

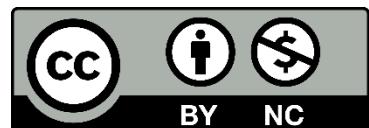
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica



**Diseño de Circuito Electrónico para la Medición de Potencia y
Temperaturas en Paneles Fotovoltaicos Monofaciales en el ITCR
Sede San Carlos: Análisis Comparativo de Eficiencia Energética con
y sin Enfriamiento.**

Informe de Trabajo Final de Graduación para optar por el Título de Ingeniero en
Electrónica con el Grado Académico de Licenciatura

Gabriel Steven Rodríguez Palacios



This work is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

San Carlos, noviembre de 2024

TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
UNIDAD DESCONCENTRADA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA SAN CARLOS
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado “Diseño de Circuito Electrónico para la medición de Potencia y Temperaturas en Paneles Fotovoltaicos Monofaciales en el ITCR Sede San Carlos: Análisis Comparativo de Eficiencia Energética con y sin Enfriamiento”, realizado por el señor Gabriel Steven Rodriguez Palacios y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador

Ing. Hugo Sánchez Ortíz

Profesor asesor

Ing. Ernesto Rivera Alvarado

Profesor lector

San Carlos, 21 noviembre del 2024

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Firma:



Gabriel Steven Rodríguez Palacios

San Carlos, 20 de noviembre del 2024

Céd: 208110242

Resumen

Este proyecto, tiene como objetivo principal diseñar un sistema de medición capaz de lograr analizar el comportamiento de la eficiencia energética al comparar dos paneles solares de los cuales uno de ellos tiene instalado un sistema de enfriamiento. En el Instituto Tecnológico de Costa Rica, sede San Carlos, se instalaron dos paneles fotovoltaicos monofaciales para estudiar su rendimiento bajo diferentes condiciones de enfriamiento.

La eficiencia de los paneles fotovoltaicos se ve afectada significativamente por el aumento de su temperatura, la cual en Costa Rica puede oscilar entre 55 y 70 grados Celsius. Este aumento de temperatura puede reducir la potencia de salida de los paneles en un 4.1% por cada 10 °C adicionales. Para realizar un análisis comparativo, se diseño e implementó un circuito electrónico que se encarga de medir la potencia para 2 paneles solares idénticos en un mismo instante, esto es importante para tener una correcta comparación de datos, además el circuito es capaz de obtener temperaturas de distintas zonas de cada panel, así como la irradiancia, esto va a ir instalado de tal forma que se pueda recolectar los datos y subirlos a internet por medio del microcontrolador.

Los datos tomados muestran el correcto funcionamiento del circuito diseñado, ya que era de esperar que el panel que presenta un sistema de enfriamiento iba a ser más eficiente en comparación al que no posee enfriamiento, los resultados mostraron una mejora en la producción de energía de un 20.63% para el panel con enfriamiento respecto al que no posee enfriamiento. Los datos recogidos se analizaron usando *Google Colaboratory*, lo que permitirá el acceso a la información desde cualquier lugar. Este proyecto sienta las bases para futuros desarrollos tecnológicos, con el objetivo de incentivar el diseño de disipadores de calor aplicables a millones de paneles fotovoltaicos a nivel mundial.

Palabras Claves: Eficiencia, Enfriamiento, Monofaciales, Temperatura.

Abstract

The main objective of this project is to design a measurement system capable of analyzing energy efficiency behavior by comparing two solar panels, one of which has a cooling system installed. At the Costa Rica Institute of Technology, San Carlos campus, two monofacial photovoltaic panels were installed to study their performance under different cooling conditions.

The efficiency of photovoltaic panels is significantly affected by temperature increases, which in Costa Rica can range between 55 and 70 degrees Celsius. This temperature rise can reduce the panels' output power by 4.1% for every additional 10°C. For a comparative analysis, an electronic circuit was designed and implemented to measure the power of two identical solar panels simultaneously, ensuring an accurate data comparison. Additionally, the circuit can obtain temperatures from different areas of each panel, as well as irradiance, allowing the data to be collected and uploaded to the internet through a microcontroller.

The data collected demonstrate the correct operation of the designed circuit, showing that the panel with a cooling system is more efficient than the one without cooling. The results revealed a 20.63% improvement in energy production for the cooled panel compared to the uncooled one. The data was analyzed using Google Colaboratory, enabling access to the information from any location. This project lays the foundation for future technological developments, with the aim of encouraging the design of heat dissipators applicable to millions of photovoltaic panels worldwide.

Keywords: Efficiency, Cooling, Monofacial, Temperature.

Índice General

Resumen.....	4
Abstract.....	5
1. Introducción.....	11
1.1. Problema existente e importancia de su solución	11
1.2. Solución seleccionada.....	11
2. Meta y objetivos	13
2.1. Meta.....	13
2.2. Objetivo general	13
2.3. Objetivos específicos.....	13
3. Marco teórico.....	14
3.1. Variables que influyen en la producción de energía fotovoltaica.....	14
3.1.1. Radiación solar.....	14
3.1.2. Energía fotovoltaica	15
3.1.2.1. Parámetros de funcionamiento.....	15
3.1.3. Eficiencia del panel fotovoltaico.....	17
3.1.3.1. Temperatura en panel fotovoltaico	18
3.2. Estudios en pruebas de enfriamiento de paneles solares.....	19
3.3. Sensores para instalaciones fotovoltaicas	20
3.4. Protocolos de comunicación industrial	24
3.4.1. Protocolo I²C	24
3.4.2. Protocolo SPI	26
3.4.3. Protocolo SP puerto serie	27
3.5. Sistemas embebidos	27
3.5.1. ESP32-WROOM-32.....	28
4. Metodología.....	30
4.1. Reconocimiento de problema.....	30
4.2. Propuesta del diseño	30
4.3. Diseño del sistema.....	30
4.4. Costo del sistema.....	44
5. Análisis de resultados.....	45
6. Conclusiones y recomendaciones.....	55

6.1. Conclusiones.....	55
6.2. Recomendaciones	56
7. Bibliografía.....	57
8. Anexos.....	59
8.1. Valores de resistencia del sensor NTC	59
8.2. Programación de la ESP32	62
8.3. Programación de <i>Google Apps Script</i>.....	63
8.4. Programación de <i>Google Colabatory</i>.....	65

Índice de figuras

Figura 1. 1: Diagrama de bloques de la ejecución del proyecto	12
Figura 3. 1: Tipos de radiación solar. [3]	15
Figura 3.2: Curvas características del panel solar [6].	16
Figura 3.3: Efecto de la temperatura sobre la curva de voltaje vs corriente.[7]	17
Figura 3.4: Temperatura en la célula del panel solar T_c sobre la temperatura ambiente T_a , en función de la velocidad del viento y de la irradiancia solar I_s .[8].....	19
Figura 3. 5: Sensores Termopar. [14]	21
Figura 3. 6: Sensores RTD PT100 y PT1000. [14]	22
Figura 3. 7: Sensor NTC utilizado en el proyecto. [15].....	23
Figura 3. 8: Tipos de radiación que miden el piranómetro (a) y el pirhelíometro (b). [16] ..	23
Figura 3. 9: Conexión de cuatro dispositivos a un bus de comunicación I2C. [18].....	25
Figura 3. 10: Conexión de cuatro dispositivos a un bus de comunicación SPI. [19]	26
Figura 3. 11: Diagrama de bits y tiempos de la comunicación SP. [20]	27
Figura 3. 12: Pines de salida de ESP32 WROOM-32. [23]	29
Figura 4. 1: Diagrama de primer nivel para el desarrollo del proyecto	31
Figura 4. 2: Temperaturas requeridas para analizar el intercambiador de calor por microfluídica	32
Figura 4. 3: Diagrama del circuito con los sensores y módulos para el desarrollo del proyecto	33
Figura 4. 4: Calibrado del sensor Spektron 210 con ayuda de un Piranómetro.....	35
Figura 4. 5: Gráfico obtenido de irradiancia vs valores del ADC	35
Figura 4. 6: Diseño en Fusion360 de las piezas necesarias para las bases de los paneles	36
Figura 4. 7: Base impresa en 3D con filamento PETG y montada con el panel	36
Figura 4. 8: Diseño de PCB en Eagle	37
Figura 4. 9: PCB realizada con máquina de fresado CNC en palca de cobre doble cara..	38
Figura 4. 10: Caja de intemperie con todos los componentes para la toma de datos del proyecto	39
Figura 4. 11: Instalación completa del proyecto para la toma de datos	40
Figura 4. 12: Método de enfriamiento aplicado a uno de los paneles	41
Figura 4. 13: Orientación e inclinación del panel solar con enfriamiento	41
Figura 4. 14: Orientación e inclinación del panel solar sin enfriamiento.....	42
Figura 5. 1: Vista superior en inferior del panel con enfriamiento para observar la ubicación de los sensores de temperatura.....	45
Figura 5. 2: Vista superior en inferior del panel sin enfriamiento para observar la ubicación de los sensores de temperatura.....	46
Figura 5. 3: Comparación entre sensores de temperatura NTC vs termocupla tipo K en el panel sin enfriamiento.....	48

Figura 5. 4: Gráfico de comparación de potencias vs irradiancia en el tiempo	49
Figura 5. 5: Gráfico de potencia de panel sin enfriamiento, con enfriamiento e irradiancia	50
Figura 5. 6: Gráfico de las temperaturas y potencias de los paneles con enfriamiento y sin enfriamiento.....	51
Figura 5. 7: Comparación de la energía generada por ambos paneles en cada día, donde P1 es el panel con enfriamiento y P2 es el panel sin enfriamiento	53
Figura 5. 8: Comparación de la eficiencia de ambos paneles en cada día, donde P1 es el panel con enfriamiento y P2 es el panel sin enfriamiento.....	54
Figura A. 1: Valores de resistencia del sensor NTC según la temperatura	59
Figura A. 2: Valores de resistencia del sensor NTC según la temperatura	60
Figura A. 3: Valores de resistencia del sensor NTC según la temperatura	61

Índice de tablas

Tabla 1: Precios de todos los componentes para la elaboración del proyecto	44
Tabla 2: Energías y eficiencias de los paneles solares durante el 20-10-2024 de las 8 a 16 horas.....	52
Tabla 3: Energías y eficiencias de los paneles solares durante el 21-10-2024 de las 8 a 16 horas.....	52
Tabla 4: Energías y eficiencias de los paneles solares durante el 22-10-2024 de las 8 a 16 horas.....	52
Tabla 5: Energías y eficiencias de los paneles solares durante el 22-10-2024 de las 8 a 16 horas.....	53

1. Introducción

1.1. Problema existente e importancia de su solución

La eficiencia de los paneles fotovoltaicos se ve afectada significativamente por la temperatura. En Costa Rica, las temperaturas de operación de los paneles pueden oscilar entre 55 y 70 grados Celsius, lo que representa un incremento mínimo de 30 °C sobre las condiciones estándar de 25 °C especificadas por los fabricantes. Este aumento de temperatura puede reducir la potencia de salida de los paneles en un 4.1% por cada 10 °C adicionales, afectando así su eficiencia global. Alrededor del 50 al 60% de la radiación solar que incide en el panel se transforma en calor, lo que genera altas temperaturas durante el funcionamiento del panel fotovoltaico. [1]

Debido a este problema sumado a que no se cuenta con dispositivos a la venta con el que podamos analizar a profundidad qué tan efectiva es una nueva tecnología o método de disipación de calor en el panel solar, esto atrasa e incluso frena en su desarrollo para comprobar su viabilidad, el cual puede llegar a ser muy revolucionario.

1.2. Solución seleccionada

El Instituto Tecnológico de Costa Rica, sede San Carlos, se ha comprometido con la investigación y desarrollo de tecnologías sostenibles. En este contexto, se van a instalar dos paneles fotovoltaicos monofaciales para estudiar la eficiencia energética en diferentes condiciones operativas. Por este motivo, el objetivo de este proyecto es diseñar un circuito electrónico económico que tome datos en tiempo real con el fin de comparar el rendimiento entre un panel con sistema de enfriado y otro sin enfriamiento, esto para ser analizados desde cualquier dispositivo de manera sencilla mediante gráficos con *Google Colaboratory* y comprobar que tan efectivos son los distintos métodos de disipación de calor para el aumento de la eficiencia energética de los paneles solares.

Para el proyecto se utilizó dos paneles solares, en donde uno va a ser enfriado con agua. A ambos paneles se les midió la potencia entregada y temperaturas, el circuito consta con sensores de temperatura, un sensor de irradiancia, entradas y salidas de potencia para los paneles, la salida de potencia es aprovechada ya sea a inversores DC/AC o a una carga, además de una salida de datos, dichos datos se recolectaron con un microcontrolador el cual los va a subir a una nube en internet y realizarles un análisis en torno a la eficiencia.

Además, se llevó a cabo un análisis de la temperatura mediante sensores, así como la radiación solar y la potencia entregada por los paneles en cada caso.

Los datos recogidos se analizaron y compararon para evaluar la eficiencia de los paneles bajo diferentes condiciones de enfriamiento. El análisis se realizará con *Google Colaboratory*, permitiendo el acceso a la información desde cualquier lugar.

En la Figura 1. 1 se puede observar el diagrama de bloque con los procesos que lleva a cabo la generación de gráficos o tablas de los datos recolectados de ambos paneles solares, con los que se generó el análisis de resultados del proyecto.

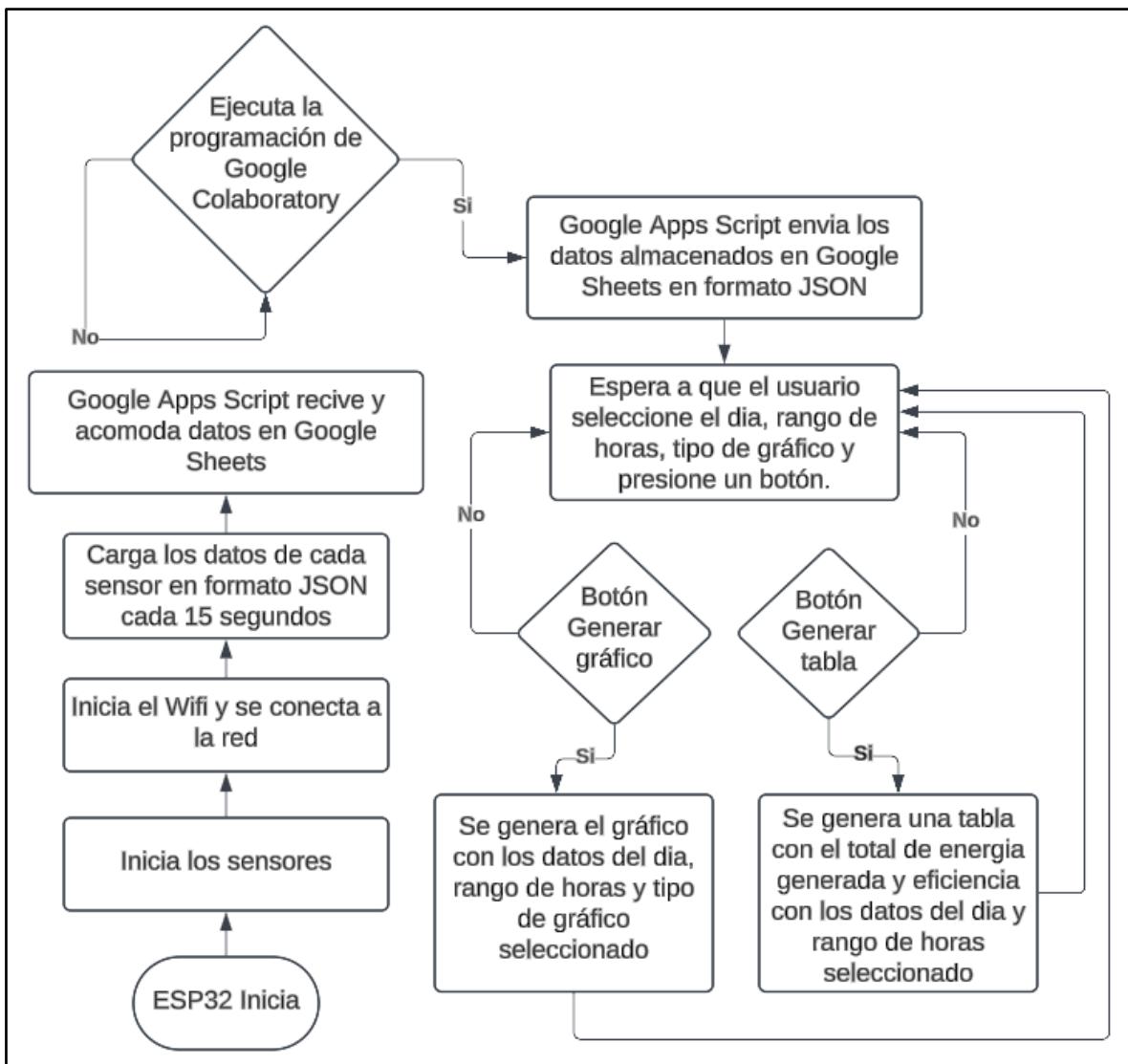


Figura 1. 1: Diagrama de bloques de la ejecución del proyecto

2. Meta y objetivos

2.1. Meta

Diseñar un circuito electrónico para la medición de irradiancia, potencia y temperaturas en paneles fotovoltaicos monofaciales, y realizar un análisis comparativo de eficiencia energética entre paneles con enfriamiento y paneles sin enfriamiento en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, sede San Carlos.

Indicador: Precisión y consistencia de las mediciones de temperatura y potencia entregada por los paneles fotovoltaicos bajo diferentes condiciones de enfriamiento.

2.2. Objetivo general

Diseñar un sistema para la medición precisa de la temperatura, irradiancia y potencia entregada por paneles fotovoltaicos monofaciales en el ITCR Sede San Carlos, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética comparando paneles con enfriamiento y paneles sin enfriamiento.

2.3. Objetivos específicos

1. Diseñar un circuito electrónico que permita medir la irradiancia, temperaturas y potencia entregada por los paneles fotovoltaicos monofaciales.

Indicador: Diseño y construcción del circuito con capacidades de medición precisas.

2. Analizar el impacto de la temperatura en la eficiencia de los paneles fotovoltaicos.

Indicador: Datos recopilados sobre el rendimiento de los paneles a diferentes temperaturas de operación.

3. Evaluar el rendimiento de conversión energética de un módulo fotovoltaico monofacial con sistema de enfriamiento y sin enfriamiento.

Indicador: Resultados de la comparación del rendimiento energético de ambos tipos de paneles.

3. Marco teórico

3.1. Variables que influyen en la producción de energía fotovoltaica

Esta sección abordará las variables que influyen en la producción de energía fotovoltaica.

3.1.1. Radiación solar

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, la cual se propaga en todas direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Emitida por la superficie solar, esta energía determina la dinámica de los procesos atmosféricos y climatológicos. El Sol emite energía en forma de radiación de onda corta y esta sufre un proceso de debilitamiento en la atmósfera por la presencia de las nubes y su absorción por parte de moléculas de gases o de partículas en suspensión. Tras superar la atmósfera, la radiación solar alcanza la superficie terrestre oceánica y continental, reflejándose o absorbiéndose. Finalmente, la superficie la devuelve con dirección al espacio exterior en forma de radiación de onda larga. [2]

La radiación solar, mejor conocida como **Irradiancia** se mide en superficie horizontal mediante un sensor de radiación o piranómetro que se sitúa orientado al sur y en un lugar libre de sombras. Los datos se recogen en unidades de potencia, vatios por metro cuadrado (W/m^2), en todas las estaciones meteorológicas y cuando tiende a hacerse en intervalos de tiempo se conoce como **Irradiación** usualmente en intervalos de diez minutos hasta 24 horas para establecer medias. En el caso de que se quiera pasar la irradiancia de unidades de potencia a unidades de energía, los datos en W/m^2 deben multiplicarse por la cantidad de segundos que comprenden diez minutos (600) o 24 horas (86.400) y el resultado será proporcionado en julios por metro cuadrado (J/m^2). [2]

Tipos de radiación solar según la forma en la que llega a la Tierra:

- **Radiación solar directa.** Este tipo de radiación es la que traspasa la atmósfera y alcanza la superficie de la Tierra sin haber sufrido dispersión alguna en su trayectoria. [2]

- **Radiación solar difusa.** Es la radiación que alcanza la superficie de la Tierra tras haber sufrido múltiples desviaciones en su trayectoria, por ejemplo, por los gases presentes en la atmósfera. [2]
- **Radiación solar reflejada.** Es aquella fracción de radiación solar que es reflejada por la propia superficie terrestre, en un fenómeno conocido como efecto *albedo*. [2]

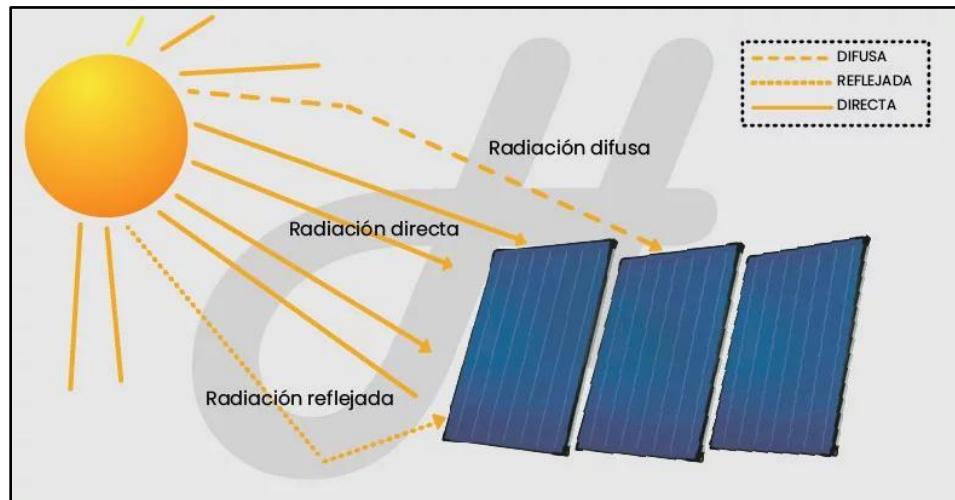


Figura 3. 1: Tipos de radiación solar. [3]

3.1.2. Energía fotovoltaica

La energía fotovoltaica es una tecnología de generación de energía eléctrica a partir de la conversión de la luz solar mediante células fotovoltaicas. Este proceso se basa en el efecto fotovoltaico, descubierto por Alexandre-Edmond Becquerel en 1839, que permite a ciertos materiales convertir la luz en electricidad. Las células fotovoltaicas, comúnmente hechas de silicio, se agrupan en módulos o paneles fotovoltaicos para generar electricidad a una escala utilizable. [4]

3.1.2.1. Parámetros de funcionamiento

Standard Test Condition (STC): Condición en la que el módulo se encuentra a una irradiancia de 1000 W/m^2 , a una temperatura de aproximadamente $25 \pm 2^\circ\text{C}$ y un factor de masa de aire de $1,5 \text{ AM}$. [5]

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT): Condición en la que el módulo se encuentra a una irradiancia de 800 W/m^2 , a una temperatura de aproximadamente 20°C ,

un factor de masa de aire de 1 AM, una velocidad de viento a 1 m/s y funcionando en circuito abierto. [5]

Potencia máxima o Potencia Pico, P_{mpp} : La potencia que se extrae de la celda viene dada por el producto de corriente y tensión, I^*U y se representa en la Ilustración mediante una línea de trazos y puntos. Se observa que tanto en corto circuito como en circuito abierto la potencia generada es nula. Existe un punto de operación (I_{mpp}, U_{mpp}) en el cual la potencia disipada en la carga es máxima, denominado punto de máxima potencia. En resumen, la potencia máxima o pico, P_{mpp} , es la potencia máxima que puede generar una celda fotovoltaica bajo unas condiciones estándar de la radiación incidente, y se obtiene como el producto de la tensión pico y de la intensidad pico:

$$P_{max} = I_{mpp}U_{mpp} \quad (1)$$

Siendo la intensidad pico, I_{mpp} , y la tensión pico, V_{mpp} , los valores de la intensidad y la tensión para los cuales la potencia suministrada por la celda alcanzada el valor máximo posible, en unas condiciones normalizadas. Las definiciones de estos parámetros característicos de las celdas son también válidas para caracterizar los módulos o paneles fotovoltaicos, constituidos a partir de un conjunto de celdas solares. [6]

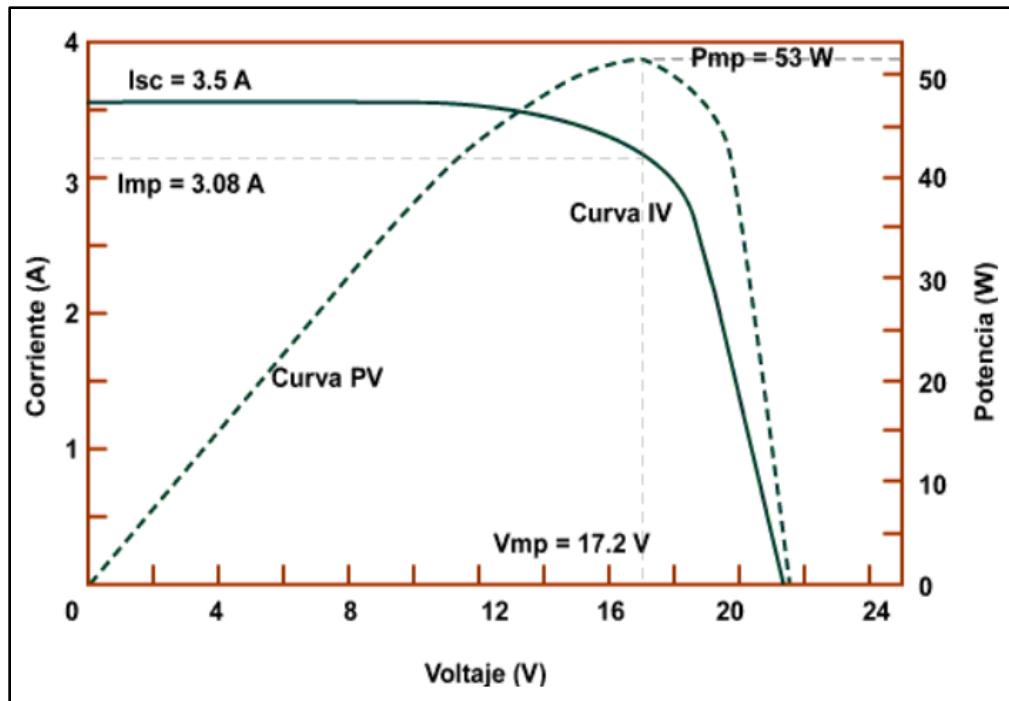


Figura 3.2: Curvas características del panel solar [6]

3.1.3. Eficiencia del panel fotovoltaico

La eficiencia de un panel fotovoltaico se refiere al porcentaje de la energía solar que puede convertir en energía eléctrica utilizable. Esta eficiencia está influenciada por varios factores, incluyendo la calidad del material, la tecnología de fabricación y las condiciones ambientales. Uno de los factores más críticos que afecta la eficiencia es la temperatura de operación del panel. A medida que la temperatura aumenta, la eficiencia disminuye debido a la pérdida de potencia de salida, como se observa en la Figura 3.3. [7]

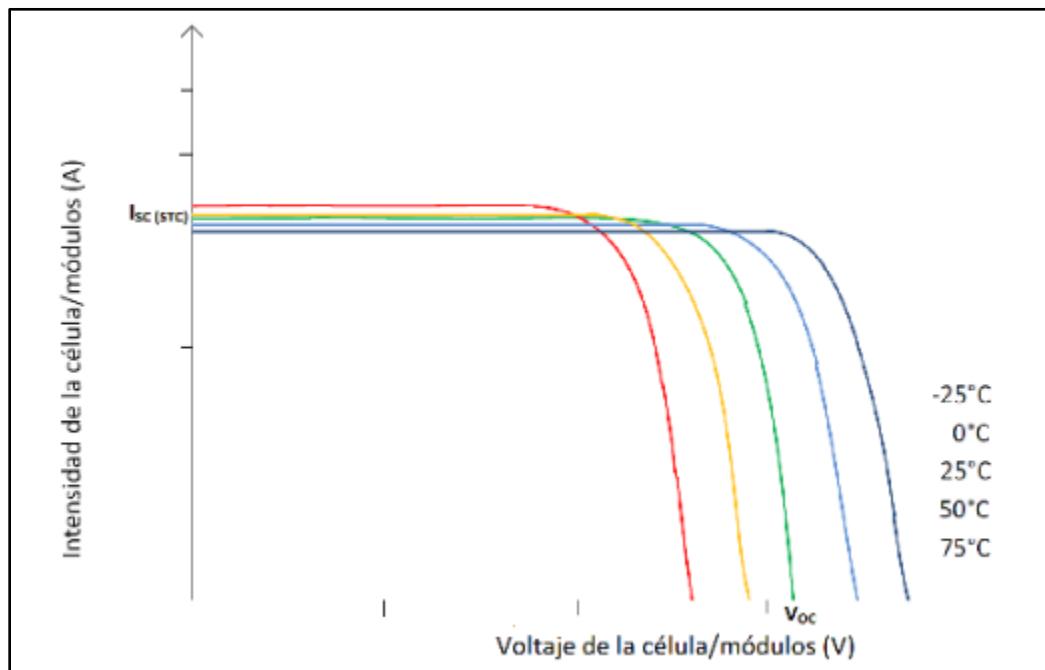


Figura 3.3: Efecto de la temperatura sobre la curva de voltaje vs corriente.[7]

Esta razón se calcula con el cociente entre la potencia eléctrica máxima, P_{max} , y el producto del área superficial de la célula, A_c , por la irradiancia incidente G en condiciones estándar de medida (CEM). Como:

$$\eta = \frac{P_{max}}{G * A_c} * 100 \quad (2)$$

En condiciones estándar, los fabricantes de paneles fotovoltaicos especifican una temperatura de operación de 25 °C (STC). Sin embargo, en climas cálidos como el de Costa Rica, las temperaturas de operación pueden superar los 55 °C, lo que puede reducir la eficiencia del panel significativamente. Se estima que, por cada 10 °C adicionales, la potencia de salida del panel disminuye aproximadamente un 4.1%. Por lo tanto, la gestión térmica de los paneles fotovoltaicos es crucial para mantener y mejorar su rendimiento. [1]

3.1.3.1. Temperatura en panel fotovoltaico

Para mitigar los efectos negativos del aumento de temperatura, se han desarrollado diversas técnicas de enfriamiento para paneles fotovoltaicos. Una de las soluciones más efectivas es el enfriamiento por agua, que utiliza intercambiadores de calor para reducir la temperatura de los paneles. Este método no solo ayuda a mantener la eficiencia del panel, sino que también puede extender su vida útil y mejorar la estabilidad de la generación de energía. [8]

La temperatura en la célula está directamente relacionada con la temperatura en ambas superficies del panel a través de las resistencias de conducción r_i y r_p de los materiales encapsulantes:

$$t_f = t_c - r_f \cdot q_f \quad (3)$$

$$t_p = t_c - r_p \cdot q_p \quad (4)$$

Donde la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en la célula solar es t_s , la temperatura en la superficie exterior del panel de la cara frontal es t_f y la temperatura en la superficie exterior del panel de la cara posterior es t_p . Las q_f y q_p son las pérdidas térmicas por la cara frontal y posterior por unidad de área del módulo, expresadas en W/m^2 y se calcula de la siguiente forma:

$$q_f = u_f(t_f - t_a) + w_f(t_f - t_g) + s_f(t_f - t_s) \quad (5)$$

$$q_p = u_p(t_p - t_a) + w_p(t_p - t_g) + s_p(t_p - t_s) \quad (6)$$

Donde las temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) del ambiente es t_a , equivalente del cielo es t_s y del suelo es t_g . Los coeficientes de transmisión térmica de convección natural y debidas al viento entre la superficie frontal del panel al ambiente es u_f y posterior del panel al ambiente es u_p , ($\text{W/m}^2 \ ^{\circ}\text{C}$). Los coeficientes de transmisión por radiación térmica entre la superficie del panel frontal y el suelo es w_f y la posterior y el suelo w_p ($\text{W/m}^2 \ ^{\circ}\text{C}$). Los coeficientes de transmisión térmica por radiación del panel hacia el cielo, por su cara frontal es S_f y la posterior es S_p ($\text{W/m}^2 \ ^{\circ}\text{C}$). [9]

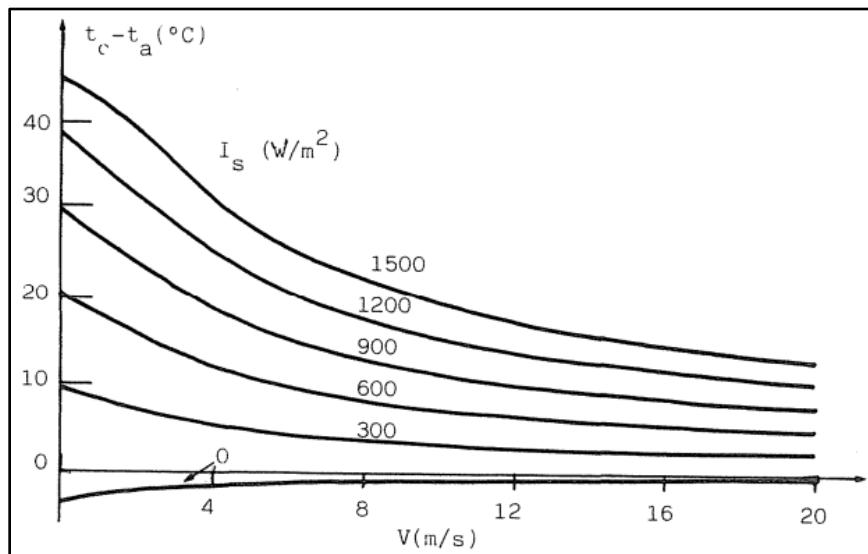


Figura 3.4: Temperatura en la célula del panel solar t_c sobre la temperatura ambiente t_a , en función de la velocidad del viento y de la irradiancia solar I_s .[8]

Es posible el cálculo de las temperaturas en la cara frontal y la cara posterior si conocemos las temperaturas del suelo, ambiente y del cielo, la generación térmica en las células, los coeficientes de transmisión de calor (convección y radiación) en ambas caras, la conductividad térmica y espesor de los materiales encapsulantes se puede calcular utilizando las ecuaciones anteriores. En la Figura 3.4 se puede observar cómo afecta la velocidad del viento a la temperatura en el panel solar en cualquier valor de irradiancia solar. [10]

La medición precisa de la potencia entregada por los paneles fotovoltaicos es esencial para evaluar su rendimiento y eficiencia. Los circuitos electrónicos diseñados para esta tarea deben ser capaces de manejar altas corrientes y voltajes, y proporcionar lecturas precisas y estables. [10]

3.2. Estudios en pruebas de enfriamiento de paneles solares

En el documento *Estudio experimental sobre los sistemas de refrigeración de los distintos tipos de paneles fotovoltaicos (FV) para aumentar su eficiencia eléctrica*, investiga el impacto de los métodos de enfriamiento en la eficiencia eléctrica de los paneles fotovoltaicos (PV). Analiza experimentalmente la eficiencia de cuatro técnicas de enfriamiento. El enfoque más eficaz que identifica es el enfriamiento por aspersión de agua en la superficie frontal de los PV, que aumenta la eficiencia en un 3,9% en comparación

con el caso sin enfriamiento. Los resultados muestran que el enfriamiento por aspersión de agua eleva la temperatura del PV a 41 °C, al tiempo que mejora su eficiencia diurna promedio al 22%. El enfriamiento por aire, el enfriamiento por agua en los tubos detrás del PV y el enfriamiento con nanofluido de óxido de aluminio y agua en los tubos detrás del PV mejoran la eficiencia en un 1,1%, 1,9% y 2,7%, respectivamente. [11]

La investigación analizada en el proyecto *Panorama del reciente enfoque del sistema de enfriamiento solar fotovoltaico*, revisa y compara varios sistemas de refrigeración que se pueden utilizar para mejorar el rendimiento de las células, incluido el enfriamiento activo y el enfriamiento pasivo. Los resultados revelan que los materiales de cambio de fase (PCM) ayudan a abordar objetivos económicos críticos, como reducir el costo de la degradación fotovoltaica, al tiempo que mejoran la vida útil de las células solares y mejoran su eficiencia, confiabilidad y calidad. Los PCM activos ofrecen un control preciso, mientras que los PCM pasivos son más simples y eficientes en términos de uso de energía, pero ofrecen menos control sobre la temperatura. [12]

En el documento *Análisis de los esfuerzos recientes en materia de refrigeración de paneles fotovoltaicos para lograr un mejor rendimiento y un mejor impacto en el medio ambiente*, menciona que existen muchos materiales que se utilizan para eliminar el calor no deseado en las células fotovoltaicas y, en los últimos años, la atención se ha centrado en la integración de nanomateriales en proporciones específicas con materiales de refrigeración tradicionales, como el agua, para mejorar sus propiedades térmicas. Como biomaterial respetuoso con el medio ambiente, renovable, sostenible, económico y con altas propiedades mecánicas, los nanocristales de celulosa (CNC) son uno de los materiales más prometedores para mejorar las propiedades de los materiales de refrigeración para enfriar las células fotovoltaicas y mejorar su rendimiento. [13]

3.3. Sensores para instalaciones fotovoltaicas

Termopar: Los termopares consisten esencialmente en dos tiras o alambres hechos de metales diferentes y unidos en un extremo. Los cambios en la temperatura en esa junta inducen un cambio en la fuerza electromotriz (FEM) entre los otros extremos. A medida que la temperatura sube, esta FEM de salida del termopar aumenta, aunque no necesariamente en forma lineal. Los más comunes son los siguientes:

Termopar Tipo J: Hecho de una combinación de hierro y constatan (aleación de cobre y níquel). De uso limitado en entornos oxidantes. Cuenta con un rango de temperatura entre los 0°C y los 750°C. [14]

Termopar Tipo T: Se compone de un alambre de cobre y otro de constatan. De uso recomendado en entornos de humedad. Su rango de temperatura se encuentra entre los -250°C y los 350°C. [14]

Termopar Tipo K: Compuesto de una junta de chromega (aleación de cromo y níquel) y alomega (aleación de aluminio y níquel), es el sistema de captación de temperatura más extendido. Y es que su rango de temperatura es muy amplio, situándose entre los -200°C y los 1250°C, aunque se recomienda para medidas entre 300 y 1100°C. [14]

Termopar Tipo E: Su combinación de materiales incluyen chromega y constatan. Su rango de temperaturas se sitúa entre los -200°C y los 900°C. [14]



Figura 3. 5: Sensores Termopar. [14]

Sensor de temperatura por resistencia (RTD): Los dispositivos termométricos de resistencia aprovechan el hecho de que la resistencia eléctrica de un material cambia al cambiar su temperatura. Dos tipos de sensores de temperatura clave son los dispositivos metálicos (normalmente conocidos como RTD) y los termistores. Como su nombre indica, los RTD confían en el cambio de resistencia en un metal, con la resistencia aumentando en

forma más o menos lineal con la temperatura. Los termistores se basan en el cambio de resistencia en un semiconductor de cerámica; la resistencia cae en forma no lineal con el aumento en la temperatura. [14]

El pt100 es un **sensor de temperatura de tipo RTD**, con un amplio rango de temperaturas, situadas entre los -200°C y los 850°C. Su nombre hace referencia a los **100 ohms que muestra a los 0°C**. Su resistencia aumenta a medida que aumenta la temperatura y su precisión dependerá del modelo que se monte (Din-B, Din-A , 1/3Din o 1/10Din). [14]



Figura 3. 6: Sensores RTD PT100 y PT1000. [14]

Termistor NTC. Están compuestos de materiales semiconductores cuya resistencia a la temperatura varía dependiendo de los grados de la misma. La utilización de un sensor de temperatura NTC está especialmente indicada en amplios rangos de temperaturas. A más temperatura, menos resistencia. Suelen estar hechos de magnesio, cobre, níquel o cobalto. [14]

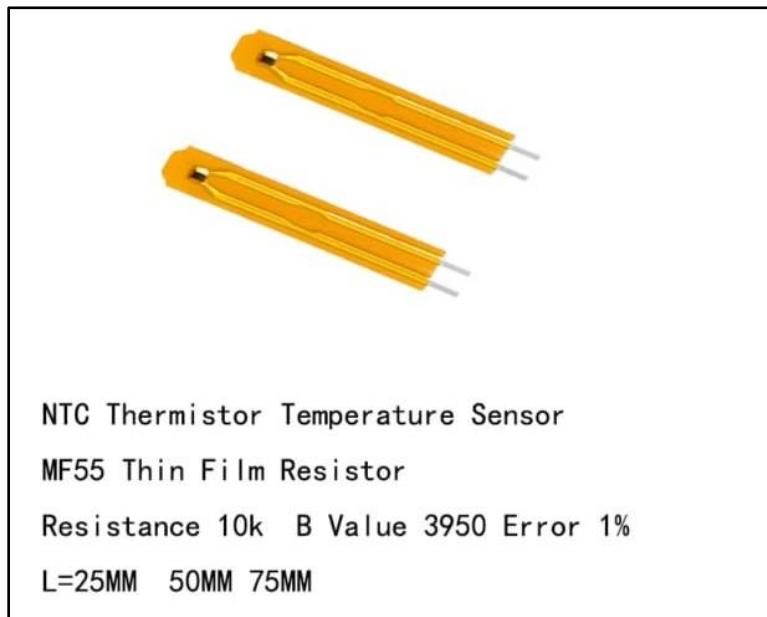


Figura 3. 7: Sensor NTC utilizado en el proyecto. [15]

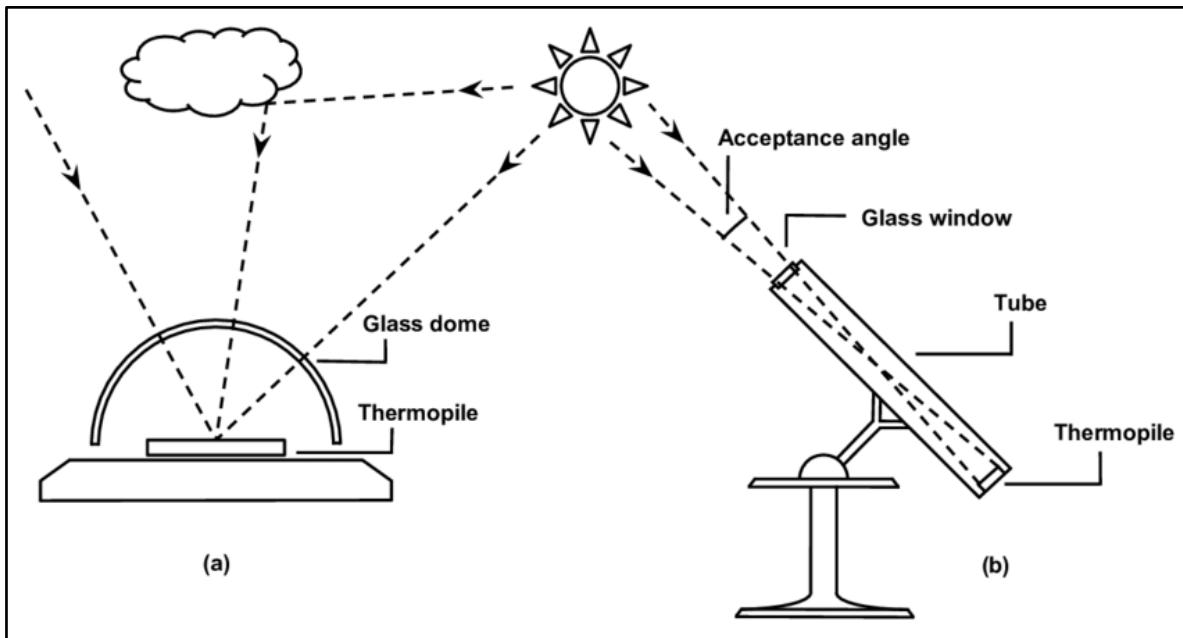


Figura 3. 8: Tipos de radiación que miden el piranómetro (a) y el pirheliómetro (b). [16]

El pirheliómetro mide la radiación solar perpendicular procedente directamente del sol y una pequeña parte de la radiación procedente del cielo alrededor del sol, como se observa en la Figura 3. 8 (b). Por lo general, la luz solar ingresa a este dispositivo a través

de una ventana de vidrio en un termopar (un dispositivo que convierte el calor en electricidad). La señal eléctrica generada se puede registrar y convertir en W/m². [16]

El piranómetro mide la radiación solar total del planetario (tanto dispersa como directa), generalmente en el plano horizontal. Esto significa que el dispositivo debe dar una respuesta imparcial a la radiación procedente de todas las direcciones, como se observa en la Figura 3. 8 (a). Consiste en un sensor térmico orientado horizontalmente y una cúpula de vidrio que limita el rango de longitud de onda, como en un pirhelímetro. [16]

3.4. Protocolos de comunicación industrial

Los sistemas de comunicación industrial son un mecanismo de transmisión de datos o información entre los diferentes niveles de la pirámide de automatización necesarios para llevar a cabo tareas de control y gestión en un proceso, se puede entender como protocolo como el convenio o conjunto de reglas que permite el intercambio de información entre diferentes dispositivos que componen una red industrial por ejemplo actuadores, HMI, variadores de velocidad, sensores etc., en otras palabras se podría decir que es el lenguaje usado para la comunicación entre dispositivos. [17]

3.4.1. Protocolo I²C

En I2C se diferencian dos elementos básicos, un MAESTRO y un ESCLAVO. La Figura-1, muestra una conexión típica de tres dispositivos, el bus consiste en dos líneas llamadas, *Serial DAta – SDA* y *Serial CLock – SCL*. Es decir, Datos Seriales y Reloj Serial.

En particular al bus se le conectan dos resistencias en arreglo *pull-up*, de entre 2.2K y 10K.

[18]

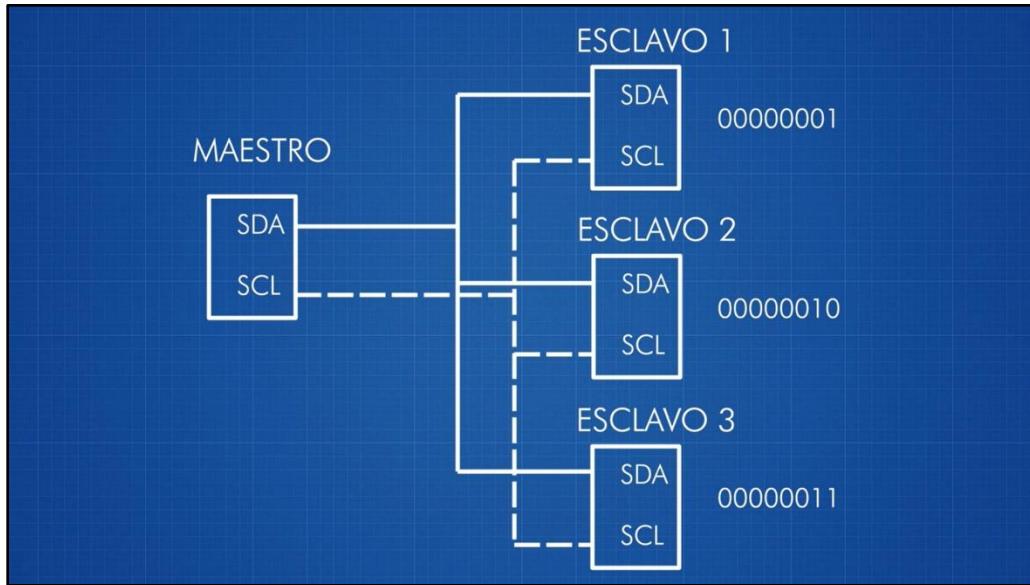


Figura 3. 9: Conexión de cuatro dispositivos a un bus de comunicación I2C. [18]

El **MAESTRO** I2C se encarga de controlar al cable de reloj, por sus siglas en inglés llamada *SCL – Serial CLock*. Además, el MAESTRO se encarga de iniciar y parar la comunicación. La información binaria serial se envía sólo por la línea o cable de datos seriales, en inglés se llama *SDA – Serial DAta*. Dos Maestros no pueden hacer uso de un mismo puerto I2C. Puede funcionar de dos maneras, como maestro-transmisor o maestro-receptor. Sus funciones principales son:

- Iniciar la comunicación – S
- Enviar 7 bits de dirección – ADDR
- Generar 1 bit de Lectura o Escritura – R/W
- Enviar 8 bits de dirección de memoria
- Transmitir 8 bits de datos
- Confirmar la recepción de datos – ACK – ACKnowledged
- Generar confirmación de No-recepción, NACK – No-ACKnowledged
- Finalizar la comunicación

El **ESCLAVO** I2C, generalmente suele ser un sensor. Este elemento suministra de la información de interés al **MAESTRO**. Puede actuar de dos formas: esclavo-transmisor o esclavo-receptor. Un dispositivo I2C esclavo, no puede generar la señal SCL. Sus funciones principales son:

- Enviar información en paquetes de 8 bits.
- Enviar confirmaciones de recepción, llamadas ACK. [18]

3.4.2. Protocolo SPI

La interfaz de periféricos en serie (SPI) es un bus de interfaz utilizado habitualmente para enviar datos entre microcontroladores y pequeños periféricos como registros de desplazamiento, sensores y tarjetas SD. Utiliza líneas de reloj y datos separadas, junto con una línea de selección para elegir el dispositivo con el que se desea hablar. [19]

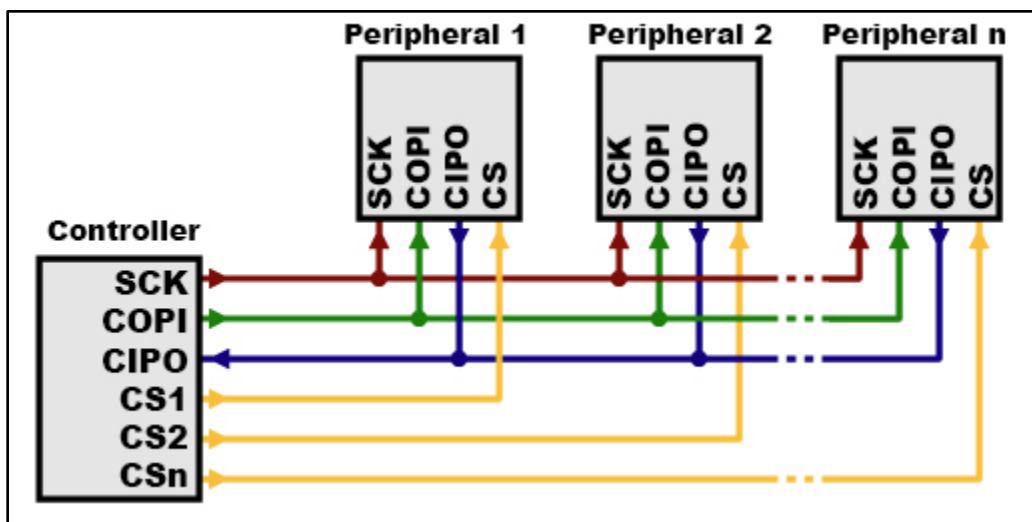


Figura 3. 10: Conexión de cuatro dispositivos a un bus de comunicación SPI. [19]

En SPI, sólo un lado genera la señal de reloj (normalmente llamada CLK o SCK para *Serial ClocK*). El lado que genera el reloj se llama “controlador”, y el otro lado se llama “periférico”. Siempre hay un solo controlador (que casi siempre es tu microcontrolador), pero puede haber múltiples periféricos (más sobre esto en un momento). [19]

Cuando se envían datos desde el controlador a un periférico, se envían por una línea de datos llamada COPI, por “Controller Out / Peripheral In”. Si el periférico necesita enviar una respuesta al controlador, el controlador continuará generando un número

preestablecido de ciclos de reloj, y el periférico pondrá los datos en una tercera línea de datos llamada CIPO, para “Controller In / Peripheral Out”. [19]

3.4.3. Protocolo SP puerto serie

La comunicación en serie es una transferencia bidireccional de datos entre un transmisor y un receptor, utilizando un solo canal de comunicación. En palabras simples, es la transferencia de bits entre dos partes, a través de un solo cable. La parte especial de la comunicación en serie es que los bits se transfieren uno tras otro, lo que significa que un solo bit se transmite en un intervalo de tiempo. Hay ciertos parámetros que deben ser entendidos antes de que avancemos hacia el conocimiento de cómo funciona la comunicación en serie. Aquí hay una breve explicación de estos parámetros:

Baud Rate: La tasa de baudios es una medida del número de bits transmitidos en un segundo. Nos permite medir la velocidad de transmisión, es decir, una mayor tasa de baudios significa que la transmisión es más rápida porque un mayor número de bits viajan del emisor al receptor. [20]

Parity Bits: Hay cuatro tipos de bits de paridad: impares, pares, espaciados y marcados. Se utilizan para la detección y corrección de errores en la comunicación en serie. [20]

Stop Bits: Los bits de parada indican el final de un paquete. Como la transmisión de los bits es continua, estos bits actúan como marcadores entre los sucesivos paquetes de información. [20]

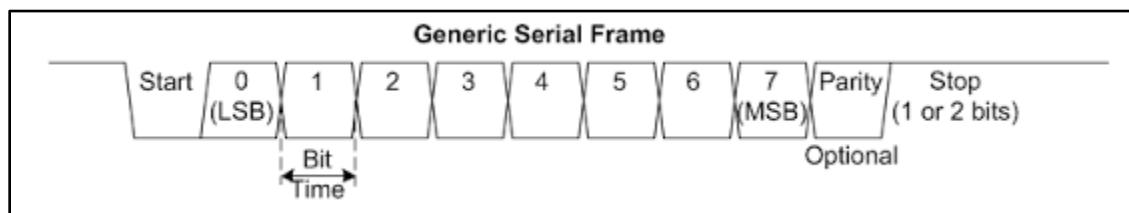


Figura 3. 11: Diagrama de bits y tiempos de la comunicación SP. [20]

3.5. Sistemas embebidos

Los sistemas embebidos son esencialmente computadoras pequeñas de bajo consumo de energía que funcionan como parte de un dispositivo o sistema más grande. Los sistemas embebidos se componen de un procesador, memoria, una fuente de alimentación y puertos

de comunicación. Son estos puertos los que se comunican con otros sistemas integrados dentro del dispositivo. Los datos comunicados son interpretados por un software altamente específico para la función del sistema embebido y almacenados en la memoria. [21]

El procesador de un sistema integrado puede ser un microcontrolador o un microprocesador. La diferencia entre estos componentes es que los microprocesadores necesitan más circuitos de soporte debido a que la memoria y los periféricos no están incluidos en el chip, utilizando circuitos integrados separados en su lugar. Los microcontroladores, por otro lado, los tienen integrados en el chip. [22]

3.5.1. ESP32-WROOM-32

ESP32-WROOM-32 es un potente módulo genérico de Wi-Fi+Bluetooth+BLE MCU que está dirigido a una amplia variedad de aplicaciones, que van desde redes de sensores de bajo consumo hasta las tareas más exigentes, como la codificación de voz, la transmisión de música y la decodificación de MP3. [23]

En el núcleo de este módulo está el chip **ESP32-D0WDQ6***. El chip incorporado está diseñado para ser escalable y adaptable. Hay dos núcleos de la CPU que pueden ser controlados individualmente, y la frecuencia del reloj de la CPU es ajustable desde 80 MHz a 240 MHz. [23]

El usuario también puede apagar la CPU y hacer uso del co-procesador de baja potencia para monitorear constantemente los periféricos por cambios o cruce de umbrales. El ESP32 integra un rico conjunto de periféricos, que van desde sensores táctiles capacitivos, sensores Hall, interfaz de tarjeta SD, Ethernet, SPI de alta velocidad, UART, I2S e I2C. [23]

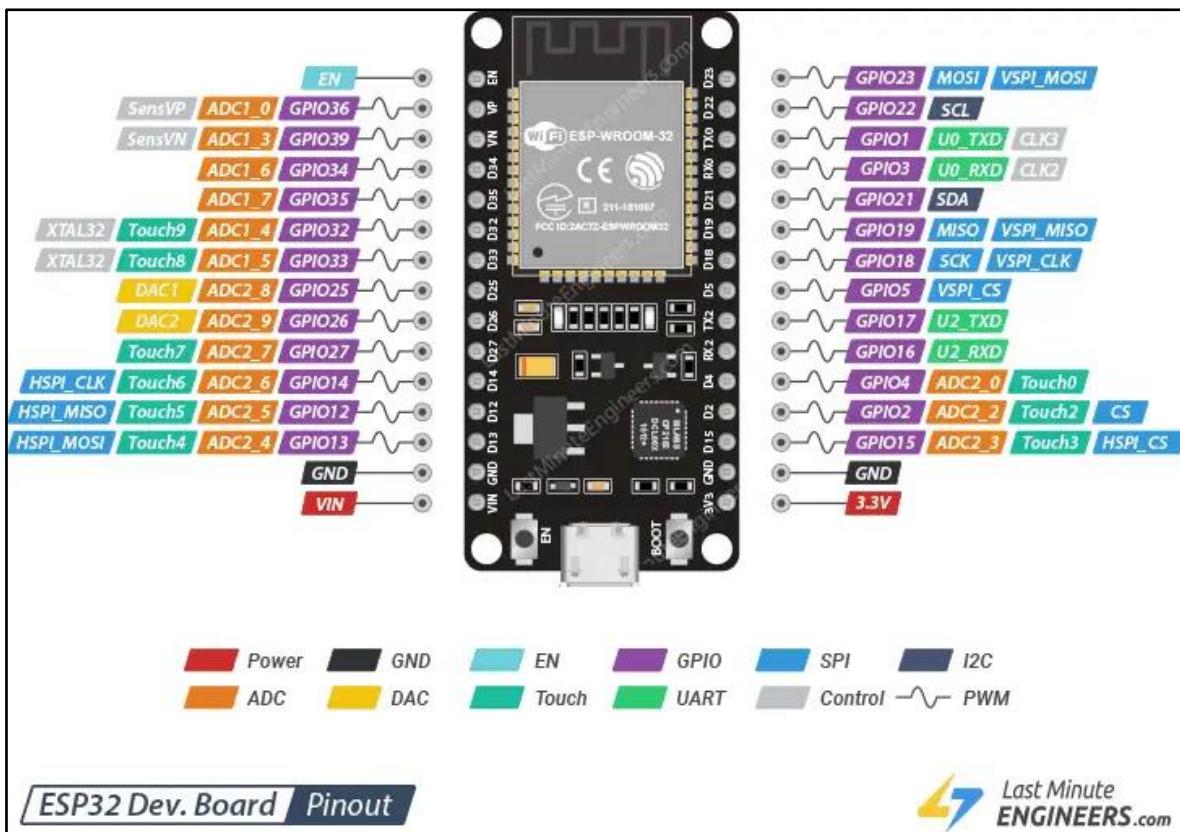


Figura 3. 12: Pines de salida de ESP32 WROOM-32. [23]

4. Metodología

4.1. Reconocimiento de problema

El aumento de la temperatura en los paneles fotovoltaicos es una de las principales causas de pérdida de rendimiento. En Costa Rica, las temperaturas de operación de los paneles pueden alcanzar entre 55 y 70 grados Celsius, lo que reduce la eficiencia y la potencia de salida. [1]

El problema principal es la alta temperatura de operación de los paneles fotovoltaicos, que reduce su eficiencia y potencia de salida. Este proyecto buscó diseñar un circuito para medir la potencia entregada por los paneles y comparar el rendimiento entre un panel con algún método de enfriado y otro sin enfriamiento. El objetivo es incentivar el desarrollo de soluciones tecnológicas que mejoren la eficiencia energética de los paneles fotovoltaicos mediante el uso de distintos métodos de disipación de calor.

4.2. Propuesta del diseño

El diseño de un circuito electrónico para medir la potencia entregada por los paneles, junto con un análisis detallado de la temperatura y la radiación solar, permitirá comparar el rendimiento de los paneles con y sin enfriamiento. Este diseño ayuda a entender mejor el impacto de la temperatura en la eficiencia de los paneles y a incentivar el desarrollo de soluciones que reduzcan su temperatura de operación. Este proyecto va a ayudar que en un futuro se desarrolle un sistema que permita enfriar los paneles fotovoltaicos utilizando cualquier método de disipación de calor, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y la producción eléctrica.

Este proyecto se centró en la comparación de la eficiencia energética de paneles fotovoltaicos monofaciales bajo diferentes condiciones de enfriamiento, con el objetivo de proponer una solución tecnológica innovadora y viable para mejorar el rendimiento de estos dispositivos en entornos de alta temperatura.

4.3. Diseño del sistema

El enfoque tecnológico de la solución se basa en el desarrollo e implementación de un sistema de medición y análisis que permita evaluar las temperaturas y potencia entregada por dos paneles fotovoltaicos en tiempo real. Para lograr esto, se diseñó un circuito electrónico que se integrará con un microprocesador y un sistema de sensores

térmicos y sensores de potencia, lo cual permitirá la recolección y procesamiento de datos de manera eficiente y precisa.

Se registraron datos de potencia, temperatura y radiación en los paneles fotovoltaicos para diferentes condiciones de operación durante un período de tiempo definido. Los datos recolectados se analizaron para determinar la relación entre la temperatura de operación y la eficiencia de los paneles. Se utilizaron herramientas en línea de visualización de datos para comparar el rendimiento de los paneles bajo las diferentes condiciones de enfriamiento. Con base en el análisis de datos, se evaluó la efectividad del enfriamiento en la mejora de la eficiencia energética de los paneles fotovoltaicos. Se generaron gráficos que faciliten la interpretación de los datos. En la Figura 4. 1 se puede observar un diagrama de primer nivel que muestra las partes con las que consta el proyecto.

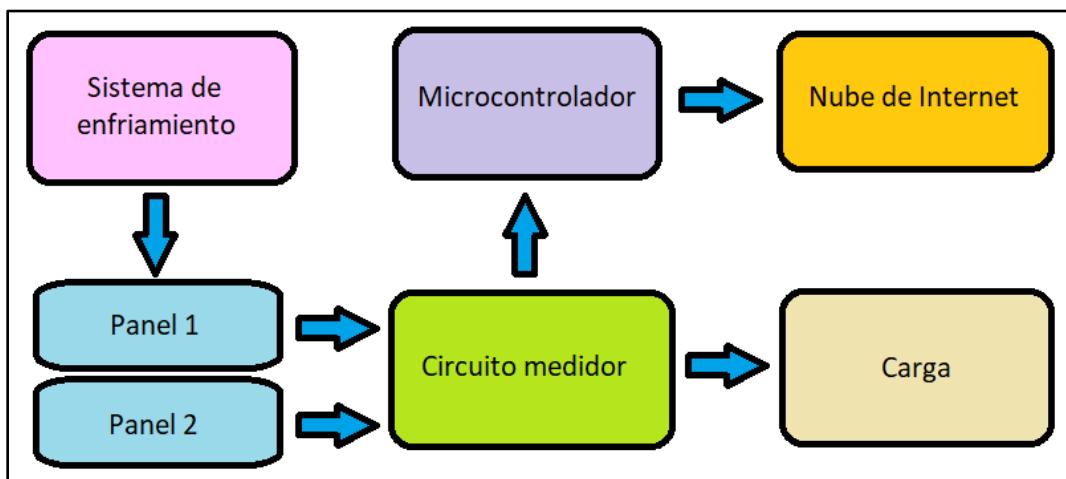


Figura 4. 1: Diagrama de primer nivel para el desarrollo del proyecto

La factibilidad tecnológica y la afinidad con el área electrónica se demuestran a través de la integración de componentes electrónicos avanzados y el uso de técnicas modernas de análisis de datos. El proyecto proporciona una experiencia significativa de diseño, involucrando la creación de un sistema completo que combina hardware y software para resolver un problema real y relevante en el ámbito de las energías renovables.

Este proyecto se inicia por la necesidad de realizar mediciones a un método de enfriamiento que se encuentra en desarrollo llamado *intercambiador de calor por microfluídica* por parte de los profesores Christopher Vega Sánchez y Luis Diego Murillo Soto del Tecnológico de Costa Rica sede Cartago, en la Figura 4. 2 podemos observar las temperaturas que desean medir, son un total de seis, además me mencionaron que en caso

de ser posible se puede agregar más sensores de los que muestran la Figura 4. 2 esto para reiterar mediciones de temperatura en el panel, por este motivo se colocaron ocho sensores de temperatura para el diseño del proyecto.

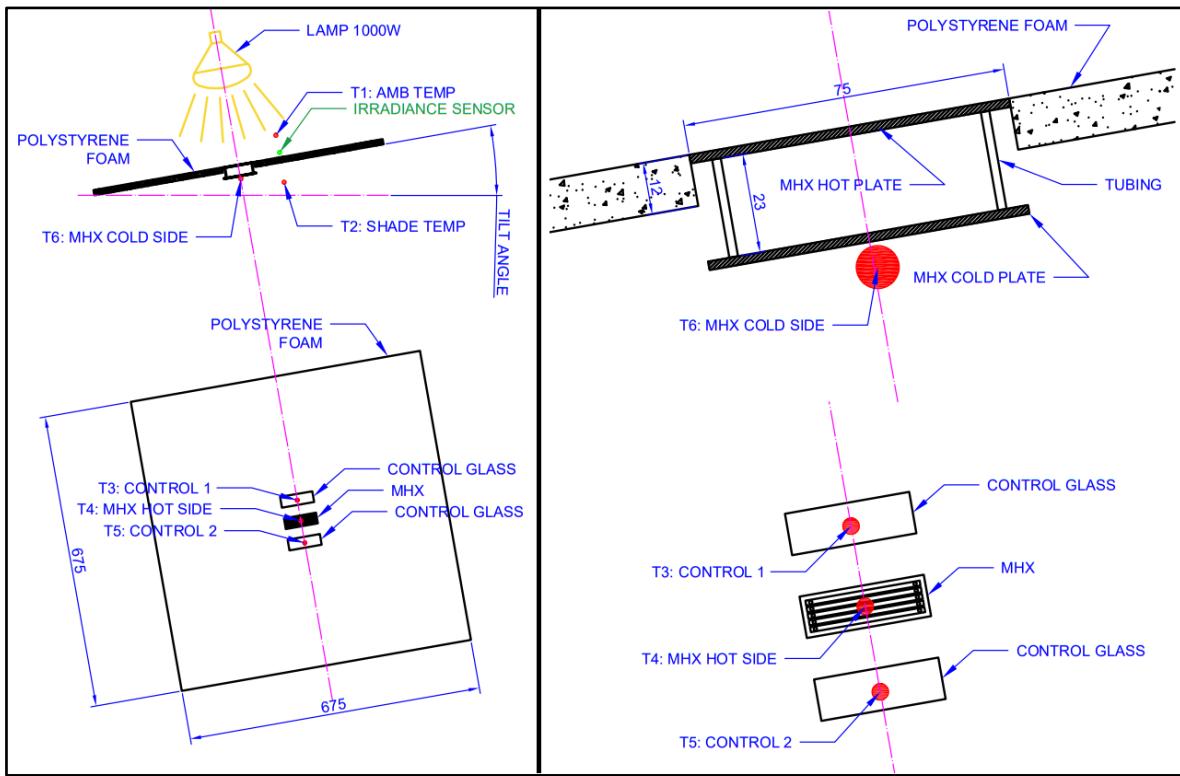


Figura 4. 2: Temperaturas requeridas para analizar el intercambiador de calor por microfluídica

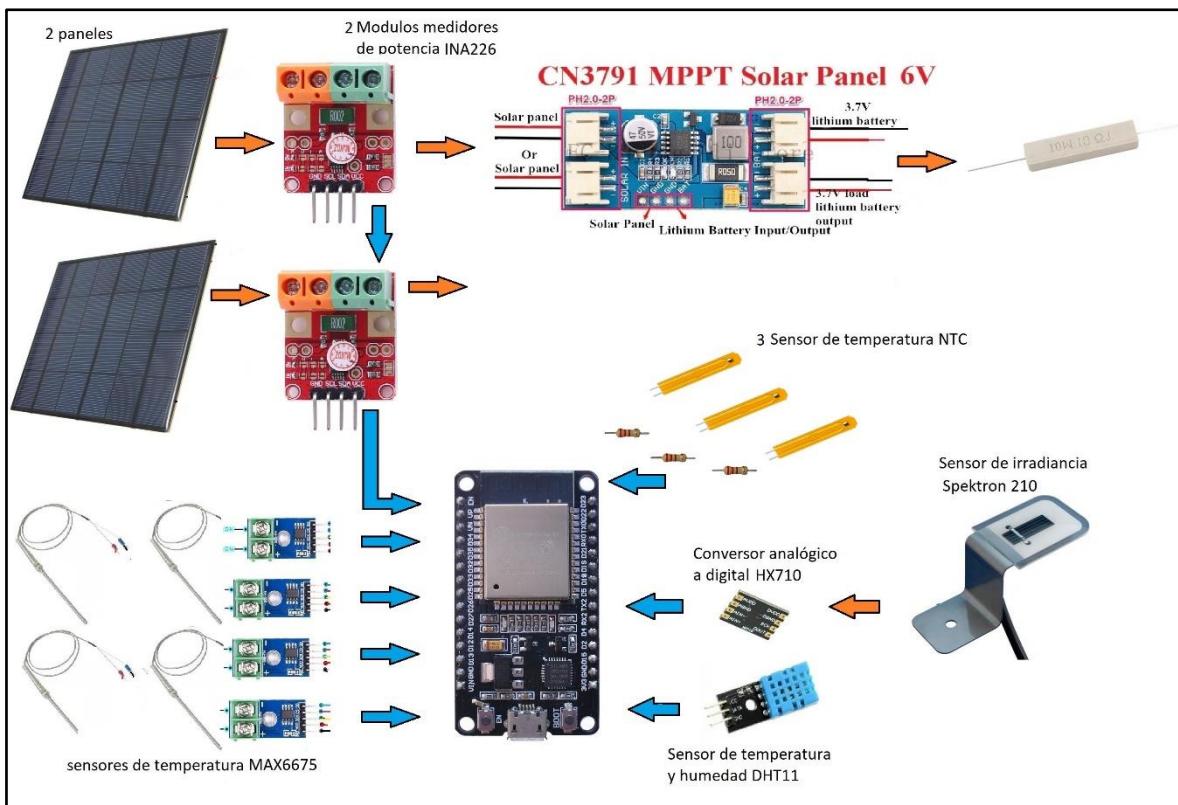


Figura 4. 3: Diagrama del circuito con los sensores y módulos para el desarrollo del proyecto

En la Figura 4. 3 se puede observar los componentes que se van a utilizar para lograr con los objetivos del proyecto, los componentes son: una ESP32, termocuplas tipo K, módulo INA226, sensores de temperatura NTC, resistencias de 10 kΩ, módulo MAX6675, módulo MPPT CN3791, paneles solares de 6V, resistencia cerámica de 8Ω 10W, módulo ADC HX710, sensor Spektron210 y módulo DHT11.

Cada módulo posee un protocolo de comunicación, el módulo para medir potencia INA226 utiliza el protocolo I2C, el módulo MAX6675 y el conversor analógico a digital HX710 utilizan SPI y el sensor de temperatura y humedad DHT11 utiliza el protocolo SP.

Para los sensores de temperatura NTC se va a utilizar los ADC incorporados en la ESP32 por medio de un divisor de tensión midiendo el voltaje entre una resistencia con valor conocido del sensor, en las figuras del anexo 8 podemos observar los valores de resistencia del sensor NTC en cada grado de temperatura.

El ADC de la ESP32 posee 12 bits por lo que va a dividir el rango de 0V hasta 3.3V en 4096 valores, entonces para conocer el valor del voltaje V_{Rf} se va a conectar en uno de los pines ADC de la ESP32 y se va a utilizar la siguiente ecuación:

$$V_{Rf} = \frac{PinESP32}{4096} * 3.3 \quad (7)$$

Una vez conectado el pin de la ESP32 entre la resistencia fija y el sensor de temperatura nos va a tirar un valor entre 0 y 4096, pero utilizando la ecuación anterior podemos convertir dicho valor en voltaje, de esa manera se obtiene V_{Rf} .

Para conocer el valor de la resistencia del sensor de temperatura NTC se utiliza la siguiente ecuación:

$$R_{NTC} = R_{fija} * \frac{V_{Rf}}{V_{cc} - V_{Rf}} \quad (8)$$

Donde R_{NTC} es la resistencia del sensor de temperatura, R_{fija} es una resistencia con valor conocido conectada en serie con el sensor, V_{Rf} es el voltaje de la resistencia con valor fijo y V_{cc} es el voltaje de alimentación, el cual es de 3.3 V que entrega la ESP32.

Una vez conociendo el valor de R_{NTC} se recorre una lista en la programación con todos los valores mostrados en las figuras del Anexo 8.1, por ejemplo, ahora que conocemos R_{NTC} , se recorre la lista hasta encontrar un valor de resistencia que sea menor a R_{NTC} y a la vez mayor al siguiente valor de la lista, de esta forma vamos a conocer cuál es la temperatura.

El método de calibrado del Spektron 210 se realizó colocándolo en el mismo plano del Piranómetro y tratando de que el sol incida a 90 grados de dicho plano, en la Figura 4. 4 se puede observar cómo se colocaron ambos dispositivos.



Figura 4. 4: Calibrado del sensor Spektron 210 con ayuda de un Piranómetro

Luego se tomaron los datos manualmente en un Excel observando el valor que mostraba el Piranómetro y para el valor del ADC se observaba con ayuda de la ESP32 conectado a la computadora utilizando el software Arduino IDE en el Serial Monitor, esperando a que se estabilizaran los valores para proceder a apuntarlos. Una vez se recolectaron bastantes datos se realizó un gráfico en Excel y se obtuvo una ecuación polinomial que se ajusta bastante bien a dichos datos.

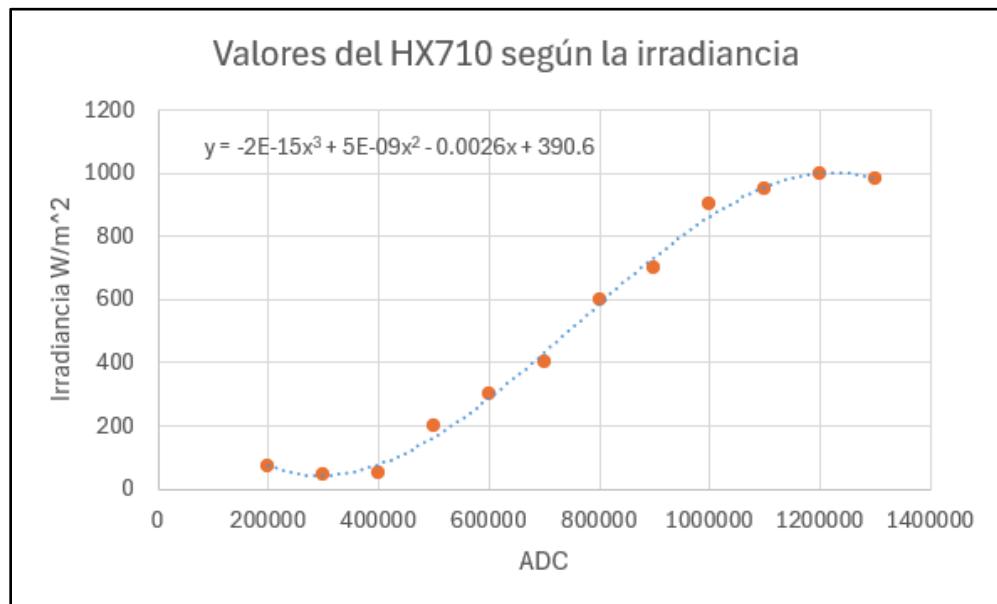


Figura 4. 5: Gráfico obtenido de irradiancia vs valores del ADC

La línea punteada de color azul representa la ecuación polinomial y los puntos naranjas son los datos tomados manualmente. La ecuación obtenida es:

$$y = -2 * 10^{-15}x^3 + 5 * 10^{-9}x^2 - 0.0026x + 390 \quad (9)$$

Para el diseño de las bases en 3D se utilizó el software *Fusion360* en la Figura 4. 6 podemos observar las piezas diseñadas y la Figura 4. 7 con toda la estructura armada:

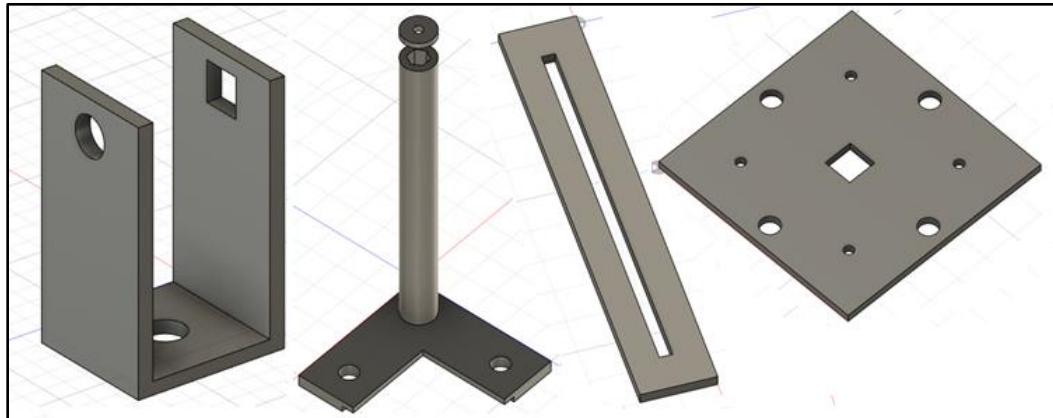


Figura 4. 6: Diseño en Fusion360 de las piezas necesarias para las bases de los paneles

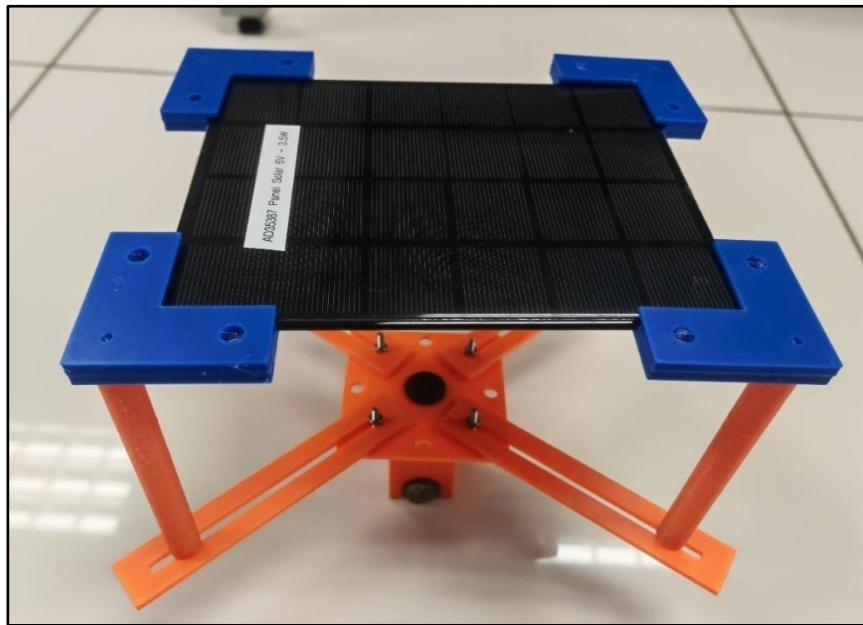


Figura 4. 7: Base impresa en 3D con filamento PETG y montada con el panel

La idea del diseño es que la estructura base se pueda ajustar a casi cualquier panel solar pequeño, tal y como se observa en la Figura 4. 7 la estructura funciona correctamente para sostener el panel solar.

Para el diseño de la PCB en donde se van a montar todos los componentes se utilizó el software *EAGLE* en la Figura 4. 8 se puede observar el diseño y en la Figura 4. 9 se puede observar la implementación realizada en una placa de cobre doble cara por una máquina de fresado CNC.

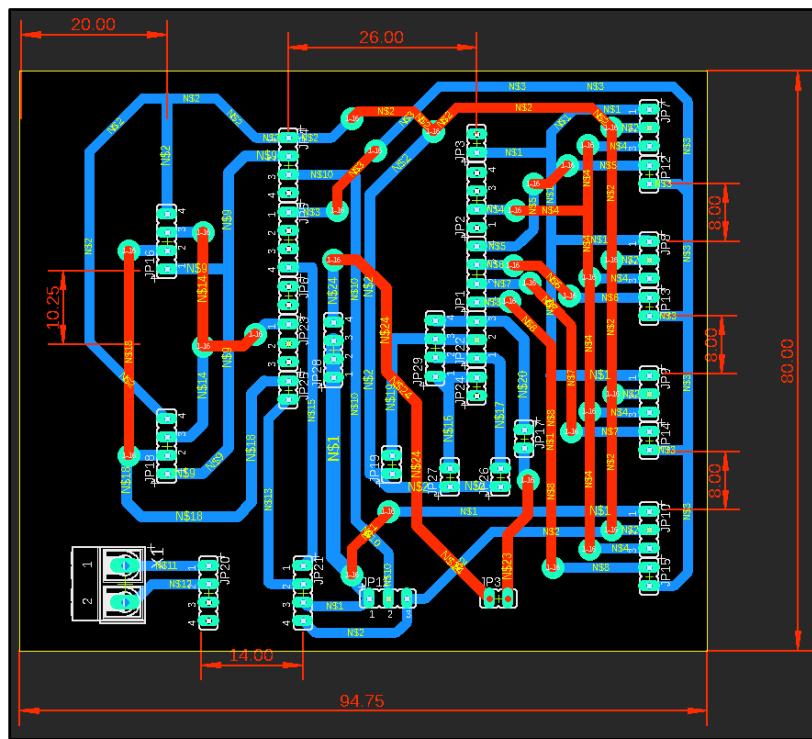


Figura 4. 8: Diseño de PCB en Eagle.

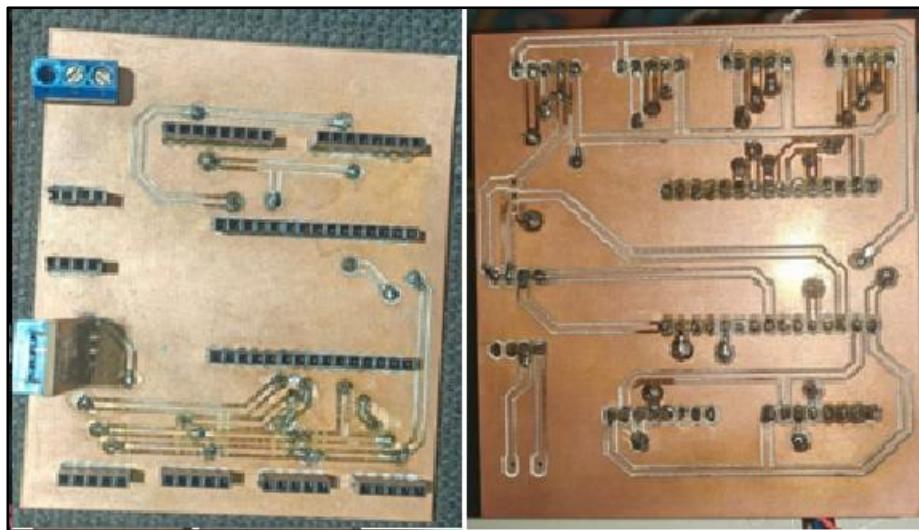


Figura 4. 9: PCB realizada con máquina de fresado CNC en palca de cobre doble cara

En la Figura 4. 10 podemos observar el circuito completamente armado en la caja de intemperie con todos los componentes requeridos, se puede observar los módulos MAX6675, INA226, ESP32, MPPT, batería de litio, HX710 y un adaptador para alimentar la ESP32 que tiene de entrada 120 VAC y de salida 5 VDC. Se le realizaró perforaciones en la caja de intemperie para pasar los cables de las termocuplas tipo K, los sensores NTC, el Spektron210, el DTH11 y un tomacorriente de 120 VAC.

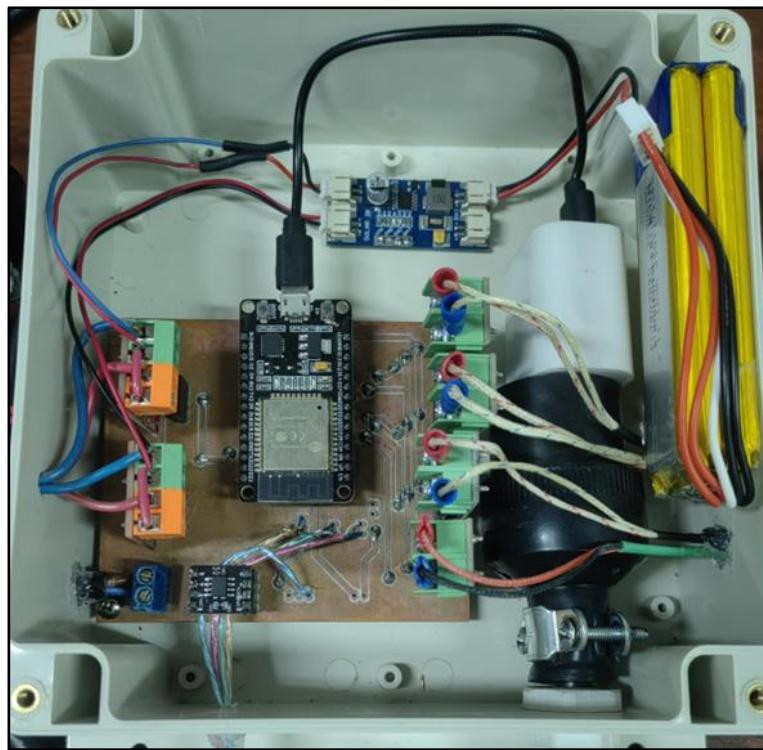


Figura 4. 10: Caja de intemperie con todos los componentes para la toma de datos del proyecto

El lugar donde se instaló el proyecto debía de cumplir con los siguientes requerimientos: que haya una conexión a wifi estable, que haya un grifo cercano, un tomacorriente de 120 VAC y también que no haya objetos que afecten con sombras a los paneles solares. El lugar en donde se instaló cumple con todos esos requerimientos solo que, si recibe sombra antes de las 8 am y después de las 4 pm, por lo que se programó para que la toma de datos fuera en ese intervalo de tiempo. En la Figura 4. 11 se puede observar todo el sistema listo para la toma de datos.

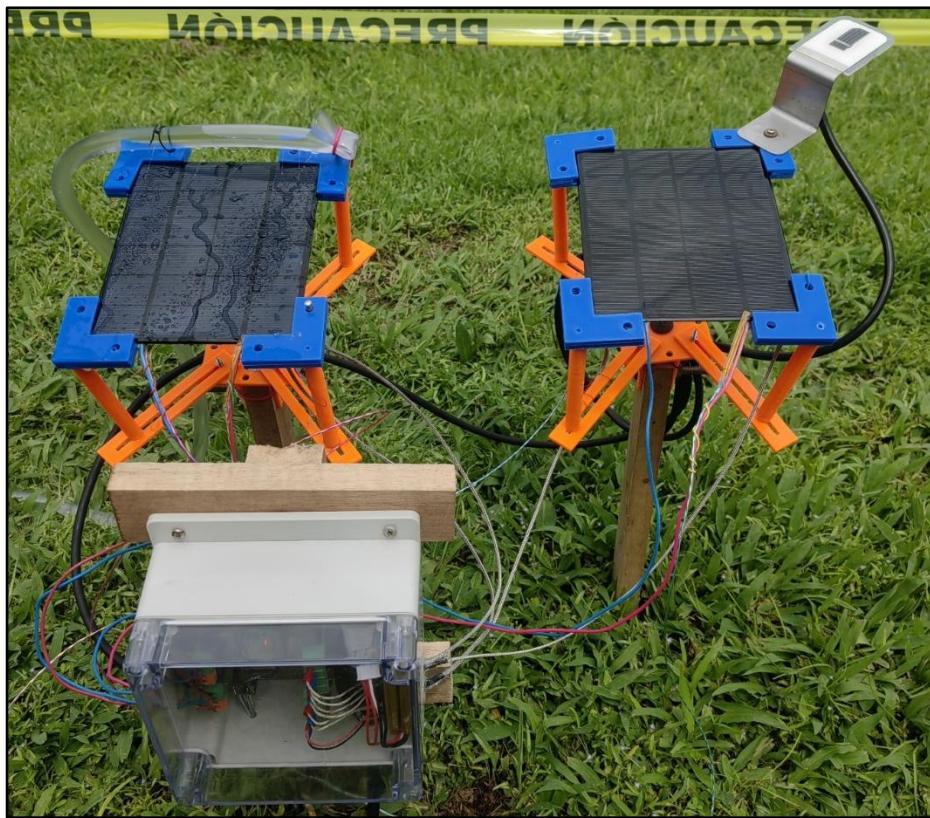


Figura 4. 11: Instalación completa del proyecto para la toma de datos

Después de tener montado el proyecto se procedió a enfriar con agua a uno de los paneles solares tal como se muestra en la Figura 4. 12, con la idea de enfriar a un panel y tomar datos para compararlo con el otro panel que no tiene enfriamiento y comprobar que el circuito diseñado funciona correctamente, cabe mencionar que también se puede utilizar cualquier otro método de enfriamiento innovador. Esto para obtener datos de temperatura y potencia entregada por cada panel y compararlos, donde se espera que el panel con enfriamiento sea el que más potencia entregue.

Es muy importante tener una misma inclinación y orientación en ambos paneles solares por lo que se realizó dichas mediciones utilizando un teléfono celular colocado encima del panel para ver la orientación con ayuda la brújula la cual varía su valor de 0 grados hasta 360 grados y para la inclinación del panel se utiliza un medidor del nivel en el que se encuentra el teléfono celular respecto al plano horizontal, en la Figura 4. 13 y Figura 4. 14 se muestran las orientaciones e inclinaciones de ambos paneles.



Figura 4. 12: Método de enfriamiento aplicado a uno de los paneles

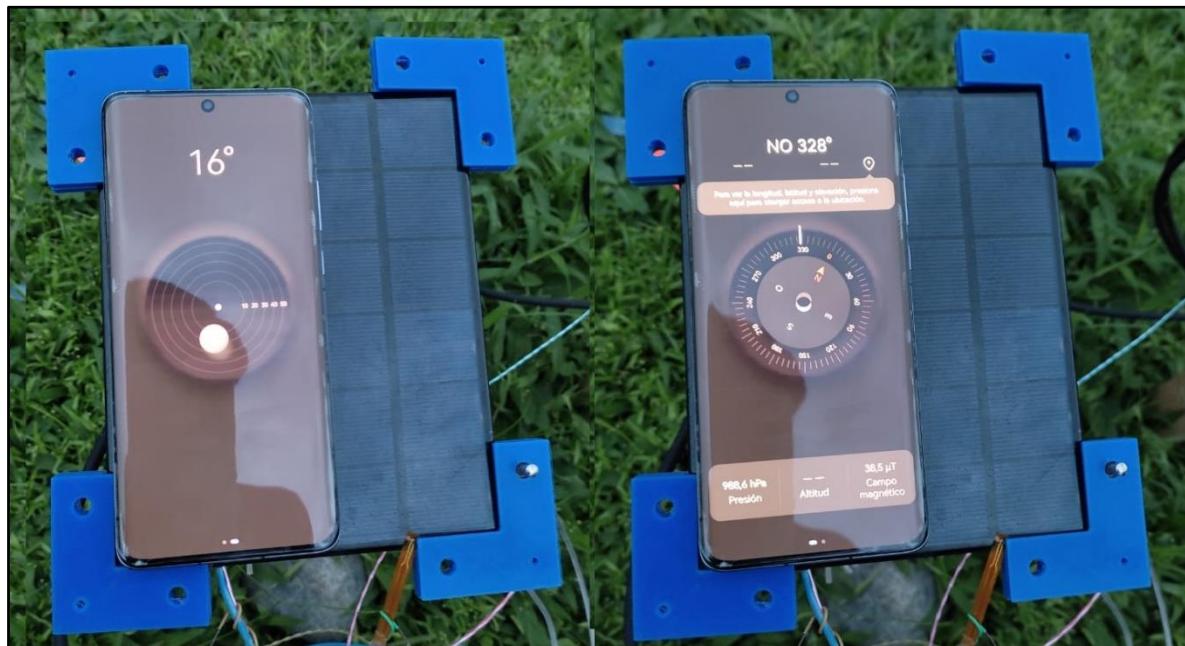


Figura 4. 13: Orientación e inclinación del panel solar con enfriamiento



Figura 4. 14: Orientación e inclinación del panel solar sin enfriamiento

En la Figura 4. 13 del panel derecho, éste es el que no tiene enfriamiento, se puede observar que la inclinación es de 16 grados, la bolita blanca indica hacia donde se está inclinando el celular representando como si tuviéramos una bolita esférica sobre nuestra pantalla y la orientación es de 328 grados. En la Figura 4. 14 del panel izquierdo, este es el que tiene enfriamiento, se puede observar que la inclinación del panel es de 15 grados y la orientación es de 330 grados, como se puede ver tanto la inclinación y orientación en cada panel son muy similares se puede confiar en que estas variables no van a afectar negativamente a los valores de los datos recogidos.

Para el almacenamiento y graficado de los datos recogidos se realizó el siguiente procedimiento: primero se creó un Excel con *Google Apps Sheety* se guardó en una carpeta de *Google Drive*, luego con *Google Apps Script* se creó una programación en Java con una función que se encargue de recibir los datos en formato JSON y guardarlos en la respectiva columna del Excel y otra función que se encargue de extraer los datos del Excel en formato JSON y generamos el enlace para incluir o extraer los datos JSON, en el anexo 8.3 podemos observar dicha programación, la función de extraer datos es para utilizarla en *Google Colaboratory*, en esta plataforma se realizó la programación en Python para generar los gráficos de potencias, Irradiancia y temperaturas, esto para analizar los datos tomados por el sistema de una manera más sencilla, en el anexo 8.4 se puede observar dicha

programación. La función de guardar datos se utiliza en el programa de la ESP32, esta se encarga de extraer todos los datos de los sensores y mandarlos en formato JSON cada 15 segundos por medio del enlace generado en *Google Apps Script*, en el anexo 8.2 se puede observar dicha programación.

En la programación de *Google Colaboratory* se realizó un menú interactivo en el que hay un botón para generar un gráfico, para este se puede elegir el día, el rango de horas, también si deseó realizar un promedio con los datos, por ejemplo, cada 2 minutos agrupa los datos de irradiancia para filtrar las posibles caídas bruscas por el paso de una nube y además se puede elegir el tipo de gráfico, por ejemplo, potencia vs irradiancia. Para el botón de generar tabla se debe elegir el día y el rango de horas para crear una tabla que muestra la energía producida y la eficiencia en el rango elegido, todo esto se puede observar en el diagrama de bloques de la Figura 1. 1. Para el cálculo de la energía producida por el panel solar durante todo el día se utilizó la siguiente ecuación:

$$E_{producida} = \sum P * t \quad [J] \quad (10)$$

Donde se realiza la sumatoria de todos los datos donde P es la potencia del panel solar y t es el tiempo que produce esa cantidad de potencia, es de alrededor de 19 segundos para cada dato tomado. Para el cálculo de la energía teórica del panel solar se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{teorica} = I * A * t \quad [J] \quad (11)$$

Donde I es la irradiancia, A es el área del panel solar, en nuestro caso es de 0.022275 m^2 , t es el tiempo en el que se recibe esa irradiancia, también es de 19 segundos para cada dato tomado. Para el cálculo de la eficiencia se utiliza la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{E_{producida}}{E_{teorica}} * 100 \quad (12)$$

Con los datos recogidos por el proyecto se puede realizar dichos cálculos para ver la diferencia de energía producida por el panel con enfriamiento y el panel sin enfriamiento, así como su eficiencia.

4.4. Costo del sistema

Para la elaboración del proyecto se necesitó de los componentes mostrados en la Tabla 1, se pueden observar una columna con el nombre del componente, una columna con la cantidad de dicho componente, otra con el precio por unidad del componente y una columna con el nombre de la tienda con el enlace donde se compró los artículos.

Tabla 1: Precios de todos los componentes para la elaboración del proyecto

Articulo	Cantidad	Precio	Tienda
MPPT	1	₡ 13 000.00	MicroJPM
Batería 6000 mAh	1	₡ 11 000.00	CRCibernetica
Caja Intemperie	1	₡ 7 300.00	CRCibernetica
Placa cobre doble cara	1	₡ 4 680.00	MicroJPM
Filamento PETG	1	₡ 16 600.00	CRCibernetica
ESP32 ESP-WROOM-32	1	₡ 8 320.00	MicroJPM
INA226	2	₡ 13 000.00	CRCibernetica
Termistor NTC	3	₡ 2 200.00	AliExpress
MAX6675 y tipo K	4	₡ 8 300.00	MicroJPM
Spektron 210	1	₡ 20 000.00	Tritec
HX710	1	₡ 2 600.00	CRCibernetica
Resistencia 8 ohm	1	₡ 700.00	MicroJPM
DHT11	1	₡ 2 000.00	MicroJPM
Panel 6V 3.5W	2	₡ 9 880.00	MicroJPM
Resistencias	3	₡ 30.00	MicroJPM
Total		₡ 171 850.00	

5. Análisis de resultados

Primeramente, cabe mencionar que el proyecto se realizó con 8 sensores de temperatura, de esos 4 son termocuplas tipo K, 3 son NTC y un DHT11, se colocaron en distintas zonas de ambos paneles solares para comprobar cuál es mejor para los requerimientos de poseer un bajo margen de error.



Figura 5. 1: Vista superior en inferior del panel con enfriamiento para observar la ubicación de los sensores de temperatura.

En la Figura 5. 1 se puede observar la ubicación de los sensores colocados en el panel con enfriamiento, en este se colocó un sensor NTC en la parte superior y en la inferior

se colocó uno tipo K y un NTC, además se puede ver un sensor atornillado en el soporte de color azul, este es un sensor tipo k encargado de tomar la temperatura del sol directo.

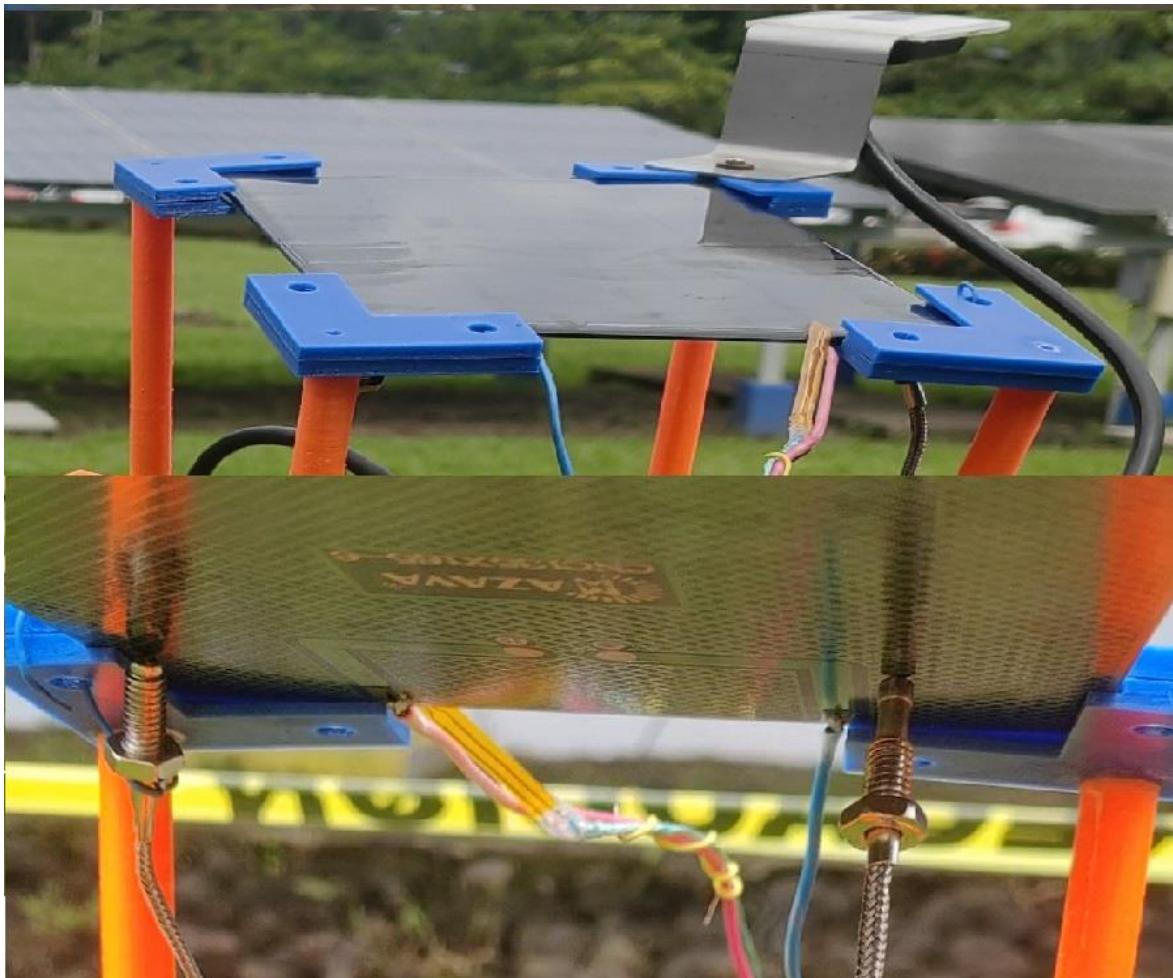


Figura 5. 2: Vista superior en inferior del panel sin enfriamiento para observar la ubicación de los sensores de temperatura.

En la Figura 5. 2 se puede observar la ubicación de los sensores colocados en el panel sin enfriamiento, en este se colocó un sensor NTC en la parte superior y en la inferior se colocó dos sensores tipo K, además se puede ver el sensor de irradiancia atornillado en el soporte de color azul, el sensor DHT11 no se logra apreciar, pero se encuentra bajo el panel sin enfriamiento, este sensor es el encargado de tomar la temperatura en sombra y la humedad relativa. En la Figura 5. 2 también se puede observar que el sensor de temperatura tipo k posee ese tornillo hueco el cual no se puede quitar, esto afectaba negativamente en la transmisión de calor hacia el sensor. A demás, son incomodas de colocar debido a su forma cilíndricas por lo que solo una pequeña parte de toda la

termocupla se encuentra en contacto con la zona del panel solar que se desea medir, esto va a provocar que se disipe el calor por el metal de la termocupla.

También es importante mencionar que en la programación de la ESP32 se están enviando datos cada 15 segundos, pero al analizar los segundos de diferencia entre los datos hay casos en los que tarda más segundos y otros en los que se tarda menos segundos, pero sacando un promedio se está tardando 19.34 segundos entre cada dato, por lo que hay cerca de 187 datos en una hora, esta variedad en la diferencia de tiempo entre datos puede deberse a lo que tarda *Google Apps Script* en cargar los datos a la hoja de cálculo de *Google Sheets* y cuando la diferencia es mayor se debe a una mala conexión de internet. Se decidió tomar los datos en ese intervalo de tiempo, y no en menos, para no tener un exceso de datos y también por los cambios tan repentinos de irradiancia que ocurren normalmente, por ese motivo éste es un tiempo adecuado para notar dichos cambios, ya que esta variable afecta directamente a la potencia y a la temperatura de los paneles solares.

En la Figura 5. 3 se analizó los datos del 23 de octubre de 2024 entre las 10 am y 11 am en el panel sin enfriamiento se puede observar que el gráfico de color verde es el

del sensor NTC, los de color azul y naranja son de las termocuplas tipo K y el de color rojo es la temperatura tomada por el sensor DHT11 el cual se encuentra en sombra.

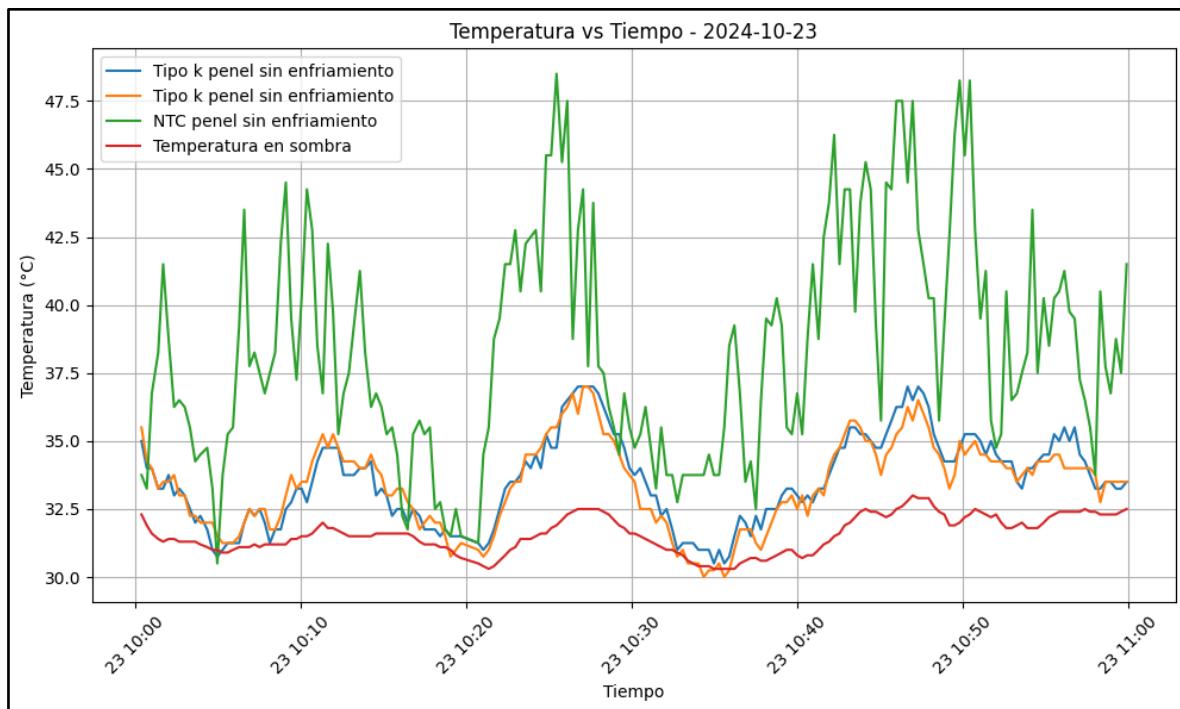


Figura 5. 3: Comparación entre sensores de temperatura NTC vs termocupla tipo K en el panel sin enfriamiento

Es notable que para el grafico de la Figura 5. 3 que las termocuplas tipo K presentan temperaturas más bajas en la mayoría del tiempo en comparación con el sensor NTC, esto debido a la disipación y falta de contacto con la superficie del panel solar. Por este motivo se van a utilizar más adelante solo los datos recopilados de los sensores NTC para realizar los análisis de gráficos de potencia, temperatura e irradiancia.

En el gráfico de la Figura 5. 4 se analizó los datos el 23 de octubre de 2024 entre la 1 pm y 2 pm, este gráfico se genera utilizando las mediciones de irradiancia realizadas por el Spektron210 y potencia entregada por ambos paneles medidas con el módulo INA226, se puede observar como la irradiancia en ese intervalo de tiempo se mantiene la mayor parte del tiempo por encima de los 1000 W/m^2 , donde el gráfico de color verde es el del panel sin enfriamiento y el de color azul es el del panel con enfriamiento, se puede observar claramente como la potencia del panel con enfriamiento es mayor a la del panel sin

enfriamiento la mayor parte del tiempo, esto era de esperarse debido a que el aumento en la temperatura afecta a la eficiencia del panel disminuyendo la potencia entregada.

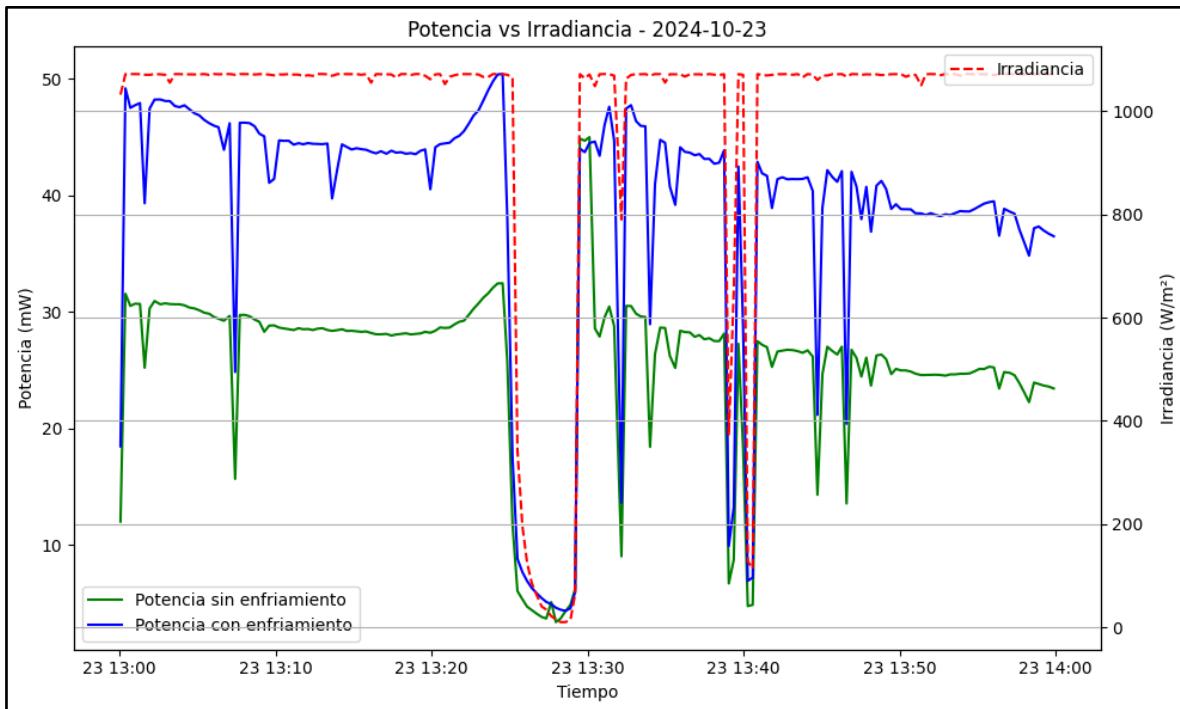


Figura 5. 4: Gráfico de comparación de potencias vs irradiancia en el tiempo

En el gráfico de la Figura 5. 5 se analizó la medición del 21 de octubre de 2024 entre las 12 pm y 1 pm, cabe mencionar que los datos se tomaron cada 19 segundos por lo que hay alrededor de 187 datos en una hora, este gráfico se genera utilizando las medición de irradiancia realizadas por el Spektron210 y potencias entregadas por ambos paneles, se puede observar como la irradiancia en ese intervalo de tiempo se mantiene la mayor parte

del tiempo por encima de los 800 W/m^2 por este motivo se decidió graficar este intervalo para que fuera más evidente la afectación de la potencia entregada por ambos paneles.

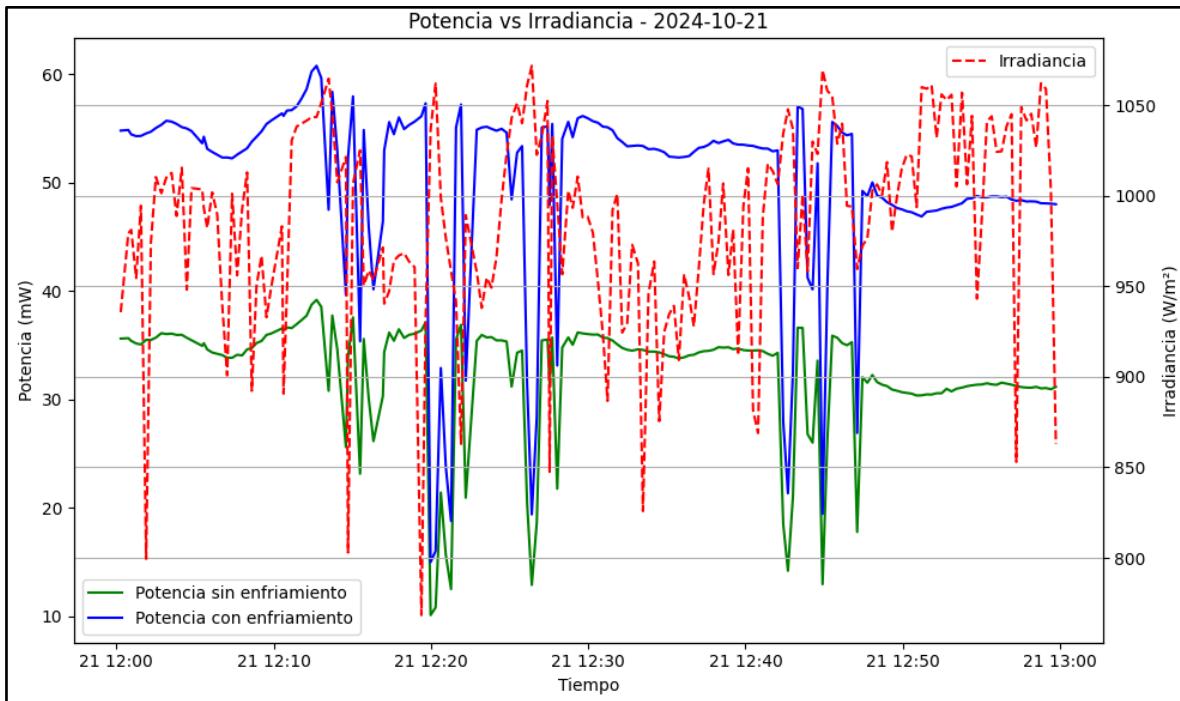


Figura 5. 5: Gráfico de potencia de panel sin enfriamiento, con enfriamiento e irradiancia

En el gráfico de la Figura 5. 5 el de color verde es el del panel sin enfriamiento y el de color azul es el del panel con enfriamiento, se puede observar claramente como la potencia del panel con enfriamiento es mayor a la del panel sin enfriamiento la mayor parte del tiempo, esto era de esperarse debido a que la irradiancia al mantenerse alta por un determinado tiempo la temperatura del panel solar comienza a aumentar, donde el aumento en la temperatura afecta a la eficiencia del panel disminuyendo la potencia entregada, una parte interesante del gráfico son las caídas de potencia de ambos paneles, esto a pesar de que aparentemente no hay una caída en la irradiancia, por ejemplo, en la Figura 5. 5 a las 12:20 se presenta este caso, esto se puede explicar mejor observando los mismos datos del mismo día y hora, pero graficando Potencias vs Temperaturas como se puede ver en la Figura 5. 6, cerca de ese tiempo hay una caída de temperatura de ambos paneles lo que indica que el sol no estaba despejado o al menos no constantemente, si bien el gráfico

muestra un pico de irradiancia en ese momento la temperatura indica lo contrario, lo que significa que el dato se tomó justo cuando el sol se despejó en un breve periodo de tiempo.

En el gráfico de la Figura 5. 6 estamos analizando los datos tomados el 21 de octubre de 2024 entre las 12 pm y 1 pm, utilizando las temperaturas de los sensores NTC ubicados en la cara superior de ambos paneles solares, donde se puede observar el gráfico de color rojo es la temperatura del panel sin enfriamiento y el verde la potencia del panel sin enfriamiento y el gráfico de color naranja es la temperatura del panel con enfriamiento y el azul la potencia del panel con enfriamiento.

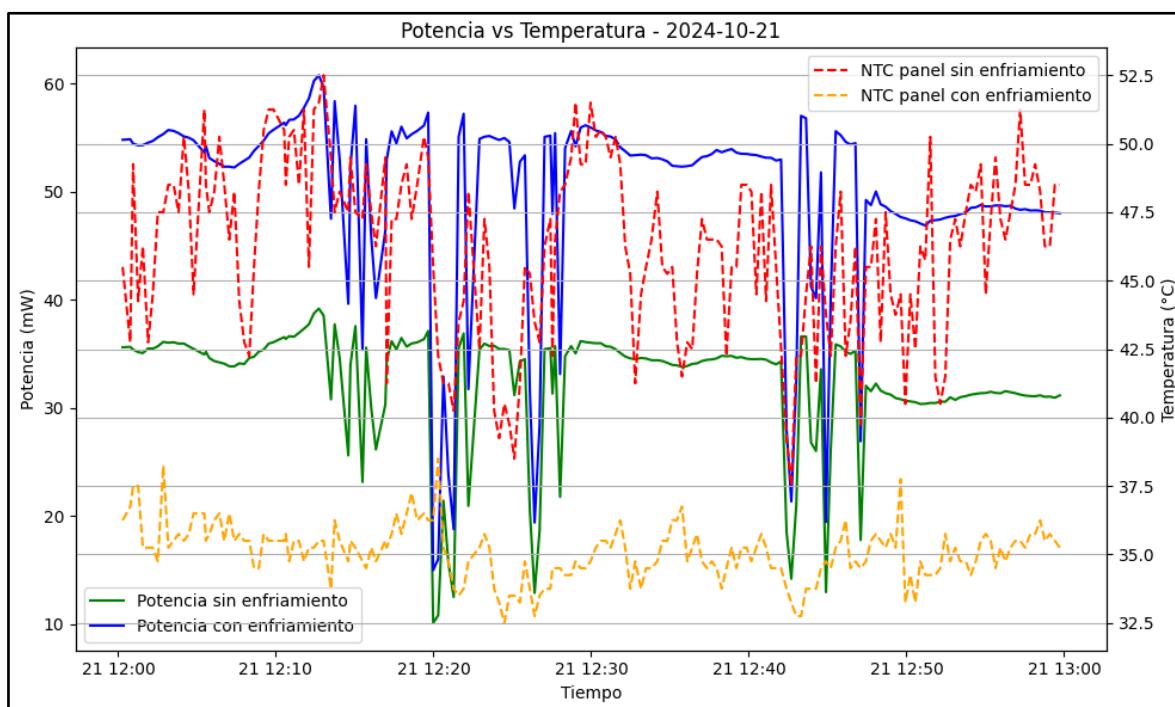


Figura 5. 6: Gráfico de las temperaturas y potencias de los paneles con enfriamiento y sin enfriamiento

En este caso se puede observar claramente como la temperatura afecta directamente a la potencia entregada por los paneles solares, donde si la temperatura es alta la potencia entregada por el panel va a disminuir y si la temperatura es baja va a aumentar la potencia entregada por el panel solar.

Para la Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5 se puede observar cuál panel solar entregó mayor energía y una mejor eficiencia. En la columna de *Energía Generada (mWh)* se encuentra los cálculos con los datos de la potencia y el tiempo, en la columna de *Energía datos INA (mWh)* es el módulo que nos entrega esta medición solo que si por algún motivo

hay un corte eléctrico se reinicia a cero por lo que no es confiable, para la columna de *Energía incidente (mWh)* se utiliza los datos de irradiancia y para el cálculo de la Eficiencia se utiliza los datos obtenidos en las columnas de *Energía Generada (mWh)* y *energía incidente (mWh)*.

Es notable que para los 4 días de datos tomados el panel que posee enfriamiento tiene una mayor energía y eficiencia respecto al panel sin enfriamiento.

Tabla 2: Energías y eficiencias de los paneles solares durante el 20-10-2024 de las 8 a 16 horas

Panel	Energía generada (mWh)	Energía datos INA (mWh)	Energía incidente (mWh)	Eficiencia (%)
Panel sin enfriamiento	151.569214	150.533333	96008.051886	0.157871
Panel con enfriamiento	192.948497	191.916667	96008.051886	0.200971

Tabla 3: Energías y eficiencias de los paneles solares durante el 21-10-2024 de las 8 a 16 horas

Panel	Energía generada (mWh)	Energía datos INA (mWh)	Energía incidente (mWh)	Eficiencia (%)
Panel sin enfriamiento	154.561328	154.075000	1137520.223999	0.135878
Panel con enfriamiento	190.902704	190.880556	1137520.223999	0.167826

Tabla 4: Energías y eficiencias de los paneles solares durante el 22-10-2024 de las 8 a 16 horas

Panel	Energía generada (mWh)	Energía datos INA (mWh)	Energía incidente (mWh)	Eficiencia (%)
Panel sin enfriamiento	143.373963	140.697222	120395.992596	0.119085
Panel con enfriamiento	172.958889	171.730556	120395.992596	0.143658

Tabla 5: Energías y eficiencias de los paneles solares durante el 23-10-2024 de las 8 a 16 horas

Panel	Energía generada (mWh)	Energía datos INA (mWh)	Energía incidente (mWh)	Eficiencia (%)
Panel sin enfriamiento	163.842016	162.758333	140090.798428	0.116954
Panel con enfriamiento	218.407405	217.177778	140090.798428	0.155904

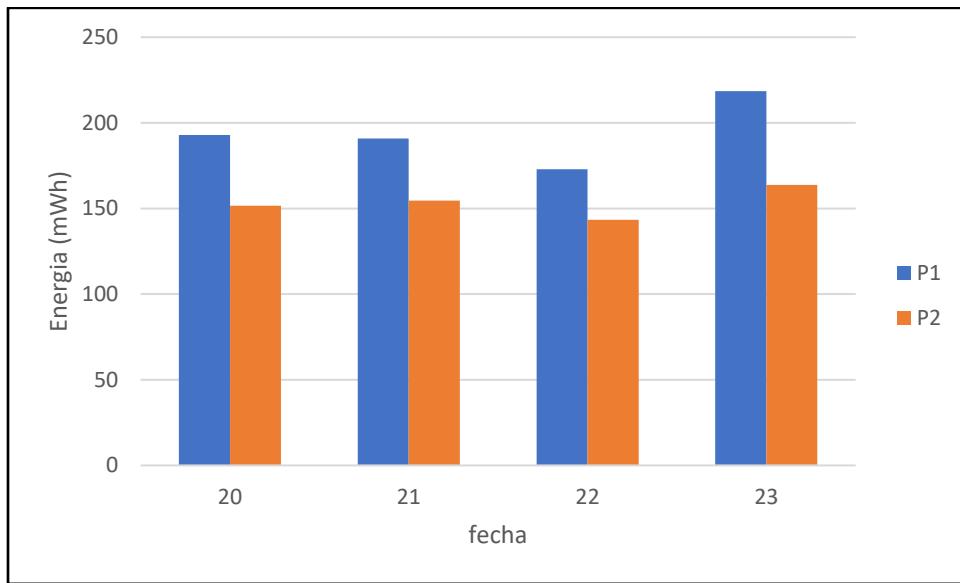


Figura 5. 7: Comparación de la energía generada por ambos paneles en cada día, donde P1 es el panel con enfriamiento y P2 es el panel sin enfriamiento

En el gráfico de la Figura 5. 7 se puede observar la comparación de energías mostradas en las tablas anteriores, el panel con enfriamiento son las barras de color azul y el del panel sin enfriamiento son las barras de color naranja, están agrupadas por día, es notable en todos los días la energía del panel con enfriamiento es mayor.

Podemos calcular la energía del panel con enfriamiento respecto a la del panel sin enfriamiento con la siguiente ecuación.

$$\eta = \left(1 - \frac{E_{\text{sin enfriamiento}}}{E_{\text{con enfriamiento}}} \right) * 100 \quad (13)$$

Donde la energía es de un 21.44%, 19.03%, 17.10% y 24.98% para los datos tomados el 20, 21, 22 y 23 de octubre del 2024 respectivamente. Con esto se puede

promediar lo que da un 20.63% de mayor generación de energía para el panel con enfriamiento comparado con el panel solar sin enfriamiento.

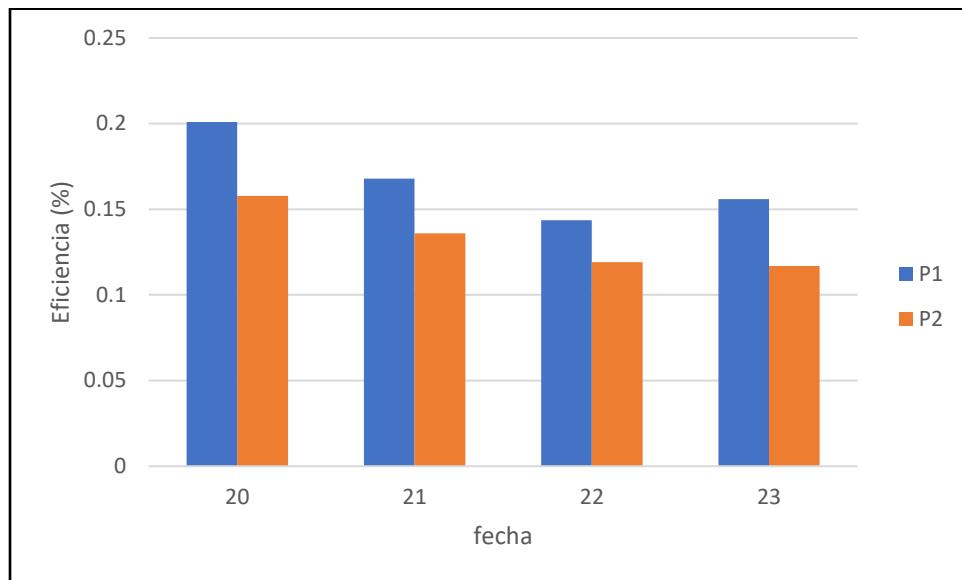


Figura 5. 8: Comparación de la eficiencia de ambos paneles en cada día, donde P1 es el panel con enfriamiento y P2 es el panel sin enfriamiento

En el gráfico de la Figura 5. 8 se puede observar la comparación de eficiencias mostradas en las tablas anteriores, el panel con enfriamiento son las barras de color azul y el del panel sin enfriamiento son las barras de color naranja, están agrupadas por día, es notable en todos los días la eficiencia del panel con enfriamiento es mayor, cabe mencionar que esta eficiencia se refiere a la comparación de la energía generada con respecto a la energía solar incidente.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Dado los resultados evaluados, es posible observar el cumplimiento de los objetivos planteados destacando las siguientes conclusiones.

- Se logró realizar el diseño de un circuito electrónico capaz de tomar los datos de irradiancia, temperatura y potencia de dos paneles solares y subirlos en línea para poder realizar un análisis comparativo de los datos desde cualquier dispositivo con acceso a internet. De los componentes utilizados el conjunto de sensores que permiten realizar mediciones precisas de temperatura son los tres sensores NTC, los 4 módulos MAX6675 junto a las termocuplas tipo k no se recomienda utilizarlas para el proyecto, los módulos medidores de potencia funcionan correctamente en los dos paneles fotovoltaicos, el sensor de irradiancia también se logró calibrar bastante bien y el módulo DHT11 no es muy preciso por lo que es mejor optar por otro.
- Se ha determinado que los sensores NTC son los más adecuados para este tipo de aplicación, debido a su fácil instalación, pequeño tamaño y capacidad para reflejar rápidamente los cambios de temperatura. En contraste, las termocuplas tipo K presentaron dificultades en la instalación y mayor dispersión térmica, lo que afecta la precisión de las mediciones.
- Los resultados confirman que la temperatura tiene un impacto significativo en la eficiencia de los paneles fotovoltaicos. El panel con enfriamiento mostró un rendimiento de 20.63% mayor en la producción de energía comparado con el panel sin enfriamiento, destacando la importancia de gestionar adecuadamente la temperatura en instalaciones fotovoltaicas, especialmente en zonas de alta irradiancia y temperaturas elevadas como Costa Rica.
- Este proyecto se inició debido a la necesidad de analizar qué tan efectivo es un método de enfriamiento que se encuentra en desarrollo actualmente, por lo que una vez tengan listo el sistema de enfriamiento el proyecto que realicé va a utilizarse inmediatamente para analizar si el sistema aumenta la eficiencia energética del panel solar por medio de los datos recolectados. Por este motivo este proyecto sienta las bases para la evaluación del desarrollo de sistemas de enfriamiento que pueden llegar a ser implementados en instalaciones fotovoltaicas a mayor escala,

contribuyendo a la mejora de la eficiencia energética y la sostenibilidad en la generación de energía solar.

6.2. Recomendaciones

En esta sección vamos a enlistar todas las mejoras que se recomienda realizar al proyecto para poder implementarlo y obtener mejores resultados.

- Se recomienda el uso exclusivo de sensores NTC en futuras implementaciones, ya que han demostrado ser más fiables y fáciles de manejar que las termocuplas tipo K. Estos sensores permiten una mayor precisión en las mediciones debido a su rápido tiempo de respuesta y su menor interferencia por disipación de calor.
- Para poder utilizar más de 4 sensores NTC es necesario realizar modificaciones al circuito, esto debido a que la ESP32 cuenta únicamente con 4 ADC internos, por lo que recomiendo usar 2 módulos ADS1115, este módulo cuenta con 4 entradas analógicas, lo que va a permitir llegar a colocar hasta 8 sensores de temperatura NTC.
- Aunque el sistema de enfriamiento por agua ha mostrado resultados positivos, se recomienda explorar otras técnicas de enfriamiento, como el uso de disipadores de calor o enfriamiento por aire forzado, para aumentar la eficiencia del sistema y reducir el consumo de agua en instalaciones más grandes.
- Es más conveniente utilizar el sensor DHT22 debido a que es más preciso, ya que tiene un margen de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en temperatura y $\pm 2\%$ de humedad, en comparación al que se está utilizando es el DHT11 que tiene un margen de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en temperatura y $\pm 5\%$ de humedad.
- Es importante asegurarse de que las mediciones de temperaturas son correctas, por eso se recomienda utilizar algún instrumento de medición de temperatura mas preciso para asegurarse de que las mediciones de temperatura son correctas por parte de los sensores NTC.
- Sería conveniente extender el análisis a otras condiciones ambientales y climas, para evaluar cómo afecta la humedad, la velocidad del viento y otros factores meteorológicos a la eficiencia del sistema de enfriamiento y el rendimiento de los paneles.
- También se recomienda utilizar termografía para analizar la temperatura en la cara superior del panel solar.

7. Bibliografía

- [1] V. R. & G. M. Dupré O., Physics of the temperature coefficients of solar cells. Solar energy materials and solar cells, 2015.
- [2] «Radiación solar: ¿cuál es su impacto sobre el planeta y el ser humano?», Iberdrola, [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/compromiso-social/radiacion-solar>.
- [3] «Energía solar directa y difusa: conceptos y producción,» Solar Placas, [En línea]. Available: <https://solarplacas.es/energia-solar-directa-y-difusa/>. [Último acceso: 7 noviembre 2024].
- [4] R. S., «Historia del panel solar: ¿cómo nació y cual ha sido su evolución?..», Solfy, 2023. [En línea]. Available: <https://solfy.net/placas-solares/historia-del-panel-solar-como-nacio-y-cual-ha-sido-su-evolucion/>.
- [5] «Características eléctricas de los paneles solares,» TECNOSOL, [En línea]. Available: <https://tecnosolab.com/noticias/caracteristicas-electricas-de-los-paneles-solares/>.
- [6] M. D. N. Flores, «Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio,» CIMAV, [En línea]. Available: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/791/1/Norma%20Rosario%20f>.
- [7] S.A, «Maximizando la Energía Solar: la Eficiencia de los Paneles Solares.,» Beetmann, 2024. [En línea]. Available: <https://beetmann.com/maximizando-la-energia-solar-comprendiendo-la-eficiencia-de-los-paneles-solares/>. [Último acceso: 15 septiembre 2024].
- [8] «Intercambiador de calor - Definición, funcionamiento, tipos, aplicaciones y mucho más,» Alfa Laval, [En línea]. Available: <https://www.alfalaval.es/productos-y-soluciones/transferencia-de-calor/intercambiadores-de-calor-de-placas/intercambiador-de-calor-definicion-funcionamiento-tipos-y-aplicaciones/>.
- [9] F. Chenlo, «Cálculo de la Temperatura de Operación de Células Solares en un Panel Fotovoltaico Plano.,» CIEMAT, 2002. [En línea]. Available: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/115/38115092.pdf.
- [10] I. M. E. Rua, «Banco de pruebas didáctico para aprendizaje y medición del rendimiento de paneles solares fotovoltaicos,» Universidad Industrial de Santander, [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/5537/553770380001/html/>.
- [11] O. Mahain, «Plos One,» 16 septiembre 2024. [En línea]. Available: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0307616>. [Último acceso: 4 Noviembre 2024].

- [12] Y. Ahmed, M. Reza Maghami, J. Pasupuleti, S. Hassan Danook y F. Basim Ismail, «MDPI,» 19 Septiembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7080/12/9/171>. [Último acceso: 4 Noviembre 2024].
- [13] S. Salama Hussen, A. Abdul Kareem, S. Mohamed Thariq, F. Syazwani Shahar y A. Umaira, «MDPI,» 13 mayo 2022. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/10/1664>. [Último acceso: 4 noviembre 2024].
- [14] «Tipos de Sensores de Temperatura,» SRC, [En línea]. Available: <https://srcsl.com/tipos-sensores-temperatura/>.
- [15] «Termistor NTC,» AliExpress, [En línea]. Available: https://a.aliexpress.com/_mKmCIQo.
- [16] «¿Qué es un piranómetro y cómo mide la irradiancia?,» Seven, [En línea]. Available: <https://www.sevensensor.com/es/que-es-un-piranometro-y-como-mide-la-irradiancia>.
- [17] G. Pardo Chamorro y H. Toro, «Protocolos de comunicación industrial,» Universidad ECCI, [En línea]. Available: <https://repositorio.ecci.edu.co/bitstream/handle/001/1874/Informe%20de%20seminario.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [18] Andres, «I2C – Puerto, Introducción, trama y protocolo,» HETPRO, [En línea]. Available: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/i2c/>.
- [19] Paguayo, «Protocolo SPI (Serial Peripheral Interface),» MCI, 23 Agosto 2022. [En línea]. Available: <https://cursos.mcilelectronics.cl/2022/08/23/serial-peripheral-interface-spi/>.
- [20] «Una guía detallada de la transmisión en serie,» Solectro, 4 junio 2020. [En línea]. Available: https://solectroshop.com/es/blog/una-guia-detallada-de-la-transmision-en-serie-n18?srsltid=AfmBOooyV-e2J_sNJRZkqSHjKhOZXdyQc9rMhtGLthygBksdOg5JQHKq.
- [21] «Explicación de los sistemas embebidos,» Reboundeu, [En línea]. Available: <https://reboundeu.com/es/insights/blog/embedded-systems-explained-15/>. [Último acceso: 13 noviembre 2024].
- [22] «¿Cuál es la diferencia entre microprocesadores y microcontroladores?,» AWS, [En línea]. Available: <https://aws.amazon.com/es/compare/the-difference-between-microprocessors-microcontrollers/>. [Último acceso: 13 noviembre 2024].

8. Anexos

8.1. Valores de resistencia del sensor NTC

Temp. (deg. C)	Rmax (k Ohms)	Rnor (k Ohms)	Rmin (k Ohms)
-25	136.5254	131.7332	127.0964
-24	128.4558	124.0216	119.7285
-23	120.9146	116.8107	112.8348
-22	113.8640	110.0648	106.3818
-21	107.2691	103.7512	100.3387
-20	101.0977	97.8396	94.6771
-19	95.3201	92.3020	89.3705
-18	89.9088	87.1124	84.3946
-17	84.8385	82.2471	79.7268
-16	80.0856	77.6837	75.3463
-15	75.6284	73.4018	71.2336
-14	71.4468	69.3823	67.3708
-13	67.5220	65.6077	63.7412
-12	63.8370	62.0616	60.3295
-11	60.3755	58.7288	57.1212
-10	57.1228	55.5953	54.1032
-9	54.0651	52.6480	51.2629
-8	51.1895	49.8747	48.5889
-7	48.4842	47.2643	46.0705
-6	45.9381	44.8062	43.6978
-5	43.5409	42.4906	41.4615
-4	41.2831	40.3086	39.3531
-3	39.1559	38.2516	37.3644
-2	37.1508	36.3117	35.4880
-1	35.2603	34.4817	33.7169
0	33.4771	32.7547	32.0447
1	31.7945	31.1243	30.4652
2	30.2064	29.5847	28.9728
3	28.7068	28.1301	27.5623
4	27.2904	26.7556	26.2286
5	25.9521	25.4562	24.9672
6	24.6872	24.2274	23.7738
7	23.4912	23.0650	22.6443
8	22.3599	21.9650	21.5750
9	21.2897	20.9239	20.5622
10	20.2768	19.9380	19.6028
11	19.3178	19.0041	18.6937
12	18.4096	18.1193	17.8318
13	17.5493	17.2807	17.0146
14	16.7340	16.4857	16.2394
15	15.9612	15.7317	15.5040

Figura A. 1: Valores de resistencia del sensor NTC según la temperatura

16	15.2284	15.0164	14.8059
17	14.5333	14.3376	14.1432
18	13.8738	13.6933	13.5139
19	13.2479	13.0816	12.9160
20	12.6537	12.5005	12.3479
21	12.0895	11.9485	11.8080
22	11.5535	11.4239	11.2946
23	11.0442	10.9252	10.8064
24	10.5602	10.4510	10.3419
25	10.1000	10.0000	9.9000
26	9.6709	9.5709	9.4710
27	9.2623	9.1626	9.0630
28	8.8732	8.7738	8.6747
29	8.5025	8.4037	8.3052
30	8.1494	8.0512	7.9534
31	7.8128	7.7154	7.6184
32	7.4919	7.3953	7.2993
33	7.1859	7.0903	6.9953
34	6.8940	6.7995	6.7056
35	6.6156	6.5221	6.4294
36	6.3498	6.2576	6.1660
37	6.0962	6.0051	5.9148
38	5.8540	5.7642	5.6752
39	5.6227	5.5342	5.4465
40	5.4018	5.3146	5.2283
41	5.1907	5.1049	5.0199
42	4.9890	4.9045	4.8210
43	4.7961	4.7130	4.6309
44	4.6117	4.5300	4.4494
45	4.4354	4.3551	4.2759
46	4.2667	4.1878	4.1100
47	4.1053	4.0278	3.9515
48	3.9508	3.8748	3.7999
49	3.8030	3.7283	3.6548
50	3.6614	3.5882	3.5161
51	3.5258	3.4540	3.3833
52	3.3960	3.3255	3.2562
53	3.2715	3.2025	3.1346
54	3.1523	3.0846	3.0181
55	3.0380	2.9717	2.9065
56	2.9285	2.8635	2.7996
57	2.8234	2.7597	2.6972
58	2.7227	2.6603	2.5990

Figura A. 2: Valores de resistencia del sensor NTC según la temperatura

59	2.6260	2.5649	2.5049
60	2.5333	2.4734	2.4147
61	2.4443	2.3856	2.3282
62	2.3589	2.3014	2.2452
63	2.2768	2.2206	2.1656
64	2.1981	2.1431	2.0892
65	2.1224	2.0686	2.0159
66	2.0498	1.9970	1.9455
67	1.9800	1.9283	1.8779
68	1.9129	1.8623	1.8130
69	1.8484	1.7989	1.7507
70	1.7864	1.7380	1.6908
71	1.7267	1.6794	1.6332
72	1.6694	1.6231	1.5779
73	1.6142	1.5689	1.5247
74	1.5612	1.5168	1.4736
75	1.5101	1.4667	1.4245
76	1.4610	1.4185	1.3772
77	1.4137	1.3722	1.3317
78	1.3681	1.3275	1.2880
79	1.3243	1.2845	1.2458
80	1.2820	1.2431	1.2053
81	1.2413	1.2033	1.1663
82	1.2021	1.1649	1.1287
83	1.1644	1.1279	1.0926
84	1.1279	1.0923	1.0577
85	1.0928	1.0580	1.0241
86	1.0590	1.0249	0.9918
87	1.0264	0.9930	0.9606
88	0.9949	0.9623	0.9306
89	0.9646	0.9326	0.9016
90	0.9353	0.9040	0.8737

Figura A. 3: Valores de resistencia del sensor NTC según la temperatura

8.2. Programación de la ESP32

Parte de la programación encargada de pasar los datos en formato JSON

```
1. void loop() {
2.     timeClient.update(); // Actualiza la hora desde el servidor NTP
3.     // Obtén la hora actual (en segundos desde la medianoche)
4.     int currentHour = timeClient.getHours();
5.     if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
6.         Serial.println("Conexión WiFi perdida, intentando reconectar...");
7.         connectToWiFi(); // Intentar reconectar si la conexión se pierde
8.     }
9.     if (currentHour >= 8 && currentHour < 16) { //toma datos de 8am a 4pm
10.    //////////////////////////////Enviar JSON/////////////////////////////
11.    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
12.        // Crear JSON para enviar los datos
13.        String jsonData = "{\"MAXsensor1\":\"" + String(temp1) +
14.                      "\",\"MAXsensor2\":\"" + String(temp2) +
15.                      "\",\"MAXsensor3\":\"" + String(temp3) +
16.                      "\",\"MAXsensor4\":\"" + String(temp4) +
17.                      "\",\"NTCsensor1\":\"" + String(T_NTC1) +
18.                      "\",\"NTCsensor2\":\"" + String(T_NTC2) +
19.                      "\",\"NTCsensor3\":\"" + String(T_NTC3) +
20.                      "\",\"DHTsensorTemp\":\"" + String(t) +
21.                      "\",\"DHTsensorHume\":\"" + String(h) +
22.                      "\",\"DHTsensorIndi\":\"" + String(hic) +
23.                      "\",\"Irradiancia\":\"" + String(y) +
24.                      "\",\"VoltajePanel1\":\"" + String(V0) +
25.                      "\",\"CorrientePanel1\":\"" + String(C0) +
26.                      "\",\"PotenciaPanel1\":\"" + String(P0) +
27.                      "\",\"EnergiaPanel1\":\"" + String(J0) +
28.                      "\",\"VoltajePanel2\":\"" + String(V1) +
29.                      "\",\"CorrientePanel2\":\"" + String(C1) +
30.                      "\",\"PotenciaPanel2\":\"" + String(P1) +
31.                      "\",\"EnergiaPanel2\":\"" + String(J1) + "}";
32.
33.        // Enviar los datos al servidor Google Sheets
34.        HTTPClient http;
35.        http.begin(serverName);
36.        http.addHeader("Content-Type", "application/json");
37.
38.        int httpResponseCode = http.POST(jsonData);
39.
40.        if (httpResponseCode > 0) {
41.            String response = http.getString();
42.            Serial.println(httpResponseCode);
43.            Serial.println(response);
44.        } else {
45.            Serial.println("Error en la conexión");
46.        }
47.        http.end();
48.    }
49. } else {
50.     Serial.println("Es de noche, no se recogen datos.");
51. }
52.
53. delay(15000); // Esperar 15 segundo entre lecturas
54. }
```

8.3. Programación de *Google Apps Script*

Programación completa de las funciones para agregar o extraer datos al Excel.

```
1. function doPost(e) {
2.   // Verifica si se han recibido datos
3.   if (typeof e !== 'undefined' && typeof e.postData !== 'undefined') {
4.     var data = JSON.parse(e.postData.contents); // Deserializa los datos JSON
5.
6.     // Abre la hoja de cálculo por ID
7.     var sheet = SpreadsheetApp.openById('11pkie5ZGyoCUqdt1WDDz7iG-
IGdiddH8I2l44NlPCy8').getActiveSheet();
8.
9.     // Crea un array con los datos recibidos
10.    var row = [
11.      new Date(),           // Marca de tiempo
12.      data.MAXsensor1,     // Dato del MAX6675 sensor 1
13.      data.MAXsensor2,     // Dato del MAX6675 sensor 2
14.      data.MAXsensor3,     // Dato del MAX6675 sensor 3
15.      data.MAXsensor4,     // Dato del MAX6675 sensor 4
16.      data.NTCsensor1,     // Dato del NTC sensor 1
17.      data.NTCsensor2,     // Dato del NTC sensor 2
18.      data.NTCsensor3,     // Dato del NTC sensor 3
19.      data.DHTsensorTemp,  // Temperatura del sensor DHT
20.      data.DHTsensorHume,  // Humedad del sensor DHT
21.      data.DHTsensorIndi,  // Índice de calor del sensor DHT
22.      data.Irradiancia,    // Dato de irradiancia
23.      data.VoltajePanel1,   // Voltaje del panel 1
24.      data.CorrientePanel1, // Corriente del panel 1
25.      data.PotenciaPanel1, // Potencia del panel 1
26.      data.EnergiaPanel1,  // Energía del panel 1
27.      data.VoltajePanel2,   // Voltaje del panel 2
28.      data.CorrientePanel2, // Corriente del panel 2
29.      data.PotenciaPanel2, // Potencia del panel 2
30.      data.EnergiaPanel2   // Energía del panel 2
31.    ];
32.
33.    // Inserta los datos en la siguiente fila disponible
34.    sheet.appendRow(row);
35.
36.    // Retorna un mensaje de éxito
37.    return ContentService.createTextOutput("Datos recibidos con éxito");
38.  } else {
39.    // Si no se recibieron datos, se envía un mensaje de error
40.    return ContentService.createTextOutput("No se recibieron
datos").setMimeType(ContentService.MimeType.TEXT);
41.  }
42. }
43.
44. function doGet(e) {
45.   // Abre la hoja de cálculo por ID
46.   var sheet = SpreadsheetApp.openById('11pkie5ZGyoCUqdt1WDDz7iG-
IGdiddH8I2l44NlPCy8').getActiveSheet();
47.
48.   // Obtén todos los datos de la hoja de cálculo
49.   var data = sheet.getDataRange().getValues();
50.
51.   // Prepara un array de objetos JSON
52.   var jsonData = [];
53.
54.   for (var i = 1; i < data.length; i++) { // Comienza en 1 para omitir encabezados
```

```

55.     var row = data[i];
56.     jsonData.push({
57.       timestamp: row[0],           // Marca de tiempo
58.       MAXsensor1: row[1],
59.       MAXsensor2: row[2],
60.       MAXsensor3: row[3],
61.       MAXsensor4: row[4],
62.       NTCsensor1: row[5],
63.       NTCsensor2: row[6],
64.       NTCsensor3: row[7],
65.       DHTsensorTemp: row[8],
66.       DHTsensorHume: row[9],
67.       DHTsensorIndi: row[10],
68.       Irradiancia: row[11],
69.       VoltajePanel1: row[12],
70.       CorrientePanel1: row[13],
71.       PotenciaPanel1: row[14],
72.       EnergiaPanel1: row[15],
73.       VoltajePanel2: row[16],
74.       CorrientePanel2: row[17],
75.       PotenciaPanel2: row[18],
76.       EnergiaPanel2: row[19]
77.     });
78.   }
79.
80.   // Retorna los datos en formato JSON
81.   return ContentService.createTextOutput(JSON.stringify(jsonData))
82.     .setMimeType(ContentService.MimeType.JSON);

```

8.4. Programación de *Google Colaboratory*

Parte de la programación de *Google Colaboratory* que se encarga de crear las tablas de energía y eficiencia de los paneles solares.

```
1. import requests
2. import matplotlib.pyplot as plt
3. from datetime import datetime, timedelta
4. import pytz
5. import ipywidgets as widgets
6. from IPython.display import display
7.
8. # URL de la API de Google Apps Script
9. url =
  'https://script.google.com/macros/s/AKfycbzpWkyD8LbWA110LrHvaZN9pn1GAzWQsqcCUO8JvY-
  i_fvASVKOoA5QyW4C-4cBpyt7/exec'
10. response = requests.get(url)
11.
12. # Procesar los datos JSON si la respuesta fue exitosa
13. if response.status_code == 200:
14.     data = response.json()
15. else:
16.     print("Error al obtener los datos")
17.
18. # Convertir los timestamps a objetos datetime con la zona horaria de Costa Rica
19. utc_zone = pytz.utc
20. costa_rica_zone = pytz.timezone('America/Costa_Rica')
21.
22. # Función para calcular la energía y eficiencia
23. def calcular_energia_y_eficiencia(dia_elegido, hora_inicio, hora_fin):
24.     # Filtrar los datos por el día seleccionado y el intervalo de tiempo
25.     timestamps_filtered = []
26.     PotenciaPanel1_filtered = []
27.     PotenciaPanel2_filtered = []
28.     Irradiancia_filtered = []
29.     EnergiaPanel1_filtered = []
30.     EnergiaPanel2_filtered = []
31.
32.     for entry in data:
33.         time_obj = datetime.strptime(entry['timestamp'], '%Y-%m-%dT%H:%M:%S.%fZ')
34.         time_obj = utc_zone.localize(time_obj)
35.         local_time = time_obj.astimezone(costarica_zone)
36.
37.         # Filtrar por día e intervalo de tiempo
38.         if local_time.date() == dia_elegido and hora_inicio <= local_time.hour <
            hora_fin:
39.             timestamps_filtered.append(local_time)
40.             PotenciaPanel1_filtered.append(float(entry['PotenciaPanel1']))
41.             PotenciaPanel2_filtered.append(float(entry['PotenciaPanel2']))
42.             EnergiaPanel1_filtered.append(float(entry['EnergiaPanel1']))
43.             EnergiaPanel2_filtered.append(float(entry['EnergiaPanel2']))
44.             Irradiancia_filtered.append(float(entry['Irradiancia']))
45.
46.             # Asegurar que los datos tengan la misma longitud
47.             min_length = min(len(timestamps_filtered), len(PotenciaPanel1_filtered),
                  len(PotenciaPanel2_filtered), len(EnergiaPanel1_filtered),
                  len(EnergiaPanel2_filtered),
                  len(Irradiancia_filtered))
48.
49.             timestamps_filtered = timestamps_filtered[:min_length]
50.             PotenciaPanel1_filtered = PotenciaPanel1_filtered[:min_length]
51.             PotenciaPanel2_filtered = PotenciaPanel2_filtered[:min_length]
52.             EnergiaPanel1_filtered = EnergiaPanel1_filtered[:min_length]
53.             EnergiaPanel2_filtered = EnergiaPanel2_filtered[:min_length]
54.             Irradiancia_filtered = Irradiancia_filtered[:min_length]
55.
56.             # Convertir timestamps a diferencias de tiempo en segundos
```

```

58.     tiempo_segundos = [(timestamps_filtered[i+1] -
59.         timestamps_filtered[i]).total_seconds() for i in range(len(timestamps_filtered) -
60.             1)]
61.     tiempo_segundos.append(tiempo_segundos[-1]) # Repetimos el último valor para
62.         mantener misma longitud
63.     #print(f"Tiempooooo: {tiempo_segundos[len(tiempo_segundos)-5]}")
64.     # Calcular la energía de cada panel en mJ
65.     energia_panel1 = sum(p * t for p, t in zip(PotenciaPanel1_filtered,
66.         tiempo_segundos))/1000 # mJ a J
67.     energia_panel2 = sum(p * t for p, t in zip(PotenciaPanel2_filtered,
68.         tiempo_segundos))/1000 # mJ a J
69.     energiaINA_panel1 = EnergiaPanel1_filtered[-1]-EnergiaPanel1_filtered[0]
70.     energiaINA_panel2 = EnergiaPanel2_filtered[-1]-EnergiaPanel2_filtered[0]
71.     # Calcular la potencia incidente (W/m2 a W) y la energía incidente total sobre
72.         el área del panel
73.     potencia_incidente = [(irradiancia) * AREA_PANEL for irradiancia in
74.         Irradiancia_filtered]
75.     #print(f"Tiempooooo: {potencia_incidente[len(potencia_incidente)-5]}")
76.     energia_incidente = sum(pi * t for pi, t in zip(potencia_incidente,
77.         tiempo_segundos)) # en J
78.     # Eficiencia de cada panel
79.     eficiencia_panel1 = (energia_panel1 / energia_incidente) * 100 if
80.         energia_incidente > 0 else 0
81.     eficiencia_panel2 = (energia_panel2 / energia_incidente) * 100 if
82.         energia_incidente > 0 else 0
83.     # Crear una tabla con los resultados
84.     print(" ")
85.     print(f"Tabla de Energias y eficiencia del {dia_elegido} de las {hora_inicio} a
86.         {hora_fin} horas ")
87.     tabla = pd.DataFrame({
88.         "Panel": ["Panel Sin Enfriamiento", "Panel Con Enfriamiento"],
89.         "Energia Generada (J)": [energia_panel1, energia_panel2],
90.         "Energía datos INA (J)": [energiaINA_panel1, energiaINA_panel2],
91.         "Energia Incidente (J)": [energia_incidente, energia_incidente],
92.         "Eficiencia (%)": [eficiencia_panel1, eficiencia_panel2]
93.     })
94.     return tabla

```