemas. A continuación, se listan los parámetros eléctricos elementales que posee un panel fotovoltaico y que normalmente son informados por los fabricantes en sus hojas de características técnicas (Rubilar,2023):

Voltaje de circuito abierto (V_{oc})

Es el voltaje máximo del panel que se obtiene a partir del terminal abierto (circuito abierto).

Corriente de corto circuito (I_{sc})

Es la corriente máxima de salida que puede alcanzar el panel. Se produce cuando los terminales están conectados (corto circuito).

Potencia máxima (P_{max})

Es la máxima potencia eléctrica que pueden entregar el panel fotovoltaico.

Tensión o voltaje de máximo potencia (V_{mpp})

Es el voltaje máximo que puede entregar el panel fotovoltaico cuando opera en su máxima potencia.

Corriente de máxima potencia (I_{mpp})

Es el corriente máximo que puede entregar el panel fotovoltaico cuando opera en su máxima potencia.

Conocer las variables eléctricas permite construir la curva I-V y P-V (Ilustración 9), que es uno de los principales gráficos que describe el comportamiento de un panel fotovoltaico y permite encontrar el punto óptimo de trabajo de un panel. Estas curvas consisten en dos gráficos superpuestos. Uno de ellos muestra la relación entre la corriente y el voltaje, y el otro muestra la relación entre la potencia y el voltaje. Al observar ambas graficas de manera conjunta es posible identificar un punto de máxima producción de potencia que está relacionado a una combinación específica de voltaje y corriente. La identificación estática o dinámica de esto último es lo que se conoce como MPPT (máximum power point tracking).

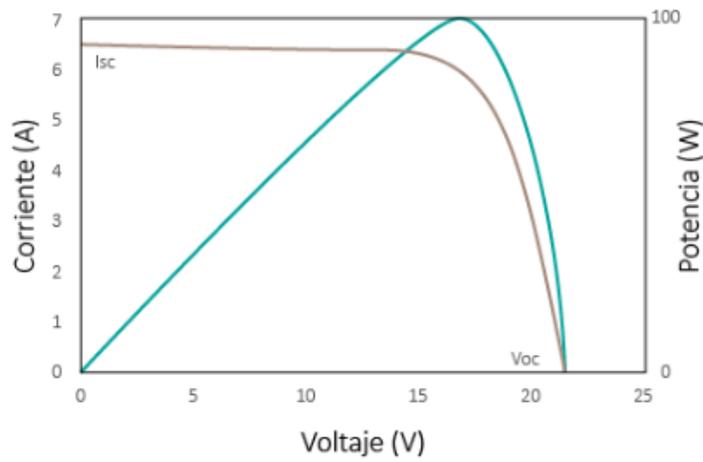


Ilustración 9: Gráfico superpuesto de las curvas I-V (marrón) y P-V (verde), que describe el comportamiento del panel fotovoltaico. Fuente: <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/la-curva-de-intensidad-voltaje-y-la-de-potencia-voltaje-de-un-panel-solar-el-papel-del-regulador-de-carga>

Actualmente existe equipamiento convencional de medidas que es utilizado para chequear cada elemento de un sistema FV y obtener este tipo de curvas características a través de un procedimiento relativamente normalizado. De esta manera, es posible verificar instrumentalmente la característica de desempeño que presenta cada panel y/o conjunto de paneles (string) en un sistema mayor ya sea en el momento de validar su puesta en funcionamiento o bien al momento de efectuar revisiones de rutina. Un ejemplo de este tipo de instrumental es (Ilustración 10).



Ilustración 10: MI 3115 PV Analyser que permite pruebas según la norma IEC 62446. Fuente: <https://www.metrel.es/es/shop/EIS/photovoltaic-and-electrical-installation-testers/mi-3115-pv-analyser.html>.

Sin pretender entrar a competir con este tipo de instrumental comercial, en el presente trabajo se plantea una alternativa de bajo costo para poder acceder a mediciones particulares que incluso no son directamente posibles de obtener con el instrumental estándar ya que se busca estudiar una característica específica (influencia de los hot spot) que en el contexto de las mediciones convencionales no se considera.

2.1.6 Eficiencia

La eficiencia de un panel fotovoltaico es la cantidad de energía eléctrica que puede generar en función de la radiación solar incidente que recibe (porcentaje de transformación efectiva de energía de irradiación solar en energía eléctrica). Por lo tanto, a mayor eficiencia, mayor será la energía eléctrica entregada por el panel. La eficiencia del panel se puede calcular de la siguiente manera.

$$\eta = \frac{V_{mpp} * I_{mpp}}{G * A} \quad (\text{Ec.2})$$

con

$$G = 1000 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

A = superficie del panel fotovoltaico [m^2]

V_{mpp} = Tensión de máximo potencia

I_{mpp} = Corriente de máxima potencia

Como se observa en la ecuación anterior, la eficiencia del panel no solo está determinada por el tamaño, sino también por otros factores como el diseño del panel y las conexiones entre los paneles. Además, existen algunos factores externos que influye en la eficiencia del panel como son la intensidad de la luz solar, temperatura de la celda, sombreado y mantenimiento (Rubilar,2023).

Los rangos actuales de eficiencia que se pueden encontrar en paneles fotovoltaicos están en valores alrededor del 19% al 22% para paneles monofaciales convencionales policristalinos y monocristalinos (Lane, 2024). Sin

embargo, existe mucho desarrollo de nuevas tecnologías y actualmente se conoce de una mayor eficiencia que se logra con los paneles bifaciales e incluso nuevos registros basados en mejoras relativas a los sustratos y materiales (como la Perovskita) (Lane, 2024).

2.2 Hotspot

2.2.1 Definiciones Técnicas

Los hotspot (Ilustración 11), se podrían definir como zonas en los paneles fotovoltaicos que presentan un aumento de la temperatura sobre la temperatura de trabajo en una celda solar o en grupo de celdas solares debido a la disipación de energía [Kim & Kreim, 2018, Dhimish, Holmes, Mehrdadi, Dales & Mather, 2018). Estas altas temperaturas pueden ser provocadas por una polarización inversa debido a una Sombra (Tian, Mancilla, Ellis, Muljadi & Jenkins, 2013) o por una acumulación de flujos de corriente provocada por una microfractura (Dhimish,2020), y por último por una reducción en la capacidad de transferencia y disipación de calor en esa zona del panel que puede generar acumulación de temperatura (Meena, Pareek & Gupta, 2024).

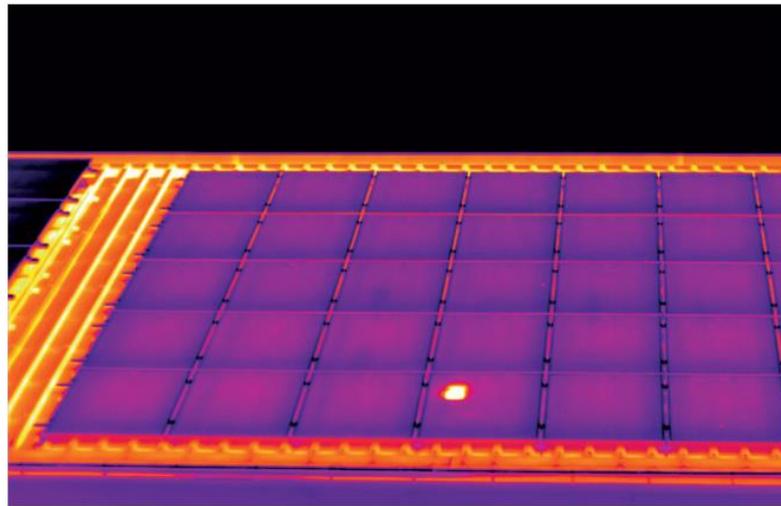


Ilustración 11: Visualización de un hotspot a través de una imagen térmica. Fuente: <https://celdares.mx/que-es-un-punto-caliente-en-un-panel-solar/>

En la actualidad algunos estudios han documentado las altas temperaturas que pueden generar un hotspot. Uno de estos estudios, realizado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL) con

respecto al comportamiento de los paneles fotovoltaicos frente al hotspot se destaca que, los paneles fotovoltaicos de silicio cristalino presentan hotspot de hasta 86°C. En contraste, las celdas que no presentaron hotspot mantenían una temperatura aproximada de 49°C [Ahsan, Niazi, Khan & Yang, 2018]. Además, el trabajo de grado realizado (Castrillon Ocampo, 2022) se observó que los paneles fotovoltaicos que presentaron hotspot alcanzaron temperaturas de hasta 67.9°C. En cambio, las celdas sin hotspot mantenía una temperatura de 52°C. Además, el estudio realizado por Ahsan, Niazi, Khan & Yang (2018) y Alpizar (2023) indicaron que por cada 1°C que aumenta la temperatura la eficiencia eléctrica se reduce entre un 0,4-0,5%. Estos resultados son sumamente importantes ya que los paneles fotovoltaicos para que puedan funcionar de manera óptima deben trabajar bajo condiciones ideales y dentro de esta condición se considera una temperatura de trabajo de 25°C (Kassar, Takash, Faraj, Khaled & Ramadan, 2024)

2.2.2 Parámetros eléctricos afectados por la temperatura

Diversos estudios han demostrado que las altas temperaturas afectan los parámetros eléctricos de un panel fotovoltaico, lo que resulta una disminución en la eficiencia energética (Čabo, Marinić-Kragić, Garma & Nižetić, 2021, Radziemska & Klugmann, 2002). El estudio propuesto por (Teo, Lee & Hawlader, 2012) para disminuir las altas temperatura con el fin de mejorar la eficiencia de un panel mediante el uso de un sistema de refrigeración, evidenció que los paneles fotovoltaicos son más eficientes cuando presentan temperaturas bajas. Por lo tanto, basándose en los diversos estudios, surge la pregunta: ¿Por qué las altas temperaturas afectan la eficiencia de un panel fotovoltaico? La respuesta se encuentra en el silicio.

El silicio es el elemento fundamental de los paneles fotovoltaico, siendo un semiconductor que permite convertir la radiación solar en energía eléctrica. Sin embargo, los semiconductores presentan una característica particular en su

banda prohibida frente a las altas temperaturas que pueden afectar la eficiencia de los paneles fotovoltaico.

Cabe señalar que en general los paneles fotovoltaicos son capaces de convertir principalmente radiación solar dentro del espectro visible (donde el rojo presenta poco aporte) y parte del espectro ultravioleta, mientras que la radiación de espectro infrarrojo que llega a un panel contribuirá al calentamiento del mismo (por tanto, pérdida de eficiencia) y no aportará a la conversión y generación de energía eléctrica.

La banda prohibida es la energía mínima necesaria para excitar un electrón desde su banda de valencia hacia la banda de conducción (Ilustración 12), lo que permite la conducción de los electrones en los semiconductores (Čabo, Marinić-Kragić, Garma & Nižetić, 2021). Cuando los semiconductores son expuestos altas temperaturas, su banda prohibida se reduce, lo que disminuye la energía necesaria para que el electrón “salte” desde la banda de valencia hacia la banda de conducción. Lo que ocasiona una disminución en el voltaje de circuito abierto y, como resultado, una disminución en la potencia de salida. Por lo tanto, a temperaturas altas el panel no puede entregar su máxima potencia (Čabo, Marinić-Kragić, Garma & Nižetić, 2021, Radziemska & Klugmann, 2002). Sin embargo, debido a la reducción de la banda prohibida aumenta el flujo de electrones, lo que resulta un incremento en la corriente de corto circuito (Čabo, Marinić-Kragić, Garma & Nižetić, 2021, Radziemska & Klugmann, 2002).

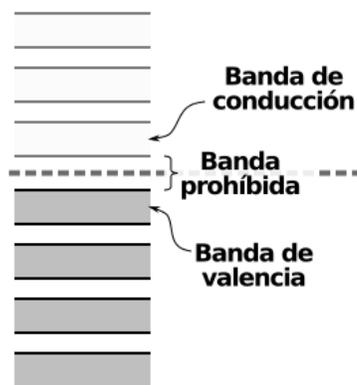


Ilustración 12: banda de los semiconductores (Imagen editada). Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Banda_de_valencia.

2.2.3 Fallas que provocan un hotspot

La presencia de un hotspot en el interior de un panel fotovoltaico puede ser ocasionado por diversos factores, que se clasifican como internos y externos. El primero se refiere aquellos factores internos al panel que pueden ocasionar un hotspot, por el contrario, el segundo son aquellos factores externos al panel que pueden provocar un hotspot (Waqar Akram, Li, Jin, Zhu, Javiad, Zuhaib & Usman Khan, 2020). Entre los factores internos encontramos la delaminación (Meena, Pareek & Gupta, 2024) (Ilustración 13), que consiste en la separación de las distintas capas que posee un panel fotovoltaico debido a estrés ambiental, fabricación defectuosa o una mala adherencia de la película de encapsulado de EVA. Esta separación reduce la transferencia de calor en el módulo, lo que aumenta la temperatura generando un hotspot (Meena, Pareek & Gupta, 2024).



Ilustración 13: Panel fotovoltaico que presenta la degradación tipo delaminación. Fuente: <https://amaranzero.mx/academia/blog/enemigos-de-la-fotovoltaica-delaminacion>

Otro factor interno significativo son las microfisuras (Dhimish,2020, Papargyri, Theristis, Kubicek, Krametz, Mayr, Papanastasiou & Georghiou, 2020) que consisten en fracturas producidas en la celda solar de los paneles fotovoltaico que no son visibles a simple vista debido a sus dimensiones. Estas microfisuras (Ilustración 14) pueden ser causadas por una instalación y transporte inadecuado, factores ambientales y fabricación defectuosa. Como es sabido, las celdas solares están conectadas en serie para que existan un flujo de corriente constante, pero cuando una celda solar presenta una microfisura, las propiedades físicas del semiconductor son dañadas, lo que ocasiona una disminución en su capacidad de transportar corriente causando que se comporte como una resistencia que, por efecto Joule, produce una pérdida de energía en forma de calor (Dhimish,2020) generando un Hotspot.

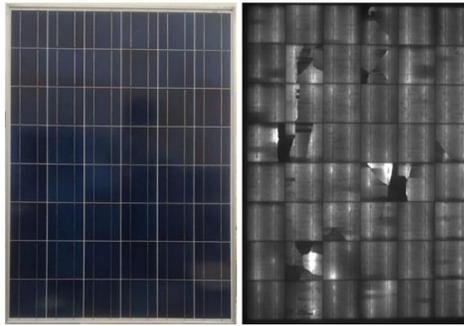


Ilustración 14: Imágenes de un mismo panel fotovoltaico. La imagen de la derecha fue obtenida a partir de la técnica de electroluminiscencia y permite detectar microfracturas. Fuente: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012022000200060

Entre los factores externos que pueden formar un hotspot, se encuentra la sombra (Bayrak, Ertürk, & Oztop, 2017, Kim, Seo, Cho, & Krein, 2016). Este fenómeno puede manifestarse como sombra parcial o total (Ilustración 15) cuando un objeto se interpone entre la fuente de radiación (normalmente del sol) y el panel fotovoltaico. Dado que los paneles fotovoltaicos deben instalarse en el exterior para recibir los rayos del sol, están expuestos a la acumulación de suciedad en su superficie ya sea polvo, hojas, deposiciones de aves o presencia de árboles u otros elementos que pueden provocar sombra.



Ilustración 15: Panel fotovoltaico con sombra. Fuente: <https://engelenergy.es/blog/afecta-sombra-a-placas-solares/>

En un panel fotovoltaico, todas las celdas están conectadas en serie y reciben la misma irradiación. Por lo tanto, cada celda produce la misma corriente y fluye de manera idéntica en cada una. Sin embargo, cuando una celda se ve afectada por la sombra, su capacidad de generar corriente se reduce y la

corriente no fluye de manera uniforme. En consecuencia, la célula no sombreada forzará un flujo mayor de corriente que aquel que esté siendo producido por la célula sombreada. Esto producirá una especie de bloqueo en el flujo de corriente, equivalente a un comportamiento resistivo, lo que conlleva a una disipación localizada en forma de calor generando un hotspot (Tian, Mancilla, Ellis, Muljadi & Jenkins, 2013).

En una cadena de paneles fotovoltaicos cuando se tiene un panel sombreado, tiende a polarizarse inversamente. Esto significa que la corriente producida por la cadena es mayor que la corriente de cortocircuito de panel sombreado, en consecuencia, el voltaje sufrirá una polarización inversa (Kim, Seo, Cho, & Krein, 2016). Debido al voltaje negativo, el panel sombreado no genera energía, sino que la absorbe. Si el panel absorbe una cantidad importante de energía, provocará un aumento de temperatura en la zona sombreada generando un hotspot.

2.2.4 Métodos y tecnología para detección de hotspot

En la actualidad existen diversas técnicas que permiten detectar el hotspot y sus efectos negativos en los paneles fotovoltaicos. Estas técnicas se pueden clasificar con respecto a la interrupción que se requiere realizar o no durante el funcionamiento del panel fotovoltaico. Por tanto, estas técnicas son denominadas técnicas invasivas y técnicas no invasivas, las técnicas invasivas corresponden aquellas que requieren una intervención directa al panel fotovoltaico del sistema fotovoltaico, mientras que las técnicas no invasivas no requieren la intervención directa del panel fotovoltaico del sistema fotovoltaico (Castrillon Ocampo, 2022, Davila Sacota, 2020).

Dentro de las técnicas no invasivas encontramos la Termografía, la Electroluminiscencia y la Fluorescencia UV, mientras que en las técnicas

invasivas encontramos la medición directa sobre el panel de los parámetros eléctricos (Davila Sacota, 2020).

- Medición de los parámetros eléctricos

Este método es uno de los principales para detectar anomalías en los parámetros eléctricos de un panel fotovoltaico midiendo la corriente de corto circuito (I_{sc}), voltaje de circuito abierto (V_{oc}), Potencia máxima (P_{max}), corriente de máxima potencia (I_{mpp}), tensión en el punto de máxima potencia (V_{mpp}) (Rahman, Khan, & Alameh, 2021). Utilizando un dispositivo de medición como el MI 3115 PV Analyser (Ilustración 10) y siguiendo la norma estándar de medición IEC61215, se obtiene los parámetros necesarios para graficar la curva I-V. En base a esto, se puede determinar la tasa de degradación de los paneles, la eficiencia de conversión de la radiación, obtener información necesaria para configurar el sistema fotovoltaico para que opere en su punto óptimo de potencia máxima. Además, permite visualizar la curva para evaluar el rendimiento del panel o del string (Rahman, Khan, & Alameh, 2021). En el laboratorio Nacional de Energía Renovable en Golden, Colorado, utilizaron este método para evaluar la degradación de los parámetros eléctricos de 12 paneles fotovoltaicos de silicio cristalino, utilizando los datos proporcionados por el fabricante como base (Smith, 2012). Mientras que en el Centro Avanzado de Educación (UMPEDAC) en Malasia, se utilizó este método para investigar el comportamiento de los parámetros eléctricos frente a condiciones internas del panel (Islam, Hasanuzzaman, & Rahim, 2018). Además, este método también se emplea para encontrar el punto óptimo de máxima potencia (MPPT) (Ahmad, J., Ciocia, A., Fichera, Murtaza, & Spertino, 2019). En el ámbito de los paneles fotovoltaicos, este método resulta muy útil, ya que proporciona resultados cuantitativos, que pueden ser utilizados en diversas investigaciones y aplicaciones. Sin embargo, presentan una limitación; no son capaces de detectar la falla que está provocando anomalías en los parámetros eléctricos. Esto se puede observar en las siguientes referencias (Smith, 2012, Islam, Hasanuzzaman, & Rahim, 2018, Ahmad, J.,

Ciocia, A., Fichera, Murtaza, & Spertino, 2019) donde en cada una de estas investigaciones se utilizó un segundo método para detectar la falla.

- Imágenes termográficas IR

La termografía infrarroja es una técnica no destructiva para la detección de una variedad de defectos en los paneles fotovoltaico (Maldague, 2000). Todo objeto que supere los 0°K emite una energía térmica en forma de radiación infrarroja. Esta técnica aprovecha esa radiación, que es invisible al ojo humano, para formar imágenes visibles utilizando una cámara térmica. Al observar anomalías en la distribución térmica, se pueden identificar que existe un defecto en el panel fotovoltaico.

Un artículo del Departamento de Ciencia e Ingeniería de la Energía, del Instituto Indio de Tecnología de Bombay, India, sobre el uso de la termografía infrarroja para la inspección no destructiva de módulos solares fotovoltaico (Maldague, 2000), determinó que este método es útil para detectar zona donde existen altas temperaturas, conocidas como hotspot. Sin embargo, esta técnica no puede detectar la causa implícita de la anomalía térmica en la zona. Lo mismo se determinó en el artículo sobre la confiabilidad de las imágenes IR en las plantas fotovoltaica en condiciones de funcionamiento (Buerhop, Schlegel, Niess, Vodermayr, Weißmann, & Brabec, 2012). A pesar de detectar los hotspot se requiere otro método para identificar la causa del aumento de temperatura.

- Técnica de imagen por electroluminiscencia (EL)

Es un fenómeno óptico y eléctrico en el que un material emite luz en respuesta al paso de una corriente o un campo eléctrico fuerte. Cuando se investigan módulos fotovoltaicos, la corriente se alimenta a un módulo Fotovoltaico, y la recombinación radiativa de los portadores provocan una emisión de luz (Muehleisen, Eder, Voronko, Spielberg, Sonnleitner, Knoebl, Ebner, Ujvari & Hirschl, 2018). En el artículo de Muehleisen, Eder, Voronko, Spielberg, Sonnleitner, Knoebl, Ebner, Ujvari & Hirschl (2018) se realizó una

investigación en tres plantas fotovoltaica ubicadas en el sur de Austria (Carinthia), con el objetivo de detectar las fallas que presentaron los paneles fotovoltaicos luego de estar expuesto a una lluvia de granizo. Utilizando la técnica de electroluminiscencia, se encontraron microfractura y grietas en los paneles. Sin embargo, fue necesario utilizar una cámara térmica para detectar los hotspot, debido a que la electroluminiscencia solo detecta la falla que genera la presencia de este. Asimismo, en el artículo (Lane, 2024) menciona que utilizar imágenes infrarrojas es muy útil para detectar los hotspot. Pero a pesar de eso, si se requiere identificar la falla que genera un hotspot utilizar la electroluminiscencia.

2.2.5 Soluciones propuestas para medición y análisis de los parámetros eléctricos

A raíz de lo expuesto, nace la necesidad de encontrar una herramienta que permita medir Voltaje, Corriente, Potencia y Energía, obtener estos datos resulta esencial para llevar a cabo un análisis del impacto de los hotspot en el rendimiento energético de un panel fotovoltaico. Además de tener una herramienta que permita la medición de los parámetros eléctricos, es fundamental contar con una herramienta de almacenamiento, lo que permite el análisis, la visualización y el acceso a los datos. La gran utilidad que tiene el uso de una herramienta de almacenamiento es la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real lo que permite, la temprana detección de los hotspot analizando los parámetros eléctricos en tiempo real.

En el Programa de Energías Renovables No Convencionales (PERNC) de la Universidad Tecnológica Metropolitana se cuenta con un sistema básico de generación fotovoltaica off-grid, que incluye una cadena de paneles fotovoltaicos junto a un inversor y regulador de carga integrado, más un banco de baterías. Aprovechando esta instalación que es utilizada diariamente y provee de energía a ciertas dependencias del laboratorio, se aprovechará de someter a mediciones a sus paneles en busca de fallas tipo hotspot. Adicionalmente se implementará un setup ad-hoc para evaluar numerosos paneles de distintos fabricantes y

características que están disponibles en el laboratorio, de los cuales se seleccionarán los casos más llamativos e ilustrativos a efectos del estudio propuesto.

En el presente trabajo experimental, además de observaciones no intrusivas en base a cámara termográfica, también se aplicará una técnica intrusiva para tomar mediciones que permitan graficar curvas características de Corriente v/s Voltaje y Potencia v/s Voltaje de distintos paneles. Estos gráficos se utilizarán posteriormente para analizar cómo se ve afectada la performance de los paneles frente a las altas temperaturas provocadas por los hotspot, tomando como base los datos entregados por el fabricante del panel que sea medido y analizado. La Energía medida será utilizada para efectuar una comparación en la generación eléctrica entre un panel en condiciones óptimas y otro que presenta una falla.

3 Implementación de las pruebas

3.1 Dispositivos de monitoreo en CC

Mientras la medición instrumental no intrusiva en corriente alterna es posible gracias al fenómeno de la inducción de campo, entre otras técnicas de medición indirecta sin contacto o de cercanía, la medición en corriente continua presenta menos alternativas e instrumentalmente es de hecho mucho más costosa. Es por esto que resulta valioso explorar soluciones de bajo costo para poder realizar mediciones lo menos invasivas posible en CC.

3.1.1 Componentes del dispositivo

El dispositivo principal que utilizaremos para hacer la medida de parámetros en CC es el PZEM-017 (Ilustración 16), que es un medidor diseñado para medir parámetros eléctricos en corriente continua. Tiene la capacidad de medir en sistemas con voltaje de hasta 300 (V) mientras que el nivel de corriente a un voltaje dado estará que está condicionada por la resistencia shunt por la cual pasa la corriente generando una muestra de caída de tensión que es muestreada por el dispositivo. En nuestro caso, utilizaremos una resistencia shunt que tolera como máximo 50[A]. Además, este medidor puede obtener los parámetros de potencia y energía, lo que lo convierte en una herramienta muy útil para medir. El PZEM-017 al no poseer una pantalla utiliza una interfaz de comunicación RS485 para enviar los datos y así ser visualizado en algún entorno de programación.



Ilustración 16: Medidor PZEM-017 con su respectiva resistencia shunt (imagen editada). Fuente: <https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-1512171225-medidor-de-consumo-de-corriente-continua-peacefair-pzem-017- JM>. <https://www.amazon.com.mx/PEACEFAIR-Multifunci%C3%B3n-Comunicaci%C3%B3n-Amper%C3%ADmetro-Volt%C3%ADmetro/dp/B0B644VTP9?th=1>

La interfaz RS485 (Ilustración 17) se conecta al medidor utilizando los pines A+ y B-. Estos pines son utilizados para la transmisión de datos que su fundamenta en la diferencia de voltaje, donde el primero indica el voltaje positivo y el segundo el voltaje negativo esta diferencia permite la captura del dato, ya que elimina el ruido, previene la interferencia y facilita la comunicación a largas distancias y, por último, incluye los pines de alimentación y GND.



Ilustración 17: Interfaz RS485. Fuente: <https://maxelectronica.cl/componentes-electronicos/591-modulo-conversor-serial-ttl-a-max485-rs485-3p.html>

El medidor PZEM-017 utiliza la interfaz RS485 que es un estándar de comunicación que posee la capacidad de transmisión datos en forma serial a altas velocidades y largas distancias a través de un bus bidireccional, también cuenta con la capacidad de conectarse y comunicarse con hasta 32 usuarios, para alimentar esta interfaz se requiere 3.3V o 5V, incluye pines TX y RX permitiendo la comunicación serial, sin embargo, una característica relevante que tiene es el uso del protocolo Modbus.

Por otra parte, los datos muestreados por el medidor serán enviados a través de protocolo Modbus para su procesamiento en un sistema microcontrolador ESP32 (Ilustración 18). El ESP32 es un microcontrolador de bajo consumo y bajo costo de fabricación, este microcontrolador es una edición más avanzada que el ESP8266, dado que una de sus características principales es la capacidad de conectarse a redes de WiFi y Bluetooth. Este microcontrolador funciona a una frecuencia de 240MHz y cuenta con un procesador de doble núcleo permitiendo ejecutar múltiples tareas de manera eficiente, adicionalmente cuenta con 34 pines GPIO, donde permite realizar conversión analógico-digital, conversión digital-analógica, sensor táctil, controlador SD/SDIO/MMC, pines TWI, comunicación SP, puertos UART o puerto serial que es compatible con la interfaz RS485 y por último posee pines de alimentación de 5V y pines GND. El ESP32 se puede programar en distintos lenguajes de programación como C++, Python y Arduino, lo que facilita la creación de programas y aplicaciones.



Ilustración 18: Microcontrolador ESP32. Fuente:
<https://www.mouser.cl/ProductDetail/Esspressif-Systems/ESP32-DevKitC-32E?qs=GedFDLaBXFpgD0kAZWDrQ%3D%3D>

3.1.2 Esquema Eléctrico

Como se observa esquema (Ilustración 19), se utilizarán los pines UART IO17 (TX) e IO16 (RX) del ESP32 estos se conectarán de manera directa a los

pinos TX y RX del RS485, asimismo el medidor PZEM-017 se conectará al RS485 a través de los pines A y B. El RS485 y el PZEM-017 se deben alimentar con 5V se utilizará el pin de alimentación del ESP32 que proporciona los 5V y por ultima se conectará los GND de cada dispositivo.

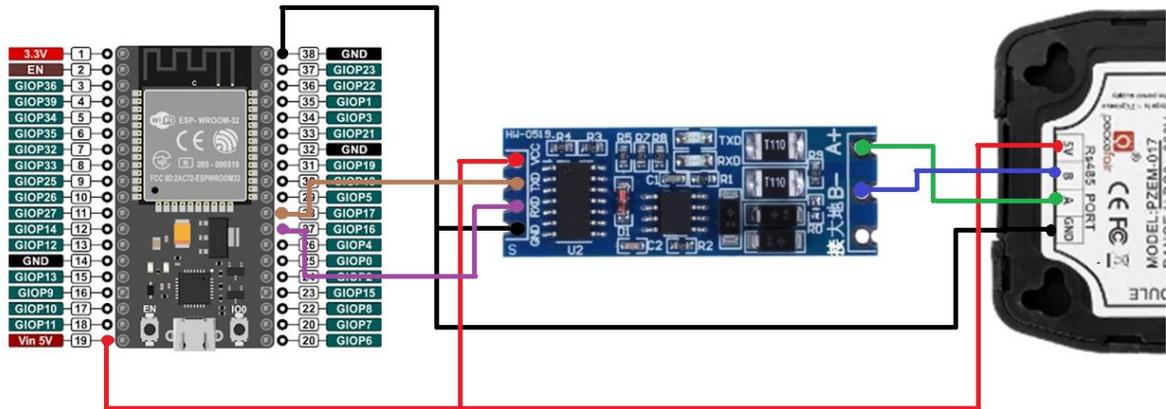


Ilustración 19: Esquema de conexión que permite la comunicación entre los componentes ESP32 y PZEM-017 a través de la interfaz RS48. Fuente: Imagen propia

En el siguiente esquema (Ilustración 20), se ilustra la conexión que permite realizar las mediciones al panel fotovoltaico. Los paneles fotovoltaicos poseen dos terminales, una positiva y la otra negativa las cuales están conectadas al inversor. Utilizando los terminales extremos de la resistencia Shunt estas se conectarán en serie al terminal negativo del panel fotovoltaico y del inversor, esto permite medir la corriente mientras que los terminales de voltaje se conectarán de manera directa al medidor. La caída de tensión que existen entre dichos terminales permitirá medir la corriente. Además, uno de los terminales del PZEM-017 se debe conectar al polo positivo para una referencia en la tierra común. Por último, uno de los extremos de la resistencia Shunt se debe conectar al PZEM-017 esto permite medir la corriente que fluye a través de la resistencia shunt.

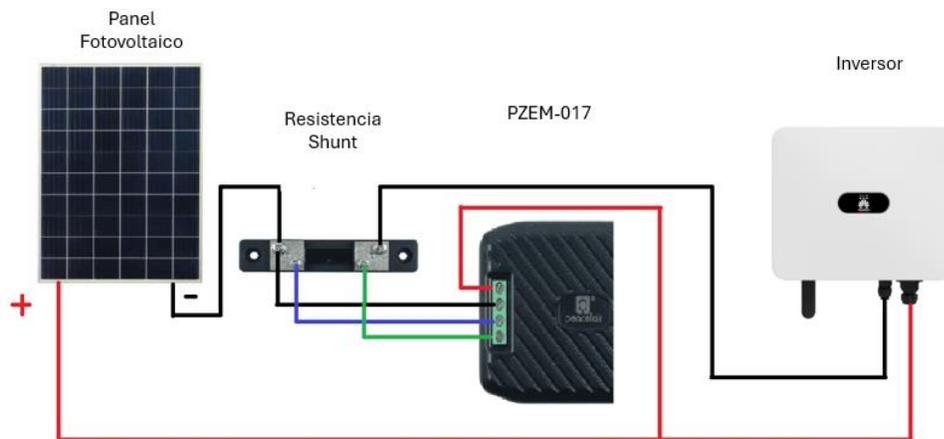


Ilustración 20: Esquema eléctrico que permite la medición del panel fotovoltaico utilizando el PZEM-017. Fuente: Imagen propia.

3.1.3 Desarrollo del software y herramienta on-line de captura, transmisión y almacenamiento de datos.

Como se menciona en los párrafos anteriores el medidor PZEM-017 utiliza la interfaz RS485 para enviar los datos utilizando el protocolo Modbus. Según el artículo (L, A., & Jacob, 2023, Tamboli, Rawale, Thoraiet, & Agashe, 2015). Modbus es un protocolo de comunicación abierto la cual permite la transmisión de datos entre distintos equipos electrónicos conectados a un mismo bus, su arquitectura se basa en la relación maestro-esclavo, esto significa que el dispositivo maestro (ESP32) es quien solicita la información, mientras que el dispositivo esclavo (PZEM-017) envía la información solicitada.

Este protocolo en un principio estaba orientado a los controladores lógico-programables (PLC), no obstante, dado que el protocolo es de uso público se amplía la posibilidad de extender su uso en distintos dispositivos y posibilitando la creación de modos de transmisión de datos adaptado a los dispositivos utilizados.

- Modbus RTU (Remote Terminal Unit)

Se utiliza para desarrollar la comunicación múltiple entre maestro/esclavo (Tamboli, Rawale, Thoraiet, & Agashe, 2015). hablando en termino de conexión, es posible conectar un maestro con hasta 247 esclavo. El Modbus RTU utiliza como capa física la interfaz RS-232 y RS-485 la distinción radica en que el primero utiliza una comunicación full-dúplex esto significa que envía y recibí datos simultáneamente, mientras que el segundo tiene una comunicación half-dúplex la información no es enviada y recibida al mismo tiempo. La información que se transmite entre los dispositivos se lleva a cabo en formato binario, por lo tanto, se envían paquetes de byte.

- Modbus ASCII (American Standard Code for Information Interchange)

Una característica fundamental que posee Modbus ASCII es la representación de los datos enviados donde un byte enviado se convierte en 2 carácter ASCII, mientras que el Modbus RTU envía los datos byte en binario (Gallegos Ramirez & Delgado Guerrero 2015). Es importante destacar que la comunicación realizada en este modo de transmisión y la capa física utilizada es la misma que utiliza Modbus RTU (Tamboli, Rawale, Thoraiet, & Agashe, 2015).

- Modbus TCP

Es una variante del protocolo Modbus RTU y ASCII donde utiliza una interfaz ethernet que contenga el protocolo TCP/IP (Tamboli, Rawale, Thoraiet, & Agashe, 2015, Gallegos Ramirez & Delgado Guerrero 2015).

- Herramienta de almacenamiento de datos

Google Sheet es una hoja de cálculo online de Google, que forma parte del conjunto gratuito de Google Docs Editors. Esta hoja de cálculo está disponible como aplicación móvil y aplicación web. Esta aplicación es una herramienta muy útil debido a su capacidad de ofrecer herramientas que permite analizar datos, a

través de funciones y formulas y a la vez visualizar los datos utilizando gráficos y tablas. Además, posee una interfaz gráfica amigable, que permite al usuario utilizar esta herramienta de manera más fácil.

Pero una de las características fundamentales es que posee la capacidad de ser una plataforma de almacenamiento de datos, y es compatible con Google App Script que permite crear código de programación, para automatizar, enviar y recibir y darle nuevas funciones a Google Sheets.

Google Script es un entorno de desarrollo que permite interactuar con Google Sheet utilizando un lenguaje de programación, lo que permite editar la hoja de calcula, aplicar funciones y conectarse con diversos servicios de Google. Pero una de las aplicaciones más importante es que tiene la capacidad de utilizar API lo que permite que Google Sheet pueda comunicarse con software externos permitiendo que este pueda recibir y enviar datos.

La Interfaz de Programación de Aplicaciones (API), es un conjunto de reglas y protocolos para la comunicación entre diferentes softwares. En la actualidad existentes distintas API con diferentes funciones y aplicaciones. A continuación, se mencionarán algunas API.

- API SOAP (Simple Object Access Protocol)

Protocolo de comunicación que utiliza la red para llamar servicios o acciones que esta definidas en un servicio web. Cada operación o mensaje se envía en formato XML y utiliza el protocolo de transporte HTTP. Esta API es una de las más antiguas y su estructura de basa en WSDL lo que convierte esta API es muy estructurada y compleja de aplicar.

- API RCP (Remoto Procedura Call)

Es la primera Api en desarrollarse, la cual es utilizada para llamar métodos o funciones. Esta API envía mensajes en formato XML y JSON utilizando el protocolo de transporte de información HTTP.

- API REST (Representational State Transfer)

Esta API es la más utilizada y está diseñada para exponer datos en el servidor, la cual pueden ser enviados en distintos formatos como son JSON, XML, HTML. Su estructura está basada en operaciones HTTP estándar lo que permite un uso más fácil y flexible al solicitar y exponer los datos.

Para realizar el código que permita visualizar y enviar los datos extraídos del medidor PZEM-017 se ocupará el entorno Arduino, ya que este programa es compatible con el microcontrolador ESP32. Como se ha mencionado previamente existen tres modos para la transmisión de datos Modbus RTU, Modbus ASCII y Modbus TCP. En este caso se optará Modbus RTU, ya que, en términos de velocidad, transmisión de datos y ancho de banda es mucho más eficiente en comparación con Modbus ASCII. Además, transmite datos en formato binaria y utiliza como capa física la interfaz RS485. Además, utilizando la capacidad que tiene el ESP32 para conectarse a una red Wifi, este se conectará para enviar la solicitud HTTP Get a Google Script, para poder visualizar los datos en tiempo real en Google Sheet

- Diagrama de flujo

Para facilitar la comunicación, se establecerá una dirección al esclavo (PZEM-017) para que el Maestro (ESP32) pueda identificarlo. Por lo tanto, como se muestra en el diagrama de flujo (Ilustración 21), el proceso de asignar la dirección al esclavo se inicia mediante la comunicación serial a una velocidad de 115200 baudios para la comunicación al monitor serial de Arduino. A continuación, se establece una comunicación serial2 con una velocidad de 9600 baudio, para la transmisión de datos entre el PZEM-017 y el ESP32. Esta información se enviará en formato de 8 bits.

Una vez configurado la comunicación, se procede a asignar la dirección del esclavo al PZEM-017 para ser identificado. Para confirmar la dirección asignada, se inicia la comunicación entre el PZEM-017 y el ESP32. El programa entra en

un bucle donde lee los registros de entrada Modbus desde la dirección asignada del dispositivo PZEM-017. Estos registros de entrada contienen lo datos solicitado por el programa, siendo en este caso el valor del voltaje. Si la lectura es exitosa, el programa muestra el valor del voltaje del monitor serial. En caso contrario, si la lectura no es exitosa, el programa muestra "Failed to read modbus" en el monitor serial, indicando que hubo un problema en la asignación de dirección. Después de mostrar el valor de voltaje o el mensaje de error, el programa esperara 5 segundo antes de repetir el proceso e iniciar de nuevo el bucle principal.

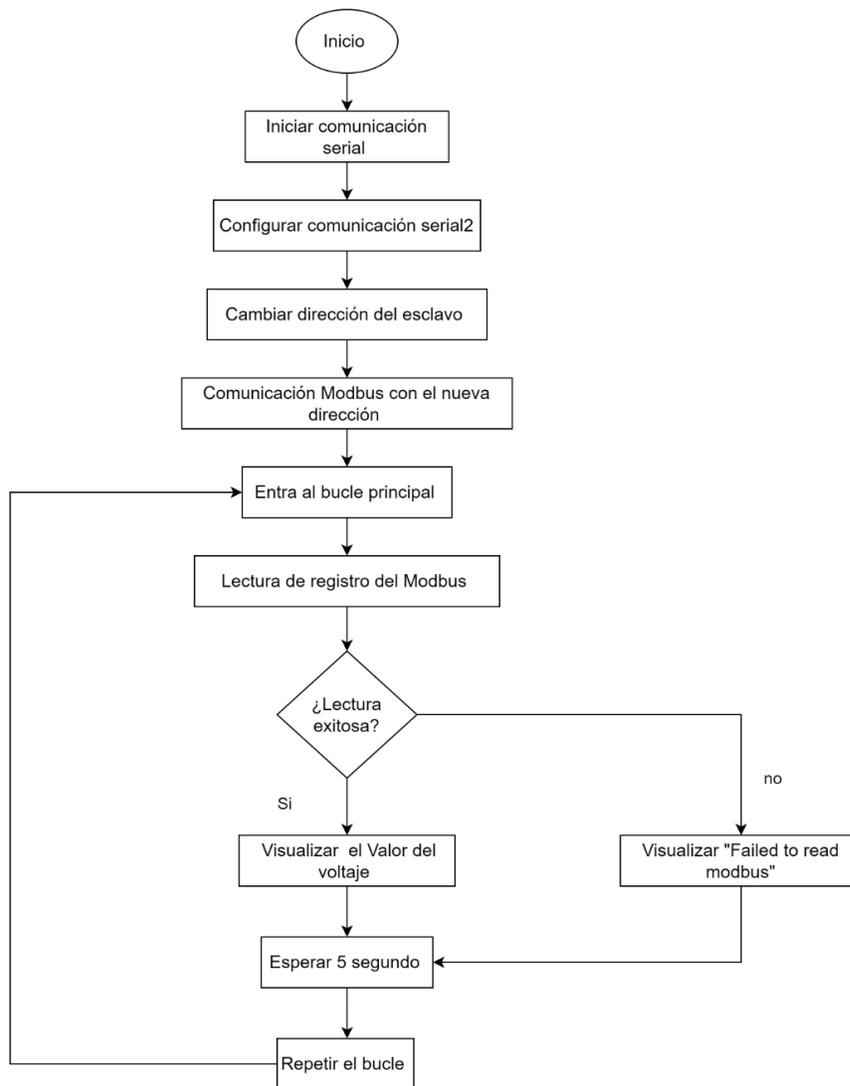
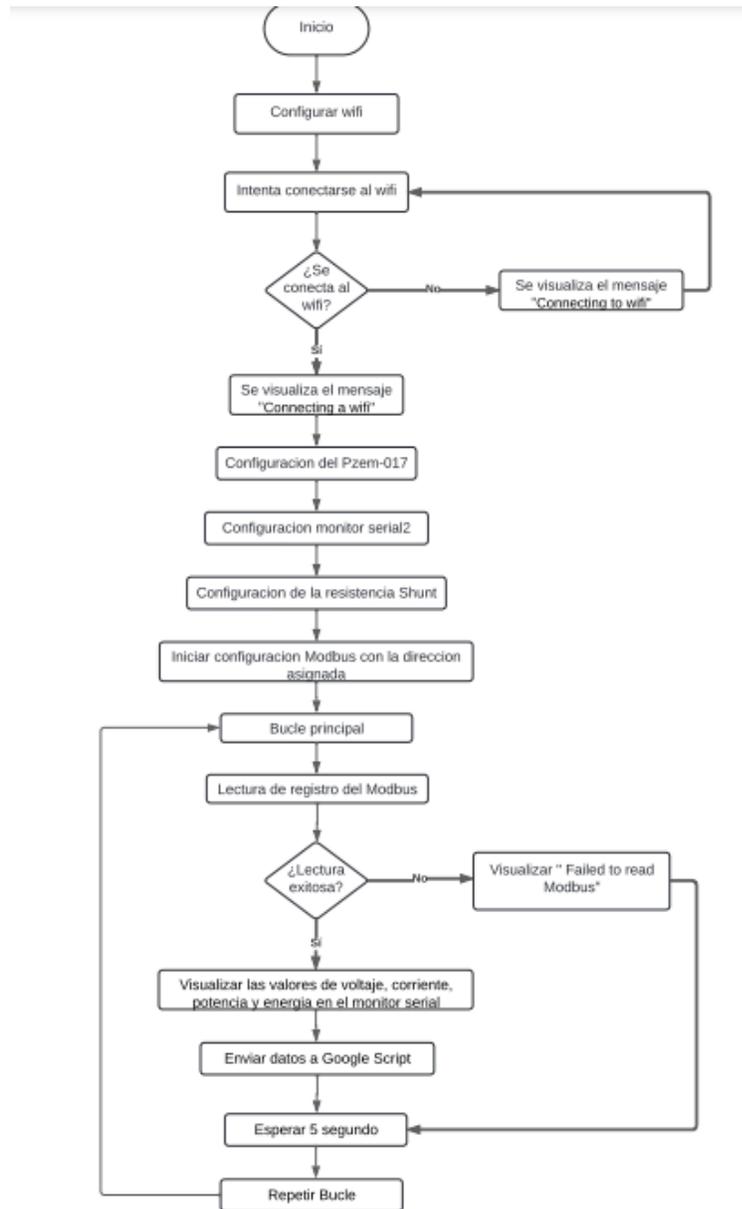


Ilustración 21: Diagrama de flujo asignación de dirección al esclavo. Fuente: Imagen propia.

Una vez confirmada la correcta comunicación entre el ESP32 y el PZEM-017 utilizando el entorno Arduino, se procede a emplear el siguiente código que permitirá medir los parámetros eléctrico de voltaje, corriente, potencia y energía, para ser enviados a Google Script a través de una solicitud HTTP Get. Para explicar el código, se utilizará el diagrama de flujo lectura del PZEM-017 y comunicación con Google Script (Ilustración 22).



*Ilustración 22: Diagrama de flujo medición del PZEM-017 y comunicación con Google Script.
Fuente: Imagen propia*

Para iniciar el programa configura la conexión a Wifi con los datos entregados, para luego intentar conectarse a la red Wifi. En caso de no conectarse se imprime en el monitor serial “Connecting to Wifi...”. En caso contrario si logra conectarse se imprimirá “Connecting a Wifi” en el monitor serial,

lo cual el programa continuará con la configuración del PZEM-017. Luego de conectarse a la red Wifi el código establecerá la comunicación serial entre el PZEM-017 y el ESP32. Además, es importante configurar la resistencia shunt conectada al dispositivo PZEM-017, ya que esto permite una medición precisa de la corriente. Una vez establecida comunicación con la dirección del esclavo se ingresa al bucle principal del código.

Dentro del programa, el protocolo Modbus lee los registros del dispositivo PZEM-017, que contiene los valores del voltaje, corriente, potencia y energía. Si la lectura es exitosa, los valores medidos se muestran en el monitor serial para luego ser enviados a través de una solicitud HTTP GET a Google Script para su visualización y almacenamiento en Google Sheet. En caso contrario, si la lectura no es exitosa, se visualiza el mensaje "Failed to read Modbus". Después de visualizar los valores o el mensaje de error el programa espera 5 segundos y se repetirá el bucle principal.

El siguiente código (Ilustración 23) se diseñó, para exponer los datos enviados del PZEM-017 a Google Sheet, a través, de una solicitud HTTP Get, utilizando la API Rest desarrollado a través de un código en Google Script.

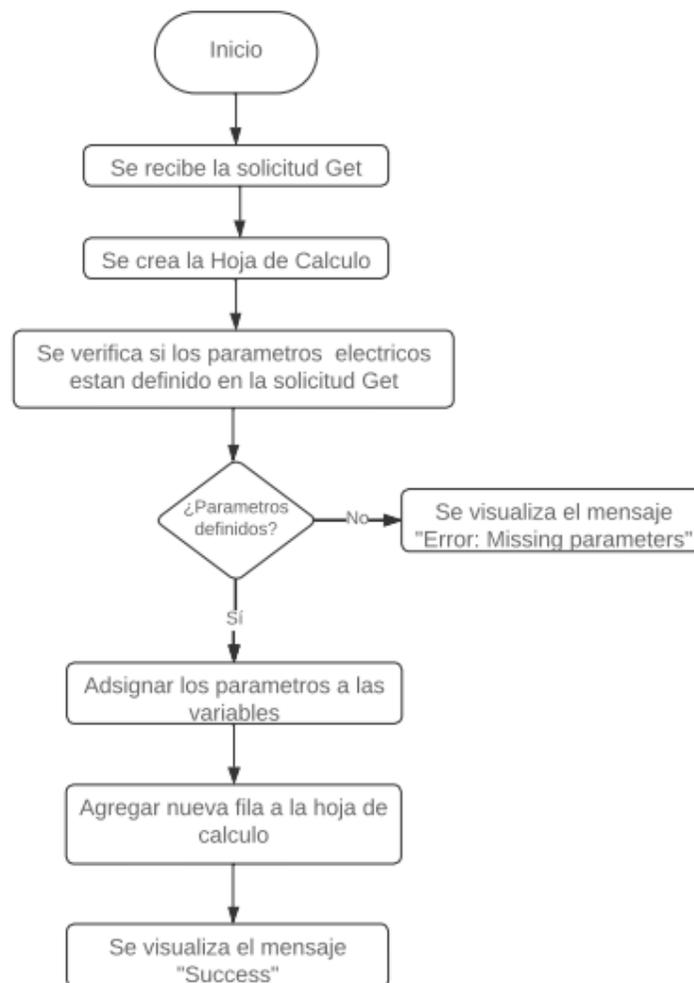


Ilustración 23: Diagrama de flujo que permite visualizar los datos en Google Sheet. Fuente: Imagen propia

Se da inicio al programa de manera automática, cuando se recibe la solicitud HTTP GET, para luego abrir la hoja de cálculo. A continuación, el código verifica que los parámetros eléctricos estén definidos en la solicitud GET. Si los parámetros no están definidos se envía un mensaje “Error Missing Parameters”, en el caso contrario si los parámetros vienen definidos, serán nuevamente definido, pero en las variables que se encuentran en el código. Luego se agrega una fila en la hoja de cálculo agregando el tiempo, para así mostrar las variables

definidas en tiempo real. Por último, se visualiza en mensaje “Success” donde indica que se desarrolló de manera correcta el proceso.

3.1.4 Diseño y metodología de pruebas a realizar

Para realizar las mediciones correspondientes, se utilizará los paneles fotovoltaicos instalado en el año 2020 para el sistema fotovoltaico Off Grid (Ilustración 24), del Programa de Energía Renovable No Convencionales (PERNC) de la Universidad Tecnológica Metropolitana. El sistema fotovoltaico cuenta con un inversor híbrido de 5KW que incluye el regulador de carga MPPT de 120 (V) 18 (A), el banco de 4 baterías de 12 (V) 100 (Ah) cada una, estas están conectada en serie entregando un total de 48 (V) 100 (Ah), además el sistema cuenta con interruptores de protección desde el inversor hasta los enchufes de las cargas (interruptor 1) y desde el inversor hasta los paneles fotovoltaico (interruptor 2).

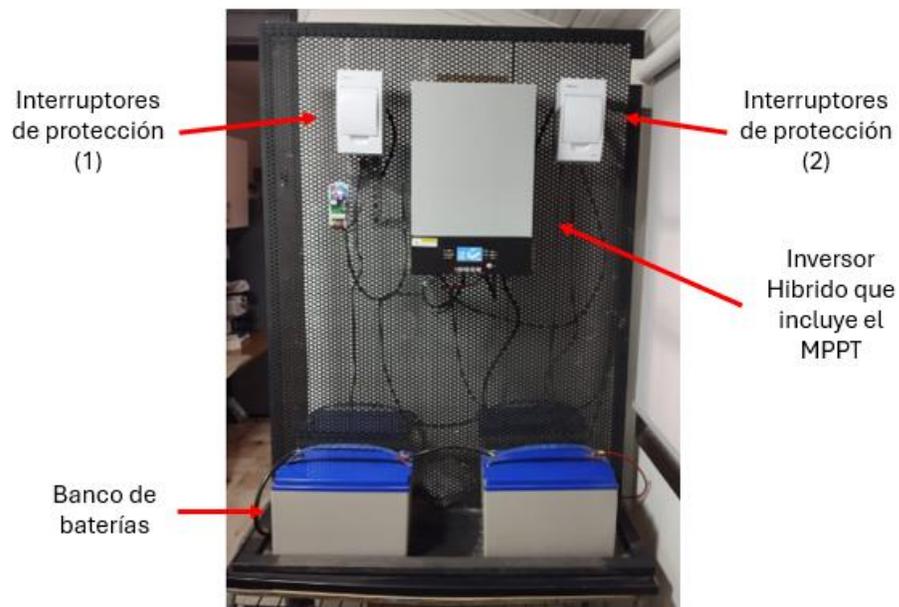


Ilustración 24 Sistema fotovoltaico Off Grid instalado en dependencias del PERNC. Fuente: Imagen propia

El arreglo de los paneles del sistema fotovoltaico está conformado por 4 paneles de tipo policristalino conectados en serie (Ilustración 25) que presenta la siguiente característica tabla 2:



Ilustración 25: Paneles fotovoltaicos conectado en serie modelo JKM335PP-72. Fuente: Imagen propia.

Características eléctricas del panel fotovoltaico modelo JKM335PP-72		
Condición Estándar	STC	NOCT
Potencia máxima Pmax	335 [W]	249 [W]
Tensión de máxima potencia (Vmpp)	38 [V]	35,6 [V]
Corriente de máxima Potencia (Impp)	8,82 [A]	6,99 [A]
Voltaje de circuito abierto (Voc)	47,2 [V]	43,8 [V]
Corriente de corto circuito (Isc)	9,18 [A]	7,52 [A]

Tabla 2: Características eléctricas del panel fotovoltaico. Datos adquiridos de la referencia (Rubilar, 2023)

Para tomar los datos requiero es necesario instalar el dispositivo entre los terminales del panel fotovoltaico y el inverso como se muestra en la ilustración 26. De esta manera el dispositivo podrá realizar las mediciones de manera correcta. Sin embargo, Existen factores que constituyen tareas adicionales que por limitación de tiempo y carencia de instrumental específico (por ejemplo, piranómetro o medidor de radiación de alta precisión) no pueden ser medidos experimentalmente en el contexto de este trabajo. Por ejemplo: condiciones climáticas ambientales de Santiago, niveles de radiación solar promedio, presión atmosférica, etc. Dichos factores se tomarán en consideración en los análisis, pero en caso de ser necesarios, serán consultados directamente de la literatura, modelos, simuladores y bases de datos disponibles y oficiales.

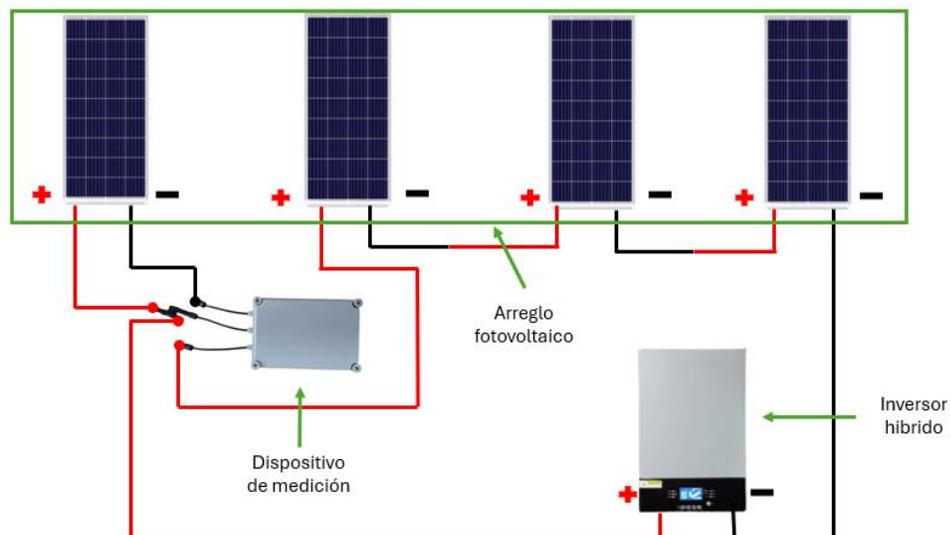


Ilustración 26 Esquema del dispositivo instalado en los terminales del panel fotovoltaico. Fuente: Imagen propia.

- Desarrollo del dispositivo

Los elementos electrónicos del dispositivo fueron montados dentro de una caja estanca (Ilustración 27) para asegurar su protección contra la suciedad y el polvo.

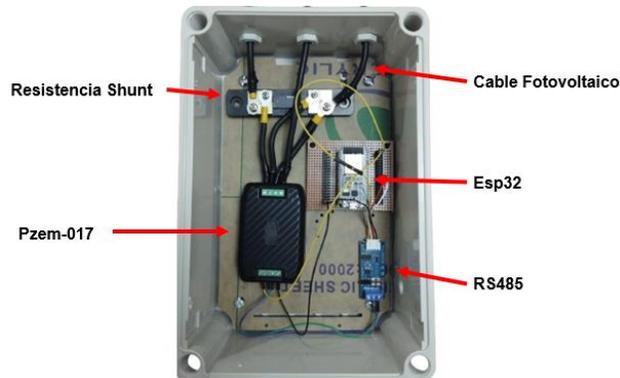


Ilustración 27: Componentes electrónicos del dispositivo dentro de la caja estanca. Fuente: Imagen propia.

Se utilizaron cable fotovoltaico para conectar el dispositivo Pzem-017 a la resistencia shunt y este mismo poder conectarse a los terminales del panel fotovoltaico utilizando MC4 (Ilustración 28)

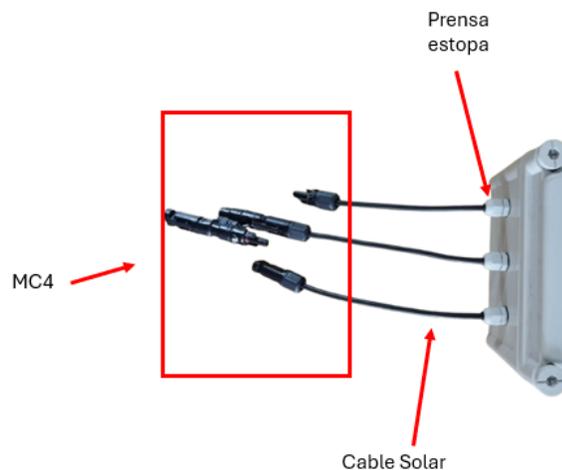


Ilustración 28: Conectores MC4 que permite conectarse al arreglo fotovoltaico. Fuente: Imagen propia.

3.2 Instrumento para la detección de hotspot.

Como se menciona en el capítulo 2.2.4, utilizar un dispositivo de medición solo permite registrar los parámetros eléctricos de un panel fotovoltaico, lo que necesario para realizar los análisis posteriores. Por lo tanto, es fundamental contar con un dispositivo adicional que permita detectar la presencia de un hotspot dentro del panel fotovoltaico. Para esto se utilizarán imágenes térmicas obtenidas a partir de cámaras termográficas.

En este caso, para detectar la presencia de hotspot en los paneles fotovoltaico, se utilizará la cámara térmica TI-160 de la marca ULIRvision (Ilustración 29). Esta cámara cuenta distintas características avanzadas como la captura de imágenes térmicas en color de alta nitidez, lectura precisa de temperatura, anotación de voz, sonido de alarma, display LCD, almacenamiento en memoria flash, conexión USB a PC y Software de análisis (ULIRvision, 2014). A continuación, se presenta la característica especificaciones técnicas de la cámara termográfica (Tabla 3).



Ilustración 29: cámara térmica TI-160 de la marca ULIRvision. Fuente: <http://www.ulirvision.es/thermal-imaging-camera-ti160.html>

Elemento de la cámara	Tipo	Características
Detector IR	Resolución	160 x 120
Calidad de imagen	FOV	21° x 16° / 0.15m
	Ifov	2.3 mrad
Medición	Rango de temperatura	-20°C a + 120°C
	Precisión	±2°C
	Modo de medición	4 puntos, medición de línea, alarma de temperatura, temperaturas máximas, mínima y promedio.
	Ajuste de sistema	Fecha, tiempo, unidad de temperatura °C, °K, °F.
Almacenamiento	Medio de almacenaje (memoria interna)	Hasta sobre 1.500 imágenes
	Tipo de archivo	JPEG.

Tabla 3: Características específicas de la cámara termográfica TI-160, datos adquiridos de la referencia (ULIRvision, 2014).

4 Resultados y análisis experimental

En el presente capítulo se presentan los resultados de las pruebas experimentales desarrolladas sobre los distintos dispositivos y sistemas, las cuales incorporan gráficos en dominio temporal real de la toma de muestras en DC efectuada gracias al dispositivo de monitoreo, observación y medida de efectos térmicos y presencia de hotspots permanentes y/o transitorios en placas FV obtenidas mediante uso de cámara termográfica y evaluaciones porcentuales de pérdida de capacidad de generación ante la presencia de hotspots. Adicionalmente a los objetivos y alcances planteados desde un principio, se logra aportar una interesante evaluación de la respuesta de generación de energía ante secuencias sistemáticas de sombreado parcial de las placas para verificar si el efecto de pérdida de generación presenta una relación lineal o no lineal respecto del área de sombreado.

4.1 Primera prueba

La primera prueba que fue desarrollada en las dependencias del PERNC, consistió en verificar la conexión del ESP32 a la señal Wifi que va a permitir la comunicación inalámbrica entre el dispositivo y el servidor. En primer lugar, el ESP32 logra conectarse a la red Wifi (Ilustración 30).

```
14:42:42.682 -> Connecting to WiFi...  
14:42:43.650 -> Connecting to WiFi...  
14:42:44.738 -> Connecting to WiFi...  
14:42:44.738 -> Connected to WiFi
```

Ilustración 30: Prueba de conexión entre el dispositivo y la red Wifi. Fuente: Imagen extraída del monitor serial de Arduino.

Posteriormente, el dispositivo fue instalado en uno de los paneles fotovoltaico como se en la Ilustración 26, con el objetivo de la recepción de los

datos medidos por el Pzem-017 a Google Sheet utilizando la conexión Wi-Fi del ESP32.

En esta prueba el panel fotovoltaico se encuentra desconectado del inversor híbrido. En consecuencia, los valores obtenidos fueron los esperados debido a que el panel al no estar conectado a una carga muestra el voltaje de circuito abierto, registrando un valor máximo de 42,69 (V). Asimismo, al no estar conectado a una carga, se genera una corriente 0 (A). En consecuencia, la potencia medida es de 0 (W). Esto se refleja en los gráficos de línea obtenido a partir de los datos registrados por el dispositivo (Ilustración 31).



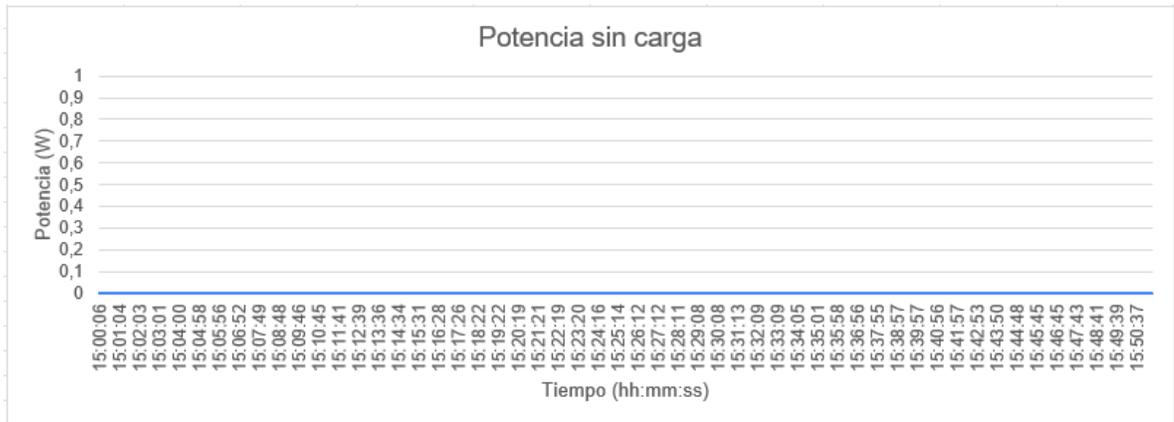


Ilustración 31: Gráfico de línea de voltaje, corriente y potencia. Medición realizada durante 50 minutos. Fuente: Google sheets.

Estos resultados fueron obtenidos primeramente a partir de mediciones realizadas en un panel fotovoltaico que presentaba una capa fina y uniforme de polvo en su superficie. Por lo tanto, con el interés de identificar la mayor o menor influencia de este factor de bloqueo por impurezas, se decidió limpiar el panel con el objetivo de obtener una nueva medición y compararla con la anterior. Cuando el panel presentaba aun la capa fina de polvo el voltaje medido fue variando entre los 42 y 43 (V). Luego de realizar la limpieza, el voltaje medido se mantuvo constante sobre los 43 (V) alcanzando un máximo de 43,56 (V) (Ilustración 32).



Ilustración 32: Gráfico de línea del voltaje de salida del panel luego de ser limpiado.

En esta prueba realizada, se puede observar el impacto relativo que tiene una delgada capa de polvo sobre la superficie del panel fotovoltaico en la generación a nivel del voltaje de salida del panel. Esto se observa en la ilustración 32, en la cual durante los primeros 13 minutos aproximados el voltaje medido presenta una variación evidente. Luego, al limpiar el panel el voltaje aumenta y es más estable, lo que permite estimar un aumento que resulta ser bastante menor de lo esperado, esto es, sólo de un 2% aproximadamente. Esto es lo que se expresa en términos del voltaje bajo determinadas condiciones, por tanto, para poder concluir mejor sobre la influencia del bloqueo de radiación en paneles debido a suciedad por presencia de polvo depositado uniformemente sobre la placa, sería recomendable genera nuevas pruebas en que se establezca una carga estable que permita verificar, además del voltaje, la influencia de la limpieza del panel sobre la capacidad de corriente y entrega de potencia a la carga.

4.2 Segunda prueba

Para la segunda prueba se utilizó una lámina metálica flexible del mismo tamaño del panel, la cual fue utilizada para cubrir y descubrir progresivamente el panel fotovoltaico en incrementos lineales según columnas y filas de celdas. Esto, con el objetivo de encontrar la relación que existe entre el sombreado de filas y columnas con el voltaje de salida. Para esto, el panel fotovoltaico inicia cubierto en su totalidad, para luego ir descubriéndolo de manera sistemática por filas o columnas, registrando mediante el dispositivo de medición el comportamiento del voltaje de salida. Cabe destacar que para esta prueba el arreglo fotovoltaico se encuentra desconectado del inversor híbrido.

En primer lugar, el panel fotovoltaico de tipo policristalino está formado por 12 filas, las cuales fueron destapadas de manera secuencial. Este experimento se ejecutó durante 22 minutos aproximados, registrando 241 datos que fueron graficados (Ilustración 33).



Ilustración 33: Gráfico obtenidos a partir de los 241 datos medidos durante 22 minutos aproximado. Se observa el aumento del voltaje de salida según se iban descubriendo secuencialmente las filas de celdas al ir retirando la placa metálica que bloqueaba la radiación solar.

Como se observa en el gráfico, a medida que se destapan las primeras filas, el voltaje aumenta de forma relativamente lineal. Sin embargo, a partir de la fila 9 el voltaje comienza a presentar incrementos cada vez menores, configurando una curva de ascenso no lineal que tiende asintóticamente al voltaje máximo que no supera los 43 (V). Así, se registra un voltaje máximo de salida de 42,43 (V). El comportamiento lineal inicial del panel fotovoltaico es el esperado debido, a que cada celda del panel aporta con el voltaje de salida, pero a partir de la fila 9 el panel se estabiliza indicando que llegó a su máxima capacidad de conversión de energía. Con esto se concluye que no existe una proporcionalidad lineal entre el porcentaje del área total de un panel FV que recibe radiación efectiva y el voltaje de salida que genera, esto al menos en circuito abierto. Sería por tanto interesante realizar este mismo procedimiento de prueba en el caso de un panel que esté entregando potencia a una carga estabilizada.

Con respecto a las columnas, el panel fotovoltaico está formado por 6 columnas, las cuales fueron igualmente descubiertas de manera secuencial una a una. Este experimento se ejecutó durante 15 minutos aproximados, se registraron 109 datos que posteriormente fueron graficados (Ilustración 34)

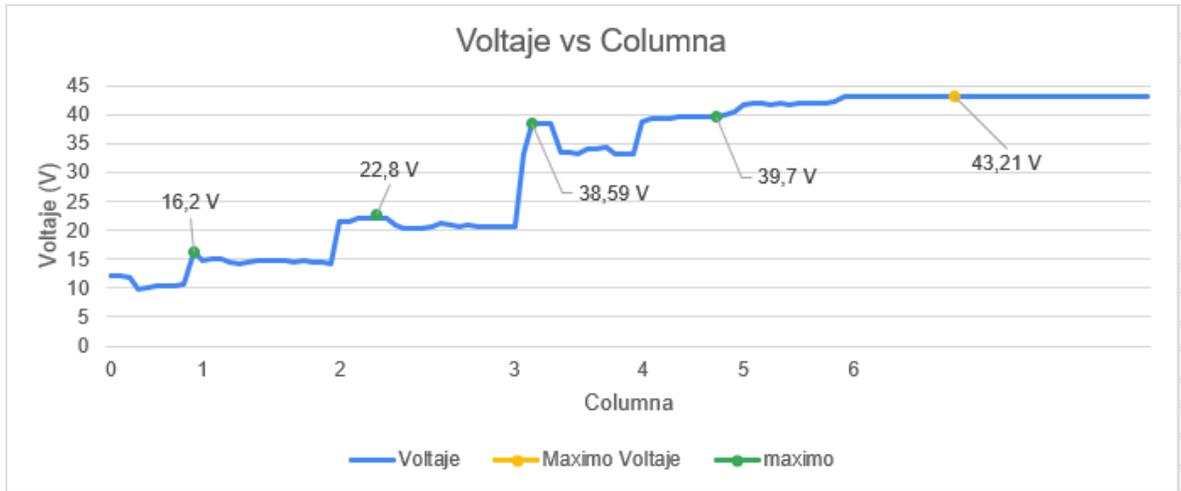


Ilustración 34: Gráfico obtenidos a partir de los 109 datos registrados durante 22 minutos aproximado. Se observa el aumento del voltaje de salida según se iban descubriendo secuencialmente las columnas de celdas al ir retirando la placa metálica que bloqueaba la radiación solar.

Como se observa en el gráfico, el voltaje no presenta un aumento de forma lineal, desde que el panel está completamente cubierto hasta la columna 4. En cambio, el voltaje experimenta un aumento abrupto para luego disminuir y mantenerse constante. Con el fin de entenderlo mejor se generan distintos voltajes transitorios, que posteriormente disminuye y se estabiliza. Sin embargo, a partir de la columna 4 el voltaje aumenta para luego presentar un comportamiento asintótico horizontal registrando un voltaje máximo de 43,21 (V)

En la ilustración 34 la evolución del voltaje medido desde la condición de panel tapado en su totalidad y panel con 4 columnas descubiertas es inestable, para luego presentar un comportamiento estable asintótico horizontal. Esto presenta diferencias con el comportamiento del voltaje en la ilustración 33 que aumenta de forma lineal hasta estabilizarse y presenta un comportamiento estable asintótico horizontal. Los incrementos más o menos abruptos visibles en estos gráficos, están relacionados no solamente al hecho de que al destapar filas se incorporan menos celdas que al destapar columnas, sino que también están relacionados a la manera en que están interconectadas las celdas en la

estructura del panel fotovoltaico. En este sentido, las celdas están conectadas en serie horizontalmente según el arreglo de filas.

Cabe considerar que, al bloquear artificial e intencionadamente filas o columnas del panel sometido a pruebas, también pudiera haber surgido un fenómeno de zonas con hotspots transitorios. Esto se verá en la siguiente prueba.

4.3 Tercera prueba (generación de hotspot sin carga)

Como se menciona en los capítulos anteriores, los hotspot presentan un problema para la eficiencia energética de los paneles fotovoltaicos, debido a que reducen su vida útil y generan anomalías en los parámetros eléctricos. Además, cabe destacar que este tipo de degradación es difícil de detectar a simple vista. Por este motivo, es necesario utilizar una cámara termográfica, que permite detectar las altas temperatura localizada que genera la disipación de calor a partir de la corriente que comienza a circular por zonas con comportamiento resistivo, lo que señala la aparición de un hotspot.

Para la tercera prueba, se utilizará la cámara termográfica ULIRvision TI-160 como una técnica no invasiva para detectar hotspot en los paneles fotovoltaicos. Sin embargo, al no tener el sistema conectado al inversor híbrido, no es posible detectar un hotspot debido a la ausencia de flujo de corriente, tal como se corrobora en la ilustración 30. Por este motivo, para realizar esta y las siguientes pruebas, el sistema fotovoltaico estará conectado al inversor híbrido para generar un flujo de corriente. Cabe mencionar que los datos registrados de voltaje, corriente y potencia a partir este punto corresponden al valor de máxima potencia. Además, para un mejor análisis, se calculará la variación porcentual con respecto al promedio entre el valor máximo y valor mínimo de los datos registrados dentro de un intervalo de tiempo, cuando el panel no presenta hotspot, cuando se genera el hotspot con la sombra y cuando el panel este expuesto solo al hotspot.

Como muestra la ilustración 35, los paneles fotovoltaicos no presentan hotspot, por lo tanto, esto sugiere que el panel no presenta delaminación, microfractura u otra condición o daño estructural preexistente. Además, como el panel no está expuesto a una sombra parcial no se generan hotspots. Por este motivo, se simulará un hotspot proyectando diferentes sombras sobre celdas del panel utilizando un objeto sólido para proyectar dicha sombra. Es importante mencionar que la temperatura que presenta cualquier objeto no es homogénea, en consecuencia, la superficie del panel fotovoltaico muestra diversas temperaturas (Ilustración 35).

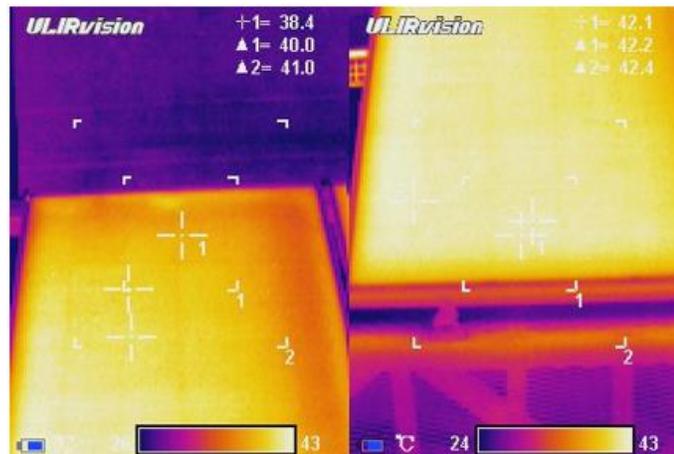


Ilustración 35: Imagen térmica del panel fotovoltaico sin hotspot.

4.3.1 Primer experimento sin carga

En primer lugar, se genera una sombra con el fin de generar un hotspot en la zona adyacente a la celda sombreada. Utilizando la cámara termográfica se detecta a los pocos segundos la aparición de un hotspot (Ilustración 36) con una temperatura de 48,5°C, mientras que el panel presenta una temperatura de 23,5°C. Este experimento se ejecutó durante 12 minutos aproximados, registrando 87 datos que luego fueron graficados.

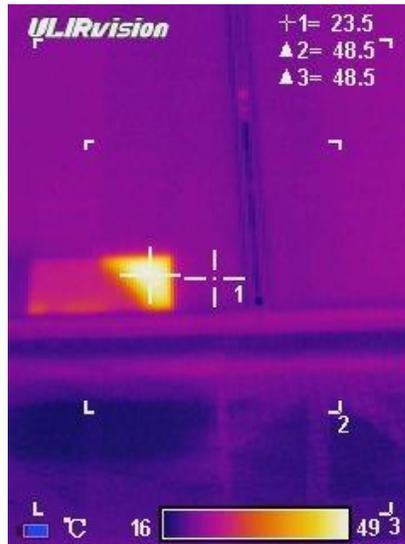


Ilustración 36: Imagen térmica del hotspot transitorio provocado de manera intencional exponiendo el panel a una sombra parcial sobre una de sus celdas. La temperatura en la zona del hotspot llega a 48.5°C.

Como se observa luego en la ilustración 37, el voltaje tiende a comportarse de manera lineal durante aproximadamente 5 minutos. Sin embargo, se midió la variación de voltaje entre los puntos A y B, que corresponde a aproximadamente 3 minutos previos al momento del bloqueo, tiempo en el que el panel no está expuesto a un hotspot ni a cambios de temperatura, obteniéndose una variación de alrededor de 1%.

No obstante, al exponer la celda del panel a una sombra, el voltaje disminuye de 37,11 (V) a 11,89 (V) de manera abrupta entre los puntos B y C para luego comportarse de manera estable aproximadamente durante 3 minutos entre los puntos C y D. Durante este periodo, se generó rápidamente un hotspot que alcanzó una temperatura máxima de 48,3°C. A partir de los valores de voltaje registrados durante estos 3 minutos de bloqueo con presencia de hotspot, se observó una variación del voltaje de apenas 0,9%.

Posteriormente, al retirar el objeto que proyectaba sombra el voltaje aumentó de 11,91 (V) a 35,57 (V) de manera abrupta (en 9 segundos) entre los puntos D y E. Seguidamente, durante los primeros 3 minutos aproximados entre

los puntos E y F, se observó que la temperatura del hotspot fue disminuyendo de manera más bien lenta, tiempo en el que el voltaje nuevamente se estabilizó presentando una variación de 3%.

Lo anterior indica que, además de los grandes cambios en el nivel de voltaje que se registran debido al sombreadamiento y aparición del hotspot transitorio, en el proceso de generación del hotspot (calentamiento), mientras permanece el hotspot y en el proceso de enfriamiento y hasta que desaparece el hotspot se presenta una mayor inestabilidad del voltaje ya sea en su nivel alto o en su nivel bajo.

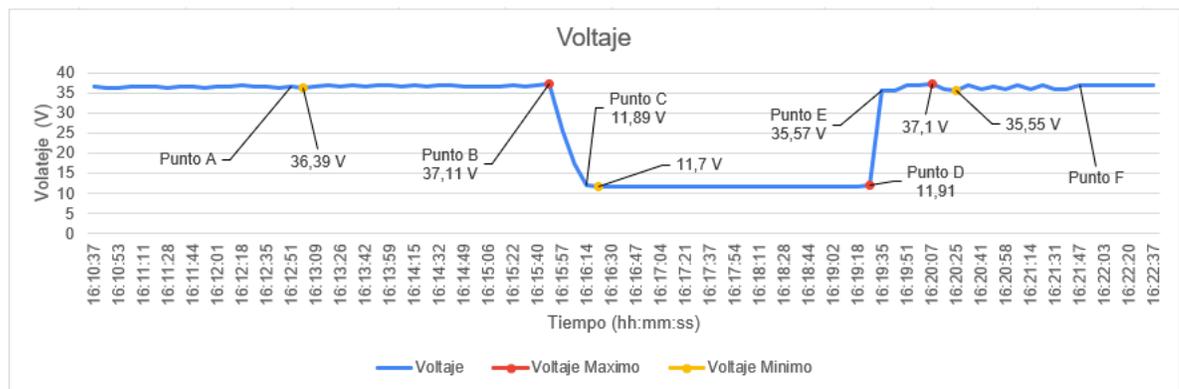


Ilustración 37: Gráfico del voltaje de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se forma un hotspot de 48,3°C.

En el caso de la corriente se observa (Ilustración 38) durante aproximadamente 5 minutos, la corriente presenta un descenso lento pero constante debido a que el experimento se desarrolló en un momento del día en que se estaba perdiendo irradiación solar rápidamente (atardecer), entre los puntos A y B que corresponden a 3 minutos aproximados se calcula la variación obteniendo un 2%. Sin embargo, al momento de exponer la celda del panel a la sombra intencional que genera el hotspot la corriente disminuye de 15,02 (A) a 10,28 (A) de manera abrupta para luego recuperarse y volver aproximadamente al mismo nivel determinado por la demanda de corriente que viene desde el inversor. Así, de manera rápida la corriente aumenta de 10,28 (A) a 15,12 (A). No

obstante, se calcula la variación entre los puntos B y C obteniendo un 1,2%. Posteriormente, una vez recuperado el nivel de corriente, durante 7 minutos aproximados la corriente continúa presentando la disminución lenta y constante debido a la pérdida de irradiación solar. Sin embargo, se calcula la variación de corriente entre los puntos C y D que corresponde al intervalo en que el panel presenta solo el hotspot, obteniéndose 3%. Cabe notar que, pese a que la corriente se restaura, el voltaje se mantiene bajo mientras dura la existencia del hotspot (comparar con ilustración 37) lo cual se refleja en una reducción de la capacidad de potencia.

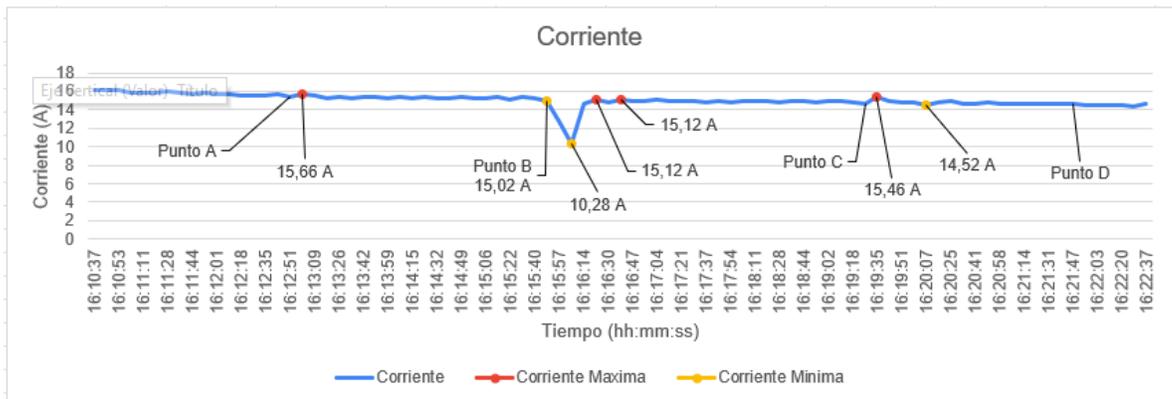


Ilustración 38: Gráfico de la corriente de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se forma un hotspot de 48,3°C.

En cuanto a la potencia (Ilustración 39), durante aproximadamente 5 minutos presenta una disminución constante. Se calcula la variación de la potencia durante los primeros minutos entre los puntos A y B, obteniendo una variación de 1,1%. para luego disminuir de 557,3 (W) a 179,2 (W) de manera abrupta al momento de provocarse el bloqueo por sombra y aparición del hotspot. Posteriormente, la potencia continúa presentando un descenso contante durante 3 minutos aproximados entre los puntos C y D y con una variación de 0,8%. A continuación, la potencia aumenta de 175 (W) a 549 (W), para luego mantener una disminución constante y para este caso se calcula nuevamente la variación

dentro del mismo rango de medición del voltaje entre los puntos E y F, obteniéndose 4,6%.

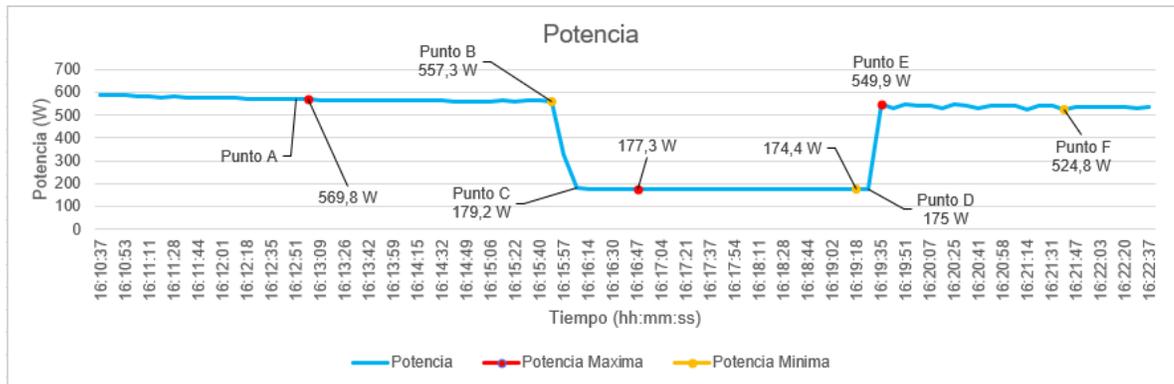


Ilustración 39: Gráfico de la potencia máxima en función del tiempo en el momento en que se forma un hotspot de 48,3°C.

Lo más notable, es constatar que pese a que en este experimento solamente se produjo una sombra parcial sobre una celda de un panel, al generarse un hotspot como consecuencia del sombreado, se produce una notable caída en la capacidad de potencia que es resultado no solamente de la pérdida parcial de irradiación sino que se ve agravada por el sobrecalentamiento de la zona adyacente a la celda, con el consiguiente comportamiento resistivo que afecta a toda una fila de la placa sometida al hotspot.

4.3.2 Segundo experimento sin carga

En la siguiente prueba, se expone a una sombra sobre la mitad de una celda del panel, lo que provoca que la parte no sombreada se genere un hotspot. Como se observa en la ilustración 40, el hotspot alcanza una temperatura de 41,9°C, mientras que la temperatura del panel es de 20,6°C. Este experimento se ejecutó aproximadamente durante 11 minutos, y se registraron 78 datos que posteriormente se graficaron.

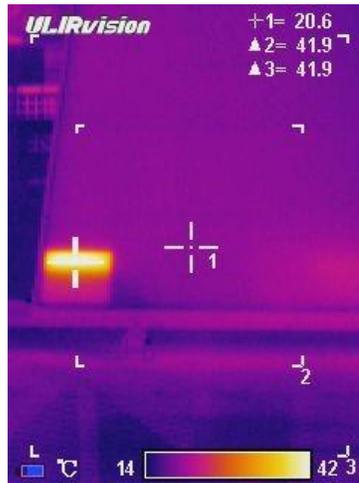


Ilustración 40: Imagen térmica del hotspot provocado de manera intencional sombreando la mitad de una celda, llegando a generar un hotspot que registra 41,9°C.

Como se observa en la ilustración 41, aproximadamente durante los primeros 5 minutos, el voltaje presenta un comportamiento lineal. Sin embargo, como en el caso anterior se calcula la variación entre los puntos A-B, que corresponden aproximadamente a los 3 primeros minutos cuando el panel no presenta un hotspot, obteniendo una variación de alrededor de 0,6%.

Al exponer la celda del panel a la sombra, el voltaje disminuye de 36,59 (V) a 25,64 (V) entre los puntos B y C. Posteriormente, aproximadamente durante 4 minutos entre los puntos C y D el voltaje mantiene un comportamiento lineal. Durante ese periodo, como en el experimento anterior se genera rápidamente un hotspot que alcanzado una temperatura máxima de 41,9°C y, con los datos registrados se obteniendo una variación de voltaje de alrededor de 3,2%. Luego, al retirar la sombra de la celda, el voltaje aumenta de 24,36 (V) a 36,21 (V) entre los puntos D y E. Seguidamente, durante 3 minutos aproximados entre los puntos E y F el voltaje presenta una variación antes de estabilizarse y mantenerse sobre los 37 (V). Durante esta variación, el panel aún está expuesto al hotspot, y se calculó la variación del voltaje, obteniéndose un 11,2%.

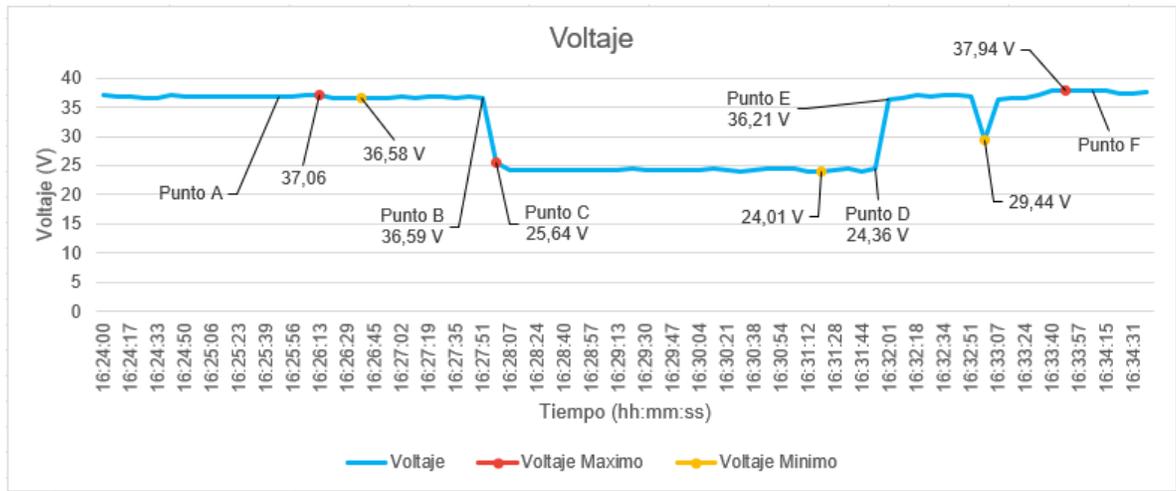


Ilustración 41: Gráfico del voltaje de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se forma un hotspot de 41,9°C.

En el caso de la corriente (Ilustración 42), durante los primeros 3 minutos aproximados, la corriente desciende de manera constante y se calcula su variación entre los puntos A y B obteniéndose 1,7%. Al exponer la celda a la sombra, la corriente cae de 13,38 (A) a 11,18 (A) de manera abrupta. Sin embargo, aumenta de forma abrupta de 11,18 (A) a 13,6 (A). Posteriormente, durante 5 minutos aproximados la corriente mantiene una disminución constante y se calcula su variación entre los puntos B y C, obteniéndose 8,9%. Seguidamente, entre los puntos C y D la corriente aún mantiene una disminución constante y calcula la variación porcentual, obteniéndose un 7,3%.

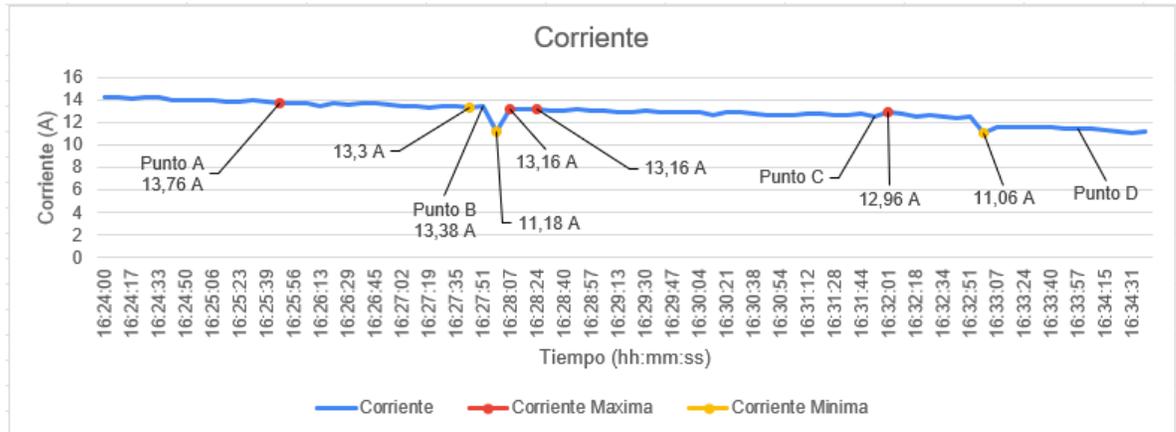


Ilustración 42: Gráfico de la corriente de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se forma un hotspot de 41,9°C.

Durante los primeros 5 minutos aproximadamente (Ilustración 43), la potencia presenta un comportamiento descendente constante. No obstante, entre los puntos A y B se calcula la variación porcentual correspondiente a los 3 primeros minutos previos a la exposición del panel a la sombra, obteniéndose 1,7%. Luego, disminuye abruptamente de 489,5 (W) a 286,6 (W) entre los puntos B y C. Posteriormente, la potencia continúa disminuyendo de manera constante durante 4 minutos aproximados entre los puntos C y D, presentando una variación de 5%. Seguidamente, la potencia aumenta de 305,4 (W) a 462,9 (W) entre los puntos D y E. Seguidamente, la potencia mantiene una disminución constante y, se calcula nuevamente la variación entre los puntos E y F, obteniéndose 15,3%.

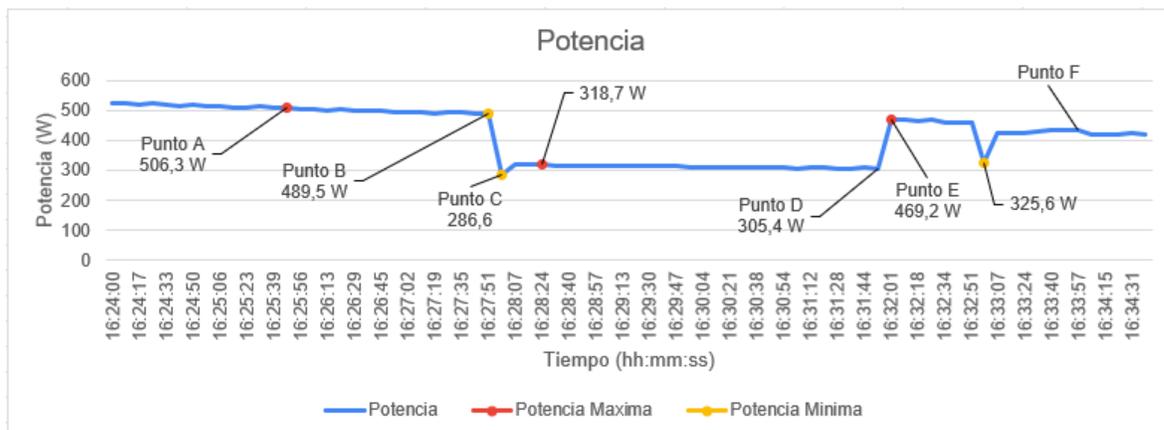


Ilustración 43: Gráfico de la potencia máxima en función del tiempo en el momento (intervalo entre puntos B y C) en que se forma un hotspot que llega a registrar 41,9°C.

Como se puede observar en las ilustraciones 36 y 40, la sombra sobre el panel fotovoltaico provoca la presencia de un hotspot transitorio lo que puede provocar daños a largo plazo y reducir la eficiencia del panel. Además, estos hotspot presentan una alta temperatura, indicando un sobrecalentamiento localizado provocando una variación en los parámetros eléctricos. Uno de los hallazgos más interesantes es que, al exponer una celda del panel a una sombra, se genera rápidamente (menos de 10 segundos) un hotspot que alcanza una temperatura muy elevada, en cambio al eliminar la sombra la temperatura del hotspot disminuye de manera más lenta (entre 1 y dos minutos) hasta recuperar la condición térmica que existía antes.

Con respecto a los parámetros eléctricos, en el primer experimento el voltaje de máxima potencia muestra un aumento en la variación en su voltaje debido a la presencia del hotspot. Esto es evidente cuando se obtiene una variación de 3% cuando el panel presenta un a zona de hotspot, en comparación con el 1% que se obtiene cuando el panel no presenta un hotspot. En cambio, en el segundo experimento, el voltaje de máxima potencia presenta una variación de 0,6% cuando el panel presenta el hotspot, en comparación al 11,2% que presenta

cuando el panel cuando no presenta hotspot. De todos modos, en lo que respecta a la caída principal de voltaje, los datos registrados muestran que la aparición de un hotspot puede generar una caída de voltaje en torno al 30% o superior con tan solo afectar una sola celda de todo el panel. Estas variaciones se deben al sobrecalentamiento que presenta la celda, debido a que las altas temperaturas afectan al voltaje de salida y generan un comportamiento resistivo por parte del material semiconductor que experimenta el sobrecalentamiento.

Por otra parte, la corriente de máxima potencia en ambos experimentos disminuyó de manera constante debido a la pérdida gradual de radiación solar sobre el panel en función del tiempo debido a que por condiciones climáticas adversas hubo que desarrollar estos experimentos en un horario en que el ángulo solar variaba rápidamente (atardecer). No obstante, igualmente resultó evidente que al exponer el panel a distintos niveles de sombreado, la corriente disminuye abruptamente para luego aumentar al instante. Esto es probablemente debido a la presencia del diodo de bypass que desvía el flujo de corriente dentro del panel. A pesar de esto, no tiene la capacidad de mitigar el hotspot.

En el caso de la potencia que depende del voltaje y la corriente debido a que es el producto entre ambos, su disminución abrupta de la potencia en ambos experimentos se debe a la caída abrupta que presenta el voltaje causado por la presencia del hotspot y la sombra. Durante el primer experimento la variación fue de 1,1% cuando el panel no estaba expuesto al hotspot. Luego al eliminar la sombra, el panel aun presenta el hotspot, por lo que la variación de potencia fue de 2,3%, mientras que en el experimento dos la variación de la potencia mientras que el panel no tiene hotspot fue de 1,7% mientras que durante la presencia del hotspot fue 15,3%

4.4 Cuarta prueba (generación hotspot con carga)

Para esta prueba, el panel se expone a una sombra para generar un hotspot. Sin embargo, a diferencia de las pruebas anteriores el sistema fotovoltaico además de estar conectado al inversor híbrido, **estará conectado a una carga**, en este caso, un horno eléctrico. Con el objetivo, de analizar el comportamiento de los paneles en la presencia de un hotspot, durante su funcionamiento real.

4.4.1 Primer experimento con carga

En esta prueba, el panel fue expuesto a una sombra que cubre la mitad de una celda lo que provoca que la parte no sombreada se genere un hotspot. Como se observa en la ilustración 44, en la zona no sombreada se genera el hotspot, que alcanzó una temperatura máxima de $60,6^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura del panel fue de $33,2^{\circ}\text{C}$. La prueba se realiza durante 15 minutos aproximados, donde se registran 106 datos.

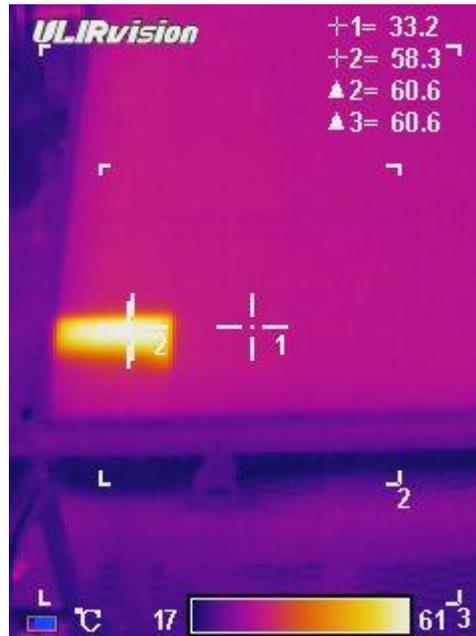


Ilustración 44: Imagen térmica del hotspot provocado de manera intencional en la mitad de la celda exponiendo el panel a una sombra, llegando a los 60,6°C.

Durante los 3 primeros minutos entre los puntos A y B, el panel no estuvo expuesto a un hotspot. En este intervalo de tiempo, el voltaje presenta un comportamiento lineal, pero con algunas variaciones notorias (Ilustración 45). Al calcular el promedio de estas variaciones se obtiene un 4,8%.

Posteriormente, al exponer el panel a una sombra para generar un hotspot, el voltaje disminuye abruptamente de 34,24 (V) a 22,22 (V) entre los puntos B y C, para luego mantener un comportamiento lineal con algunas variaciones durante 6 minutos aproximados entre los puntos C y D. En este periodo, la temperatura del hotspot aumenta rápidamente y el promedio de la variación de voltaje fue 8,4%.

Luego, al eliminar la sombra, el voltaje aumenta de manera abrupta de 25,83 (V) a 35,05 (V) entre los puntos D y E. Durante los siguiente 6 minutos aproximados, la temperatura del hotspot disminuye más lenta. Sin embargo, para

el análisis del promedio de la variación de voltaje, se utilizaron solo los primeros 3 minutos que encuentra entre los puntos E y F, esto se debe a que el hotspot presenta aun una elevada temperatura. En este tiempo, la variación de voltaje fue de 7,8%.

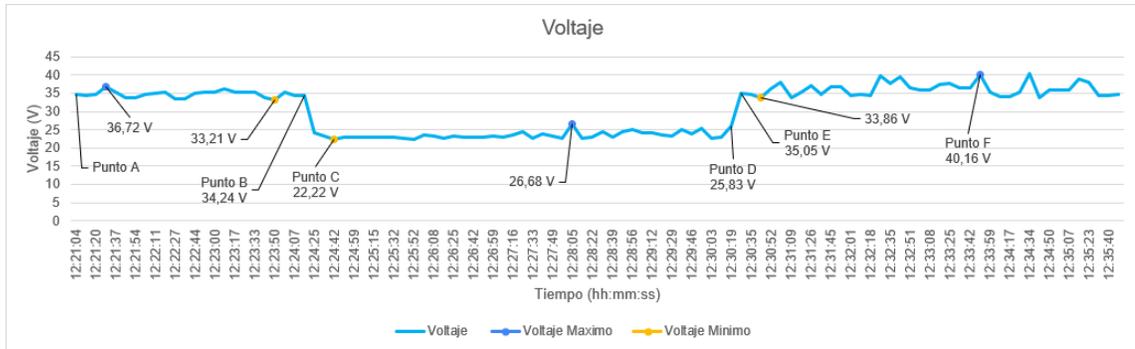


Ilustración 45: Gráfico del voltaje de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se genera un hotspot de 60,6°C.

En el caso de la corriente de máxima potencia (Ilustración 46), durante aproximadamente los primeros 3 minutos entre los puntos A y B, la corriente se comporta como una onda que oscila entre los 28,96 (A) a 36,58 (A), con una variación de alrededor de 10,4%. Posteriormente, al exponer el panel a una sombra, la corriente disminuye abruptamente de 36,58 (A) a 26,92 (A), para luego aumentar repentinamente a 36,32 (A). Luego de este cambio, mantiene un comportamiento lineal durante 2 minutos aproximados para luego volver a oscilar en un intervalo de 21,50 (A) a 37,86 (A) durante 4 minutos aproximados. En estos 6 minutos aproximados su variación fue de 21,6% entre los puntos B y C.

Posteriormente, al eliminar la sombra, la corriente aumenta de manera abrupta de 24,18 (A) a 36,24 (A). Durante los siguientes 6 minutos aproximados, la corriente presenta un comportamiento oscilatorio. En este intervalo, se calcula el promedio de la variación de la corriente entre los puntos D y E debido a que el

hotspot aun presenta una elevada temperatura durante 3 minutos obteniendo una variación de 31,9%

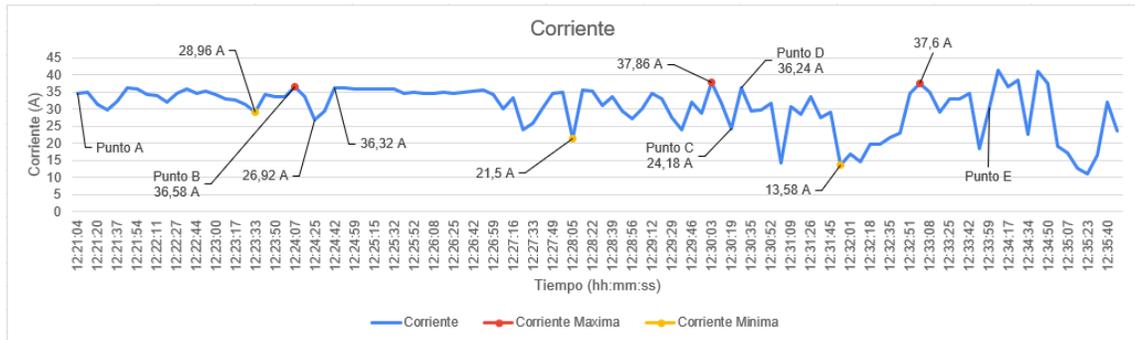


Ilustración 46: Gráfico de la corriente de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se genera un hotspot de 60,6°C.

Como se observa en la ilustración 47, el comportamiento de la potencia máxima es el esperado, debido a que depende del voltaje y la corriente. Durante aproximadamente 3 minutos, la potencia tiene un comportamiento similar al de la corriente, en este caso, oscilando entre los 1017,3 (W) a 1252,1(W) entre los puntos A y B con una variación de 9,4%.

El panel al estar expuesto a la sombra para generar el hotspot, la potencia disminuye de manera abrupta de 1149,7 (W) a 649,3 (W), para aumentar inmediatamente a 807 (W). Después, durante 2 minutos aproximados la potencia se mantiene lineal, para nuevamente oscilar entre los 573,6 (W) a 853,7 (W) durante 4 minutos aproximados, en estos 6 minutos aproximados la variación de potencia fue de 16,4% entre los puntos B y C.

Al eliminar la sombra del panel, la potencia aumenta abruptamente de 624,5 (W) a 1270,2 (W), para luego mantener un comportamiento oscilatorio durante 6

minutos. Como en los experimentos anteriores se calcula la variación tras eliminar la sombra durante los 3 primeros minutos obtenido un 31,4 %.

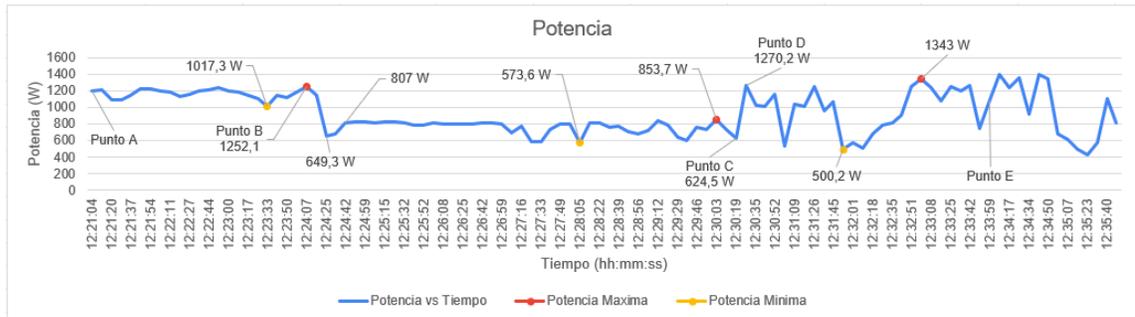


Ilustración 47: Gráfico de la potencia máxima en función del tiempo en el momento en que se genera un hotspot que registra 60,6°C.

4.4.2 Segundo experimento con carga

Para esta prueba, el panel se expuso nuevamente a una sombra que cubre tres cuartos de la celda lo que provoca que la parte no sombreada se genere un hotspot, como se muestra en la ilustración 48. En este caso, el hotspot alcanzó una temperatura máxima de 73,7°C, mientras que la temperatura del panel es de 28,4°C. Este experimento duro aproximadamente 14 minutos y se registraron 98 datos.



Ilustración 48: Imagen térmica del hotspot provocado de manera intencional en tres cuarto de la celda exponiendo el panel a una sombra, llegando a los 73,7°C.

Durante aproximadamente los primeros 5 minutos, el voltaje de máxima potencia presenta un comportamiento lineal, con distintos picos de voltaje alcanzando un máximo de 41,34 (V). Se calcula el promedio de variación entre los puntos A y B, que corresponde a los últimos 3 minutos aproximados antes de exponer el panel a la sombra, obteniéndose una variación de 7,9%.

Posteriormente, al someter el panel a una sombra con el fin de generar un hotspot, el voltaje disminuye de manera abrupta 41,34 (V) a 24,91 (V) entre los puntos B y C. Durante aproximadamente 5 minutos el voltaje presenta distintos picos, alcanzando un máximo de 29,95 (V) y un mínimo de 22,8 (V). En este intervalo de tiempo, se calcula la variación de voltaje, obteniéndose un 11,8%. Además, durante este periodo, el hotspot alcanzo rápidamente una temperatura elevada.

Después de eliminar la sombra, el voltaje aumenta de manera abrupta de 23,3 (V) a 39,54 (V) entre los puntos D y E. Durante los siguiente 5 minutos aproximados, el panel presenta un hotspot que reduce su temperatura de manera

más lenta. Sin embargo, para el análisis del promedio de la variación de voltaje, se considera solo los 3 primeros minutos donde el voltaje alcanza un máximo de 41,23 (V) y un mínimo de 34,46 (V) entre los puntos E y F. Este cálculo se realizó debido a que el hotspot un presentaba una temperatura elevada. Durante este rango de tiempo se obtiene una variación de 8,5 %.

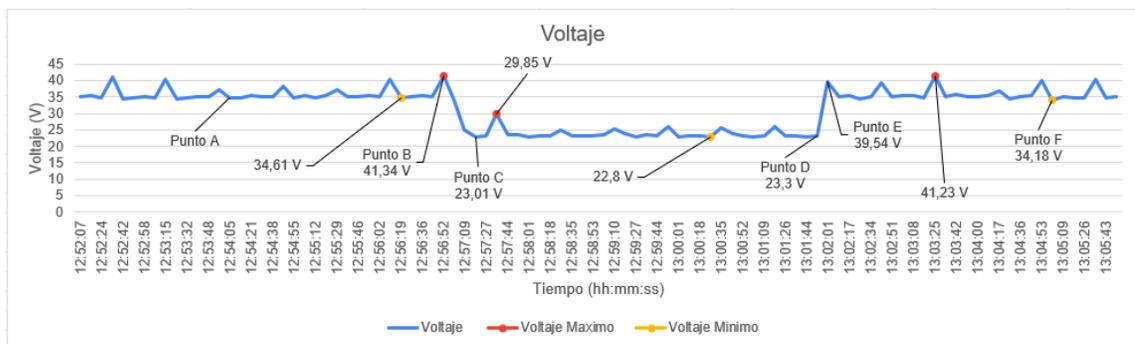


Ilustración 49: Gráfico del voltaje de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se genera un hotspot de 73,7°C.

En el caso de la corriente de máxima potencia (Ilustración 50), durante aproximadamente los primeros 5 minutos la corriente inicia de manera estable, para luego mostrar distintas caídas de corriente, alcanzando un mínima de 14,32 (A). Con el fin de realizar un mayor análisis, se calcula la variación de corriente entre los puntos A y B que corresponde a 3 minutos antes de exponer el panel a una sombra, obteniéndose una variación de 28,4%.

Al exponer el panel a una sombra para generar el hotspot, la corriente disminuye de manera abrupta de 35,18 (A) a 29,14 (A), para aumentar inmediatamente a 33,92 (A). Durante los siguientes 5 minutos aproximados se observan distintas caídas de corriente alcanzando un mínimo de 5,2 (A) con una variación de 42,5%. Además, en este intervalo se genera un hotspot que alcanza rápidamente una temperatura muy elevada.

Al eliminar la sombra, la corriente presenta a caída abrupta entre los puntos C y D de 34,26 (A) a 20,88 (A). Durante aproximadamente los siguiente 5 minutos, la corriente presenta nuevas caídas con un mínimo de 14,9 (A). Durante

este rango de tiempo, el hotspot reduce su temperatura de manera más lenta. Sin embargo, para el análisis de la variación de la corriente con respecto al promedio, se considera solo aproximadamente los 3 primeros minutos entre los puntos D y F, debido a que el hotspot aun presentaba una elevada temperatura. Durante este rango se obtiene una variación de 28,7%.

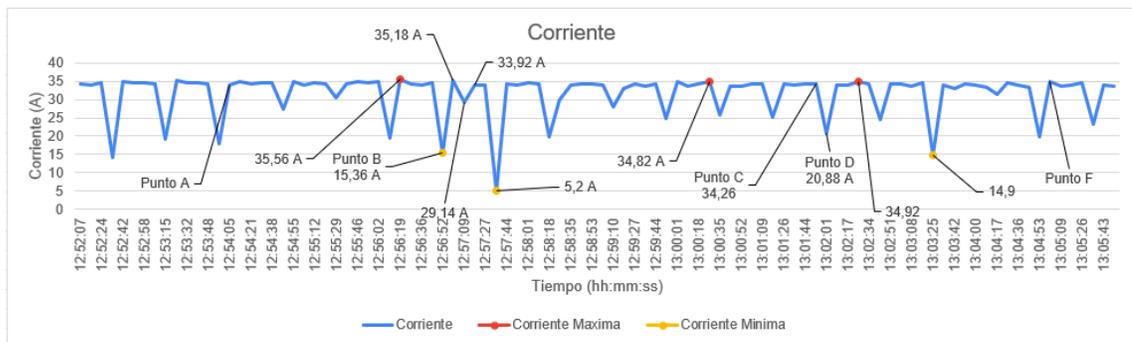


Ilustración 50: Gráfico de la corriente de máxima potencia en función del tiempo en el momento en que se genera un hotspot de 73,7°C.

Como se observa en la ilustración 51, el comportamiento de la potencia es el esperado, debido a que, este depende del voltaje y la corriente. Durante, aproximadamente los primeros 5 minutos, la potencia inicia con un comportamiento estable para luego manifestar distintas caídas de potencia, alcanzado un mínimo de 588,6 (W). Con el fin de realizar un mayor análisis, se calcula la variación de la potencia entre los puntos A y B que corresponden aproximadamente a 3 minutos antes de exponer el panel a la sombra, obteniéndose una variación de 24,2%.

Al exponer el panel a la sombra para generar el hotspot, la potencia disminuye de manera abrupta de 1193,3 (W) a 725,8 (W). Posteriormente, durante aproximadamente 5 minutos la potencia presenta nuevas caídas, llegando a un mínimo de 155,2 (W). Durante ellos puntos C y D, se calcula la variación de potencia obteniendo 40,4%. Además, el hotspot alcanza rápidamente una temperatura muy elevada.

Al eliminar la sombra, la potencia aumenta de 790,1 (W) a 1198,2 (W) entre los puntos D y E. Durante aproximadamente los siguientes 5 minutos, se observa una caída de potencia llegando a un mínimo de 614,3 (W). Durante este intervalo de tiempo, el hotspot reduce su temperatura de manera más lenta. Sin embargo, para el análisis del promedio de la variación de la potencia, se utilizaron solo los primeros 3 minutos aproximados que corresponde a los puntos E y F, debido a que el hotspot aun presentaba una elevada temperatura. En este rango, se obtiene una variación de 25%.

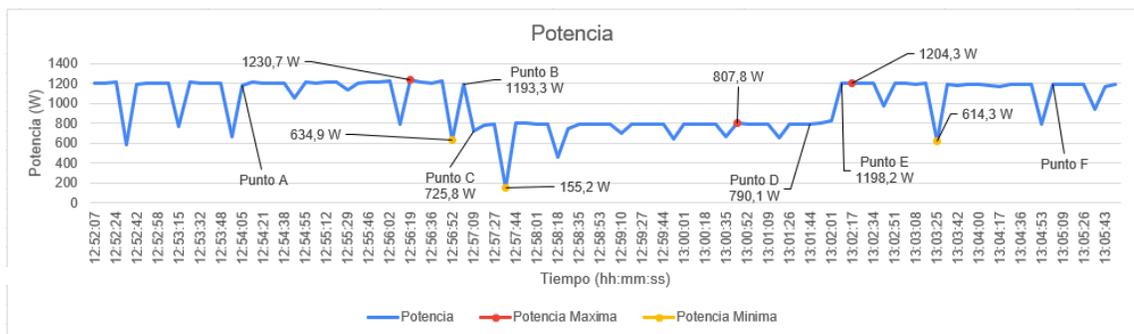


Ilustración 51: Gráfico de la potencia máxima en función del tiempo en el momento en que se genera un hotspot de 73,7°C.

Similar a la tercera prueba, los hotspot que se generan en la cuarta prueba (Ilustración 44, 48) alcanzaron temperaturas de 60,6°C y 73,7°C, debido a que están expuestos a una sombra. Además, mediante el uso de la cámara térmica, se visualiza el sobrecalentamiento que posee la zona. En consecuencia, los resultados de voltaje, corriente y potencia registrados por el dispositivo demostraron que el hotspot provoca alteraciones en los parámetros eléctricos.

Con respecto a los parámetros eléctricos el voltaje de máxima potencia presenta distintos comportamientos en ambos experimentos. Durante los primeros minutos del primer experimento el voltaje no presento variaciones significativas, las cuales se refleja en el promedio de la variación que fue de 4,8%. En el segundo experimento, el voltaje experimento un pequeño aumento en su variación que fue de 7,9% indicando que el panel generó altos valores de voltaje.

Cuando el panel se expone a una sombra para generar el hotspot, en ambos experimentos el hotspot alcanzó rápidamente una temperatura muy elevada y también el voltaje disminuyó de manera abrupta. En el primer experimento, el voltaje se estabilizó, pero luego presenta una variación, al calcular obtenemos un 8,4%. En cambio, en el segundo experimento el voltaje alcanza distintos picos de voltaje, pero estos disminuyeron de manera progresiva, lo que resulta una variación de 11,8%.

Por último, al eliminar la sombra y dejar el panel expuesto solo al hotspot, en ambos experimentos el voltaje aumenta abruptamente y el hotspot disminuye su temperatura lentamente. En el experimento uno, el voltaje presenta algunas variaciones, con una variación de 7,8%. Mientras que en el experimento dos, el voltaje presentó distintos picos de voltaje, no obstante, su variación fue de 8,5% indicando que está perdiendo eficiencia.

En el caso de la corriente, en el primer experimento la corriente muestra fluctuaciones con una variación de 10,4%, mientras que en el segundo experimento se presentan caídas de corriente más pronunciadas, con una variación de 28,4%. Esto se debe a que el panel al estar en condiciones normales puede presentar un comportamiento variable.

Luego, al exponer el panel a una sombra para generar el hotspot, en ambos experimentos la corriente disminuye abruptamente, debido a la sensibilidad que tiene el panel frente a la reducción de la radiación solar. Sin embargo, esta caída presenta un aumento inmediato debido al diodo bypass. En el primer experimento, la variación de corriente fue de 21,6% debido a los distintos picos de variación. En cambio, la variación del segundo experimento fue de 42,5% debido a las continuas caídas de corriente.

Al eliminar la sombra y dejar expuesto al panel solo al hotspot, en ambos experimentos la corriente experimenta nuevas fluctuaciones y oscilaciones, lo que refleja la presencia del hotspot. Esto se confirma en el aumento de las

variaciones de corriente, en el primer experimento presenta una variación de 31,9%, mientras que en el experimento dos presenta una variación de 28,7%.

En el caso de la potencia, en el experimento uno y dos la potencia presenta un comportamiento estable debido a que existe un equilibrio entre la corriente y el voltaje. Antes de exponer el panel a una sombra, el experimento uno se obtiene una variación de 9,4 %, mientras que en el experimento dos una variación de 24,2 %.

Al exponer el panel a una sombra para generar un hotspot, en ambos experimentos la potencia disminuye de manera abrupta, lo que refleja el impacto negativo que tiene la sombra sobre los paneles fotovoltaicos. Luego, en el primer experimento, la potencia presenta una fluctuación con una variación de 16,4 %, mientras que en el segundo experimento la potencia presenta oscilaciones que representan una variación de 40,4 %, debido al hotspot que se está generando.

Al eliminar la sombra, y exponer el panel únicamente al hotspot, en ambos experimentos la potencia aumenta abruptamente, y presentan nuevamente fluctuación y oscilaciones. En el experimento uno la variación fue de 31,4%, mientras que en el segundo experimento 24,5%. Lo que indica para ambos casos, que la presencia de un hotspot afecta significativamente la potencia del panel debido a las alteraciones que provoca el aumento de la temperatura localizada.

4.5 Quinta prueba (aplicación de fuente de calor externa)

Para esta última prueba se utilizará una fuente de calor externo para generar un hotspot en el panel. Esta fuente de calor se aplica en la parte posterior del panel, con el objetivo de detectar variación en los parámetros registrados por el dispositivo, debido al hotspot generado por dicha fuente externa. Cabe destacar que para esta prueba solo se conectó el sistema fotovoltaico al inversor híbrido.

4.5.1 Primer experimento

Como se observa en la ilustración 52, al generar un hotspot utilizando una fuente de calor externa se observa que aumenta rápidamente su temperatura alcanzada un máximo de 41,9°C, mientras que la temperatura del panel es de 20,9°C. Esta prueba se realizó durante 12 minutos aproximados registrando 85 datos.

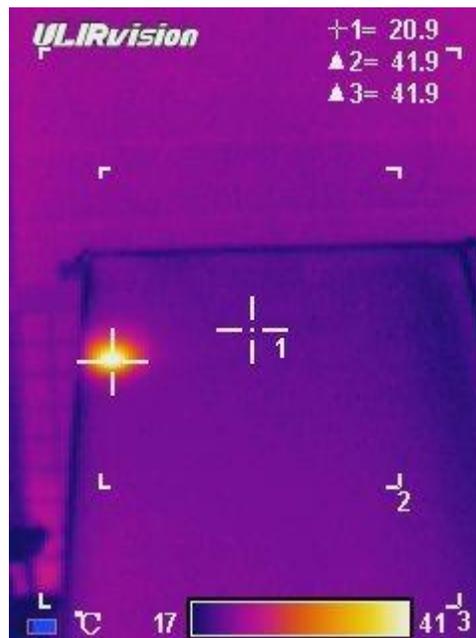


Ilustración 52: Imagen térmica del hotspot generado a partir de una fuente de calor externa.

Durante aproximadamente los 3 primeros minutos, el panel no está expuesto a un hotspot, por lo que el voltaje de máxima potencia presenta un comportamiento relativamente lineal (Ilustración 53) con una variación de 0,0%. Luego, al generar el hotspot durante 6 minutos aproximados, el voltaje aún mantiene un comportamiento relativamente lineal, y con una variación calculada entre los 36,79 (V) a 36,16 (V) obteniendo una variación de 0,01%. Después de generar el hotspot, la superficie del panel aun presenta una temperatura elevada, Por lo tanto, durante los primeros 3 minutos se calcula la variación de voltaje obteniéndose un 0,0%.

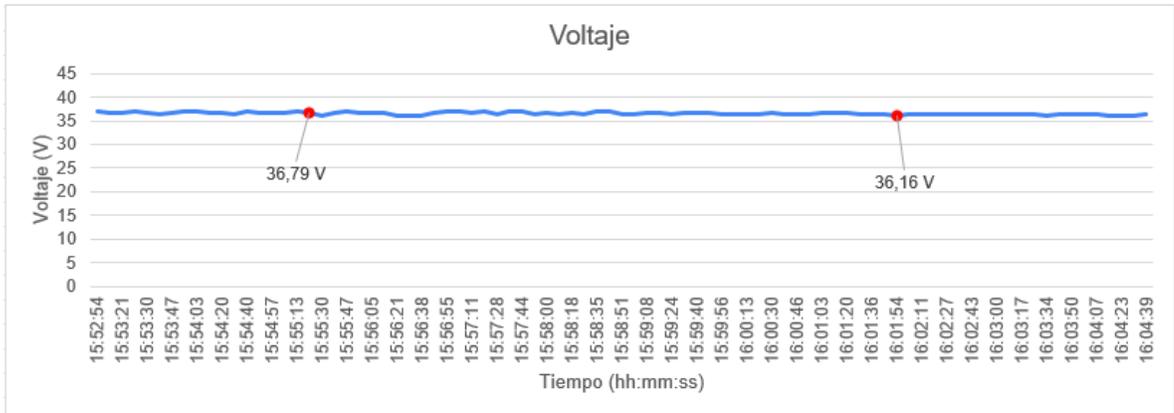


Ilustración 53: Voltaje de máxima potencia del panel cuando se genera un hotspot con una fuente externa.

En el caso de la corriente de máxima potencia (Ilustración 54), durante los primeros 3 minutos la corriente presenta un aumento, para luego mostrar un comportamiento relativamente lineal. En este rango de tiempo, se calcula su variación de 0,5%. Luego, al generar el hotspot, la corriente disminuye de manera abrupta de 17,5 (A) a 14,38 (A), para luego aumentar abruptamente a 16,54 (A). Durante los siguientes 6 minutos aproximados, la corriente aumenta de forma relativamente lineal y su variación fue de 0,6%, calculada del intervalo de 16,54 (A) a 18,68 (A). Posteriormente, después de generar el hotspot, la corriente disminuye, y durante los 3 primeros minutos aproximados se calcula una variación de 0,3%

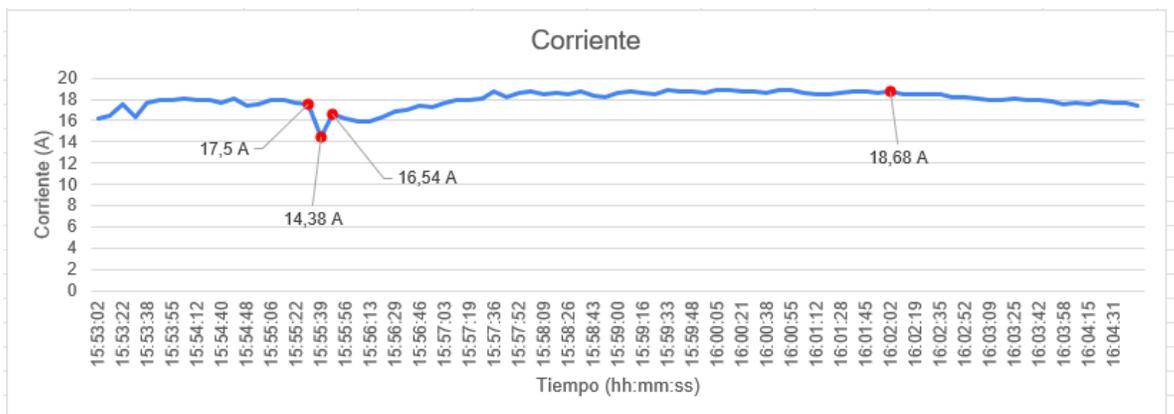


Ilustración 54: Corriente de máxima potencia del panel cuando se genera un hotspot con una fuente externa. Fuente: Google sheets

Como en las pruebas anteriores, la potencia máxima presenta un comportamiento es el esperado (Ilustración 55) debido a que depende del voltaje y la corriente. Durante aproximadamente los primeros 3 minutos la potencia presenta un comportamiento similar a la corriente y presenta una variación de 0,5%. Posteriormente, al generar el hotspot la potencia disminuye de manera abrupta de 643,8 (W) a 518,8 (W) para aumentar inmediatamente a 604,7 (W). Luego la potencia aumenta para mantenerse de forma relativamente lineal, durante un intervalo de tiempo de 6 minutos aproximado. Además, se calcula la variación entre el intervalo de 604,8 (W) a 672,4 (W) obteniéndose 0,6%. Posteriormente, después de generar el hotspot, la potencia disminuye, y durante los 3 primeros minutos aproximados se calcula una variación de 0,3%.

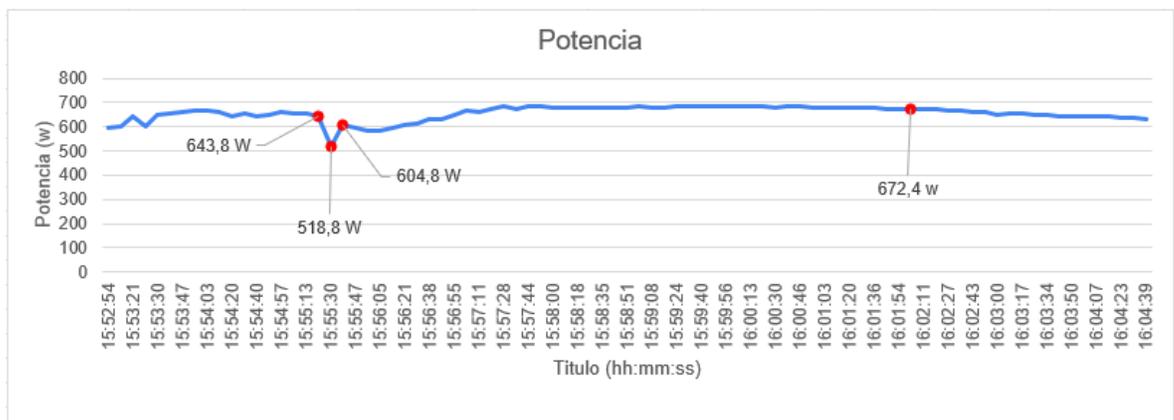


Ilustración 55: Corriente de máxima potencia del panel cuando se genera un hotspot con una fuente externa. Fuente: Google sheets.

El resultado de la aplicación de una fuente directa de calor externa sobre el material de la placa, a fin de generar un hotspot no permitió verificar modificaciones mayores en el desempeño del sistema fotovoltaico. Presumiblemente lo que ocurrió es que se logró generar un calentamiento superficial del material de la placa pero que no penetró a las capas interiores y por tanto no hubo afectación térmica significativa del material semiconductor interior de la placa, cosa que en cambio sí ocurre cuando se genera un hotspot por sombreadamiento ya que este corresponde a un sobrecalentamiento directo

(debido a efecto resistivo) del material semiconductor interno de la placa. Esta prueba por tanto requerirá de un planteamiento instrumental y metodológico más elaborado, pudiéndose al menos concluir que las fuentes de calor externas cercanas a placas FV en un contexto normal (que no se trate de fuentes de calor extrema como fuego directo u otras) no afectarían de manera tan crítica ni inmediata al desempeño de los sistemas FV en la medida que las placas cuenten con buen material de blindaje en su cara anterior y posterior.

5 Conclusiones

Se ha desarrollado un estudio experimental, bajo condiciones controladas, del comportamiento de paneles fotovoltaicos en relación a sus parámetros eléctricos de generación de energía, considerando alteraciones provocadas por fallas de tipo puntos calientes “hotspot”, simuladas o provocadas intencionadamente en parte de sus celdas o en zonas enteras de paneles del tipo convencional de uso común en instalaciones fotovoltaicas domiciliarias e industriales. Para ello se ha dispuesto de materiales e instalaciones adecuadas para el desarrollo de las pruebas en el laboratorio del Programa de Energías Renovables no Convencionales (PERNC) donde ha sido posible configurar esquemas de medición y pruebas utilizando instrumental de baja complejidad y bajo costo, el que, no obstante, ha permitido verificar metodológicamente buena parte del comportamiento y efectos que aparecen informados en la literatura científico-técnica identificada, en relación al comportamiento y efectos que tiene sobre los sistemas de generación fotovoltaica, la existencia de regiones de sobrecalentamiento del material semiconductor en los paneles, fenómeno denominado “hotspot”.

Para las pruebas experimentales desarrolladas, se ha debido hacer un desarrollo de adaptación y optimización de un dispositivo semi-intrusivo para la medición de corriente y potencia en CC el cual además del mejoramiento y adaptación en sus componentes hardware, ha debido ser integrado con una componente de comunicación de datos y software intermediario que han permitido finamente disponer de un sistema de desarrollo propio para efectuar medición en CC, el cual dadas sus características, resulta fácilmente escalable para su aplicación en instalaciones más complejas y de mayor tamaño, presentando un costo económico muy bajo (inversión en hardware y materiales inferior a \$50.000) con un grado de precisión bastante aceptable para los efectos de las mediciones requeridas (error inferior a 1% en medidas de escala de 1 a 5

amperes). Este dispositivo de medición en CC, ciertamente presenta un muy buen potencial de aplicación al ser integrado con tarjetas tipo embedded, microprocesadoras con puertos de comunicaciones alámbricos e inalámbricos, con lo cual resulta de alto interés el poder continuar explorando su optimización, determinar sus alcances, tolerancias, presión para un rango más amplio de medidas, resistencia a intemperie y ambientes extremos, entre otros.

A nivel de resultados de medición experimental, en primer lugar y en términos generales, las pruebas realizadas han permitido constatar la evidente influencia que tiene la existencia permanente o transitoria de regiones con sobrecalentamiento tipo hotspot, cuya aparición en tan solo una celda sobre un total de 72 de un panel, puede hacer llegar a perder un 30% de la capacidad de generación de voltaje global del panel.

Como se explica más en el detalle de la secuencia de pruebas, con los resultados obtenidos de la primera prueba se demuestra que la superficie del panel al estar expuesto a una capa fina de polvo presenta una alteración importante en el voltaje de salida. A pesar de que el voltaje de salida solo aumentó un 2%, esto sugiere que limpiar el panel mejora el rendimiento energético, pero a pesar de esto las variaciones de aumento en termino de voltaje, no pueden ser transferido de manera directa a capacidades de corriente y potencia, lo cual es necesario complementar prueba como en la ilustración 32.

Para la segunda prueba, se demuestra la relación que tienen las filas, y las columnas con respecto al voltaje de salida cuando el panel se sombrea de manera sistemática. En primer lugar, al destapar las filas del panel se presenta un aumento pseudo-lineal para luego estabilizarse en su capacidad máxima, esto nos indica que no existe una relación proporcionalmente lineal entre las filas y el voltaje de salida. En segundo lugar, al destapar las columnas el voltaje presenta aumentos abruptos y también no lineales, para luego estabilizarse asintóticamente en su capacidad máxima, esta variación abrupta puede

determinar el arreglo de las celdas dentro del panel fotovoltaico. Esto sugiera que las celdas estas conectadas en serie de manera horizontal.

Para la tercera prueba, el estudio sobre los hotspot en los paneles fotovoltaicos, nos indica que existe un impacto negativo en la eficiencia energética del panel. Durante este experimento, con el uso de una cámara termográfica se demostró que la presencia de una sombra sobre incluso una pequeña región del panel puede generar hotspot en zonas específicas que alcanzan rápidamente temperaturas muy elevadas, lo que significa una disminución significativa (15 a 30%) en los parámetros eléctricos globales del panel como el voltaje y potencia. Con respecto a la corriente existe una disminución debida también a la acción del diodo bypass de protección. Se observa que, si bien los diodos bypass cumplen su función de re-encaminar y desbloquear el flujo de corriente en una cadena de celdas donde se está produciendo algún tipo de bloqueo (resistivo u otro), esta acción protectora eléctrica no tiene la capacidad de mitigar el efecto del hotspot que se ha producido en el panel y que activa precisamente la acción del diodo bypass. Esta prueba nos indica, que la presencia de hotspot en un panel fotovoltaico produce variaciones importantes en los parámetros eléctricos lo que sugiere que debe existir un monitorio constante, una adecuada limpieza y un mantenimiento preventivo para evitar la formación de hotspot con el fin de mejorar un rendimiento energético.

Para la cuarta prueba, al exponer el panel a una sombra se genera nuevamente un hotspot, resultando en temperaturas más elevadas, afectando de manera más significativa los parámetros eléctricos de voltaje, corriente y potencia. Ello, al tener el sistema fotovoltaico trabajando en un ambiente “real” dado por el hecho de que hay presencia de demanda de corriente a través de una carga eléctrica permanente y relativamente estable. Al exponer el panel a la aparición de un hotspot en una de sus celdas, no solo se evidencia una caída

notable de su capacidad de generación de voltaje y corriente, sino que también se observa una inestabilidad mayor en los valores medidos frente a los valores obtenidos cuando el panel no está expuesto a un hotspot. Es decir, aparentemente la presencia de regiones tipo hotspot generan no solamente una baja en la capacidad de generación eléctrica de los paneles, sino que también son origen de inestabilidades eléctricas que, no obstante ser de corto plazo perfectamente podrían originar fallos en los sistemas que son alimentados directamente en CC en base a los paneles. De acuerdo con los resultados mostrados, se obtuvo una variación mayor cuando el hotspot presento una mayor temperatura esto se observa especialmente en el segundo experimento. A partir de esta observación, sería un interesante trabajo futuro el explorar en qué medida estas pérdidas de voltaje e inestabilidad en CC debido a hotspot se llegan a manifestar o no en la etapa de salida de AC al momento de considerar un sistema con un inversor. Lo anterior no es trivial ya que distintos inversores presentan diferentes sistemas de estabilización entrada-salida los cuales también tienen límites de efectividad que es interesante conocer.

Para la quinta prueba, al generar un hotspot utilizando una fuente de calor externa demostró que no hubo una variación en los parámetros eléctricos. Esto indica que el calor aplicado, y verificado con la termografía en la superficie del panel, no fue lo suficiente para afectar en el material semiconductor que se encuentra en el interior del panel, a diferencia del hotspot que se generó de manera intencionada por una sombra. Por lo tanto, como trabajo a futuro se recomienda exponer el panel a una fuente externa de calor mayor, y durante un lapso superior de tiempo que permita al calor externo penetrar de manera más efectiva y persistente las capas internas, con el fin de evaluar la interacción que tienen los paneles fotovoltaicos con calores extremos de origen externo que pudiesen estar presentes en determinados contextos de instalación (proximidad de sistemas de aire acondicionado o de extractores de aire, etc

5.1 Trabajo futuro

Cabe destacar que, en este trabajo de título se ha enfocado en como la presencia del hotspot afecta los parámetros eléctricos de un panel fotovoltaico. Sin embargo, el uso de un simulador permite obtener resultados más detallada sobre los hotspot e incrementar la confianza en los resultados obtenidos. Lo que contribuye a desarrollar trabajos más sólidos en el ámbito académico. Por lo tanto, es fundamental y necesario integrar un software de simulación especializado, como COMSOL, multiphysics o Matlab/simulink. Ya que esto permite.

- a. Predecir el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas y climáticas.
- b. Modelar el comportamiento térmico y eléctrico de los paneles fotovoltaico.
- c. Integrar variables como ángulo de incidencia solar, variación en la radiación solar, diferentes intensidades de sombra.

Respecto al primer experimento, con objeto de verificar si la contaminación superficial del panel tiene una incidencia mayor en el voltaje o corriente o potencia utilizando una carga estable con el fin de obtener una conclusión más precisa. Esta investigación permite desarrollar trabajos a futuro con el fin de optimizar el rendimiento energético del panel implementando técnicas de mantenimiento y la importancia de esto.

Conocer el fenómeno hotspot permite desarrollar trabajos futuros que desarrollen soluciones que permita minimizar el impacto de estos sobre el panel y en todo un sistema fotovoltaico donde se pueden presentar múltiples paneles con este tipo de problemas simultáneamente, pudiéndose generar un efecto acumulativo de pérdida de eficiencia, fenómeno que también puede ser un interesante tema de investigación para un futuro trabajo.

En la tercera y cuarta prueba no se consideraron algunos factores que podrían también generar variaciones en los parámetros eléctricos, como son zona geográfica donde están instalados los paneles, zona climática, estación del año, mes del año, escenarios de diferentes tipos de nivel de radiación que pueden estar expuestos los paneles, factores internos del panel, duración de los experimentos, variabilidad climática, pruebas en distintos tipos de paneles. Asimismo, es probable que exista algún grado de interferencia en las medidas, proveniente del circuito eléctrico al que estaba interconectado el sistema bajo prueba, ya que durante los experimentos y mediciones, ni el panel ni el sistema FV intervenidos fueron aislados del sistema eléctrico del laboratorio en que funcionan, existiendo por tanto la posibilidad de estar recibiendo influencia de armónicos, transitorios y cargas motorizadas u otras que pudieran originar comportamientos pulsantes periódicos como los que se aprecian en las figuras 46 a la 51. Todo lo anterior, sumado a posibles deficiencias en la metodología o el instrumental utilizado para medir la temperatura del hotspot obligan a declarar que los experimentos aquí realizados constituyen una aproximación a un trabajo real de laboratorio totalmente perfectible. Por lo tanto, como trabajo a futuro se recomienda realizar una evaluación a largo plazo del fenómeno hotspot considerando los factores mencionados, instrumental de mayor precisión como por ejemplo el dron DJI modelo Matrice 300 RTK que está equipado con la cámara termográfica ZenMuse H20T que permite un constante monitoreo sobre los paneles fotovoltaicos. Además, implementar un sistema de monitoreo constante de medición eléctrica que a su vez incluya un monitoreo termográfico, con el fin de registrar los resultados en tiempo real.

6 Bibliografía y referencia.

- Reguera, F. (2015). Análisis de la Degradación de Módulos Fotovoltaico. [Master Tecnología de los sistemas de energía solar fotovoltaica]. Universidad Internacional de Andalucía.
- Kherici, Z., Cheghib, H., Kahoul, N., Youness, M., Affari, B. C., & Hazem, T. (2020). Failure modes of standard photovoltaic modules in Sahara Desert. En *2020 11th international renewable energy congress (IREC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/irec48820.2020.9310409>
- Bouaichi, A., Alami Merrouni, A., Hajjaj, C., Messaoudi, C., Ghennioui, A., Benlarabi, A., Ikken, B., El Amrani, A., & Zitouni, H. (2019). In-situ evaluation of the early PV module degradation of various technologies under harsh climatic conditions: The case of Morocco. *Renewable Energy*, *143*, 1500–1518. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.091>
- Ferrara, C., & Philipp, D. (2012). Why do PV modules fail? *Energy Procedia*, *15*, 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.046>
- Ahsan, S., Niazi, K. A. K., Khan, H. A., & Yang, Y. (2018). Hotspots and performance evaluation of crystalline-silicon and thin-film photovoltaic modules. *Microelectronics Reliability*, *88-90*, 1014–1018. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.06.097>
- Jordan, D. C., Silverman, T. J., Wohlgemuth, J. H., Kurtz, S. R., & VanSant, K. T. (2017). Photovoltaic failure and degradation modes. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *25*(4), 318–326. <https://doi.org/10.1002/pip.2866>
- Dhimish, M., Mather, P., & Holmes, V. (2018). Evaluating power loss and performance ratio of hot-spotted photovoltaic modules. *IEEE Transactions*

on *Electron Devices*, 65(12), 5419–5427. <https://doi.org/10.1109/ted.2018.2877806>

- Rajput, P., Tiwari, G. N., Sastry, O. S., Bora, B., & Sharma, V. (2016). Degradation of mono-crystalline photovoltaic modules after 22 years of outdoor exposure in the composite climate of India. *Solar Energy*, 135, 786–795. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.047>
- Rada, J., Chamberlin, C., Lehman, P., & Jacobson, A. (2017). Comparison of PV module performance before and after 11, 20, and 25.5 years of field exposure. En *2017 IEEE 44th photovoltaic specialists conference (PVSC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2017.8366370>
- Rubilar, P. (2023). Desarrollo de dispositivo Telemétrico de Parámetros Eléctricos en Corriente Continua Aplicado a Paneles fotovoltaicos. [Trabajo de Titulación para optar al Título de Ingeniería Civil en Electrónica]. Universidad Tecnológica Metropolitana.
- Kim, K. A., & Krein, P. T. (2015). Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(5), 1435–1441. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2015.2444091>
- Dhimish, M., Holmes, V., Mehrdadi, B., Dales, M., & Mather, P. (2018). Output-Power enhancement for hot spotted polycrystalline photovoltaic solar cells. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 18(1), 37–45. <https://doi.org/10.1109/tdmr.2017.2780224>
- Tian, H., Mancilla–David, F., Ellis, K., Muljadi, E., & Jenkins, P. (2013). Determination of the optimal configuration for a photovoltaic array depending on the shading condition. *Solar Energy*, 95, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.05.028>
- Dhimish, M. (2020). Micro cracks distribution and power degradation of polycrystalline solar cells wafer: Observations constructed from the analysis of 4000 samples. *Renewable Energy*, 145, 466–477. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.057>
- Meena, R., Pareek, A., & Gupta, R. (2024). A comprehensive Review on interfacial delamination in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113944. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113944>
- Castrillon Ocampo, D (2022). Detección de puntos calientes en sistema fotovoltaico [Informe final de Trabajo de Grado] Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM.

- Carballo Alpizar, A (2023). Detección de puntos calientes en generadores fotovoltaico a partir de termografía infrarroja y técnicas de aprendizaje profundo [Trabajo de Diplomado para en opción al Título de ingeniero(a) en Automática]. Universidad de Oriente.
- Kassar, R. E., Takash, A. A., Faraj, J., Khaled, M., & Ramadan, H. S. (2024). Phase change materials for enhanced photovoltaic panels performance: A comprehensive review and critical analysis. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.02.004>
- Čabo, F. G., Marinić-Kragić, I., Garma, T., & Nižetić, S. (2021). Development of thermo-electrical model of photovoltaic panel under hot-spot conditions with experimental validation. *Energy*, 230, 120785. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120785>
- Radziemska, E., & Klugmann, E. (2002b). Thermally affected parameters of the current–voltage characteristics of silicon photocell. *Energy Conversion and Management*, 43(14), 1889–1900. [https://doi.org/10.1016/s0196-8904\(01\)00132-7](https://doi.org/10.1016/s0196-8904(01)00132-7)
- Teo, H. G., Lee, P. S., & Hawlader, M. N. A. (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*, 90(1), 309–315. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.017>
- Waqar Akram, M., Li, G., Jin, Y., Zhu, C., Javaid, A., Zuhair Akram, M., & Usman Khan, M. (2020). Study of manufacturing and hotspot formation in cut cell and full cell PV modules. *Solar Energy*, 203, 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.052>
- Papargyri, L., Theristis, M., Kubicek, B., Krametz, T., Mayr, C., Papanastasiou, P., & Georghiou, G. E. (2020). Modelling and experimental investigations of microcracks in crystalline silicon photovoltaics: A review. *Renewable Energy*, 145, 2387–2408. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.138>
- Bayrak, F., Ertürk, G., & Oztop, H. F. (2017). Effects of partial shading on energy and exergy efficiencies for photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 164, 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.108>
- Kim, K. A., Seo, G.-S., Cho, B.-H., & Krein, P. T. (2016). Photovoltaic hot-spot detection for solar panel substrings using AC parameter characterization. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(2), 1121–1130. <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2417548>
- Davila Sacota, M. (2020). Estudio de técnicas invasivas y no invasivas para evaluar el deterioro de paneles solares fotovoltaicos [Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad, Mención Redes

Eléctricas Inteligentes] Universidad de Cuenca, Ecuador. URL: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/34418>

- Rahman, M. M., Khan, I., & Alameh, K. (2021). Potential measurement techniques for photovoltaic module failure diagnosis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111532. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111532>
- Smith, R. M. (2012). *Outdoor PV module degradation of current-voltage parameters: Preprint*. National Renewable Energy Laboratory.
- Islam, M. A., Hasanuzzaman, & Rahim, N. A. (2018). Experimental investigation of on-site degradation of crystalline silicon PV modules under Malaysian climatic condition. *Indian Journal Of Pure & Applied Physics*, 56(3), 226-237. <http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/44096/1/IJPAP%2056%283%29%20226-237.pdf>
- Ahmad, J., Ciocia, A., Fichera, S., Murtaza, A. F., & Spertino, F. (2019). Detection of typical defects in silicon photovoltaic modules and application for plants with distributed MPPT configuration. *Energies*, 12(23), 4547. <https://doi.org/10.3390/en12234547>
- Maldague, X. (2000). Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation. En *Trends in optical non-destructive testing and inspection* (pp. 591–633). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-008043020-1/50040-5>
- Buerhop, C., Schlegel, D., Niess, M., Vodermayr, C., Weißmann, R., & Brabec, C. J. (2012). Reliability of IR-imaging of PV-plants under operating conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 107, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.07.011>
- L, A., & Jacob, B. (2023). Design and implementation of Modbus serial line Server RTU VIP. En *2023 international conference on control, communication and computing (ICCC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iccc57789.2023.10165207>
- Tamboli, S., Rawale, M., Thoraiet, R., & Agashe, S. (2015). Implementation of Modbus RTU and Modbus TCP communication using Siemens S7-1200 PLC for batch process. En *2015 international conference on smart technologies and management for computing, communication, controls, energy and materials (ICSTM)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icstm.2015.7225424>
- Gallegos Ramirez, J, M & Delgado Guerrero E, H (2015). Diseño e Implementación de una red industrial modbus para el control de actuadores trifásicos en el Laboratorio de Fabricación Flexible [Tesis previa para la

obtención del título: Ingeniero Electrónico]. Universidad Politécnica Salesiana.

Mangalaraja, A. (2023). *Materials technology energy environment: Materials technology for the energy and environmental nexus, volume 1*. Institute of Physics Publishing.

Acevedo, A (2016) Modelo analítico de celdas solares de capa delgada CdS/CdTe y optimización de parámetros para la obtención de altas eficiencias [Maestro de ciencias en la especialidad de ingeniería eléctrica]. Centro de investigación y de estudios avanzados del instituto politécnico nacional.

Jiang, L., Cui, S., Sun, P., Wang, Y., & Yang, C. (2020). Comparison of monocrystalline and polycrystalline solar modules. En *2020 IEEE 5th information technology and mechatronics engineering conference (ITOEC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/itoec49072.2020.9141722>

Bracamontes, E. (2020). Implementación de sistema fotovoltaico aislados y de respaldo para dispositivos de control de personal [Tesis que para obtener el título de Ingeniero Eléctrico y Electrónico]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Perpiñan Lamigueiro, O. (2023). Energía Solar Fotovoltaica. Obtenido de <https://elsolucionario.net/energia-solar-fotovoltaica-oscar-perpinan-lamigueiro-1ra-edicion/>.

Muehleisen, W., Eder, G. C., Voronko, Y., Spielberger, M., Sonnleitner, H., Knoebel, K., Ebner, R., Ujvari, G., & Hirschl, C. (2018). Outdoor detection and visualization of hailstorm damages of photovoltaic plants. *Renewable Energy*, 118, 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.010>

Lane, C. (8 de marzo 2024). La eficiencia de los paneles solares: Los paneles solares mas eficientes en 2024. SolarReviews. URL: <https://www.solarreviews.com/es/blog/cuales-son-los-paneles-solares-mas-eficientes>.

Zavia, M. (10 de noviembre 2023). Nuevo récord de eficiencia de un panel solar gracias al perovskita. El “material milagroso” supera ya el límite teórico de los paneles convencionales. Xatakaenergia. URL: <https://www.xataka.com/energia/nuevo-record-eficiencia-panel-solar-gracias-a-perovskita-material-milagroso-supera-limite-teorico-paneles-convencionales>

ULIRvision. (2014). Serie TI-160/384 Cámara termográfica UFPA MANUAL DE USUARIO. Doi: <http://www.ulirvision.es/thermal-imaging-camera-ti160.html>.

M. S. Alam, M. I. Islam and A. A. Mansur, "Comprehensive Investigation of Performance Degradation of Old Photovoltaic Panels at Outdoor Exposed Condition: A Case Study in Bangladesh," *2024 6th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT)*, Dhaka, Bangladesh, 2024, pp. 945-950, doi: 10.1109/ICEEICT62016.2024.10534386.

Sameera, M. Tariq and M. Rihan, "Identification and Mitigation of Atmospheric Effects on Solar PV Panel," *2022 Fourth International Conference on Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology (ICERECT)*, Mandya, India, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICERECT56837.2022.10060441.