

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES**



**CARACTERIZACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA
DETERMINAR PERDIDAS POR TEMPERATURA MEDIANTE
CÁMARA TERMOGRÁFICA INFRARROJA IR – CAMPUS
AYABACAS**

Arles Lucero Choque Torres

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES**

Asesor:
M.Sc. Reynaldo Condori Yucra



Juliaca, 2023

Ficha catalográfica

Choque Torres, A. L. (2023). *Caracterización de módulos fotovoltaicos para determinar perdidas por temperatura mediante cámara termográfica infrarroja IR – campus Ayabacas* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca.

AUTOR: Arles Lucero Choque Torres

TÍTULO: Caracterización de módulos fotovoltaicos para determinar perdidas por temperatura mediante cámara termográfica infrarroja IR – campus Ayabacas

PUBLICACIÓN: Juliaca, 2023

DESCRIPCIÓN: Cantidad de páginas (114 pp)

CÓDIGO: 02-000019-02/C75

NOTA: Incluye bibliografía

ASESOR: M.Sc. Reynaldo Condori Yucra

PALABRAS CLAVE: Cámara termográfica, Hot Spot, limpieza de módulos fotovoltaicos, módulo fotovoltaico monocristalino, policristalino, temperatura

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES

**“CARACTERIZACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA DETERMINAR
PERDIDAS POR TEMPERATURA MEDIANTE CÁMARA TERMOGRÁFICA
INFRARROJA IR – CAMPUS AYABACAS”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

Presentada por:

Arles Lucero Choque Torres

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Ubaldo Yancachajlla Tito



PRESIDENTE DE JURADO

M. Sc. Cesar Enrique Yupanqui Bendita



JURADO (Secretario)

2° MIEMBRO

M. Sc. Alex Mario Lerma Coaquira



JURADO (Vocal)

3° MIEMBRO



M. Sc. Reynaldo Condori Yucra

ASESOR DE TESIS

NOMBRE DEL TRABAJO

**CARACTERIZACIÓN DE MÓDULOS FOTO
VOLTAICOS PARA DETERMINAR PERDIDAS
POR TEMPERATURA MEDIANTE CÁMARA
TERMOGRÁFICA INFRARROJA IR -
CAMPUS AYABACAS**

AUTOR

Arles Lucero Choqque Torres

RECUENTO DE PALABRAS

24368 Words

RECUENTO DE CARACTERES

125776 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

114 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

4.5MB

FECHA DE ENTREGA

Dec 21, 2023 10:29 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Dec 21, 2023 10:32 AM GMT-5

● **8% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base

- 7% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 11 palabras)



Mg. Reynaldo Condori Yucra
ASESOR

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mis padres Leonardo Choque y Lorenza Torres por apoyarme e incentivarne a lograr mi objetivo, a mis hermanos Dante, Ruth, Roberto, Elvis por sus palabras y por el apoyo moral. Tambien dedico este trabajo a Alex por apoyarme incondicionalmente en la ejecución de mi proyecto de tesis.

AGRADECIMIENTOS

Antes que todo agradezco a Dios por darme vida, salud y permitirme seguir cumpliendo mis metas.

Agradezco a la Universidad Nacional de Juliaca por permitirme continuar mis estudios en sus instalaciones.

Agradezco a la escuela profesional de Ingeniería en Energías Renovables por darme acceso a sus instalaciones y uso de equipos especializados del laboratorio de ingeniería en energía solar fotovoltaica, lo cual fue determinante para culminar de forma satisfactoria el presente proyecto de tesis.

Agradezco a mis padres Leonardo Choque, Lorenza Torres y mi hermano Dante Choque por apoyarme durante mis estudios y motivarme a cumplir mis metas.

Agradezco al M. Sc. Reynaldo Condori Yucra que en su condición de asesor del presente proyecto de tesis estuvo guiándome y compartiendo sus conocimientos desde el inicio hasta concluir el proyecto de tesis. Al Ing. Alvaro y al Dr. Henry Pizarro quienes apoyaron incondicionalmente.

También quiero agradecer a todos los docentes de la escuela profesional de Ingeniería en Energías Renovables por las enseñanzas brindadas. Así como también agradecer a mis amistades Alex, Edgar, Vianey, Edison quienes me apoyaron durante la ejecución del presente proyecto de tesis.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-------|
| Dedicatoria..... | iv |
| Agradecimientos..... | v |
| Índice de tablas..... | x |
| Índice de figuras..... | xii |
| Índice de anexos..... | xv |
| Lista de abreviaturas y siglas..... | xvi |
| Lista de símbolos..... | xvii |
| Resumen..... | xviii |
| Abstract..... | xix |
| Introducción..... | 20 |
| | |
| CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN..... | 22 |
| 1.1 Formulación del problema..... | 23 |
| 1.1.1 Problema general..... | 23 |
| 1.1.2 Problemas específicos..... | 23 |
| 1.2 Objetivos de la investigación..... | 23 |
| 1.2.1 Objetivo general..... | 23 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 23 |
| 1.3 Justificación de la investigación..... | 24 |
| 1.3.1 Justificación técnica..... | 24 |
| 1.3.2 Justificación social..... | 24 |
| 1.3.3 Justificación económica..... | 24 |
| 1.3.4 Justificación ambiental..... | 25 |
| | |
| CAPÍTULO II REVISIÓN DE LA LITERATURA..... | 26 |
| 2.1 Antecedentes del problema de investigación..... | 26 |
| 2.2 Marco teórico..... | 28 |
| 2.2.1 Radiación solar..... | 28 |
| 2.2.2 Energía solar fotovoltaica..... | 29 |
| 2.2.3 Módulos fotovoltaicos..... | 29 |
| 2.2.4 Módulo fotovoltaico monocristalino..... | 29 |

| | | |
|--|---|--------|
| 2.2.5 | Módulo fotovoltaico policristalino..... | 30 |
| 2.2.6 | Parámetros eléctricos de los módulos fotovoltaicos | 30 |
| 2.2.7 | Perdidas de potencia en módulos fotovoltaicos por temperatura..... | 32 |
| 2.2.8 | Sombreado o shading | 32 |
| 2.2.9 | Suciedad o soiling | 33 |
| 2.2.10 | Puntos calientes o Hot spots..... | 33 |
| 2.2.11 | Termografía infrarroja..... | 34 |
| 2.2.12 | Cámara termográfica..... | 34 |
| 2.2.13 | Norma IEC TS 62446-3 | 35 |
| CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS..... | | 36 |
| 3.1 | Ubicación del proyecto de investigación | 36 |
| 3.2 | Formulación de hipótesis | 36 |
| 3.2.1 | Hipótesis general | 36 |
| 3.2.2 | Hipótesis específicas | 36 |
| 3.3 | Materiales y equipos | 37 |
| 3.3.1 | Módulos fotovoltaicos policristalinos | 37 |
| 3.3.2 | Módulos fotovoltaicos monocristalinos | 38 |
| 3.3.3 | Dron con cámara termográfica..... | 40 |
| 3.3.4 | Trazador de curvas I-V..... | 40 |
| 3.3.5 | Microcontrolador Arduino Uno | 41 |
| 3.3.6 | Lector de tarjeta SD para Arduino | 42 |
| 3.3.7 | Módulo RTC DS1307 para Arduino | 42 |
| 3.3.8 | Fuente de 24 V en corriente continua | 43 |
| 3.3.9 | Transmisor de temperatura..... | 43 |
| 3.3.10 | Sensor de temperatura PT100 | 44 |
| 3.3.11 | Otros materiales | 45 |
| 3.4 | Software | 45 |
| 3.5 | Metodología | 45 |
| 3.5.1 | Sistema de adquisición de datos de temperatura con Arduino..... | 45 |
| 3.5.2 | Programación y pruebas de funcionamiento del sistema de adquisición de datos de temperatura | 47 |

| | | |
|--|--|----|
| 3.5.3 | Armado del sistema de adquisición de datos de temperatura para exteriores | 48 |
| 3.5.4 | Instalación del sistema de adquisición de datos de temperatura | 48 |
| 3.5.5 | Trazado de curvas I-V | 50 |
| 3.5.6 | Termografía de módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos ... | 51 |
| 3.5.7 | Caracterización de módulos fotovoltaicos | 52 |
| 3.6 | Costos del proyecto de investigación..... | 54 |
| CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES | | 55 |
| 4.1 | Evaluación de módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza | 55 |
| 4.1.1 | Curvas I-V y P-V de los módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza | 55 |
| 4.1.2 | Temperatura de los módulos fotovoltaico monocristalinos sin limpieza..... | 59 |
| 4.1.3 | Caracterización de módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza | 60 |
| 4.2 | Evaluación de módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza | 61 |
| 4.2.1 | Curvas I-V y P-V de los módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza | 61 |
| 4.2.2 | Temperatura de los módulos fotovoltaico policristalinos sin limpieza..... | 65 |
| 4.2.3 | Caracterización de módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza | 68 |
| 4.3 | Evaluación de módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza | 68 |
| 4.3.1 | Curvas I-V y P-V de los módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza | 69 |
| 4.3.2 | Temperatura de los módulos fotovoltaico monocristalino con limpieza | 72 |
| 4.3.3 | Caracterización de los módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza | 74 |
| 4.4 | Evaluación de módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza..... | 75 |
| 4.4.1 | Curvas I-V y P-V de los módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza | 75 |
| 4.4.2 | Temperatura de los módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza | 79 |
| 4.4.3 | Caracterización de los módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza | 82 |
| 4.5 | Perdidas de potencia por altas temperaturas en los módulos fotovoltaicos | 82 |
| 4.5.1 | Perdidas de potencia por temperatura en módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza..... | 82 |
| 4.5.2 | Perdidas de potencia por temperatura en módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza | 83 |

| | | |
|---|---|-----|
| 4.5.3 | Perdidas de potencia por temperatura en módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza..... | 84 |
| 4.5.4 | Perdidas de potencia por temperatura en módulos fotovoltaico policristalinos con limpieza | 85 |
| 4.5.5 | Perdida de potencia por temperatura en módulos fotovoltaicos | 86 |
| CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | | 88 |
| 5.1 | Conclusiones | 88 |
| 5.2 | Recomendaciones | 89 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 90 |
| Anexo 1. | Ficha técnica del módulo fotovoltaico policristalino..... | 93 |
| Anexo 2. | Ficha técnica del módulo fotovoltaico monocristalino..... | 95 |
| Anexo 3. | Códigos de programación en Arduino para adquisición de datos de temperatura de los módulos fotovoltaicos monocristalinos..... | 97 |
| Anexo 4. | Códigos de programación en Arduino para adquisición de datos de temperatura de los módulos fotovoltaicos policristalinos..... | 99 |
| Anexo 5. | Datos promedio de los parámetros eléctricos en STC de los módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza..... | 101 |
| Anexo 6. | Datos promedio de los parámetros eléctricos en STC de los módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza..... | 104 |
| Anexo 7. | Datos promedio de los parámetros eléctricos en STC de los módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza. | 107 |
| Anexo 8. | Datos promedio de los parámetros eléctricos en STC de los módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza. | 110 |
| Anexo 9. | Temperatura en los SFCR con módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos..... | 113 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|----------|---|----|
| Tabla 1 | Especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico policristalino TP660P-270..... | 38 |
| Tabla 2 | Especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico monocristalino EPSC370. | 39 |
| Tabla 3 | Costos de implementación de los sistemas de adquisición de datos de temperatura. | 54 |
| Tabla 4 | Resultados del módulo fotovoltaico monocristalino 1 sin limpieza..... | 56 |
| Tabla 5 | Resultados del módulo fotovoltaico monocristalino 2 sin limpieza..... | 57 |
| Tabla 6 | Resultados del módulo fotovoltaico monocristalino 3 sin limpieza..... | 58 |
| Tabla 7 | Resumen de temperaturas de placa de módulo fotovoltaico monocristalinos sin limpieza. | 59 |
| Tabla 8 | Resultados de la caracterización de módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza según su temperatura de placa. | 61 |
| Tabla 9 | Resultados del módulo fotovoltaico policristalino 1 sin limpieza..... | 62 |
| Tabla 10 | Resultados del módulo fotovoltaico policristalino 2 sin limpieza..... | 63 |
| Tabla 11 | Resultados del módulo fotovoltaico policristalino 3 sin limpieza..... | 64 |
| Tabla 12 | Resumen de temperaturas de placa de los 3 módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza..... | 66 |
| Tabla 13 | Resultados de la caracterización de módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza según su temperatura. | 68 |
| Tabla 14 | Resultados del módulo fotovoltaico monocristalino 1 con limpieza..... | 69 |
| Tabla 15 | Resultados del módulo fotovoltaico monocristalino 2 con limpieza..... | 71 |
| Tabla 16 | Resultados del módulo fotovoltaico monocristalino 3 con limpieza..... | 72 |
| Tabla 17 | Resumen de temperaturas de placa de los 3 módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza. | 73 |
| Tabla 18 | Resultados de la caracterización de módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza según su temperatura. | 75 |
| Tabla 19 | Resultados del módulo fotovoltaico policristalino 1 con limpieza. | 76 |
| Tabla 20 | Resultados del módulo fotovoltaico policristalino 2 con limpieza. | 77 |

| | | |
|----------|---|-----|
| Tabla 21 | Resultados del módulo fotovoltaico policristalino 3 con limpieza. | 78 |
| Tabla 22 | Resumen de temperaturas de placa de los 3 módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza..... | 80 |
| Tabla 23 | Resultados de la caracterización de módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza según su temperatura. | 82 |
| Tabla 24 | Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico monocristalino 1 sin limpieza en STC..... | 101 |
| Tabla 25 | Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico monocristalino 2 sin limpieza en STC..... | 102 |
| Tabla 26 | Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico monocristalino 3 sin limpieza en STC..... | 103 |
| Tabla 27 | Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico policristalino 1 sin limpieza en STC..... | 104 |
| Tabla 28 | Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico policristalino 2 sin limpieza en STC..... | 105 |
| Tabla 29 | Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico policristalino 3 sin limpieza en STC..... | 106 |
| Tabla 30 | Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico monocristalino 1 con limpieza en STC..... | 107 |
| Tabla 31 | Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico monocristalino 2 con limpieza en STC..... | 108 |
| Tabla 32 | Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico monocristalino 3 con limpieza en STC..... | 109 |
| Tabla 33 | Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico policristalino 1 con limpieza en STC..... | 110 |
| Tabla 34 | Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico policristalino 2 con limpieza en STC..... | 111 |
| Tabla 35 | Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico policristalino 3 con limpieza en STC..... | 112 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 1. | Efectos de la temperatura en el voltaje de un módulo fotovoltaico (Collado, 2015). | 20 |
| Figura 2. | Vista infrarroja de dos módulos fotovoltaicos (Hurtado, 2016). | 21 |
| Figura 3. | Tipos de radiaciones solares (Alonso, 2006). | 28 |
| Figura 4. | Modulo fotovoltaico monocristalino, adaptado de (Serrano, 2017). | 29 |
| Figura 5. | Módulos fotovoltaicos policristalino, adaptado de (Serrano, 2017). | 30 |
| Figura 6. | Curva característica I-V y P-V de un módulo fotovoltaico (Vargas & Abrahamse, 2014). | 31 |
| Figura 7. | Sombreamiento en un módulo fotovoltaico (Alvarez, 2018). | 32 |
| Figura 8. | Acumulación de suciedad en un módulo fotovoltaico (CambioEnergetico, 2021) | 33 |
| Figura 9. | Módulos fotovoltaicos con Hot spots (Morales, 2020). | 34 |
| Figura 10. | Instituto de energías renovables y eficiencia energética – UNAJ -Ayabacas (Google Maps). | 36 |
| Figura 11. | SFCR con inversor string utilizando módulos fotovoltaicos policristalinos. | 37 |
| Figura 12. | SFCR con convertidores CC/CC utilizando módulos fotovoltaicos monocristalinos. | 39 |
| Figura 13. | Dron con cámara termográfica. | 40 |
| Figura 14. | Trazador de curva I-V Gossen Metrawatt. | 41 |
| Figura 15. | Microcontrolador Arduino uno. | 41 |
| Figura 16. | Lector de tarjeta SD para Arduino. | 42 |
| Figura 17. | Módulo RTC DS1307 para Arduino. | 42 |
| Figura 18. | Fuente de 24 V en corriente continua. | 43 |
| Figura 19. | Transmisor de temperatura. | 44 |
| Figura 20. | Sensor de temperatura TP100. | 44 |
| Figura 21. | Conexión del sistema de adquisición de datos de temperatura con Arduino. | 46 |

| | |
|---|----|
| Figura 22. Programación en el software Arduino..... | 47 |
| Figura 23. Pruebas de funcionamiento de la programación en Arduino. | 47 |
| Figura 24. Tablero de adquisición de datos de temperatura. | 48 |
| Figura 25. Sistema de adquisición de datos de temperatura con Arduino..... | 48 |
| Figura 26. Sistemas fotovoltaicos conectados a red con tecnologías monocristalinas y policristalinas..... | 49 |
| Figura 27. Instalación de sensores de temperatura PT100. | 49 |
| Figura 28. Trazado de curva I-V de un módulo fotovoltaico monocristalino. | 50 |
| Figura 29. Termografía de módulos fotovoltaicos policristalinos y monocristalinos. | 51 |
| Figura 30. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico monocristalino 1 sin limpieza..... | 55 |
| Figura 31. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico monocristalino 2 sin limpieza..... | 57 |
| Figura 32. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico monocristalino 3 sin limpieza..... | 58 |
| Figura 33. Temperatura de módulos fotovoltaicos monocristalinos evaluados sin limpieza. | 59 |
| Figura 34. Temperatura de celda de los módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza. | 60 |
| Figura 35. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico policristalino 1 sin limpieza. | 62 |
| Figura 36. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico policristalino 2 sin limpieza. | 63 |
| Figura 37. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico policristalino 3 sin limpieza. | 64 |
| Figura 38. Temperatura de los módulos fotovoltaicos policristalinos evaluados sin limpieza. | 65 |
| Figura 39. Temperatura de celda de los módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza. | 66 |
| Figura 40. Comportamiento de la temperatura de celda de módulos fotovoltaicos sin limpieza. | 67 |
| Figura 41. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico monocristalino 1 con limpieza. | 69 |
| Figura 42. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico monocristalino 2 con limpieza. | 70 |
| Figura 43. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico monocristalino 3 con limpieza. | 71 |

| | |
|---|-----|
| Figura 44. Temperatura de los módulos fotovoltaicos monocristalinos evaluados con limpieza. | 73 |
| Figura 45. Temperatura de celda de los módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza. | 74 |
| Figura 46. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico policristalino 1 con limpieza. | 76 |
| Figura 47. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico policristalino 2 con limpieza. | 77 |
| Figura 48. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico policristalino 3 con limpieza. | 78 |
| Figura 49. Temperatura de los módulos fotovoltaicos policristalinos evaluados con limpieza. | 79 |
| Figura 50. Temperatura de celda de módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza. | 80 |
| Figura 51. Comportamiento de la temperatura de celda de módulos fotovoltaicos con limpieza. | 81 |
| Figura 52. Perdidas de potencia según temperatura de operación en módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza. | 83 |
| Figura 53. Perdidas de potencia según temperatura de operación en módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza. | 84 |
| Figura 54. Perdidas de potencia según temperatura de operación en módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza. | 84 |
| Figura 55. Perdidas de potencia según temperatura de operación en módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza. | 85 |
| Figura 56. Perdidas de potencia por temperatura en módulos fotovoltaicos. | 86 |
| Figura 57. Temperatura del SFCR de 3.7 kWp con convertidores CC/CC con módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza. | 113 |
| Figura 58. Temperatura del SFCR de 3.7 kWp con convertidores CC/CC con módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza. | 113 |
| Figura 59. Temperatura del SFCR de 3.24 kWp con inversor string con módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza. | 114 |
| Figura 60. Temperatura del SFCR de 3.24 kWp con inversor string con módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza. | 114 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|---|-----|
| Anexo 1. Ficha técnica del módulo fotovoltaico policristalino..... | 93 |
| Anexo 2. Ficha técnica del módulo fotovoltaico monocristalino..... | 95 |
| Anexo 3. Códigos de programación en Arduino para adquisición de datos de temperatura de los módulos fotovoltaicos monocristalinos..... | 97 |
| Anexo 4. Códigos de programación en Arduino para adquisición de datos de temperatura de los módulos fotovoltaicos policristalinos. | 99 |
| Anexo 5. Datos promedio de los parámetros eléctricos en STC de los módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza. | 101 |
| Anexo 6. Datos promedio de los parámetros eléctricos en STC de los módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza. | 104 |
| Anexo 7. Datos promedio de los parámetros eléctricos en STC de los módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza..... | 107 |
| Anexo 8. Datos promedio de los parámetros eléctricos en STC de los módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza. | 110 |
| Anexo 9. Temperatura en los SFCR con módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos. | 113 |

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

CC - Corriente continua

FV - Fotovoltaico

IEC - Comisión Electrotécnica Internacional

IR – Infrarroja

OMM - Organización Meteorológica Mundial

RTC - Reloj en tiempo real

RTD - Detector de temperatura resistivo

SD - Tarjeta digital segura

SFCR - Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red

STC - Condiciones Estándares de Prueba

LISTA DE SÍMBOLOS

V_{oc} - Voltaje de circuito abierto

$V_{oc\ ref}$ - Voltaje de circuito abierto de referencia

T_c - Temperatura celda

β - Coeficiente de temperatura de voltaje

I_{sc} - Corriente de corto circuito

$I_{sc\ ref}$ - Corriente de corto circuito de referencia

α - Coeficiente de temperatura de intensidad

V_{pmp} - Voltaje de máxima potencia

$V_{pmp\ ref}$ - Voltaje de máxima potencia de referencia

I_{pmp} - Corriente de máxima potencia

$I_{pmp\ ref}$ - Corriente de máxima potencia de referencia

η - Eficiencia

G - Irradiancia

RESUMEN

El aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica cada vez va tomando más fuerza, para ello se utilizan módulos fotovoltaicos para convertir energía solar en energía eléctrica por lo cual son muy utilizados a nivel mundial. En el Perú, esta realidad no es diferente ya que es considerado uno de los países con alto recurso solar de hasta 5.8988 kWh/m^2 . Sin embargo, en la región de Puno donde se presentan altas radiaciones solares y la acumulación de suciedad y polvo en módulos fotovoltaicos genera pérdidas de potencia y eficiencia debido a las altas temperaturas que llegan a superar la temperatura nominal de operación de los módulos fotovoltaicos. Por lo cual se evaluaron tres módulos fotovoltaicos monocristalinos EPSC370 Wp correspondiente al sistema fotovoltaico conectado a la red (SFCR) de 3.7 kWp con convertidores CC/CC y tres módulos fotovoltaicos policristalinos TP660P-270Wp correspondiente al SFCR de 3.24 kWp con inversor string. Se evaluaron los módulos fotovoltaicos con limpieza y sin limpieza durante 16 días en dos turnos mañana y tarde, la caracterización de estos dos modelos de módulos fotovoltaicos consiste en determinar las pérdidas de potencia y para ello se registraron datos de parámetros eléctricos y ambientales (potencia, tensión, corriente, temperatura del módulo e irradiancia) con un trazador de curvas I-V Profitest PV y se tomaron datos de temperatura de placa con la cámara termográfica con dron Autel EVO II del laboratorio de energía solar fotovoltaica de la EPIER. El resultado nos muestra que en la evaluación con limpieza se registraron las temperaturas más altas con la cámara termográfica con $45.9 \text{ }^\circ\text{C}$ en módulos monocristalinos y $48.1 \text{ }^\circ\text{C}$ en policristalinos lo cual genera una pérdida de potencia del 31.24 Wp equivalente al 10.42 % y 14.54 Wp igual a 6.43 % respectivamente. En conclusión los módulos fotovoltaicos monocristalinos presentan mayores pérdidas de potencia por temperatura a comparación de los policristalinos.

Palabras claves: Cámara termográfica, Hot Spot, limpieza de módulos fotovoltaicos, modulo fotovoltaico monocristalino, policristalino, temperatura.

ABSTRACT

The use of photovoltaic solar energy is increasingly gaining strength; photovoltaic modules are used to convert solar energy into electrical energy, which is why they are widely used worldwide. In Peru, this reality is no different since it is considered one of the countries with a high solar resource of up to 5.8988 kWh/m². However, in the Puno region where high solar radiation occurs and the accumulation of dirt and dust in photovoltaic modules generates power and efficiency losses due to high temperatures that exceed the nominal operating temperature of the photovoltaic modules. Therefore, three EPSC370 Wp monocrystalline photovoltaic modules corresponding to the 3.7 kWp grid-connected photovoltaic system (SFCR) with DC/DC converters and three TP660P-270 Wp polycrystalline photovoltaic modules corresponding to the 3.24 kWp SFCR with string inverter were evaluated. The photovoltaic modules were evaluated with cleaning and without cleaning for 16 days in two shifts, morning and afternoon. The characterization of these two models of photovoltaic modules consists of determining the power losses and for this, data on electrical and environmental parameters (power, voltage, current, module temperature and irradiance) with a Profitest PV I-V curve tracer and plate temperature data were taken with the Autel EVO II drone thermal imaging camera from the EPIER photovoltaic solar energy laboratory. The result shows us that in the evaluation with cleaning the highest temperatures were recorded with the thermal imaging camera with 45.9 °C in monocrystalline modules and 48.1 °C in polycrystalline modules, which generates a power loss of 31.24 Wp equivalent to 10.42 % and 14.54 Wp equal to 6.43 % respectively. In conclusion, monocrystalline photovoltaic modules present greater power losses due to temperature compared to polycrystalline ones.

Keywords: Thermal imaging camera, Hot Spot, cleaning of photovoltaic modules, monocrystalline photovoltaic module, polycrystalline, temperature.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la energía solar fotovoltaica por mucho tiempo lleva siendo una solución óptima para la generación de electricidad en lugares que no cuentan con energía de la red, a su vez forma parte de las energías renovables que con su ingreso al mercado energético buscan reducir la dependencia del uso de combustibles fósiles que son uno de los causantes del calentamiento global produciendo cambios climáticos. Los cambios climáticos en los últimos tiempos que conlleva consigo el aumento en la temperatura global que no solo afecta a los seres humanos, sino que también a los módulos fotovoltaicos que se ven afectados por la temperatura ambiente y la irradiación incidente que con el aumento de temperatura su tensión suele reducir en $-2.3 \text{ mV /}^\circ\text{C}$ para células de silicio cristalino en caso de no contar con ficha técnica del fabricante (Perpiñan, 2013). En la Figura 1, se muestra como se ve afectado la tensión de un módulo fotovoltaico con el aumento de la temperatura.

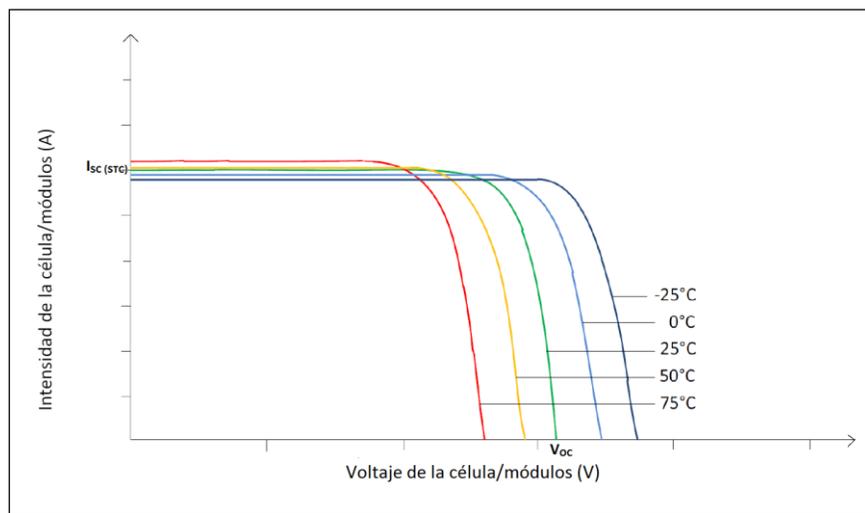


Figura 1. Efectos de la temperatura en el voltaje de un módulo fotovoltaico (Collado, 2015).

Para determinar las temperaturas de celda en módulos fotovoltaicos se pueden utilizar sensores de contacto como el sensor de temperatura PT100, estos sensores son buenos para diagnosticar la temperatura celda del módulo fotovoltaico ya que con este sensor se puede medir en tiempo real las temperaturas de las celdas (Albornoz, 2018). La cámara termográfica es una herramienta valiosa para este diagnóstico permitiendo una evaluación de la temperatura del módulo fotovoltaico, el cual nos permite realizar un estudio de cada célula para poder detectar

cuales presentan defectos (Ramos, 2022). En la Figura 2, se muestra una imagen térmica de dos módulos fotovoltaicos obtenida a través de una cámara termográfica infrarroja.

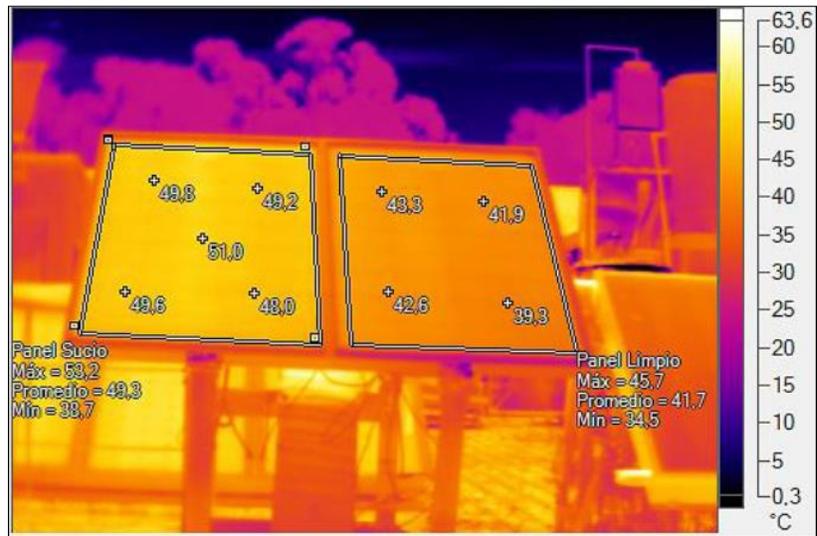


Figura 2. Vista infrarroja de dos módulos fotovoltaicos (Hurtado, 2016).

El aumento de temperatura en módulos fotovoltaicos no solo es perjudicial en la disminución de la potencia y su eficiencia, sino que también en su vida útil. La disminución de su potencia y eficiencia se debe a que el semiconductor tiene un coeficiente negativo y cuando se eleva la temperatura la resistencia del material aumenta provocando la disminución de su rendimiento eléctrico (Casavilca & Dueñas, 2019).

Bajo este contexto surge la alternativa de solución que se centra en la caracterización de los módulos fotovoltaicos monocristalino y policristalino con el propósito de determinar las pérdidas por temperatura utilizando una cámara termográfica infrarroja y la aplicación de los sensores PT100 para monitorear la temperatura del módulo fotovoltaico y a su vez verificar si existen posibles Hot spots en los SFCR instalados en la escuela profesional de ingeniería en energías renovables. También se utilizó un trazador de curvas I-V y modelos matemáticos para ver cuánto es las pérdidas de potencia por temperatura bajo condiciones climáticas de la región Puno.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En los últimos años los cambios climáticos afectan negativamente al medio ambiente debido al calentamiento global, en la actualidad se buscan fuente de energía limpia que no contaminé el medio ambiente y ayude a combatir el calentamiento global que conlleva consigo a cambios climáticos a nivel mundial. Según Organización Meteorológica Mundial (OMM) los cambios climáticos traen consigo un aumento en la temperatura de hasta 1.2 °C desde la era industrial en 1880. Es por ello que se opta por el uso de energías renovables para la generación de energía eléctrica donde destaca el uso de módulos fotovoltaicos que convierten la energía solar en eléctrica, Sin embargo, la eficiencia de los módulos son bajas debido a presencia de la irradiancia solar elevada, acumulación de polvo, lluvia, días sombreados y temperaturas elevadas del módulo que afectan a la cantidad de energía producible (Arteaga & Ucañan, 2021).

Según Quispe et al., (2018), en sus estudios realizados la región Puno el recurso solar promedio anual es de 5.8988 kWh/m². Como la irradiación solar es alta la temperatura del módulo fotovoltaico también es elevada llegando a un aproximado de 45 °C, causando la deficiencias de los módulos fotovoltaico. Para maximizar la eficiencia y la rentabilidad de estos sistemas, es esencial comprender y abordar los factores que pueden afectar la eficiencia de los módulos fotovoltaico (Constante & Chipugsi, 2023). Uno de los desafíos más significativos que enfrentan los sistemas fotovoltaicos es la pérdida de potencia y eficiencia por aumento de temperatura ya que el módulo fotovoltaico tendrá diferentes temperaturas en cada célula y esto ocasiona que en cada una de ellas tendrá una tensión distinta dependiendo a la temperatura en la que se encuentre el modulo fotovoltaico (Fernández, 2023).

Debido a esta problemática el presente proyecto de investigación busca caracterizar y determinar las perdidas por temperatura módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos a través de imágenes termográficas y las curvas I-V de los mismos. Para lo cual se eligieron como muestra 3 módulos fotovoltaicos tanto en monocristalinos y policristalinos, se tomaron datos con la cámara termografía y el trazador de curvas I-V durante 16 días (8 días sin limpieza y 8 días con limpieza) tanto

del SFCR con módulos fotovoltaicos policristalinos y monocristalinos para determinar sus temperaturas, para obtener el comportamiento de la temperatura de celda durante todo los días de los módulos fotovoltaicos evaluados también se instalaron sensores PT100 con sistema de adquisición a través de un microcontrolador Arduino.

1.1 Formulación del problema

En este contexto, se plantea las siguientes interrogantes de investigación:

1.1.1 Problema general

¿Será posible caracterizar módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos para determinar pérdidas por temperatura mediante cámara termográfica IR en el campus Ayabacas?

1.1.2 Problemas específicos

- ¿Será posible caracterizar mediante la medición de temperatura de celda con la cámara termográfica módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos?
- ¿Será posible detectar Hot Spot en módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos mediante el análisis de imágenes termográficas?
- ¿De qué manera influye la temperatura de celda en la determinación de las pérdidas de potencia en módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos mediante la cámara termográfica?

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

Determinar pérdidas por temperatura en módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos mediante cámara termográfica IR en el campus Ayabacas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos mediante la medición de temperatura de placa con cámara termográfica.

- Detectar posibles Hot Spots en módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos mediante imágenes termográficas.
- Determinar las pérdidas de potencia por incremento de temperatura de celda en módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos.

1.3 Justificación de la investigación

1.3.1 Justificación técnica

Este proyecto está justificado por el uso de tecnologías más eficiente para el análisis de temperatura de operación o detección de posibles Hot spots de los módulos fotovoltaicos de forma más rápida a su vez poder caracterizar a los diferentes tipos de módulos según el comportamiento de su temperatura a través cámara termográfica infrarroja IR y para complementar un análisis más detallado se utiliza un trazador de curvas el cual nos permite verificar sus parámetros eléctricos de los módulos fotovoltaicos.

1.3.2 Justificación social

El presente proyecto de tesis, despertará el interés de los estudiantes carrera profesional de ingeniería en energías renovables en cuanto a la investigación en sistemas solares para llevar más estudios en el tema y realizar más proyectos sobre perdidas por temperatura en los módulos fotovoltaicos. A su vez contribuirá a la elección de tipos de módulos fotovoltaicos monocristalinos o policristalinos más adecuados para futuros proyectos de energía solar fotovoltaica en la región Puno.

1.3.3 Justificación económica

La instalación de sistemas fotovoltaicos requiere una gran inversión y estos se ven influenciados negativamente por la suciedad, lluvia, temperatura y otros factores por lo cual pueden llegar a deteriorarse con mayor rapidez, es por ello que para una mejor conservación de los módulos fotovoltaicos deben realizarse estudios acerca de estos factores y determinar cuáles son las pérdidas de generación de energía que sería igual a pérdidas económicas.

1.3.4 Justificación ambiental

El uso de las energías renovables o la energía solar fotovoltaica para la generación eléctrica sustituye a los combustibles fósiles y es una manera de combatir al calentamiento global, por lo cual las investigaciones acerca de módulos fotovoltaicos van tomando más fuerza y la detección de las anomalías en ellos a través de una cámara termográfica contribuyen a su pronta solución o sustitución del mismo para que el sistema fotovoltaico siga funcionando en óptimas condiciones.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Antecedentes del problema de investigación

Antecedentes nivel internacional tenemos a Hurtado (2016), quien tiene como objetivo estudiar y cuantificar el fenómeno de ensuciamiento en módulos fotovoltaicos, utilizando termografía infrarroja como técnica de inspección. Se utilizó una cámara termográfica Ti-400 de Fluke y el software para procesamiento de imágenes infrarrojas SmartView 3.5 de Fluke. Se empleó 2 módulos fotovoltaicos policristalinos de 100 W y 3 módulos fotovoltaicos monocristalinos de 100 W. Cada ensayo se consideró el registro de las variables elementales a cada sistema (Corriente, Voltaje y Potencia), irradiancia y temperatura de los módulos, los módulos policristalinos fueron expuesto a 45 días y los módulos monocristalinos a 51 días. Los resultados el sistema de policristalino frente a las condiciones de operación del panel sucio, llegando a una potencia máxima de 88 W con una eficiencia de 11.34 %, mientras que, para el panel limpio, la potencia máxima obtenida fue de 81 W con una eficiencia de 10.86 % mientras que los módulos monocristalinos, presentaron un mejor rendimiento asociado a la configuración limpia alcanzando una eficiencia máxima de 8.4 %, mientras que para la configuración Sucia, la eficiencia máxima sólo alcanzó el 8 %. Los resultados termográfica tomadas simultáneamente sobre ambos módulos, mostraban distintas temperaturas para el módulo sucio y modulo limpio, bajo las mismas condiciones de irradiancia. Otra investigación realizada en España por Alvarez (2018), quien realiza una inspección de una planta fotovoltaica de 100 kW mediante termografía IR que le permite caracterizar el comportamiento térmico de los mismos. Se utilizó una cámara termográfica Workswell WIRIS alojada en dron, dicha inspección de realizo a una altura máxima de 15 metros desde los módulos y para su análisis de resultados se utilizó el software CorePlayer de Workswell. Como resultados se obtuvo varias anomalías con temperaturas muy elevadas llegando incluso hasta los 125.5 °C debido al sombreado parcial por vegetación y postes, en módulos con cubierta rota llegaron hasta los 97.9 °C, incluso se llegó a encontrar 3 cadenas cuyos módulos están en circuito abierto, es decir no están contribuyendo a la producción energética de la planta fotovoltaica.

A nivel nacional se tiene una investigación con el uso de la cámara termográfica para evaluar módulos fotovoltaicos en donde podemos mencionar a Nuñez (2022), quien tiene como objetivo realizar un análisis termográfico de los paneles fotovoltaicos mediante procesamiento digital de imágenes para el mantenimiento preventivo-predictivo para la futura planta solar fotovoltaica Indiana. se utilizó cámara termográfica Flir C5 para evaluar 4 módulos fotovoltaicos monocristalinos de 5 W creando puntos calientes forzados, simulando sombras colocando papel en trozos pequeños. Para análisis de datos lo hizo con el programa de Matlab donde realizo una programación para detectar puntos calientes, lo resultado fueron que la irradiancia debe de ser mayor o igual a 350 W/m^2 para que los puntos calientes puedan ser detectados con la cámara termográfica en la futura Planta Solar Fotovoltaica Indiana este nivel de irradiancia se presenta entre las 9:00 am hasta las 3:00 pm.

A nivel local no se encontraron antecedentes acerca del uso de una cámara termográfica infrarroja IR para la inspección de módulos fotovoltaicos, es por ello que el presente proyecto de investigación es de vital importancia ya que dar mayor información acerca de las anomalías y comportamiento de la temperatura según los tipos de módulos fotovoltaicos utilizando una cámara termográfica infrarroja IR, promoviendo el uso de este tipo de tecnologías en la inspección de plantas solares fotovoltaicas ya que es de manera rápida e instantánea siendo muy beneficioso para mantenimientos preventivos y detección de posibles anomalías en módulos fotovoltaicos. A su vez conocer qué tipo de modulo fotovoltaico es más favorable en la región Puno a través de su análisis térmico y potencia de salida de los módulos fotovoltaicos ayudaran a su mejor elección de los tipos de módulos para futuros proyectos que involucren sistemas fotovoltaicos.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Radiación solar

La radiación se describe desde diversas perspectivas como la energía electromagnética liberada por el sol. La magnitud que cuantifica la radiación solar que alcanza la Tierra es la irradiancia, que mide la energía por unidad de tiempo y área. Entonces, las unidades de medición de la radiación solar son en W/m^2 . Los tipos de radiación solar son los siguientes:

- **Radiación directa:** Es cuando la irradiación solar que alcanza la superficie de manera directa y sin ser alterada por interferencias o disturbios.
- **Radiación difusa:** Se trata de la energía solar dispersada o desviada debido a obstáculos en su trayectoria
- **Radiación albedo o reflejada:** Se refiere al fenómeno en el cual la luz solar incide en una superficie y parte de ella rebota o regresa, cambiando su dirección con respecto a la normal a la superficie.

En la Figura 3, se muestra los tipos de radiaciones solares que son aprovechadas por un módulo fotovoltaico.

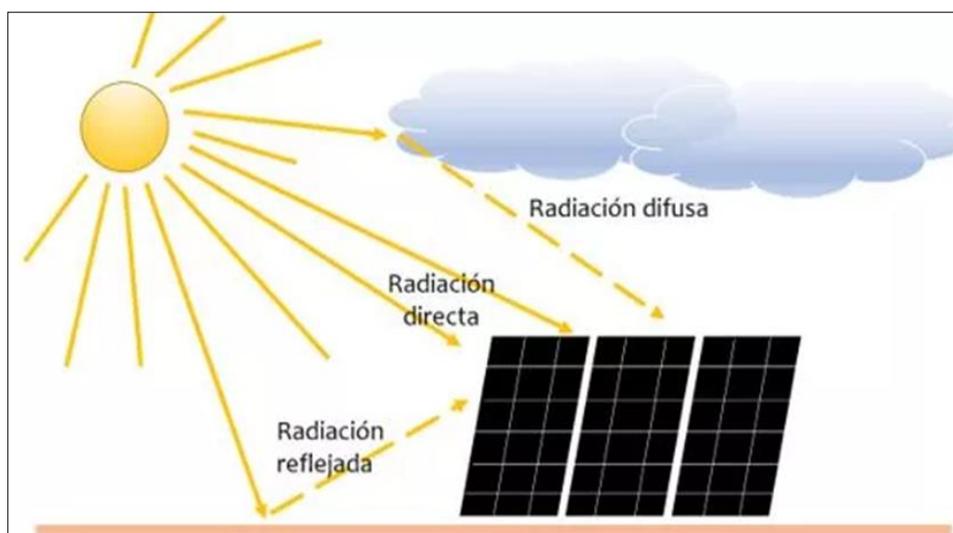


Figura 3. Tipos de radiaciones solares (Alonso, 2006).

2.2.2 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es la energía obtenida a través de la conversión directa de la luz o radiación solar en electricidad. Utiliza células fotovoltaicas que son dispositivos fabricados con material semiconductor. Las principales tecnologías aplicadas en la producción son módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos por ser consideradas tecnologías sólidas y confiables (Tavares & Galdino, 2014).

2.2.3 Módulos fotovoltaicos

Es un dispositivo que convierte directamente la luz solar en corriente para producir potencia eléctrica. Estos módulos fotovoltaicos su material es principalmente el silicio, ya sea monocristalino o policristalino.

2.2.4 Módulo fotovoltaico monocristalino

En los módulos fotovoltaicos monocristalinos, las celdas están compuestas por múltiples regiones de silicio cristalino que están unidas mediante enlaces covalentes y separadas por los límites de grano. Estas celdas se fabrican en una configuración cuadrada con bordes ligeramente ovalados. Los módulos fotovoltaicos monocristalinos suelen funcionar mejor que los policristalinos a condiciones de baja luz solar, aunque su rendimiento es menor a los policristalinos en condiciones de altas temperaturas de operación (Ossa, 2017). En la Figura 4, se muestra un módulo fotovoltaico monocristalino que tiene un color oscuro y sus celdas tienen el borde ovalado.

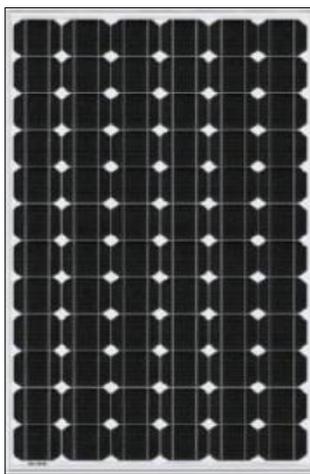


Figura 4. Módulo fotovoltaico monocristalino, adaptado de (Serrano, 2017).

2.2.5 Módulo fotovoltaico policristalino

Los módulos fotovoltaicos policristalinos se distinguen por un proceso de fabricación más sencillo, lo que contribuye a un costo considerablemente inferior en comparación con los monocristalinos. Los módulos fotovoltaicos policristalinos presentan una capacidad menor para soportar altas temperaturas que los monocristalinos, debido a esto que cuando estos módulos solares se encuentran expuestos a altas temperaturas el módulo policristalino no cuenta con el mismo rendimiento que uno monocristalino. Incluso el calor influye de manera significativa acortando la vida útil de los módulos fotovoltaicos policristalinos (Pincay, 2017). En la Figura 5, se muestra un módulo fotovoltaico policristalino que se le reconoce por el característico color azulado y con las celdas cuadradas.

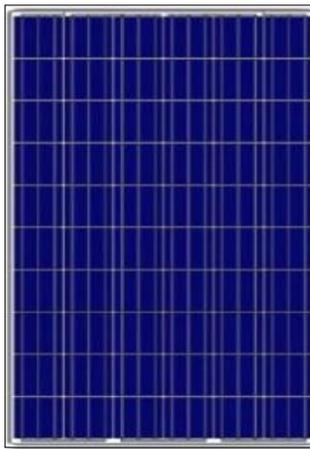


Figura 5. Módulos fotovoltaicos policristalino, adaptado de (Serrano, 2017).

2.2.6 Parámetros eléctricos de los módulos fotovoltaicos

Los parámetros eléctricos de los módulos fotovoltaicos son la potencia máxima, corriente de máxima potencia, voltaje de máxima potencia, corriente en cortocircuito y el voltaje en circuito abierto.

- **Potencia máxima (P_{max}):** se obtiene a partir de la multiplicación de corriente de máxima potencia y voltaje de máxima potencia.
- **Corriente de máxima potencia (I_{mpp}):** Es cuando la corriente trabaja en el punto de máxima potencia.

- **Voltaje de máxima potencia (V_{mpp}):** Es cuando el voltaje trabaja en el punto de máxima potencia.
- **Corriente en cortocircuito (I_{sc}):** Se obtiene al cortocircuitar los terminales positivo y negativo de un módulo fotovoltaico lo cual hace circular la corriente y es de máxima potencia. En este caso el voltaje es igual a cero.
- **Voltaje en circuito abierto (V_{oc}):** se obtiene al dejar los terminales del módulo fotovoltaico en circuito abierto que al recibir la radiación el voltaje es de máxima potencia. Este se realiza en corriente igual a cero.

Para adquirir los parámetros eléctricos de un módulo fotovoltaico de manera rápida, sencilla y mayor precisión se utilizan trazadores de curvas. Los analizadores o trazadores de curvas I-V, son dispositivos con un diseño compacto y un tiempo de adquisición de datos de manera instantánea en rangos de milisegundos, que utilizan diferentes técnicas para obtener la curva I-V de un solo modulo fotovoltaico o incluso de un string fotovoltaico siempre y cuando este dentro de los rangos de medición del trazador de curvas I-V (Sanchez, 2021). En la Figura 6, se muestra una curva característica que nos proporciona el trazador de curva I-V.

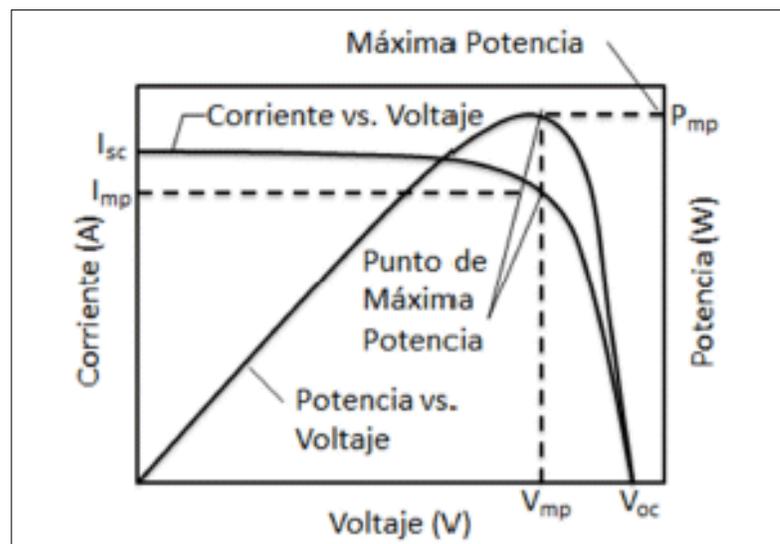


Figura 6. Curva característica I-V y P-V de un módulo fotovoltaico (Vargas & Abrahamse, 2014).

2.2.7 Pérdidas de potencia en módulos fotovoltaicos por temperatura

Un factor muy importante en la potencia que entrega el módulo fotovoltaico es la irradiación que incide sobre la superficie del módulo, pero existe otro factor que influye en ello de forma negativa en la pérdida de potencia y esto es debido a la temperatura de celda. Diversos factores inciden en la potencia de salida de los módulos fotovoltaicos, tales como la parcial obstrucción de la luz solar, acumulación de suciedad y presencia de puntos calientes.

2.2.8 Sombreado o shading

La influencia de una sombra parcial en un panel solar está determinada por la ubicación específica de la zona sombreada y la conexión en serie y en paralelo de las celdas que integran el módulo fotovoltaico. La presencia de sombreado provoca una alteración en el comportamiento de la curva característica corriente-tensión (I-V) y en la potencia generada por el módulo. Además, el sombreado puede ocasionar la formación de puntos calientes, incrementando la temperatura del módulo fotovoltaico. (Amesquita et al., 2020). En la Figura 7, se muestra cómo influye los sombreamientos parciales en la temperatura de los módulos fotovoltaicos.



Figura 7. Sombreamiento en un módulo fotovoltaico (Alvarez, 2018).

2.2.9 Suciedad o soiling

La acumulación de suciedad es un fenómeno común en todas las plantas o instalaciones fotovoltaicas. Las pérdidas causadas por la suciedad varían, oscilando entre un 5 % de pérdidas de producción anual en climas con lluvias moderadas y templados, hasta un 40 % anual en climas secos, áridos o desérticos. La limpieza de los módulos fotovoltaicos es importante caso contrario a no realizar la limpieza las temperaturas de operación del módulo se elevan incluso pueden llegar a tener puntos calientes (Castro, 2019). En la Figura 8, se muestra la acumulación de suciedad en un módulo fotovoltaico sin limpieza y otro con limpieza.



Figura 8. Acumulación de suciedad en un módulo fotovoltaico (CambioEnergetico, 2021)

2.2.10 Puntos calientes o Hot spots

Los puntos calientes son áreas específicas en el módulo fotovoltaico que presentan una resistencia notablemente elevada, lo que provoca un aumento significativo de la temperatura, pudiendo llegar hasta los 200 °C. Esto suele producirse debido imperfecciones del módulo tales como son golpes o defectos internos, acumulación de suciedad o residuos en la superficie del módulo o sombreamientos, el daño suele ser irreparable y se reemplazan los módulos afectados. La identificación se lleva a cabo mediante cámaras termográficas (Amesquita et al., 2020). En la Figura 9, se muestra la presencia de Hot spots en módulos fotovoltaicos captados por una cámara termográfica.

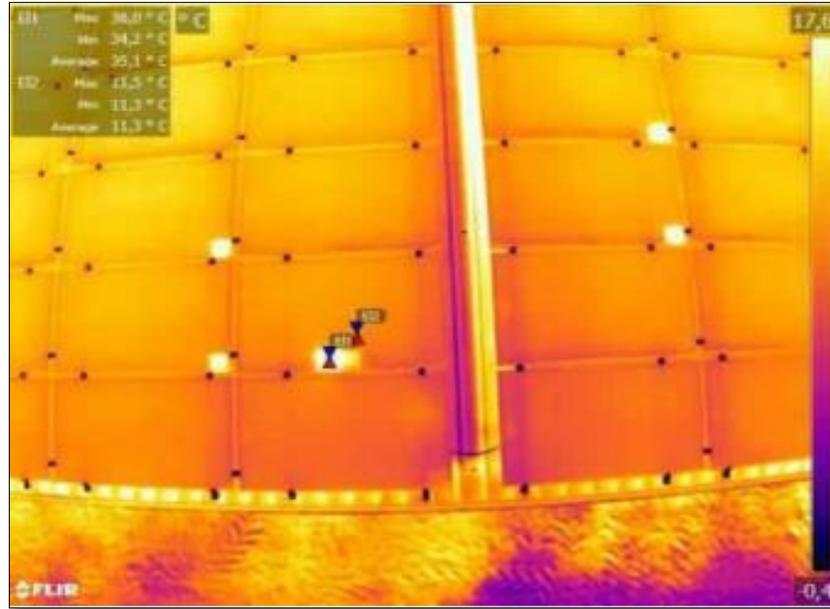


Figura 9. Módulos fotovoltaicos con Hot spots (Morales, 2020).

2.2.11 Termografía infrarroja

La termografía nos permite dar información térmica a partir de equipos sin contacto directo los cuales son capaces de captar radiación infrarroja emitida por un cuerpo. Permite realizar la medida de temperatura de cualquier objeto, nos da un tiempo rápido de respuesta también proporciona una precisión elevada y una alta repetitividad con una alta fiabilidad en todas y cada una de sus mediciones (Hernández, 2020).

2.2.12 Cámara termográfica

Las cámaras termográficas son tecnologías que permiten detectar puntos calientes en los módulos fotovoltaicos a través de imágenes termográficas IR los cuales si no son tratadas pueden convertirse en desperfectos serios. Para su utilización de la cámara termográfica el parque o instalación solar puede funcionar de manera normal, es decir, no es necesario apagar el sistema. Para su clasificación y evaluación de las anomalías detectadas se requieren un excelente entendimiento de la energía solar, conocimientos del sistema inspeccionado y mediciones eléctricas adicionales de ser necesario para dar solución a los problemas de puntos calientes (Pinto, 2019).

2.2.13 Norma IEC TS 62446-3

El uso de la termografía IR para mantenimiento en los sistemas FV se utiliza desde hace varios años. La especificación técnica IEC TS 62446-3 (2017), define la inspección termográfica (infrarroja) exterior de módulos y plantas fotovoltaicas en funcionamiento. La inspección puede incluir cables, contactos, fusibles, interruptores, inversores y baterías. Esta inspección apoya el mantenimiento preventivo contra incendios o puntos calientes en módulos fotovoltaicos.

Actualmente se utilizan dos niveles diferentes de inspección:

- a) **Inspección termográfica simplificada:** Aplicable durante la puesta en marcha de sistemas con reducidos requerimientos respecto a la cualificación de personal. Consiste en una inspección limitada para verificar que funcionan los módulos FV y los componentes del sistema.
- b) **Inspección termográfica detallada y análisis:** Esto puede incluir patrones térmicos que difieren de los ejemplos proporcionados, y por lo tanto requiere una comprensión más profunda de las anomalías térmicas. Se pueden hacer mediciones de temperatura absolutas. Se requiere para esta inspección un experto en plantas FV y un experto en termografía.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del proyecto de investigación

Este proyecto de investigación se realizará en el instituto de investigación de energías renovables de la Universidad Nacional de Juliaca el cual se encuentra ubicado en el centro poblado Santa María de Ayabacas a una latitud de -15.4094 , longitud de -70.0906 y una altitud de 3832 m.s.n.m. En la Figura 10, se muestra la ubicación en donde se realizará el proyecto de investigación de la caracterización de módulos fotovoltaicos para determinar perdidas por temperatura mediante una cámara termográfica infrarroja.

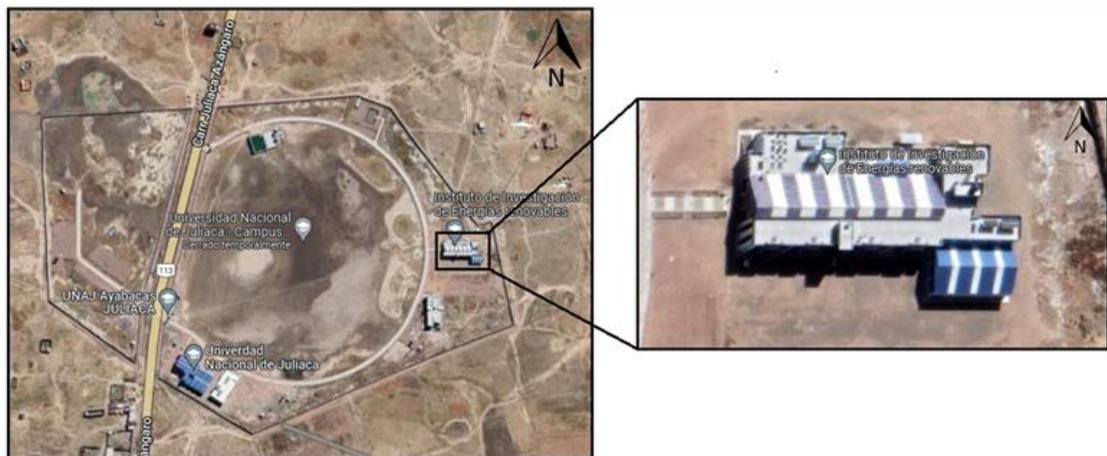


Figura 10. Instituto de energías renovables y eficiencia energética – UNAJ -Ayabacas (Google Maps).

3.2 Formulación de hipótesis

3.2.1 Hipótesis general

Mediante la cámara termográfica IR se caracteriza y determina perdidas por temperatura en módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos en el campus Ayabacas.

3.2.2 Hipótesis específicas

- La medición de temperatura de celda con cámara termográfica caracteriza los módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos.
- El análisis de imágenes termográficas detecta los Hot spots en módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos.

- Las pérdidas de potencia en módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos se dan por variación de la temperatura de celda detectadas por la cámara termográfica.

3.3 Materiales y equipos

3.3.1 Módulos fotovoltaicos policristalinos

Los módulos fotovoltaicos policristalinos utilizados son de la marca Talesun de 270 W los cuales forman parte de un SFCR con inversor string de 3.24 kWp que consta de 12 módulos fotovoltaicos policristalinos de los cuales se evaluaron 3 que están instalados en las Instalaciones de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables – sede Ayabacas como se muestra en la Figura 11. En la Tabla 1, me muestra las especificaciones técnicas de los módulos fotovoltaicos policristalinos utilizados en el presente proyecto de investigación.

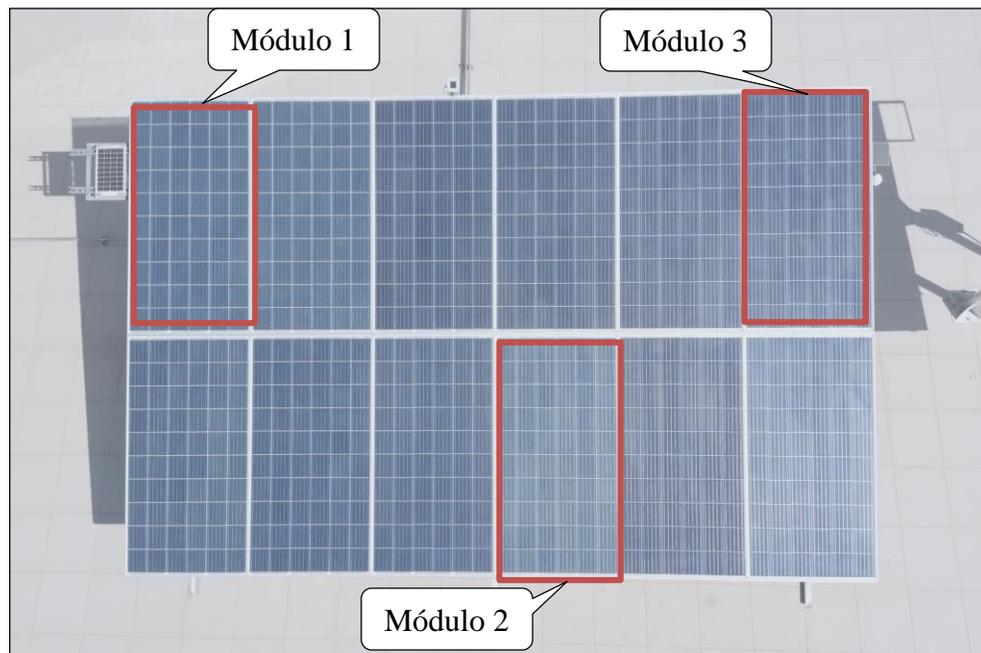


Figura 11. SFCR con inversor string utilizando módulos fotovoltaicos policristalinos.

Tabla 1*Especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico policristalino TP660P-270.*

| Módulo TP660P-270 | |
|---|---------------|
| Parámetros eléctricos (STC) | |
| Potencia máxima (P_{max}) | 270 W |
| Corriente de máxima potencia (I_{mpp}) | 8.63 A |
| Tensión de máxima potencia (V_{mpp}) | 31.3 V |
| Corriente de corto circuitos (I_{sc}) | 9.09 A |
| Tensión de circuito abierto (V_{oc}) | 38.5 V |
| Parámetros térmicos | |
| Temperatura nominal de Operación de la Célula (TNOC) | 45 ± 2 °C |
| Coefficiente de Temperatura de I_{sc} | +0.06 %/°C |
| Coefficiente de Temperatura de V_{oc} | -0.31 %/°C |
| Coefficiente de Temperatura de P_{max} | -0.40 %/°C |
| STC :Irradiancia 1000 W/m ² , Temperatura de celda 25 °C, Masa de aire a 1.5 | |

3.3.2 Módulos fotovoltaicos monocristalinos

Los módulos fotovoltaicos monocristalinos utilizados son de la marca Era solar de 370 W los cuales forman parte de un SFCR con convertidores CC/CC de 3.7 kWp que consta de 10 módulos fotovoltaicos monocristalinos de los cuales se evaluaron 3 que están instalados en las instalaciones de la escuela profesional de ingeniería en energías renovables – sede Ayabacas como se muestra en la Figura 12. En la Tabla 2, me muestra las especificaciones técnicas de los módulos fotovoltaicos monocristalinos utilizados en el presente proyecto de investigación.

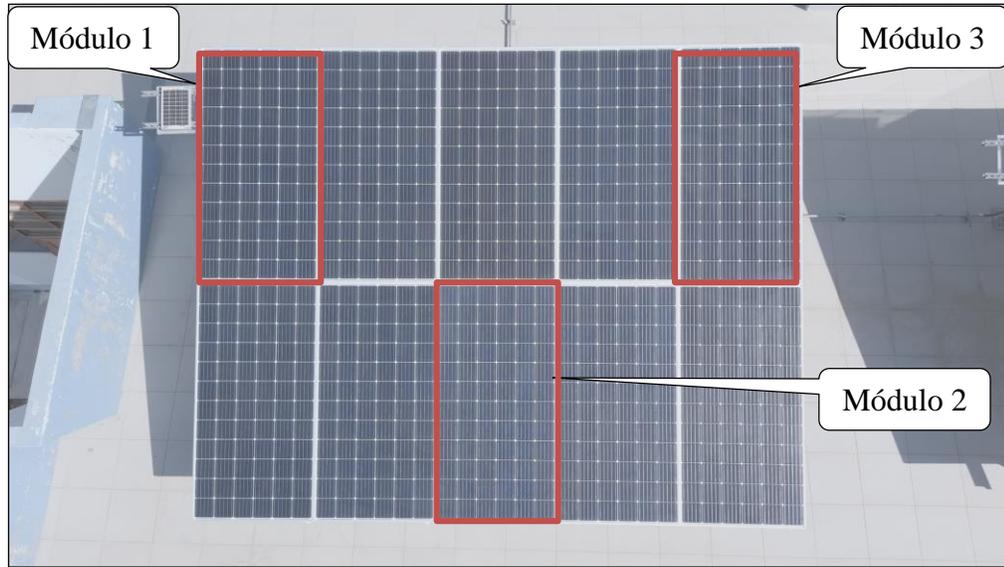


Figura 12. SFCR con convertidores CC/CC utilizando módulos fotovoltaicos monocristalinos.

Tabla 2

Especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico monocristalino EPSC370.

| Módulo EPSC370 | |
|--|---------------|
| Parámetros eléctricos (STC) | |
| Potencia máxima (P_{max}) | 370 W |
| Corriente de máxima potencia (I_{mpp}) | 9.23 A |
| Tensión de máxima potencia (V_{mpp}) | 40.1 V |
| Corriente de corto circuitos (I_{sc}) | 9.95 A |
| Tensión de circuito abierto (V_{oc}) | 48.3 V |
| Parámetros térmicos | |
| Temperatura nominal de Operación de la Célula (TNOC) | 45 °C |
| Coefficiente de Temperatura de I_{sc} | +0.02973 %/ K |
| Coefficiente de Temperatura de V_{oc} | -0.38038 %/ K |
| Coefficiente de Temperatura de P_{max} | -0.57402 %/ K |
| STC :Irradiancia 1000 W/m ² , Temperatura de celda 25°C, Masa de aire a 1.5 | |

3.3.3 Dron con cámara termográfica

La cámara termográfica permite inspeccionar los módulos fotovoltaicos detectando aquellas celdas fotovoltaicas defectuosos de manera más clara, además permiten observar las diferencias de temperaturas y estas diferencias pueden ser indicativas de problemas de funcionamiento. El dron nos permite llevar la cámara térmica a ciertas alturas y enfocar de manera perpendicular al módulo fotovoltaico para tomar imágenes térmicas que nos muestren datos más reales y con mayor precisión para su posterior análisis de las imágenes térmicas a través de su software. En la Figura 13, se muestra el dron con cámara térmica de la marca Autel Evo II utilizada en el presente proyecto de investigación el cual es controlado mediante la aplicación Autel Explorer instalado en el celular con conexión a su control remoto.



Figura 13. Dron con cámara termográfica.

3.3.4 Trazador de curvas I-V

Para adquirir datos de los parámetros eléctricos de los módulos fotovoltaicos se utilizó el trazador de curva de marca Gossen metrawatt lo cual permite trazar la curva I-V y obtener datos de la potencia máxima, voltaje de máxima potencia, corriente de máxima potencia, voltaje de circuito abierto, corriente de corto circuito, etc. En la Figura 14, se muestra el trazador de curvas I-V utilizado, tiene componentes de los cuales son un sensor de temperatura PT100 para medir temperatura del módulo, un sensor de irradiancia y cables de conexión. Además, nos permite procesar los datos con el software PV- Analizador.



Figura 14. Trazador de curva I-V Gossen Metrawatt.

3.3.5 Microcontrolador Arduino Uno

El Arduino es un microcontrolador que se conecta a una PC o dispositivo portátil mediante un cable USB permitiendo una iteración en donde el usuario puede escribir códigos de programación el cual se sube al microcontrolador que se encarga de ejecutar e interactuar con las entradas y salidas como son los sensores de temperatura PT100. Para este proyecto de investigación se utilizaron 2 Arduinos Uno R3 para adquisición de datos de temperatura, de los cuales son un Arduino para cada SFCR que se está evaluando su temperatura, en la Figura 15 se muestra la imagen del Arduino Uno R3 utilizado.

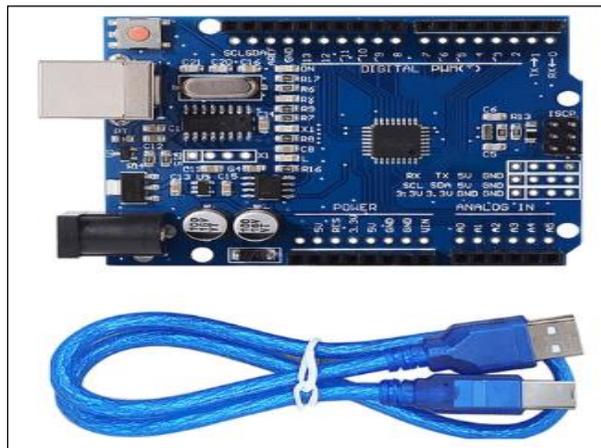


Figura 15. Microcontrolador Arduino uno.

3.3.6 Lector de tarjeta SD para Arduino

Se utilizaron 2 lectoras de tarjeta SD para Arduino que nos permite insertar una tarjeta SD para cada lector el cual nos permite guardar y almacenar los datos adquiridos de las temperaturas de los módulos fotovoltaicos. En la Figura 16, se muestra el lector de tarjeta SD utilizado para almacenar datos de temperatura.

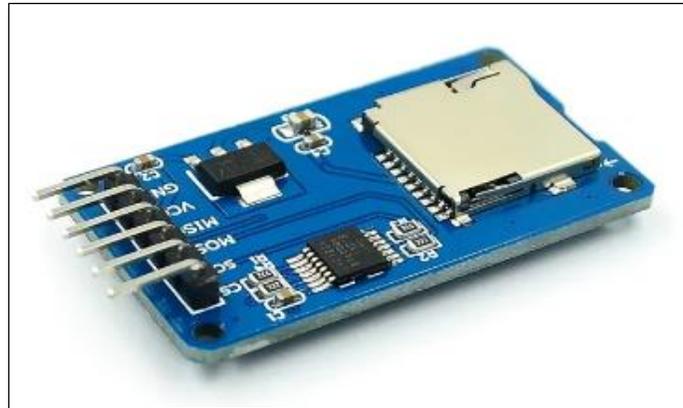


Figura 16. Lector de tarjeta SD para Arduino.

3.3.7 Módulo RTC DS1307 para Arduino

Se utilizaron 2 módulos RTC DS1307 que son relojes de precisión para Arduino con sus respectivas pilas cada uno, el cual nos permite guardar y almacenar datos de la hora y fecha en la tarjeta SD de cada medida tomada de la temperatura de los módulos fotovoltaicos. En la Figura 17, se muestra el módulo RTC DS1307 para Arduino utilizado.

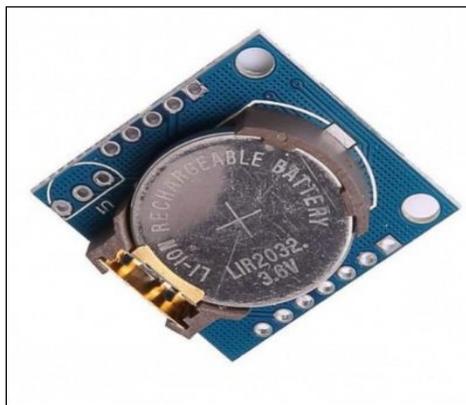


Figura 17. Módulo RTC DS1307 para Arduino.

3.3.8 Fuente de 24 V en corriente continua

La fuente de alimentación de 24 V nos permite convertir la energía de la red en corriente alterna de 220 V a 24 V en corriente continua, el cual requerimos para alimentar a los transmisores de temperatura utilizados para medir datos de la temperatura de los módulos fotovoltaicos. En la Figura 18, se muestra la fuente de alimentación de 24 V y 2.5 A, utilizada en este proyecto de investigación para el cual se utilizaron dos unidades.



Figura 18. Fuente de 24 V en corriente continua.

3.3.9 Transmisor de temperatura

El transmisor de temperatura es un dispositivo que trabaja juntamente con el sensor de temperatura PT100, su función es convertir señales que recibe del sensor PT100 en una señal analógica de 4 a 20 mA para que pueda ser interpretado por el microcontrolador, asegurando que la transmisión de la medida del sensor de temperatura sea la correcta. En la Figura 19, se muestra el modelo de transmisor de temperatura utilizado con un voltaje de entrada de 24 V en corriente continua, una salida de señal de 4 a 20 mA y un rango de 0 °C a 200 °C. para este proyecto de investigación se utilizaron un total de 7 transmisores de temperatura.



Figura 19. Transmisor de temperatura.

3.3.10 Sensor de temperatura PT100

El sensor de temperatura es un instrumento que sirve para medir la temperatura de los módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos, es un sensor de tipo RTD que tiene tres cables y el principio de medición es la variación de la resistencia de un conductor en función de su temperatura. Para este proyecto de utilizaron 7 sensores de temperatura PT100 de los cuales 6 son destinados a medir las temperaturas de los módulos fotovoltaicos y uno para medir temperatura ambiente. El modelo del sensor de temperatura PT100 utilizado se muestra en la Figura 20.

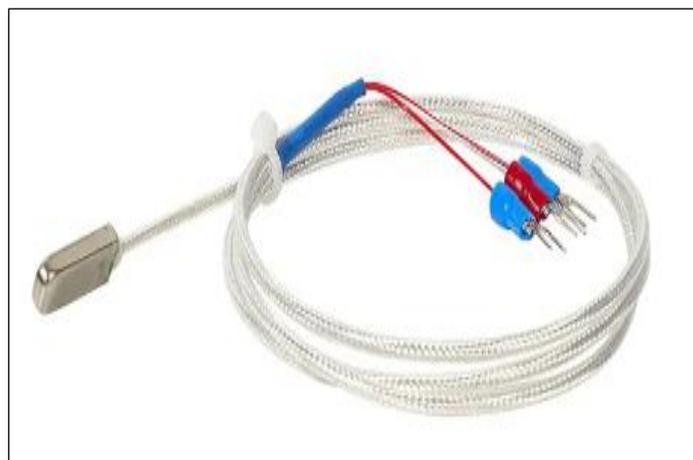


Figura 20. Sensor de temperatura TP100.

3.3.11 Otros materiales

También se utilizaron 2 protoboard y cables para realizar conexiones, también dos fuentes de 5 V CC para alimentar al Arduino para adquisición de datos de forma independiente.

3.4 Software

En esta investigación los softwares utilizados para la programación, adquisición de datos y tratamiento de datos, los cuales son los siguientes:

- Arduino IDE
- IR-PCtool
- PV-Analizador
- Excel

3.5 Metodología

3.5.1 Sistema de adquisición de datos de temperatura con Arduino

Para adquirir datos de la temperatura de los módulos fotovoltaicos se utilizaron sensores de temperatura PT100 que funcionan con una fuente de alimentación de 24 V en CC el cual pasa por un transmisor de temperatura que se encarga de convertir señales que recibe del sensor PT100 en una señal analógica de 4 a 20 mA para que pueda ser interpretado por el microcontrolador Arduino Uno. Para poder almacenar los datos registrados por el Arduino Uno se utilizó una micro SD con su lector de tarjeta, también se utilizó un módulo RTC DS1307 para registrar hora y fecha en cada medición de temperaturas. En la Figura 21, se muestra el conexionado del sistema de adquisición de temperatura con Arduino Uno.

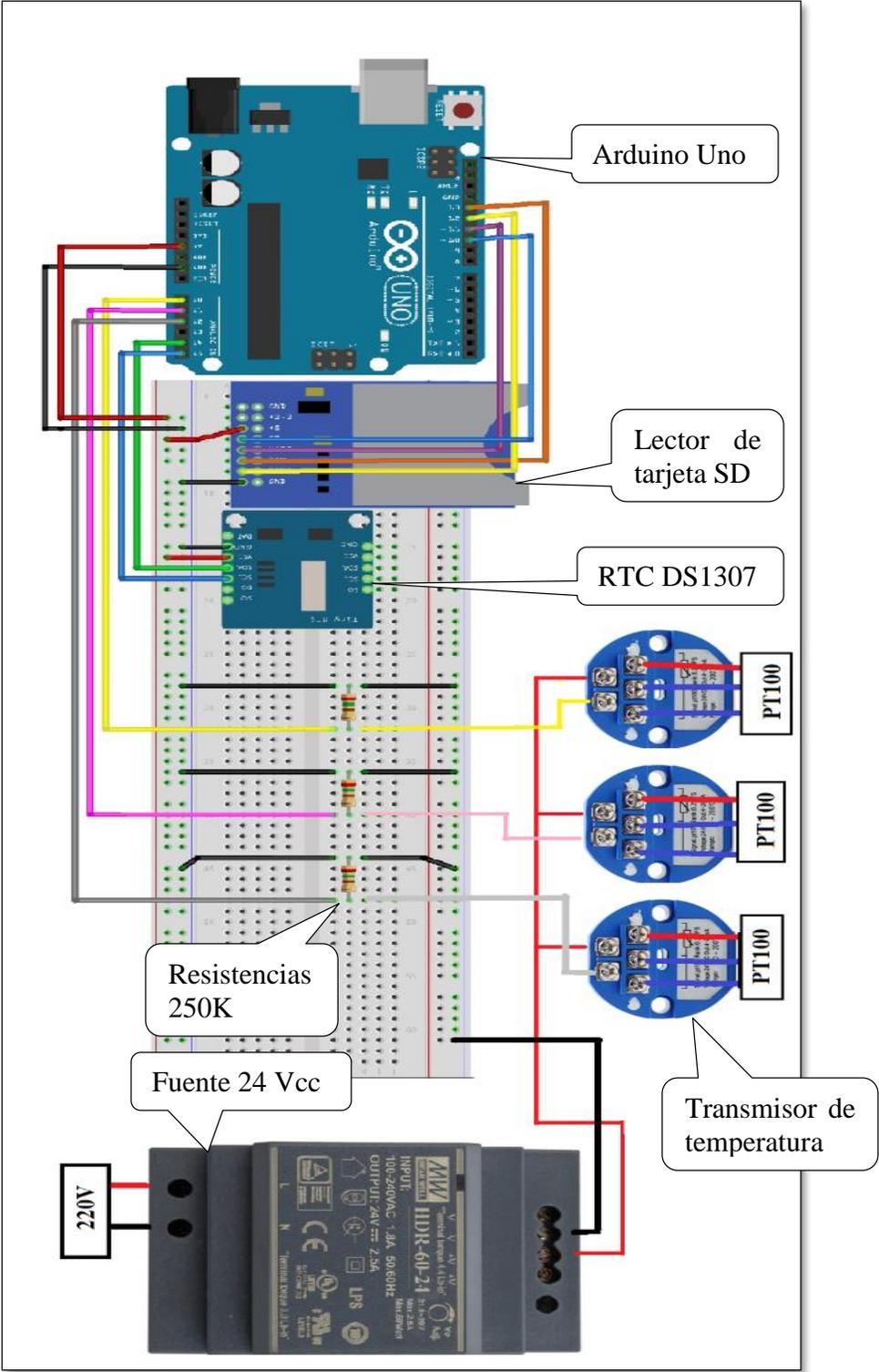
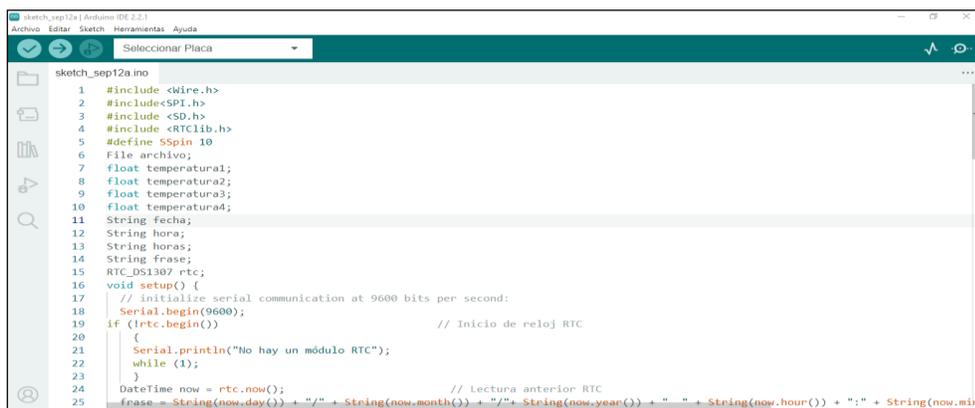


Figura 21. Conexión del sistema de adquisición de datos de temperatura con Arduino.

3.5.2 Programación y pruebas de funcionamiento del sistema de adquisición de datos de temperatura

Se utilizó un protoboard con conexiones de cable jumper macho-macho y todos los materiales ya mencionados. Este procedimiento se realizó como pruebas de funcionamiento correcto de las programaciones realizadas en su propio software de Arduino. En la Figura 22, se muestra la plataforma de programación mediante el lenguaje C++ en el software Arduino.



```
sketch_sep12a.ino
1 #include <Wire.h>
2 #include <SPI.h>
3 #include <SD.h>
4 #include <RTClib.h>
5 #define SSpin 10
6 File archivo;
7 float temperatura1;
8 float temperatura2;
9 float temperatura3;
10 float temperatura4;
11 String fecha;
12 String hora;
13 String horas;
14 String frase;
15 RTC_DS1307 rtc;
16 void setup() {
17 // initialize serial communication at 9600 bits per second:
18 Serial.begin(9600);
19 if (rtc.begin()) // Inicio de reloj RTC
20 {
21 Serial.println("No hay un módulo RTC");
22 while (1);
23 }
24 DateTime now = rtc.now(); // Lectura anterior RTC
25 frase = String(now.day()) + "/" + String(now.month()) + "/" + String(now.year()) + " " + String(now.hour()) + ":" + String(now.min())
```

Figura 22. Programación en el software Arduino.

En la Figura 23, se muestra las pruebas de funcionamiento correcto de la programación realizada en Arduino, al lado izquierdo el trazador de curvas I-V que cuenta con un sensor de temperatura PT100 para corroborar la temperatura que nos brinda los sensores de temperatura PT100 que utiliza el Arduino Uno.



Figura 23. Pruebas de funcionamiento de la programación en Arduino.

3.5.3 Armado del sistema de adquisición de datos de temperatura para exteriores

Para que el sistema de adquisición de temperatura con Arduino sea instalado en el exterior donde se encuentran los SFCR de 3.7 kWp con tecnologías monocristalinas y SFCR de 3.24 kWp policristalinas, el sistema se instaló dentro de un tablero de PVC para que no haya conducción de electricidad que pueda alterar los resultados de los sensores de temperatura como se ve en la Figura 24.



Figura 24. Tablero de adquisición de datos de temperatura.

3.5.4 Instalación del sistema de adquisición de datos de temperatura

Ambos sistemas de adquisición de datos de temperatura se instalaron debajo de cada SFCR de 3.7 kWp con tecnologías monocristalinas y SFCR de 3.24 kWp con tecnología policristalinas como se ve en la Figura 25.

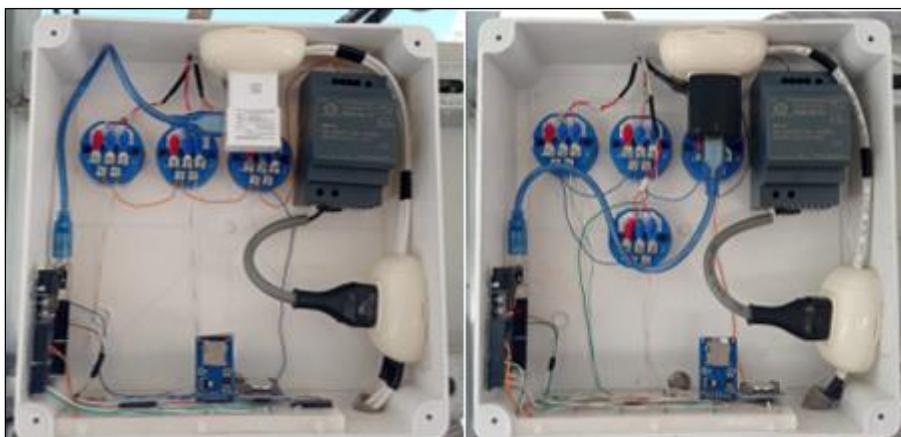


Figura 25. Sistema de adquisición de datos de temperatura con Arduino.

En la Figura 26, del lado izquierdo se muestra el SFCR con módulos monocristalinos donde se instalaron sensores de temperatura PT100 en el centro de los 3 módulos evaluados y del lado derecho el SFCR con módulos policristalinos donde también se instalaron sensores de temperatura PT100 en el centro de los 3 módulos seleccionados que se encuentran dentro de un recuadro rojo. En la Figura 27, se muestra la instalación de un sensor de temperatura PT100 y de la misma forma fueron instalados los demás sensores en una celda que este en el centro del módulo con una cinta adhesiva de cobre.

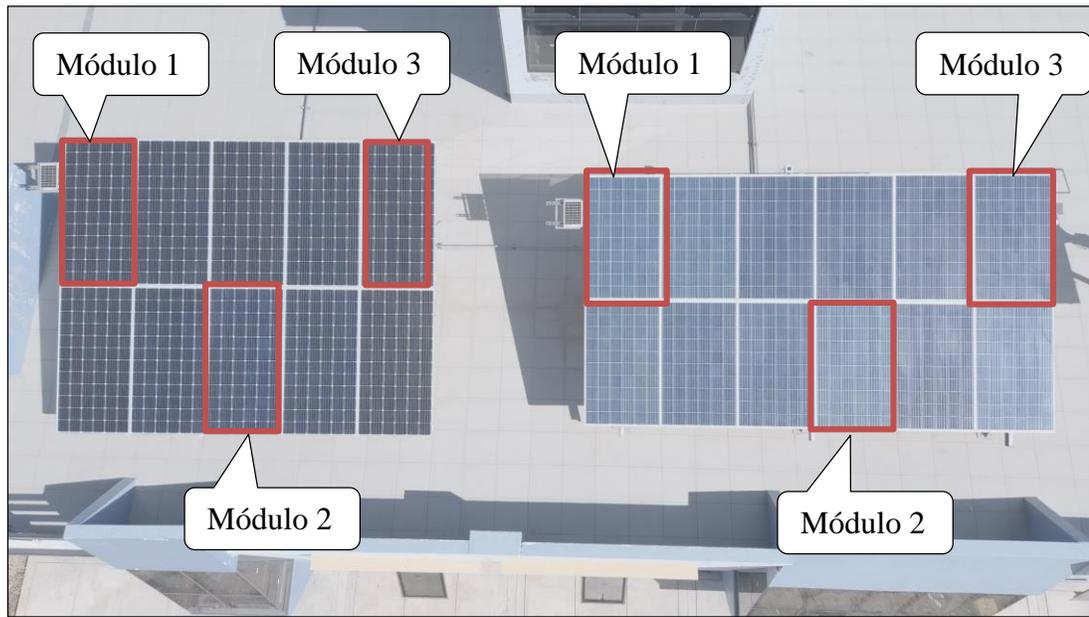


Figura 26. Sistemas fotovoltaicos conectados a red con tecnologías monocristalinas y policristalinas.

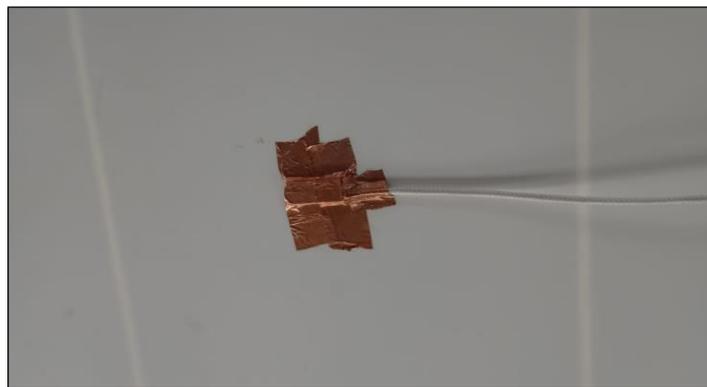


Figura 27. Instalación de sensores de temperatura PT100.

3.5.5 Trazado de curvas I-V

Los módulos fotovoltaicos que se evaluaron con el trazador de curvas son los mismos que se indican en la Figura 26. Muestra datos de los parámetros eléctricos tanto en STC (Standar Test Condition) y a condiciones de operación del momento, también nos muestra la irradiancia incidente en el módulo fotovoltaico a través de una celda de referencia o calibrada y la temperatura del módulo a través de un sensor de temperatura PT100. Se tomaron datos durante 16 días (8 días sin limpieza y 8 días con limpieza de los módulos fotovoltaicos), considerando en dos horarios por día las 10:00 AM y 2:00 PM que son los mismos horarios en los que se tomaran imágenes termográficas.

En la Figura 28, se muestra el trazado de curvas I-V de módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos, del lado izquierdo es el trazado de curvas I-V del módulo fotovoltaico monocristalino 1 y de la misma forma se realizaron los otros dos módulos fotovoltaicos monocristalinos restantes, del lado derecho se tiene el trazado de curvas I-V del módulo fotovoltaico policristalino 1 y de la misma forma se realizaron los otros dos módulos fotovoltaicos policristalinos restantes



Figura 28. Trazado de curva I-V de un módulo fotovoltaico monocristalino.

3.5.6 Termografía de módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos

Las imágenes térmicas nos permiten saber a qué temperatura se encuentran los módulos fotovoltaicos. Se tomaron imágenes térmicas con un dron de termografía infrarroja IR a una altura de 15 m para ver a qué temperaturas están los módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalino, dichas medidas fueron a las 10:00 AM y 2:00 PM para evitar reflejos no deseados por parte del módulo fotovoltaico a la cámara termográfica que normalmente sucede al medio día, ya que las imágenes térmicas se toman de forma perpendicular al módulo fotovoltaico para tener mayor precisión en los resultados. Se tomaron las imágenes durante 8 días sin limpieza y 8 días con limpieza. En la Figura 29, se muestra una imagen termográfica tomada con un dron con cámara térmica.

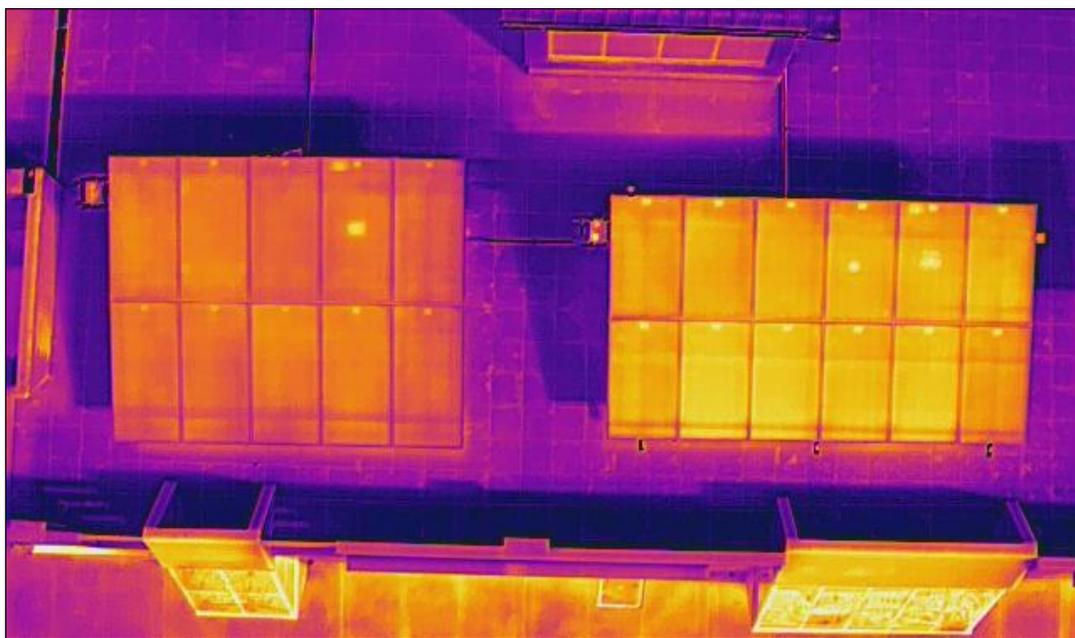


Figura 29. Termografía de módulos fotovoltaicos policristalinos y monocristalinos.

Para realizar el análisis de las diferencias de temperaturas de módulos fotovoltaicos mediante imágenes termográficas se tomaron en cuenta la normativa internacional de módulos y plantas fotovoltaicas – termografía infrarroja exterior IEC TS 62446-3 (2017), del cual se toman los siguientes criterios para la obtención de imágenes termográficas:

- Irradiancia mínima de 600 W/m².
- Velocidad máxima del viento de 28 km/h.
- Evitar reflexiones del personal de mediciones, cámara termográfica, etc. Sobre el módulo fotovoltaico.
- Tomar la imagen de la cámara termográfica en forma perpendicular al módulo, en caso de no poder tomar la imagen de esta forma, se tiene que tomar la imagen a un ángulo mayor de 30° con respecto a la superficie exterior del módulo fotovoltaico.
- Mantener la cámara termográfica estable al momento de tomar la imagen.
- Mantener limpio el módulo fotovoltaico antes de tomar la imagen termográfica del mismo, en caso de realizar comparaciones tomar imagen con suciedad incluida.
- Cielo despejado o máximo 2 octas de cielo cubierto por cúmulos.

3.5.7 Caracterización de módulos fotovoltaicos

Para la caracterización de los módulos fotovoltaicos según su temperatura del módulo se utiliza las siguientes ecuaciones:

- Tensión de circuito abierto

$$V_{oc} = V_{oc\ ref} [1 + \beta(T_c - 25^\circ\text{C})] \quad (1)$$

Donde , V_{oc} es la tensión de circuito abierto V , $V_{oc\ ref}$ es la tensión de circuito abierto de referencia en V , β es el coeficiente de temperatura de tensión y T_c es la temperatura celda en $^\circ\text{C}$.

- Corriente de corto circuito

$$I_{sc} = I_{sc\ ref} [1 + \alpha(T_c - 25^\circ\text{C})] \times \left(\frac{G_{(\alpha,\beta)}}{G_{stc}} \right) \quad (2)$$

Donde, I_{sc} es la corriente en corto circuito en A , $I_{sc\ ref}$: corriente de corto circuito de referencia, α es el coeficiente de temperatura de intensidad, T_c es la temperatura celda en $^\circ\text{C}$, $G_{(\alpha,\beta)}$ es la irradiancia en W/m^2 y G_{stc} es la irradiancia a condiciones estándares en W/m^2 .

- Tensión de máxima potencia

$$V_{pmp} = V_{pmp\ ref} [1 + \beta(T_c - 25^\circ\text{C})] \quad (3)$$

Donde, V_{pmp} es la tensión de máxima potencia en V, $V_{pmp\ ref}$ es el tensión de máxima potencia de referencia en V, β es el coeficiente de temperatura de tensión y T_c es la temperatura celda en $^\circ\text{C}$.

- Corriente de máxima potencia

$$I_{pmp} = I_{pmp\ ref} [1 + \alpha(T_c - 25^\circ\text{C})] \times \left(\frac{G_{(\alpha,\beta)}}{G_{stc}} \right) \quad (4)$$

Donde, I_{pmp} es la corriente de máxima potencia en A, $I_{pmp\ ref}$ es la corriente de máxima potencia de referencia en A, α es el coeficiente de temperatura intensidad, T_c es la temperatura celda en $^\circ\text{C}$, $G_{(\alpha,\beta)}$ es la irradiancia en W/m^2 y G_{stc} es la irradiancia a condiciones estándares en W/m^2 .

- Potencia máxima del módulo fotovoltaico

$$P_{pmp} = P_{pmp\ ref} \times \left(\frac{G_{(\alpha,\beta)}}{G_{stc}} \right) \times [1 + \gamma(T_c - 25^\circ\text{C})] \quad (5)$$

Donde, P_{pmp} es la potencia máxima del módulo fotovoltaico en W, $P_{pmp\ ref}$ es la potencia máxima de referencia en W, $G_{(\alpha,\beta)}$ es la irradiancia en W/m^2 , G_{stc} es la irradiancia a condiciones estándares en W/m^2 , γ es el coeficiente de temperatura de potencia y T_c es temperatura celda en $^\circ\text{C}$.

- Eficiencia del módulo fotovoltaico

$$\eta = \frac{P_{pmp}}{G \times A} \quad (6)$$

Donde η es la eficiencia del módulo fotovoltaico, P_{max} es la potencia máxima en W, G es la irradiancia en W/m^2 y A es el área superficial del módulo fotovoltaico en m^2 .

3.6 Costos del proyecto de investigación

En la Tabla 3, se muestra el presupuesto total del costo de materiales utilizados en la implementación de los sistemas de adquisición de datos de temperatura, el costo total fue asumido por el tesista.

Tabla 3

Costos de implementación de los sistemas de adquisición de datos de temperatura.

| Costos de implementación del sistema de adquisición de datos de temperatura | | | | |
|--|-------------------------|----------------------------|--------------|-------------------------|
| Descripción | Unidad de medida | Costo unitario (S/) | Cant. | Costo total (S/) |
| Microcontrolador Arduino Uno | Unidad | 75.00 | 2 | 150.00 |
| Lector de tarjeta SD para Arduino | Unidad | 10.00 | 2 | 20.00 |
| Tarjeta SD | Unidad | 30.00 | 2 | 60.00 |
| Módulo RTC DS1307 para Arduino | Unidad | 11.00 | 2 | 22.00 |
| Fuente de alimentación 24Vcc | Unidad | 60.00 | 2 | 120.00 |
| Transmisor de temperatura | Unidad | 33.00 | 6 | 198.00 |
| Sensor de temperatura PT100 | Unidad | 45.00 | 6 | 270.00 |
| Protoboard | Unidad | 24.00 | 2 | 48.00 |
| Tablero 25x25x12 | Unidad | 30.00 | 2 | 60.00 |
| Tomacorrientes simples | Unidad | 2.50 | 4 | 10.00 |
| Fuente de alimentación 5Vcc | Unidad | 20.00 | 2 | 40.00 |
| Cables de conexión 14 AWG | Metros | 1.50 | 8 | 12.00 |
| Cables UTP 24 AWG | Metros | 2.00 | 5 | 10.00 |
| Total | | | | 1020.00 |

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se muestra los resultados obtenidos de las mediciones de la temperatura mediante cámara termográfica con dron, sensores de temperatura PT100 y a través del trazador de curvas I-V los parámetros eléctricos de los módulos fotovoltaicos evaluados.

4.1 Evaluación de módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza

A continuación se muestran las curvas I-V, P-V, imágenes térmicas y comportamiento de temperatura de celda de los módulos fotovoltaicos monocristalinos evaluados sin limpieza.

4.1.1 Curvas I-V y P-V de los módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza

a) Modulo fotovoltaico monocristalino 1 sin limpieza

En la Figura 30, la curva de potencia medido es de color azul, la curva I-V medido de color rojo, la curva I-V en condiciones estándares de prueba (STC) se encuentra de color morado y las líneas de color verde son los puntos de máxima potencia, tensión y corriente, todo ellos son datos del módulo fotovoltaico monocristalino 1 sin limpieza tomados el 22 de agosto del 2023 a las 10:16:18 AM.

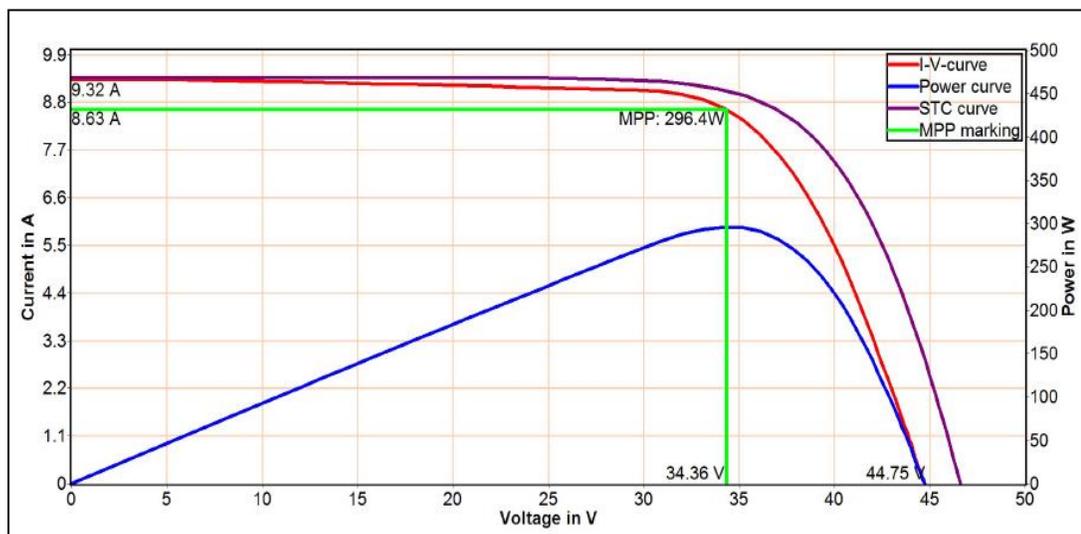


Figura 30. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico monocristalino 1 sin limpieza.

En la Tabla 4, se muestran los resultados del trazado de curvas I-V del módulo fotovoltaico monocristalino 1 sin limpieza a una irradiancia de 995 W/m² y una temperatura de celda de 36.6 °C obteniendo una potencia máxima de 296.4 W. Los datos fueron obtenidos el 22 de agosto del 2023 a las 10:16:18 AM.

Tabla 4

Resultados del módulo fotovoltaico monocristalino 1 sin limpieza.

| | Medido | STC | NOCT | Referencia |
|--------------------------------------|---------------|------------|-------------|-------------------|
| P _{pmp} (W/W _p) | 296.4 | 319.3 | 265.6 | 370 |
| I _{pmp} (A) | 8.63 | 8.67 | 6.93 | 9.21 |
| V _{pmp} (V) | 34.4 | 36.8 | 38.3 | 40.2 |
| I _{sc} (A) | 9.32 | 9.37 | 7.49 | 9.90 |
| V _{oc} (V) | 44.7 | 46.60 | 46.97 | 48.2 |
| Rs (Ω) | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.3 |
| Rs (kΩ) | >0.3 | >0.3 | >0.4 | >0.3 |
| FF (%) | 71.1 | 73.1 | 75.4 | 77.6 |
| E _{eff} (W/m ²) | 995 | 1000 | 800 | 1000 |
| T _{mod} (°C) | 36.6 | 25 | 33.3 | 25 |

b) Módulo fotovoltaico monocristalino 2 sin limpieza

En la Figura 31, la curva de potencia medido es de color azul, la curva I-V medido de color rojo, la curva I-V en condiciones estándares de prueba (STC) se encuentra de color morado y las líneas de color verde son los puntos de máxima potencia, tensión y corriente. En la curva I-V de color rojo medido al instante se observa una curva un tanto irregular, esto es debido a que en la parte baja del módulo hay acumulación de suciedad. En la Tabla 5, se muestran los resultados del trazado de curvas I-V del módulo fotovoltaico monocristalino 2 sin limpieza a una irradiancia de 992 W/m² y una temperatura de celda de 39.3 °C obteniendo una potencia máxima de 289.5 W. Todo ellos son datos del módulo fotovoltaico monocristalino 2 sin limpieza tomados el 22 de agosto del 2023 a las 10:18:08 AM.

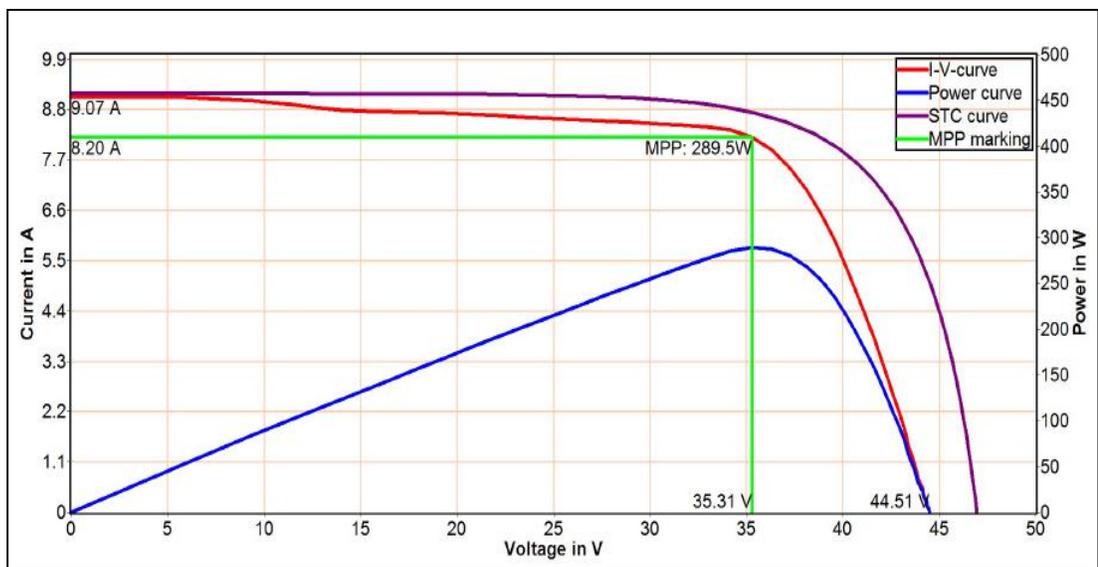


Figura 31. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico monocristalino 2 sin limpieza.

Tabla 5

Resultados del módulo fotovoltaico monocristalino 2 sin limpieza.

| | Medido | STC | NOCT | Referencia |
|-------------------------------|---------------|------------|-------------|-------------------|
| P_{pmp} (W/ W_P) | 289.5 | 318.5 | 258.6 | 370 |
| I_{pmp} (A) | 8.20 | 8.27 | 6.61 | 9.21 |
| V_{pmp} (V) | 35.3 | 38.5 | 39.1 | 40.2 |
| I_{sc} (A) | 9.07 | 9.15 | 7.32 | 9.90 |
| V_{oc} (V) | 44.5 | 46.95 | 46.96 | 48.2 |
| R_s (Ω) | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.3 |
| R_s (k Ω) | >0.3 | >0.3 | >0.4 | >0.3 |
| FF (%) | 71.1 | 74.2 | 75.2 | 77.6 |
| E_{eff} (W/m ²) | 992 | 1000 | 800 | 1000 |
| T_{mod} (°C) | 39.3 | 25 | 35.5 | 25 |

c) Módulo fotovoltaico monocristalino 3 sin limpieza

En la Figura 32, la curva de potencia medido es de color azul, la curva I-V medido de color rojo, la curva I-V en condiciones estándares de prueba (STC) se encuentra de color morado y las líneas de color verde son los puntos de máxima potencia, tensión y

corriente. En la Tabla 6, se muestran los resultados del trazado de curvas I-V del módulo fotovoltaico monocristalino 3 sin limpieza a una irradiancia de 997 W/m^2 y una temperatura de celda de $39.3 \text{ }^\circ\text{C}$ obteniendo una potencia máxima de 306.9 W . Todo ellos son datos del módulo fotovoltaico monocristalino 3 sin limpieza tomados el 22 de agosto del 2023 a las 10:19:58 AM.

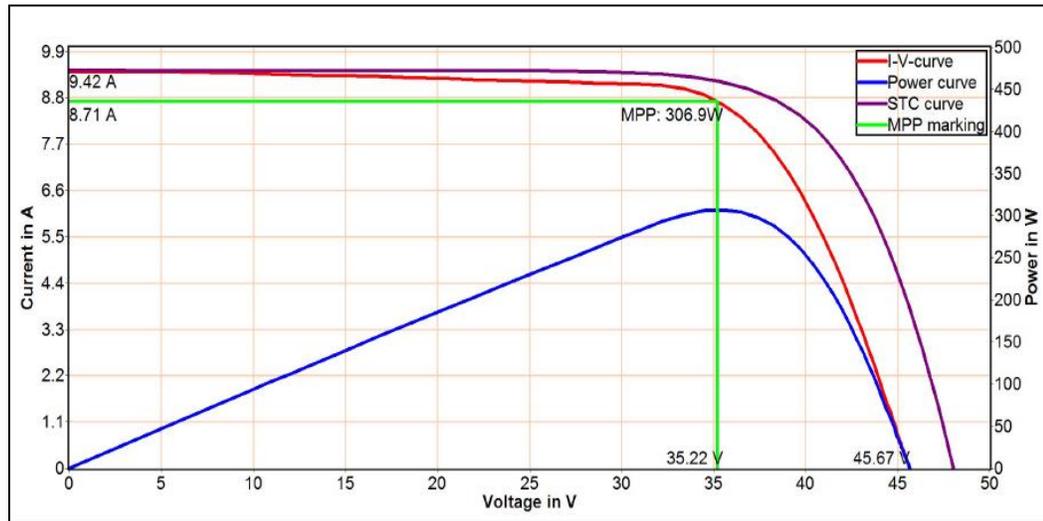


Figura 32. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico monocristalino 3 sin limpieza.

Tabla 6

Resultados del módulo fotovoltaico monocristalino 3 sin limpieza.

| | Medido | STC | NOCT | Referencia |
|--------------------------------|--------|-------|-------|------------|
| P_{pmp} (W/W _P) | 306.9 | 335.7 | 278.9 | 370 |
| I_{pmp} (A) | 8.71 | 8.74 | 6.99 | 9.21 |
| V_{pmp} (V) | 35.2 | 38.4 | 39.9 | 40.2 |
| I_{sc} (A) | 9.42 | 9.45 | 7.56 | 9.90 |
| V_{oc} (V) | 45.7 | 48.04 | 48.43 | 48.2 |
| R_s (Ω) | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.3 |
| R_s (k Ω) | >0.3 | >0.4 | >0.4 | >0.3 |
| FF (%) | 71.3 | 73.9 | 76.2 | 77.6 |
| E_{eff} (W/m ²) | 997 | 1000 | 800 | 1000 |
| T_{mod} ($^\circ\text{C}$) | 39.3 | 25 | 35.5 | 25 |

4.1.2 Temperatura de los módulos fotovoltaico monocristalinos sin limpieza

En la Figura 33, se muestra el análisis de la temperatura de los 3 módulos fotovoltaicos monocristalinos evaluados sin limpieza a través del software IR_PCTool correspondiente a la cámara termográfica con dron utilizado, la imagen térmica se tomó el día 22 de agosto del 2023 a las 10:18:08 AM a una irradiancia de 995.28 W/m². En la Tabla 7, se ve los resultados del análisis de la temperatura de los 3 módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza. En el módulo fotovoltaico monocristalino 1 se tiene una temperatura máxima de 43.6 °C y un promedio de todo el módulo de 41.5 °C, en el módulo 2 una temperatura máxima de 44.2 °C y un promedio de 42.2 °C y en el módulo 3 una temperatura máxima de 39.2 °C y un promedio de 37.3 °C.

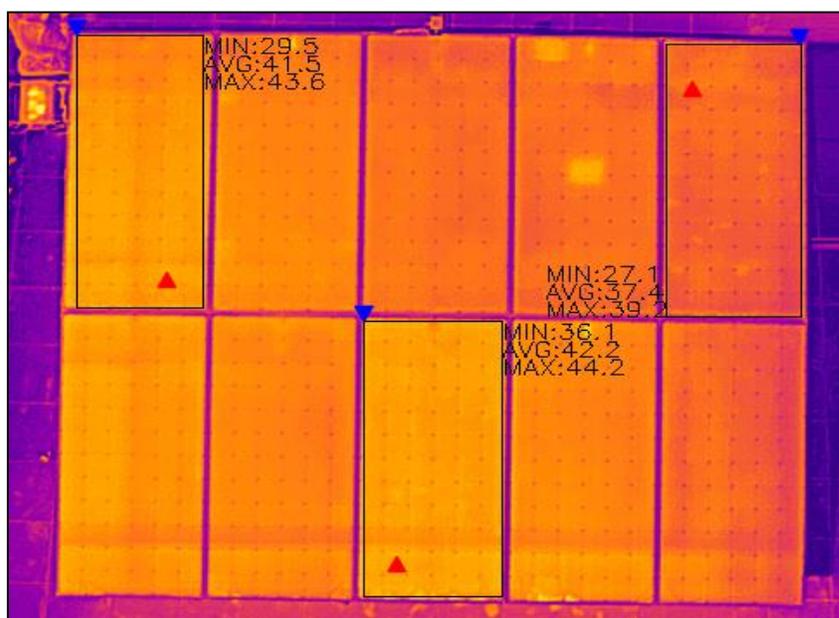


Figura 33. Temperatura de módulos fotovoltaicos monocristalinos evaluados sin limpieza.

Tabla 7

Resumen de temperaturas de placa de módulo fotovoltaico monocristalinos sin limpieza.

| | Fecha | Hora | Temperatura Máximo (°C) | Temperatura Promedio (°C) | Temperatura Mínimo (°C) |
|----------|----------|----------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Módulo 1 | 22/08/23 | 10:18:08 | 43.6 | 41.5 | 29.5 |
| Módulo 2 | 22/08/23 | 10:18:08 | 44.2 | 42.2 | 36.1 |
| Módulo 3 | 22/08/23 | 10:18:08 | 39.2 | 37.4 | 27.1 |

En la Figura 34, se muestra las temperaturas más altas registradas con los sensores PT100 durante la evaluación de los módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza. En el módulo monocristalino 1 se tiene una temperatura máxima de 43.9 °C y una temperatura media diaria de 25.95 °C, en el módulo monocristalinos 2 se tiene una temperatura máxima de 41.87 °C y una temperatura media diaria de 25.51 °C y en el módulo fotovoltaico monocristalino 3 se tiene una temperatura máxima de 42.96 °C y una temperatura media diaria de 25.34 °C. Los datos recolectados por los sensores de temperatura PT100 corresponden al 22 de agosto del 2022 a una irradiancia media diaria de 606.79 W/m² y una irradiancia máxima de 1068.20 W/m².

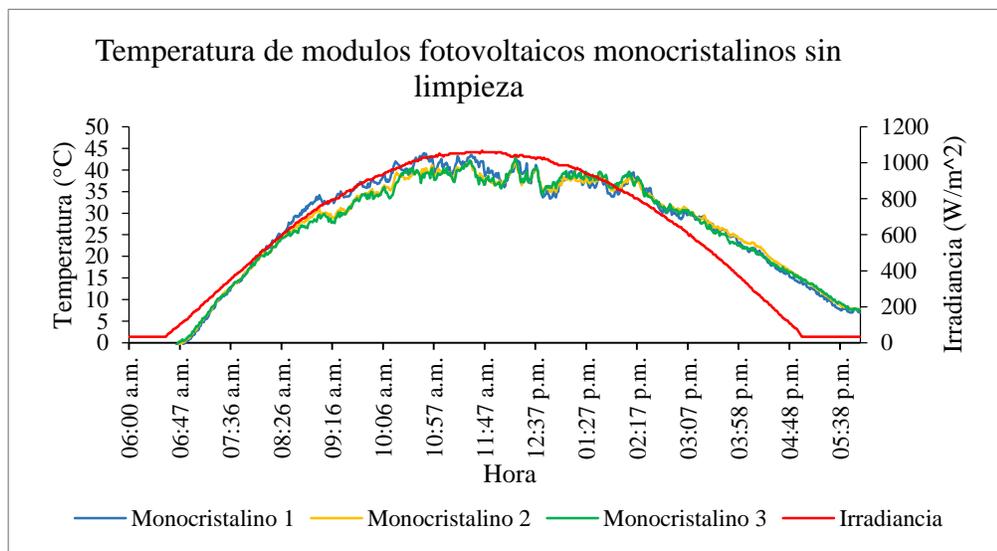


Figura 34. Temperatura de celda de los módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza.

4.1.3 Caracterización de módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza

En la Tabla 8, se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los 3 módulos fotovoltaicos monocristalinos evaluados sin limpieza, en cual se tomaron como condiciones estándares de prueba (STC) al promedio de los datos que se muestran en el Anexo 5 que fueron obtenidos mediante el trazador de curvas I-V y a partir de ello se caracterizan según su temperatura de placa promedio e irradiancia de todos los módulos evaluados que se muestran en la Figura 37 a través de modelos matemáticos. En los resultados de la caracterización según su temperatura de placa de 42.2 °C hay una disminución de 2.49 V en la tensión y una disminución de hasta 1.65 % de eficiencia en el módulo fotovoltaico monocristalino 2.

Tabla 8

Resultados de la caracterización de módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza según su temperatura de placa.

| Módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza | | | | | | | |
|---|------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-------|
| | T | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} | η |
| | °C | A | V | A | V | W | % |
| Módulo 1 (STC) | 25 | 9.48 | 47.09 | 8.79 | 37.64 | 331.02 | 17.06 |
| Módulo 1 (Caracterizado) | 41.5 | 9.50 | 44.14 | 8.81 | 35.28 | 298.83 | 15.45 |
| Módulo 2 (STC) | 25 | 9.27 | 47.15 | 8.50 | 38.18 | 324.34 | 16.72 |
| Módulo 2 (Caracterizado) | 42.2 | 9.29 | 44.07 | 8.52 | 35.69 | 291.50 | 15.07 |
| Módulo 3 (STC) | 25 | 9.49 | 47.91 | 8.84 | 38.27 | 338.26 | 17.44 |
| Módulo 3 (Caracterizado) | 37.4 | 9.50 | 45.65 | 8.85 | 36.46 | 313.30 | 16.19 |

4.2 Evaluación de módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza

A continuación, se muestran las curvas I-V, P-V, imágenes térmicas y comportamiento de temperatura de celda durante todo el día de los módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza evaluados durante el periodo de duración de la investigación.

4.2.1 Curvas I-V y P-V de los módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza

a) Modulo fotovoltaico policristalino 1 sin limpieza

En la Figura 35, la curva de potencia medido es de color azul, la curva I-V medido de color rojo, la curva I-V en condiciones estándares de prueba (STC) se encuentra de color morado y las líneas de color verde son los puntos de máxima potencia, tensión y corriente. En la Tabla 9, se muestran los resultados del trazado de curvas I-V del módulo fotovoltaico policristalino 1 sin limpieza a una irradiancia de 1006 W/m² y una temperatura de celda de 38.2 °C obteniendo una potencia máxima de 220.2 W. Todo ellos son datos del módulo fotovoltaico policristalino 1 sin limpieza tomados el 22 de agosto del 2023 a las 10:24:36 AM.

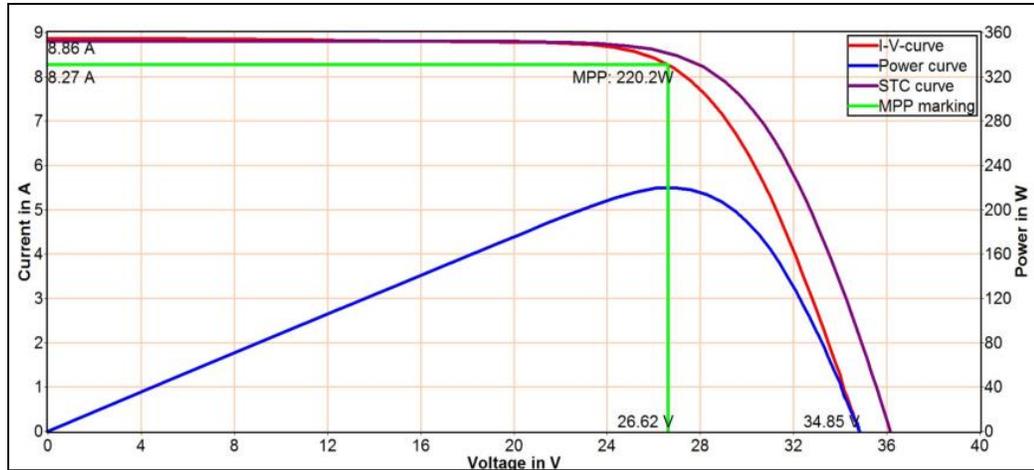


Figura 35. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico policristalino 1 sin limpieza.

Tabla 9

Resultados del módulo fotovoltaico policristalino 1 sin limpieza.

| | Medido | STC | NOCT | Referencia |
|-------------------------------|---------------|------------|-------------|-------------------|
| P_{pmp} (W/ W_p) | 220.2 | 231.2 | 191.7 | 270 |
| I_{pmp} (A) | 8.37 | 8.22 | 6.57 | 8.63 |
| V_{pmp} (V) | 26.6 | 28.1 | 29.2 | 31.3 |
| I_{sc} (A) | 8.86 | 8.80 | 7.04 | 9.09 |
| V_{oc} (V) | 34.8 | 36.15 | 36.33 | 38.5 |
| R_s (Ω) | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.3 |
| R_s (k Ω) | >0.2 | >0.2 | >0.3 | >0.2 |
| FF (%) | 71.3 | 72.7 | 74.9 | 77.2 |
| E_{eff} (W/m ²) | 1006 | 1000 | 800 | 1000 |
| T_{mod} (°C) | 38.2 | 25 | 34.5 | 25 |

b) Módulo fotovoltaico policristalino 2 sin limpieza

En la Figura 36, la curva de potencia medido es de color azul, la curva I-V medido de color rojo, la curva I-V en condiciones estándares de prueba (STC) se encuentra de color morado y las líneas de color verde son los puntos de máxima potencia, tensión y corriente. En la Tabla 10, se muestran los resultados del trazado de curvas I-V del

módulo fotovoltaico policristalino 2 sin limpieza a una irradiancia de 1013 W/m^2 y una temperatura de celda de $40.9 \text{ }^\circ\text{C}$ obteniendo una potencia máxima de 213.9 W . Todo ellos son datos del módulo fotovoltaico policristalino 2 sin limpieza tomados el 22 de agosto del 2023 a las 10:27:14 AM.

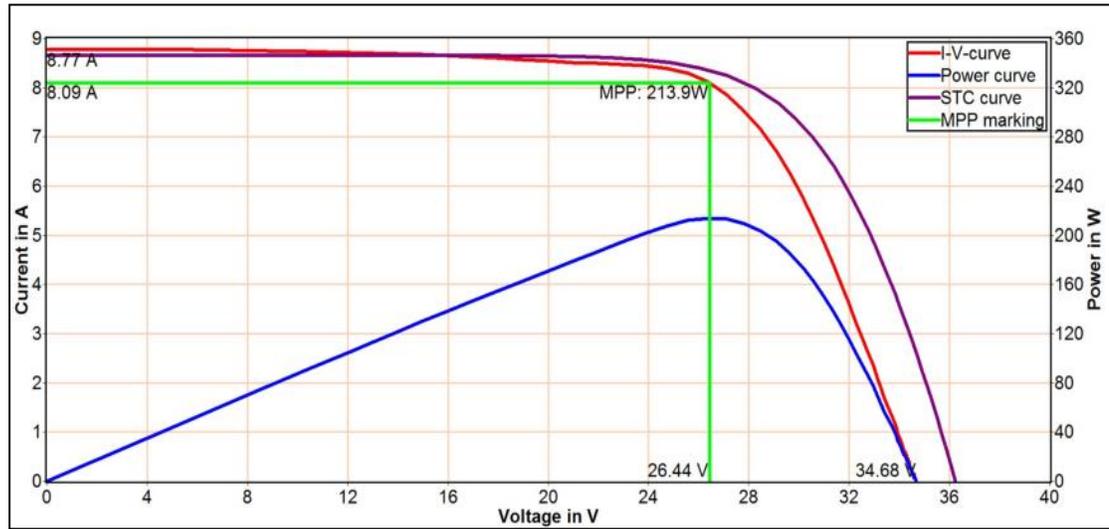


Figura 36. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico policristalino 2 sin limpieza.

Tabla 10

Resultados del módulo fotovoltaico policristalino 2 sin limpieza.

| | Medido | STC | NOCT | Referencia |
|------------------------------------|---------------|------------|-------------|-------------------|
| $P_{pmp} \text{ (W/W}_P \text{)}$ | 213.9 | 225.8 | 186.1 | 270 |
| $I_{pmp} \text{ (A)}$ | 8.09 | 7.99 | 6.39 | 8.63 |
| $V_{pmp} \text{ (V)}$ | 26.4 | 28.3 | 29.1 | 31.3 |
| $I_{sc} \text{ (A)}$ | 8.77 | 8.66 | 6.93 | 9.09 |
| $V_{oc} \text{ (V)}$ | 34.7 | 36.24 | 36.34 | 38.5 |
| $R_s \text{ (}\Omega\text{)}$ | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.3 |
| $R_s \text{ (k}\Omega\text{)}$ | >0.3 | >0.3 | >0.4 | >0.2 |
| FF (%) | 70.3 | 72 | 73.9 | 77.2 |
| $E_{eff} \text{ (W/m}^2\text{)}$ | 1013 | 1000 | 800 | 1000 |
| $T_{mod} \text{ (}^\circ\text{C)}$ | 40.9 | 25 | 36.5 | 25 |

c) Módulo fotovoltaico policristalino 3 sin limpieza

En la Figura 37, la curva de potencia medido es de color azul, la curva I-V medido de color rojo, la curva I-V en condiciones estándares de prueba (STC) se encuentra de color morado y las líneas de color verde son los puntos de máxima potencia, tensión y corriente.

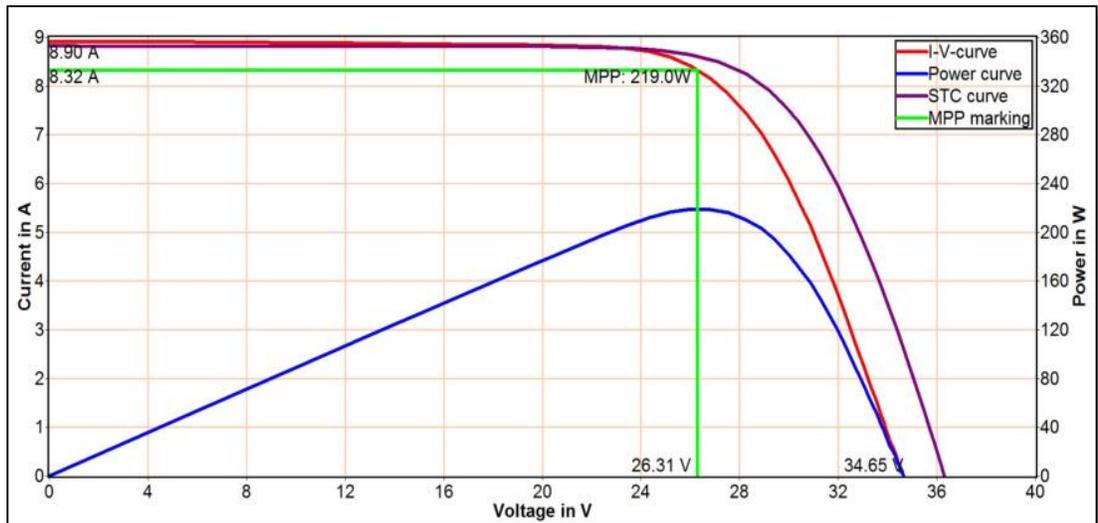


Figura 37. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico policristalino 3 sin limpieza.

Tabla 11

Resultados del módulo fotovoltaico policristalino 3 sin limpieza.

| | Medido | STC | NOCT | Referencia |
|-------------------------------|---------------|------------|-------------|-------------------|
| P_{pmp} (W/W _P) | 219 | 232.9 | 193.6 | 270 |
| I_{pmp} (A) | 8.32 | 8.24 | 6.59 | 8.63 |
| V_{pmp} (V) | 26.3 | 28.3 | 29.4 | 31.3 |
| I_{sc} (A) | 8.90 | 8.82 | 7.05 | 9.09 |
| V_{oc} (V) | 34.7 | 36.30 | 36.53 | 38.5 |
| R_s (Ω) | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.3 |
| R_s (k Ω) | >0.2 | >0.2 | >0.3 | >0.2 |
| FF (%) | 71 | 72.8 | 75.2 | 77.2 |
| E_{eff} (W/m ²) | 1010 | 1000 | 800 | 1000 |
| T_{mod} (°C) | 41.8 | 25 | 37.3 | 25 |

En la Tabla 11, se muestran los resultados del trazado de curvas I-V del módulo fotovoltaico policristalino 3 sin limpieza a una irradiancia de 1010 W/m^2 y una temperatura de celda de $41.8 \text{ }^\circ\text{C}$ obteniendo una potencia máxima de 219 W . Todo ellos son datos del módulo fotovoltaico policristalino 3 sin limpieza tomados el 22 de agosto del 2023 a las 10:29:18 AM.

4.2.2 Temperatura de los módulos fotovoltaico policristalinos sin limpieza

En la Figura 38, se muestra el análisis de temperatura de los 3 módulos fotovoltaicos policristalinos evaluados sin limpieza, la imagen térmica fue tomada el día 22 de agosto del 2023 a las 10:27:10 AM a una irradiancia de 1012.97 W/m^2 .

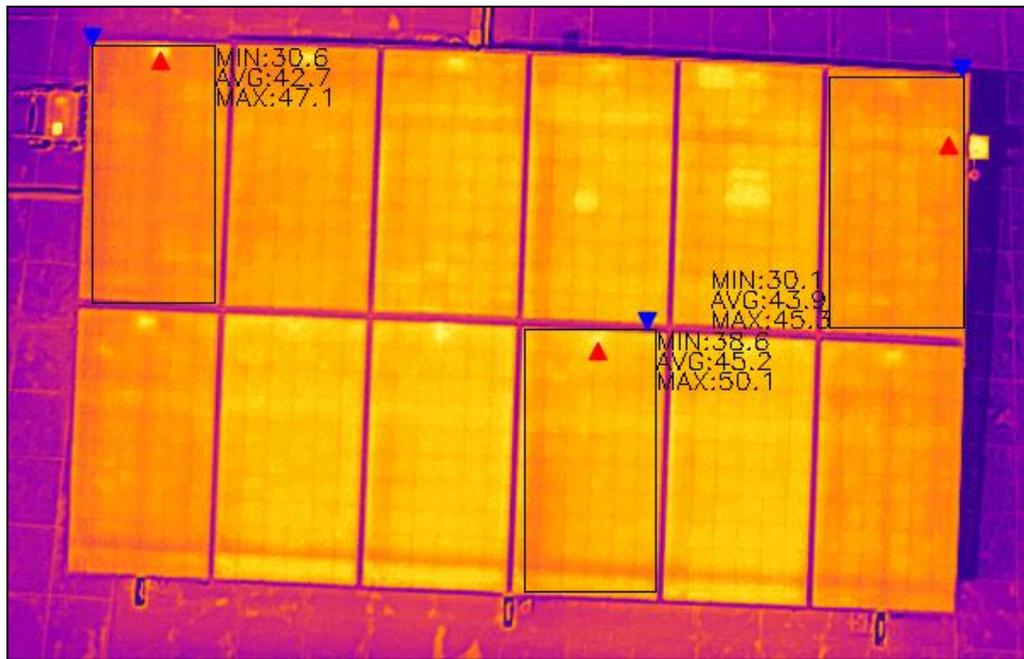


Figura 38. Temperatura de los módulos fotovoltaicos policristalinos evaluados sin limpieza.

En la Tabla 12, se muestra los resultados de la Figura 39, donde el módulo fotovoltaico policristalino 1 tiene una temperatura máxima de $47.1 \text{ }^\circ\text{C}$ y un promedio de $42.7 \text{ }^\circ\text{C}$, el módulo 2 tiene una temperatura máxima de $50.1 \text{ }^\circ\text{C}$ y un promedio de $45.2 \text{ }^\circ\text{C}$ y en el módulo policristalino 3 tiene una temperatura máxima de $45.3 \text{ }^\circ\text{C}$ y un promedio de $43.9 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabla 12

Resumen de temperaturas de placa de los 3 módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza.

| | Fecha | Hora | Temperatura Máximo (°C) | Temperatura Promedio (°C) | Temperatura Minimo (°C) |
|----------|--------------|-------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Módulo 1 | 22/08/23 | 10:27:10 | 47.1 | 42.7 | 30.6 |
| Módulo 2 | 22/08/23 | 10:27:10 | 50.1 | 45.2 | 38.6 |
| Módulo 3 | 22/08/23 | 10:27:10 | 45.3 | 43.9 | 30.1 |

En la Figura 39, se muestra las temperaturas más altas registradas con los sensores PT100 durante la evaluación de los módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza. En el módulo monocristalino 1 se tiene una temperatura máxima de 50.87 °C y una temperatura media diaria de 31.34 °C, en el módulo monocristalinos 2 se tiene una temperatura máxima de 49.57 °C y una temperatura media diaria de 31.16 °C y en el módulo fotovoltaico monocristalino 3 se tiene una temperatura máxima de 48.2 °C y una temperatura media diaria de 29.92 °C. Los datos recolectados por los sensores de temperatura PT100 corresponden al 22 de agosto del 2022 a una irradiancia media diaria de 606.79 W/m² y una irradiancia máxima de 1068.20 W/m².

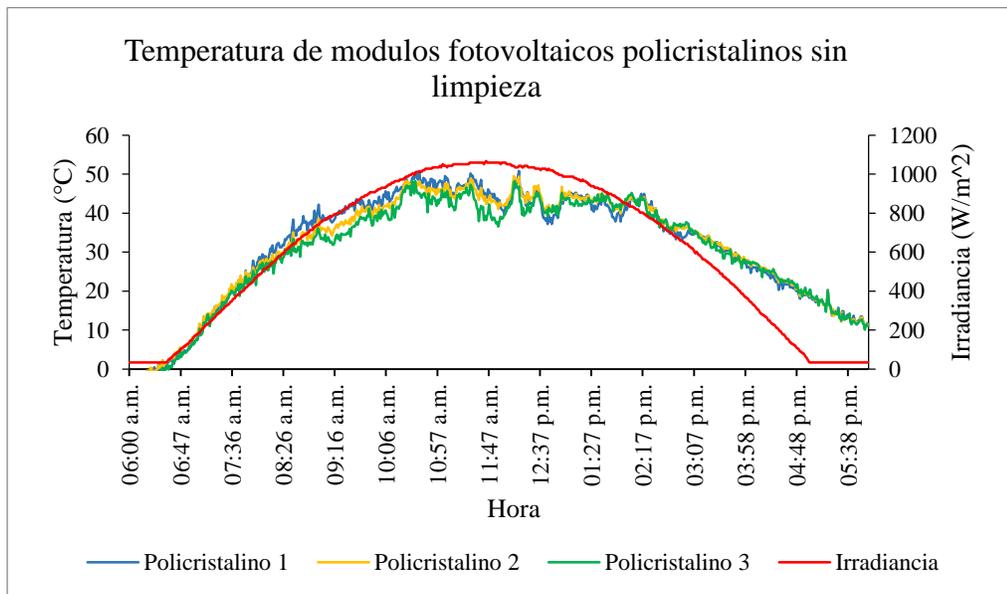


Figura 39. Temperatura de celda de los módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza.

En la Figura 40, se muestra el grafico comparativo del comportamiento de la temperatura de celda de los módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos adquirido el mismo día y a una misma irradiancia durante todo un día desde las 6:00 AM a 6:00 PM. Los datos fueron obtenidos por el sistema de adquisición de datos con Arduino el 22 de agosto del 2023, donde se registraron las temperaturas más altas y una radiación solar constante durante el periodo de evaluación de los módulos fotovoltaicos sin limpieza, para el cual se eligieron los módulos que tienen mayor temperatura de celda en ambas tecnologías solares evaluadas. En el grafico se muestra que de la temperatura de celda de los módulos fotovoltaicos policristalinos llegan a una temperatura máxima de 50.87 °C y con una temperatura media diaria de 31.34 °C son superiores a los monocristalinos que llega a una temperatura máxima de 41.87 °C y una temperatura media diaria de 25.51 °C todo ello a una irradiancia máxima de 1068.2 W/m² y una irradiancia media diaria de 606.79 W/m². El modulo fotovoltaico policristalino tiene mayor temperatura que los monocristalinos ya que tienen la capacidad de absorber más rápido el calor y lo cual hace que soporte de mejor manera el sobrecalentamiento.

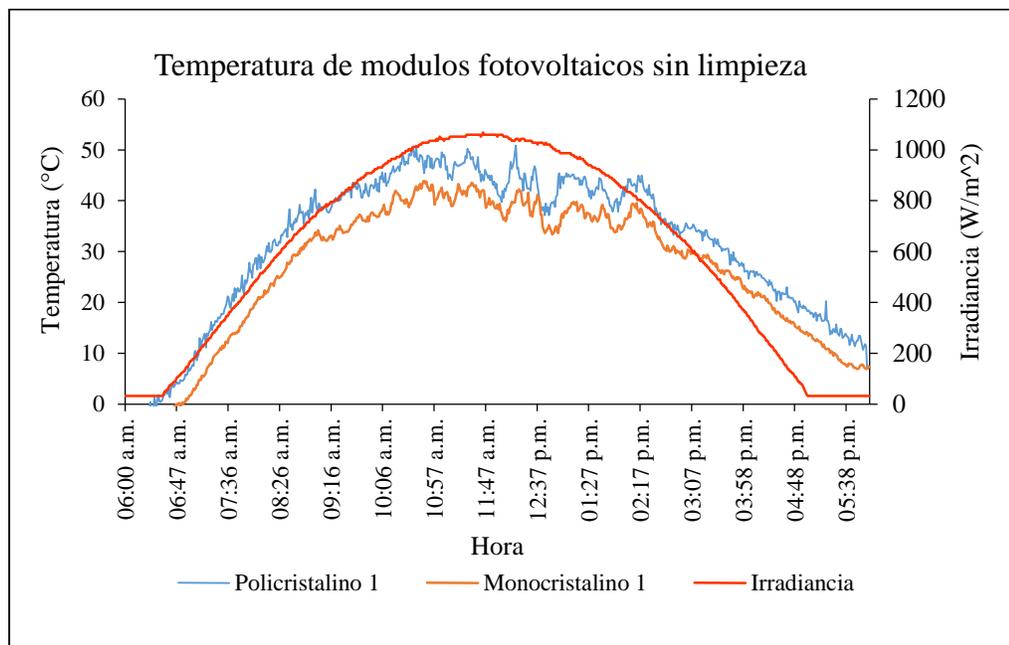


Figura 40. Comportamiento de la temperatura de celda de módulos fotovoltaicos sin limpieza.

4.2.3 Caracterización de módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza

En la Tabla 13, se muestran los resultados de la caracterización de los 3 módulos fotovoltaicos policristalinos evaluados sin limpieza, donde los valores en STC es el promedio de los datos que se muestran en el Anexo 6 los cuales se obtuvieron mediante el trazador de curvas I-V para luego caracterizar los módulos fotovoltaicos seleccionados a través de su temperatura promedio que se muestran en la Tabla 12. En los resultados de la caracterización según su temperatura se puede ver disminución de hasta de 1.77 V de la tensión y disminución de 1.14 % de eficiencia en el módulo 2 con una temperatura de placa de 45.2 °C.

Tabla 13

Resultados de la caracterización de módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza según su temperatura.

| Módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza | | | | | | | |
|---|------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-------|
| | T | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} | η |
| | °C | A | V | A | V | W | % |
| Módulo 1 (STC) | 25 | 8.92 | 36.48 | 8.34 | 28.29 | 236.05 | 14.57 |
| Módulo 1 (Caracterizado) | 42.7 | 9.13 | 34.48 | 8.54 | 26.74 | 222.18 | 13.54 |
| Módulo 2 (STC) | 25 | 8.73 | 36.49 | 8.09 | 28.34 | 229.35 | 14.16 |
| Módulo 2 (Caracterizado) | 45.2 | 8.95 | 34.22 | 8.30 | 26.57 | 213.65 | 13.02 |
| Módulo 3 (STC) | 25 | 8.89 | 36.55 | 8.30 | 28.36 | 235.42 | 14.53 |
| Módulo 3 (Caracterizado) | 43.9 | 9.11 | 34.46 | 8.50 | 26.74 | 220.92 | 13.46 |

4.3 Evaluación de módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza

La evaluación de los modulo fotovoltaicos monocristalinos con limpieza se realizaron durante 8 días, a continuación se muestran los datos más relevantes de las curvas I-V y P-V, imágenes termográficas y el comportamiento de la temperatura de celda durante un día de los modulo evaluados.

4.3.1 Curvas I-V y P-V de los módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza

a) Modulo fotovoltaico monocristalino 1 con limpieza

En la Figura 41, la curva de potencia medido es de color azul, la curva I-V medido de color rojo, la curva I-V en STC se encuentra de color morado y las líneas de color verde son los puntos de máxima potencia, tensión y corriente.

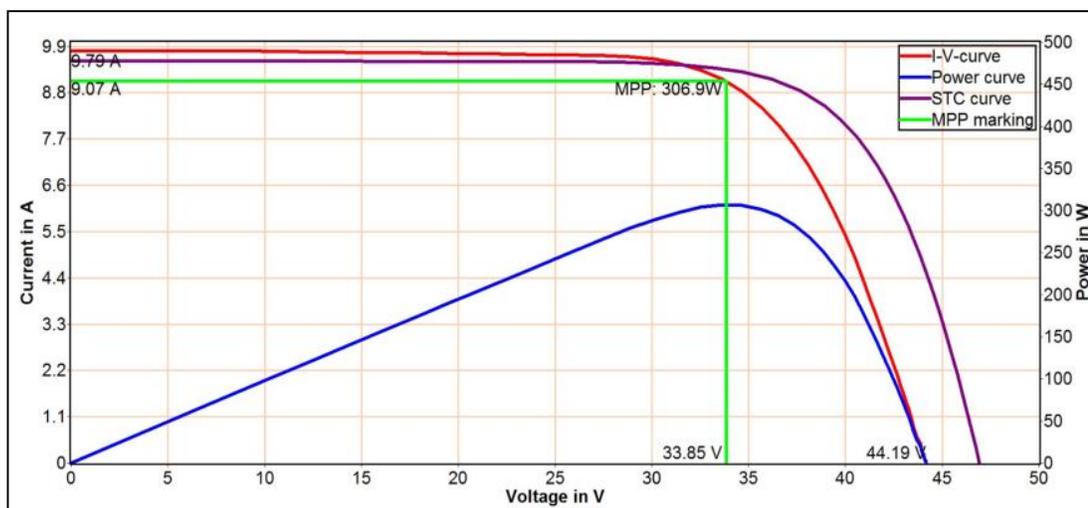


Figura 41. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico monocristalino 1 con limpieza.

Tabla 14

Resultados del módulo fotovoltaico monocristalino 1 con limpieza.

| | Medido | STC | NOCT | Referencia |
|-------------------------------|---------------|------------|-------------|-------------------|
| P_{pmp} (W/W _P) | 306.9 | 333.1 | 277.5 | 370 |
| I_{pmp} (A) | 9.07 | 8.84 | 7.07 | 9.21 |
| V_{pmp} (V) | 33.8 | 37.7 | 39.2 | 40.2 |
| I_{sc} (A) | 9.79 | 9.55 | 7.64 | 9.90 |
| V_{oc} (V) | 44.2 | 46.92 | 47.37 | 48.2 |
| R_s (Ω) | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.3 |
| R_s (k Ω) | >0.3 | >0.3 | >0.4 | >0.3 |
| FF (%) | 70.9 | 74.4 | 76.7 | 77.6 |
| E_{eff} (W/m ²) | 1026 | 1000 | 800 | 1000 |
| T_{mod} (°C) | 42.4 | 25 | 37.5 | 25 |

En la Tabla 14, se muestran los resultados del trazado de curvas I-V del módulo fotovoltaico monocristalino 1 con limpieza a una irradiancia de 1026 W/m^2 y una temperatura de celda de $42.4 \text{ }^\circ\text{C}$ obteniendo una potencia máxima de 306.9 W . Todo ellos son datos del módulo fotovoltaico monocristalino 1 con limpieza tomados el 23 de agosto del 2023 a las 10:35:50 AM.

b) Módulo fotovoltaico monocristalino 2 con limpieza

En la Figura 42, se muestra las curvas características del módulo fotovoltaico monocristalino 1 con limpieza, la curva de potencia medido es de color azul, la curva I-V medido de color rojo, la curva I-V en condiciones estándares de prueba (STC) se encuentra de color morado y las líneas de color verde son los puntos de máxima potencia, tensión y corriente. En la Tabla 15, se muestran resultados del trazado de curvas I-V del módulo fotovoltaico monocristalino 2 con limpieza a una irradiancia de 1029 W/m^2 y una temperatura de celda de $42.9 \text{ }^\circ\text{C}$ obteniendo una potencia máxima de 304.4 W . Todo ellos son datos del módulo fotovoltaico monocristalino 2 con limpieza tomados el 23 de agosto del 2023 a las 10:37:32 AM.

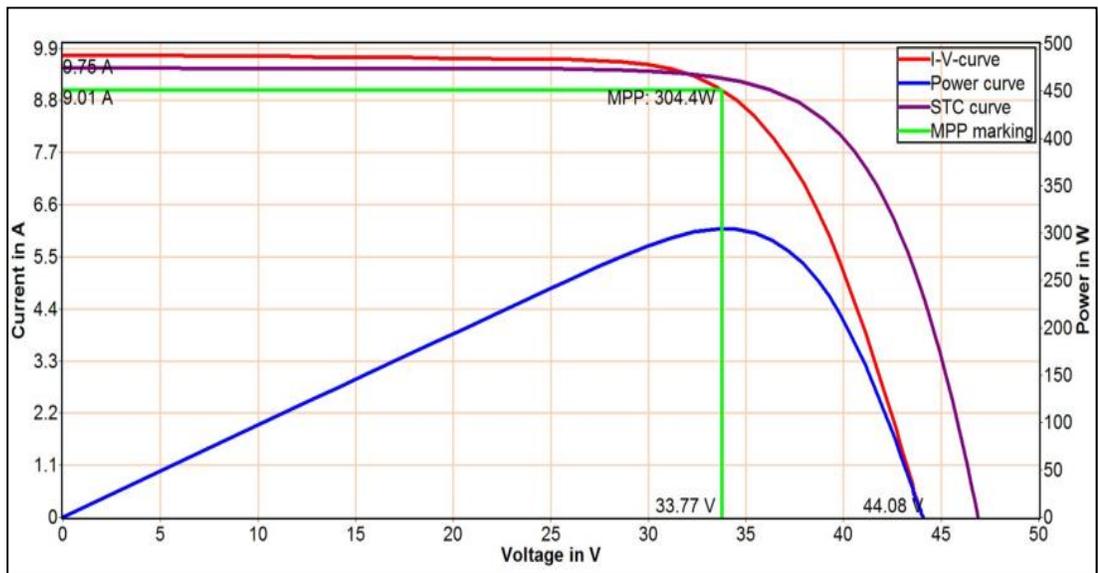


Figura 42. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico monocristalino 2 con limpieza.

Tabla 15

Resultados del módulo fotovoltaico monocristalino 2 con limpieza.

| | Medido | STC | NOCT | Referencia |
|-------------------------------|---------------|------------|-------------|-------------------|
| P_{pmp} (W/W _p) | 304.4 | 330.5 | 275 | 370 |
| I_{pmp} (A) | 9.01 | 8.76 | 7.01 | 9.21 |
| V_{pmp} (V) | 33.8 | 37.7 | 39.3 | 40.2 |
| I_{sc} (A) | 9.75 | 9.48 | 7.58 | 9.90 |
| V_{oc} (V) | 44.1 | 46.89 | 47.33 | 48.2 |
| R_s (Ω) | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.3 |
| R_s (k Ω) | >0.3 | >0.4 | >0.4 | >0.3 |
| FF (%) | 70.8 | 74.4 | 76.6 | 77.6 |
| E_{eff} (W/m ²) | 1029 | 1000 | 800 | 1000 |
| T_{mod} (°C) | 42.9 | 25 | 37.8 | 25 |

c) Módulo fotovoltaico monocristalino 3 con limpieza

En la Figura 43, la curva de potencia medido es de color azul, la curva I-V medido de color rojo, la curva I-V en condiciones estándares de prueba (STC) se encuentra de color morado y las líneas de color verde son los puntos de máxima potencia, tensión y corriente.

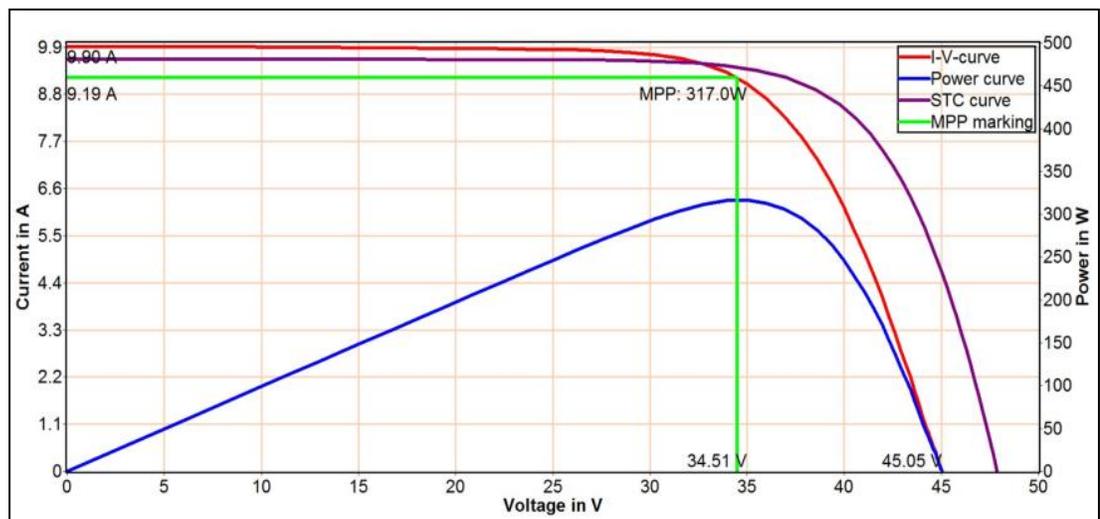


Figura 43. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico monocristalino 3 con limpieza.

En la Tabla 16, se muestran los resultados del trazado de curvas I-V del módulo fotovoltaico monocristalino 3 con limpieza a una irradiancia de 1030 W/m^2 y una temperatura de celda de $42.7 \text{ }^\circ\text{C}$ obteniendo una potencia máxima de 317 W . Todo ellos son datos del módulo fotovoltaico monocristalino 3 con limpieza tomados el 23 de agosto del 2023 a las 10:39:14 AM.

Tabla 16

Resultados del módulo fotovoltaico monocristalino 3 con limpieza.

| | Medido | STC | NOCT | Referencia |
|---|---------------|------------|-------------|-------------------|
| $P_{\text{pmp}} (\text{W}/\text{W}_\text{P})$ | 317 | 343.4 | 286.3 | 370 |
| $I_{\text{pmp}} (\text{A})$ | 9.19 | 8.92 | 7.13 | 9.21 |
| $V_{\text{pmp}} (\text{V})$ | 34.5 | 38.5 | 40.1 | 40.2 |
| $I_{\text{sc}} (\text{A})$ | 9.90 | 9.62 | 7.69 | 9.90 |
| $V_{\text{oc}} (\text{V})$ | 45 | 47.88 | 48.35 | 48.2 |
| $R_s (\Omega)$ | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.3 |
| $R_s (\text{k}\Omega)$ | >0.3 | >0.3 | >0.4 | >0.3 |
| FF (%) | 71 | 74.6 | 77 | 77.6 |
| $E_{\text{eff}} (\text{W}/\text{m}^2)$ | 1030 | 1000 | 800 | 1000 |
| $T_{\text{mod}} (\text{ }^\circ\text{C})$ | 42.7 | 25 | 37.6 | 25 |

4.3.2 Temperatura de los módulos fotovoltaico monocristalino con limpieza

En la Figura 44, se muestra la imagen térmica y las temperaturas de los 3 módulos fotovoltaicos monocristalinos evaluados con limpieza tomados el día 23 de agosto del 2023 a las 10:37:32 AM a una irradiancia de 1029.09 W/m^2 . En la Tabla 17, se muestran los resultados del análisis de temperatura de placa, donde el módulo fotovoltaico monocristalino 1 tiene una temperatura máxima de $47 \text{ }^\circ\text{C}$ y un promedio de todo el módulo de $45.4 \text{ }^\circ\text{C}$, el módulo 2 tiene una temperatura máxima de $47.7 \text{ }^\circ\text{C}$ y un promedio de $45.9 \text{ }^\circ\text{C}$ y el módulo 3 una temperatura máxima de $44.8 \text{ }^\circ\text{C}$ y un promedio de $43.2 \text{ }^\circ\text{C}$.

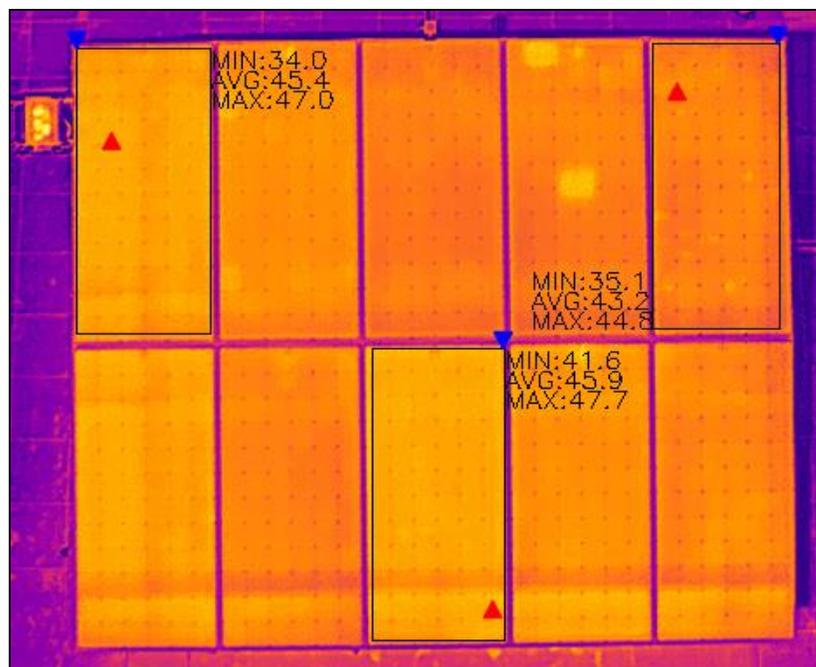


Figura 44. Temperatura de los módulos fotovoltaicos monocristalinos evaluados con limpieza.

Tabla 17

Resumen de temperaturas de placa de los 3 módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza.

| | Fecha | Hora | Temperatura Máximo (°C) | Temperatura Promedio (°C) | Temperatura Mínimo (°C) |
|----------|--------------|-------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Módulo 1 | 23/08/23 | 10:37:32 | 47 °C | 45.4 °C | 34 °C |
| Módulo 2 | 23/08/23 | 10:37:32 | 47.7 °C | 45.9 °C | 41.6 °C |
| Módulo 3 | 23/08/23 | 10:37:32 | 44.8 °C | 43.2 °C | 35.1 °C |

En la Figura 45, se muestra las temperaturas más altas registradas con los sensores PT100 durante la evaluación de los módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza. En el módulo monocristalino 1 se tiene una temperatura máxima de 46.24 °C y una temperatura media diaria de 28.01 °C, en el módulo monocristalinos 2 se tiene una temperatura máxima de 44.62 °C y una temperatura media diaria de 27.76 °C y en el módulo fotovoltaico monocristalino 3 se tiene una temperatura máxima de 45.64 °C y una temperatura media diaria de 27.55 °C. Los datos recolectados por los sensores de

temperatura PT100 corresponden al 23 de agosto del 2022 a una irradiancia media diaria de 591.77 W/m^2 y una irradiancia máxima de 1068.20 W/m^2 . De los resultados obtenidos a una misma irradiancia e puede observar que en el módulo 1 presenta ligeramente una mayor temperatura de celda que el resto de los modulo fotovoltaico monocristalinos con limpieza evaluados.

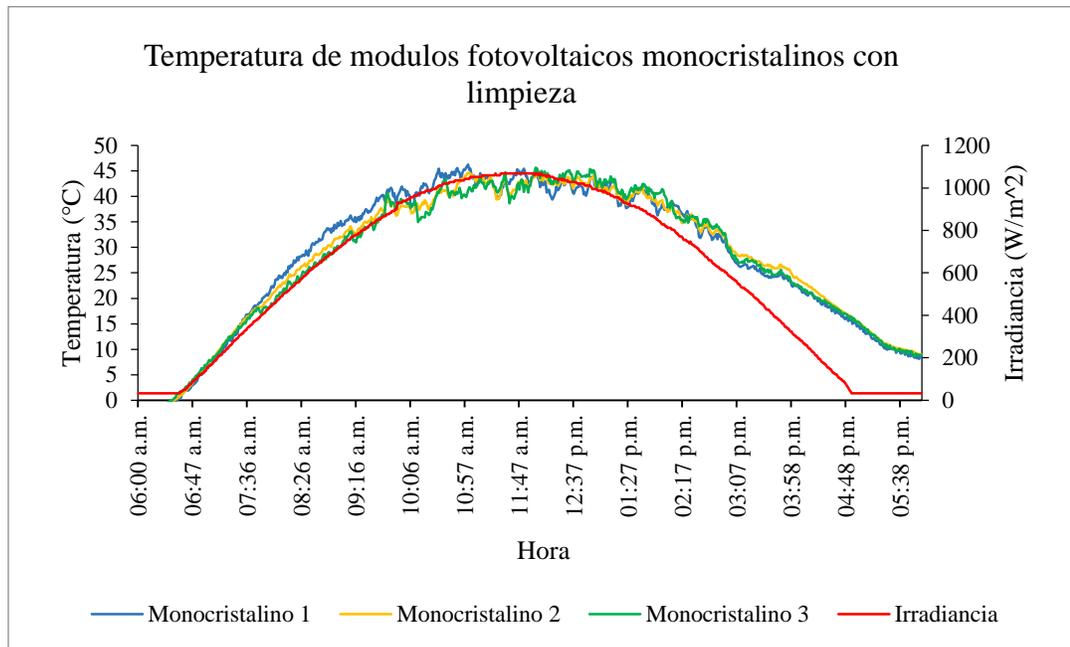


Figura 45. Temperatura de celda de los módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza.

4.3.3 Caracterización de los módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza

En la Tabla 18, se muestran los resultados de la caracterización de los 3 módulos fotovoltaicos monocristalinos evaluados con limpieza, donde los valores en STC es el promedio de los datos que se muestran en el Anexo 7, los cuales se obtuvieron mediante el trazador de curvas I-V para luego caracterizar los módulos fotovoltaicos seleccionados a través de su temperatura de placa promedio que se muestran en el Figura 44. En los resultados de la caracterización según su temperatura se puede ver una disminución de hasta 2.97 V de y una disminución de hasta 2.05 % de eficiencia en el módulo 2.

Tabla 18

Resultados de la caracterización de módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza según su temperatura.

| Módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza | | | | | | | |
|---|------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-------|
| | T | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} | η |
| | °C | A | V | A | V | W | % |
| Módulo 1 (STC) | 25 | 9.66 | 47.05 | 8.93 | 37.47 | 334.71 | 17.25 |
| Módulo 1 (Caracterizado) | 45.4 | 10.00 | 43.40 | 9.25 | 34.56 | 304.11 | 15.23 |
| Módulo 2 (STC) | 25 | 9.53 | 47.00 | 8.85 | 37.38 | 331.00 | 17.06 |
| Módulo 2 (Caracterizado) | 45.9 | 9.87 | 43.26 | 9.17 | 34.41 | 299.76 | 15.01 |
| Módulo 3 (STC) | 25 | 9.68 | 47.90 | 9.00 | 38.20 | 343.70 | 17.72 |
| Módulo 3 (Caracterizado) | 43.2 | 10.02 | 44.59 | 9.31 | 35.56 | 316.75 | 15.87 |

4.4 Evaluación de módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza

A continuación, se muestran los datos más relevantes de las curvas I-V, P-V, imágenes térmicas y comportamiento de temperatura de celda durante todo el día de los módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza evaluados durante el periodo de duración de la investigación.

4.4.1 Curvas I-V y P-V de los módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza

a) Modulo fotovoltaico policristalino 1 con limpieza

En la Figura 46, se muestra las curvas características del módulo fotovoltaico policristalino 1 con limpieza, donde la curva de potencia medido es de color azul, la curva I-V medido de color rojo, la curva I-V en condiciones estándares de prueba (STC) se encuentra de color morado y las líneas de color verde son los puntos de máxima potencia, tensión y corriente. En la Tabla 19, se muestran los resultados del trazado de curvas I-V del módulo fotovoltaico policristalino 1 con limpieza a una irradiancia de 1033 W/m² y una temperatura de celda de 43.8 °C obteniendo una potencia máxima de 229.2 W. Todo ellos son datos del módulo fotovoltaico policristalino 1 con limpieza tomados el 23 de agosto del 2023 a las 10:43:26 AM.

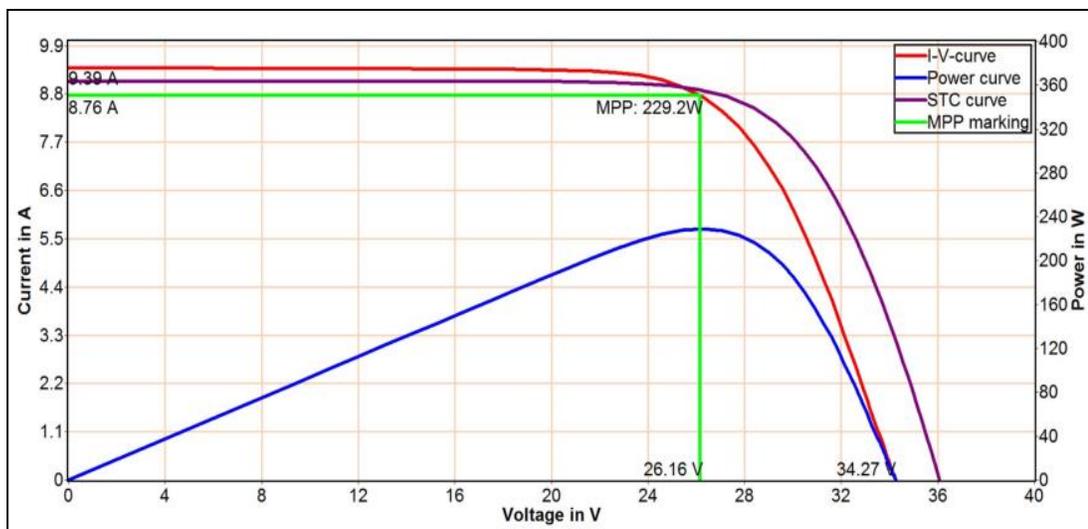


Figura 46. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico policristalino 1 con limpieza.

Tabla 19

Resultados del módulo fotovoltaico policristalino 1 con limpieza.

| | Medido | STC | NOCT | Referencia |
|---------------------------|---------------|------------|-------------|-------------------|
| P_{pmp} (W/ W_P) | 229.2 | 240.7 | 199.5 | 270 |
| I_{pmp} (A) | 8.76 | 8.48 | 6.79 | 8.63 |
| V_{pmp} (V) | 26.2 | 28.4 | 29.4 | 31.3 |
| I_{sc} (A) | 9.39 | 9.09 | 7.27 | 9.09 |
| V_{oc} (V) | 34.3 | 36.07 | 36.28 | 38.5 |
| R_s (Ω) | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.3 |
| R_s ($k\Omega$) | >0.2 | >0.2 | >0.3 | >0.2 |
| FF (%) | 71.2 | 73.4 | 75.6 | 77.2 |
| E_{eff} (W/m^2) | 1033 | 1000 | 800 | 1000 |
| T_{mod} ($^{\circ}C$) | 43.8 | 25 | 38.4 | 25 |

b) Módulo fotovoltaico policristalino 2 con limpieza

En la Figura 47, la curva P-V medido es de color azul, la curva I-V medido de color rojo, la curva I-V en STC se encuentra de color morado y las líneas de color verde son los puntos de máxima potencia, tensión y corriente. En la Tabla 20, se muestran los

resultados del trazado de curvas I-V del módulo fotovoltaico policristalino 2 con limpieza a una irradiancia de 1035 W/m^2 y una temperatura de celda de $45.4 \text{ }^\circ\text{C}$ obteniendo una potencia máxima de 223.3 W . Todo ellos son datos del módulo policristalino 2 con limpieza tomados el 23 de agosto del 2023 a las 10:45:28 AM.

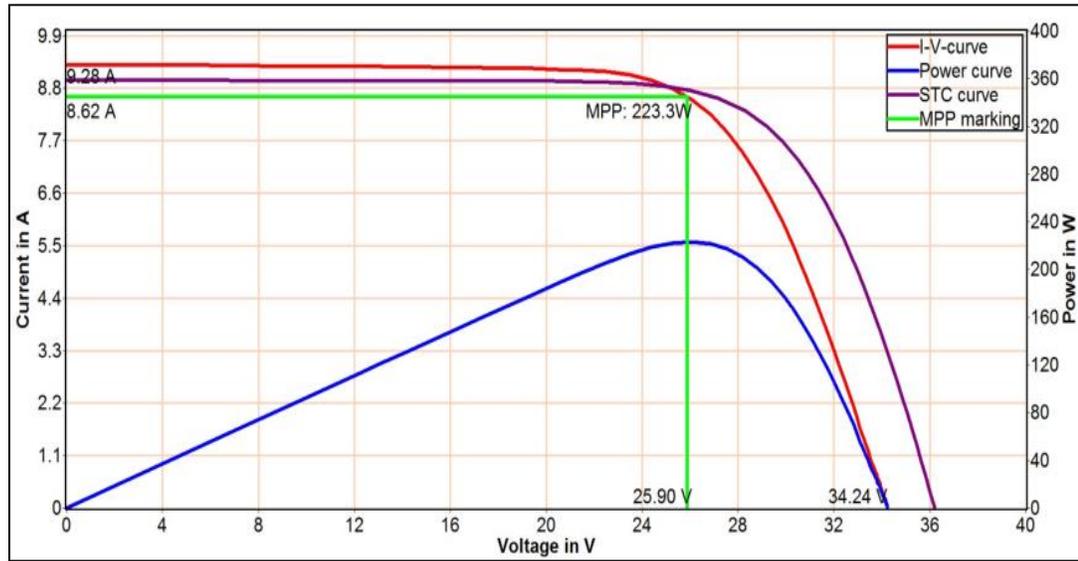


Figura 47. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico policristalino 2 con limpieza.

Tabla 20

Resultados del módulo fotovoltaico policristalino 2 con limpieza.

| | Medido | STC | NOCT | Referencia |
|--------------------------------|--------|-------|-------|------------|
| P_{pmp} (W/W _P) | 223.3 | 235.7 | 195.5 | 270 |
| I_{pmp} (A) | 8.62 | 8.33 | 6.66 | 8.63 |
| V_{pmp} (V) | 25.9 | 28.3 | 29.3 | 31.3 |
| I_{sc} (A) | 9.28 | 8.96 | 7.17 | 9.09 |
| V_{oc} (V) | 34.2 | 36.20 | 36.41 | 38.5 |
| R_s (Ω) | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.3 |
| R_s (k Ω) | >0.2 | >0.2 | >0.3 | >0.2 |
| FF (%) | 70.3 | 72.7 | 74.9 | 77.2 |
| E_{eff} (W/m ²) | 1035 | 1000 | 800 | 1000 |
| T_{mod} ($^\circ\text{C}$) | 45.4 | 25 | 39.6 | 25 |

c) Módulo fotovoltaico policristalino 3 con limpieza

En la Figura 48, se muestra las curvas características del módulo fotovoltaico policristalino 3 con limpieza, donde la curva de potencia medido es de color azul, la curva I-V medido de color rojo, la curva I-V en condiciones estándares de prueba (STC) se encuentra de color morado y las líneas de color verde son los puntos de máxima potencia, tensión y corriente.

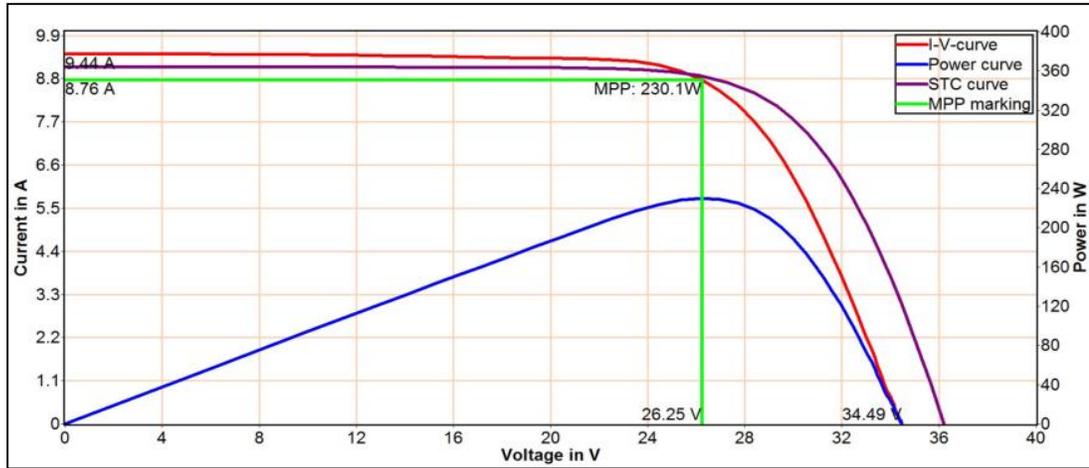


Figura 48. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico policristalino 3 con limpieza.

Tabla 21

Resultados del módulo fotovoltaico policristalino 3 con limpieza.

| | Medido | STC | NOCT | Referencia |
|-------------------------------|---------------|------------|-------------|-------------------|
| P_{pmp} (W/W _P) | 230.1 | 239.8 | 198.4 | 270 |
| I_{pmp} (A) | 8.76 | 8.45 | 6.76 | 8.63 |
| V_{pmp} (V) | 26.3 | 28.4 | 29.3 | 31.3 |
| I_{sc} (A) | 9.44 | 9.10 | 7.28 | 9.09 |
| V_{oc} (V) | 34.5 | 36.21 | 36.39 | 38.5 |
| R_s (Ω) | .04 | 0.4 | 0.4 | 0.3 |
| R_s (k Ω) | >0.2 | >0.2 | >0.3 | >0.2 |
| FF (%) | 70.7 | 72.8 | 74.9 | 77.2 |
| E_{eff} (W/m ²) | 1037 | 1000 | 800 | 1000 |
| T_{mod} (°C) | 43 | 25 | 37.7 | 25 |

En la Tabla 21, se muestran los resultados del trazado de curvas I-V del módulo fotovoltaico policristalino 3 con limpieza a una irradiancia de 1037 W/m^2 y una temperatura de celda de $43 \text{ }^\circ\text{C}$ obteniendo una potencia máxima de 230.1 W . Todo ellos son datos del módulo fotovoltaico policristalino 3 con limpieza obtenidos el 23 de agosto del 2023 a las 10:48:26 AM.

4.4.2 Temperatura de los módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza

En la Figura 49, se muestra la imagen térmica y las temperaturas de los 3 módulos fotovoltaicos policristalinos evaluados con limpieza tomados el día 23 de agosto del 2023 a las 10:45:28 AM a una irradiancia de 1035.26 W/m^2 . En la Tabla 22, se muestra el resultado de la evaluación de la temperatura de placa de los tres módulos fotovoltaicos policristalinos evaluados en la Figura 62, donde el módulo fotovoltaico policristalino 1 tiene una temperatura máxima de $52.3 \text{ }^\circ\text{C}$ y un promedio de todo el módulo de $47.5 \text{ }^\circ\text{C}$, el módulo 2 tiene una temperatura máxima de $52.7 \text{ }^\circ\text{C}$ y un promedio de $48.1 \text{ }^\circ\text{C}$ y en el módulo 3 una temperatura máxima de $47.7 \text{ }^\circ\text{C}$ y un promedio de $45.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

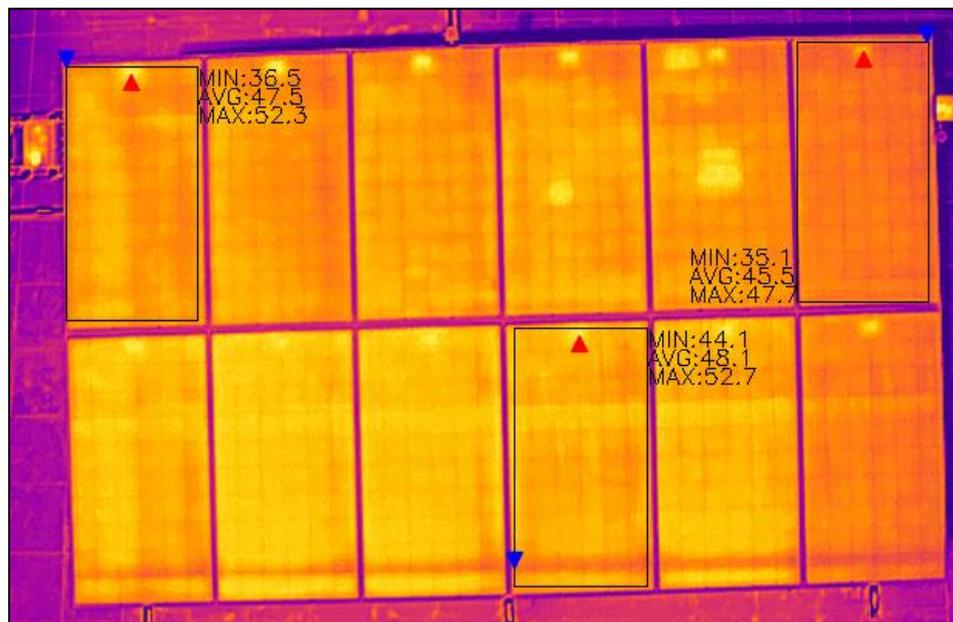


Figura 49. Temperatura de los módulos fotovoltaicos policristalinos evaluados con limpieza

Tabla 22

Resumen de temperaturas de placa de los 3 módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza.

| | Fecha | Hora | Temperatura Maximo (°C) | Temperatura Promedio (°C) | Temperatura Minimo (°C) |
|----------|----------|----------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Módulo 1 | 23/08/23 | 10:37:32 | 52.3 | 47.5 | 36.5 |
| Módulo 2 | 23/08/23 | 10:37:32 | 52.7 | 48.1 | 44.1 |
| Módulo 3 | 23/08/23 | 10:37:32 | 47.7 | 45.5 | 35.1 |

En la Figura 50, se muestra las temperaturas más altas registradas con los sensores PT100 durante la evaluación de los módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza. En el módulo monocristalino 1 se tiene una temperatura máxima de 55.21 °C y una temperatura media diaria de 33.54 °C, en el módulo monocristalinos 2 se tiene una temperatura máxima de 51.98 °C y una temperatura media diaria de 33.22 °C y en el módulo fotovoltaico monocristalino 3 se tiene una temperatura máxima de 50.25 °C y una temperatura media diaria de 32.25 °C. Los datos recolectados por los sensores de temperatura PT100 corresponden al 23 de agosto del 2022 a una irradiancia media diaria de 591.78 W/m² y una irradiancia máxima de 1068.20 W/m².

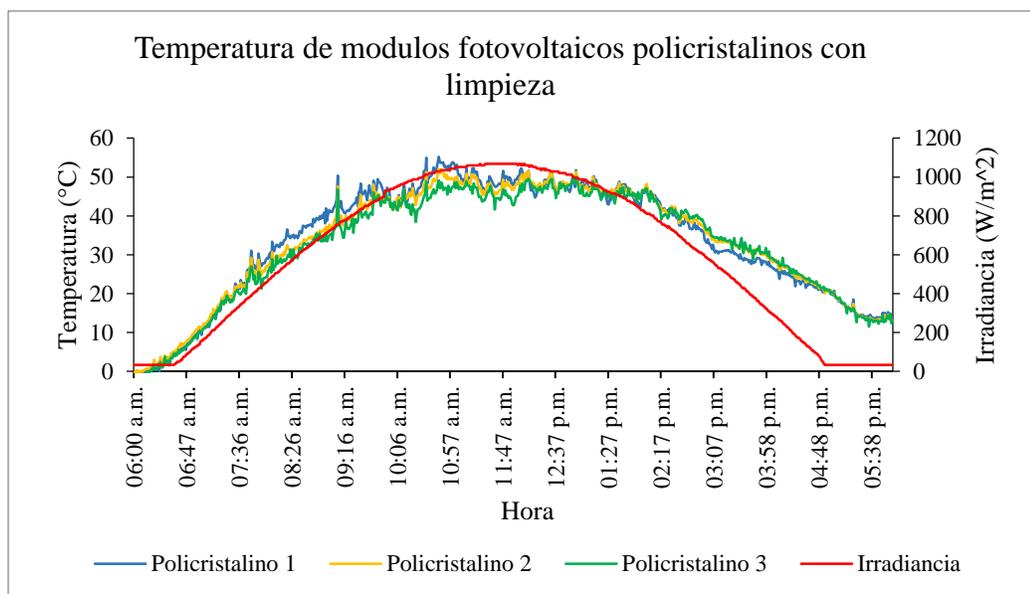


Figura 50. Temperatura de celda de módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza.

En la Figura 51, se muestra el grafico comparativo del comportamiento de la temperatura de celda de los módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos con limpieza adquiridos el mismo día y a una misma irradiancia durante todo un día desde las 6:00 AM a 6:00 PM. Los datos fueron obtenidos por el sistema de adquisición de datos con Arduino el 23 de agosto del 2023, donde se registraron las temperaturas más altas a una radiación solar constante durante el periodo de evaluación de los módulos fotovoltaicos con limpieza, para el cual se eligieron los módulos que tienen mayor temperatura de celda en ambos tecnologías solares evaluadas. En el grafico se muestra que de la temperatura de celda de los módulos fotovoltaicos policristalinos llegan a una temperatura máxima de 55.21 °C y con una temperatura media diaria de 33.55 °C son superiores a los monocristalinos que llega a una temperatura máxima de 46.24 °C y una temperatura media diaria de 28.02 °C todo ello a una irradiancia máxima de 1068.20 W/m² y una irradiancia media diaria de 591.78 W/m². Los módulos fotovoltaicos policristalinos presentan mayor temperatura que los monocristalinos debido a que tienen una mayor rapidez de absorción del calor, por lo cual puede soportar mejor el sobrecalentamiento obteniendo menores perdidas por temperatura que el monocristalino.

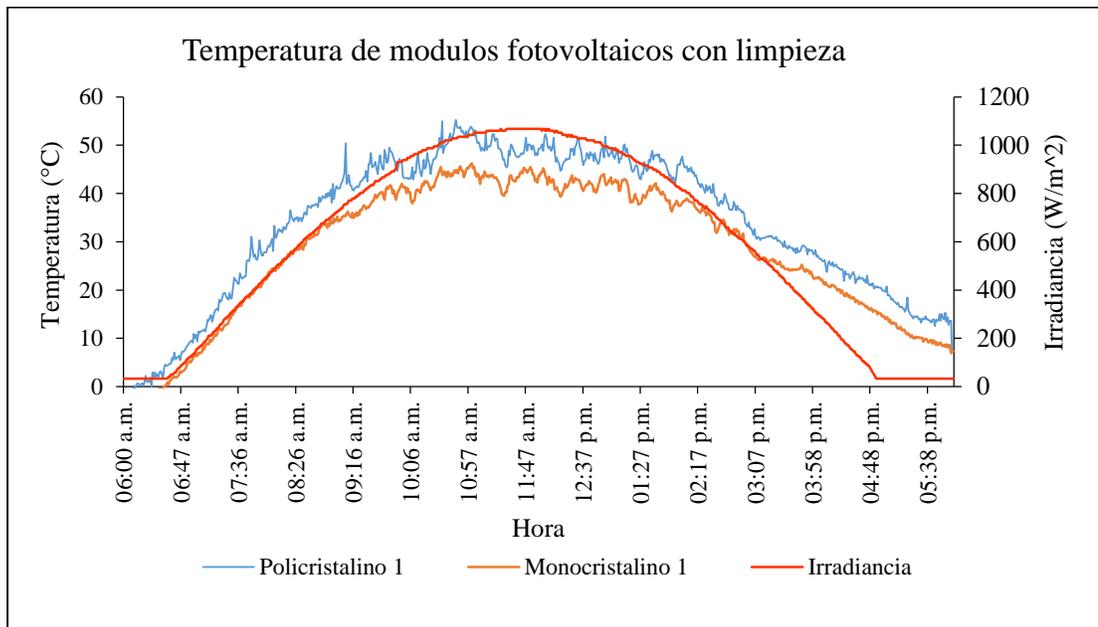


Figura 51. Comportamiento de la temperatura de celda de módulos fotovoltaicos con limpieza.

4.4.3 Caracterización de los módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza

En la Tabla 23, se muestran los resultados de la caracterización de los 3 módulos fotovoltaicos policristalinos evaluados con limpieza, donde los valores en STC es el promedio de los datos que se muestran en el Anexo 8, con el cual se realizó la luego caracterización de los módulos fotovoltaicos seleccionados según de su temperatura promedio que se muestran en el Figura 49. En los resultados de la caracterización según su temperatura se puede ver una disminución de 2.03 V de voltaje en el módulo 2 y una disminución del 1.37 % de eficiencia en el módulo 2.

Tabla 23

Resultados de la caracterización de módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza según su temperatura.

| Módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza | | | | | | | |
|---|------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-------|
| | T | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} | η |
| | °C | A | V | A | V | W | % |
| Módulo 1 (STC) | 25 | 9.13 | 36.39 | 8.54 | 28.29 | 241.52 | 14.91 |
| Módulo 1 (Caracterizado) | 47.5 | 9.58 | 33.85 | 8.96 | 26.31 | 227.54 | 13.57 |
| Módulo 2 (STC) | 25 | 9.13 | 36.56 | 8.51 | 28.30 | 240.71 | 14.86 |
| Módulo 2 (Caracterizado) | 48.1 | 9.58 | 33.94 | 8.93 | 26.27 | 226.17 | 13.49 |
| Módulo 3 (STC) | 25 | 9.12 | 36.50 | 8.50 | 28.29 | 240.32 | 14.83 |
| Módulo 3 (Caracterizado) | 45.5 | 9.56 | 34.18 | 8.90 | 26.49 | 228.40 | 13.62 |

4.5 Perdidas de potencia por altas temperaturas en los módulos fotovoltaicos

4.5.1 Perdidas de potencia por temperatura en módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza

En la Figura 52, se muestra las pérdidas de potencia por temperatura de placa en el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza, donde las barras de color azul es la potencia máxima en condiciones estándares de prueba (STC) a una irradiancia de 1000 W/m² y 25 °C de cada modulo fotovoltaico evaluado y la barra de color naranja es la potencia máxima caracterizada a través de métodos matemáticos según temperatura de placa y a una irradiancia de 997.20 W/m². En el modulo 1 a una

temperatura de 41.5 °C se tiene una pérdida de potencia de 32.19 W igual a 10.77 %, en el módulo 2 a una temperatura de 42.2 °C una pérdida de potencia de 32.84 W equivalente a 11.27 % y en el módulo 3 a una temperatura de 37.4 °C se tiene una pérdida de potencia del 24.96 W equivalente a 4.86 %. De los resultados podemos mencionar que a mayores temperaturas del módulo fotovoltaico monocristalino sin limpieza mayores serán las pérdidas por temperatura .

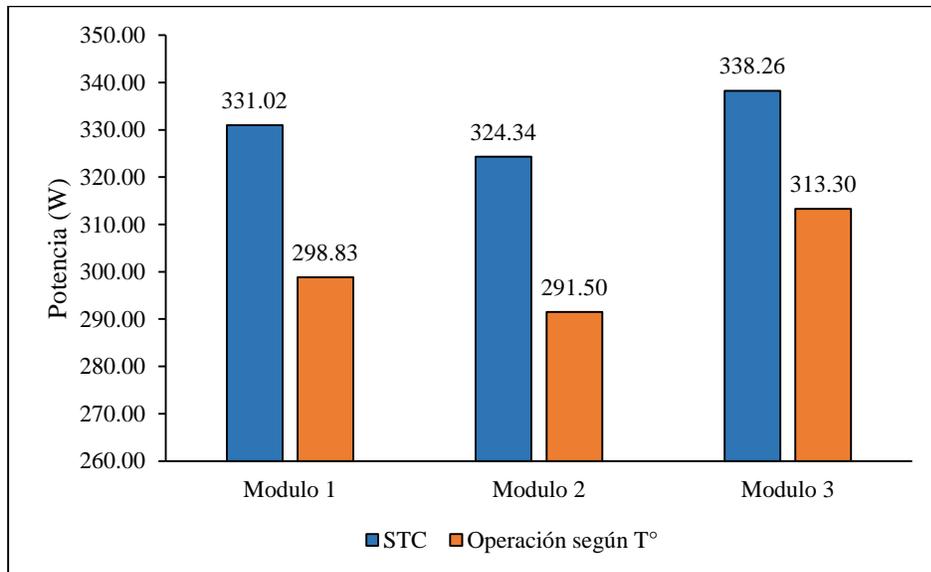


Figura 52. Pérdidas de potencia según temperatura de operación en módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza.

4.5.2 Pérdidas de potencia por temperatura en módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza

En la Figura 53, se muestra las pérdidas de potencia por temperatura de operación en módulos fotovoltaico policristalinos sin limpieza. Las barras de color rojo es la potencia máxima en condiciones estándares de prueba (STC) a una irradiancia de 1000 W/m² y 25 °C de cada modulo fotovoltaico evaluado y la barra de color verde es la potencia máxima caracterizada a través de métodos matemáticos según temperatura de placa y a una irradiancia de 1012.97 W/m². En el modulo 1 a una temperatura de 42.7 °C se tiene una pérdida de potencia de 13.87 W equivalente al 6.24 %, en el módulo 2 a una temperatura de 45.1°C una pérdida de potencia de 15.70 W equivalente a 7.35 % y en el módulo 3 a una temperatura de 43.4 °C se tiene una pérdida de potencia del 14.50 W equivalente a 6.57 %. De los resultados podemos mencionar que a mayores

temperaturas del módulo fotovoltaico policristalino sin limpieza mayores serán las pérdidas por temperatura.

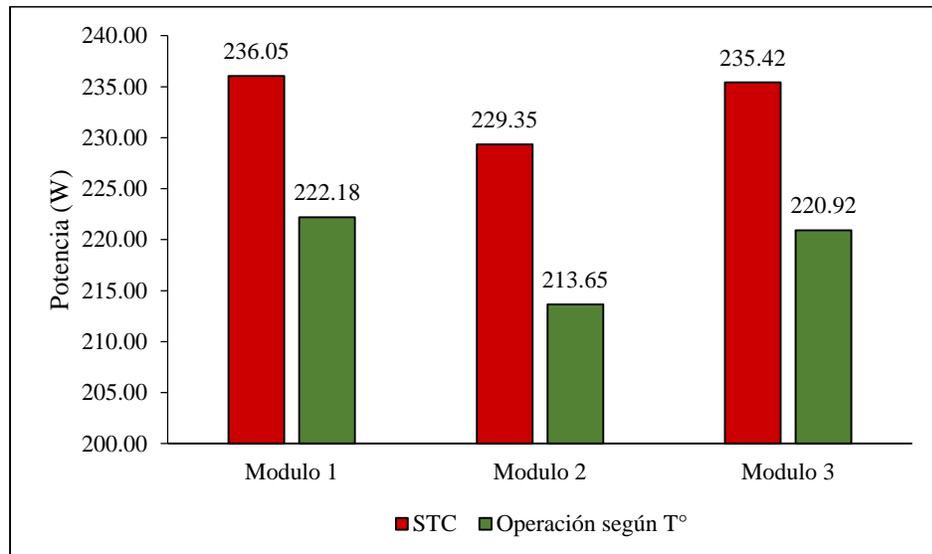


Figura 53. Pérdidas de potencia según temperatura de operación en módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza.

4.5.3 Pérdidas de potencia por temperatura en módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza

En la Figura 54, se muestra las pérdidas de potencia por temperatura de operación en módulos fotovoltaico monocristalinos con limpieza.

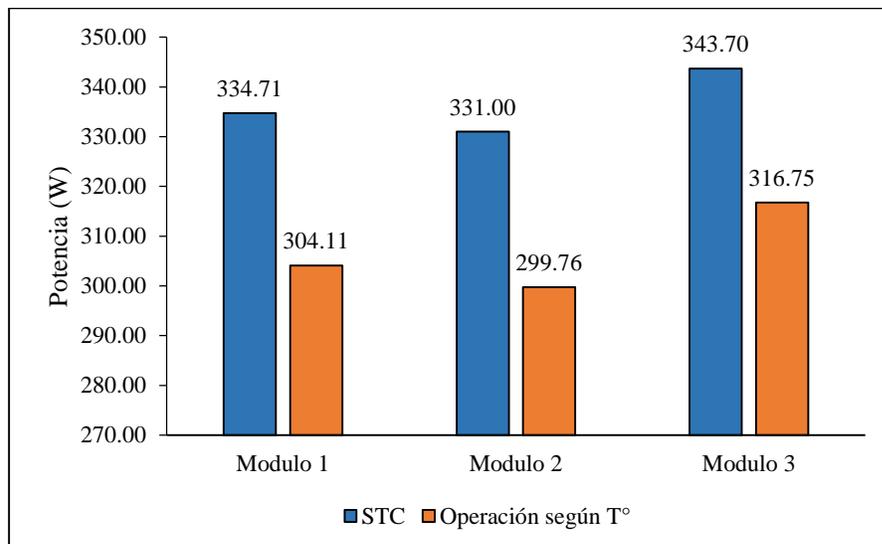


Figura 54. Pérdidas de potencia según temperatura de operación en módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza.

En el gráfico anterior las barras de color azul es la potencia máxima en condiciones estándares de prueba (STC) a una irradiancia de 1000 W/m^2 y $25 \text{ }^\circ\text{C}$ de cada módulo fotovoltaico evaluado y la barra de color naranja es la potencia máxima caracterizada a través de métodos matemáticos según temperatura de placa y a una irradiancia de 1029.09 W/m^2 . En el módulo 1 a una temperatura de $45.4 \text{ }^\circ\text{C}$ tiene una pérdida de potencia de 30.60 W equivalente al 10.06% , en el módulo 2 a una temperatura de $45.9 \text{ }^\circ\text{C}$ una pérdida de potencia de 31.19 W igual a 10.42% y en el módulo 3 una temperatura de $43.2 \text{ }^\circ\text{C}$ se tiene una pérdida de potencia del 26.95 W equivalente a 8.51% . De los resultados podemos mencionar que a mayores temperaturas del módulo fotovoltaico monocristalino con limpieza mayores serán las pérdidas por temperatura.

4.5.4 Pérdidas de potencia por temperatura en módulos fotovoltaico policristalinos con limpieza

En la Figura 55, se muestra las pérdidas de potencia por temperatura de operación en módulos fotovoltaico policristalinos con limpieza.

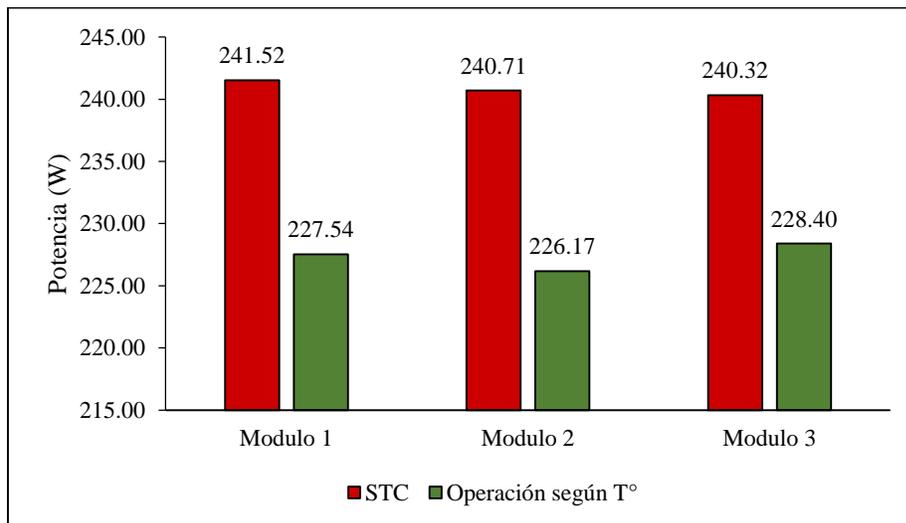


Figura 55. Pérdidas de potencia según temperatura de operación en módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza.

Las barras de color rojo es la potencia máxima en condiciones estándares de prueba (STC) a una irradiancia de 1000 W/m^2 y $25 \text{ }^\circ\text{C}$ de cada módulo fotovoltaico evaluado y la barra de color verde es la potencia máxima caracterizada a través de métodos matemáticos según temperatura de placa y a una irradiancia de 1035.26 W/m^2 . En el módulo 1 a una temperatura de $47.5 \text{ }^\circ\text{C}$ tiene una pérdida de potencia de 13.99 W

equivalente al 6.15 %, en el módulo 2 a una temperatura de 48.1 °C una pérdida de potencia de 14.54 W igual a 6.43 % y en el módulo 3 a una temperatura de 45.5 °C se tiene una pérdida de potencia del 11.93 W equivalente a 5.22 %. De los resultados podemos mencionar que a mayores temperaturas del módulo fotovoltaico policristalino con limpieza mayores serán las pérdidas por temperatura.

4.5.5 Pérdida de potencia por temperatura en módulos fotovoltaicos

En la Figura 56, se muestra el porcentaje de las pérdidas de potencia por temperatura en los módulos fotovoltaicos evaluados a partir de las condiciones estándares de prueba (STC). En módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza a una irradiancia de 997.20 W/m² el módulo 2 con una temperatura de placa de 42.2 °C presenta mayores pérdidas de potencia con el 11.27 % y en la evaluación con limpieza a irradiancia de 1029.09 W/m², el módulo 2 con una temperatura de placa de 45.9 °C presenta el 10.42 % en pérdidas de potencia. En módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza con una irradiancia de 1012.97 W/m² el módulo 2 con una temperatura de placa de 45.1 °C presenta mayores pérdidas por temperatura equivalente al 7.35 % y en la evaluación con limpieza y una irradiancia de 1035.26 W/m², el módulo 2 con una temperatura de placa de 48.1 °C llega al 6.43 % de pérdidas de potencia.

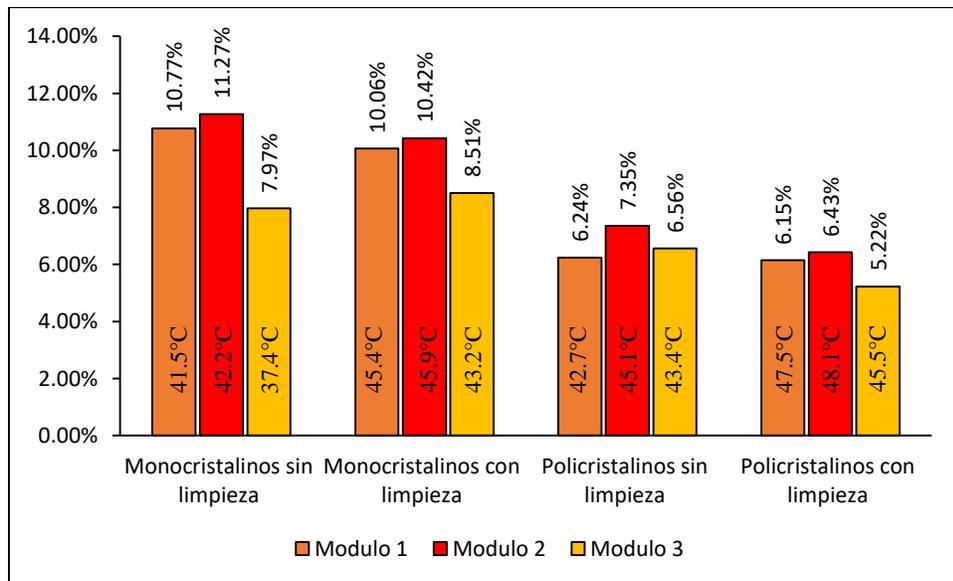


Figura 56. Pérdidas de potencia por temperatura en módulos fotovoltaicos.

Con los datos obtenidos en condiciones estándares de prueba (STC) a través del trazador de curvas I-V, los resultados nos demostraron que se encuentran muy por debajo de lo indicado en la ficha técnica brindada por el fabricante. En los módulos fotovoltaicos monocristalinos de 370 W, en las pruebas sin limpieza en STC es de 324.34 W lo cual disminuye de hasta 14.08 % (45.66 W) y con limpieza en STC es de 331 W lo que con lleva hasta 11.78 % (39 W) menor de potencia máxima a comparación de la ficha técnica. En los módulos fotovoltaicos policristalinos de 270 W, en las pruebas sin limpieza en STC se tiene una potencia máxima de 229.35 W lo cual disminuye hasta 17.72 % (40.65 W) y con limpieza en STC 240.32 W el cual involucra un 14 % (29.68 W) menor de potencia máxima a comparación de la ficha técnica. Según Camejo et al. (2019), quien realizo pruebas con un trazador de curvas I-V determino que un módulo fotovoltaico de 440 W_p solo obtuvo 222.96 W_p siendo un 8.6 % menor a lo indicado por el fabricante, siendo este resultado un indicador de degradación con el paso de los años y que el modulo fotovoltaico no es lo que indica el fabricante.

Los métodos para la caracterización de los parámetros eléctricos de los módulos fotovoltaicos fueron correctos ya que los resultados nos muestran datos similares a lo medido con el trazador de curvas I-V a cierta temperatura e irradiancia. En las pruebas sin limpieza, con la acumulación de polvo en los módulos fotovoltaicos bloquea ligeramente la radiación solar incidente sobre el modulo provocando pérdidas de potencia y eficiencia, es por ello que la potencia máxima de los módulos fotovoltaicos sin limpieza es menor que uno con limpieza.

Los resultados también mostraron que la temperatura de operación de los módulos fotovoltaicos policristalinos es superior a los monocristalinos. sin embargo, se presentan mayores pérdidas de potencia debido al incremento de temperatura en los módulos fotovoltaicos monocristalinos. Esto es debido a los coeficientes temperatura de potencia y tensión de los módulos policristalinos con $-0.31\%/^{\circ}\text{C}$ y $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$ respectivamente son menores a los monocristalinos con $-0.38038\%/^{\circ}\text{C}$ y $-0.57402\%/^{\circ}\text{C}$, en el coeficiente de temperatura de la corriente ocurre lo contrario donde el coeficiente de temperatura de la corriente del módulo fotovoltaico policristalino es $+0.06\%/^{\circ}\text{C}$ es mayor al monocristalino con $+0.02973\%/^{\circ}\text{C}$.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En los resultados obtenidos se muestra que las temperaturas en módulos fotovoltaicos policristalinos son superiores a los monocristalinos, sin embargo, se obtiene mayores pérdidas por temperatura en módulos fotovoltaicos monocristalinos a comparación de los policristalinos.

Se logró caracterizar los parámetros eléctricos de los módulos fotovoltaicos evaluados según su temperatura de placa obtenidas por la cámara termográfica. Las más altas temperaturas registradas se dieron en la evaluación con limpieza, donde en los módulos fotovoltaicos monocristalinos alcanzaron una temperatura de placa de 45.9 °C provocando una caída de tensión de 2.97 V y la disminución de 2.05 % de eficiencia, en los módulos fotovoltaicos policristalinos con una temperatura de placa de 48.1 °C tiene una caída de voltaje de 2.03 V y la disminución de 1.37 % de eficiencia.

Durante el periodo y horarios de inspección con la cámara termográfica utilizada no se encontraron puntos calientes o hot spot en los módulos fotovoltaicos evaluados con y sin limpieza, a excepción de los módulos fotovoltaicos policristalinos 1 y 2 donde se alcanzaron temperaturas de 52.3 °C y 52.7 °C respectivamente, los cuales son ocasionados por la caja de conexiones de diodos de bypass de los módulos fotovoltaicos mencionados. Dichas temperaturas serán aún mayores en horas del medio día ya que hay un aumento de la irradiancia.

Se determinó las pérdidas de potencia por temperatura en los módulos fotovoltaicos donde en las pruebas sin limpieza se tuvieron mayores temperaturas. Donde los módulos fotovoltaicos monocristalinos con una temperatura de 45.9°C tiene una pérdida de potencia de 31.24 W equivalente al 10.42 %, mientras que en los módulos fotovoltaicos policristalinos a una temperatura de 48.1 °C se tiene una pérdida de potencia de 14.54 W equivalente al 6.43 %. con lo cual concluimos que los módulos fotovoltaicos monocristalinos presentan mayores pérdidas de potencia por temperatura a comparación de los policristalinos.

5.2 Recomendaciones

Después de concluir este proyecto de investigación se puede plantear las siguientes recomendaciones:

- Realizar las inspecciones termográficas con los módulos fotovoltaicos limpios.
- Enfocar y mantener estable la cámara termográfica al momento de tomar imágenes térmicas.
- Evitar días nublados y horas del mediodía para evitar reflectancia que alteren la exactitud de la medición de temperatura con cámara termográfica con dron. Caso contrario buscar otras normativas y bajo qué condiciones realizarlas.
- En caso de utilizar sensores de temperatura PT100 para medir su temperatura de celda de los módulos fotovoltaicos, evitar utilizar cintas adhesivas que generen puntos calientes en los módulos fotovoltaicos.
- Desarrollar mantenimientos preventivos con cámara termográfica y trazador de curvas I-V a todos los sistemas fotovoltaicos instalados en el Instituto de Investigación de Energías Renovables y Eficiencia Energética.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albornoz, D. A. W. (2018). *Diseño y construcción de un sistema de bajo costo para estimación en tiempo real de irradiancia y temperatura en paneles solares* [Universidad TALCA]. <http://dspace.usalca.cl/bitstream/1950/12309/3/tutcur-20180021.pdf>
- Alonso, J. (2006). Radiación Solar. *Sunfields*. <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/radiacion-solar/>
- Alvarez, G. (2018). *Caracterizacion de instalaciones fotovoltaicas mediante tecnicas de termografia inflaraja*. http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/tesisuned:ED-Pg-TecInd-Galvarez/Alvarez_Tey_German_Tesis.pdf
- Amesquita, B., Ulloa, P., Suttner, A., Bruno, R., Piccioli, I., Laguarda, A., & Alonso, R. (2020). Sombreamiento, suciedad y roturas en módulos PV: un ensayo preliminar. *Colibri - Universidad de La Republica*. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/28414>
- Arteaga, H., & Ucañan, L. (2021). *Influencia de la acumulación de polvo en la generación de potencia de módulos fotovoltaicos* [Universidad Nacional del Santa]. <https://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14278/3937/52449.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- CambioEnergetico. (2021). *¿Cómo afecta la suciedad a las placas solares?* <https://www.cambioenergetico.com/blog/suciedad-placas-solares/>
- Camejo, J., Rivas, H., Ramos, R., & Proenza, R. (2019). Caracterizacion electrica de modulos fotovoltaicos. *Ecosolar*. <http://ecosolar.cubaenergia.cu/index.php/ecosolar/article/view/67/93>
- Casavilca, C., & Dueñas, K. (2019). *Modelamiento matematico y validacion experimental para incrementar la eficiencia de un panel fotovoltaico en un sistema hibrido* [Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/5992>
- Castro, J. (2019). *Análisis de pérdidas por suciedad en plantas fotovoltaicas* [universidad Carlos III de Madrid]. https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/29375/TFM_Jesus_Castro_Martinez_2019.pdf?

sequence=1&isAllowed=y

- Collado, E. (2015). Los efectos de la temperatura en la producción de la instalaciones fotovoltaicas. *Energías Renovables*. <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/los-efectos-de-la-temperatura-en-la-20150713>
- Constante, A., & Chipugsi, J. (2023). *Estudio de la eficiencia energética en la generación fotovoltaica, a partir de diferentes tecnologías y sus componentes*. [Universidad Técnica de Cotopaxi]. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/10366>
- Fernández, J. (2023). *Análisis de la influencia de los gradientes de temperatura entre células en la producción de un módulo fotovoltaico* [Universidad de Sevilla]. <https://hdl.handle.net/11441/149159>
- Hernández, E. M. (2020). *Cámaras termográficas (IR termico)*. 2019–2020. https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/21422/Camaras_termograficas_%28IR_termico%29.pdf?sequence=1
- Hurtado, P. N. (2016). *Termografía Infrarroja Aplicada Al Análisis Del Efecto De Ensuciamiento En Equipos Solares Fovoltaticos*. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/23342/3560900257157UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Morales, P. (2020). *Deteccion de anomalias en paneles Fovoltaticos en base A imagenes Multiespectrales*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173935>
- Núñez, A. (2022). *Análisis termográfico de paneles fotovoltaicos mediante procesamiento digital de imágenes para el mantenimiento preventivo-predictivo de la futura planta solar fotovoltaica Indiana-Loreto* [Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <http://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/5181/253T20201002.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ossa, V. (2017). *Ensamble y caracterización de un panel solar fotovoltaico* [universidad Tecnológica de Pereira]. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/525f3203-4bf3-42f7-a7d5-fe8239c0c669/content>

- Perpiñan, O. (2013). *Energía Solar Fotovoltaica*.
<http://procomun.wordpress.com/documentos/libroesf>
- Pincay, J. (2017). *Análisis experimental de la relación de la temperatura de operación de un módulo fotovoltaico y su voltaje de circuito abierto*. [Universidad Autónoma de Occidente].
<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10010/T07673.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Pinto, A. (2019). *Estado del arte de estrategias de mantenimiento en grandes parques fotovoltaicos* [Pontificia Universidad Católica de Valparaíso].
http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-0000/UCB0312_01.pdf
- Quispe, L., Huillca, M., & Sotomayor, G. (2018). Estimación de la Radiación Solar Global en la Ciudad de Puno Mediante la Aplicación del Modelo Bristown y Campbell. *ÑAWPARISUN - Revista de Investigación Científica, 1*.
- Ramos, J. B. (2022). *Análisis de defectos en Paneles Solares de Plantas Fotovoltaicas mediante Termografía y electroluminiscencia* [Universidad de Valladolid].
<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/52181/TFG-I-2139.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sanchez, P. (2021). *Inspección de paneles solares en plantas fotovoltaicas mediante curvas corriente-voltaje (I-V)*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/51654>
- Serrano, R. (2017). Tipo de paneles fotovoltaicos. *Tritec Intervento*. <https://tritec-intervento.cl/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/>
- Tavares, J., & Galdino, M. (2014). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*.
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7576921/mod_resource/content/0/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf
- Vargas, T., & Abrahamse, A. (2014). Trazador de curvas I-V de código abierto para monitoreo de rendimiento de paneles fotovoltaicos en Bolivia. *Scielo*.

ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica del módulo fotovoltaico policristalino.

TP660P

60 CELL SERIES



KEY FEATURES

275W

Highest power output

10 years

Material & workmanship warranty

PID Free

Certified by TUV Rheinland

25 years

Linear power output warranty

- Positive power tolerance: 0-+3%
- Robust design: Certified to withstand up to 2400 Pa wind load and up to 5400 Pa snow load
- Proved high reliability built on dozens of projects
- Four busbar cell: Improve the efficiency of modules

QUALITY WARRANTY

TALESUN guarantees that defects will not appear in materials and workmanship defined by IEC61215, IEC61730 and UL1703 under normal installation, use and maintenance as specified in Talesun's installation manual for 10 years from the warranty starting date.



ABOUT TALESUN

Zhongli Talesun Solar Co., Ltd. is one of the world's largest integrated PV manufacturers. Its standard and high-efficiency product offerings are among the most powerful and cost-effective in the industry. With over 3.5 GW of modules installed globally, we are a leading solar energy company built upon proven product reliability and sustainable performance.

PERFORMANCE WARRANTY

Polycrystalline Solar Cell Modules

- During the first year, TALESUN guarantees the nominal power output of the product will be no less than 97.5% of the labeled power output.
- From year 2 to year 24, the nominal power decline will be no more than 0.7% in each year; by the end of year 25, the nominal power output will be no less than 80.7% of the labeled power output.

ELECTRICAL PARAMETERS

| Model | TP660P | | | |
|-------------------------------|------------------------|----------|------|------|
| | Maximum Power (Pmax/W) | 260 | 265 | 270 |
| Operating Voltage (Vmpp/V) | 30.6 | 31.0 | 31.3 | 31.7 |
| Operating Current (Impp/A) | 8.50 | 8.56 | 8.63 | 8.69 |
| Open-Circuit Voltage (Voc/V) | 37.9 | 38.2 | 38.5 | 38.7 |
| Short-Circuit Current (Isc/A) | 8.97 | 9.04 | 9.09 | 9.17 |
| Module Efficiency η (%) | 16.0 | 16.3 | 16.6 | 16.9 |
| Power Tolerance | 0-+3% | | | |
| Temperature Coefficient | Pmax | -0.40%/C | | |
| | Voc | -0.31%/C | | |
| | Isc | +0.06%/C | | |
| Noct | 45±2 C | | | |

* STC: 1000w/m², 25 C, AM 1.5

OTHER PARAMETERS

| | |
|---------------------------|---|
| Cell Type | Poly Crystalline |
| Cell Dimensions | 156*156mm(6inch) |
| Cell Arrangement | 60(6*10) |
| Weight | 18.5kg(40.8lbs) |
| Module Dimensions | 1640*990*35mm(64.6*39.0*1.4inch) |
| Cable Length | 900mm(35.4inch) |
| Cable Cross Section Size | 4mm ² (0.006sq.in) |
| Front Glass | 3.2mm High Transmission, Tempered Glass |
| No. of Bypass Diodes | 3/6 |
| Packing Configuration (1) | 30pcs/Pallet, 840pcs/40hq |
| Packing Configuration (2) | 30pcs+5pcs/Pallet, 910pcs/40hq |
| Frame | Anodized Aluminium Alloy |
| Junction Box | IP65/IP67 |

OPERATING CONDITIONS

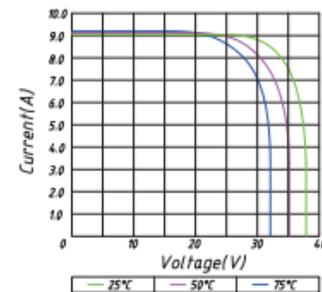
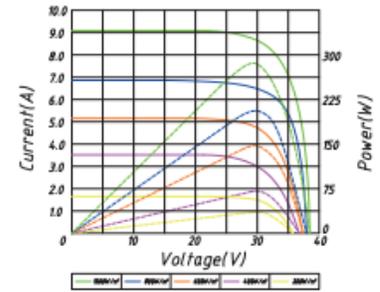
| | |
|------------------------|----------------|
| Maximum System Voltage | 1000V/DC(IEC) |
| Operating Temp. | -40 C -+85 C |
| Maximum Series Fuse | 15A |
| Static Loading | 5400Pa |
| Conductivity at Ground | ≤ 0.1Ω |
| Safety Class | II |
| Resistance | ≥100MΩ |
| Connector | MC4 Compatible |

ZHONGLI TALESUN SOLAR CO.,LTD.

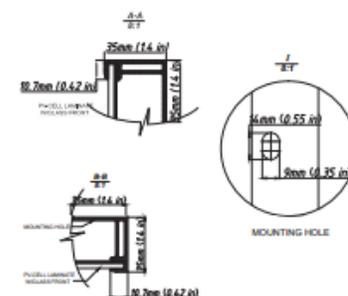
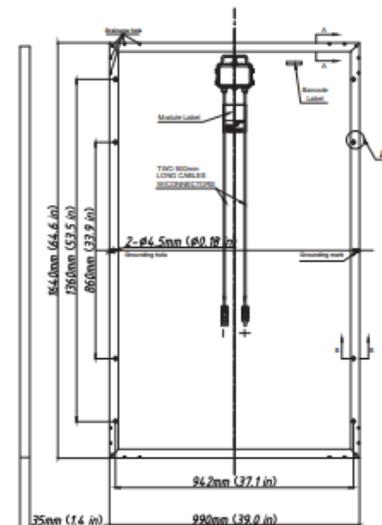
Email: sales@talesun.com Web: www.talesun.com Tel: +86 400 885 1098

I-V CURVE

TP660P Pm(W)260



TECHNICAL DRAWINGS



Anexo 2. Ficha técnica del módulo fotovoltaico monocristalino.



ESPSC

Monocrystalline Solar Module

- Q High-quality**
With 72 cells and 3 bypass diodes in power classes from 300 to 370 Wp for grid connected systems.
- \$ Reliable**
The high quality level of ERA SOLAR guarantees long life-time and high earnings.
- kg Solid**
An Aluminium hollow-chamber frame on each side combined with low-iron and tempered solar glass ensures high load capacity resistance.
- Wp Performance guarantee**
ERA SOLAR grants a power guarantee of 90% of nominal power output up to 10 years and 80% up to 25 years.

| | | | | | | | |
|----------|--------------------------|-----------|------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|
| + | WATTS POSITIVE TOLERANCE | 10 | YEARS PRODUCT WARRANTY | 10 | YEARS PERFORMANCE GUARANTEE 90% | 25 | YEARS PERFORMANCE GUARANTEE 80% |
|----------|--------------------------|-----------|------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|

115/  Zhejiang ERA Solar Technology Co., Ltd.
www.erasolar.com.cn



ESPSC

Monocrystalline Solar Module

SPECIFICATIONS

| | |
|-----------------------------|--|
| Dimensions | 1956 x 992 x 35 mm 1956 x 992 x 40 mm 1956 x 992 x 45 mm |
| Weight | 21.5 kg |
| Frame | Aluminium hollow-chamber frame on each side |
| Glass | Low-iron and tempered glass 3.2 mm |
| Cells | 72 pcs Mono-crystalline Si-cells (156 x 156 mm) |
| Cell Embedding | EVA |
| Back-Foil | TUV certified FEVE / PET/ FEVE |
| Junction Box | |
| Cable | 4 mm ² solar cable 2 x 900 mm |
| Temperature Range | -40°C ... +85°C |
| Load Capacity | 5400 Pa |
| Application class | Class A |
| Electrical protection class | Class II |
| Fire safety class | Class C |
| Product Warranty | 10 years |
| Power Guarantee | 10 years 90% 25 years 80% |

CHARACTERISTICS

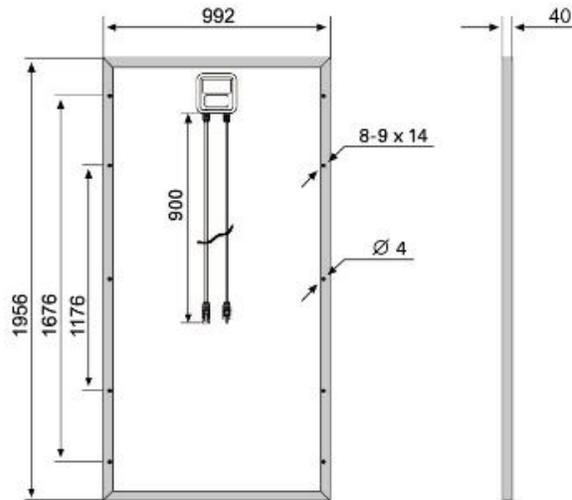
| | |
|----------------------------------|--------------|
| Max. System Voltage | 1000V/DC |
| Temperature-Coefficient I_{sc} | +0.02973%/°K |
| Temperature-Coefficient V_{oc} | -0.38038%/°K |
| Temperature-Coefficient P_{mp} | -0.57402%/°K |
| NOCT*** | 45°C |

CERTIFICATES

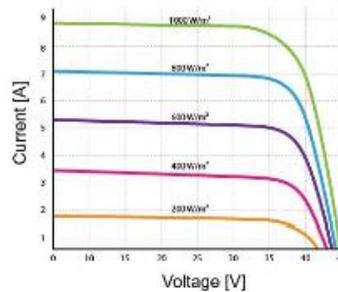
IEC 61215 edition 2 (TUV Nord)
IEC 61730 MCS INMETRO
CE CEC SALT-MIST
PID Resistant

INSURANCE

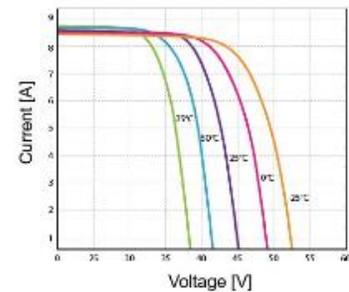
Chubb



CURRENT-VOLTAGE CURVES



Module characteristics at constant module temperatures (25°C) and different levels of irradiance.



Module characteristics at different module temperatures and constant module irradiance (1,000 W/m²).

| ESPSC TYPE | 300 | 330 | 340 | 350 | 360 | 370 |
|---|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Power Class | 300W | 330W | 340W | 350W | 360W | 370W |
| Max. Power Voltage (V_{mp})* at STC** | 37V | 37.95V | 38.5V | 39.1V | 39.6V | 40.1V |
| Max. Power Current (I_{mp}) at STC | 8.1A | 8.7A | 8.84A | 8.96A | 9.1A | 9.23A |
| Open Circuit Voltage (V_{oc}) at STC | 44.8V | 45.75V | 46.4V | 47.1V | 47.7V | 48.3V |
| Short Circuit Current (I_{sc}) at STC | 8.7A | 9.3A | 9.45A | 9.6A | 9.8A | 9.95A |
| Module Efficiency | 15.4 % | 17 % | 17.5% | 18% | 18.5% | 19% |

* MPP: Maximum Power Point

** STC (Standard Test Conditions): 1000W/m², 25°C, AM 1.5

*** Normal Operating Cell Temperature



ERA SOLAR and the ERA SOLAR logo are trademarks or registered trademarks of ERA SOLAR Corporation.
© October 2018 ERA SOLAR Corporation. All rights reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

Anexo 3. Códigos de programación en Arduino para adquisición de datos de temperatura de los módulos fotovoltaicos monocristalinos.

```
monocristalino_1 | Arduino IDE 2.2.1
Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda
Arduino Uno
monocristalino_1.ino
1 #include <Adafruit_ADS1X15.h>
2 Adafruit_ADS1015 ads1015;
3 #include <Wire.h> //Incluye libreria interfaz I2C
4 #include <SPI.h> //Incluye libreria interfaz SPI
5 #include <SD.h> //Incluye libreria para el módulo SD
6 #include <RTClib.h> //Incluye libreria para el módulo RTC
7 #define SSpin 10
8 File archivo;
9 float temperatura1;
10 float temperatura2;
11 float temperatura3;
12 String fecha;
13 String hora;
14 String horas;
15 String frase;
16 RTC_DS1307 rtc;
17 void setup() {
18
19     Serial.println("Hola!");
20     Serial.println("Obteniendo lectura de AIN0..3");
21     Serial.println("ADC Range: +/- 6.144V (1 bit = 3mV)");
22     ads1015.begin();
23     Serial.begin(9600);
24     if (!rtc.begin()) // Inicio de reloj RTC
25     {
26         Serial.println("No hay un módulo RTC");
27         while (1);
28     }
29     DateTime now = rtc.now(); // Lectura anterior RTC
30     frase = String(now.day()) + "/" + String(now.month()) + "/" + String(now.year()) + " "
31 + String(now.hour()) + ":" + String(now.minute()) + ":" + String(now.second());
32     rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__))); // Lectura actualizada RTC con la PC
33     Serial.println(" FECHA | HORA | temperatura1 | temperatura2 | temperatura3 ");
34
35     Serial.println("Iniciando tarjeta SD ..."); // Inicio de tarjeta SD
36     if(!SD.begin(SS))
37     {
38         Serial.println("Fallo de inicio SD ...");
39     }
40     else
41     {
42         archivo = SD.open("dato.txt", FILE_WRITE);
43         Serial.println("Inicializacion SD => OK");
44     }
45     Serial.println("Inicializando tarjeta...");
46 }
47 void loop()
48 {
```

```

49   int16_t adc0, adc1, adc2, adc3;
50
51   adc0 = ads1015.readADC_SingleEnded(0);
52   adc1 = ads1015.readADC_SingleEnded(1);
53   adc2 = ads1015.readADC_SingleEnded(2);
54   adc3 = ads1015.readADC_SingleEnded(3);
55   Serial.print("AIN0: "); Serial.println(adc0);
56   Serial.print("AIN1: "); Serial.println(adc1);
57   Serial.print("AIN2: "); Serial.println(adc2);
58   Serial.print("AIN3: "); Serial.println(adc3);
59   Serial.println(" ");
60
61   DateTime now = rtc.now(); // Actualización RTC
62   fecha = String(now.day()) + "/" + String(now.month()) + "/" + String(now.year());
63   hora = String(now.hour()) + ":" + String(now.minute()) + ":" + String(now.second());
64   horas = String(now.hour()) + ":" + String(now.minute());
65
66   frase = fecha + "," + hora;
67   Serial.print(frase); // Envío MSN al monitor serial
68   Serial.print(",");
69
70   int sensorValue = ads1015.readADC_SingleEnded(0);
71   float voltaje1 = sensorValue * (5.0 / 1023.0);
72   float tempe1= 47.753*voltaje1-42.419;
73   float temper1=0.5236*tempe1 - 14.422;
74   temperatura1=1.0611*temper1- 1.901;
75   Serial.println( temperatura1);
76   int sensor2 = ads1015.readADC_SingleEnded(1);
77   float voltaje2 = sensor2 * (5.0 / 1023.0);
78   float tempe2= 45.277*voltaje2-42.14;
79   float temper2= 0.543*tempe2 - 12.699;
80   temperatura2=1.0901* temper2- 1.3419;
81   Serial.println( temperatura2);
82   int sensor3 = ads1015.readADC_SingleEnded(2);
83   float voltaje3 = sensor3 * (5.0 / 1023.0);
84   float tempe3= 51.151*voltaje3-50.003;
85   float temper3= 0.4815*tempe3 - 10.838;
86   temperatura3=1.0586*temper3 - 1.7595;
87   Serial.println(temperatura3);
88   registra_sd();
89   }
90 void registra_sd(){
91
92   archivo = SD.open("dato.txt", FILE_WRITE);
93   if (archivo)
94   {
95     archivo.print(frase);
96     archivo.print(",");
97     archivo.print(temperatura1);
98     archivo.print(",");
99     archivo.print(temperatura2);
100    archivo.print(",");
101    archivo.println(temperatura3);

```

```

102     archivo.print(",");
103     archivo.close();
104     delay(60000);
105 }
106     else
107     {
108     Serial.println("Error en apertura de archivo");
109     }
110 }

```

Anexo 4. Códigos de programación en Arduino para adquisición de datos de temperatura de los módulos fotovoltaicos policristalinos.

The screenshot shows the Arduino IDE interface with the following code in the editor:

```

policristalino_1.ino
1  #include <Wire.h>           //Incluye libreria interfaz I2C
2  #include<SPI.h>           //Incluye libreria interfaz SPI
3  #include <SD.h>           //Incluye libreria para el módulo SD
4  #include <RTClib.h>       //Incluye libreria para el módulo RTC
5  #define SSpin 10
6  File archivo;
7  float temperatura1;
8  float temperatura2;
9  float temperatura3;
10 float temperatura4;
11 String fecha;
12 String hora;
13 String horas;
14 String frase;
15 RTC_DS1307 rtc;
16 void setup() {
17     Serial.begin(9600);
18     if (!rtc.begin())           // Inicio de reloj RTC
19     {
20     Serial.println("No hay un módulo RTC");
21     while (1);
22     }
23     DateTime now = rtc.now();   // Lectura anterior RTC
24     frase = String(now.day()) + "/" + String(now.month()) + "/" + String(now.year()) + " "
25     + String(now.hour()) + ":" + String(now.minute()) + ":" + String(now.second());
26     rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__))); // Lectura actualizada RTC con la PC
27     Serial.println("FECHA|HORA |temperatura1| temperatura2| temperatura3| temperatura4|");
28
29     Serial.println("Iniciando tarjeta SD ..."); // Inicio de tarjeta SD
30     if(!SD.begin(SS))
31     {
32     Serial.println("Fallo de inicio SD ...");
33     }
34     else
35     {
36     archivo = SD.open("dato.txt", FILE_WRITE);

```

```

37 Serial.println("Inicializacion SD => OK");
38 }
39 Serial.println("Inicializando tarjeta...");
40 }
41 void loop(){
42 DateTime now = rtc.now(); // Actualización RTC
43 fecha = String(now.day()) + "/" + String(now.month()) + "/" + String(now.year());
44 hora = String(now.hour()) + ":" + String(now.minute()) + ":" + String(now.second());
45 horas = String(now.hour()) + ":" + String(now.minute());
46 frase = fecha + "," + hora;
47 Serial.print(frase); // Envío MSN al monitor serial
48 Serial.print(",");
49 int sensorValue = analogRead(A0);
50 float voltaje1 = sensorValue * (5.0 / 1023.0);
51 float tempeA= 40.839*voltaje1-34.35;
52 temperatura1=1.1433*tempeA - 2.0526;
53 Serial.println(temperatura1);
54 int sensor2 = analogRead(A1);
55 float voltaje2 = sensor2 * (5.0 / 1023.0);
56 float tempeB= 45.121*voltaje2-39.552;
57 temperatura2= 0.9933 *tempeB + 1.0177;
58 Serial.println(temperatura2);
59 int sensor3 = analogRead(A2);
60 float voltaje3 = sensor3 * (5.0 / 1023.0);
61 float tempeC= 46.962*voltaje3-42.873;
62 temperatura3=0.9934* tempeC+ 1.4078;
63 Serial.println(temperatura3);
64 int sensor4 = analogRead(A3);
65 float voltaje4 = sensor4 * (5.0 / 1023.0);
66 float tempeD= 45.277*voltaje4-42.14;
67 temperatura4 =1.0358*tempeD + 0.4908;
68 Serial.println(temperatura4);
69 registra_sd();
70 }
71 void registra_sd(){
72 archivo = SD.open("dato.txt", FILE_WRITE);
73 if (archivo) {
74 archivo.print(frase);
75 archivo.print(",");
76 archivo.print(temperatura1);
77 archivo.print(",");
78 archivo.print(temperatura2);
79 archivo.print(",");
80 archivo.print(temperatura3);
81 archivo.print(",");
82 archivo.println(temperatura4);
83 archivo.print(",");
84 archivo.close();
85 delay(60000);
86 }
87 else {
88 Serial.println("Error en apertura de archivo");
89 }
90 }

```

Anexo 5. Datos promedio de los parámetros eléctricos en STC de los módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza.

Tabla 24

Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico monocristalino 1 sin limpieza en STC.

| Módulo fotovoltaico monocristalino 1 sin limpieza en STC | | | | | | | | |
|---|----------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Fecha | Hora | T | G | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} |
| | | °C | W/m ² | A | V | A | V | W |
| 8/08/2023 | 10:19:30 | 25 | 1000 | 9.54 | 46.84 | 8.86 | 37.29 | 330.42 |
| 8/08/2023 | 14:07:58 | 25 | 1000 | 9.63 | 47.21 | 8.93 | 37.52 | 334.95 |
| 9/08/2023 | 10:02:32 | 25 | 1000 | 9.55 | 47.08 | 8.87 | 37.68 | 334.24 |
| 9/08/2023 | 14:04:32 | 25 | 1000 | 9.60 | 47.29 | 8.89 | 37.97 | 337.36 |
| 10/08/2023 | 10:09:40 | 25 | 1000 | 9.51 | 46.79 | 8.84 | 37.16 | 328.44 |
| 10/08/2023 | 14:00:40 | 25 | 1000 | 9.59 | 47.40 | 8.88 | 38.20 | 339.17 |
| 11/08/2023 | 10:14:50 | 25 | 1000 | 9.52 | 46.92 | 8.85 | 37.45 | 331.52 |
| 11/08/2023 | 14:08:16 | 25 | 1000 | 9.56 | 47.87 | 8.91 | 37.66 | 335.63 |
| 15/08/2023 | 10:12:22 | 25 | 1000 | 9.32 | 46.95 | 8.64 | 37.81 | 326.66 |
| 15/08/2023 | 14:17:20 | 25 | 1000 | 9.43 | 47.06 | 8.78 | 37.20 | 326.54 |
| 16/08/2023 | 10:06:54 | 25 | 1000 | 9.39 | 46.92 | 8.68 | 37.87 | 328.73 |
| 16/08/2023 | 14:04:10 | 25 | 1000 | 9.42 | 47.29 | 8.76 | 37.83 | 331.51 |
| 17/08/2023 | 10:00:24 | 25 | 1000 | 9.39 | 47.05 | 8.70 | 37.89 | 329.53 |
| 17/08/2023 | 13:46:32 | 25 | 1000 | 9.44 | 47.27 | 8.74 | 38.15 | 333.33 |
| 22/08/2023 | 10:16:18 | 25 | 1000 | 9.37 | 46.60 | 8.67 | 36.84 | 319.32 |
| 22/08/2023 | 14:11:40 | 25 | 1000 | 9.41 | 46.89 | 8.73 | 37.68 | 328.92 |
| Promedio | | 25 | 1000 | 9.48 | 47.09 | 8.79 | 37.64 | 331.02 |

Tabla 25*Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico monocristalino 2 sin limpieza en STC.*

| Módulo fotovoltaico monocristalino 2 sin limpieza en STC | | | | | | | | |
|---|----------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Fecha | Hora | T | G | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} |
| | | °C | W/m ² | A | V | A | V | W |
| 8/08/2023 | 10:18:08 | 25 | 1000 | 9.43 | 46.74 | 8.77 | 37.30 | 326.98 |
| 8/08/2023 | 14:09:58 | 25 | 1000 | 9.44 | 47.02 | 8.79 | 37.35 | 328.50 |
| 9/08/2023 | 10:04:30 | 25 | 1000 | 9.48 | 46.95 | 8.82 | 37.51 | 330.76 |
| 9/08/2023 | 14:06:04 | 25 | 1000 | 9.41 | 47.08 | 8.76 | 37.66 | 330.06 |
| 10/08/2023 | 10:11:32 | 25 | 1000 | 9.45 | 46.64 | 8.80 | 36.96 | 325.17 |
| 10/08/2023 | 14:02:40 | 25 | 1000 | 9.39 | 47.22 | 8.76 | 37.94 | 332.47 |
| 11/08/2023 | 10:17:12 | 25 | 1000 | 9.42 | 46.86 | 8.77 | 37.40 | 328.06 |
| 11/08/2023 | 14:09:58 | 25 | 1000 | 9.34 | 47.57 | 8.75 | 37.22 | 325.55 |
| 15/08/2023 | 10:14:00 | 25 | 1000 | 9.06 | 47.03 | 8.16 | 38.55 | 314.55 |
| 15/08/2023 | 14:19:28 | 25 | 1000 | 9.10 | 47.47 | 8.21 | 38.89 | 319.26 |
| 16/08/2023 | 10:08:32 | 25 | 1000 | 9.15 | 47.10 | 8.23 | 38.68 | 318.26 |
| 16/08/2023 | 14:06:20 | 25 | 1000 | 9.12 | 47.54 | 8.23 | 39.47 | 324.69 |
| 17/08/2023 | 10:01:56 | 25 | 1000 | 9.16 | 47.20 | 8.24 | 38.84 | 320.07 |
| 17/08/2023 | 13:47:48 | 25 | 1000 | 9.15 | 47.46 | 8.24 | 39.13 | 322.28 |
| 22/08/2023 | 10:18:08 | 25 | 1000 | 9.15 | 46.95 | 8.27 | 38.52 | 318.51 |
| 22/08/2023 | 14:14:26 | 25 | 1000 | 9.10 | 47.59 | 8.21 | 39.52 | 324.28 |
| Promedio | | 25 | 1000 | 9.27 | 47.15 | 8.50 | 38.18 | 324.34 |

Tabla 26*Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico monocristalino 3 sin limpieza en STC.*

| Módulo fotovoltaico monocristalino 3 sin limpieza en STC | | | | | | | | |
|---|----------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Fecha | Hora | T | G | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} |
| | | °C | W/m ² | A | V | A | V | W |
| 8/08/2023 | 10:15:08 | 25 | 1000 | 9.58 | 47.51 | 8.92 | 37.72 | 336.43 |
| 8/08/2023 | 14:12:12 | 25 | 1000 | 9.57 | 48.15 | 8.94 | 38.50 | 344.29 |
| 9/08/2023 | 10:06:00 | 25 | 1000 | 9.62 | 47.87 | 8.97 | 38.24 | 342.87 |
| 9/08/2023 | 14:07:44 | 25 | 1000 | 9.53 | 48.03 | 8.86 | 38.59 | 341.90 |
| 10/08/2023 | 10:13:32 | 25 | 1000 | 9.58 | 47.87 | 8.94 | 38.25 | 342.11 |
| 10/08/2023 | 14:05:10 | 25 | 1000 | 9.51 | 48.15 | 8.87 | 38.69 | 343.14 |
| 11/08/2023 | 10:18:56 | 25 | 1000 | 9.59 | 47.57 | 8.95 | 37.68 | 337.36 |
| 11/08/2023 | 14:13:18 | 25 | 1000 | 9.51 | 48.19 | 8.91 | 37.60 | 335.19 |
| 15/08/2023 | 10:15:36 | 25 | 1000 | 9.42 | 47.79 | 8.73 | 38.42 | 335.57 |
| 15/08/2023 | 14:21:34 | 25 | 1000 | 9.39 | 47.87 | 8.78 | 37.80 | 331.88 |
| 16/08/2023 | 10:10:12 | 25 | 1000 | 9.48 | 47.89 | 8.76 | 38.68 | 338.99 |
| 16/08/2023 | 14:07:50 | 25 | 1000 | 9.41 | 47.96 | 8.77 | 38.51 | 337.57 |
| 17/08/2023 | 10:03:40 | 25 | 1000 | 9.52 | 47.86 | 8.80 | 38.51 | 338.81 |
| 17/08/2023 | 13:49:38 | 25 | 1000 | 9.42 | 47.94 | 8.76 | 38.32 | 335.71 |
| 22/08/2023 | 10:19:58 | 25 | 1000 | 9.45 | 48.04 | 8.74 | 38.40 | 335.69 |
| 22/08/2023 | 14:15:54 | 25 | 1000 | 9.34 | 47.84 | 8.73 | 38.34 | 334.59 |
| Promedio | | 25 | 1000 | 9.49 | 47.91 | 8.84 | 38.27 | 338.26 |

Anexo 6. Datos promedio de los parámetros eléctricos en STC de los módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza.

Tabla 27

Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico policristalino 1 sin limpieza en STC.

| Módulo fotovoltaico policristalino 1 sin limpieza en STC | | | | | | | | |
|---|----------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Fecha | Hora | T | G | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} |
| | | °C | W/m ² | A | V | A | V | W |
| 8/08/2023 | 10:29:14 | 25 | 1000 | 8.96 | 36.17 | 8.38 | 27.92 | 234.01 |
| 8/08/2023 | 14:18:30 | 25 | 1000 | 9.02 | 36.54 | 8.50 | 28.45 | 241.89 |
| 9/08/2023 | 10:12:02 | 25 | 1000 | 8.93 | 36.28 | 8.30 | 28.24 | 234.28 |
| 9/08/2023 | 14:12:02 | 25 | 1000 | 8.98 | 36.53 | 8.39 | 28.36 | 237.87 |
| 9/08/2023 | 14:12:34 | 25 | 1000 | 8.99 | 36.51 | 8.41 | 28.32 | 238.05 |
| 10/08/2023 | 10:18:34 | 25 | 1000 | 8.90 | 36.33 | 8.30 | 28.28 | 234.83 |
| 10/08/2023 | 14:09:58 | 25 | 1000 | 8.93 | 36.53 | 8.38 | 28.16 | 235.98 |
| 11/08/2023 | 10:23:30 | 25 | 1000 | 8.89 | 36.20 | 8.30 | 28.02 | 232.62 |
| 11/08/2023 | 14:30:58 | 25 | 1000 | 9.03 | 37.16 | 8.60 | 28.00 | 240.73 |
| 15/08/2023 | 10:19:48 | 25 | 1000 | 8.88 | 36.26 | 8.23 | 28.18 | 232.05 |
| 15/08/2023 | 14:27:46 | 25 | 1000 | 8.90 | 36.75 | 8.37 | 28.40 | 237.79 |
| 16/08/2023 | 10:14:48 | 25 | 1000 | 8.90 | 36.47 | 8.23 | 28.42 | 233.99 |
| 16/08/2023 | 14:12:34 | 25 | 1000 | 8.89 | 36.72 | 8.31 | 28.48 | 236.58 |
| 17/08/2023 | 10:08:04 | 25 | 1000 | 8.90 | 36.35 | 8.25 | 28.41 | 234.45 |
| 17/08/2023 | 13:53:34 | 25 | 1000 | 8.91 | 36.65 | 8.35 | 28.60 | 238.79 |
| 22/08/2023 | 10:24:36 | 25 | 1000 | 8.80 | 36.15 | 8.22 | 28.14 | 231.24 |
| Promedio | | 25 | 1000 | 8.92 | 36.48 | 8.34 | 28.29 | 236.05 |

Tabla 28*Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico policristalino 2 sin limpieza en STC.*

| Módulo fotovoltaico policristalino 2 sin limpieza en STC | | | | | | | | |
|---|----------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Fecha | Hora | T | G | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} |
| | | °C | W/m ² | A | V | A | V | W |
| 8/08/2023 | 10:32:02 | 25 | 1000 | 8.82 | 36.07 | 8.21 | 27.56 | 226.30 |
| 8/08/2023 | 14:20:48 | 25 | 1000 | 8.83 | 36.41 | 8.28 | 28.09 | 232.65 |
| 9/08/2023 | 10:14:46 | 25 | 1000 | 8.73 | 36.33 | 8.13 | 28.03 | 227.82 |
| 9/08/2023 | 14:14:38 | 25 | 1000 | 8.79 | 36.35 | 8.20 | 28.07 | 230.20 |
| 10/08/2023 | 10:20:32 | 25 | 1000 | 8.74 | 36.19 | 8.14 | 28.01 | 228.07 |
| 10/08/2023 | 14:12:28 | 25 | 1000 | 8.75 | 36.22 | 8.19 | 27.60 | 226.01 |
| 11/08/2023 | 10:27:04 | 25 | 1000 | 8.72 | 36.26 | 8.11 | 28.01 | 227.12 |
| 11/08/2023 | 14:32:52 | 25 | 1000 | 8.84 | 37.16 | 8.33 | 28.23 | 235.20 |
| 15/08/2023 | 10:21:58 | 25 | 1000 | 8.69 | 36.44 | 7.95 | 28.42 | 225.88 |
| 15/08/2023 | 14:30:54 | 25 | 1000 | 8.67 | 37.08 | 8.00 | 29.24 | 234.02 |
| 16/08/2023 | 10:17:02 | 25 | 1000 | 8.71 | 36.40 | 7.94 | 28.41 | 225.68 |
| 16/08/2023 | 14:14:56 | 25 | 1000 | 8.70 | 36.76 | 8.03 | 29.24 | 234.89 |
| 17/08/2023 | 10:09:50 | 25 | 1000 | 8.70 | 36.52 | 7.92 | 28.66 | 227.09 |
| 17/08/2023 | 13:55:54 | 25 | 1000 | 8.73 | 36.80 | 8.03 | 28.95 | 232.40 |
| 22/08/2023 | 10:27:14 | 25 | 1000 | 8.66 | 36.24 | 7.99 | 28.27 | 225.79 |
| 22/08/2023 | 14:22:04 | 25 | 1000 | 8.63 | 36.61 | 8.04 | 28.66 | 230.54 |
| Promedio | | 25 | 1000 | 8.73 | 36.49 | 8.09 | 28.34 | 229.35 |

Tabla 29*Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico policristalino 3 sin limpieza en STC.*

| Módulo fotovoltaico policristalino 3 sin limpieza en STC | | | | | | | | |
|---|----------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Fecha | Hora | T | G | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} |
| | | °C | W/m ² | A | V | A | V | W |
| 8/08/2023 | 10:35:42 | 25 | 1000 | 8.98 | 36.61 | 8.37 | 28.23 | 236.32 |
| 8/08/2023 | 14:23:48 | 25 | 1000 | 8.96 | 36.46 | 8.39 | 28.12 | 236.00 |
| 9/08/2023 | 10:16:30 | 25 | 1000 | 8.92 | 36.58 | 8.28 | 28.50 | 236.15 |
| 9/08/2023 | 14:16:00 | 25 | 1000 | 8.94 | 36.60 | 8.31 | 28.44 | 236.28 |
| 10/08/2023 | 10:22:24 | 25 | 1000 | 8.92 | 36.29 | 8.29 | 28.34 | 234.97 |
| 10/08/2023 | 14:14:20 | 25 | 1000 | 8.90 | 36.59 | 8.30 | 28.16 | 233.60 |
| 11/08/2023 | 10:28:52 | 25 | 1000 | 8.87 | 36.43 | 8.24 | 28.36 | 233.74 |
| 11/08/2023 | 14:35:02 | 25 | 1000 | 9.04 | 37.18 | 8.55 | 28.18 | 240.84 |
| 15/08/2023 | 10:23:48 | 25 | 1000 | 8.88 | 36.41 | 8.29 | 28.09 | 233.00 |
| 15/08/2023 | 14:33:24 | 25 | 1000 | 8.86 | 36.70 | 8.28 | 28.40 | 235.11 |
| 16/08/2023 | 10:19:02 | 25 | 1000 | 8.89 | 36.51 | 8.29 | 28.27 | 234.25 |
| 16/08/2023 | 14:16:44 | 25 | 1000 | 8.85 | 36.45 | 8.29 | 28.58 | 236.80 |
| 17/08/2023 | 10:11:30 | 25 | 1000 | 8.87 | 36.52 | 8.27 | 28.53 | 235.90 |
| 17/08/2023 | 13:58:10 | 25 | 1000 | 8.88 | 36.63 | 8.25 | 28.70 | 236.79 |
| 22/08/2023 | 10:29:18 | 25 | 1000 | 8.82 | 36.30 | 8.24 | 28.25 | 232.87 |
| 22/08/2023 | 14:23:50 | 25 | 1000 | 8.74 | 36.47 | 8.18 | 28.60 | 234.05 |
| Promedio | | 25 | 1000 | 8.89 | 36.55 | 8.30 | 28.36 | 235.42 |

Anexo 7. Datos promedio de los parámetros eléctricos en STC de los módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza.

Tabla 30

Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico monocristalino 1 con limpieza en STC.

| Módulo fotovoltaico monocristalino 1 con limpieza en STC | | | | | | | | |
|---|----------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Fecha | Hora | T | G | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} |
| | | °C | W/m ² | A | V | A | V | W |
| 23/08/2023 | 10:35:50 | 25 | 1000 | 9.55 | 46.92 | 8.84 | 37.69 | 333.13 |
| 23/08/2023 | 13:54:46 | 25 | 1000 | 9.68 | 47.05 | 8.95 | 37.57 | 336.16 |
| 24/08/2023 | 10:02:00 | 25 | 1000 | 9.61 | 47.10 | 8.87 | 37.65 | 333.92 |
| 24/08/2023 | 13:51:02 | 25 | 1000 | 9.69 | 47.36 | 8.95 | 37.99 | 340.07 |
| 29/08/2023 | 10:13:16 | 25 | 1000 | 9.60 | 46.95 | 8.88 | 37.59 | 333.84 |
| 29/08/2023 | 14:11:52 | 25 | 1000 | 9.68 | 46.90 | 8.98 | 37.29 | 335.04 |
| 1/09/2023 | 09:39:08 | 25 | 1000 | 9.61 | 46.79 | 8.93 | 37.25 | 332.48 |
| 1/09/2023 | 14:16:34 | 25 | 1000 | 9.76 | 47.34 | 9.01 | 37.18 | 335.07 |
| 4/09/2023 | 10:20:06 | 25 | 1000 | 9.70 | 46.50 | 8.99 | 37.05 | 332.91 |
| 4/09/2023 | 14:07:28 | 25 | 1000 | 9.71 | 47.07 | 9.01 | 36.83 | 331.83 |
| 5/09/2023 | 10:08:18 | 25 | 1000 | 9.58 | 46.61 | 8.87 | 36.79 | 326.32 |
| 5/09/2023 | 14:06:26 | 25 | 1000 | 9.80 | 47.83 | 9.05 | 38.21 | 345.80 |
| 7/09/2023 | 10:10:34 | 25 | 1000 | 9.61 | 47.67 | 8.89 | 38.61 | 343.38 |
| 7/09/2023 | 14:16:18 | 25 | 1000 | 9.67 | 47.04 | 8.86 | 37.48 | 332.14 |
| 8/09/2023 | 10:15:42 | 25 | 1000 | 9.57 | 46.88 | 8.89 | 37.20 | 330.54 |
| 8/09/2023 | 14:01:10 | 25 | 1000 | 9.70 | 46.82 | 8.97 | 37.11 | 332.71 |
| Promedio | | 25 | 1000 | 9.66 | 47.05 | 8.93 | 37.47 | 334.71 |

Tabla 31*Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico monocristalino 2 con limpieza en STC.*

| Módulo fotovoltaico monocristalino 2 con limpieza en STC | | | | | | | | |
|---|----------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Fecha | Hora | T | G | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} |
| | | °C | W/m ² | A | V | A | V | W |
| 23/08/2023 | 10:37:32 | 25 | 1000 | 9.48 | 46.89 | 8.76 | 37.73 | 330.48 |
| 23/08/2023 | 13:56:04 | 25 | 1000 | 9.51 | 47.05 | 8.83 | 37.54 | 331.59 |
| 24/08/2023 | 10:03:32 | 25 | 1000 | 9.55 | 47.10 | 8.89 | 37.88 | 336.61 |
| 24/08/2023 | 13:49:18 | 25 | 1000 | 9.54 | 46.88 | 8.85 | 37.53 | 332.23 |
| 29/08/2023 | 10:15:00 | 25 | 1000 | 9.52 | 47.00 | 8.79 | 37.75 | 331.70 |
| 29/08/2023 | 14:13:38 | 25 | 1000 | 9.49 | 46.93 | 8.83 | 37.29 | 329.26 |
| 1/09/2023 | 09:40:36 | 25 | 1000 | 9.53 | 46.70 | 8.90 | 36.92 | 328.67 |
| 1/09/2023 | 14:18:00 | 25 | 1000 | 9.56 | 47.28 | 8.88 | 37.30 | 331.35 |
| 4/09/2023 | 10:21:38 | 25 | 1000 | 9.62 | 46.84 | 8.90 | 37.46 | 333.41 |
| 4/09/2023 | 14:09:10 | 25 | 1000 | 9.53 | 46.98 | 8.92 | 37.05 | 330.42 |
| 5/09/2023 | 10:10:22 | 25 | 1000 | 9.51 | 47.14 | 8.86 | 37.17 | 329.38 |
| 5/09/2023 | 14:07:32 | 25 | 1000 | 9.58 | 47.44 | 8.95 | 37.53 | 335.95 |
| 7/09/2023 | 10:13:54 | 25 | 1000 | 9.52 | 47.27 | 8.85 | 37.72 | 333.93 |
| 7/09/2023 | 14:18:12 | 25 | 1000 | 9.49 | 47.11 | 8.77 | 37.47 | 328.67 |
| 8/09/2023 | 10:17:14 | 25 | 1000 | 9.49 | 46.82 | 8.82 | 37.10 | 327.43 |
| 8/09/2023 | 14:02:34 | 25 | 1000 | 9.53 | 46.56 | 8.86 | 36.67 | 324.90 |
| Promedio | | 25 | 1000 | 9.53 | 47.00 | 8.85 | 37.38 | 331.00 |

Tabla 32*Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico monocristalino 3 con limpieza en STC.*

| Módulo fotovoltaico monocristalino 3 con limpieza en STC | | | | | | | | |
|---|----------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Fecha | Hora | T | G | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} |
| | | °C | W/m ² | A | V | A | V | W |
| 23/08/2023 | 10:39:14 | 25 | 1000 | 9.62 | 47.88 | 8.92 | 38.51 | 343.37 |
| 23/08/2023 | 13:57:40 | 25 | 1000 | 9.66 | 48.08 | 8.96 | 38.51 | 344.93 |
| 24/08/2023 | 10:05:24 | 25 | 1000 | 9.68 | 47.89 | 9.04 | 38.47 | 347.62 |
| 24/08/2023 | 13:47:04 | 25 | 1000 | 9.68 | 47.68 | 8.97 | 38.33 | 343.72 |
| 29/08/2023 | 10:16:56 | 25 | 1000 | 9.67 | 47.66 | 8.96 | 38.13 | 341.55 |
| 29/08/2023 | 14:15:18 | 25 | 1000 | 9.65 | 48.18 | 8.96 | 38.53 | 345.37 |
| 1/09/2023 | 09:42:04 | 25 | 1000 | 9.71 | 47.85 | 9.09 | 37.98 | 345.30 |
| 1/09/2023 | 14:19:16 | 25 | 1000 | 9.72 | 48.02 | 9.03 | 38.41 | 346.63 |
| 4/09/2023 | 10:23:20 | 25 | 1000 | 9.78 | 47.86 | 9.07 | 38.24 | 346.84 |
| 4/09/2023 | 14:10:48 | 25 | 1000 | 9.72 | 47.98 | 9.04 | 37.97 | 343.15 |
| 5/09/2023 | 10:12:30 | 25 | 1000 | 9.67 | 47.69 | 9.00 | 37.55 | 337.80 |
| 5/09/2023 | 14:08:48 | 25 | 1000 | 9.75 | 48.25 | 9.09 | 38.53 | 350.30 |
| 7/09/2023 | 10:16:24 | 25 | 1000 | 9.65 | 48.00 | 9.00 | 38.17 | 343.36 |
| 7/09/2023 | 14:21:30 | 25 | 1000 | 9.59 | 48.11 | 8.87 | 38.41 | 340.71 |
| 8/09/2023 | 10:19:12 | 25 | 1000 | 9.65 | 47.62 | 8.99 | 37.79 | 339.54 |
| 8/09/2023 | 14:03:58 | 25 | 1000 | 9.71 | 47.68 | 8.98 | 37.76 | 339.01 |
| Promedio | | 25 | 1000 | 9.68 | 47.90 | 9.00 | 38.20 | 343.70 |

Anexo 8. Datos promedio de los parámetros eléctricos en STC de los módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza.

Tabla 33

Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico policristalino 1 con limpieza en STC.

| Módulo fotovoltaico policristalino 1 con limpieza en STC | | | | | | | | |
|---|----------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Fecha | Hora | T | G | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} |
| | | °C | W/m ² | A | V | A | V | W |
| 23/08/2023 | 10:43:26 | 25 | 1000 | 9.09 | 36.07 | 8.48 | 28.37 | 240.67 |
| 23/08/2023 | 14:01:50 | 25 | 1000 | 9.17 | 36.69 | 8.60 | 28.62 | 246.17 |
| 24/08/2023 | 10:12:18 | 25 | 1000 | 9.07 | 36.04 | 8.44 | 27.95 | 235.78 |
| 24/08/2023 | 13:54:36 | 25 | 1000 | 9.17 | 36.40 | 8.59 | 28.47 | 244.59 |
| 29/08/2023 | 10:21:04 | 25 | 1000 | 9.06 | 35.93 | 8.47 | 28.01 | 237.23 |
| 29/08/2023 | 14:19:30 | 25 | 1000 | 9.17 | 36.76 | 8.60 | 28.24 | 242.84 |
| 1/09/2023 | 09:46:28 | 25 | 1000 | 9.15 | 36.27 | 8.55 | 28.33 | 242.07 |
| 1/09/2023 | 14:22:26 | 25 | 1000 | 9.26 | 36.89 | 8.69 | 28.37 | 246.45 |
| 4/09/2023 | 10:27:16 | 25 | 1000 | 9.12 | 36.04 | 8.51 | 28.28 | 240.74 |
| 4/09/2023 | 14:15:10 | 25 | 1000 | 9.17 | 36.90 | 8.62 | 28.34 | 244.24 |
| 5/09/2023 | 10:16:48 | 25 | 1000 | 9.08 | 36.36 | 8.49 | 28.23 | 239.77 |
| 5/09/2023 | 14:10:52 | 25 | 1000 | 9.22 | 36.51 | 8.60 | 28.21 | 242.45 |
| 7/09/2023 | 10:24:10 | 25 | 1000 | 9.01 | 36.36 | 8.40 | 28.08 | 235.77 |
| 7/09/2023 | 14:25:22 | 25 | 1000 | 9.12 | 36.62 | 8.48 | 28.62 | 242.62 |
| 8/09/2023 | 10:21:28 | 25 | 1000 | 9.08 | 36.09 | 8.49 | 28.22 | 239.53 |
| 8/09/2023 | 14:06:56 | 25 | 1000 | 9.17 | 36.33 | 8.61 | 28.27 | 243.44 |
| Promedio | | 25 | 1000 | 9.13 | 36.39 | 8.54 | 28.29 | 241.52 |

Tabla 34*Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico policristalino 2 con limpieza en STC.*

| Módulo fotovoltaico policristalino 2 con limpieza en STC | | | | | | | | |
|---|----------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Fecha | Hora | T | G | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} |
| | | °C | W/m ² | A | V | A | V | W |
| 23/08/2023 | 10:45:28 | 25 | 1000 | 8.96 | 36.20 | 8.33 | 28.29 | 235.69 |
| 23/08/2023 | 14:04:18 | 25 | 1000 | 9.06 | 36.40 | 8.43 | 28.22 | 237.82 |
| 24/08/2023 | 10:13:44 | 25 | 1000 | 8.95 | 36.10 | 8.33 | 27.90 | 232.37 |
| 24/08/2023 | 13:56:56 | 25 | 1000 | 9.09 | 36.41 | 8.44 | 28.45 | 240.05 |
| 29/08/2023 | 10:23:20 | 25 | 1000 | 8.97 | 36.05 | 8.36 | 27.83 | 232.75 |
| 29/08/2023 | 14:21:26 | 25 | 1000 | 9.07 | 36.65 | 8.43 | 28.03 | 236.23 |
| 1/09/2023 | 09:48:56 | 25 | 1000 | 9.04 | 36.66 | 8.43 | 28.41 | 239.58 |
| 1/09/2023 | 14:23:50 | 25 | 1000 | 9.23 | 36.95 | 8.70 | 27.46 | 238.76 |
| 4/09/2023 | 10:29:24 | 25 | 1000 | 9.03 | 35.99 | 8.42 | 28.00 | 235.89 |
| 4/09/2023 | 14:17:08 | 25 | 1000 | 9.11 | 36.66 | 8.52 | 28.02 | 238.74 |
| 5/09/2023 | 10:18:46 | 25 | 1000 | 9.02 | 36.33 | 8.41 | 28.06 | 236.11 |
| 5/09/2023 | 14:12:32 | 25 | 1000 | 9.22 | 36.38 | 8.55 | 27.99 | 239.41 |
| 7/09/2023 | 10:26:54 | 25 | 1000 | 8.84 | 36.43 | 8.24 | 28.01 | 230.92 |
| 7/09/2023 | 14:27:04 | 25 | 1000 | 8.94 | 36.58 | 8.31 | 28.53 | 236.97 |
| 8/09/2023 | 10:23:18 | 25 | 1000 | 9.02 | 36.17 | 8.43 | 28.17 | 237.40 |
| 8/09/2023 | 14:09:36 | 25 | 1000 | 9.13 | 36.56 | 8.51 | 28.30 | 240.71 |
| Promedio | | 25 | 1000 | 9.04 | 36.41 | 8.43 | 28.10 | 236.84 |

Tabla 35*Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico policristalino 3 con limpieza en STC.*

| Módulo fotovoltaico policristalino 3 con limpieza en STC | | | | | | | | |
|---|----------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Fecha | Hora | T | G | I _{sc} | V _{oc} | I _{mpp} | V _{mpp} | P _{max} |
| | | °C | W/m ² | A | V | A | V | W |
| 23/08/2023 | 10:48:26 | 25 | 1000 | 9.10 | 36.21 | 8.45 | 28.38 | 239.77 |
| 23/08/2023 | 14:06:10 | 25 | 1000 | 9.14 | 36.25 | 8.50 | 28.23 | 239.80 |
| 24/08/2023 | 10:15:30 | 25 | 1000 | 9.11 | 36.42 | 8.44 | 28.43 | 239.99 |
| 24/08/2023 | 13:59:24 | 25 | 1000 | 9.12 | 36.24 | 8.47 | 28.30 | 239.83 |
| 29/08/2023 | 10:25:16 | 25 | 1000 | 9.03 | 36.36 | 8.42 | 28.28 | 238.09 |
| 29/08/2023 | 14:23:32 | 25 | 1000 | 9.05 | 36.77 | 8.49 | 28.65 | 243.30 |
| 1/09/2023 | 09:51:00 | 25 | 1000 | 9.13 | 36.81 | 8.54 | 28.45 | 242.84 |
| 1/09/2023 | 14:25:30 | 25 | 1000 | 9.25 | 37.35 | 8.71 | 28.09 | 244.72 |
| 4/09/2023 | 10:31:28 | 25 | 1000 | 9.14 | 36.24 | 8.51 | 28.47 | 242.12 |
| 4/09/2023 | 14:19:12 | 25 | 1000 | 9.14 | 36.61 | 8.53 | 28.08 | 239.62 |
| 5/09/2023 | 10:21:42 | 25 | 1000 | 9.14 | 36.41 | 8.50 | 28.09 | 238.88 |
| 5/09/2023 | 14:13:58 | 25 | 1000 | 9.26 | 36.72 | 8.64 | 27.92 | 241.15 |
| 7/09/2023 | 10:30:32 | 25 | 1000 | 9.01 | 36.44 | 8.37 | 28.10 | 235.14 |
| 7/09/2023 | 14:29:14 | 25 | 1000 | 9.09 | 36.28 | 8.37 | 28.25 | 236.52 |
| 8/09/2023 | 10:25:00 | 25 | 1000 | 9.11 | 36.32 | 8.49 | 28.47 | 241.86 |
| 8/09/2023 | 14:11:28 | 25 | 1000 | 9.11 | 36.63 | 8.50 | 28.41 | 241.55 |
| Promedio | | 25 | 1000 | 9.12 | 36.50 | 8.50 | 28.29 | 240.32 |

Anexo 9. Temperatura en los SFCR con módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos.

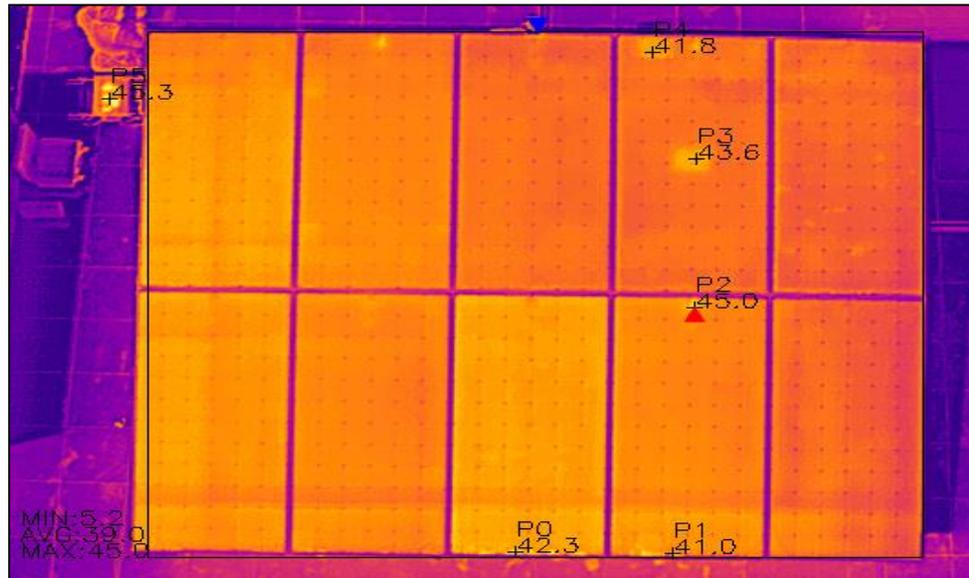


Figura 57. Temperatura del SFCR de 3.7 kWp con convertidores CC/CC con módulos fotovoltaicos monocristalinos sin limpieza.

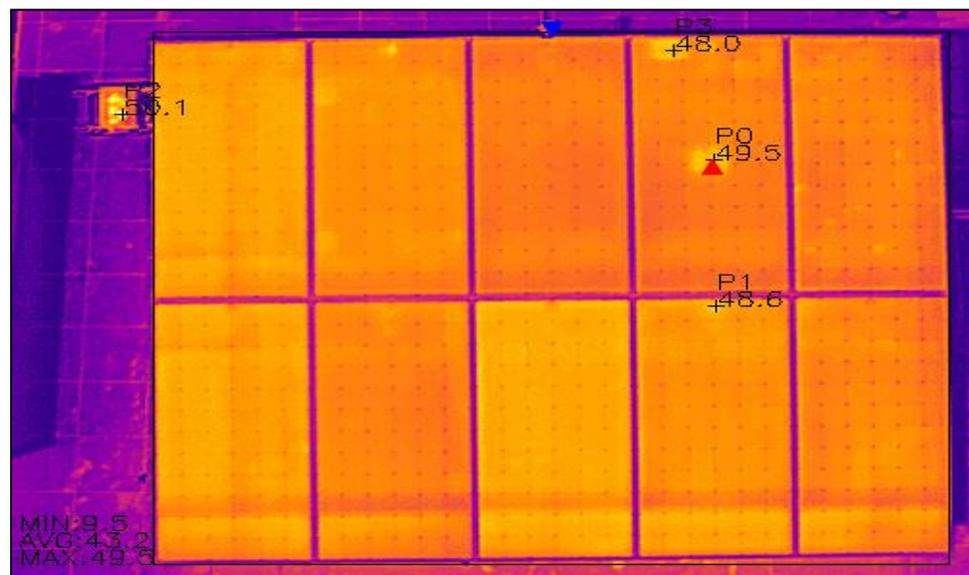


Figura 58. Temperatura del SFCR de 3.7 kWp con convertidores CC/CC con módulos fotovoltaicos monocristalinos con limpieza.

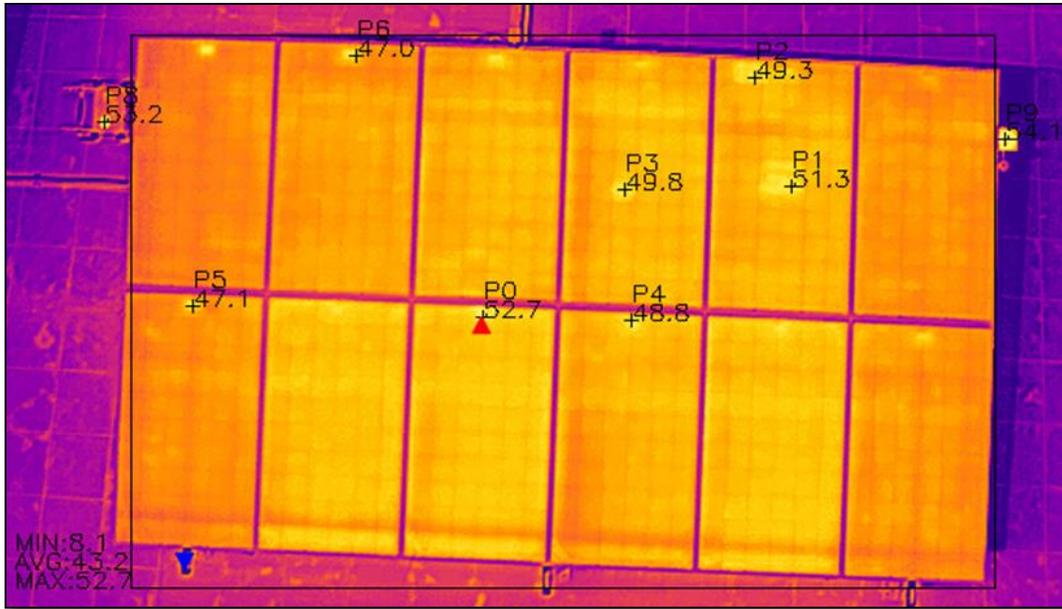


Figura 59. Temperatura del SFCR de 3.24 kWp con inversor string con módulos fotovoltaicos policristalinos sin limpieza.

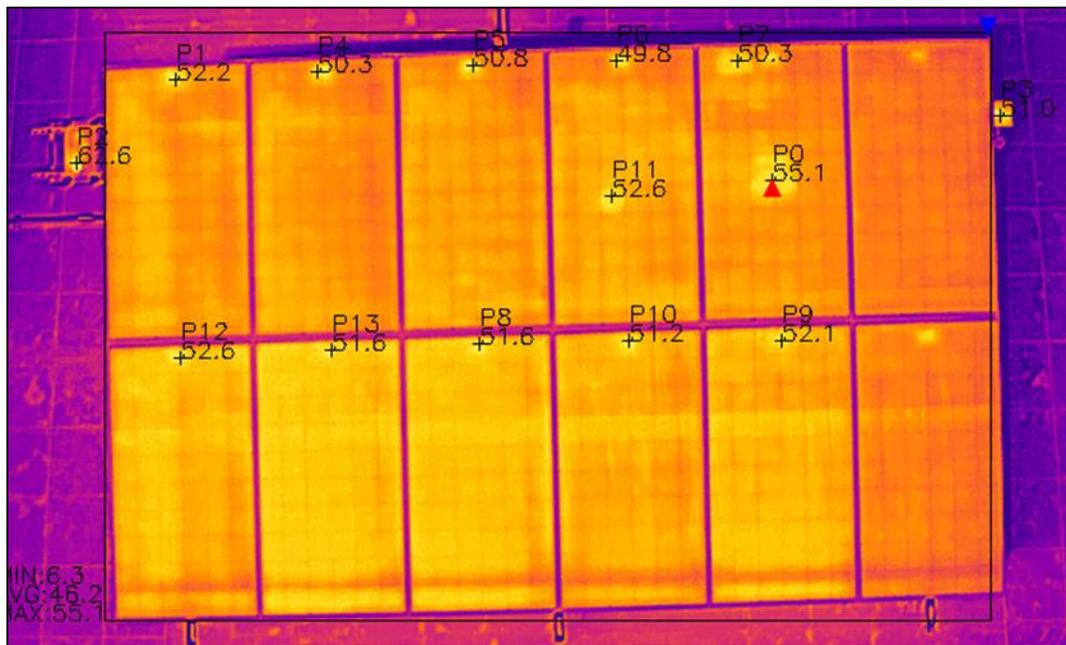


Figura 60. Temperatura del SFCR de 3.24 kWp con inversor string con módulos fotovoltaicos policristalinos con limpieza.

