

Desempeño energético del sistema fotovoltaico del Edificio de la Escuela de Ingenierías
Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones a 2023

Duvan Andres Gurain Puentes y Karen Daniela Saenz Niño

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero/a Electricista

Director

German Alfonso Osma Pinto

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mi madre, Vanesa, una mujer excepcional que me ha enseñado a superar diversos obstáculos y a no desfallecer ante ninguna adversidad. Con su fortaleza y amor ha sido una guía constante en mi vida.

A mi padre, Orlando, por brindarme su apoyo incondicional y sus innumerables palabras de aliento en momentos difíciles. Su sabiduría y dedicación han sido fundamentales en mi formación y en cada paso que he dado.

Al esposo de mi madre, Javier, por criarme como a una hija y por siempre estar pendiente de que no me faltara nada. Su generosidad y cuidado han sido una fuente de seguridad y bienestar.

A mis hermanos y a mi familia cercana, por ser siempre una mano aliada en todo este proceso. Su apoyo y compañía han sido invaluable y han hecho de este camino una experiencia enriquecedora.

Karen Daniela Sáenz Niño

A Nelly Puentes, mi madre, quien ha sido un pilar fundamental en mi vida. Ella que con ternura me ha alentado en los momentos que creía no poder más.

A mi padre, Adolfo Guarín, cuyas enseñanzas han sido un faro que me ha guiado hacia la disciplina y la responsabilidad. Debo lo que soy a ellos.

A Lizeth Guarín, mi hermana, compañera inseparable en este proceso, cuyo carisma, humor y apoyo han hecho cada paso más llevadero y memorable

Duván Andrés Guarín Puentes

Agradecimientos

A mis padres, les estaré eternamente agradecida por sus innumerables esfuerzos, sacrificios y paciencia infinita. Gracias a ustedes, he logrado ser la persona que soy hoy. Al doctor Germán Osma, por su invaluable orientación y exigencia en este proyecto. A Liliana Ortega y Alejandra Martínez, por guiarnos y compartir generosamente su vasto conocimiento. A Duván, por ser un excelente compañero de trabajo de grado y amigo. A mis amigas Aura y Camila, por estar siempre presentes desde el primer momento de este proceso y por convertirse en parte de mi familia. A todas aquellas personas que me acompañaron e hicieron más amenos estos años de arduo trabajo y largas noches de desvelo, especialmente a Sebastián M., Juan Diego M. y Julián Peña.

Karen Daniela Saenz Niño

Mi sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa en este proceso. Primero, a mi padre, a mi madre y a mi hermana por su apoyo inquebrantable, comprensión, amor y paciencia a lo largo de este camino. Gracias por siempre estar para mí en cada paso del camino.

Agradezco profundamente a mis amigos y compañeros de estudio, quienes compartieron conmigo sus conocimientos, experiencias y apoyo moral durante este proceso. De entre los cuales quiero resaltar a Nicolás Jaimes, Yainy Arenas, Daniela Pereira y Juan Zambrano. Gracias por enseñarme lo valioso de una amistad. Elias Cuartas, quien ha sido una fuente de inspiración, ha iluminado mi camino con paciencia y aliento incondicional. Agradezco profundamente su presencia y sus sabios consejos que han enriquecido este viaje personal y académico.

A Alejandra Martínez y Liliana Ortega por apoyarnos en cada fase de este proyecto. Su apoyo, dedicación y profesionalismo fueron fundamentales en la realización de este trabajo.

Al doctor German Alfonso Osma, por su guía y apoyo constante a lo largo de todo el proceso. Su exigencia sacó a relucir nuestras mejores cualidades.

A Daniela, puesto que en ella encontré una gran compañera, colega y amiga.

Finalmente, a todos aquellos que de una u otra manera contribuyeron a este trabajo, su ayuda ha sido invaluable y muy apreciada.

Duván Andrés Guarín Puentes

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	19
1. Objetivos.....	21
1.1. Objetivo General.....	21
1.2. Objetivos Específicos.....	21
2. Sistema Fotovoltaico E3T: Especificaciones y Características.....	22
3. Análisis y adaptación del sistema de medida del SFV.....	27
3.1. Parámetros existentes.....	28
3.2. Indicadores de desempeño.....	29
3.3. Adecuación de la infraestructura de medición del SFV.....	37
3.3.1. Almacenamiento de datos.....	39
3.3.2. Medición de irradiancia.....	41
3.3.3. Medición de temperatura.....	48
4. Puesta en marcha y recopilación de datos.....	54
4.1. Curva de ajuste.....	54
4.2. Programación de los Datalogger's.....	62
4.3. Recopilación de datos.....	63
5. Análisis de datos y comparativa entre subsistemas.....	65
6. Conclusiones.....	75
Referencias bibliográficas.....	77
Apéndice.....	81

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Características eléctricas paneles FV.....	23
Tabla 2. Características mecánicas paneles FV.....	23
Tabla 3. Elevación de paneles fotovoltaicos SFV E3T.....	25
Tabla 4. Dispositivos para recolección de variables pre-existentes.....	29
Tabla 5. Artículos recopilados.....	30
Tabla 6. Indicadores de desempeño energético recopilados.....	32
Tabla 7. Indicadores de desempeño seleccionados.....	33
Tabla 8. Detalles instalación dispositivos de medición de irradiancia.....	48
Tabla 9. Componentes instalados en el SFV de la terraza.....	54
Tabla A. Función de las entradas del data logger XR5-SE.....	81

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Piranómetro con sensor térmico Kipp & Zonen.....	12
Figura 2. Piranómetro con sensor semiconductor Davis.....	12
Figura 3. Tipos de irradiancia.....	14
Figura 4. Ubicación de sistemas FV.....	24
Figura 5. Estación meteorológica Davis terraza edificio E3T.....	26
Figura 6. Metodología del sistema de medición y adquisición de variables.....	28
Figura 7. Esquema de conexión general piranómetros, termocuplas y datalogger.....	37
Figura 8. Esquema de conexión obtención de variables SFV E3T.....	38
Figura 9. Datalogger XR5-SE-20mV y EC45 Compact Weatherproof Case.....	39
Figura 10. Ubicación de los dataloggers.....	41
Figura 11. Piranómetro SKU 6450 subsistema FV 2 (escaleras).....	43
Figura 12. Esquema de conexión eléctrica piranómetro Davis.....	44
Figura 13. Piranómetros SMP3 Kipp & Zonen subsistema 1 (ascensor).....	45
Figura 14. Piranómetros SMP3 Kipp & Zonen SFV 3 (extremo este).....	46
Figura 15. Esquema de conexión piranómetro SMP3 Kipp & Zonen.....	47
Figura 16. Instalación termocuplas SFV 1 (Ascensor).....	50
Figura 17. Instalación termocupla SFV 2 (escaleras).....	52
Figura 18. Instalación termocuplas SFV 3 (extremo este).....	53

Figura 19. Instalación previa de los piranómetros para realizar la curva de ajuste.....	55
Figura 20. Curva de irradiancia de las pruebas preliminares en el SFV1.....	56
Figura 21. Instalación secundaria de los piranómetros para realizar la curva de ajuste.....	56
Figura 22. Datos registrados del 4 al 6 de octubre.....	58
Figura 23. Gráficas de las ecuaciones obtenidas por cada piranómetro.....	59
Figura 24. Instalación termocuplas en la cara coplanar del panel FV.....	60
Figura 25. Clasificación termocuplas.....	60
Figura 26. Curvas de ajuste termocuplas.....	61
Figura 27. Proceso de extracción de datos microinversores.....	63
Figura 28. Proceso de extracción de datos PQube3.....	64
Figura 29. Proceso de extracción de datos datalogger.....	64
Figura 30. Gráficas de comparación de temperatura.....	66
Figura 31. Gráfica de registros promedio de irradiancia.....	67
Figura 32. Gráfica indicador performance ratio (PR).....	69
Figura 33. Gráfica de los valores de energía neta inyectada en el punto de conexión común.....	70
Figura 34. Gráfica de los valores de rendimiento específico y de referencia, PR y PR con corrección de temperatura en el punto de conexión común.....	71
Figura 35. Gráficas del desglose de pérdidas generales por mes entre diciembre del 2023 y marzo del 2024.....	73
Figura 36. Gráficas del desglose de pérdidas generales por mes de abril y mayo del 2024.....	74

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A.....	80
Apéndice B.....	81
Apéndice C.....	81
Apéndice D.....	82
Apéndice E.....	82
Apéndice F.....	85

Abreviaturas y acrónimos

SFV: Sistema fotovoltaico

FV: Fotovoltaiico

Pace: XR5-SE Data Logger Pace Instrument

E3T: Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

PR: Relación de rendimiento o performance ratio por sus siglas en inglés

Yi: Rendimiento específico o rendimiento final del sistema

CF: Factor de capacidad

Yr: Rendimiento de referencia

CUF: Factor de utilización de la capacidad

η : Eficiencia del sistema fotovoltaico

Pi: Índice de rendimiento

IPP: Índice de rendimiento de potencia

YA: Rendimiento de la matriz

PV: Eficiencia de conversión

Lc: Perdidos de captura

Ls: Persidad del sistema

ED: Densidad de energía

AC: Corriente alterna

DC: Corriente directa

Glosario

Datalogger: Dispositivo electrónico que registra datos en el tiempo o en relación a la ubicación por medio de instrumentos y sensores propios o conectados externamente.

Piranómetro: Instrumento meteorológico utilizado para medir la irradiancia solar incidente sobre una superficie.

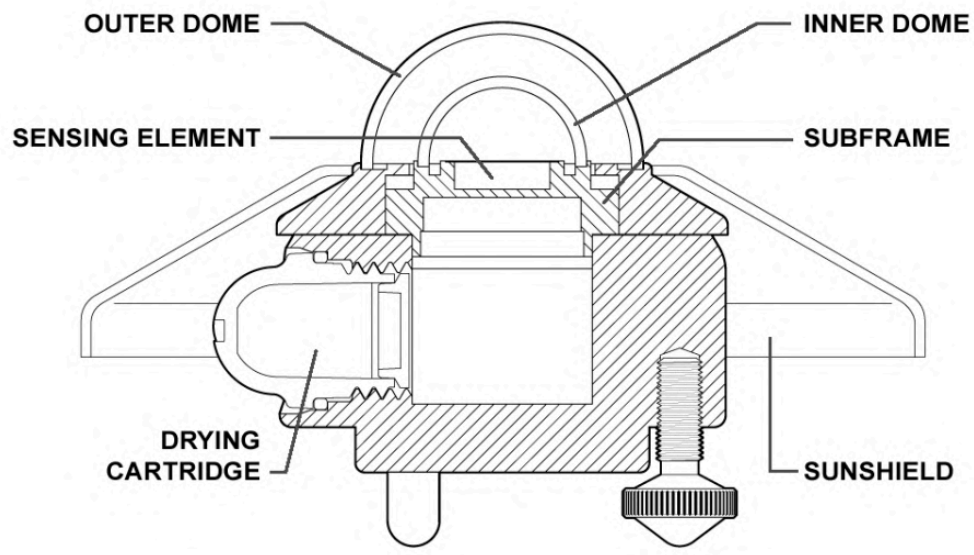
Los piranómetros se basan en dos enfoques para medir la irradiancia global: sensores térmicos y sensores de silicio.

- Sensores térmicos

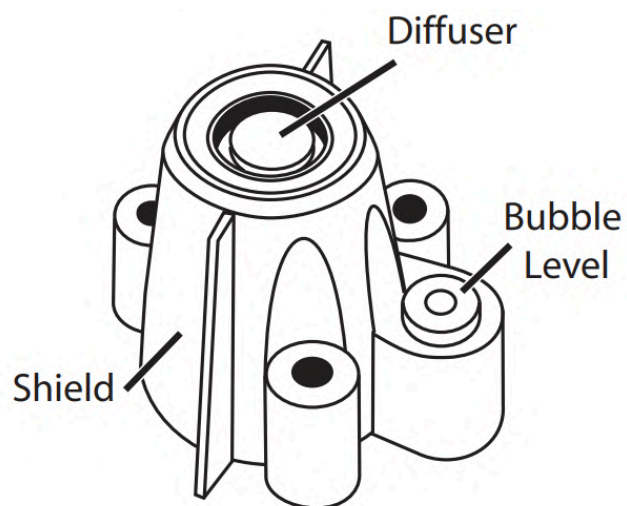
Un piranómetro con sensor térmico tiene un elemento sensible al calor, comúnmente llamado termopila. Este componente está diseñado para absorber la radiación solar y convertirla en calor. Cuando la radiación solar incide sobre la superficie del piranómetro, el elemento sensible al calor absorbe la energía de la radiación y se calienta. El aumento de temperatura en el elemento sensible al calor produce una diferencia de temperatura entre sus extremos, lo que genera un voltaje a través de la termopila. La magnitud del voltaje generado es proporcional a la cantidad de radiación solar recibida por el piranómetro. Este voltaje se mide y se convierte en una lectura de irradiancia solar.

- Sensores de silicio

Los piranómetros de sensor de silicio, también conocidos como piranómetros de células fotovoltaicas de silicio. Estas células son sensibles a la radiación solar y generan una corriente eléctrica cuando son iluminadas. La intensidad de esta corriente está directamente relacionada con la cantidad de radiación solar que incide sobre el piranómetro (CUSHICÓNDOR, 2019).

Figura 1.*Piranómetro con sensor térmico Kipp & Zonen*

Fuente: (Kipp & Zonen, 2017)

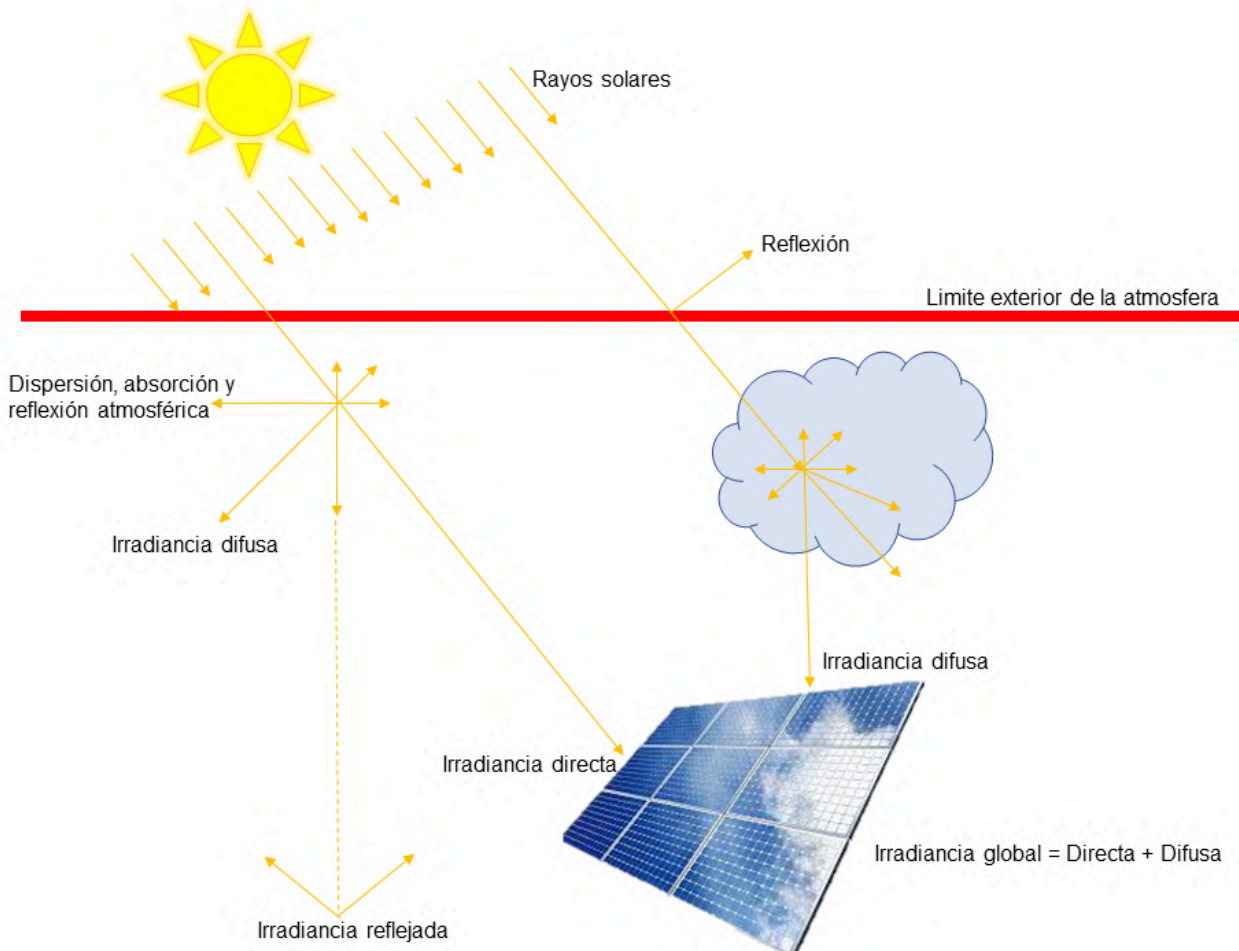
Figura 2*Piranómetro con sensor semiconductor Davis.*Fuente: <https://www.davisinstruments.com/products/solar-radiation-sensor>**Termocupla:** Herramienta de medición de temperatura típicamente superficial

Irradiancia: Está definida como la energía incidente sobre una superficie por unidad de área y tiempo, lo que equivale a la potencia incidente por unidad de superficie teniendo como unidad de medida el W/m^2 . La figura 3 proporciona una visión más detallada de la clasificación de los tipos de irradiancia

- **Irradiancia directa:** Se denomina irradiancia directa a la componente de la irradiancia global, que incide sobre una superficie y viene directamente del sol, sin que exista cambio de dirección.
- **Irradiancia difusa (Irradiancia indirecta):** Es la componente de la irradiancia global que incide sobre la superficie terrestre de forma indirecta, ya que atraviesa la atmósfera y las nubes, lo que hace que se disperse, la irradiancia difusa representa cerca de un 15% de la irradiancia global en días soleados y en días nublados este porcentaje aumenta considerablemente.
- **Irradiancia horizontal global:** Se denomina irradiancia horizontal global a toda la cantidad de luz en una superficie horizontal, es la suma de la irradiancia directa más la difusa.
- **Irradiancia reflejada:** Se denomina irradiancia reflejada a la cantidad de luz solar dispersa desde la superficie terrestre que depende del albedo de la superficie. El albedo está definido como la relación de la irradiancia solar reflejada o ascendente que se refleja hacia el cielo y la irradiancia horizontal global incidente o descendente. El albedo depende de la superficie y puede variar de 0,1 para superficies oscuras a 0,2 para pastizales y a más de 0,8 para nieve recién caída. En una superficie perfectamente reflectante el albedo toma un valor de 1.

Figura 3.

Tipos de irradiancia.



Fuente: adaptado de (CUSHICÓNDOR, 2019)

Celda fotovoltaica: Las celdas FV son dispositivos electrónicos que transforman la energía lumínica (fotones) en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. El material más comúnmente utilizado en estas celdas es el silicio, y su eficiencia de conversión varía según el tipo de silicio utilizado.

Estación meteorológica: Una estación meteorológica es un sistema integrado por dispositivos de alta exactitud diseñados para la observación y el análisis de diversas variables atmosféricas. Estos incluyen sensores para medir la irradiancia solar horizontal, anemómetros para la determinación de la velocidad y dirección del viento, termómetros para registrar la temperatura ambiente e higrómetros para evaluar la humedad relativa del aire, entre otras variables.

Microinversores: Los microinversores son dispositivos electrónicos utilizados en sistemas de energía solar fotovoltaica. Su función principal es convertir la corriente continua (DC) generada por los paneles FV en corriente alterna (AC), que puede ser utilizada en el hogar o comercializada a la red eléctrica.

Entrada analógica de rango múltiple: Una entrada analógica de rango múltiple es un tipo de entrada que puede procesar señales de diferentes magnitudes. Esto es especialmente relevante en el contexto de dispositivos de medición o control, donde es necesario adaptarse a distintos tipos de señales provenientes de sensores o transductores.

Entrada de frecuencia: Una entrada de frecuencia se refiere a un componente electrónico diseñado para medir la frecuencia de una señal eléctrica. Esta frecuencia, que representa el número de ciclos de una onda que ocurren en un segundo, se expresa en hertz (Hz). Las entradas de frecuencia son esenciales en sistemas de medición y control, ya que permiten a dispositivos interpretar señales provenientes de sensores cuya frecuencia varía con la magnitud medida, como es el caso de los sensores de velocidad de rotación o los medidores de flujo.

Resumen

Título: Desempeño energético del sistema fotovoltaico del edificio de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones a 2023^{1*}

Autor: Karen Daniela Saenz Niño y Duvan Andres Gurain Puentes^{2*}

Palabras Clave: Datalogger, eficiencia, energías renovables, irradiancia, piranómetro, termocupla.

Descripción: Este trabajo de grado evalúa el rendimiento energético de un sistema fotovoltaico en un edificio universitario. El SFV de la E3T se encuentra situado en la terraza del quinto piso y está compuesto por 43 módulos solares fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos fijos con orientaciones de 10° sur-norte, 10° norte-sur y 0. El objetivo principal de este trabajo es evaluar el desempeño energético del sistema fotovoltaico durante seis meses, utilizando datos meteorológicos y parámetros eléctricos. Para alcanzar este objetivo, se instaló un sistema de monitoreo que captura variables necesarias para el análisis del desempeño. Este sistema incluye dataloggers, piranómetros y termocuplas, que facilitan la lectura, análisis y procesamiento de datos de potencia, energía, temperatura operativa e irradiación solar. Además, se construyó una base de datos integral que recopila las variables monitoreadas, sobre la cual se realizaron evaluaciones detalladas de los indicadores de desempeño específicos del sistema fotovoltaico en estudio. El análisis de los datos recopilados durante un período de seis meses evidenció una alta captación de irradiancia, lo cual se traduce en una producción óptima de energía eléctrica a partir de la energía solar. El análisis de datos recopilados, evidenció una alta captación de irradiancia y una producción óptima de energía solar, con un rendimiento superior al 70%. Los indicadores de rendimiento específico y de referencia corroboraron esta eficiencia, demostrando una relación efectiva entre la captación de irradiancia y su conversión en energía útil. Estos resultados refuerzan la efectividad del SFV en la E3T.

^{1*} Trabajo de Grado

^{2**} Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: German Alfonso Osma Pinto. Doctor en Ingeniería.

Abstract

Title: Energy performance of the photovoltaic system of the School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering building to 2023.^{3*}

Author(s): Karen Daniela Saenz Niño y Duvan Andres Gurain Puentes⁴

Key Words: Datalogger, efficiency, pyranometer, renewable energies, thermocouple.

Description: This thesis evaluates the energy performance of a photovoltaic system in a university building. The PV system at E3T is located on the rooftop of the fifth floor of the school building and consists of 43 fixed monocrystalline and polycrystalline solar modules with orientations of 10° south-north, 10° north-south, and 0°. The main objective of this study is to assess the energy performance of the photovoltaic system in the Electrical Engineering Building over a six-month period, using meteorological data and electrical parameters. To achieve this goal, a monitoring system was deployed to capture the variables necessary for performance analysis. This system relied on the installation of devices such as dataloggers, pyranometers, and thermocouples, whose operation guided the establishment of a methodology for data reading, analysis, and processing related to power, energy, operating temperature, and solar irradiance. This strategy was chosen to optimize resources and make the most of the equipment already available at E3T, thus minimizing operational costs and promoting efficient management of institutional resources. Additionally, a comprehensive database was built to collect the monitored variables, upon which detailed evaluations of specific performance indicators of the photovoltaic system under study were conducted. The analysis of the collected data revealed a high irradiance capture and optimal solar energy production, with a performance exceeding 70%. The specific and reference performance indicators corroborated this efficiency, demonstrating an effective relationship between irradiance capture and its conversion into useful energy. These results reinforce the effectiveness of the PV system at E3T.

^{3*} Degree Work

^{4*} School of Physicomechanics. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Electrical Engineering. Director: German Alfonso Osma Pinto. Ph.D. in Engineering

Introducción

En la actualidad, la implementación de energías limpias y sostenibles ha adquirido un papel importante a nivel mundial. Debido a la crisis actual del uso excesivo de recursos fósiles, se hace necesaria la implementación de tecnologías amigables con el medio ambiente. En este contexto, la energía solar fotovoltaica se ha convertido en una solución para satisfacer las necesidades energéticas, al reducir notablemente la huella de carbono.

Conscientes de esta necesidad, la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), adscrita a la Universidad Industrial de Santander (UIS), ha diseñado y construido su edificio aplicando estrategias de sostenibilidad energética. El edificio cuenta con una arquitectura que aprovecha la luz del sol. La orientación de las ventanas permite regular la temperatura interior de forma natural y reduce la dependencia de sistemas de climatización convencionales, lo que disminuye su consumo energético.

También se ha instalado un sistema de generación fotovoltaica, el cual está compuesto por 43 módulos solares, distribuidos de la siguiente manera: 38 de ellos están posicionados a un ángulo de elevación de 10° Sur - Norte, 2 están posicionados a un ángulo de elevación de 10° Norte - Sur, 2 están orientados a 0° de elevación y 1 está instalado en un seguidor solar. Todo este sistema representa una importante estrategia para aprovechar la energía solar. Por lo que, es deseable estudiar su desempeño.

El estudio del desempeño energético de un SFV hace referencia a un análisis destinado a evaluar la eficiencia y el rendimiento de un sistema de generación de energía solar fotovoltaica. Este análisis implica la medición y evaluación de varios parámetros y variables relacionados con la generación de energía eléctrica a partir de la irradiación solar incidente. Incluye la evaluación

de la potencia eléctrica generada por el sistema, la eficiencia de conversión de energía solar en energía eléctrica, la estabilidad operativa en diferentes condiciones ambientales y temporales, así como la durabilidad y confiabilidad de los componentes del sistema. Además, este estudio puede involucrar la comparación de los datos obtenidos con los valores esperados o teóricos, así como la identificación de posibles áreas de mejora para optimizar el rendimiento del sistema fotovoltaico.

En este sentido, estudiar en detalle el rendimiento del sistema fotovoltaico es esencial para conocer su estado actual y propender por toma de decisiones informadas en aras de garantizar su aprovechamiento.

Para llevar a cabo el estudio, se realizó un inventario de los componentes ya instalados y se determinó qué elementos adicionales eran necesarios para monitorizar diariamente las variables a utilizar en los indicadores de desempeño. En la terraza del edificio, el sistema fotovoltaico existente contaba únicamente con una estación meteorológica de la marca Davis, la cual no lograba abarcar la recopilación de variables propias de cada subsistema.

Por ello, se procedió a la instalación de los componentes adicionales. Estos componentes tienen la finalidad de monitorear variables clave, tales como: temperatura e irradiancia incidente, en cada uno de los subsistemas integrados en el sistema fotovoltaico de la terraza.

El estudio del desempeño de un sistema fotovoltaico también permite identificar brechas en el conocimiento existente, lo que puede impulsar nuevas líneas de investigación y desarrollo tecnológico. Así, se contribuye a la evolución de la energía solar fotovoltaica, asegurando que su implementación sea cada vez más efectiva y accesible, en línea con los objetivos de sostenibilidad energética global.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Evaluar el nivel de desempeño energético del sistema fotovoltaico del Edificio de Ingeniería Eléctrica, empleando datos meteorológicos y parámetros eléctricos en un lapso de 6 meses.

1.2. Objetivos Específicos

- Implementar un sistema de monitorización de las variables requeridas para el estudio de desempeño.
- Establecer una metodología para la recolección, análisis y tratamiento de los datos de potencia, energía, temperatura de operación e irradiancia solar.
- Construir una base de datos de las variables monitorizadas.
- Evaluar los indicadores de desempeño seleccionados para el sistema fotovoltaico.

2. Sistema Fotovoltaico E3T: Especificaciones y Características

El sistema fotovoltaico de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) está instalado en las terrazas del cuarto y quinto piso del edificio de la escuela. Este sistema abarca una superficie aproximada de $71,6 \text{ m}^2$ y consta de 43 paneles solares, cuyas elevaciones se detallan en la Tabla 1, tiene una capacidad instalada de aproximadamente 11,575 kWp.

Los paneles solares instalados corresponden a cuatro fabricantes, UPSOLAR (Upsolar Group, 2016) con celda policristalina y con una potencia nominal de 250 Wp, CANADIAN SOLAR (CanadianSolar Inc, 2016) con celda policristalina y con una potencia nominal de 255 Wp, JINKO SOLAR con celda policristalina y potencia nominal de 325 Wp y TRINA SOLAR (TrinaSolar, 2017) con celda policristalinas y potencia nominal de 270 Wp. Algunas características eléctricas y mecánicas de los paneles FV mencionados anteriormente se pueden observar de manera más detallada en las tablas 1 y 2.

Tabla 1.*Características eléctricas paneles FV.*

Características eléctricas				
Marca del panel FV	UPSOLAR	CANADIAN SOLAR	JINKO SOLAR	TRINA SOLAR
Referencia	M250P-B	CS6P-255P-SD	JKM325PP-72(pl us)	TSM-PD05.08
Potencia máxima (Pmax STC)	250 Wp	255 Wp	325 Wp	270 Wp
Corriente máxima de operación (Vmax)	30.9 V	30.2	37.6	30.9 V
Corriente máxima de operación (Imax)	8.1 A	8.43 A	8.66 A	8.73 A
Corriente de corto circuito (isc STC)	8.45 A	9 A	9.10 A	9.18 A
Tensión de circuito abierto (Voc STC)	38.2 V	37.4 V	46.7 V	38.4 V
Eficiencia del módulo (η)	14.40%	15.85%	16.75%	16.50%

Tabla 2.*Características mecánicas paneles FV.*

Características mecánicas				
Marca del panel FV	UPSOLAR	CANADIAN SOLAR	JINKO SOLAR	TRINA SOLAR
Tipo de celda	Policristalina	Policristalina	Policristalina	Policristalina
	156x156 mm	156x156 mm	156x156 mm	156x156 mm
Número de celdas	60 celdas (6X10)	60 celdas (6X10)	72 celdas (6x12)	60 celdas (6X10)
Dimensiones	1640 x 992 x 35 mm	1638 x 982 x 40 mm	1956 x 992 x 40 mm	1650 x 992 x 35mm
Peso	18.5 Kg	19.1 Kg	26.5 Kg	18.6 Kg

El SFV se ha segmentado en tres subsistemas, como se muestra en la Figura 4. Los aspectos técnicos específicos de cada uno de estos se detallan en la tabla 3. Cada subsistema está equipado con los elementos esenciales para llevar a cabo la supervisión de su funcionamiento diario. Entre estos se encuentran los microinversores IQ7, IQ7+ y M250 de la reconocida marca Enphase como se observa en la Figura 4, el dispositivo Envoy cuya función es servir como medio de comunicación entre los microinversores y la nube, el analizador de calidad de la energía PQube 3 y medidores de energía. Estos dispositivos posibilitan la recopilación, procesamiento y visualización de variables clave, como la energía activa y no activa inyectada, así como la energía generada por cada subsistema.

Figura 4.
Ubicación de sistemas FV.



Tabla 3.*Elevación de paneles fotovoltaicos SFV E3T.*

Ubicación	Subsistema	Elevación	Cantidad
Terraza cuarto piso	1 (SFV 1)	Seguidor solar	1
Terraza quinto piso -Frente al ascensor	2 (SFV 2)	10° orientación sur	18
Terraza quinto piso – Frente a las escaleras	3 (SFV 3)	10° orientación sur	18
Terraza quinto piso – Extremo este		10° orientación norte	2
Terraza quinto piso – Extremo este	4 (SFV 4)	10° orientación sur	2
Terraza quinto piso – Extremo este		0°	2

Además, se dispone de una estación meteorológica, cuya representación visual se presenta en la Figura 5. Su principal cometido consiste en supervisar una variedad de condiciones climáticas ambientales, tales como la irradiancia solar horizontal, temperatura ambiente, la dirección y velocidad del viento. Esta estación se encuentra estratégicamente ubicada junto al sistema fotovoltaico 2 (SFV2), en proximidad a las escaleras de acceso a la terraza.

Figura 5.
Estación meteorológica Davis terraza edificio E3T.



Fuente: <https://www.davisinstruments.com/pages/vantage-pro2>

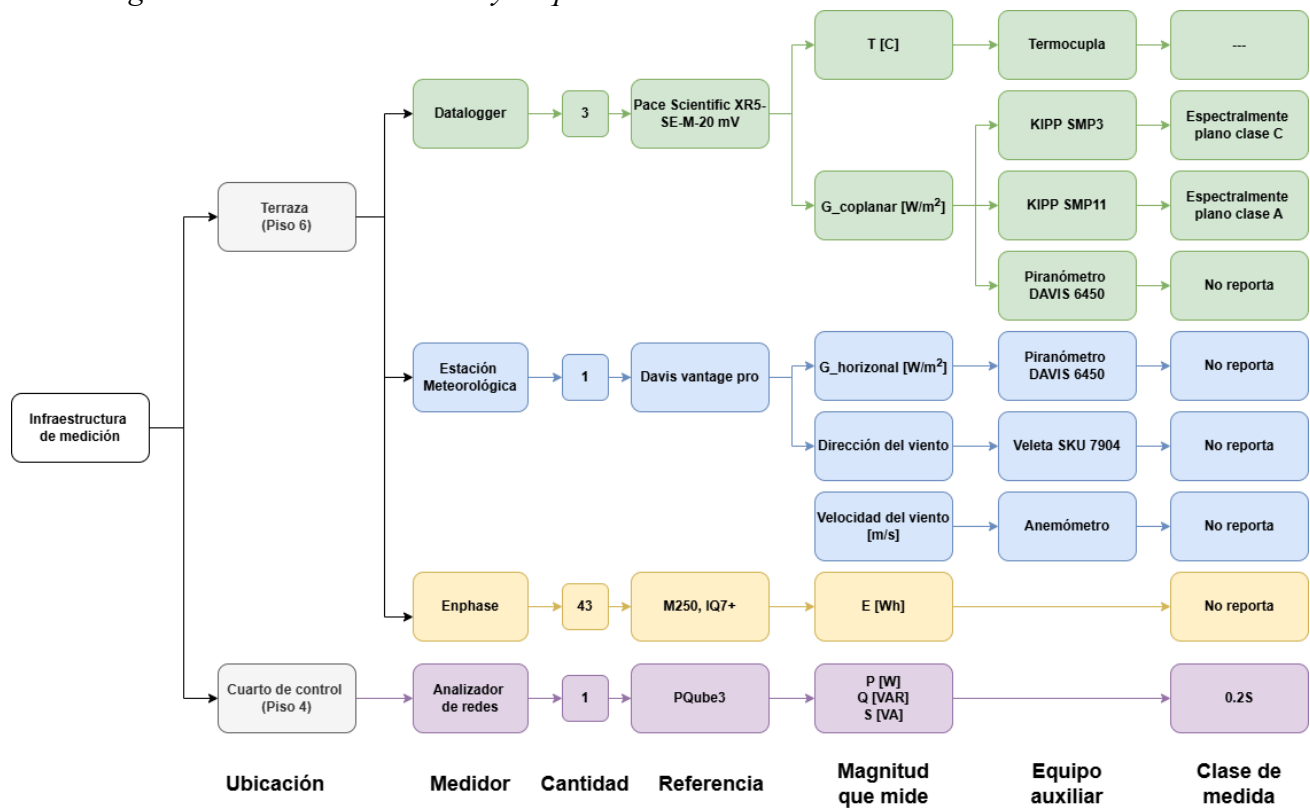
La información recopilada por esta estación meteorológica es utilizada para estudiar el comportamiento de variables microclimáticas en investigaciones desarrolladas por el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica - GISEL, adscrito a la E3T. Note que este equipo no es el adecuado para el desarrollo de este trabajo de grado debido a que no permite medir la irradiancia solar incidente o temperatura de operación de los paneles FV sin embargo, esta estimación era muy poco precisa ya que no se adapta a las necesidades propias de cada subsistema, como lo son la ubicación y el ángulo de elevación.

3. Análisis y adaptación del sistema de medida del SFV

Para evaluar el desempeño energético del SFV, se llevó a cabo una consulta y recopilación de información, basada en estudios previos realizados a nivel mundial. Posterior a esto se seleccionó aquella información que se ajustara a las necesidades específicas, componentes y estructura del sistema en cuestión.

Para evaluar el desempeño energético SFV, se llevó a cabo una minuciosa consulta y recopilación de información en bases de datos locales e internacionales, tales como Science Direct, IEEE y la biblioteca virtual de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Esta búsqueda se realizó con el objetivo de reunir la mayor cantidad de información relevante sobre estudios previos relacionados con el desempeño energético de diferentes SFV en el mundo.

Los principales datos recolectados incluyeron: los equipos utilizados en las investigaciones, los indicadores de desempeño específicos de cada proyecto, el tiempo de monitorización, los detalles técnicos y mecánicos de los SFV, así como la discusión de los resultados obtenidos. Con esta información, se desglosaron y analizaron en profundidad cada uno de estos ítems, permitiendo un análisis detallado de las variables aplicables al SFV de la E3T.

Figura 6.*Metodología del sistema de medición y adquisición de variables.*

3.1. Parámetros existentes

El sistema fotovoltaico preexistente estaba equipado con los dispositivos esenciales para llevar a cabo un monitoreo en tiempo real de su operación. A través de estos dispositivos, se recopilan diversas variables, entre las que se incluyen la energía activa y no activa inyectada, la energía generada por cada subsistema, la energía total generada, las distintas pérdidas del sistema y algunas variables microclimáticas recopiladas por una estación meteorológica con un posicionamiento totalmente horizontal. La Tabla 4 relaciona variables con el dispositivo encargado de su medición.

Tabla 4.*Dispositivos para recolección de variables pre-existentes.*

Equipo	Medición	Variable
PQube 3	Energía	Pr, Ps, Pt, P3, Sr, Ss, St, S3, THDir, THDis, THDit
Piranómetro Davis – estación meteorológica	Irradiancia horizontal	Gh
Veleta - Estación meteorológica	Dirección del viento	Dir
Anemómetro - Estación meteorológica	Velocidad del viento	V_air

Las variables preexistentes desempeñan un papel fundamental en el monitoreo del sistema fotovoltaico de la terraza. Sin embargo, es importante destacar que su orientación u otro factor obstaculizan su implementación en el análisis del desempeño energético.

3.2. Indicadores de desempeño

Empleando bases de datos como la IEEE y Science Direct, se llevó a cabo una investigación enfocada en estudios relacionados con el rendimiento energético de los SFV a nivel mundial. Como resultado de esta búsqueda meticulosa, se identificaron y seleccionaron artículos que proporcionaban información detallada sobre el desempeño energético de distintos SFV en diversas partes del mundo.

Tras realizar una lectura minuciosa de estos artículos y estudios, se procedió a extraer datos fundamentales, tales como el año de publicación, el nombre del journal, la base de datos en la que se encontró el artículo, detalles específicos sobre el SFV estudiado, la duración del período de monitorización, los equipos empleados en la investigación, los indicadores de desempeño evaluados y los resultados obtenidos (Laarabi et al., 2017), (Jabbour et al., 2021),

(Boulmrharj et al., 2022), (Elibol et al., 2017), (Bansal et al., 2021), (Kim et al., 2023), (Koev, 2022), (Cristea et al., 2021), (So et al., 2006), como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5.

Artículos recopilados.

Artículo	Base de datos	Tiempo de monitorización	Indicadores de desempeño	Tipo de panel	Equipos utilizados
Performance evaluation of grid-connected silicon-based PV systems integrated into institutional buildings: An experimental and simulation comparative study.	Science Direct	1 año	•Yf •Yr •ED •PR •CF	•Ms -Si •Ps - Si	•Plataforma de adquisición de datos climáticos y el GCPV in situ •Medidores de tensión, corriente y potencia •PT100
Performances of Various PV Modules Technologies under Climate Conditions of Rabat in Morocco	IEEE	31 meses 30 días	•Producción eléctrica (kWh) •productividad (kWh/kWp) •Relación de desempeño (%)	•A – Si •Multi – Si •Mono - Si	Estación meteorológica
Energetic and Economic Evaluation of Mono and Poly c-Si Grid-connected PV Systems: In Ouarzazate, Morocco	IEEE	1 año	•PR •YF •CF	•P – Si •M - Si	•Software System Advisor Model (SAM) •Inversores Sunny Boy 2000HF •Estación meteorológica
Outdoor performance analysis of different PV panel types	Science Direct	1 año	•PR •CF	•Mono - Si •Poly – Si •A – Si	•Estación meteorológica TFA 35.1077 •Caja de sensores SMA

Comparative investigation of performance evaluation, degradation causes, impact and corrective measures for ground mount and rooftop solar PV plants – A review	Science Direct	NA	• Yr • Yf • PR • CUF • η	NA	NA
Quality Analysis of Photovoltaic System Using Descriptive Statistics of Power Performance Index	IEEE	1 año	• Pi • IPP • Yf • CUF	NA	•Pirómetro •Termómetro •Medidor de viento •Higrómetro •Sensores de temperatura
An Investigation of the Energy Efficiency of a Grid Connected Photovoltaic System	IEEE	105 meses	• PR • CUF • Yf • η	•Mono - Si •Poli -Si	•Sunny Sensor Box •Inversores
Performance analysis of grid-connected rooftop solar photovoltaic systems using different photovoltaic technologies: a case study in Romania	IEEE	1 año	• Ya • Yf • Yr • PR • FC	•M-Si •P-Si •HIT •CIGS •CdTe •A-Si	•Software PVSOL Premium 2021 •Software Meteonorm
Performance results and analysis of large scale pv system	IEEE	1 año	•PV •PR •Lc •Ls	•Multi - Si	•RTU •Meteorological sensor •Local server •Power meter •PCU

•PV Array

Después de llevar a cabo la búsqueda, se procedió a extraer todos los indicadores de rendimiento mencionados en los estudios identificados. Estos indicadores fueron desglosados con base en las variables necesarias para su implementación en cada sistema fotovoltaico (SFV). La presentación detallada de estos indicadores se encuentra disponible en la Tabla 6, donde se ofrece una visión más específica y descriptiva de cada uno.

Tabla 6.*Indicadores de desempeño energético recopilados.*

Parámetro	Símbolo	Equivalencia	Unidad
Rendimiento energético del campo FV	Y_A	$\frac{E_A}{P_o}$	$h \text{ o } kWh$
Rendimiento final del sistema	Y_i	$\frac{E_{out}}{P_o}$	$h \text{ o } kWh$
Rendimiento de referencia	Y_r	$\frac{H_i}{G_{i-ref}}$	$h \text{ o } kWh$
Pérdidas de captación del campo FV	L_c	$Y_r - Y_A$	$h \text{ o } kWh$
Pérdidas del balance del sistema (BOS)	L_{BOS}	$Y_A - Y_i$	$h \text{ o } kWh$
Eficiencia del campo FV	η_A	$\frac{E_A}{H_i * A_A}$	-
Eficiencia del sistema	η_f	$\frac{E_{out}}{H_i * A_A}$	-
Eficiencia del BOS	η_{BOS}	$\frac{E_{out}}{E_A}$	-

Coeficiente de rendimiento	PR	$\frac{Y_i}{Y_r}$	%
Coeficiente de eficiencia energética	CUF	$\frac{\text{Potencia actual (kWh)}}{\text{Capacidad instalada(kWp)}*24(h)*36}$	-

Una vez revisado el listado de posibles indicadores para implementar en el estudio, se llevó a cabo un proceso de filtrado para determinar cuáles eran los más apropiados. Este filtro implicó investigar qué equipos generaban las variables mencionadas en cada indicador. Después de obtener el listado de equipos, se realizó un cruce de datos entre estos y los disponibles en la escuela para la instalación y almacenamiento de variables. Este análisis reveló cuáles indicadores eran los más idóneos, según las necesidades específicas del SFV. Los resultados se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7.

Indicadores de desempeño seleccionados

Indicador	Variable	Equipo
Rendimiento Específico (Y_i)	Hi	Piranómetros del SFV
	Gi-ref	-
Rendimiento Final del Sistema o Rendimiento de Referencia (Y_r)	Eout	PQube 3
	Po	-
Coeficiente de Rendimiento (PR)	$\frac{Y_i}{Y_r}$	-

El indicador de desempeño Y_i (rendimiento específico), representa la cantidad de energía útil generada por el SFV (Landínez, 2020), las variables que se requieren para el cálculo de este indicador es la energía producida con unidad kWh y potencia del generador FV con unidad kWp.

El resultado del indicador se expresa en horas (h) y se interpreta como el número de horas durante las cuales el sistema fotovoltaico tendría que funcionar a su potencia nominal para generar la misma cantidad de energía que ha generado en un periodo determinado (Elibol et al., 2017). Un valor alto de Y_i indica que el sistema está generando una gran cantidad de energía con respecto en relación con capacidad nominal; mientras que un Y_i bajo podría indicar problemas en el diseño, instalación, mantenimiento o diversas condiciones ambientales que impiden su funcionamiento óptimo.

Para obtener resultados más precisos en la evaluación del sistema fotovoltaico, se calcularon tres tipos de rendimientos específicos, considerando puntos clave del sistema. Estos puntos incluyen:

- **Rendimiento específico de los componentes generadores:** Este rendimiento se refiere a la eficiencia de los módulos fotovoltaicos en la conversión de la energía solar en energía eléctrica. Se calcula teniendo en cuenta la energía producida y la potencia del generador FV.
- **Rendimiento específico de los microinversores:** Este parámetro evalúa la eficiencia de los microinversores en la conversión de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA). El rendimiento de los microinversores se mide comparando la energía eléctrica generada en corriente continua con la energía entregada en corriente alterna.
- **Rendimiento específico en el punto de conexión común:** Este rendimiento se refiere a la eficiencia del sistema fotovoltaico en el punto de acoplamiento con la red eléctrica o el sistema de consumo interno. Incluye todas las pérdidas desde los módulos fotovoltaicos hasta el punto de conexión, incluyendo las pérdidas por cableado,

eficiencia de inversores, y otros componentes del sistema. Este se calcula con la medida de la energía inyectada y la potencia del generador FV.

El indicador Y_r (rendimiento de referencia), se utiliza para medir la cantidad de energía solar que incide sobre los paneles solares (Jain et al., 2022), las variables utilizadas para calcular el indicador son la irradiación coplanar con unidades kWh/m² e irradiancia de transferencia con unidades kW/m². El resultado de este indicador se expresa en horas (h) y se interpreta como el número de horas durante las cuales los paneles solares reciben una irradiancia cercana o igual a 1000 W/m². Un valor alto de Y_r indica una buena captación de irradiancia solar, que a su vez esto debería traducirse en mayor producción de energía.

El indicador de desempeño PR (performance ratio) es el encargado de cuantificar la eficiencia de conversión del sistema en condiciones reales de operación, este indicador se calcula a partir de los dos indicadores de desempeño anteriores. Este indicador se expresa como porcentaje; un PR del 100% indica que el SFV está operando en su máxima eficiencia teórica, en condiciones operacionales reales, el PR debería ser entre 90% y 70% para indicar un buen funcionamiento del SFV (Sips et al., s. f.). Para minimizar las variaciones estacionales del rendimiento (PR), la IEC 61724 (Asociación Española de Normalización (UNE), 2022), recomienda calcular un coeficiente de rendimiento corregido con la temperatura (PRT), modificando la potencia asignada en cada periodo de medición para corregir las discrepancias entre la temperatura real del panel y la de referencia en condiciones estándar (STC) 25°C. Esto se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$PRT = \left[\sum_K E_k \right] / \left[\sum_k \frac{C_k P_o H_k}{G_{STC}} \right]$$

Donde C_k viene dado por:

$$C_K = 1 + \beta [T_{mod,K} - 25]$$

Para este estudio se tuvo presentes las diversas pérdidas que pueden haber en un sistema fotovoltaico, con el objetivo de obtener resultados más acertados en cuanto al rendimiento real de un SF operacional en condiciones no controladas, como lo son:

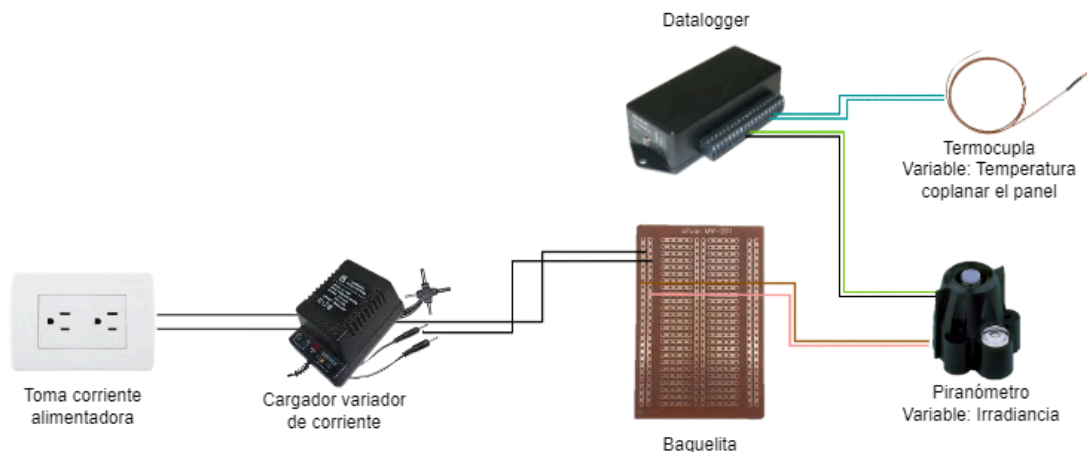
- **Pérdidas en el panel FV/Sombreamiento:** Se refieren a la reducción en la generación de energía debido a la sombra proyectada sobre los paneles solares.
- **Pérdidas por degradación:** se refieren a la disminución gradual en la capacidad de generación de energía de los paneles fotovoltaicos a lo largo del tiempo. Esta degradación es una consecuencia natural del envejecimiento de los materiales de los paneles.
- **Pérdidas por sobrecalentamiento:** Ocurren cuando los paneles fotovoltaicos operan a temperaturas superiores a sus condiciones óptimas de funcionamiento. La eficiencia de los paneles disminuye a medida que aumenta la temperatura.
- **Pérdidas en los microinversores:** se refieren a la energía perdida durante la conversión de corriente continua (CC) generada por los paneles solares a corriente alterna (CA) utilizable.
- **Pérdidas por consumo de microinversores - noche:** Se refieren a la energía consumida por los microinversores cuando no están generando energía.
- **Pérdidas en la acometida AC día/noche:** se refieren a la energía perdida durante la transmisión de la energía generada desde los inversores hasta el punto de consumo o conexión a la red. Estas pérdidas pueden ocurrir debido a la resistencia de los cables y la eficiencia de otros componentes del sistema de distribución de energía.

3.3. Adecuación de la infraestructura de medición del SFV

El sistema de medición consiste en conectar simultáneamente los equipos responsables de muestrear y almacenar las variables requeridas. Para este proyecto en específico, estos equipos incluyen piranómetros para recolectar datos de irradiancia y termocuplas para medir la temperatura coplanar de los paneles solares. Los datos recopilados por estos dispositivos se almacenan en un datalogger, el cual registra la información de manera continua en intervalos de tiempo predefinidos, la Figura 7 ofrece una representación general de la conexión entre estos dispositivos

Figura 7.

Esquema de conexión general piranómetros, termocuplas y datalogger.



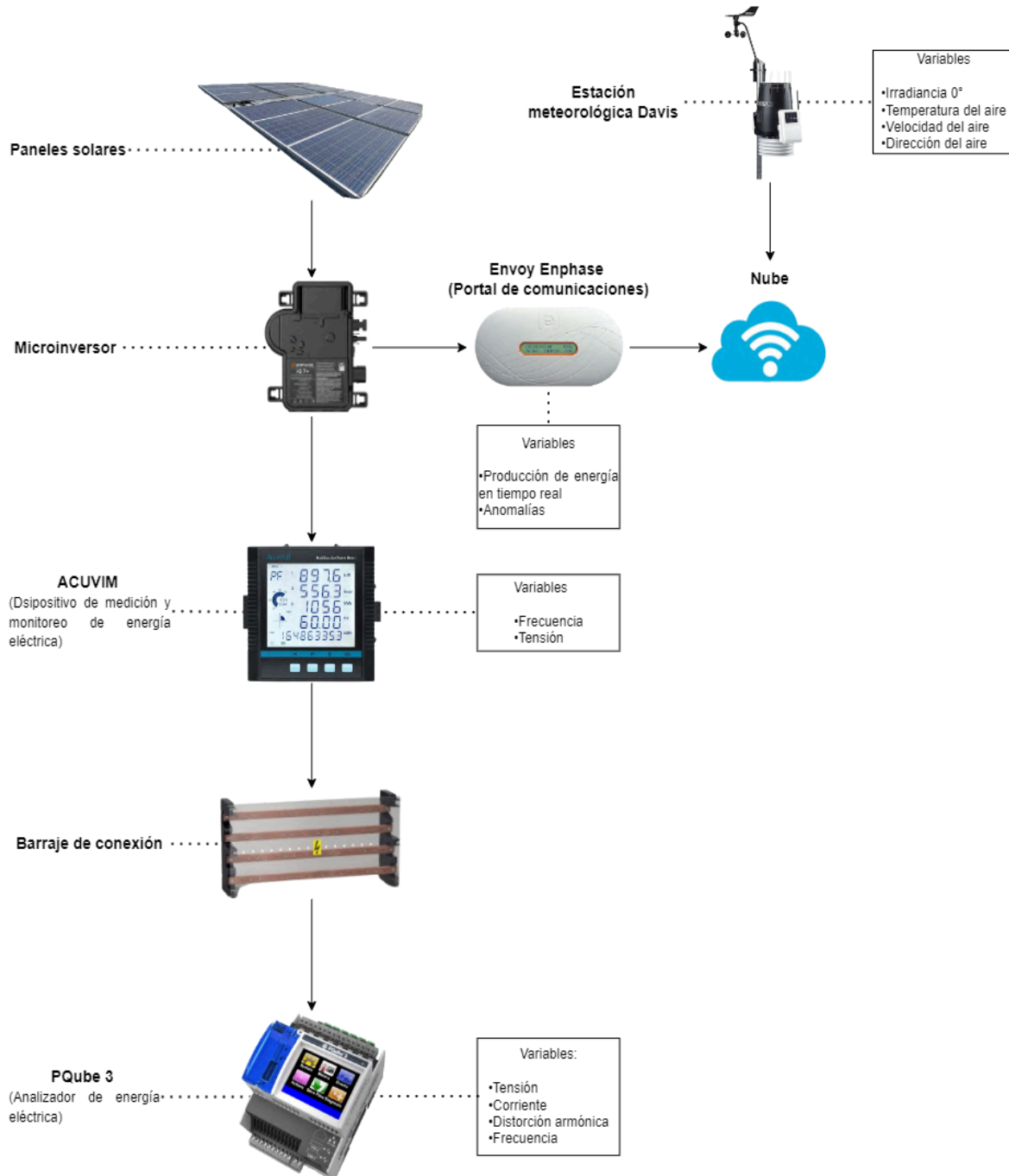
Para construir el sistema de medición, se utilizaron equipos que estaban disponibles de manera inmediata en la escuela y se instalaron de acuerdo con las particularidades de cada SFV.

En cuanto a la obtención de las demás variables requeridas, el SFV de la E3T cuenta con un sistema altamente eficiente para recolectar datos de energía, irradiancia, diferentes temperaturas, dirección y velocidad del viento. Estos datos se almacenan en plataformas digitales, lo que permite su visualización y tratamiento según sea necesario. La Figura 8 presenta un esquema general de la conexión entre los diferentes equipos involucrados en la

recopilación de estas variables. Cabe destacar que este sistema ya operaba de manera óptima antes de iniciar el estudio del desempeño energético, por lo que no requirió ninguna intervención o adecuación de sus componentes.

Figura 8.

Esquema de conexión obtención de variables SFV E3T



A continuación, se detallan los equipos implementados en el sistema de medición y almacenamiento de variables instalados para este estudio:

3.3.1. Almacenamiento de datos

Se seleccionó un Datalogger XR5-SE-20mV de la marca PACE SCIENTIFIC para el almacenamiento de datos, como se muestra en la Figura 9. Este dispositivo es compatible con los demás equipos (piranómetros y termocuplas), ya que cuenta con entradas específicas para la monitorización de irradiancia y temperatura. Además, su disponibilidad inmediata en la escuela fue un factor adicional que favorece su elección.

Figura 9.

Datalogger XR5-SE-20mV y EC45 Compact Weatherproof Case



Fuente: <https://www.pace-sci.com/data-loggers-xr5.htm> - <https://www.pace-sci.com/ec45.htm>

Este dispositivo dispone de 19 entradas, cuyas especificaciones se detallan en la tabla del apéndice A, lo que lo hace compatible con una amplia gama de sensores, tales como temperatura, humedad relativa, presión, aceleración, corriente, voltaje, luz, radiación solar, velocidad del viento, lluvia, entre otros.

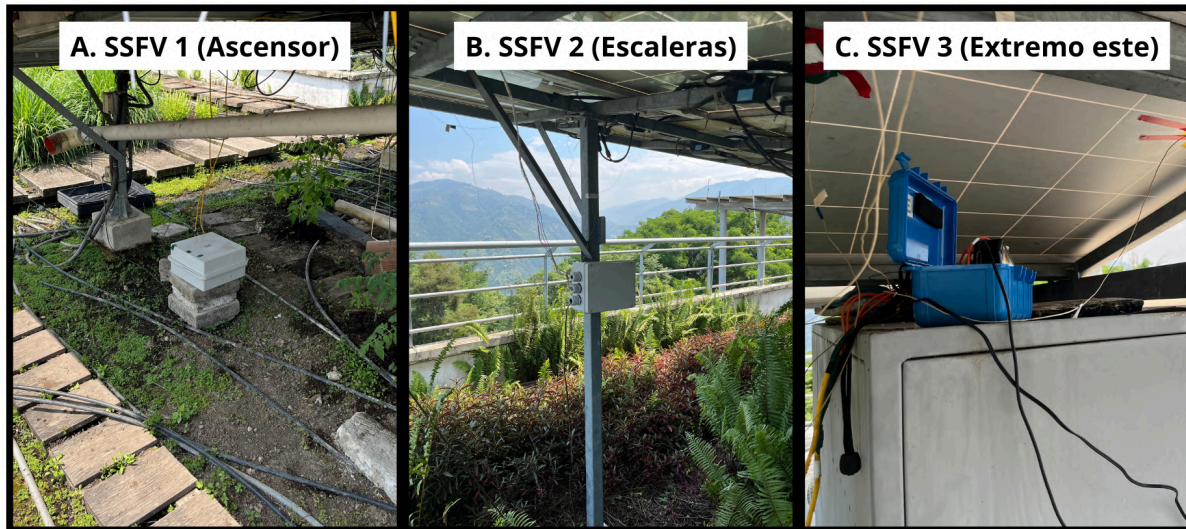
Para asegurar el correcto funcionamiento del dispositivo, se llevó a cabo una medición de su fuente de alimentación. Esta fuente consiste en dos baterías de litio, cada una con una tensión de 3,6 V, según lo indicado en el manual de usuario (Pace Scientific, 2024). Mantener una tensión estable y constante es crucial para garantizar el óptimo rendimiento del dispositivo.

Tras realizar la medición y verificar que las baterías funcionan correctamente, se procedió a llevar a cabo pruebas de funcionamiento adicionales utilizando un piranómetro de la marca Davis. Estas pruebas consistieron en establecer una conexión provisional entre el piranómetro y el data logger, para luego, exponer a la luz y sombrear el piranómetro, con el fin de obtener una pequeña cantidad de lecturas, las cuales fueron analizadas para determinar si el equipo se encontraba en óptimas condiciones para su instalación.

Las pruebas realizadas confirmaron el correcto funcionamiento de tres data loggers, todos del mismo modelo. No obstante, para garantizar un rendimiento constante, se decidió sustituir las baterías existentes en cada equipo por unas completamente nuevas.

Los tres dataloggers seleccionados se posicionan debajo de cada subsistema para garantizar una proximidad óptima a los equipos de medición que se conectarán a ellos. Las ubicaciones específicas de cada datalogger se pueden apreciar en la Figura 10.

Figura 10.
Ubicación de los dataloggers.



3.3.2. *Medición de irradiancia*

La medición de irradiancia es un componente crítico en la evaluación del desempeño energético de los sistemas fotovoltaicos. En Colombia, un país bendecido con una abundancia de radiación solar, la comprensión precisa de la irradiancia disponible no solo es fundamental para la optimización de estos sistemas, sino también para garantizar la viabilidad económica y la sostenibilidad a largo plazo de las inversiones en energía solar.

Los piranómetros son instrumentos científicos esenciales en la meteorología y la investigación climatológica, ya que permiten medir con precisión la irradiancia solar, es decir, la cantidad de energía solar que llega a una superficie determinada por unidad de tiempo. Estos dispositivos son cruciales para comprender y analizar el comportamiento del sol y su influencia en nuestro planeta. Los piranómetros, por lo tanto, juegan un papel vital en el monitoreo ambiental, la gestión de recursos energéticos y el desarrollo de tecnologías de energía renovable,

como la solar fotovoltaica. La explicación del funcionamiento del dispositivo se puede ver más a detalle en el Apéndice B.

Para este estudio se utilizaron dos tipos de piranómetros, el Solar Radiation Sensor - SKU 6450 de la marca Davis Instrument y el SMP de la marca Kipp & Zonen. El funcionamiento de estos dispositivos se puede visualizar en el Apéndice C.

El piranómetro SKU 6450 de Davis Instruments está diseñado para medir la radiación solar con una respuesta espectral que va de 400 a 1100 nanómetros, lo que permite capturar una amplia gama del espectro solar relevante para los paneles fotovoltaicos. Este dispositivo se instaló en el subsistema 2 (escaleras), tal como se muestra en la Figura 10. La instalación del sensor se realizó tomando en cuenta el ángulo de inclinación del mencionado subsistema fotovoltaico, que presenta una elevación de 10° en dirección sur-norte.

Con el objetivo de asegurar la durabilidad del soporte para el piranómetro, se optó por utilizar una lámina de acrílico, ya que este material es ideal para soportar las diversas condiciones climáticas sin llegar a deformarse o que de alguna manera afecte la estabilidad del equipo. A esta lámina se le efectuaron los ajustes y modificaciones necesarios para permitir la fijación del piranómetro, utilizando para ello un conjunto de tornillos y resortes provistos con el equipo. Estos elementos son considerados idóneos para la instalación, ya que ofrecen facilidad en el posicionamiento del dispositivo. El piranómetro se posicionó en el centro del subsistema y se aseguró mediante amarres de plástico a la estructura metálica del SFV, como se observa en la figura 11.

Figura 11.
Piranómetro SKU 6450 subsistema FV 2 (escaleras)



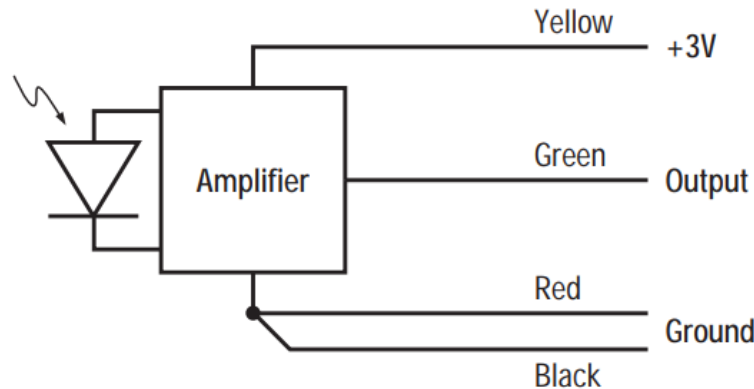
El piranómetro Davis, que requiere una alimentación precisa de 3 V y 1 mA, debe operar dentro de un margen de variación de tensión no superior al 10% para asegurar la máxima precisión en las mediciones. La estabilidad de la tensión es crítica, ya que fluctuaciones significativas podrían comprometer la fiabilidad de los datos recogidos. El diseño del dispositivo incorpora un puerto RJ11 que cumple una doble función: proporcionar alimentación y facilitar la transferencia de datos. Dada la importancia de mantener una alimentación constante y fiable, se ha implementado un puerto hembra RJ45, permitiendo así una conexión segura tanto para la alimentación como para la transmisión de datos al data logger.

Para satisfacer las especificaciones de alimentación del piranómetro, se ha seleccionado un convertidor DC/DC reductor dedicado a regular la corriente a una salida precisa de 3 V y 1 mA. Para asegurar una adecuada conexión eléctrica del dispositivo, se siguió el esquema de

conexión detallado en el manual de especificaciones técnicas (*XR5-SE Data Logger - Specifications*, s. f.), el cual se ilustra claramente en la Figura 12.

Figura 12.

Esquema de conexión eléctrica piranómetro Davis



Fuente: <https://www.davisinstruments.com/products/solar-radiation-sensor>

El convertidor obtiene energía de un cargador especialmente modificado para satisfacer los requerimientos específicos del dispositivo. Este cargador está conectado a un tomacorriente localizado cerca del sitio donde se instala el piranómetro, lo cual simplifica las tareas de mantenimiento y supervisión.

En cuanto a los piranómetros SMP3 de la marca Kipp & Zonen, son dispositivos clasificados como piranómetros de Clase C según la norma ISO 9060, ofrecen una respuesta espectral plana, lo que permite mediciones precisas de la radiación global en un plano horizontal, en el Apéndice D se visualizan más detalles técnicos del dispositivo.

Se procedió a la instalación de cuatro piranómetros modelo SMP3, distribuidos equitativamente entre dos subsistemas fotovoltaicos: dos unidades en el SFV 1 (ascensor), y dos unidades en el SFV 3 (extremo este). Durante el proceso de montaje, se optó nuevamente por el uso de láminas de acrílico en ambos subsistemas, las cuales fueron cuidadosamente ajustadas para alinearse con la posición de los tornillos previamente destinados a la fijación de los

dispositivos. En el caso particular del SFV 1, los piranómetros se centraron y se fijaron firmemente a la estructura metálica del subsistema mediante el uso de amarres de plástico, detalle que se puede apreciar en la Figura 13.

Figura 13.

Piranómetros SMP3 Kipp & Zonen subsistema 1 (ascensor)



En el SFV 3 (extremo este), se habían previamente instalado dos soportes metálicos diseñados para sostener dispositivos similares, aunque destinados a otro propósito. Estos soportes se ubicaban en los ángulos de inclinación correspondientes a los paneles solares de este subsistema, es decir, a 10° en la dirección norte-sur y a 0° . Ante la falta de espacio en la estructura metálica del subsistema para la instalación directa de los dispositivos requeridos, se optó por utilizar estos soportes ya existentes. Para fortalecer la estabilidad de uno de estos soportes, se agregó una lámina de acrílico que proporciona un apoyo adicional y mejorado al

conjunto del dispositivo. El posicionamiento preciso de estos dispositivos se puede observar en la Figura 14.

Figura 14.

Piranómetros SMP3 Kipp & Zonen SFV 3 (extremo este)

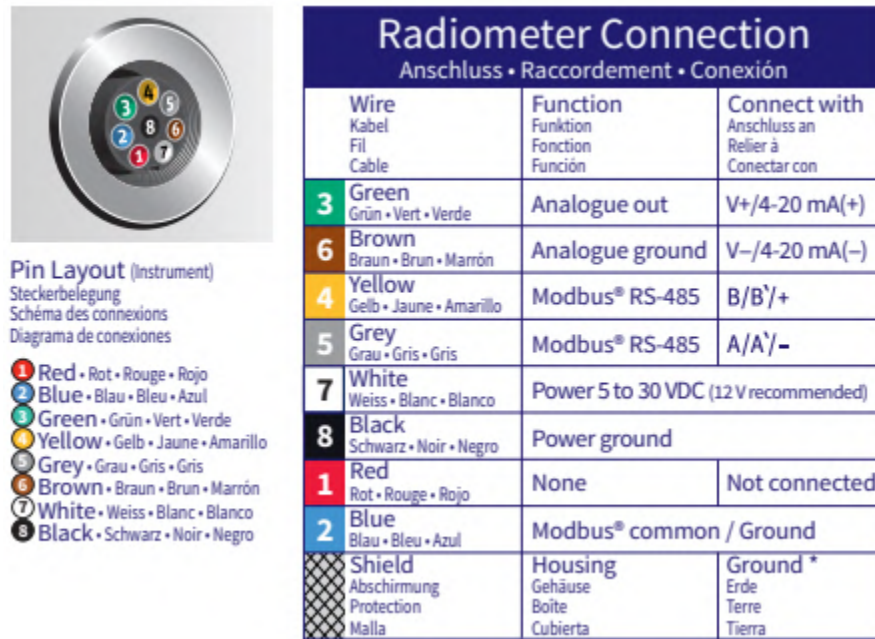


Para la correcta alimentación de los piranómetros SMP3, el dispositivo está diseñado para permitir tensiones entre 5 y 30 VDC (*Smart Pyranometer SMP3 - Kipp & Zonen, s. f.*). Sin embargo, se aconseja utilizar una alimentación de 12 VDC para optimizar su funcionamiento. Con el fin de garantizar la tensión adecuada, se ha seguido un código de colores detallado en la figura 15, extraído del manual de conexión del dispositivo. Los cables de alimentación se empalmaron a un adaptador de voltaje ajustable, que permite seleccionar una tensión de entrada desde 1.5 hasta 12 V. Siguiendo las especificaciones técnicas del fabricante, se proporcionó alimentación a los SFV 1 (ascensor) y SFV 2 (extremo este) con 12 VDC, provenientes de sus

respectivos adaptadores. Estos adaptadores se conectan a tomas de corriente situadas en las proximidades de la ubicación de instalación de los piranómetros.

Figura 15.

Esquema de conexión piranómetro SMP3 Kipp & Zonen



Fuente: <https://www.kippzonen.com/Product/201/SMP3-Pyranometer>

También se recopilan datos de irradiancia mediante la estación meteorológica de la marca DAVIS, la cual está equipada con dos piranómetros posicionados a una elevación de 0°. Esta estación desempeñó un papel fundamental en la verificación de la correcta instalación de los piranómetros en los distintos SFV, ya que al realizar una comparación entre los valores obtenidos, y según su proximidad dentro del rango establecido, se podía afirmar que la recopilación de datos de los subsistemas se llevaba a cabo de manera adecuada. La estación está equipada con un sistema integral que facilita el almacenamiento de datos en la nube, eliminando la necesidad de recolección manual. Los datos pueden ser descargados automáticamente según los requerimientos específicos, ya sea por intervalos de tiempo determinados o por días seleccionados, lo que optimiza la eficiencia y accesibilidad de la información.

La Tabla 8 presenta un resumen de los detalles pertinentes a cada instalación, proporcionando así una visión detallada y ampliada que contribuye a una comprensión más profunda del tema en cuestión.

Tabla 8.

Detalles instalación dispositivos de medición de irradiancia.

Dispositivo	Referencia	Almacenamiento	Ubicación	Intervalo de medición	Variable obtenida
Piranómetro	DAVIS SKU 6450	Pace 1	SFV 2 (escaleras)	5 minutos	Irradiancia solar incidente 10° - sur
	SMP3 - Kipp 1	Pace 2	SFV 1 (ascensor)	5 minutos	Irradiancia solar incidente 10° - sur
	SMP3 - Kipp 3				
	SMP3 - Kipp 2	Pace 3	SFV 3 (extremo este)	5 minutos	Irradiancia solar incidente 10° - norte
	SMP11 - Kipp 4				Irradiancia solar incidente 0°
	DAVIS SKU 6450	Nube	Estación meteorológica	5 minutos	Irradiancia solar incidente 0°
	DAVIS SKU 6450				

3.3.3. *Medición de temperatura*

La medición de temperatura es un aspecto crítico en la evaluación del desempeño energético de los sistemas fotovoltaicos. Las termocuplas, siendo sensores de temperatura altamente precisos y confiables, juegan un papel fundamental en este proceso. Estos dispositivos, compuestos por dos metales distintos unidos en uno de sus extremos, generan una corriente eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura entre sus uniones. Esta propiedad permite

que las termocuplas detecten con exactitud las variaciones térmicas en los paneles solares, lo cual es esencial para monitorear su eficiencia operativa. Al medir la temperatura se pueden identificar posibles ineficiencias o fallas en el sistema, como puntos calientes que indican una resistencia eléctrica elevada o una mala conductividad térmica. Además, la información recabada ayuda a optimizar el diseño y la operación de los paneles, asegurando que trabajen dentro de los parámetros térmicos óptimos para una máxima conversión de energía solar en electricidad.

Las termocuplas tipo K son dispositivos ampliamente utilizados en la medición de temperaturas en procesos industriales. Estas termocuplas están compuestas por dos metales distintos, cromel y alumel, que al ser unidos en un extremo y sometidos a una diferencia de temperatura, generan una señal eléctrica proporcional a dicha diferencia. El rango de temperatura que pueden medir es bastante amplio, extendiéndose desde -200°C hasta 1300°C , lo que las hace idóneas para una gran variedad de aplicaciones. Además, son conocidas por su capacidad para mantener una precisión aceptable en mediciones continuas hasta aproximadamente 1100°C y pueden soportar temperaturas pico de hasta 1300°C durante periodos breves de tiempo.

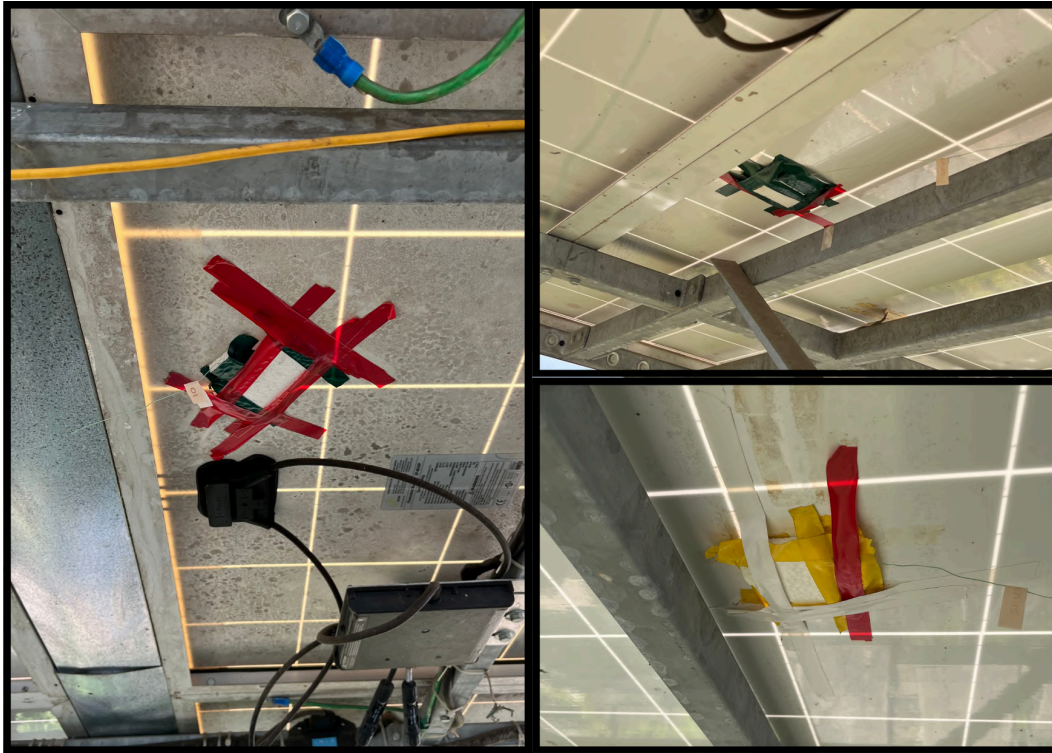
Una de las ventajas significativas de las termocuplas tipo K es su capacidad para convertir directamente la energía térmica en energía eléctrica sin necesidad de una fuente de alimentación externa, lo que simplifica su integración en sistemas de control y medición. La señal que producen es en milivoltios y varía linealmente con la temperatura, lo que facilita su calibración y la interpretación de los datos.

Se procedió la instalación de tres termocuplas tipo K en los SFV 1 (ascensor) y SFV 2 (escaleras), así como la colocación de cuatro termocuplas en el SFV 3 (extremo este). La disposición de las termocuplas se estableció considerando la localización del dispositivo encargado del registro de datos. Se implementaron tres termocuplas de un metro y seis de dos

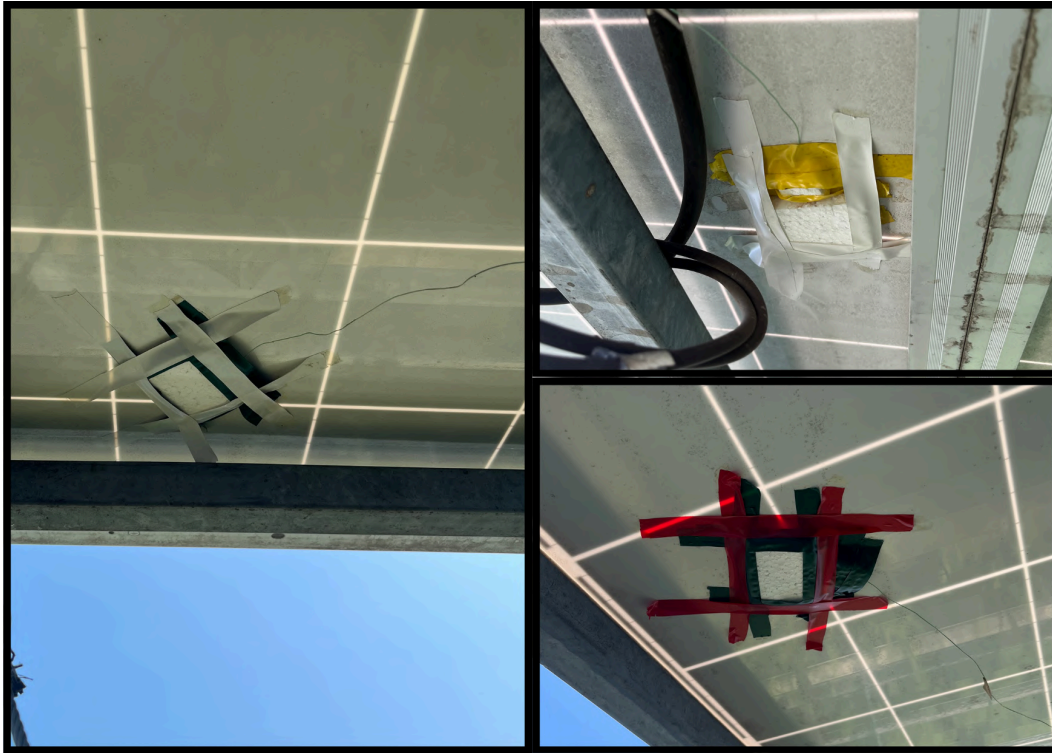
metros de longitud, adaptando así su ubicación de manera personalizada para satisfacer los requerimientos específicos de cada subsistema. Con el objetivo de garantizar la precisión en la medición de temperaturas, se adaptó a cada termocupla un revestimiento de polipropileno expandido. Este material es crucial para mitigar el impacto de variables climáticas adversas, como corrientes de aire, que podrían alterar significativamente los resultados del muestreo (*¿Qué es una termocupla y cómo funciona?*, 2019). Específicamente, el enfriamiento inducido por el aire puede provocar lecturas erróneas, comprometiendo la integridad de los datos recabados. Por tanto, se implementó este aislamiento en la punta que está en contacto directo con el panel solar y una pequeña parte contigua a la punta, este conjunto se fijó mediante cinta aislante para prevenir cualquier desplazamiento o desprendimiento que pudiera surgir durante la operación normal o bajo condiciones ambientales variables.

En el SFV 1 (ascensor), se optó por instalar las termocuplas en la zona inferior. Esta decisión se fundamentó en la posición estratégica del equipo de almacenamiento de datos, el cual se situó de tal manera que quedaba resguardado de factores ambientales adversos, como la exposición al agua. Además, se consideró la interacción humana, evitando que el equipo constituyera un obstáculo para el personal de jardinería, minimizando así el riesgo de daños físicos o funcionales que pudieran comprometer la integridad y operatividad de los equipos instalados. En la Figura 16 se puede observar su instalación.

Figura 16.
Instalación termocuplas SFV 1 (Ascensor)



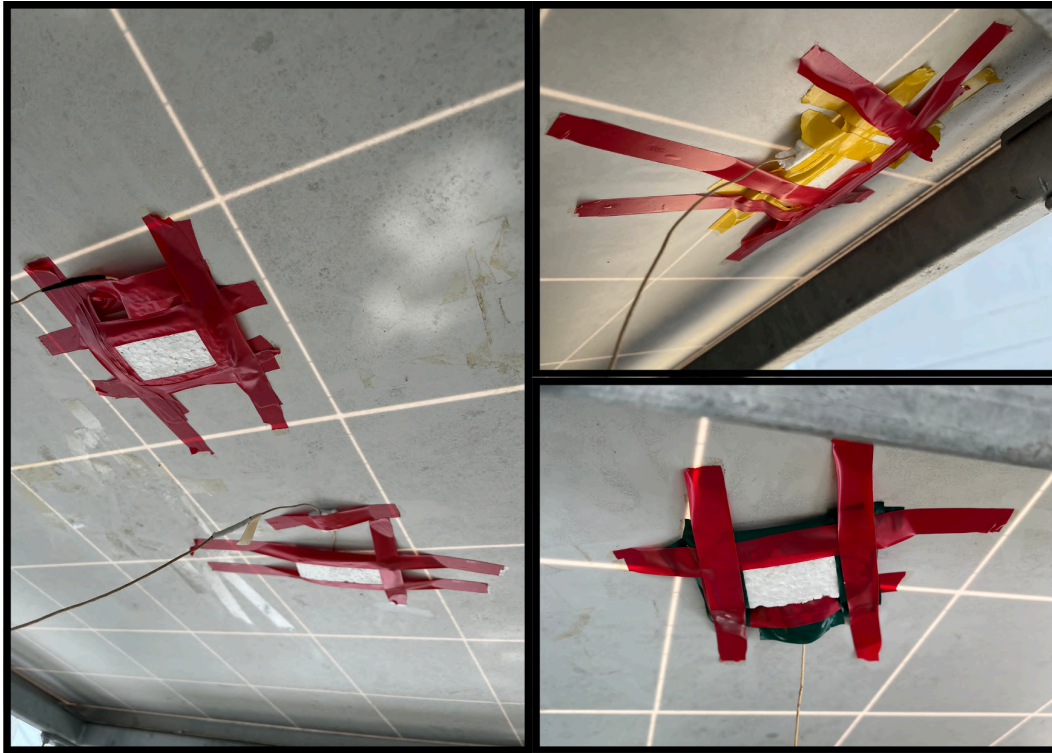
Para el SFV 2, correspondiente a las escaleras, se consideraron los mismos factores que para el SFV 1. La colocación de las termocuplas se efectuó en la esquina superior izquierda, debido a la proximidad con el equipo de almacenamiento de datos y para su protección frente a condiciones climáticas adversas y posibles interferencias humanas. Dicha instalación puede ser visualizada en la Figura 17.

Figura 17.*Instalación termocupla SFV 2 (escaleras).*

En el SFV 3 (extremo este), se aprovechó la disponibilidad de un gabinete para alojar el sistema de almacenamiento de datos. Esta disposición resulta de suma relevancia debido a la presencia de rociadores de agua para el jardín a nivel del suelo. El dispositivo de almacenamiento de datos se posicionó de manera estratégica para garantizar que las termocuplas instaladas abarcaran la medición de temperatura coplanar de todos los ángulos de elevación presentes en el SFV. En este subsistema, se instalaron cuatro termocuplas tipo K: dos en el panel con elevación de 10° de sur a norte y otras dos en el panel con elevación de 0° . Su instalación se puede observar en la Figura 18.

Figura 18.

Instalación termocuplas SFV 3 (extremo este).



Para la monitorización de las variables requeridas por los indicadores de desempeño, se instalaron un total de 18 equipos. Estos dispositivos cubren la totalidad de los ángulos de elevación presentes en el SFV ubicado en la terraza del edificio de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. El resumen de estas instalaciones se encuentra expuesto en la tabla 9.

Tabla 9.*Componentes instalados en el SFV de la terraza.*

SFV	Componente	Cantidad
SFV 1 (Ascensor)	SMP3 Kipp & Zonen Smart Pyranometer	2
	Termocupla OMEGA	3
	Datalogger XR5-SE-20mV	1
SFV 2 (Escaleras)	Piranómetro Davis SKU 6450	1
	Termocupla OMEGA	3
	Datalogger XR5-SE-20mV	1
SFV 3 (extremo este)	SMP3 Kipp & Zonen Smart Pyranometer	1
	SMP11 Kipp & Zonen Smart Pyranometer	1
	Termocupla tipo K	4
	Datalogger XR5-SE-20mV	1

4. Puesta en marcha y recopilación de datos

4.1. Curva de ajuste

Antes del montaje final de los equipos de medida, se llevaron a cabo pruebas preliminares con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de todos los dispositivos, además de establecer una curva de ajuste para corregir la incertidumbre asociada a los equipos. Inicialmente, se intentó ubicar todos los piranómetros con la misma orientación, de forma contigua, para minimizar las variaciones en las mediciones entre ellos.

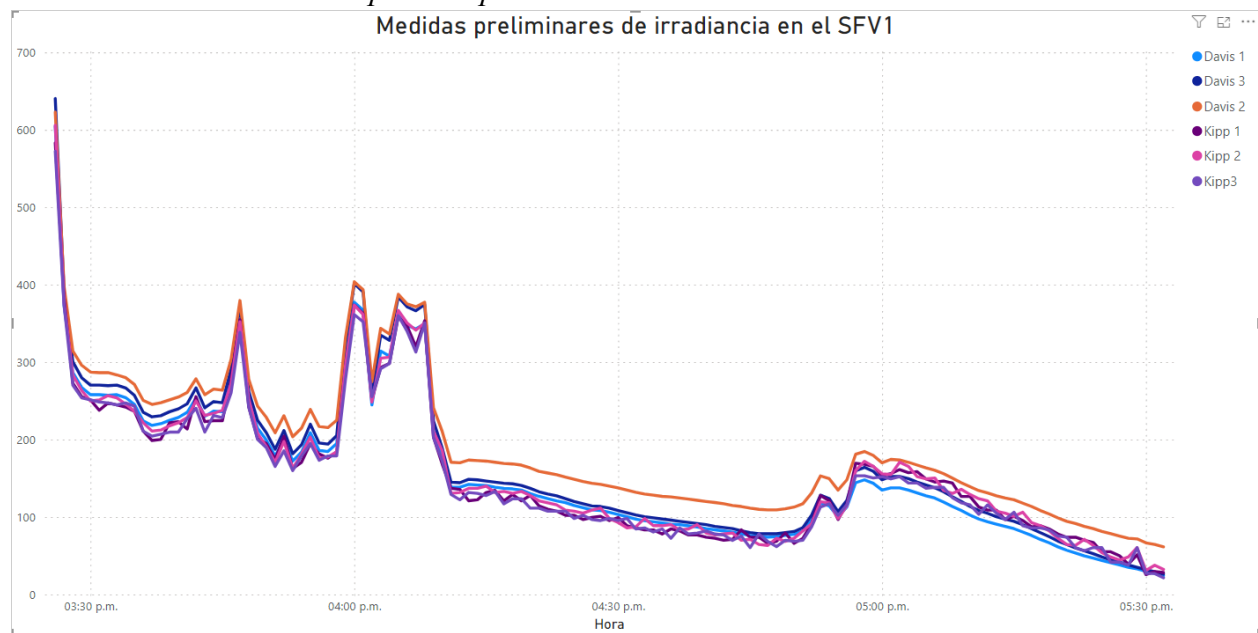
El día 29 de Septiembre del año 2023 se realizó en el SFV1, el cual corresponde al sistema ubicado frente al ascensor, una prueba preliminar de la toma de datos de los piranómetros tal como se muestra en la figura 19.

Figura 19.

Instalación previa de los piranómetros para realizar la curva de ajuste.



Con dicho montaje se tomaron datos con una frecuencia de muestreo de 1 minuto y se tuvieron los resultados mostrados en la figura 20. Se esperaba que las curvas fueran muy similares al menos entre piranómetros de la misma referencia, sin embargo, es evidente la incidencia del ascensor en los datos de irradiancia. En donde el piranómetro denominado DAVIS 2 tiene valores más altos durante casi todo el estudio,

Figura 20.*Curva de irradiancia de las pruebas preliminares en el SFV1*

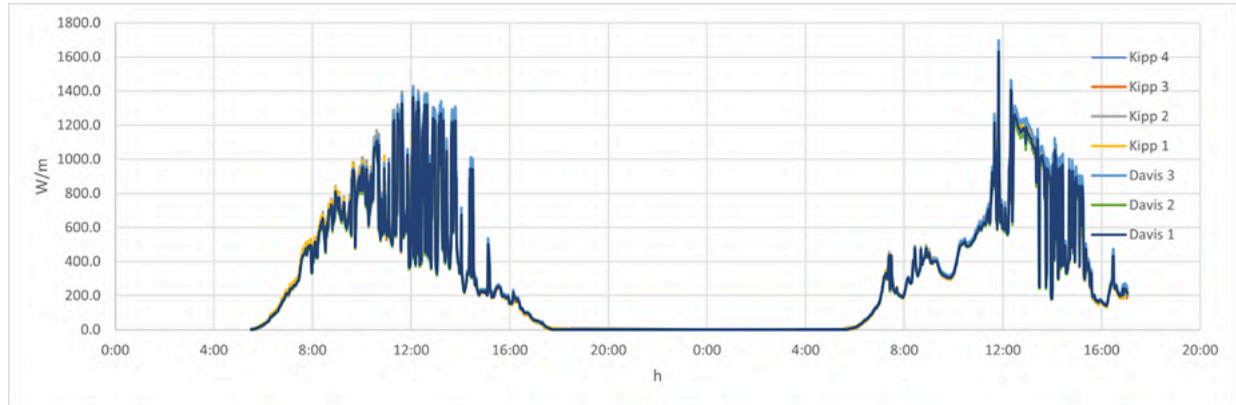
Esto se concluye puesto que en el análisis previo se esperaba que las medidas de los diferentes piranómetros estuviera casi que igual, dado que no tenían una separación superior a 1m entre sí. Pero como se observa en la figura 20, el comportamiento de la medida de los piranómetros no es como la esperada, por esto se repitió el experimento en el SFV2 se obtuvieron valores de irradiancia cercanos entre sí. En esta nueva ubicación se ordenaron los piranómetros de la manera que se muestra en la figura 21.

Figura 21.

Instalación secundaria de los piranómetros para realizar la curva de ajuste

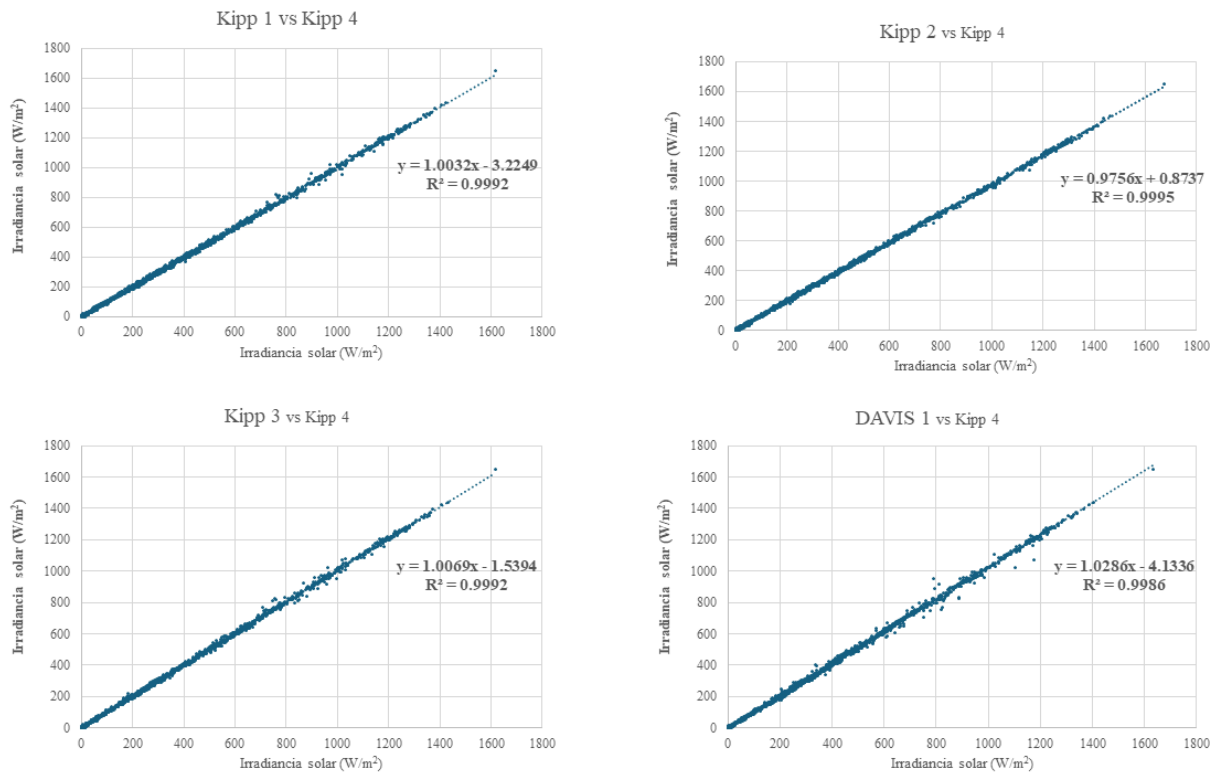


Una vez corroborado que era viable el lugar para hacer las mediciones preliminares para la curva de ajuste de los piranómetros, se registraron aproximadamente 2 días de datos, con una frecuencia de muestreo de 1 minuto; desde el 4 de octubre del 2023 a las 18:00 COT hasta las 17:03 del 6 de octubre de 20. La gráfica correspondiente a los datos recolectados se puede apreciar en la figura 22.

Figura 22.*Datos registrados del 4 al 6 de octubre*

Se analizaron los datos obtenidos, descartando los registros correspondientes a horas nocturnas. Primero, se eligió el "kipp 4", el cual corresponde a un Kipp & Zonnen SMP-11V, como el equipo patrón de medida. Esto se debe a que era el equipo de mejor calidad, dado que los SMP3-V tienen una clasificación según el estándar ISO 9060:1990 de segunda clase (Kipp & Zonen, s. f.-a), la cual en la actualización de 2018 cambió su nombre a "espectralmente plano clase C", mientras que los SMP11-V están clasificados según el estándar ISO 9060:1990 como "Estándar secundario" (Kipp & Zonen, s. f.-b), que en la actualización de 2018 cambió su nombre a "espectralmente plano clase A" (Kipp & Zonen & OTT HydroMet brand, 2022).

Una vez comparado cada piranómetro contra el Kipp 4, se obtuvieron las siguientes ecuaciones. Los piranómetros que se muestran en la Figura 23 y no cuentan con su respectiva curva de ajuste corresponde a equipos empleados para otros proyectos.

Figura 23.*Gráficas de las ecuaciones obtenidas por cada piranómetro*

Para configurar las termocuplas, el primer paso fue determinar las curvas de ajuste, para de esta manera ajustar la medida teniendo en cuenta la incertidumbre asociada al instrumento de medida. Para esto se pusieron todas las termocuplas que se iban a usar, en total 4 termocuplas tipo K y 8 Omega tipo k, las cuales deberían estar sensando el mismo punto de un panel cualquiera, primero se unían las termocuplas para que se garantizara que estuvieran midiendo el mismo punto como se observa en la Figura 24 (a). Se ajustaron con cinta adhesiva y sobre ellas se puso una porción de polipropileno expandido para aislarlas térmicamente de los efectos del viento y la temperatura ambiente, esto se muestra en la Figura 24 (b). Este experimento se repitió dos veces con termocuplas Omega (puesto que se encontraron unas averiadas) y una vez con las

tipo K. Para la elaboración de las curvas de ajuste se clasificaron como se muestra en la figura 25 y se tomaron datos de 2 días cada minuto.

Figura 24.

Instalación termocuplas en la cara coplanar del panel FV

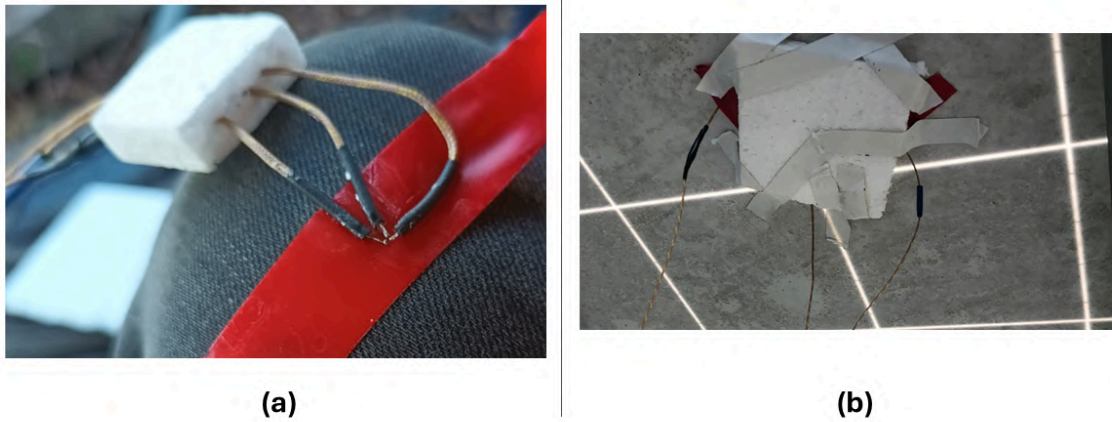
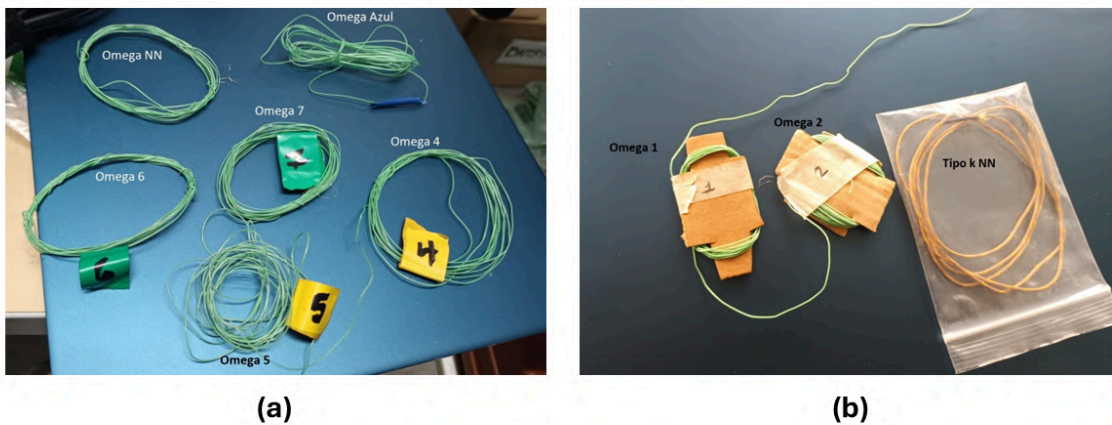


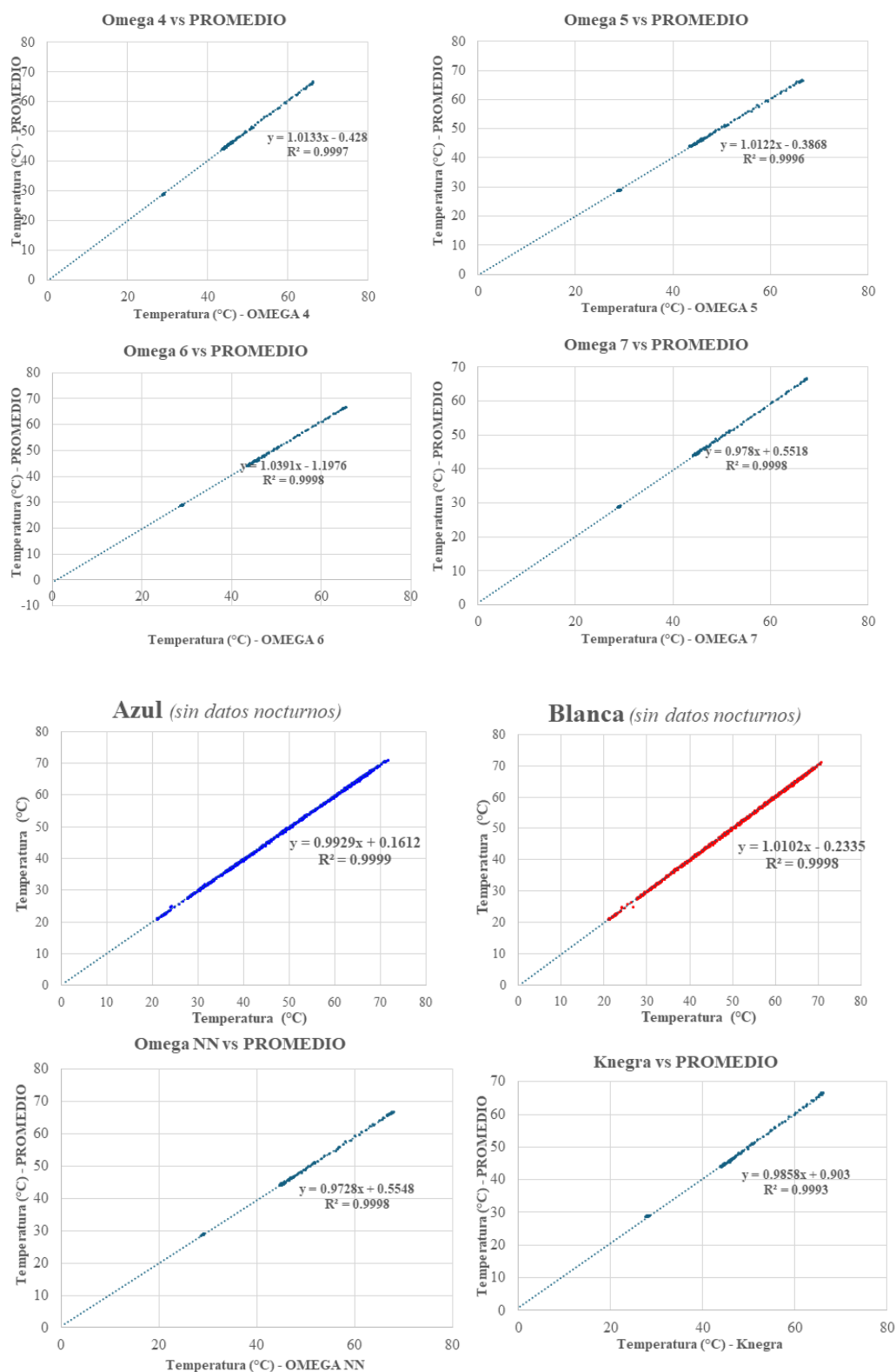
Figura 25.

Clasificación termocuplas



En la Figura 26 se muestran las curvas de ajuste obtenidas luego del periodo de medición de cada una de las termocuplas.

Figura 26.
Curvas de ajuste termocuplas



4.2. Programación de los Datalogger's

Una vez completada la instalación de cada uno de los equipos involucrados en la toma de lecturas y las pruebas para corroborar el óptimo funcionamiento de los diferentes equipos encargados de monitorizar las variables requeridas para los indicadores de desempeño en cada SFV, se procedió a realizar la respectiva conexión de cada uno de ellos con los data loggers correspondientes. Los data loggers desempeñan un papel crucial, ya que son responsables de recoger y registrar las mediciones de irradiancia y temperatura de cada SFV.

El datalogger XR5-SE se destaca por su capacidad de contar con configuraciones preestablecidas para una variedad de equipos de medición. Esta característica esencial simplifica significativamente el proceso de recolección de datos, ya que permite a los usuarios seleccionar rápidamente la configuración óptima para el equipo específico que están utilizando, sin la necesidad de programación manual. Además, esta funcionalidad asegura la consistencia y la precisión en la captura de datos, lo que resulta en un aumento de la eficiencia operativa y una reducción en la probabilidad de errores humanos.

Para iniciar la implementación, se configuraron inicialmente el periodo y el intervalo de muestreo. El período de muestreo se estableció en una semana, ya que esta frecuencia es adecuada para realizar un análisis a corto plazo del funcionamiento del SFV. El intervalo para la adquisición de datos se fijó en cinco minutos, coincidiendo con el período de muestreo utilizado para otros parámetros como energía, irradiancia a 0°, potencia y otros parámetros mencionados en un capítulo anterior, estos parámetros se introducen manualmente cada semana. La respectiva configuración de los dataloggers para la toma de lecturas de irradiancia y temperatura se puede apreciar en el Apéndice E.

Según (Kipp & Zonen, 2017) estos se alimentan con una tensión de entre 5 Vdc hasta 30 Vdc. Independiente de la tensión de alimentación, el piranómetro tiene una señal de salida de 0 a 1 Vdc. Por tal motivo, se configura el tipo de salida del canal “Type” como una salida de tensión de 0 a 2.5 V ya que es lo más cercano al rango de valores que entrega el aparato.

4.3. Recopilación de datos

Una vez configurados los medidores (ver Apéndice E) para guardar datos cada cinco minutos se inicia el proceso de recopilación y extracción de datos según los intervalos establecidos.

Para la extracción de datos se emplearon diferentes herramientas, dependiendo del medidor en cuestión, como se puede observar en las figuras 27 a 29. Mientras que para la limpieza de datos se empleó principalmente scripts de Python y para el almacenamiento y procesamiento se empleó google sheets. Semanalmente, se tomaban los datos, se realizaba la limpieza de lo que corresponde y se almacenaban en google sheets.

Figura 27.

Proceso de extracción de datos microinversores

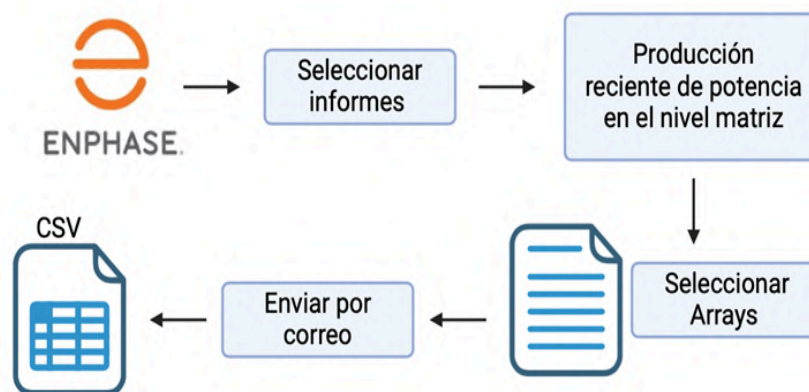


Figura 28.
Proceso de extracción de datos PQube3

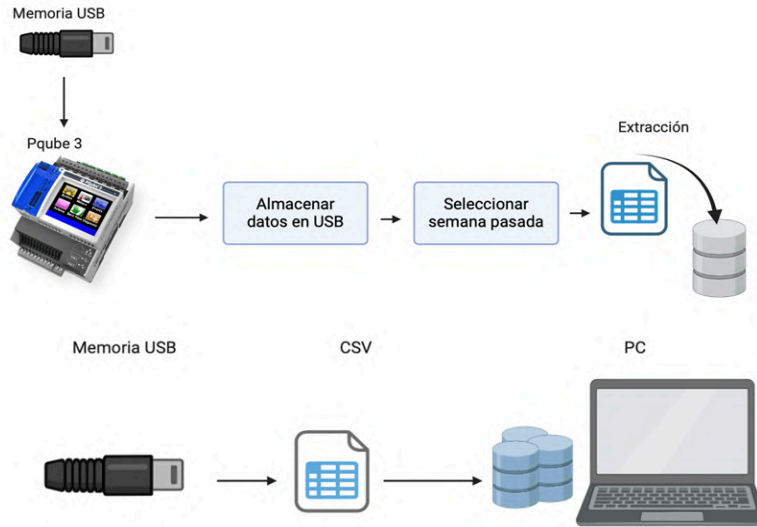
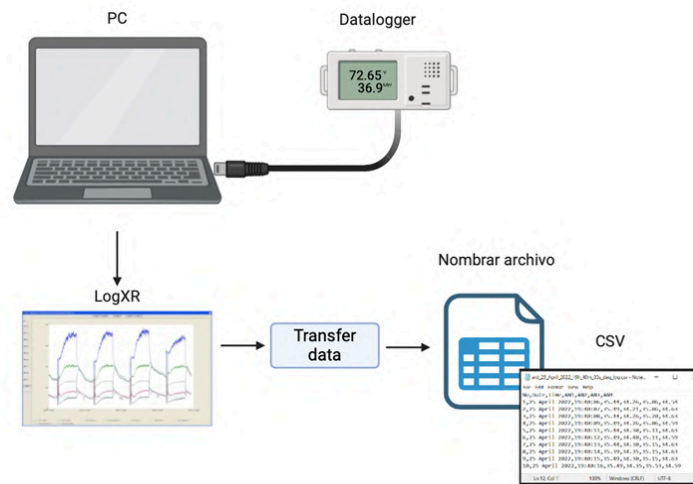


Figura 29.
Proceso de extracción de datos datalogger.



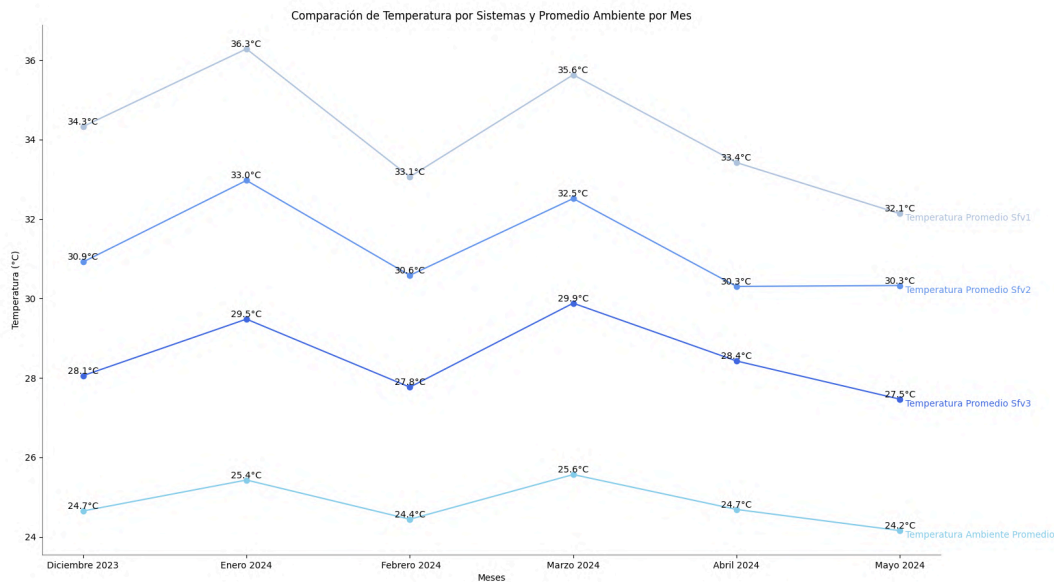
Una vez se tienen los respectivos CSVs con los datos se inicia el proceso de limpieza, para el Datalogger solo se omite el dato de la temperatura ambiente. En el caso del PQube3, se toman únicamente los archivos denominados “Trends” y otro denominado “Power_Energy”. De

estos se eliminan los datos que no se requiere y sólo se conservan del primer archivo las distorsiones armónicas por corriente por cada línea y las potencias por fase tanto aparente, activa y no activa, respectivamente. Para esto se empleó un script de python que recorría los archivos que se sacaban del Pqube y buscaba la ruta de los que se querían conservar, elimina los campos que no se requerían.

5. Análisis de datos y comparativa entre subsistemas

A partir de los datos semanales recolectados, las bases de datos mensuales fueron desarrolladas de forma manual. Para analizar estas últimas se empleó un algoritmo en Python para el análisis de datos correspondiente.

En la figura 30 se muestran las comparativas de las temperaturas ambiente promedio mensuales. Se evidencia que todos siguen el mismo comportamiento, en diferente magnitud, el sistema que presenta una mayor temperatura promedio mensual es el SFV1, mientras que el que menos presenta calentamiento es el SFV3. Los sistemas 1 y 2 distan entre sí en aproximadamente 3 grados, al igual que los sistemas 2 y 3. La temperatura más alta registrada fue de 72.9 grados y se obtuvo el día 16 de mayo del 2024 a las 12:35, en el SFV1.

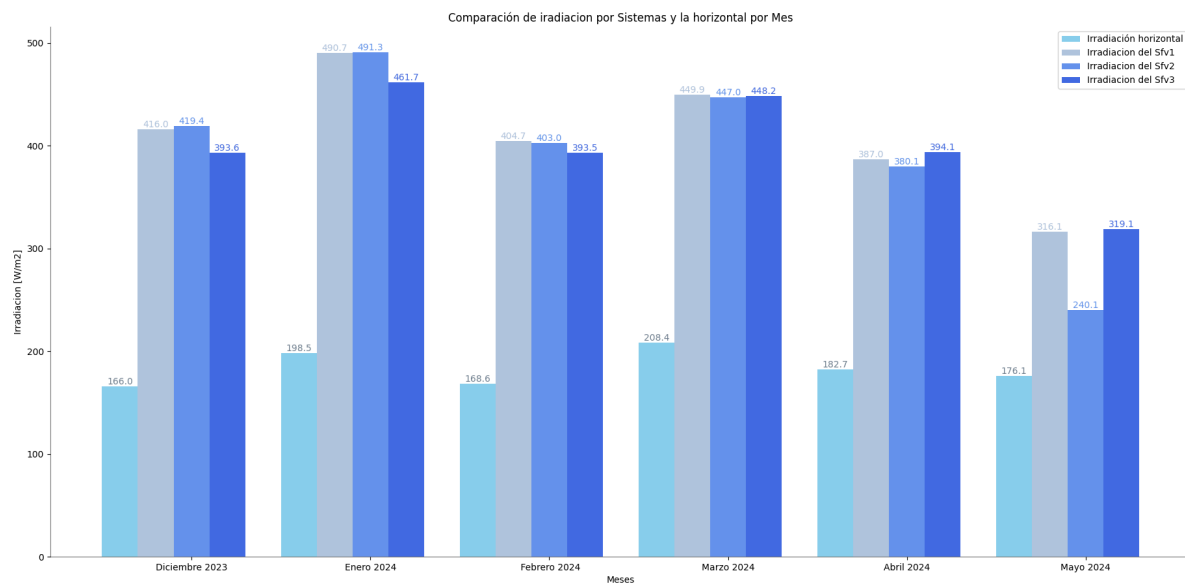
Figura 30.*Gráficas de comparación de temperatura.*

La variación en las temperaturas entre el SFV1 y el SFV2 puede explicarse en parte por la diferencia en el volumen de vegetación presente en cada área. El SFV1, con una menor cantidad de vegetación debajo de los paneles solares, se encuentra sobre placas de concreto que tienden a acumular y retener calor de manera más significativa durante el día. Este efecto de acumulación térmica se debe a la alta capacidad de retención de calor del concreto, lo que provoca temperaturas más elevadas en la superficie.

Por otro lado, el SFV2 está ubicado en una zona con un denso volumen de vegetación debajo de los paneles solares. La presencia de vegetación tiene un impacto notable en la reducción de la temperatura de la superficie. Estudios muestran que la vegetación puede reducir la temperatura de la superficie en hasta un 10-15 °C en comparación con áreas sin vegetación, debido a los efectos de sombra proporcionados por las plantas y la evaporación del agua, que

actúan como mecanismos de enfriamiento natural. Este enfriamiento adicional disminuye la acumulación de calor en la estructura del SFV2 y contribuye a una menor concentración de calor en la superficie de los paneles solares.

La Figura 31 muestra el promedio de irradiación registrado en los diferentes meses, en cada uno de los sistemas. Se evidencia que la irradiación en los sistemas 1 y 2 es mayor que la del 3, esto puede deberse al ángulo de inclinación que tiene este sistema fotovoltaico, lo que significa que el ángulo óptimo para tener una mayor captación de irradiancia es 10° norte sur, inclinación con la que se encuentran diseñadas las estructuras de los SFV 1 y SFV 2, sin embargo, en el mes de mayo del 2024 se presenta una caída en los datos de la irradiación del sistema 2, esto se debe a que se presentaron fallas en el sistema fotovoltaico por temas de humedad en las acometidas. Esto ocasionó que la protección desconectara el sistema y la alimentación del piranómetro del SFV2.

Figura 31.*Gráfica de registros promedio de irradiancia.*

En la Figura 32 se presenta la tasa de rendimiento o "Performance Ratio" (PR) obtenido mes a mes. Este gráfico refleja un desempeño favorable en términos de la eficiencia del SFV de la E3T. No obstante, es importante destacar que el PR está estrechamente asociado con la irradiancia, la cual es la principal variable climática que influye en el rendimiento de un SFV. La irradiancia puede experimentar variaciones significativas en función de las condiciones meteorológicas locales.

En este sentido, se puede interpretar que Bucaramanga goza de condiciones climáticas relativamente estables, ya que los porcentajes de PR mensuales no presentan fluctuaciones significativas. Este patrón de estabilidad es notable en comparación con otros países que enfrentan estaciones extremas, las cuales pueden inducir condiciones meteorológicas adversas que afectan considerablemente el rendimiento de los SFV.

Adicional, es importante recalcar que el PR se ubica dentro del rango que la literatura califica como aceptable, salvo el mes de mayo, esto debido a problemas técnicos con el SFV.

Figura 32.

Gráfica indicador performance ratio (PR)

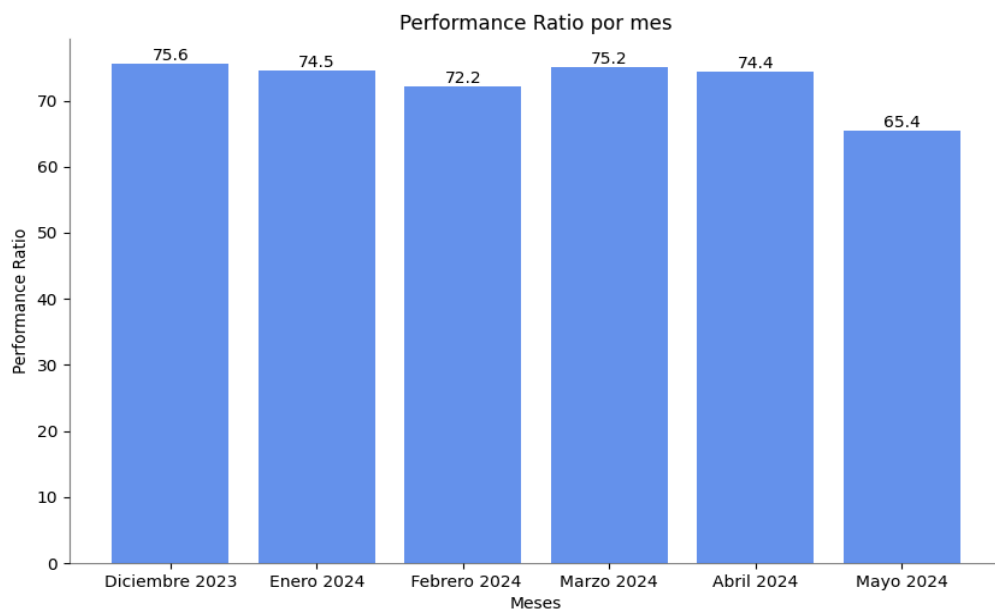
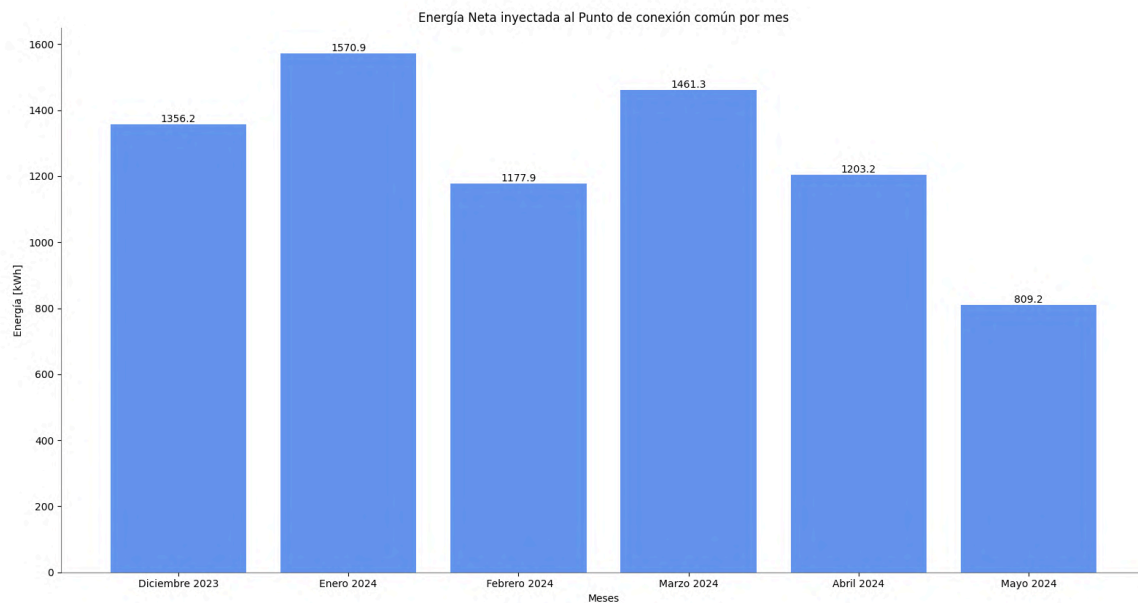


Figura 33.

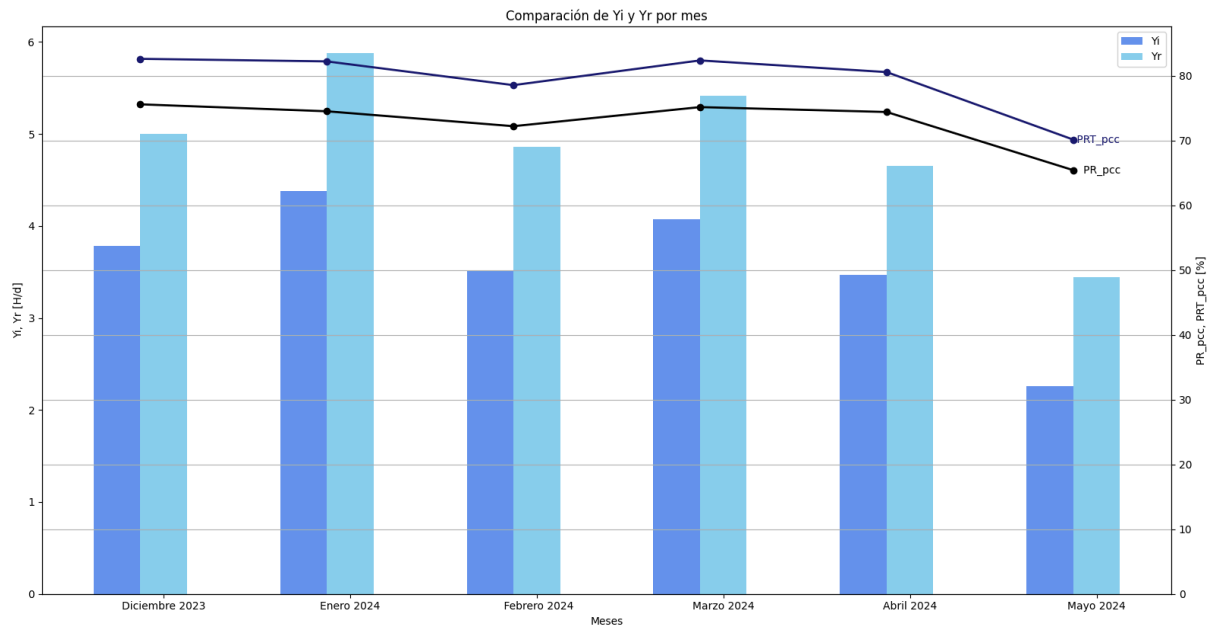
Gráfica de los valores de energía neta inyectada en el punto de conexión común



Observando las gráficas 31 y 33, se evidencia una clara correlación entre los niveles de irradiancia y la producción de energía eléctrica en el sistema fotovoltaico (SFV). Estas gráficas muestran de manera concluyente la relación directa entre ambos parámetros: a medida que aumenta la irradiancia, la producción de energía eléctrica también incrementa, y cuando la irradiancia disminuye, la producción de energía sufre una reducción correspondiente. Este fenómeno subraya la importancia de un diseño adecuado y específico para cada SFV, ya que una baja captación de irradiancia afecta significativamente su rendimiento. Por lo tanto, es crucial que el diseño de los sistemas fotovoltaicos se realice teniendo en cuenta las características específicas del sitio de instalación y las condiciones ambientales locales, con el fin de asegurar una mayor eficiencia en la conversión de la energía solar en electricidad.

Figura 34.

Gráfica de los valores de rendimiento específico y de referencia, PR y PR con corrección de temperatura en el punto de conexión común



En la Figura 34 se muestra el comparativo de los rendimientos específico (Y_i) y de referencia (Y_r) mes a mes. A su vez se tienen los índices de rendimiento y de rendimiento corregido con la temperatura. En dicha gráfica se observa que en el mes de mayo del 2024 se tiene una baja en todos estos indicadores, esto producto de una falla que se tuvo el día 12 del mes y que se mantuvo hasta el mes de junio, dejando fuera de operación el SFV 2, además de esto, también se vió afectada la alimentación del piranómetro asociado a este sistema. La primera semana de la falla, se tenían tres piranómetros sin alimentación (los asociados al SFV 1 y el del SFV 2), por esto, los indicadores disminuyeron.

Según la información recopilada por los piranómetros, en promedio, los paneles fotovoltaicos reciben luz solar desde las 5:50 a.m. hasta las 5:35 p.m. Sin embargo, esto no

implica que la energía solar sea óptima durante todo este lapso de tiempo, lo que deja un rango inferior a 12 horas diarias en el que los paneles logran captar diferentes niveles de irradiancia. Considerando que el rendimiento específico (Y_i) representa la cantidad de energía útil generada por el SFV (Landínez, 2020), al analizar las barras de la figura 34 correspondientes a este indicador, se observa que, en promedio, los paneles generan energía útil durante aproximadamente 4 horas. Esto coincide con las tendencias que indican que los paneles tienen una mayor producción energética cuando el sol está en su punto más alto, aproximadamente entre las 10:00 a.m. y las 2:00 p.m. El resultado de Y_i reafirma el correcto funcionamiento y diseño del SFV de la E3T, ya que al tener un aproximado de 4 horas efectivas de producción útil de energía, sigue las tendencias referentes al horario en que los paneles captan los valores más altos de irradiancia.

En la Figura 34, se observa una relación directa entre los indicadores específicos y de referencia, lo cual confirma la sinergia con la que operan todos los equipos involucrados en la generación, conversión y medición de las variables utilizadas en la producción de energía eléctrica en el SFV de la E3T. Esta relación evidencia que los componentes del sistema están coordinados eficazmente, maximizando la eficiencia y garantizando un rendimiento óptimo. La concordancia entre los indicadores sugiere que los procesos de captura de irradiancia, conversión fotovoltaica y gestión de la energía están alineados con los estándares esperados, validando el diseño y la implementación del sistema fotovoltaico en la E3T.

Figura 35.

Gráficas del desglose de pérdidas generales por mes entre diciembre del 2023 y marzo del 2024

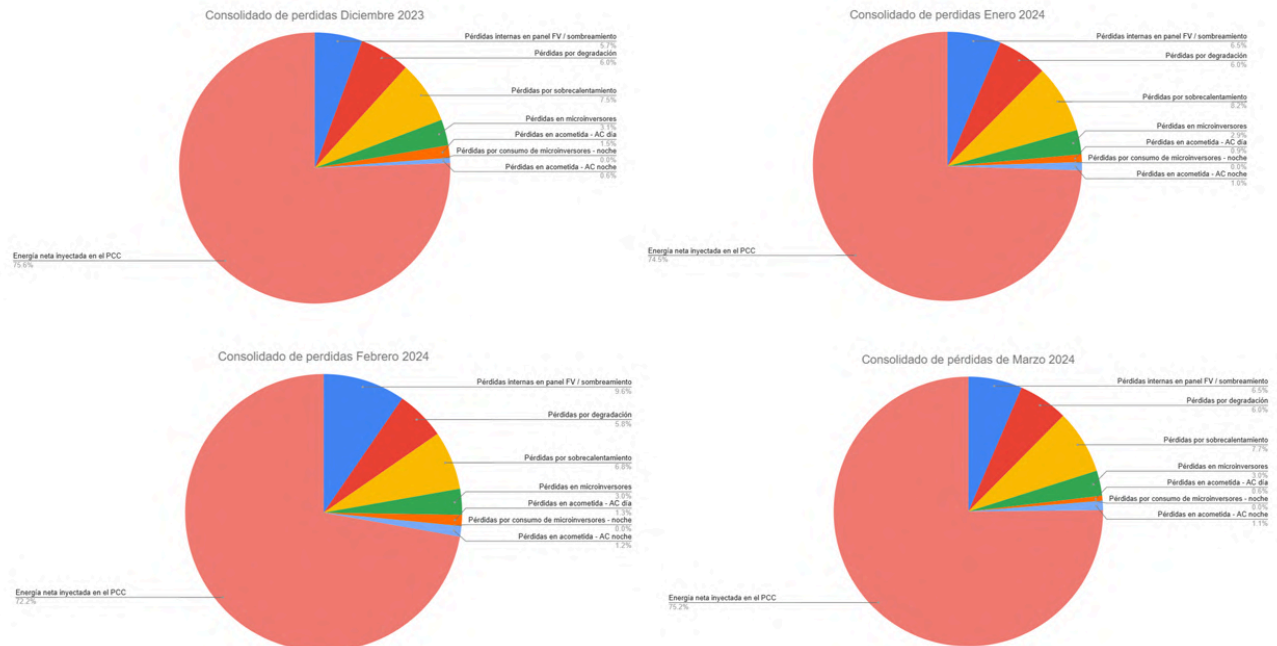
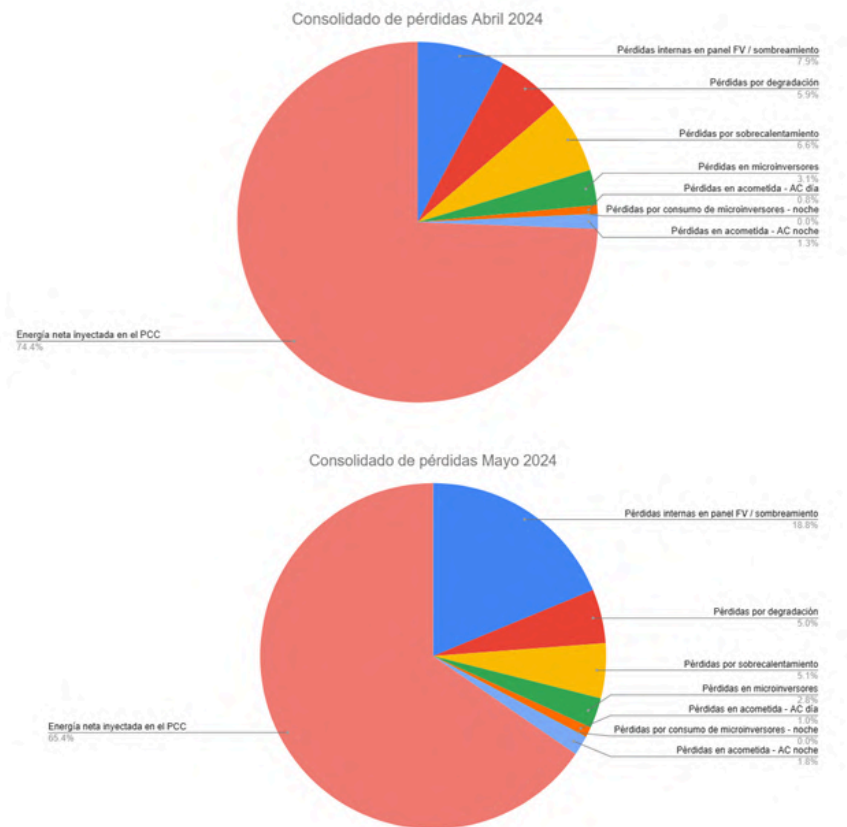


Figura 36.

Gráficas del desglose de pérdidas generales por mes de abril y mayo del 2024



En las figuras 35 y 36 se muestran las pérdidas presentadas mes a mes, en estas se evidencia que las pérdidas más significativas se deben al sombreado, sobrecalentamiento y la degradación de los paneles. De entre estas la pérdida predominante corresponde a las pérdidas por sobrecalentamiento de los paneles este fenómeno se atribuye al reciente a las altas temperaturas presentes en la ciudad de Bucaramanga y agravadas por el reciente fenómeno del niño, en el cual se registraron temperaturas extremas en comparación a otros años, sin embargo, en el mes de mayo las pérdidas con mayor porcentaje fueron las de sombreado, esto se atribuye a la novedad comentada anteriormente.

6. Conclusiones

El análisis de los valores de irradiancia máxima registrados desde diciembre de 2023 hasta mayo de 2024 revela que el mes de enero presenta el mayor valor de irradiancia en todos los subsistemas fotovoltaicos evaluados. Esta elevada irradiancia se traduce directamente en un incremento notable en la producción energética del sistema fotovoltaico durante dicho mes. En consecuencia, enero alcanzó una inyección de energía en el punto de conexión común de 1570.9 kWh. Este dato subraya la importancia de la irradiancia como factor determinante en la eficiencia del sistema fotovoltaico, ya que una mayor irradiancia permite una conversión más eficiente de la energía solar en energía eléctrica, maximizando así el rendimiento del sistema.

Considerando el concepto de Performance Ratio (PR) y los valores presentados en la figura 31, se puede concluir que el sistema fotovoltaico de la E3T exhibe un rendimiento generalmente sólido. A excepción del mes de mayo, el PR se mantiene dentro del rango de buen funcionamiento, cabe recordar que este rango puede oscilar entre 70% y 90%. Estos datos indican que el sistema opera de manera eficiente en la mayoría de los meses del período analizado.

La falla registrada en el SFV de la E3T provocó una caída abrupta en todas las variables recopiladas para este estudio. Como resultado, los datos obtenidos en el mes de mayo se vieron gravemente afectados. Esta situación se clasifica claramente como una condición adversa que comprometió la calidad de los datos, dando lugar a mediciones poco confiables. La inconsistencia en los datos de mayo dificulta una comparación precisa con los cinco meses anteriores, ya que la falla introdujo un sesgo significativo en la información, impidiendo una evaluación exacta del desempeño del sistema fotovoltaico durante ese mes. Es crucial, por lo

tanto, considerar esta anomalía al interpretar los resultados y al realizar cualquier análisis comparativo de la eficiencia del sistema fotovoltaico en los meses evaluados.

Como resultado de este novedoso estudio, se concluye que el SFV de la E3T funciona de manera eficaz. Este éxito se debe a un diseño meticulosamente elaborado para satisfacer las necesidades particulares del lugar, la excelente calidad y tecnología de los componentes del sistema, y el mantenimiento adecuado y continuo a lo largo de los años. La integración óptima de estos factores ha permitido alcanzar un desempeño superior, reflejando tanto la robustez del diseño como la eficiencia operativa del sistema fotovoltaico.

Referencias bibliográficas

<https://pace-sci.com/specifications-xr5.htm>

Asociación Española de Normalización (UNE). (2022). *UNE-EN IEC 61724-1*.

Bansal, N., Jaiswal, S. P., & Singh, G. (2021). Comparative investigation of performance evaluation, degradation causes, impact and corrective measures for ground mount and rooftop solar PV plants – A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101526. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101526>

Boulmrharj, S., Bakhouya, M., & Khaidar, M. (2022). Performance evaluation of grid-connected silicon-based PV systems integrated into institutional buildings: An experimental and simulation comparative study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102632. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102632>

CanadianSolar Inc. (2016). *CanadianSolar, make the difference. Cs6p-250 |255 |260p*.
https://www.solarelectricsupply.com/media/sparsh/product_attachment/custom/upload/C_S6P-P_en.pdf

Cristea, C., Cristea, M., Tirnovan, R.-A., Birou, I., Stoenoiu, C. E., & Mioara Șerban, F. (2021). Performance analysis of grid-connected rooftop solar photovoltaic systems using different photovoltaic technologies: A case study in Romania. *2021 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, 310-314.
<https://doi.org/10.1109/SIELMEN53755.2021.9600338>

CUSHICÓNDOR, S. (2019). *ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA SOLAR BASADA EN MODELOS MATEMÁTICOS Y MEDICIÓN DE VARIABLES ELÉCTRICAS DE PANELES FOTOVOLTAICOS*. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.

Elibol, E., Özmen, Ö. T., Tutkun, N., & Köysal, O. (2017). Outdoor performance analysis of

- different PV panel types. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 651-661.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.051>
- Jabbour, M., Darmane, Y., Baala, A., Akhsassi, M., El Mouden, H., Chaoui, F., Raoufi, M., Outzourhit, A., & Bennouna, A. (2021). Energetic and Economic Evaluation of Mono and Poly c-Si Grid-connected PV Systems: In Ouarzazate, Morocco. *2021 9th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 1-6.
<https://doi.org/10.1109/IRSEC53969.2021.9741156>
- Jain, D., Deville, L., Ritter, K., Raush, J. R., Ferdowsi, F., Gottuukkala, R., & Chambers, T. L. (2022). *Performance Evaluation of 1.1 MW Grid-Connected Solar Photovoltaic Power Plant in Louisiana*. 15, 21. <https://doi.org/10.3390/en15093420>
- Kim, G. G., Hyun, J. H., Choi, J. H., Ahn, S.-H., Bhang, B. G., & Ahn, H.-K. (2023). Quality Analysis of Photovoltaic System Using Descriptive Statistics of Power Performance Index. *IEEE Access*, 11, 28427-28438. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3257373>
- Kipp & Zonen. (s. f.-a). *CMP3| SMP3 Pyranometer For reliable entry-level measurement of solar irradiance*.
- Kipp & Zonen. (s. f.-b). *Smart Pyranometers: The more intelligent way to measure solar irradiance*.
- Kipp & Zonen. (2017, febrero). *Instruction Manual: SMP series—Smart pyranometer*.
- Kipp & Zonen, & OTT HydroMet brand. (2022). *SOLAR ENERGY INTERNATIONAL STANDARDS. WHITE PAPER ISO 9060, IEC 61724-1, ISO 9846 and 9847, ISO/IEC 17025*.
- Koev, K. (2022). An Investigation of the Energy Efficiency of a Grid Connected Photovoltaic System. *2022 8th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural*

- Engineering (EE&AE)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/EEAE53789.2022.9831419>
- Laarabi, B., Daoudi, F.-E.-Z., Safsafi, F., Hamouchi, J. E., & Barhdadi, A. (2017). Performances of Various PV Modules Technologies under Climate Conditions of Rabat in Morocco. *2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477590>
- Landínez, V. C. (2020). *Evaluación del desempeño del sistema solar fotovoltaico implementado en el Edificio Santo Domingo de la Universidad de Los Andes mediante un modelo computacional*. Universidad de los Andes.
- Pace Scientific. (2024, abril). *User's Guide XR5-SE Data Logger™ and LogXR Software™*.
- ¿Qué es una termocupla y cómo funciona? (2019, diciembre 20). Master SI. <https://www.mastersi.com.pe/mastersi/blog/69-que-es-una-termocupla>
- Sips, J.-W., Lee, C., & Ringoir, R. (s. f.). *Whitepaper: 6 Key influences that determine PV performance ratios*.
- Smart Pyranometer SMP3—Kipp & Zonen*. (s. f.). Recuperado 19 de julio de 2024, de <https://www.kippzonen.com/Product/201/SMP3-Pyranometer>
- So, J. H., Jung, Y. S., Yu, B. G., Hwang, H. M., Yu, G. J., & Choi, J. Y. (2006). Performance Results and Analysis of Large Scale PV System. *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, 2, 2375-2378. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.2006.279669>
- TrinaSolar. (2017). *The Allmax framed 60-cell module*. https://static.trinasolar.com/sites/default/files/PS-M-0323%20Datasheet_Allmax_US_Apr2018_C.pdf
- Upsolar Group. (2016). *6" Polycrystalline PV modules 60 cells black series*.

https://www.solar-voltaics.com/wp-content/uploads/brand-datasheets/Upsolar_M250P-B_Datasheet--Solar-Voltaics-201506.pdf

XR5-SE Data Logger—Specifications. (s. f.). Recuperado 19 de julio de 2024, de

<https://pace-sci.com/specifications-xr5.htm>

Apéndice

Apéndice A.

Pace proporciona el software LogXR, el cual es compatible con sistemas operativos Windows, Mac OS X y Linux, incluyendo el de Raspberry Pi. Este software permite la configuración de la transferencia de datos, la generación de gráficos y la exportación de los datos de manera sencilla y eficiente.

Tabla A.

Función de las entradas del data logger XR5-SE

Entrada	Función
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	Terminales de entrada para los canales analógicos 1-8.
C	Común (masa compartida para todas las señales). Se dispone de cinco terminales "C"
D	Excitación del sensor de precisión a 2.5V, corriente máxima recomendada de 40 mA
E	Excitación del sensor de precisión a 5.0V, corriente máxima de 30 mA
X	Entrada de disparo externo o entrada de pulso/frecuencia
Y	Entrada de pulso/frecuencia
Z	Entrada de pulso/frecuencia o salida de alarma (señal de voltaje).
Q	Entrada de alimentación externa de corriente continua.

La amplia capacidad de almacenamiento del XR5-SE permite guardar hasta 260,250 lecturas. Los datos se transfieren fácilmente a través de un archivo de texto compatible con Excel. Además, este dispositivo ofrece la opción de visualizar los datos en tiempo real mediante un gráfico de barras al conectarse a una computadora que ejecute el software LogXR.

El equipo cuenta con su propio case como se observa en la figura 5, cuya función es almacenarlo y que esté protegido contra condiciones adversas que puedan dañar u ocasionar alguna interrupción en su funcionamiento habitual.

Apéndice B.

El funcionamiento de un piranómetro se basa en la conversión de la energía radiante en una señal eléctrica, que luego se interpreta para obtener la densidad del flujo de radiación solar. Generalmente, estos dispositivos constan de una superficie receptora que absorbe la radiación solar y un sensor térmico que convierte el calor absorbido en una señal eléctrica proporcional a la intensidad de la radiación.

Apéndice C.

Su elemento difusor y la carcasa están cuidadosamente diseñados para garantizar una respuesta coseno precisa, lo que significa que puede medir la radiación de manera uniforme desde diferentes ángulos de incidencia, imitando la distribución de la luz solar en condiciones reales. Además, el fotodiodo de silicio del SKU 6450 proporciona una buena correspondencia con el espectro solar, asegurando que los datos recogidos reflejen de manera fiable la energía solar disponible para la conversión en electricidad. Además, la sonda viene equipada con un nivel de burbuja para facilitar una instalación precisa y un cable de 60 cm de longitud, lo que ofrece flexibilidad en la ubicación del sensor dentro de la estación meteorológica.

Apéndice D.

Su diseño inteligente incorpora una interfaz Modbus®, facilitando la integración con otros dispositivos y sistemas de monitoreo. Además, el SMP3 destaca por su bajo mantenimiento, gracias a su capacidad de operar sin cambio de desecante durante hasta 10 años y su protección contra sobretensiones, polaridad invertida y cortocircuitos. La corrección activa de temperatura del SMP3 garantiza datos fiables y consistentes en un amplio rango de condiciones ambientales, desde -40 °C hasta +80 °C. Estas características hacen del SMP3 una herramienta valiosa para optimizar la eficiencia de los módulos fotovoltaicos y asegurar la máxima producción energética en instalaciones solares.

Apéndice E.

Configuración inicial de muestreo para recopilación de datos en Data Logger XR5-SE.

The screenshot displays the 'XR5 Setup' window for the 'XR5-SE-M-20 mV' model. The interface includes a menu bar with 'File' and 'Send', and a tabbed navigation system with 'Main', 'Other', 'Ch1', 'Ch2', 'Ch3', 'Ch4', 'Ch5', 'Ch6', 'Ch7', 'Ch8', and 'Pulse'. The 'Main' tab is active, showing the following configuration options:

- Model:** XR5-SE-M-20 mV
- Label:** (empty text field)
- Logging Mode:** Preset (Slow) (dropdown menu)
- Start:** 18/03/2024 10:10:00 AM
- Stop:** 30/04/2024 10:10:00 AM
- Log Ambient:** ☒
- Logging Interval:** 0 hr, 5 min, 0 sec
- Maximum Log Time:** 4m, 28d, 14hr
- For model:** XR5-SE-M-20 mV (dropdown menu)
- Sensor Excitation for (Slow) Logging Modes:**
 - 30 ms (dropdown menu)
 - Estimated milliamps: 0
 - Estimated battery life: 10,0 years

Configuración de muestreo para recopilación de datos de irradiancia piranómetro Kipp en el data logger.

The screenshot shows the 'XR5 Setup' window with the title bar indicating the file path: C:\Users\duvis\Pacl\Setup\information.20mV. The 'Ch1' tab is selected among several channels (Ch1 to Ch8) and a 'Pulse' tab. The configuration for Ch1 is as follows:

- Ch1:** ON
- Description:** Kipp Negro/Verde
- Type:** 0 - 2.5V (dropdown menu)
- Mode:** Standard (dropdown menu)
- Range:** ☐ Full-Range, ☒ Half-Range
- Slope:** 1,0
- Offset:** 0,0
- Calculate Slope/Offset:** (button)
- Alarm Limits:**
 - ☐ High 0,0000
 - ☐ Low 0,0000
- SMS Alarm:**
 - Phone #:** (text input field)
 - Message:** (text input field)

Configuración para dispositivo medición de irradiancia en Data Logger XR5-SE.

The image shows a software window titled "XR5 Status" with a close button (X) in the top right corner. The window has a tabbed interface with tabs labeled "Status", "Main", "Other", "Ch1", "Ch2", "Ch3", "Ch4", "Ch5", "Ch6", "Ch7", "Ch8", and "Pulse". The "Ch1" tab is currently selected and highlighted in blue. Inside the "Ch1" tab, the configuration for Channel 1 is displayed. It includes a "Ch1:" label followed by a button labeled "ON". To the right is a "Description:" label followed by a text box containing "SFV2Davis". Below this, there are two dropdown menus: "Type:" set to "0 - 5V" and "Mode:" set to "Standard". Underneath these are two radio buttons: "Full-Range" (which is selected) and "Half-Range". Further down are two text boxes: "Slope:" with the value "600,0" and "Offset:" with the value "0,0". A section titled "Alarm Limits" in blue text contains two checkboxes: "High" and "Low", both of which are unchecked. Each checkbox is followed by a text box containing the value "0,0". Below the "Alarm Limits" section is another section titled "SMS Alarm" in blue text. This section contains two text boxes: "Phone #:" and "Message:". At the bottom center of the window is an "OK" button.

XR5 Status

Status Main Other **Ch1** Ch2 Ch3 Ch4 Ch5 Ch6 Ch7 Ch8 Pulse

Ch1: ON Description: SFV2Davis

Type: 0 - 5V Mode: Standard

☒ Full-Range ☐ Half-Range

Slope: 600,0 Offset: 0,0

Alarm Limits

☐ High 0,0 ☐ Low 0,0

SMS Alarm

Phone #:

Message:

OK

Configuración del dispositivo de medición de temperatura en Data Logger XR5-SE.

Apéndice F

Notas del profesor Germán Osma Pinto

$$H_{total}^{inc} = \sum_{ssfvi=1}^{nssf v} H_{ssfvi}^{inc} \text{ (kWh)}$$

H_{total}^{inc} : Irradiación solar o energía incidente total del SFV en un lapso (día, semana o mes)
(kWh)

H_{ssfvi}^{inc} : Irradiación solar o energía incidente total del subsistema FV i en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

$nssf v$: número de subsistemas FV (son 4)

- Hay 4 subsistemas FV: 1 (18 M250), 2 (18 M250), 3 (6 iQ7+) y seguidor solar (1 M250)

$$H_{ssfvi}^{inc} = A_{ssfvi} \cdot \sum_{j=1}^{nd} G_{ssfvi,j}^{inc} \cdot \Delta t \quad (kWh)$$

$$A_{ssfvi} = n_{ssfvi}^{panel} \cdot \sum_{m=1}^{n_{ssfvi}^{panel}} A_{ssfvi,m}^{panel} \quad (m^2)$$

A_{ssfvi} : Área total del subsistema FV i (m^2)

nd : Número de datos considerados en un lapso (día, semana o mes)

G_{ssfvi}^{inc} : Irradiancia solar incidente promedio sobre la superficie del subsistema FV i medida en un intervalo Δt (W/m^2)

Δt : Intervalo de monitorización en horas (e.g., 5 minutos es igual a 5 / 60 horas)

n_{ssfvi}^{panel} : Número de paneles FV del subsistema FV i

$A_{ssfvi,m}^{panel}$: Área del panel FV m del subsistema FV i (m^2)

$$Egen_{total}^{ideal} = \sum_{ssfvi=1}^{n_{ssfvi}} Egen_{ssfvi}^{ideal} \quad (kWh)$$

$$Egen_{ssfvi}^{ideal} = \overline{\eta_{ssfvi}} \cdot H_{ssfvi}^{inc} \quad (kWh)$$

$Egen_{total}^{ideal}$: Energía generada total esperada idealmente en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

$Egen_{ssfvi}^{ideal}$: Energía generada esperada idealmente por el subsistema FV i en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

$\overline{\eta_{ssfvi}}$: Eficiencia de conversión promedio esperada idealmente del subsistema FV i (%)

$$Epérdida_{efectoFV} = H_{total}^{inc} - Egen_{total}^{ideal} \quad (kWh)$$

$Epérdida_{efectoFV}$: Energía pérdida total en los paneles del SFV por la conversión debido al efecto FV en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

$$Egen_{PCC}^{AC_día} = \sum_{l=1}^{nd_día} Pgen_{PCC,l}^{AC_día} \cdot \Delta t \quad (kWh)$$

$Egen_{PCC}^{AC_día}$: Energía generada e inyectada en el punto de conexión común (PCC) en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

$Pgen_{PCC}^{AC_día}$: Potencia generada e inyectada promedio en el punto de conexión común (PCC) en un intervalo Δt (W)

$nd_día$: Número de datos considerados durante el día (6 a.m. a 6 p.m.) en un lapso (día, semana o mes)

$$Egen_{micros}^{AC} = \sum_{j=1}^{nd} Pgen_{micros}^{AC} \cdot \Delta t \quad (kWh)$$

$Egen_{micros}^{AC}$: Energía generada e inyectada por todos los microinversores en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

$Pgen_{micros}^{AC}$: Potencia generada e inyectada promedio por todos los microinversores en un intervalo Δt (W)

$$Epérdida_{acometida}^{AC_día} = Egen_{PCC}^{AC_día} - Egen_{micros}^{AC} \quad (kWh)$$

$Epérdida_{acometida}^{AC}$: Energía pérdida en la acometida AC entre la salida de los microinversores y el PCC durante el día (6 a.m. a 6 p.m.) en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

$$Egen_{neta}^{AC}_{PCC} = Egen_{PCC}^{AC} - Epérdida_{acometida}^{AC_noche} \quad (kWh)$$

$$Epérdida_{acometida}^{AC_noche} = \sum_{k=1}^{nd_noche} Pgen_{PCC,k}^{AC_día} \cdot \Delta t \quad (kWh)$$

$E_{gen_neta_{PCC}}^{AC}$: Energía generada e inyectada neta en el punto de conexión común (PCC) en un lapso (día, semana o mes) descontando las pérdidas nocturnas (kWh)

$Epérdida_{acometida}^{AC_noche}$: Energía pérdida entre la salida de los microinversores y el PCC durante la noche (6 p.m. a 6 a.m.) debido al efecto Joule ocasionado por la corriente que circula por los conductores de la acometida AC, con el fin de atender tanto el consumo de potencia activa como la inyección de potencia no activa por parte de los microinversores en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

nd_noche : Número de datos considerados durante la noche (6 p.m. a 6 a.m.) en un lapso (día, semana o mes)

$$Epérdida_{micros} = E_{gen_{micros}}^{DC} - E_{gen_{micros}}^{AC} \quad (kWh)$$

$$E_{gen_{micros}}^{DC} = \sum_{j=1}^{nd} P_{gen_{micros}}^{DC} \cdot \Delta t \quad (kWh)$$

$$P_{gen_{micros}}^{DC} = \sum_{ssfvi=1}^{nssfvi} P_{gen_{ssfvi}}^{DC} \quad (W)$$

$$P_{gen_{ssfvi}}^{DC} = n_{ssfvi}^{panel} \cdot \frac{P_{gen_{micros,ssfvi}}^{AC}}{\eta_{ssfvi}^{micros}(t)} \quad (W)$$

$Epérdida_{micros}$: Energía pérdida en los microinversores del SFV por la conversión de corriente directa a corriente alterna en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

$E_{gen_{micros}}^{DC}$: Energía generada e inyectada por los paneles FV a los microinversores en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

$P_{gen_{micros}}^{DC}$: Potencia generada e inyectada promedio por todos los paneles FV a los microinversores en un intervalo Δt (W)

$P_{gen_{ssfvi}}^{DC}$: Potencia generada e inyectada promedio de los paneles FV a los microinversores en el subsistema FV i en un intervalo Δt (W)

$Pgen_{micros,ssfvi}^{AC}$: Potencia generada e inyectada promedio por los microinversores del subsistema FV i en un intervalo Δt (W)

$\eta_{ssfvi}^{micros}(t)$: Eficiencia de conversión de los microinversores del subsistema FV i en el instante t (%)

$$Epérdida_{\beta} = Egen_{sin\beta}^{DC} - Egen_{micros}^{DC} \quad (kWh)$$

$$Egen_{sin\beta}^{DC} = \sum_{j=1}^{nd} Pgen_{sin\beta}^{DC} \cdot \Delta t \quad (kWh)$$

$$Pgen_{sin\beta}^{DC} = \sum_{ssfvi=1}^{nssfvi} Pgen_{sin\beta_ssfvi}^{DC} \quad (W)$$

$$Pgen_{sin\beta_ssfvi}^{DC} = Pgen_{ssfvi}^{DC} \left(1 + \overline{\beta_{ssfvi}} \cdot \left(\overline{T_{ssfvi}^{oper}(t)} - 25 \right) \right) \quad (W)$$

$Epérdida_{\beta}$: Energía pérdida en los paneles del SFV debido al sobrecalentamiento de las celdas en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

$Egen_{sin\beta}^{DC}$: Energía generada por todos los paneles FV sin considerar las pérdidas por afectación térmica en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

$Pgen_{sin\beta}^{DC}$: Potencia generada promedio por todos los paneles FV sin considerar las pérdidas por afectación térmica en un intervalo Δt (W)

$Pgen_{sin\beta_ssfvi}^{DC}$: Potencia generada promedio por los paneles FV del subsistema FV i sin considerar las pérdidas por afectación térmica en un intervalo Δt (W)

$\overline{\beta_{ssfvi}}$: Coeficiente térmico promedio de afectación de la potencia generada por los paneles FV del subsistema FV i (%)

$\overline{T_{ssfvi}^{oper}}(t)$: Temperatura de operación promedio de los paneles FV del subsistema FV i en el instante t (%)

$$Epérdida_{\gamma} = Egen_{sin\gamma}^{DC} - Egen_{sin\beta}^{DC} \quad (kWh)$$

$$Egen_{sin\gamma}^{DC} = \sum_{j=1}^{nd} Pgen_{sin\gamma}^{DC} \cdot \Delta t \quad (kWh)$$

$$Pgen_{sin\gamma}^{DC} = \sum_{ssfvi=1}^{nssfvi} Pgen_{sin\gamma_{ssfvi}}^{DC} \quad (W)$$

$$Pgen_{sin\gamma_{ssfvi}}^{DC} = Pgen_{sin\beta_{ssfvi}}^{DC} \left(1 + \overline{\gamma_{ssfvi}}\right) \quad (W)$$

$Epérdida_{\gamma}$: Energía pérdida en los paneles del SFV debido a su degradación temporal en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

$Egen_{sin\gamma}^{DC}$: Energía generada por todos los paneles FV sin considerar las pérdidas por degradación en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

$Pgen_{sin\gamma}^{DC}$: Potencia generada promedio por todos los paneles FV sin considerar las pérdidas por degradación en un intervalo Δt (W)

$Pgen_{sin\gamma_{ssfvi}}^{DC}$: Potencia generada promedio por los paneles FV del subsistema FV i sin considerar las pérdidas por degradación en un intervalo Δt (W)

$\overline{\gamma_{ssfvi}}$: Coeficiente promedio de afectación por degradación de la operación de los paneles FV del subsistema FV i (%)

$$Epérdida_{int-somb} = Egen_{total}^{ideal} - Egen_{sin\gamma}^{DC} \quad (kWh)$$

$Epérdida_{int-somb}$: Energía pérdida en los paneles del SFV debido a resistencias internas y sombreadamiento en un lapso (día, semana o mes) (kWh)

Desglose progresivo

Ítem	Aprovechamiento	Pérdidas	Obtención
Irradiación solar o energía total incidente del SFV en un lapso	H_{total}^{inc}		Por medición directa
Pérdidas por conversión del efecto fotovoltaico		$Epérdida_{efectoFV}$	Por estimación
Energía generada total idealmente esperada en un lapso	$Egen_{total}^{ideal}$		Por estimación
Energía pérdida en los paneles del SFV debido a su degradación temporal		$Epérdida_{int-somb}$	Por estimación
Energía generada por todos los paneles FV sin considerar las pérdidas por degradación	$Egen_{siny}^{DC}$		Por estimación
Energía pérdida en los paneles del SFV debido a su degradación temporal		$Epérdida_{\gamma}$	Por estimación
Energía generada por todos los paneles FV sin considerar las pérdidas por afectación térmica (también se le puede llamar energía generada por todos los paneles FV después de considerar la degradación)	$Egen_{sin\beta}^{DC}$		Por estimación
Energía pérdida en los paneles del SFV debido al sobrecalentamiento de las celdas		$Epérdida_{\beta}$	Por estimación
Energía generada e inyectada por los paneles FV a los microinversores en un lapso (también se le puede llamar energía generada de los paneles FV después de considerar el sobrecalentamiento)	$Egen_{micros}^{DC}$		Por estimación
Energía pérdida en los microinversores del SFV por la conversión de corriente directa a corriente alterna en un lapso		$Epérdida_{micros}$	Por estimación
Energía generada e inyectada por todos los microinversores	$Egen_{micros}^{AC}$		Por medición directa
Energía pérdida en la acometida AC entre la salida de los microinversores y el PCC durante el día (6 a.m. a 6 p.m.)		$Epérdida_{acometida}^{AC}$	
Energía generada e inyectada en el punto de conexión común (PCC)	$Egen_{PCC}^{AC,día}$		Por medición directa
Energía pérdida entre la salida de los microinversores y el PCC durante la noche (6 p.m. a 6 a.m.)		$Epérdida_{acometida}^{AC,noche}$	Por medición directa

Energía generada e inyectada neta en el punto de conexión común (PCC)	$E_{gen_neta}^{AC}_{PCC}$	Por medición indirecta
--	----------------------------	------------------------------