

Sistema de control para la regulación de las variables irradiancia y temperatura al interior de una cabina orientada a pruebas de paneles fotovoltaicos.

Ana Estefanny Piandoy Ruales

Bryan Alexander Puerres Delgado

Universidad Cesmag

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2024

Sistema de control para la regulación de las variables irradiancia y temperatura al interior de una cabina orientada a pruebas de paneles fotovoltaicos.

Ana Estefanny Piandoy Ruales

Bryan Alexander Puerres Delgado

Proyecto de Trabajo de Grado en la Modalidad Estancia en Línea presentada al Comité

Curricular del Programa de Ingeniería Electrónica

Asesor

John Evert Barco Jimenez

Universidad Cesmag

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2024

## Contenido

1.	Introducción .....	10
2.	Problema de investigación .....	11
2.1	Objeto o tema de investigación .....	11
2.2	Línea de investigación.....	11
2.3	Sub-línea de investigación .....	11
2.4	Planteamiento del problema.....	11
2.5	Objetivos .....	12
2.5.1	Objetivo general.....	12
2.5.2	Objetivos específicos .....	12
2.6	Justificación.....	13
2.7	Delimitación.....	14
3.	Tópicos de marco teórico.....	15
3.1	Antecedentes .....	15
3.1.1	Desarrollo de simulador solar para diseño experimental de energía solar fotovoltaica de 50 WP utilizando lámpara halógena .....	15
3.1.2	Sistema de control de aire y temperatura para una cabina de pintura, controlada por medio de un dispositivo móvil. ....	16
3.1.3	Diseño e implementación de un sistema electrónico para el control de luminosidad, temperatura y humedad ambiental para el terrario de orquídeas Telipogon en el jardín botánico de quito. ....	18
3.1.4	Controlador PID de temperatura de tipo didáctico .....	20
3.1.5	Diseño de un sistema de control de temperatura médico montado en un vehículo	21

3.1.6	Controladores de seguimiento del punto de máxima potencia basados en inteligencia artificial para sistemas fotovoltaicos.....	22
3.1.7	La influencia de la luz y las sombras artificiales en Paneles Solares Fotovoltaicos	23
3.2	Enunciados de los supuestos teóricos.....	25
3.2.1	Sistemas de control .....	25
3.2.2	Sistema de control de lazo abierto .....	25
3.2.3	Sistema de control de lazo cerrado.....	25
3.2.4	Controlador Proporcional.....	26
3.2.5	Controlador Proporcional - Derivativo .....	27
3.2.6	Controlador Proporcional Integrativo .....	28
3.2.7	Controlador Proporcional Derivativo Integrativo .....	29
3.2.8	Temperatura .....	30
3.2.9	Sensores de temperatura.....	30
3.2.10	Sensor de Temperatura DS18B20.....	30
3.2.11	Termómetro de resistencia .....	32
3.2.12	Termopar .....	33
3.2.13	Termistores.....	33
3.2.14	Irradiancia .....	34
3.2.16	Piranómetro SR-11.....	36
3.3	Definición de conceptos .....	38
3.3.1	Definición nominal de conceptos.....	38
3.3.2	Definición operativa de conceptos .....	38
3.4	Hipótesis.....	39
4.	Metodología .....	40
4.1	Secuencia metodológica.....	40

4.1.1	Selección del Controlador Apropriado .....	40
4.1.2	Calibración de Sensores .....	40
4.1.3	Calibración del Sensor de Temperatura (DS18B20).....	41
4.1.4	Calibración del Sensor de Irradiancia (Piranómetro).....	42
4.1.5	Construcción del Sistema de Control Físico .....	43
4.1.6	Desarrollo del Controlador.....	43
4.1.7	Implementación y Evaluación del Sistema .....	43
4.1.8	Análisis y Documentación de Resultados .....	43
4.1.9	Diseño e implementación del sistema de control.....	44
4.2	Técnicas de recolección de información .....	44
4.2.1	Validez de la técnica .....	44
4.2.2	Confiabilidad técnica .....	45
4.3	Instrumentos de recolección de información .....	45
5.	Resultados del proyecto .....	47
5.1	Diseño e implementación de un controlador de irradiancia y temperatura para una cabina orientada a pruebas de paneles fotovoltaicos.....	47
5.1.1	Controlador de temperatura .....	50
	Requerimientos de diseño .....	50
	Sintonización controlador PID .....	51
	Sintonización control de Histéresis .....	57
	Integración del Controlador PID y el Controlador de Histéresis .....	59
5.1.2	Control en lazo abierto de la irradiancia .....	62
5.2	Evaluación del desempeño del sistema de control para la regulación de las variables irradiancia y temperatura. ....	71
	Análisis de desempeño en la regulación de la temperatura a 35 grados.....	71
	Evaluación de los resultados .....	74

Análisis de desempeño en la regulación de la temperatura a 50 grados .....	74
Tiempos de Estabilización de la Irradiancia .....	76
6. Análisis de Resultados .....	79
Conclusiones .....	84
Recomendaciones.....	85
Bibliografía .....	86

**Lista de tablas**

Tabla 1. Especificaciones sensor piranómetro SR-11 .....	37
Tabla 2. Calibración de Sensor de Temperatura .....	42
Tabla 3. Calibración de Sensor de Irradiancia .....	42
Tabla 4. Sintonización control Histéresis.....	58
Tabla 5. Componentes control temperatura .....	61
Tabla 6. Tabla de irradiancias a partir de las potencias .....	65
Tabla 7. Componentes automatización irradiancia .....	69
Tabla 8. Desempeño del control de temperatura 35°C vs 50°C.....	76
Tabla 9. Tabla de eficacia de irradiancia .....	77
Tabla 10. Tabla de eficacia de temperatura .....	78
Tabla 11. Tabla de eficacia completa de los controladores .....	78
Tabla 12. Comparación de desempeño controladores.....	81

### Lista de figuras

Figura 1. Configuración del simulador solar para experimentos .....	16
Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de control .....	17
Figura 3. Sistema de control automático.....	19
Figura 4. Respuesta del sistema con controlador PID .....	20
Figura 5. Diagrama de control PID .....	21
Figura 6. El sistema fotovoltaico completo con la unidad de control MPPT .....	22
Figura 7. Características corriente-voltaje del módulo fotovoltaico con diferentes bombillas.....	24
Figura 8. Sistema de control de lazo abierto .....	25
Figura 9. Sistema de control de lazo cerrado .....	26
Figura 10. Controlador tipo P .....	26
Figura 11. controlador PD.....	27
Figura 12. Controlador tipo PI .....	28
Figura 13. Sistema de control en lazo cerrado con control PID.....	29
Figura 14. Sensor de temperatura ds18b20.....	31
Figura 15. Puente de Wheatstone de dos hilos.....	32
Figura 16. Esquema de una lámpara de halogenuros metálicos.....	35
Figura 17. Espectro de emisión de una lámpara con halogenuros metálicos.....	36
Figura 18. Piranómetro SR-11 .....	37
Figura 19. Certificado de calibración patrón MadgeTech .....	41
Figura 20. Diagrama de bloques control de irradiancia y temperatura .....	47
Figura 21. Diagrama de flujo control de irradiancia y temperatura .....	49
Figura 22. Diagrama de bloques control temperatura.....	50
Figura 23. Evolución de la entrada y salida en el control de temperatura .....	52
Figura 24. Medición directa vs ajuste de Tau y K. ....	53
Figura 25. Porcentaje de ajuste .....	54
Figura 26. PID valores iniciales .....	55
Figura 27. PID valores finales.....	56
Figura 28. Controlador de histéresis y actuadores .....	57
Figura 29. Interfaz de resultados.....	60



Figura 30. Diseño estructural cabina de pruebas .....	62
Figura 31. Configuración setpoint de irradiancia.....	63
Figura 32. Diagrama de bloques control de irradiancia .....	63
Figura 33. Montaje del servomotor con el balasto para ajuste de irradiancia.....	64
Figura 34. Control de lazo abierto de irradiancia 220w/m .....	66
Figura 35. Control de lazo abierto de irradiancia 300w/m .....	66
Figura 36, Control de lazo abierto de irradiancia 380w/m .....	67
Figura 37. Soporte de servomotores.....	70
Figura 38. Interior cabina de pruebas de paneles fotovoltaicos .....	70
Figura 39. Evaluación temperatura en un punto de referencia bajo.....	71
Figura 40. Evaluación temperatura en un punto de referencia alto.....	75
Figura 41. Resultado y comparación de los controladores .....	79
Figura 42. Comparación desempeño de los controladores.....	81

## 1. Introducción

En la actualidad, las principales fuentes de energía tienen su origen en fuentes no renovables como el petróleo, el gas natural o el carbón, cuyas reservas son limitadas, tienen altos costos de producción y transporte, y generan un alto impacto ambiental causantes del calentamiento global. Debido a la contaminación que genera el uso de energías convencionales, la investigación en energías alternativas, principalmente la energía solar fotovoltaica ha adquirido gran relevancia debido a su aporte positivo frente a la contaminación y protección del medio ambiente [1].

Existe un proyecto de docentes del programa de ingeniería electrónica aprobado por la UNICESMAG, el cual consiste en el diseño y construcción de una cabina de pruebas fotovoltaicas con control de temperatura e irradiancia, debido a que son las variables más influyentes en la generación de energía. La actual investigación apoya el desarrollo de dicho proyecto de docentes mediante el diseño e implementación de un controlador que permita la variación de irradiancia y temperatura en el interior de la cabina.

La cabina de pruebas es necesaria para la realización de experimentos que contribuyen a la investigación de nuevas estrategias y convertidores de seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés), debido al elevado costo de simuladores solares que realizan una función similar a la cabina de pruebas, la universidad CESMAG ha optado por apoyar esta investigación.

El documento propone aplicar un controlador que permita la variación de irradiancia y temperatura implementado a una cabina de pruebas, una vez ésta se encuentre en disponibilidad se procederá al estudio de la planta para determinar el tipo de controlador adecuado, validando su funcionamiento por medio de simulación para su posterior implementación.

A continuación, se presenta el proyecto abordado desde su problema de investigación, tópicos del marco teórico, metodología y recursos.

## **2. Problema de investigación**

### **2.1 Objeto o tema de investigación**

Sistema de control para la regulación de las variables irradiancia y temperatura en el interior de una cabina para pruebas de energía fotovoltaica.

### **2.2 Línea de investigación**

La línea de Potencia y Energía del Programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad CESMAG enfoca su trabajo en el estudio de la generación, transformación, intercambio, transporte, distribución, almacenamiento y consumo de energía eléctrica de manera absoluta o por unidad de tiempo, incluyendo el diseño, análisis, control y optimización de sistemas de electrónica de potencia. Las líneas de investigación incluyen Calidad de la Energía y Energías Alternativas [2].

### **2.3 Sub-línea de investigación**

Las energías alternativas son aquellas que se obtienen mediante procesos alternativos a los tradicionales (quema de combustibles fósiles o en el caso de Colombia la hidroeléctrica a gran escala), estas se dividen en renovables o limpias, las cuales se obtienen de fuentes naturales capaces de regenerarse de manera más rápida de lo que se consumen o ser virtualmente infinitas; y en no renovables cuya fuente se consume más rápido de lo que se regenera pero que a diferencia las fuentes tradicionales el impacto ambiental es menor [2].

### **2.4 Planteamiento del problema**

Este proyecto, alineado con la investigación en potencia y energía, se basa en el desarrollo del proyecto "Diseño y construcción de una cabina de pruebas en energía fotovoltaica con control de temperatura e irradiancia", en curso por el grupo de investigación RAMPA de la UNICESMAG. Surge la necesidad de llevar a cabo la iniciativa "Cabina de Pruebas para Paneles Fotovoltaicos con Control de Irradiancia y Temperatura". El objetivo principal es construir una cabina altamente especializada que pueda regular con precisión tanto la temperatura como la

irradiancia. Su principal objetivo es proporcionar un entorno controlado necesario para realizar pruebas de alta precisión en el campo de la energía fotovoltaica.

Para la realización de las pruebas de respuesta en potencia del panel de energía fotovoltaica, se necesita conocer de forma exacta la cantidad de irradiancia y temperatura que inciden sobre el panel fotovoltaico para que éste genere energía y la relación existente entre las variables incidentes con respecto a la salida del panel, específicamente la potencia que entrega. Se sabe que existe una relación inversa en la generación de potencia del panel con respecto a la temperatura; es decir, a mayor temperatura, el panel genera menos energía que a una temperatura ambiente (25°C). Pero con la irradiancia, su relación es directa; a mayor irradiación sobre el panel, mayor potencia y viceversa [1]. Por estas razones, debe existir un apropiado equilibrio entre la irradiancia incidente y la temperatura del panel.

El objetivo primordial de este estudio es desarrollar el control de las variables mencionadas en la cabina de pruebas. Existe incertidumbre acerca de la eficacia del sistema para monitorear la referencia de irradiancia y temperatura. Usualmente, para medir esta eficacia, se emplean índices como el error de estado estable, el tiempo de estabilización y el sobrepaso, siendo las oscilaciones una parte del comportamiento transitorio que puede estar incluida en el sobrepaso. La ausencia del desarrollo de este control podría obstaculizar la continuidad en la implementación de la cabina de pruebas, así como la planificación y evaluación de controladores para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) dentro de la misma, proyectos que el grupo de investigación RAMPA tiene planificados llevar a cabo.

## **2.5 Objetivos**

### **2.5.1 *Objetivo general***

Determinar la eficacia de un sistema de control que permita la regulación de variables irradiancia y temperatura al interior de una cabina orientada a pruebas de paneles fotovoltaicos.

### **2.5.2 *Objetivos específicos***

- Diseñar un controlador de irradiancia y temperatura para una cabina orientada a pruebas de paneles fotovoltaicos.

- Implementar un sistema de control de irradiancia y temperatura para una cabina orientada a pruebas de paneles fotovoltaicos.

- Evaluar el desempeño del sistema de control para la regulación de las variables irradiancia y temperatura.

## **2.6 Justificación**

Como se ha mencionado, la Universidad CESMAG cuenta con el grupo de investigación RAMPA, el cual se interesa en la investigación de fuentes de energía eléctrica, en particular, las energías alternativas como la energía fotovoltaica. Este grupo está llevando a cabo el proyecto titulado 'Diseño y construcción de una cabina de pruebas en energía fotovoltaica con control de temperatura e irradiancia'. Este proyecto tiene como justificación el cumplimiento de uno de los objetivos específicos del trabajo: desarrollar el controlador de irradiancia y temperatura para las pruebas fotovoltaicas en la cabina.

El programa de Ingeniería Electrónica ha ofertado, desde hace algunos años, una electiva en energía solar fotovoltaica en octavo semestre. La construcción de la cabina con su respectivo controlador permite que el estudiante, de ésta electiva, realice prácticas y conozca la respuesta en potencia de un panel fotovoltaico ante variaciones de parámetros de entrada.

El desarrollo del controlador de irradiancia y temperatura junto con la cabina de pruebas atiende la necesidad de identificar el comportamiento de cualquier tipo de modulo fotovoltaico ante variaciones de irradiancia y temperatura que el usuario requiera en ese instante y no deba depender de los cambios del medio ambiente los cuales son muy difíciles de predecir.

Dada la importancia de obtener buenos resultados en la energía es indispensable el buen control de dichas variables, debido a que son estas las que interactúan de manera directa en la generación de energía fotovoltaica. La empresa SCIENCETECH fabrica simuladores solares de aproximadamente 1 x 1 m con un costo que se encuentra alrededor de 32.000USD [3], es por esta razón, que se debe realizar la construcción de una cabina para dichas pruebas cuyo costo de fabricación será mucho menor al valor de los simuladores que fabrica la empresa SCIENCETECH.

La realización de este proyecto se ve enfocado al mejoramiento del estudio relacionado a energía fotovoltaica.

## 2.7 Delimitación

El proyecto se delimita al diseño, desarrollo e implementación de un sistema de control para la regulación de las variables de temperatura e irradiancia en una cabina de pruebas destinada a estudios fotovoltaicos. La cabina de pruebas, con dimensiones de dos metros de alto, dos metros de largo y un metro de ancho, está equipada con tecnología de control para mantener condiciones estables de temperatura y luminosidad. Cabe destacar que el proyecto no incluye el análisis de la generación de energía en paneles solares ni estudios relacionados con la eficiencia de los mismos. La cabina y el sistema de control desarrollados están destinados exclusivamente para uso en la Universidad CESMAG, donde se facilitarán experimentos y futuras investigaciones en el ámbito de la energía fotovoltaica.

### 3. Tópicos de marco teórico

#### 3.1 Antecedentes

##### *3.1.1 Desarrollo de simulador solar para diseño experimental de energía solar fotovoltaica de 50 WP utilizando lámpara halógena*

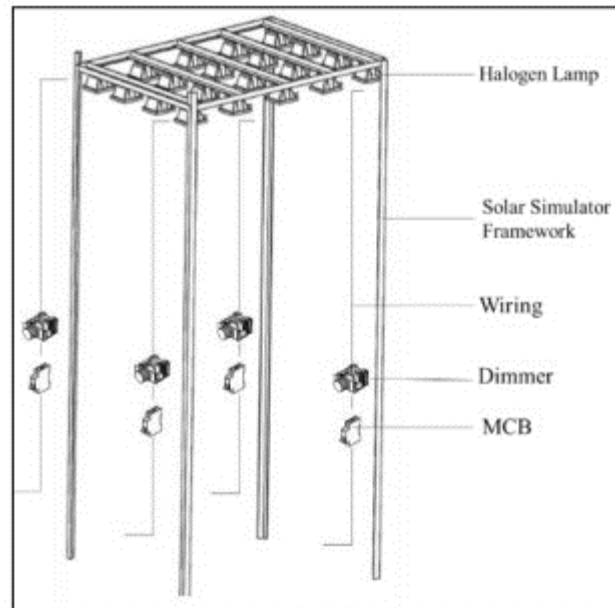
En este artículo realizado por [3], presentan el desarrollo de un simulador solar para pruebas de paneles fotovoltaicos con una capacidad de 50 WP. El simulador utiliza lámparas halógenas de 500 vatios con marca Phillips Esencial, dispuestas en una configuración de 4x5, las lámparas están dispuestas en una fila con 20 unidades en total, y se pueden interpretar las dimensiones de la fila como 4 lámparas en el ancho y 5 lámparas en el largo.

Su objetivo es simular la luz solar y permitir la realización de pruebas en paneles solares fotovoltaicos en su interior. Esta aproximación se lleva a cabo para evitar la realización de pruebas al aire libre, ya que estas se ven afectadas por los fenómenos climáticos, los cuales son muy difíciles de predecir. En este proyecto se optó por el uso de lámparas halógenas debido a su fácil adquisición y bajo costo. Además, cuentan con un sistema de conexión simple y son muy rápidas, lo que no requiere un amplio conocimiento para utilizarlas.

Según el del artículo, el simulador solar fue desarrollado específicamente para pruebas de paneles fotovoltaicos con una capacidad de 50 WP, en él se menciona que se realizaron pruebas del simulador solar a cinco voltajes diferentes: 100 voltios, 125 voltios, 160 voltios, 190 voltios y 225 voltios. Estos voltajes se utilizan para ajustar la irradiancia del simulador solar, lo que permite realizar un barrido de irradiancia en el rango de 0 a 1156.313 W/m<sup>2</sup>.

En cuanto a la generación del espectro, el indica que el espectro solar simulado se determinó mediante la irradiación en un intervalo de longitud de onda que va desde 300 hasta 1400 nm. Sin embargo, el artículo no proporciona detalles adicionales sobre cómo se generó el espectro solar simulado.

La Figura 1 muestra la estructura del simulador solar diseñado para replicar condiciones de irradiancia similares a las solares en un entorno controlado, orientado a la experimentación con paneles fotovoltaicos. El simulador solar está compuesto por un marco estructural (Solar Simulator Framework) que sostiene una serie de lámparas de halógeno. Estas lámparas permiten ajustar la intensidad de irradiancia que incide sobre los paneles a probar.



*Figura 1. Configuración del simulador solar para experimentos*

*Diseño de solar fotovoltaico de 50 WP.*

Fuente [3]

El aporte de esta investigación es crucial, ya que revela el proceso de variación de temperatura mediante el uso de lámparas similares a las empleadas. Este conocimiento proporciona un enfoque valioso para el diseño y la disposición de los componentes. Además, este estudio brinda una contribución significativa al ofrecer un simulador completo y altamente confiable. Esta herramienta no solo facilita las pruebas y experimentos en un entorno controlado, sino que también puede tener un impacto positivo en la eficiencia y calidad en los procesos futuros.

### ***3.1.2 Sistema de control de aire y temperatura para una cabina de pintura, controlada por medio de un dispositivo móvil.***

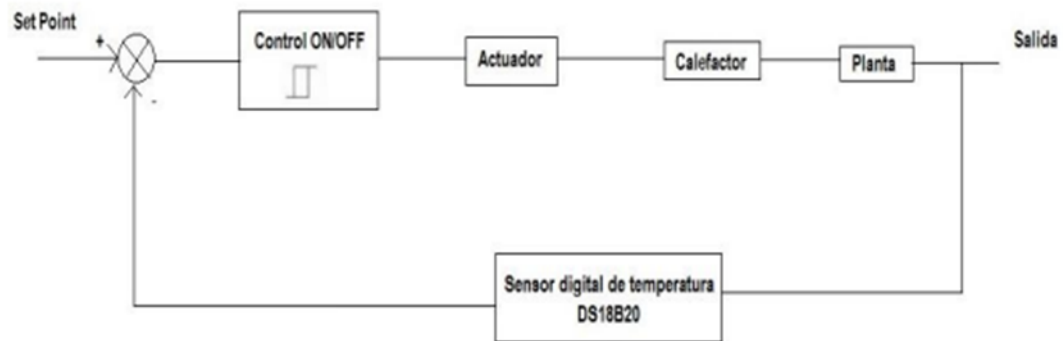
Este trabajo realizado por [4], Tiene como objetivo principal la implementación de un sistema que controle la temperatura y la cantidad de aire en una cabina de pintura industrial. Este sistema garantizará que la pintura se seque de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Utiliza un sistema en lazo cerrado o sistemas de retroalimentación, en el cual la señal de salida



realimenta al sistema de control mediante sensores. Se utiliza el protocolo OneWire para la comunicación con estos sensores, que permite enviar y recibir datos utilizando un solo cable. Los sensores están conectados a la tarjeta WeMos D1 ESP8266, y la temperatura se obtiene en grados Celsius.

Se utilizan resistencias en forma de espiral para el calefactor de la cabina de pintura. Cada resistencia tiene una potencia de 3000 W, generando un consumo total de 6000 W. Sin embargo, no se especifica la temperatura exacta que generan las resistencias. El antecedente indica que el sistema de control de la cabina de pintura debe encender y apagar los calefactores para mantener una temperatura de secado en un rango de 0°C a 60°C, según la especificación técnica del fabricante de pintura.

En la Figura 2 se presenta un diagrama de un sistema de control ON/OFF utilizado para la regulación de la temperatura en una planta. El sistema inicia con un valor de referencia de temperatura que sirve como objetivo para el controlador. El controlador ON/OFF activa un actuador en función de la diferencia entre el valor actual de temperatura y el punto de referencia. Este actuador, a su vez, activa un calefactor que eleva la temperatura de la planta hasta alcanzar el punto de referencia deseado.



*Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de control*

Fuente [4]

Del análisis de los sensores de temperatura utilizados en el sistema de control de la cabina de pintura se desprende claramente lo importante que es en este entorno un control preciso de la temperatura. Se han empleado termopares de tipo K y sensores de temperatura digitales DS18B20.

Se menciona que el sensor de temperatura utilizado en el sistema de control de la cabina de pintura es el DS18B20. Este sensor es un dispositivo digital que se comunica a través de un solo cable de datos y cuenta con tres terminales: Vcc, GND y el pin Data. El DS18B20 es un sensor de temperatura de alta precisión que puede medir temperaturas en un rango de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$  con una precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  en el rango de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$ . Además, este sensor tiene una resolución de 12 bits, lo que significa que puede medir temperaturas con una precisión de  $0.0625^{\circ}\text{C}$ . El aporte para esta investigación es el diseño del control de temperatura y ventilación conjuntamente mediante sensores.

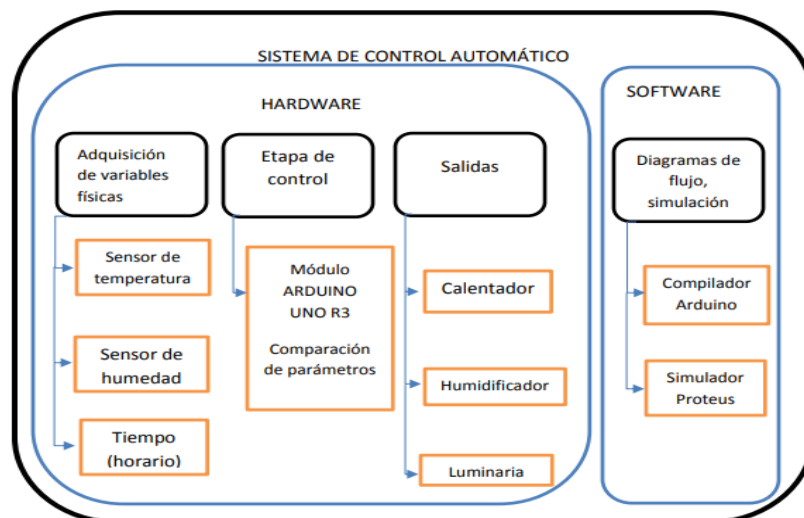
### ***3.1.3 Diseño e implementación de un sistema electrónico para el control de luminosidad, temperatura y humedad ambiental para el terrario de orquídeas Telipogon en el jardín botánico de Quito.***

El trabajo de [5] se enfoca en crear un sistema electrónico para controlar la luminosidad, temperatura y humedad del Terrario de orquídeas Telipogon en el Jardín Botánico de Quito. Compara las condiciones iniciales con las óptimas para el crecimiento de las orquídeas, describe el diseño de la solución en software y hardware, detalla la implementación de actuadores electrónicos (humidificador, célula peltier, ventilador, iluminación LED) y contrasta los parámetros ambientales antes y después de la implementación del sistema.

Para el control de la luminosidad, se utilizan dos tipos de luminarias: lámparas LED y lámparas fluorescentes. Las lámparas LED tienen una potencia de 900 lúmenes cada una, mientras que las lámparas fluorescentes tienen una potencia de 30W y 2400 lúmenes cada una. Durante el día, las luminarias se encienden para proporcionar iluminación directa, mientras que durante la noche se apagan. En cuanto al control de la temperatura, no se menciona específicamente en el contexto cómo se realiza. No se proporciona información sobre los dispositivos o métodos utilizados para controlar la temperatura en el Terrario. Para el control de la humedad, se establece un rango ideal de humedad relativa entre el 70% y 85%. Se utiliza un sensor de humedad para medir la humedad ambiental.

El sistema de control automático, ilustrado en la Figura 3, este compuesto por dos partes principales, hardware y software. En el hardware, los sensores de temperatura, humedad y tiempo capturan datos que son procesados por un módulo Arduino UNO R3. Este módulo controla los dispositivos de salida del calentador, humidificador y luminaria en función de los

parámetros adquiridos. En el software, se utilizó el compilador de Arduino para la programación y Proteus para simular el sistema antes de su implementación.



*Figura 3. Sistema de control automático*

Fuente [5]

El control automático en el sistema se implementa mediante el uso de un microcontrolador Arduino. El Arduino se encarga de recibir las lecturas de los sensores de temperatura y humedad, y en base a esos datos, activa o desactiva los actuadores correspondientes

Este proyecto presenta similitudes con el estudio, ya que aborda la implementación de un sistema electrónico para controlar variables ambientales, garantizando condiciones ideales para el desarrollo y funcionamiento de organismos o dispositivos en análisis. Este trabajo es una referencia valiosa para comprender los aspectos técnicos y metodológicos asociados al diseño e implementación de un sistema de control electrónico.

Además, resulta relevante considerar este estudio como una fuente potencial para extraer conceptos y enfoques. Por ejemplo, se destaca la utilización de sensores para la medición de variables ambientales, la programación de un controlador para regular dichas condiciones, y la posterior evaluación de los resultados obtenidos, aspectos que se encuentran detallados en el estudio de las orquídeas Telipogon.

### 3.1.4 Controlador PID de temperatura de tipo didáctico

En este artículo realizado por [6], se presenta un sistema de control de temperatura de agua, simple y de bajo costo que tiene un rango de operación de 0°C a 100°C, basado en una parrilla eléctrica. El sistema consiste en un sensor de temperatura de circuito integrado, un controlador PID analógico y una etapa de potencia cuyo costo es muy bajo.

Los datos específicos utilizados en el controlador PID se obtienen a partir de las fórmulas propuestas por Ziegler y Nichols. Estas fórmulas permiten calcular los parámetros de ajuste del controlador en función de la respuesta del sistema a un cambio tipo escalón en la variable de entrada. En este caso, se utilizan los valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  obtenidos de las fórmulas para ajustar las resistencias del controlador PID analógico. Estos valores se eligen de manera que el controlador proporcione un buen rendimiento y una respuesta estable del sistema de control de temperatura de agua.

La Figura 4 muestra la respuesta del sistema con el controlador PID implementado. De acuerdo con la figura, se evidencia la efectividad de este controlador en regular la temperatura de manera precisa y rápida. Los resultados reflejan una estabilización ágil hacia el valor deseado, lo que demuestra su capacidad para mantenerlo con alto rendimiento.

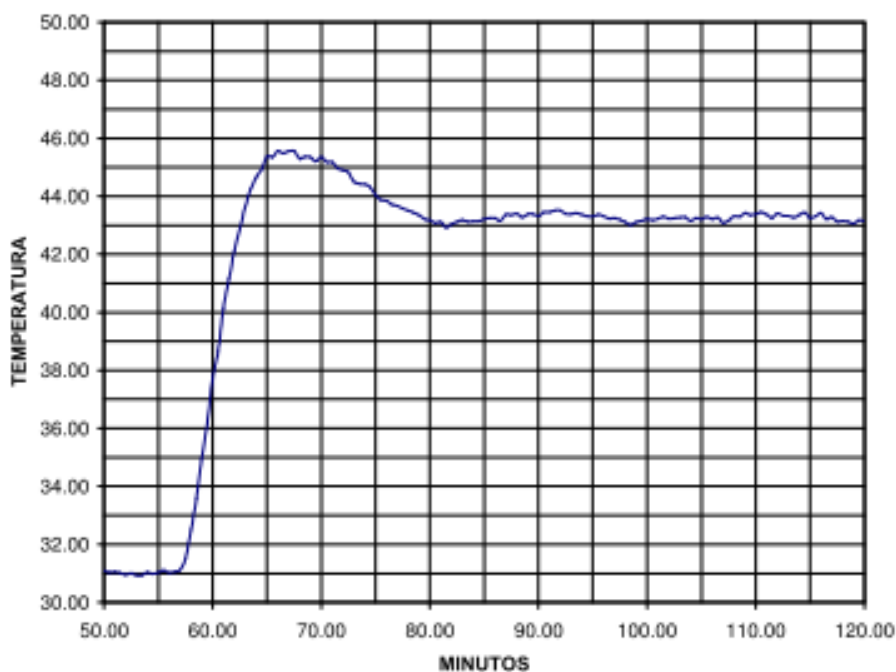


Figura 4. Respuesta del sistema con controlador PID

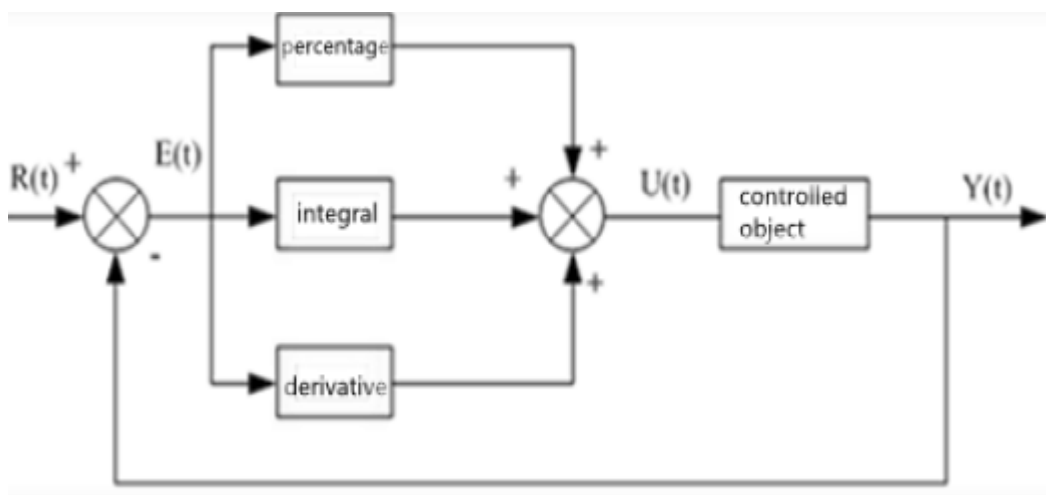
Fuente [6]

Al brindarles a los estudiantes la oportunidad de investigar individualmente la señal producida por cada nivel del controlador, el controlador PID analógico sugerido mejora las explicaciones teóricas. La etapa de potencia mejora el valor del sistema al ser similar a las que se encuentran en los controladores comerciales. El procedimiento de caracterización del sistema permite comparar los resultados experimentales con el modelo del sistema. Mediante el uso del sistema, el estudiante se familiarizará con todas las etapas del desarrollo de sistemas de control, incluida la definición de problemas, modelado, ajuste, implementación y validación experimental.

El aporte para la presente investigación es el procedimiento que se debe seguir para el diseño de un controlador tipo PID de temperatura.

### 3.1.5 *Diseño de un sistema de control de temperatura médico montado en un vehículo*

En este artículo realizado por [7], se presenta un sistema de control de temperatura aplicado a un transporte de productos médicos, el almacenamiento de tejidos vivos y las transfusiones de sangre. La prioridad del sistema de control trabajado en el artículo es cumplir con los requisitos de estabilidad y precisión basado en el control PID difuso, en este documento se propuso una solución de diseño de sistema. La referencia de temperatura del sistema de control está dentro del rango de  $37 \pm 0.1$  ° C.



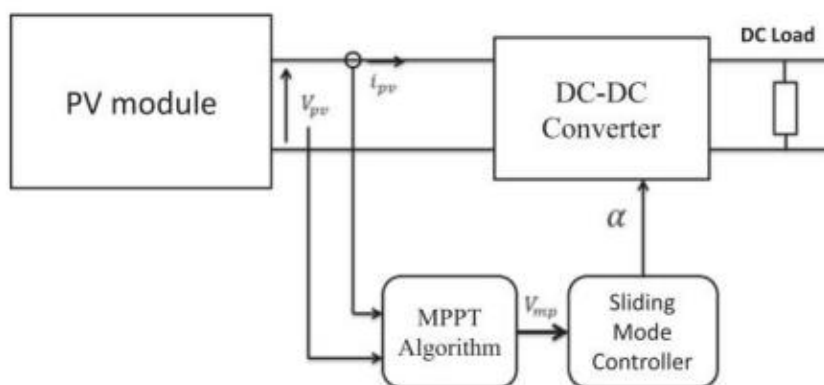
**Figura 5. Diagrama de control PID**

Fuente [7]

El aporte para esta investigación es la construcción de un controlador PID estable y con un rango operativo de temperatura amplio debido a sus aplicaciones médicas.

### 3.1.6 Controladores de seguimiento del punto de máxima potencia basados en inteligencia artificial para sistemas fotovoltaicos

En este artículo realizado por [8], los resultados obtenidos de distintos estudios e investigaciones han subrayado la relevancia del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en sistemas fotovoltaicos, con el objetivo de maximizar tanto la eficiencia como el rendimiento de la energía solar. En este contexto, un estudio comparativo, contenido en el antecedente evaluó cuatro técnicas de controladores MPPT (Controlador PID, Algoritmos genéticos, Optimización del enjambre de partículas y Lógica difusa) y una red neuronal artificial (RNA) en variadas condiciones climáticas presentes en Argelia. Los resultados destacaron que el controlador MPPT basado en lógica difusa (FL) evidenció el mejor desempeño en términos de eficiencia energética y rapidez de convergencia hacia el MPP. Esta técnica mostró una eficiencia promedio del 99.88% y un tiempo de convergencia promedio de 0.02 segundos. Asimismo, el controlador FL no demanda un conocimiento preciso de las características fotovoltaicas y se basa únicamente en dos sensores de bajo costo: voltaje y corriente.



*Figura 6. El sistema fotovoltaico completo con la unidad de control MPPT*

Fuente [8]

La Figura 6 muestra el diagrama de un sistema de control para maximizar la potencia en un módulo fotovoltaico (PV). Este sistema utilizó un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para calcular el voltaje óptimo del módulo PV, que fue posteriormente

enviado a un controlador de modo deslizante (Sliding Mode Controller). El controlador ajustó el parámetro  $\alpha$  en un convertidor DC, permitiendo así que la carga recibiera la máxima potencia posible del módulo fotovoltaico. Este diseño fue esencial para optimizar la eficiencia energética en condiciones variables de irradiancia.

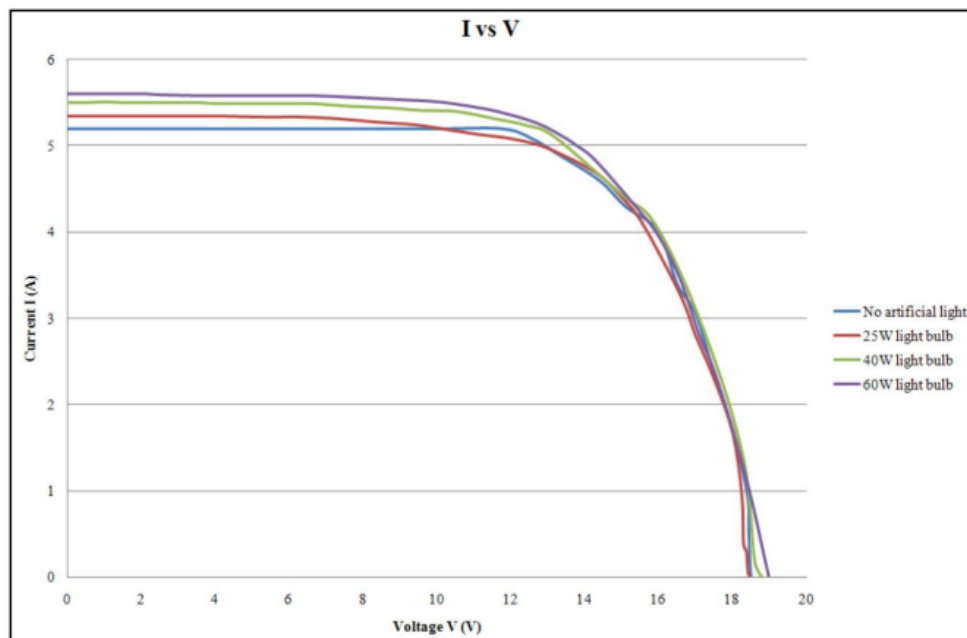
Estos resultados son pertinentes para abordar la cuestión sobre cómo mejorar la eficiencia y el rendimiento de la energía solar en Argelia, y pueden orientar la formulación de objetivos e hipótesis para investigaciones futuras en este ámbito. Se podría plantear la hipótesis de que la adopción de técnicas de controladores MPPT más precisas y eficientes, como el controlador MPPT basado en FL propuesto en el estudio analizado, podría generar mejoras significativas en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en Argelia, a la vez que reduciría los costos asociados a la producción de energía solar.

En el antecedente se presenta un estudio comparativo de diferentes técnicas de controladores MPPT y una metodología detallada para el modelado y simulación de sistemas fotovoltaicos utilizando MATLAB/Simulink. Esta información puede ser útil para la creación de una cabina de pruebas de paneles fotovoltaicos con control de irradiancia y temperatura.

### ***3.1.7 La influencia de la luz y las sombras artificiales en Paneles Solares Fotovoltaicos***

En este artículo realizado por [9] "La influencia de la luz y las sombras artificiales en Paneles Solares Fotovoltaicos" es un estudio experimental que investiga cómo la exposición a diferentes niveles de luz y sombras artificiales afecta la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos. El estudio fue realizado por ingenieros de mantenimiento de máquinas y herramientas en Windhoek, Namibia, y publicado en la Revista Internacional de Ingeniería Energética en 2013.

El planteamiento del problema en este estudio es la necesidad de comprender cómo la exposición a diferentes niveles de luz y sombras artificiales afecta la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos. Los autores señalan que la eficiencia del uso de paneles solares está influenciada por muchos factores, y que la exposición a diferentes niveles de luz y sombras artificiales es uno de ellos.



**Figura 7. Características corriente-voltaje del módulo fotovoltaico con diferentes bombillas**

Fuente [9]

En la Figura 7 se pueden ver cuatro curvas de características corriente-voltaje, cada una correspondiente a una bombilla diferente. Las curvas se etiquetan con la potencia de la bombilla utilizada para la luz artificial. La curva roja representa la exposición del panel solar a una bombilla de 25 W, la curva verde representa la exposición del panel solar a una bombilla de 40 W, la curva azul representa la exposición del panel solar a una bombilla de 60 W y la curva negra representa la exposición del panel solar sin luz artificial.

Los autores también calcularon la eficiencia del panel solar en el punto de máxima potencia, y encontraron que la eficiencia del panel solar sin luz artificial fue del 15%, mientras que la eficiencia del panel solar con luz artificial de 25 W, 40 W y 60 W fue del 15,3%, 15,4% y 15,8%, respectivamente.

Este documento sirve como referencia, ya que proporciona información sobre el circuito equivalente de una célula solar fotovoltaica, lo cual resulta útil para comprender el funcionamiento de los paneles solares y las formas en que pueden optimizarse para mejorar su eficiencia. Este antecedente es relevante para el proyecto de cabina de pruebas de paneles fotovoltaicos con control de irradiancia y temperatura, ya ofrece información valiosa sobre cómo mejorar la eficiencia de los paneles solares.



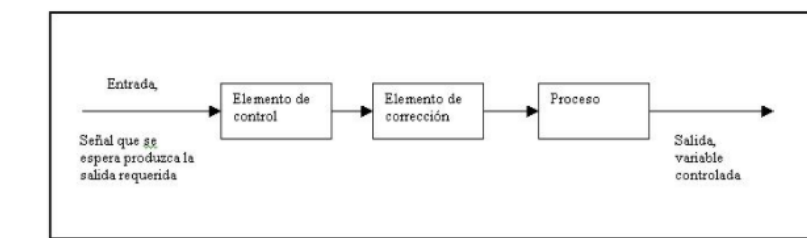
## 3.2 Enunciados de los supuestos teóricos

### 3.2.1 *Sistemas de control*

Es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema, dichos elementos trabajan en grupo para alcanzar un objetivo determinado. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen un valor establecido [10].

### 3.2.2 *Sistema de control de lazo abierto*

Un sistema de control en lazo abierto (Figura 8), es aquél en el que la acción de control es independiente de la salida. Se asume que el valor deseado de la variable no es susceptible a cambios por ningún medio externo. Esto implica que no tiene medio alguno de retroalimentación [11].



*Figura 8. Sistema de control de lazo abierto*

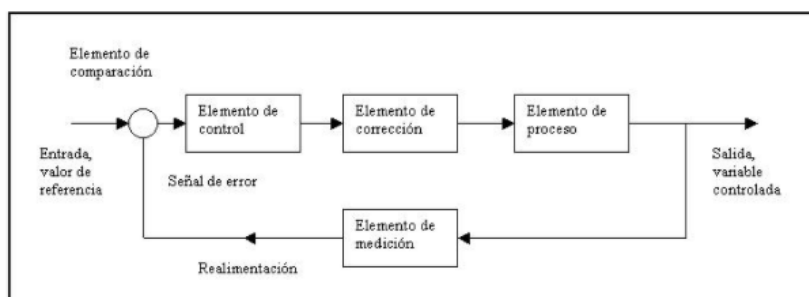
Fuente [11]

La figura 8 muestra el diagrama de un sistema de control básico, compuesto por cuatro elementos principales, la Entrada, que es la señal de referencia que define el objetivo del sistema, el Elemento de control, que procesa la señal de entrada y decide la acción a tomar, el Elemento de corrección, o actuador, que ejecuta la acción correctiva sobre el proceso y el Proceso, que es la variable a controlar y cuya salida representa la variable ajustada. La interacción de estos elementos permite que el sistema de control modifique continuamente la salida para que se mantenga lo más cerca posible del valor deseado definido por la entrada.

### 3.2.3 *Sistema de control de lazo cerrado*

Un sistema de control de lazo cerrado (Figura 9), es aquél en el que la acción de control es dependiente de la salida. La señal de salida influye en la entrada. Para esto es necesario que la

entrada sea modificada en cada instante en función de la salida. Esto se consigue por medio de una retroalimentación. [13]



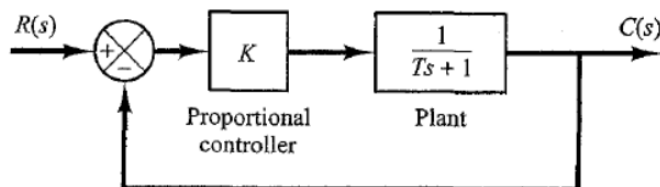
**Figura 9. Sistema de control de lazo cerrado**

Fuente [13]

La Figura 9 muestra un sistema de control de lazo cerrado con los siguientes componentes, un elemento de comparación que genera una señal de error al comparar la entrada o valor de referencia con la salida, un elemento de control que usa esta señal para determinar la acción correctiva, un elemento de corrección o actuador que ajusta el sistema, un elemento de proceso donde se controla la variable y un elemento de medición que registra la salida y la retroalimenta al sistema. Esta estructura permite que el sistema mantenga la variable controlada cercana al valor deseado mediante ajustes continuos.

### 3.2.4 Controlador Proporcional

También llamado sistema de control proporcional es un tipo de controlador de realimentación lineal. Tiene problemas de comportamiento inestable y lo soluciona mediante la modulación de la salida del dispositivo de control [13].



**Figura 10. Controlador tipo P**

Fuente [13]

La Figura 10 muestra un sistema de control de lazo cerrado con un controlador proporcional. La entrada se compara con la salida, generando una señal de error que pasa por el

controlador proporcional con una ganancia. Esta señal ajustada se aplica a la planta, que responde al control ejercido. La salida del sistema se retroalimenta al punto de comparación para corregir cualquier desviación y mantener la variable controlada cercana al valor de referencia.

La función de transferencia entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  es:

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p \quad (1)$$

*Ecuación 1. FT de un controlador proporcional.*

Donde:

$K_p$ : Ganancia proporcional

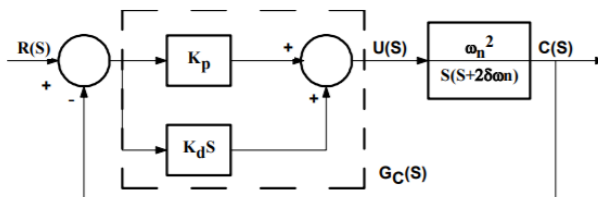
$U(S)$ : Salida del controlador.

$E(S)$ : Señal de error

### 3.2.5 Controlador Proporcional - Derivativo

La Figura 11 muestra un sistema de control de lazo cerrado con un controlador derivativo-proporcional (PD). La señal de error, obtenida al comparar la referencia  $R(S)$  con la salida  $C(S)$ , se procesa a través de un controlador proporcional con ganancia  $K_p$  y un controlador derivativo con ganancia  $K_d$ . Estas señales se suman para generar la señal de control  $U(S)$ , que se aplica a la planta. La salida  $C(S)$  se retroalimenta para ajustar el sistema y reducir el error.

El controlador PD se utiliza principalmente para mejorar la respuesta transitoria de un sistema de control [13].



*Figura 11. controlador PD*

Fuente [13]

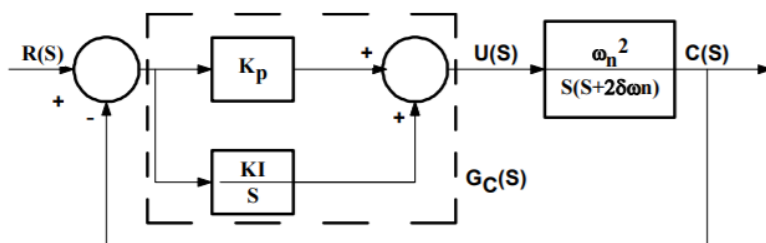
La función de transferencia del control PD es:

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p(1 + T_v * S) \quad (2)$$

*Ecuación 2. FT para controlador PD*

### 3.2.6 Controlador Proporcional Integrativo

Un controlador PI (proporcional-integral) es un elemento de transferencia de un sistema de control de bucle cerrado que comprende componentes de elemento tanto P (proporcional) como I (integral) [13].



*Figura 12. Controlador tipo PI*

Fuente [13]

La Figura 12 muestra un sistema de control de lazo cerrado con un controlador proporcional-integral (PI). En este sistema, la señal de referencia  $R(S)$  se compara con la salida  $C(S)$ , generando una señal de error. Este error se envía a un controlador proporcional con ganancia  $K_p$  y a un controlador integral con ganancia  $K_i$ . La señal integrada permite al sistema corregir errores acumulativos a lo largo del tiempo. Las salidas de ambos controladores se suman para producir la señal de control  $U(S)$ , que se aplica a la planta. La salida del sistema,  $C(S)$ , se retroalimenta para mantener la variable controlada en el valor deseado.

La función de transferencia del controlador PI es:

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_N * S} \right) \quad (3)$$

*Ecuación 3. FT de un controlador proporcional - integral.*

Donde:

$K_p$ : Ganancia Proporcional

$T_N$ : Tiempo de acción integral

Tanto  $K_p$  como  $T_N$  son ajustables.  $T_N$  regula la velocidad de acción de control, mientras que una modificación en  $K_p$  afecta tanto la parte proporcional como integral del sistema de control [13].

### 3.2.7 Controlador Proporcional Derivativo Integrativo

Un controlador PID permite controlar un sistema en lazo cerrado para que su salida sea la deseada. El controlador PID recibe este nombre ya que está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa.

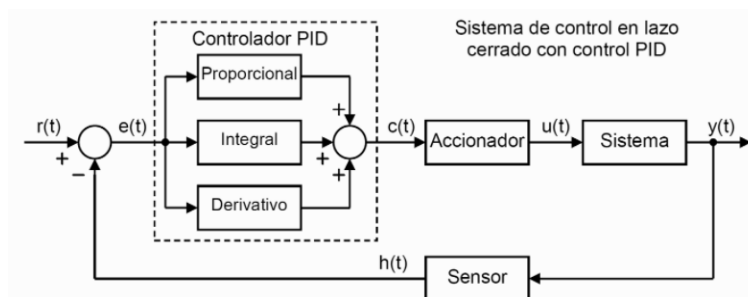


Figura 13. Sistema de control en lazo cerrado con control PID

Fuente [13]

La Figura 13 muestra un sistema de control en lazo cerrado con un controlador PID. La señal de referencia  $r(t)$  se compara con la salida  $y(t)$ , generando un error  $e(t)$  que ingresa al controlador PID. Este controlador aplica tres acciones: proporcional, que amplifica el error, integral, que corrige errores acumulativos, y derivativo, que anticipa cambios. La señal de control resultante  $c(t)$  se envía al accionador y luego al sistema. La salida  $y(t)$  se retroalimenta mediante un sensor para ajustar continuamente el sistema y mantener la salida cercana al valor deseado.

La mezcla de los elementos tiene la ventaja de que cada una de las tres acciones de control son individuales [13]. La función de transferencia es:

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_N * S} \right) + T_v * S \quad (4)$$

*Ecuación 4. FT para un controlador PID*

### **3.2.8 *Temperatura***

La temperatura es una magnitud relacionada con la rapidez del movimiento de las partículas que constituyen la materia, a mayor agitación mayor temperatura. Es importante, no confundir la temperatura con el calor, siendo este último una forma de energía producida por la vibración de las moléculas que componen un cuerpo [1].

Es importante tener en cuenta que la capacidad calorífica del suelo permite absorber o emitir radiación con mayor o menor dificultad, en este sentido la temperatura en el agua, el desierto o la selva va a diferir a pesar de que la radiación percibida sea la misma.

La temperatura se mide en grados Fahrenheit, Kelvin o Celsius, siendo la escala en grados Kelvin una escala absoluta, en la cual el valor inicial (0 K) corresponde al valor de las partículas cuando no se mueven, un valor que en la práctica parece no alcanzarse [1].

### **3.2.9 *Sensores de temperatura***

Los sensores de temperatura son dispositivos utilizados para medir la temperatura de un entorno o de un objeto, transformando esta magnitud en una señal interpretable por sistemas de control y monitoreo. En términos generales, estos sensores funcionan al detectar cambios en propiedades físicas que varían en función de la temperatura, tales como la resistencia eléctrica, el voltaje o la corriente. Esta capacidad de conversión permite que los sistemas monitoreen la temperatura y, cuando sea necesario, actúen en respuesta a las variaciones detectadas, manteniendo condiciones controladas de manera precisa y eficiente.

### **3.2.10 *Sensor de Temperatura DS18B20***

Este sensor se distingue por su tecnología de medición digital, la cual permite captar variaciones de temperatura con alta precisión y transmitir los datos mediante el protocolo OneWire. Esta comunicación se realiza a través de un único hilo de datos, simplificando la estructura del sistema y reduciendo el cableado necesario.

El DS18B20 ofrece un rango de medición de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$ , ideal para condiciones de prueba que requieren estabilidad y un amplio margen operativo. Su resolución de 12 bits permite registrar cambios de temperatura con incrementos de  $0.0625^{\circ}\text{C}$ , alcanzando una precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  en el rango de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$ . Esta precisión es fundamental para el control en entornos donde se exige una regulación exacta.

Otra ventaja importante del DS18B20 es su capacidad de integración en sistemas de monitoreo de temperatura múltiples, ya que cada sensor cuenta con una identificación única que facilita su uso en redes de sensores. Esto permite, en caso necesario, ampliar el sistema de control con varios sensores sin afectar la claridad o velocidad de transmisión de datos.

**Ventajas:**

Alta precisión en el rango de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ).

Amplio rango operativo ( $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$ ).

Comunicación eficiente mediante protocolo OneWire, reduciendo el cableado.

Capacidad de integración en sistemas de múltiples sensores mediante identificación única.

Bajo mantenimiento y fácil instalación.

**Desventajas:**

Limitación de precisión fuera del rango óptimo de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$ .

Requiere conversión a digital para leer en sistemas que no usan OneWire.

A continuación, se muestra una imagen ilustrativa del sensor DS18B20 (Figura 14), en la que se destacan sus dimensiones y configuración de pines para facilitar su conexión en el sistema de control de la cabina de pruebas fotovoltaicas [20].



*Figura 14. Sensor de temperatura ds18b20*

Fuente [20]

### 3.2.11 Termómetro de resistencia

Es un sensor basado en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Son conocidos como RTD por sus siglas en inglés (Resistance Temperature Detector) [15]. La variación de la resistencia puede ser expresada de manera matemática por la Ecuación 5. Resistencia variable a la temperatura.

$$R_f = R_0(1 + \alpha \Delta T) \quad (5)$$

*Ecuación 5. Resistencia variable a la temperatura.*

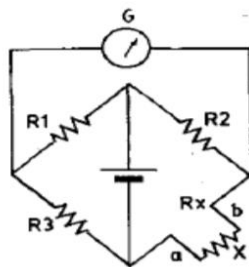
Dónde:

$R_0$ : es la resistencia a la temperatura de referencia  $T_0$ .

$\Delta T$ : es la desviación de temperatura respecto a  $T_0$ .  $\Delta T = T_f - T_0$

$\alpha$ : coeficiente de temperatura del conductor especificado a  $0^\circ\text{C}$ , interesa que sea de gran valor y constante con la temperatura.

La variación de resistencia de las sondas es medida con un puente de Wheatstone dispuesto en un montaje denominado de dos hilos (Figura 15). En este tipo de montaje la sonda de resistencia se conecta a uno de los brazos del puente y se varía  $R_3$  hasta que se anula la desviación del galvanómetro.



*Figura 15. Puente de Wheatstone de dos hilos*

Fuente [15]

$$X = R_3 * \frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

*Ecuación 6. Relación del puente de Wheatstone.*



Fuente [15]

### 3.2.12 Termopar

También se lo conoce como termocupla, su funcionamiento se enfoca en el efecto termoeléctrico que permite transformar directamente el calor en electricidad. La variación de voltaje en los terminales (a-b) del termopar es proporcional a la variación de la temperatura en su junta multiplicado por el coeficiente de Seebeck ( $\mu$ ) [15].

$$V_{AB} = \mu \Delta T \quad (7)$$

*Ecuación 7. Voltaje variable por temperatura.*

Donde

$V_{AB}$ : voltaje variable por temperatura

$\Delta T$ : variación de temperatura

$\mu$ : coeficiente de Seebeck

### 3.2.13 Termistores

Su comportamiento es similar a los resistores, los cuales varían su resistencia con la temperatura. Su construcción se basa en semiconductores, mientras que los RTD en conductores. Se fabrican con óxidos de diferentes metales como: níquel, cobalto, cobre, titanio, manganeso, etc. Por otro lado, se utilizan en la regulación del voltaje, control de potencia, control de temperatura, detección en analizadores [16].

#### **Tipos de termistores:**

PTC: coeficiente de temperatura positivo

NTC: coeficiente de temperatura negativo

#### **Ventajas y Desventajas**

##### **Ventajas**

alta sensibilidad (100 ohmios/grado).

alta precisión ( $\pm 0.02^\circ\text{C}$ ).

pequeño tamaño y baratos.

bajo tiempo de respuesta (baja inercia térmica).

estabilidad y repetitividad a largo plazo.

### **Desventajas**

No lineales. Se requiere linealizar en torno al punto de trabajo.

Limitado rango de utilización:  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ . Útil para temperatura ambiente.

### **3.2.14 Irradiancia**

La radiación solar que llega a la tierra es el 47% de la radiación solar, en un rango de longitud de onda que se encuentra entre el 380 nm y el 780 nm, el resto de la radiación es absorbido por gases de la atmosfera como el ozono. La energía que llega a la tierra recibe el nombre de irradiancia (G) y se define como la potencia por unidad de área normal a la dirección de propagación expresada en vatios por metro cuadrado [1].

### **3.2.15 Lámpara de halogenuros metálicos**

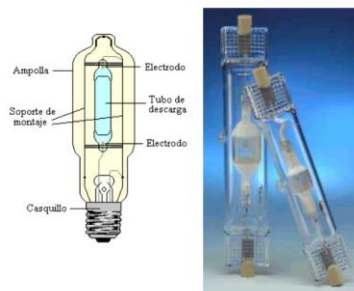
Las lámparas de halogenuros metálicos (Figura 16), están compuestas por yodo y cloro, además del mercurio y una mezcla de argón para el encendido. Los halogenuros metálicos se vaporizan una vez la lámpara alcance su temperatura de funcionamiento separándose en halógenos e iones metálicos. [17]. De este modo en la lámpara se forman los siguientes elementos:

- Halogenuros metálicos no agresivos, cerca de la pared del tubo de descarga.
- Iones metálicos y de halógenos en el centro de la descarga. Los iones metálicos son los que emiten radiación.
- Cuando los iones metálicos y halógenos se acercan, sea por convección o difusión, a las partes más frías del tubo se recombinan y el ciclo del halogenuro se repite.

El mercurio ya no actúa como generador de luz, sino como regulador.

El uso de estos metales halogenuros presentan dos ventajas:

- Los halogenuros metálicos son más volátiles a la temperatura de operación del tubo que los metales puros.
- Aquellos metales que reaccionan químicamente con el tubo pueden ser usados en forma de halogenuros, que de este modo no lo hacen [17].



**Figura 16. Esquema de una lámpara de halogenuros metálicos**

Fuente [17]

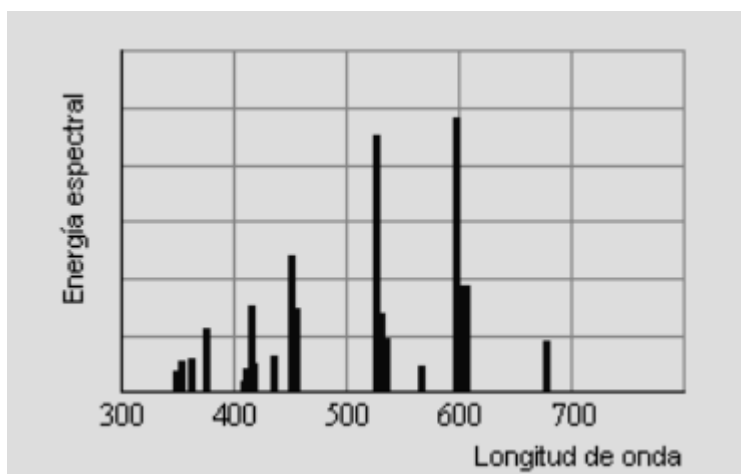
La parte interior de la ampolla exterior, en el caso de las lámparas de forma ovoidal se recubre con fósforo para convertir la radiación UV en visible. Sin embargo, como los halogenuros producen una pequeña cantidad de radiación UV, la radiación visible proviene principalmente de ellos. Las lámparas alcanzan su mejor rendimiento operando en posición vertical, cuando trabaja horizontalmente el arco se inclina hacia arriba debido a las corrientes de convección. Al mismo tiempo, el halogenuro metálico, que es líquido, se mueve hacia el centro del tubo del arco, con lo que la presión de vapor disminuye decreciendo la concentración del metal en el arco reduciendo la emisión de luz. Debido a esto el arco inclinado se acerca más a las paredes del tubo de arco, aumentando su temperatura y afectando la vida útil de la lámpara en un 25%. La eficacia de estas lámparas es bastante mayor que las de mercurio de alta presión, comercialmente pueden obtenerse lámparas con eficacia de 80 a 108 lm/W, dependiendo de la potencia, sin incluir las pérdidas en el balasto [17].

Las lámparas de halogenuros metálicos pueden emitir diferentes colores y luz brillante porque contienen diferentes elementos químicos. Cuando se aplica energía, estos componentes se "excitan" y emiten luz de diferentes colores. La combinación de estos elementos permite ajustar el tipo de luz que producen, lo que los hace útiles en lugares como estadios, acuarios y estudios de televisión donde se necesita buena iluminación y colores precisos.

La irradiancia es una medida de cuánta luz llega a una superficie en un tiempo determinado. Una lámpara de halogenuros metálicos emite luz en diferentes colores. Esta luz se compone de diferentes longitudes de onda, formando un espectro. Para calcular la irradiancia, primero es necesario comprender cómo se distribuye la luz en todo el espectro en función de su color. Luego se usa instrumento como un espectrofotómetro para medir la intensidad de la luz en diferentes longitudes de onda. Estas medidas se convierten en valores numéricos.

El espectro de radiación de una lámpara de halogenuros metálicos muestra picos de intensidad en diferentes longitudes de onda (Figura 17), lo que permite obtener una luz blanca brillante y de alta calidad. Estos picos de intensidad están relacionados con la presencia de diversos elementos químicos en la lámpara, como mercurio, halogenuros metálicos y otros materiales que contribuyen a la emisión de luz en diferentes longitudes de onda.

Como se observa en la Figura 17, los picos en diferentes longitudes de onda que corresponden a la luz azul, verde, amarilla o roja, según los elementos específicos en la composición. La altura de cada barra representa la cantidad de energía emitida en cada longitud de onda, proporcionando una visión detallada de la distribución del espectro de emisión de la lámpara de halogenuros metálicos.



*Figura 17. Espectro de emisión de una lámpara con halogenuros metálicos*

Fuente [17]

### **3.2.16 Piranómetro SR-11**

La Organización Meteorológica Mundial define radiación global como la radiación solar en el intervalo espectral de 0.3 a 3  $\mu\text{m}$  recibida sobre una superficie plana horizontal desde un ángulo sólido de  $2\pi$  sr. La radiación global es la suma de la radiación que procede directamente del disco solar (radiación directa) y de la radiación solar dispersada a su paso por la atmósfera (radiación difusa). La medida de la radiación global se realiza por medio de piranómetros, de las palabras griegas fuego, hacia arriba y medida [18], el dispositivo se observa en la Figura 18.



**Figura 18. Piranómetro SR-11**

Fuente [18]

Los clasificados como de alta calidad son válidos como patrones de trabajo y para su mantenimiento se requieren instalaciones adecuadas y personal especializado. Los considerados de buena calidad son aceptables para redes de medida. Por último, los de calidad moderada son aceptables para redes de media de bajo coste [18].

**Tabla 1. Especificaciones sensor piranómetro SR-11**

<b>Característica</b>	<b>Alta calidad</b>	<b>Buena calidad</b>	<b>Calidad moderada</b>
<b>Tiempo de respuesta</b>	< 15 s	< 30 s	< 60 s
<b>Resolución</b>	$\pm 1 W/m^2$	$\pm 5 W/m^2$	$\pm 10 W/m^2$
<b>Estabilidad</b>	$\pm 0.8 \%$	$\pm 1.5 \%$	$\pm 3 \%$
<b>Respuesta de temperatura</b>	$\pm 2 \%$	$\pm 4 \%$	$\pm 8 \%$
<b>Sensibilidad espectral</b>	$\pm 2 \%$	$\pm 5 \%$	$\pm 10 \%$

**Fuente:**[18]

La Tabla 1 muestra las características de piranómetros según su calidad (alta, buena y moderada). Se comparan aspectos como el tiempo de respuesta, con tiempos menores para piranómetros de alta calidad, y la resolución, que es más precisa en equipos de mayor calidad. También se incluyen la estabilidad y la respuesta ante cambios de temperatura, donde los dispositivos de alta calidad presentan menor variación. La sensibilidad espectral es otra característica, con menor variación en los piranómetros de mayor precisión.

### 3.3 Definición de conceptos

#### 3.3.1 Definición nominal de conceptos

La variable a medir es la eficacia de todo el sistema de control con respecto al valor de las variables que entrega el controlador. Su valor se puede obtener con la multiplicación de la relación entre el valor de temperatura entregado por el controlador sobre el valor de referencia de temperatura ingresado por el usuario y la relación entre el valor de irradiancia entregado por el controlador sobre el valor de referencia de irradiancia ingresado por el usuario y multiplicado por 100 para determinar la eficacia en términos porcentuales y poder evaluar su desempeño.

#### 3.3.2 Definición operativa de conceptos

$$Eficacia = \frac{V_{ct}}{V_{pt}} * \frac{V_{ci}}{V_{pi}} * 100\% \quad (8)$$

*Ecuación 8. Eficacia del controlador*

Donde

$V_{ct}$ : Valor de temperatura entregado por el controlador.

$V_{pt}$ : Valor de temperatura de referencia.

$V_{ci}$ : Valor de irradiancia entregado por el controlador.

$V_{pi}$ : Valor de irradiancia de referencia.

Es importante señalar que los valores de temperatura e irradiancia considerados para el cálculo de la eficacia corresponden a valores en estado estable, es decir, aquellos registrados una vez el sistema ha superado el periodo transitorio asociado a cambios en la referencia. Este enfoque garantiza que la medición de la eficacia refleje condiciones estables en el sistema de control, minimizando el impacto de posibles fluctuaciones transitorias en los resultados obtenidos.

Para establecer un criterio de selección del tiempo de respuesta, se considera el momento en que las variables de temperatura e irradiancia alcanzan y permanecen dentro de un margen aceptable alrededor del valor de referencia, sin presentar oscilaciones significativas. Este tiempo

de respuesta asegura que las mediciones se realicen únicamente cuando el sistema ha alcanzado un estado de comportamiento estable y predecible.

Para cuantificar el tiempo de respuesta y evaluar la estabilidad de las variables controladas, se utilizó el tiempo de asentamiento como medida clave. El tiempo de asentamiento se definió como el tiempo necesario para que las variables de temperatura e irradiancia se estabilicen y permanezcan dentro de un margen de error preestablecido sin fluctuaciones significativas.

### 3.4 Hipótesis

#### **Pregunta de investigación**

¿Cuál es la eficacia de un sistema de control que permita la regulación de variables temperatura e irradiancia al interior de una cabina orientada a pruebas de paneles fotovoltaicos?

**Hi:** la eficacia de un sistema de control que permita la regulación de variables temperatura e irradiancia al interior de una cabina orientada a pruebas de paneles fotovoltaicos es mayor del 95%.

**Ho:** la eficacia de un sistema de control que permita la regulación de variables temperatura e irradiancia al interior de una cabina orientada a pruebas de paneles fotovoltaicos no es mayor del 95%.

**Ha:** la eficacia de un sistema de control que permita la regulación de variables temperatura e irradiancia al interior de una cabina orientada a pruebas de paneles fotovoltaicos esta entre el 90 y 95%.

## 4. Metodología

### 4.1 Secuencia metodológica

Se desarrollo un modelo matemático preciso que refleja el comportamiento del sistema, empleando métodos analíticos y experimentales. La derivación de la función de transferencia resultado del análisis exhaustivo de datos. Posteriormente, se empleó herramientas avanzadas de simulación, como MATLAB, para explorar una variedad de estrategias de control y evaluar la regulación simultánea de irradiancia y temperatura.

#### 4.1.1 Selección del Controlador Apropriado

Después de realizar las simulaciones necesarias, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de los resultados para seleccionar el controlador más adecuado para el sistema de control de la cabina de pruebas. La evaluación se centró en la estabilidad y precisión de cada tipo de controlador simulado, lo cual permitió identificar aquel que mejor se ajustaba a los requerimientos del proyecto. Se realizó una comparación de las respuestas de diferentes tipos de controladores (como PID y controlador de histéresis) para determinar cuál ofrecía el mejor desempeño en términos de los criterios establecidos.

Los resultados obtenidos de las simulaciones fueron analizados para predecir el comportamiento del sistema de control en condiciones reales. No obstante, se reconoció que los datos de simulación no sustituyen la experimentación directa; por ello, una vez implementado el sistema en la cabina, se realizaron pruebas experimentales para verificar el desempeño del controlador seleccionado y ajustarlo en caso necesario, asegurando así la fiabilidad del sistema en condiciones reales.

#### 4.1.2 Calibración de Sensores

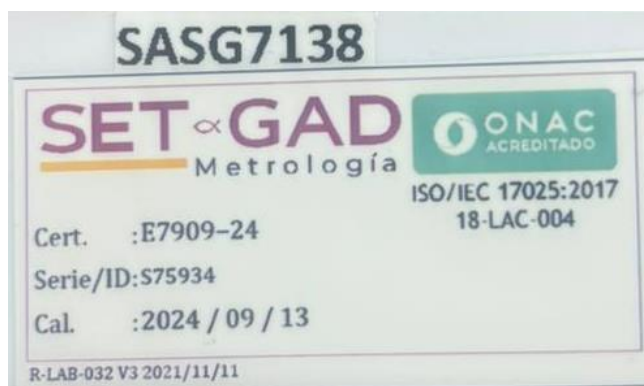
Para garantizar la precisión y confiabilidad de las mediciones de temperatura e irradiancia en este estudio, se llevó a cabo un proceso de calibración para los sensores involucrados. Este proceso asegura que los datos reflejen condiciones reales y minimiza el riesgo de errores de medición. Todos los patrones utilizados en el proceso de calibración cuentan con sus certificados



de calibración vigentes, lo cual respalda la exactitud de las verificaciones realizadas.

#### 4.1.3 Calibración del Sensor de Temperatura (DS18B20)

El sensor de temperatura DS18B20, aunque calibrado de fábrica, fue sometido a un proceso de verificación adicional con el fin de asegurar la precisión de sus lecturas. Para este propósito, se utilizó como patrón un registrador de datos MadgeTech Data Logger, el cual posee un certificado de calibración vigente, acreditado por la ONAC (Organismo Nacional de Acreditación de Colombia) con fecha de calibración el 13 de septiembre del 2024.



*Figura 19. Certificado de calibración patrón MadgeTech*

En el procedimiento de verificación, el sensor se expuso a tres puntos de temperatura de referencia: 20°C, 35°C y 50°C. En cada uno de estos puntos, se realizaron tres mediciones que luego fueron comparadas con los valores obtenidos a través del MadgeTech Data Logger, garantizando así la exactitud de las lecturas del DS18B20 y validando su desempeño en condiciones controladas.

A continuación, se presenta una tabla con los datos de calibración obtenidos para el sensor de temperatura.

*Tabla 2. Calibración de Sensor de Temperatura*

<b>Punto de Prueba (°C)</b>	<b>Medición 1 del Patrón (MadgeTech)</b>	<b>Medición 2 del Patrón (MadgeTech)</b>	<b>Medición 3 del Patrón (MadgeTech)</b>	<b>Medición 1 del DS18B20</b>	<b>Medición 2 del DS18B20</b>	<b>Medición 3 del DS18B20</b>	<b>Diferencia Promedio (°C)</b>
20°C	20.02	20.01	19.98	19.95	20	20.05	0.03
35°C	35.01	34.98	35	34.96	35.05	35.02	0.03
50°C	50	49.98	50.02	49.95	50.04	50.03	0.03

#### **4.1.4 Calibración del Sensor de Irradiancia (Piranómetro)**

Para la calibración del sensor de irradiancia, se compararon las lecturas del piranómetro con las obtenidas por la estación meteorológica Davis de la Universidad CESMAG, que también cuenta con un certificado de calibración vigente. En un punto de irradiancia constante, se tomaron cinco mediciones consecutivas en  $W/m^2$  y se compararon los valores registrados por el piranómetro con los obtenidos de la estación meteorológica Davis, verificando así la precisión de las lecturas.

La siguiente tabla presenta los datos obtenidos durante el proceso de calibración para el sensor de irradiancia.

*Tabla 3. Calibración de Sensor de Irradiancia*

<b>Medición del Piranómetro (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Valor del Patrón (Estación Davis)</b>	<b>Diferencia Absoluta (W/m<sup>2</sup>)</b>
245	248	3
492	498	6
758	753	5
1010	1005	5
846	852	6

#### **4.1.5 Construcción del Sistema de Control Físico**

En esta etapa, se llevará a cabo la identificación y adquisición de los componentes necesarios, tales como el balastro dimerizable y el driver de potencia regulable, para el montaje del sistema de control de irradiancia y temperatura. La interconexión de los dispositivos se realizará meticulosamente, asegurando su correcto funcionamiento y compatibilidad.

#### **4.1.6 Desarrollo del Controlador**

Utilizando herramientas de programación de alta precisión, como MATLAB y un microcontrolador Arduino, se llevará a cabo el diseño detallado y la configuración del controlador. La programación del controlador estará enfocada en la regulación precisa de la irradiancia y la temperatura en la cabina de pruebas, utilizando el dimmer digital como componente esencial del sistema de control.

#### **4.1.7 Implementación y Evaluación del Sistema**

La fase de implementación incluirá la integración del controlador en el sistema físico para llevar a cabo pruebas exhaustivas. Se recopilarán datos experimentales de irradiancia y temperatura para evaluar la eficacia y estabilidad del sistema de control implementado. Se prestará especial atención a la consistencia entre los resultados obtenidos y los objetivos previamente establecidos.

#### **4.1.8 Análisis y Documentación de Resultados**

Tras la evaluación del sistema de control implementado en la cabina de pruebas, se realizó un análisis detallado y comparativo de los resultados obtenidos en función de los criterios de diseño previamente establecidos y las expectativas iniciales. Para asegurar la exactitud y confiabilidad de las mediciones, se utilizó el MadgeTech Data Logger, calibrado y certificado, como referencia en la verificación de temperatura, y la estación meteorológica Davis de la Universidad CESMAG para las mediciones de irradiancia. Estos instrumentos de referencia permitieron validar que las lecturas de los sensores en el sistema de control reflejaban los valores reales de manera precisa.

Se elaboró un informe técnico que documenta en detalle los resultados, las conclusiones derivadas del análisis y las recomendaciones para futuros ajustes, todo ello basado en la evaluación de la precisión del sistema implementado y su alineación con los criterios de diseño.

#### **4.1.9 *Diseño e implementación del sistema de control***

se utilizará el software Simulink que funciona sobre el entorno de Matlab para simular la posible respuesta de la planta. Una vez el comportamiento de la simulación sea adecuado, se implementarán los controladores, analizando las variables de salida irradiancia y temperatura. Se evaluará su eficacia mediante el análisis de datos obtenidos por el sensor de radiación solar SR-11 y por el sensor de temperatura TERMOPAR DS18B20.

### **4.2 *Técnicas de recolección de información***

Observación directa: la información que se necesita se obtiene a partir del estudio del comportamiento de la planta a nivel de simulación, por medio del software Simulink que funciona sobre el entorno de Matlab en el cual se simula la posible respuesta de la planta. Una vez el comportamiento de la simulación sea adecuado serán implementados los controladores, analizando las variables de salida irradiancia y temperatura a nivel de implementación se evaluará su eficacia mediante el análisis de datos obtenidos por el sensor de radiación solar SR-11 y por el sensor de temperatura TERMOPAR DS18B20.

#### **4.2.1 *Validez de la técnica***

La técnica de recolección de información es válida, porque a nivel de simulación el software en donde se llevó a cabo es una herramienta interactiva que permite trabajar con algoritmos para recopilar información de los fenómenos físicos involucrados en los mismos, y a nivel de implementación se cuenta con la cabina para la realización de dichas pruebas extrayendo la información por medio de un piranómetro SR-11 el cual tiene una precisión de  $\pm 5\%$  del espectro completo de radiación solar, y mediante un TERMOPAR DS18B20 para recopilar datos de temperatura con una precisión de  $\pm 0.3^\circ\text{C}$  dentro de un rango operacional de temperatura de  $-55 \sim +200^\circ\text{C}$ . Según [19] los instrumentos de medición de temperatura deben contar con un rango mínimo de medición de  $-40$  a  $40^\circ\text{C}$  y los instrumentos de medición de irradiancia deben

tener una precisión de  $\pm 5\%$  y con un ángulo de visión de  $2\pi$ , debido a ello los sensores elegidos son adecuados para su debida implementación.

#### **4.2.2 Confiabilidad técnica**

La técnica empleada se consideró confiable, ya que los sensores fueron previamente sometidos a un proceso de calibración para garantizar la precisión en sus mediciones. La calibración del sensor de temperatura (DS18B20) se verificó mediante el uso de un registrador de datos certificado, el MadgeTech Data Logger, el cual actuó como patrón de referencia en tres puntos de temperatura:  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$  y  $50^{\circ}\text{C}$ . En cada punto, se realizaron múltiples mediciones y se compararon los resultados con los valores del Data Logger para asegurar la precisión del sensor.

En el caso del sensor de irradiancia (piranómetro), la calibración se corroboró al contrastar sus lecturas con las obtenidas en la estación meteorológica Davis de la Universidad CESMAG, que cuenta con certificado de calibración vigente. Este proceso consistió en tomar varias mediciones en condiciones de irradiancia constante y comparar los valores del piranómetro con los de la estación meteorológica, validando así la exactitud de las lecturas en el rango operacional necesario para esta investigación.

### **4.3 Instrumentos de recolección de información**

La información obtenida de la cabina de pruebas fotovoltaicas fue recopilada mediante una tarjeta Arduino, que actuó como dispositivo de adquisición de datos en conjunto con el software Microsoft Excel. En este proyecto, el controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) se configuró exclusivamente para el sistema de control de temperatura de la cabina, mientras que la irradiancia fue regulada mediante un sistema de automatización independiente, controlado por servomotores. La tarjeta Arduino permitió la captura de datos en tiempo real, facilitando la recolección precisa de información proveniente de los sensores instalados.

Durante el funcionamiento del sistema de control de temperatura, se ajustaron los parámetros del controlador PID, tales como las constantes proporcional, integral y derivativa, de acuerdo con las características del sistema fotovoltaico, con el objetivo de alcanzar un rendimiento adecuado en la regulación de la temperatura dentro de la cabina. Por su parte, el

control de la irradiancia se realizó mediante un sistema de servomotores que ajustaba la posición de los balastos, permitiendo alternar entre diferentes puntos de referencia predefinidos para las lámparas de halogenuros metálicos.

A medida que el controlador PID generaba señales de control para la temperatura, y el sistema de servomotores ajustaba la irradiancia, la tarjeta Arduino registraba de forma continua datos fundamentales para el análisis, tales como la temperatura, medida a través del sensor DS18B20, y la irradiancia, capturada por el piranómetro SR-11. Estos datos fueron transferidos y almacenados en Microsoft Excel, lo cual permitió su organización estructurada y su registro en un formato adecuado para su posterior análisis.

Una vez finalizada la recopilación de datos, se utilizó Microsoft Excel como herramienta para organizar los resultados obtenidos, preparándolos para su uso posterior en MATLAB. Esta organización facilitó el tratamiento de los datos, así como la realización de gráficos y cálculos avanzados en MATLAB, lo que permitió observar con mayor precisión las tendencias y comportamientos específicos del sistema. De este modo, se aseguró un análisis detallado, posibilitando comparaciones precisas entre los datos registrados y los valores esperados, y validando así el correcto funcionamiento del sistema de control implementado en la cabina de pruebas.

## 5. Resultados del proyecto

La sección 4.1 describen el desarrollo de los Objetivos 1 y 2, correspondientes a diseñar un controlador de irradiancia y temperatura para una cabina destinada a pruebas de paneles fotovoltaicos, e implementar un sistema de control de irradiancia y temperatura para dicha cabina.

La sección 4.2 aborda el desarrollo del Objetivo 3, que corresponde a evaluar el desempeño del sistema de control en la regulación de las variables de irradiancia y temperatura.

### 5.1 Diseño e implementación de un controlador de irradiancia y temperatura para una cabina orientada a pruebas de paneles fotovoltaicos.

La Figura 20 muestra la estructura de los componentes principales que conforman el sistema de control de la cabina de pruebas de irradiancia y temperatura. En esta disposición, el sistema de control central coordina distintos sensores y actuadores, entre los que se incluyen el sensor de temperatura y el piranómetro, encargados de la medición de variables ambientales. También se observan diversos elementos de control y activación, como los relés de estado sólido (trifásico y monofásico), ventilador, extractor, servomotor y balastos, que regulan el funcionamiento de resistencias y lámparas de halogenuro metálico, asegurando condiciones controladas para los ensayos.

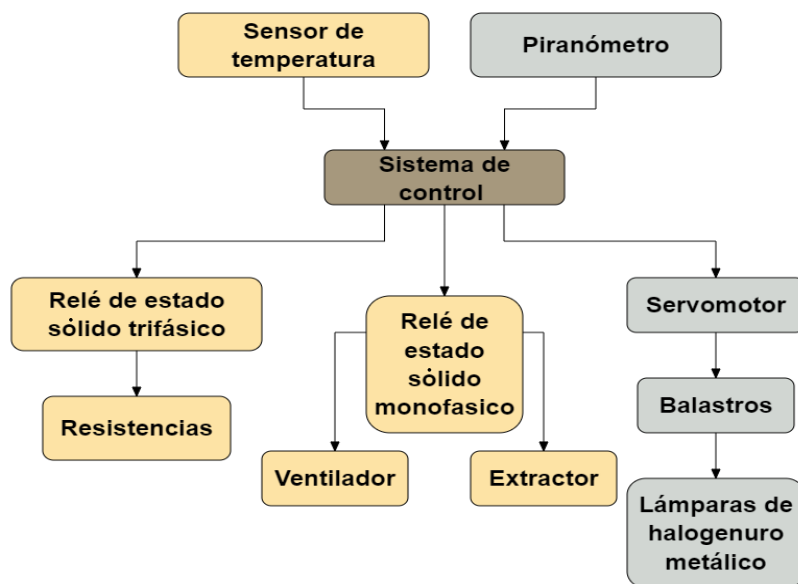


Figura 20. Diagrama de bloques control de irradiancia y temperatura

El sistema de control diseñado regula la temperatura y la irradiancia dentro de una cabina de pruebas, con puntos de ajuste definidos por el usuario. El controlador PID ajusta las resistencias, que son controladas por un relé de estado sólido trifásico y operan mediante una señal modulada por ancho de pulso (PWM) para regular la temperatura según las lecturas del sensor de temperatura. Cabe destacar que, dado que la resistencia utilizada en este sistema opera con corriente alterna, el diseño del control se adapta a estas características para lograr una regulación precisa.

Para la irradiancia, el sistema utiliza un mecanismo de ajuste de balastos controlado por servomotores, lo cual permite regular la potencia de las lámparas de halogenuros metálicos empleadas en la cabina. Adicionalmente, un relé de estado sólido monofásico, activado por un controlador de histéresis de encendido y apagado, gestiona el ventilador y el extractor de aire. Cuando la temperatura en la cabina supera el umbral predefinido, el ventilador y el extractor se activan automáticamente para enfriar el interior de la cabina y mantener las condiciones de prueba establecidas.

El diagrama de flujo, Figura 21, representa el proceso de configuración y control en una cabina de pruebas para paneles fotovoltaicos, dividido en cuatro interfaces principales: bienvenida, configuración de punto de referencia de temperatura, configuración de punto de referencia de irradiancia y resultados de sensores.

La pantalla de bienvenida es el punto de inicio, donde el usuario utiliza el codificador rotativo para navegar hacia los ajustes. En la pantalla de configuración de temperatura, el usuario establece el valor deseado de temperatura. En la pantalla de configuración de irradiancia, el usuario selecciona el nivel de irradiancia, lo cual ajusta la posición de las lámparas mediante servomotores, actualizando el display para verificar el valor.

Finalmente, la pantalla de resultados de sensores muestra en tiempo real los valores actuales de temperatura e irradiancia dentro de la cabina. El sistema monitorea constantemente la temperatura: si coincide con el punto de referencia, mantiene el ajuste, y si no, activa el control de temperatura mediante el relé y ventilador para ajustarla. Este flujo asegura un control preciso y estable en las condiciones de la cabina.



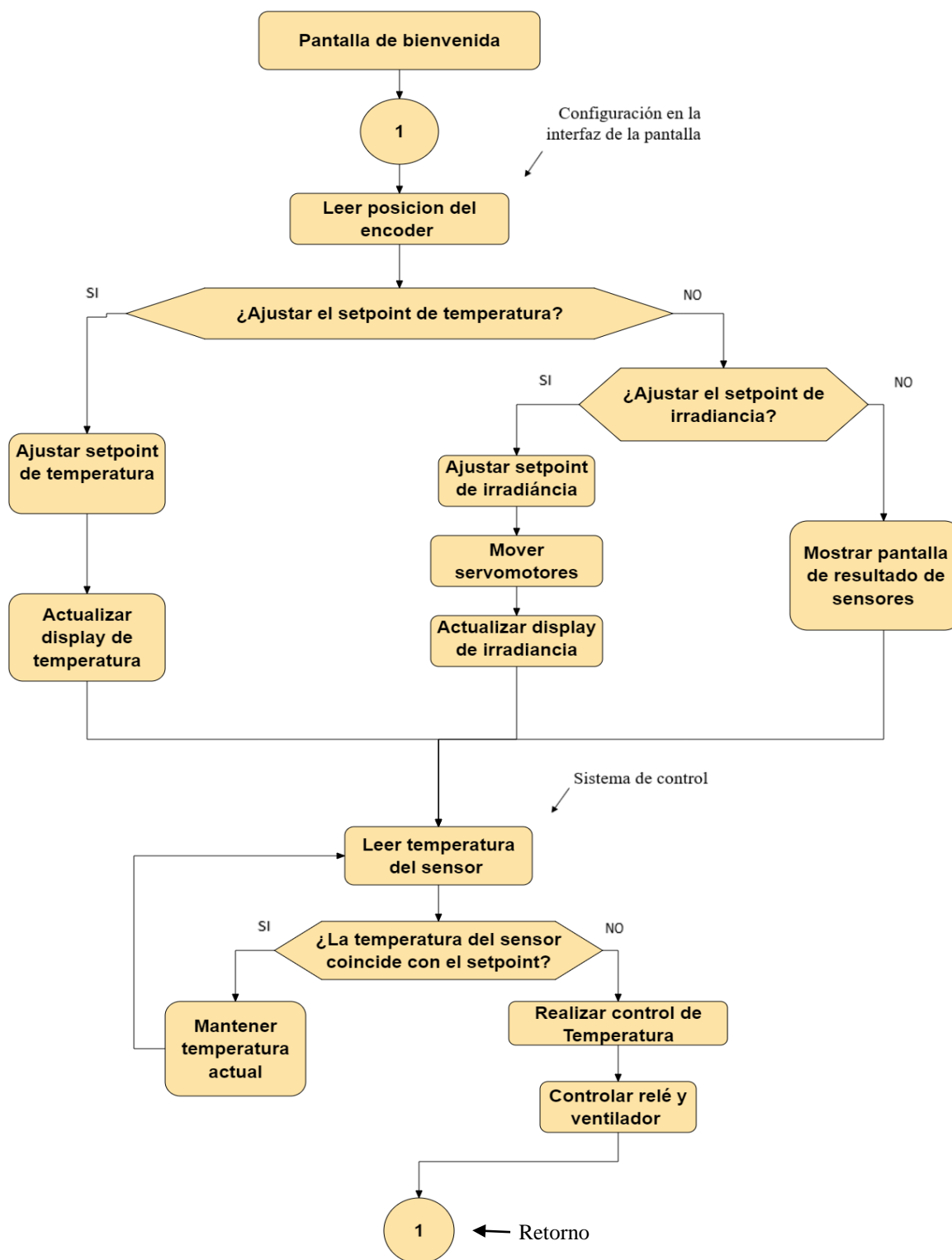


Figura 21. Diagrama de flujo control de irradiancia y temperatura

### 5.1.1 Controlador de temperatura

#### A. Diseño de controladores

Durante el desarrollo del proyecto, se evaluaron diversas configuraciones tanto de hardware como de software para el sistema de control de temperatura dentro de la cabina de pruebas fotovoltaicas. Con el objetivo de garantizar un control preciso y estable de las condiciones de prueba, se implementaron ajustes a los parámetros de control. El diseño del sistema tiene como objetivo asegurar que la cabina ofrezca un entorno controlado adecuado para evaluar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos bajo diferentes condiciones de temperatura.

#### Requerimientos de diseño

El sistema debe ser capaz de elevar la temperatura interna de la cabina desde una temperatura ambiente de entre 20°C y 25°C hasta un máximo de 50°C. Este proceso debe completarse en un tiempo no mayor a 20 minutos.

Durante el proceso de calentamiento, el sobrepaso no debe superar los 4°C respecto a la temperatura objetivo. En caso de que ocurra un sobrepaso, el sistema debe corregirlo y estabilizarse en un plazo no mayor a 5 minutos.

Una vez alcanzada la temperatura objetivo, el sistema debe estabilizarse dentro de un margen de  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Este proceso de estabilización debe completarse en un máximo de 15 minutos, asegurando que la temperatura se mantenga sin fluctuaciones significativas.

El proceso completo, desde el inicio del calentamiento hasta la estabilización y el mantenimiento de la temperatura, no debe superar los 35 minutos en total.

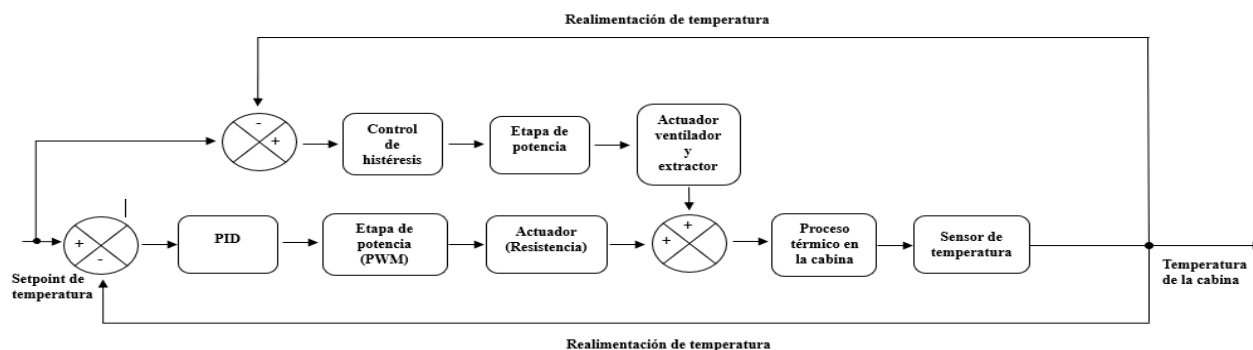


Figura 22. Diagrama de bloques control temperatura

La Figura 22 muestra el sistema de control de temperatura de la cabina mediante un controlador PID. Inicia con el setpoint de temperatura, que se compara con la temperatura actual para generar un error. El controlador PID ajusta este error y lo envía a la etapa de potencia PWM, que activa el actuador de resistencia para elevar la temperatura.

En paralelo, un control de histéresis activa una etapa de potencia para gestionar el ventilador y el extractor, manteniendo la temperatura estable. El proceso térmico en la cabina es monitoreado por un sensor de temperatura, cuya señal de retroalimentación permite ajustes continuos para mantener la temperatura en el valor deseado.

El diseño del controlador resultó crucial para garantizar que el sistema cumpliera con los requisitos de tiempo, precisión y estabilidad. Se optó por un controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) debido a su capacidad para regular sistemas con retroalimentación en tiempo real, particularmente en procesos de control de temperatura que exigen una respuesta rápida y precisa.

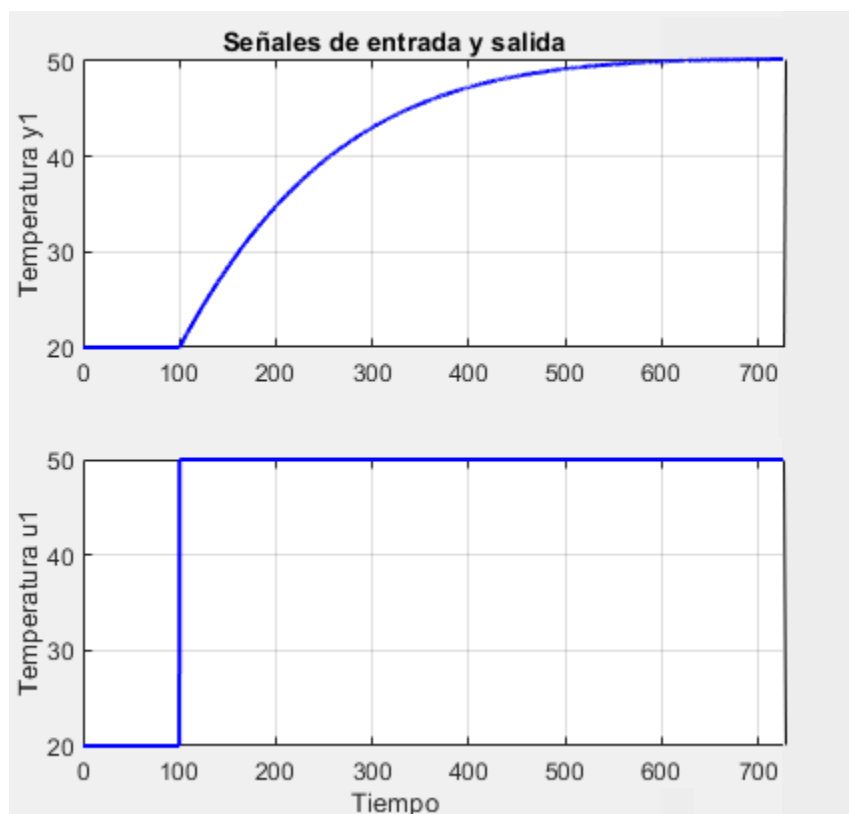
### **Sintonización controlador PID**

El proceso de sintonización del controlador PID para el sistema de control de temperatura fue fundamental para asegurar que el comportamiento cumpliera con los requisitos de tiempo de respuesta, precisión y estabilidad. En primer lugar, se llevó a cabo un proceso de identificación del sistema de temperatura en la cabina, lo cual permitió modelar su comportamiento y determinar la función de transferencia adecuada. Este modelo sirvió como base para la selección inicial de las ganancias del controlador PID.

El proceso de identificación del modelo de temperatura se realizó mediante pruebas experimentales en las que se aplicaron entradas de tipo escalón al sistema. Para ello, el sistema fue sometido a cambios bruscos de temperatura, incrementando el valor de referencia desde un estado inicial de temperatura ambiente hasta un máximo de 50°C. Durante estas pruebas, se registró la respuesta de la cabina en términos de tiempo de respuesta, oscilaciones y estabilidad. Estos datos experimentales permitieron calcular parámetros clave como la ganancia estática del sistema y la constante de tiempo, los cuales fueron necesarios para definir un modelo de primer orden que representara el comportamiento térmico de la cabina.

Con los parámetros obtenidos, se formuló una función de transferencia que describe la dinámica del sistema en función de las entradas aplicadas. Esta función de transferencia fue

utilizada para realizar simulaciones iniciales y para determinar las ganancias proporcionales, integrales y derivativas del controlador PID. Posteriormente, estas ganancias fueron ajustadas mediante pruebas en el entorno real, con el objetivo de optimizar el rendimiento y asegurar que el sistema alcanzara el valor deseado con suficiente precisión y sin oscilaciones innecesarias en un tiempo aproximado de 20 minutos.

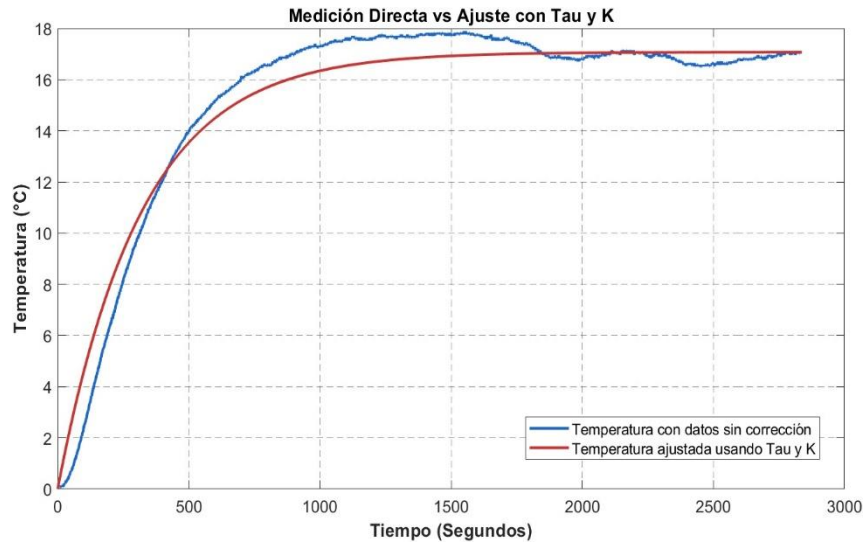


*Figura 23. Evolución de la entrada y salida en el control de temperatura*

La Figura 23 muestra la respuesta del sistema de control de temperatura en la cabina de pruebas fotovoltaicas. En esta gráfica, la parte superior representa la temperatura medida dentro de la cabina en grados Celsius, mientras que la parte inferior muestra la señal de control aplicada a la resistencia. En este caso, se utilizó una señal de tipo escalón en la entrada de control para observar cómo la temperatura se eleva y se estabiliza en respuesta a un cambio abrupto en la entrada.

Para capturar el comportamiento dinámico del sistema de control de temperatura en la cabina de pruebas, se llevaron a cabo experimentos en los que se registró la respuesta del sistema

ante una entrada de tipo escalón. En el caso de la resistencia, se aplicó un escalón en la señal de control, permitiendo observar cómo la temperatura se eleva y se estabiliza en el valor deseado, logrando una respuesta controlada y precisa.



**Figura 24. Medición directa vs ajuste de Tau y K.**

Esta respuesta permitió calcular los parámetros de ganancia estática del sistema ( $K$ ) y constante de tiempo ( $\tau$ ), obteniendo una ganancia de 0.5693 y una constante de tiempo de 5.28 minutos, lo cual representa el tiempo que el sistema tarda en alcanzar el 63% del cambio total en su respuesta. Con estos parámetros, se modeló el sistema utilizando una función de transferencia de primer orden:

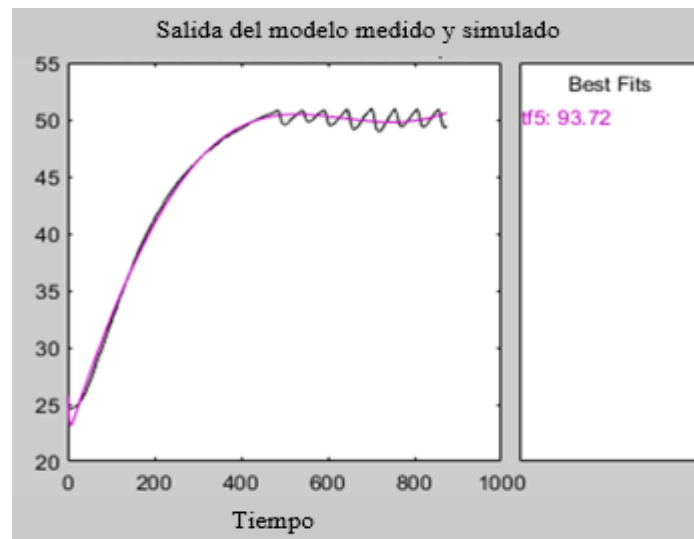
$$G(s) = \frac{0.5693}{317.73s + 1} \quad (9)$$

**Ecuación 9. Función de transferencia del sistema térmico**

En cuanto al ventilador, su funcionamiento es de tipo on-off, activándose únicamente cuando la temperatura en la cabina supera un umbral específico. Debido a que su control es discreto, no se aplicó una función de transferencia ni un proceso de identificación continua para el ventilador. En su lugar, el ventilador actúa como un mecanismo de enfriamiento adicional que se activa de forma binaria (encendido/apagado) cuando la temperatura excede el límite

establecido. Por lo tanto, la modelación del sistema se centra en la resistencia como el principal elemento de control térmico, mientras que el ventilador proporciona soporte en caso de sobrecalentamiento.

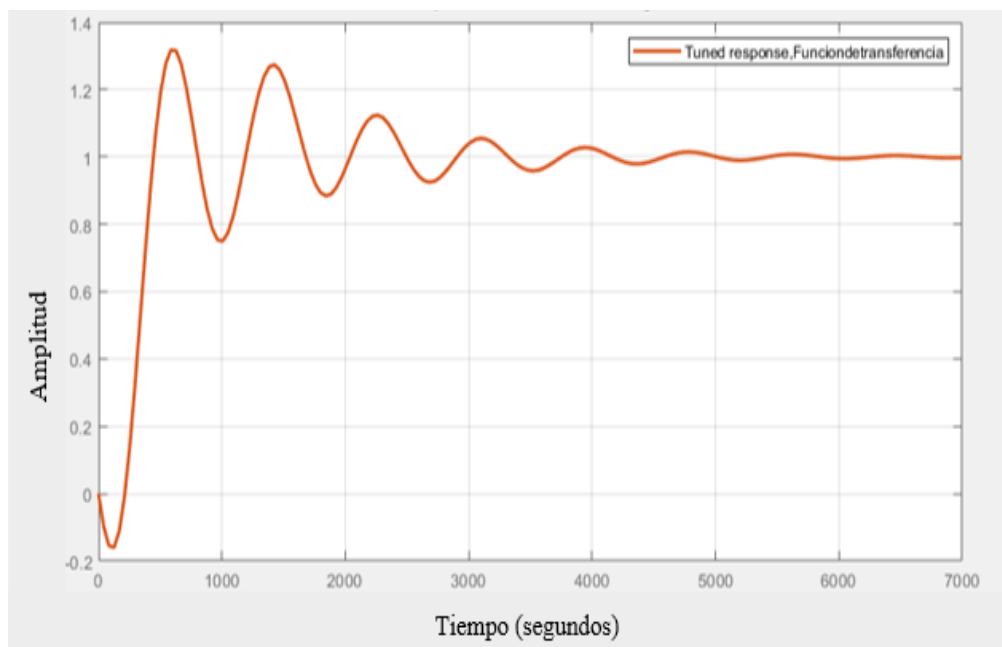
A partir de este modelo de primer orden para la resistencia, se utilizó la herramienta PIDtool para realizar la sintonización inicial del controlador PID, estableciendo los parámetros necesarios para lograr un control preciso de la temperatura en la cabina.



*Figura 25. Porcentaje de ajuste*

El controlador PID se configuró utilizando los términos proporcionales ( $K_p$ ), integral ( $K_i$ ) y derivativo ( $K_d$ ), que influyen en la forma en que el sistema responde al error en la temperatura. El término proporcional está relacionado con la respuesta inmediata al error presente; el término integral corrige errores acumulados a lo largo del tiempo, y el derivativo ayuda a prever los cambios futuros para evitar grandes oscilaciones.

Mediante simulaciones en Pidtool, se obtuvieron valores preliminares de las ganancias  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ . Los valores iniciales resultaron ser  $K_p=2.5$ ,  $K_i=0.7$  y  $K_d=0.4$ , los cuales proporcionaron un punto de partida para el ajuste posterior en el sistema real.



**Figura 26. PID valores iniciales**

Al implementar estos valores en el sistema físico, se observaron diferencias entre la simulación y el comportamiento real del sistema, debido a la naturaleza compleja y a factores no previstos en el modelo teórico, como límites reales de los actuadores. Para optimizar el control, fue necesario ajustar los valores de las ganancias mediante pruebas adicionales.

El ajuste de las ganancias se basó en pruebas controladas, siguiendo ciertos criterios de comportamiento que ayudaron a mejorar el rendimiento del sistema. Por ejemplo, al incrementar  $K_p$ , se mejoró la velocidad de respuesta del sistema, pero se tuvo cuidado de evitar que esto generara oscilaciones indeseadas. Con  $K_i$ , el enfoque fue minimizar el error en estado estacionario sin provocar inestabilidad, y con  $K_d$ , se ajustó para suavizar la respuesta del sistema y mitigar los cambios bruscos.

Después de varias pruebas, los valores de las ganancias se refinaron hasta llegar a una configuración final óptima. Los valores definitivos fueron  $K_p=3.0$ ,  $K_i=0.8$  y  $K_d=0.5$ . Estos valores permitieron al sistema alcanzar la temperatura deseada de  $50^{\circ}\text{C}$  de forma eficiente, con un tiempo de estabilización adecuado y sin un sobrepaso significativo



**Figura 27. PID valores finales**

Como resultado de estos ajustes, se logró una combinación balanceada entre la rapidez de respuesta y la estabilidad del sistema. La función de transferencia total del sistema, que incluye tanto la planta como el controlador PID, quedó definida como

$$G_{total} = \frac{1.7079 + 0.28465s + \frac{0.45544}{s}}{317.73s + 1} \quad (10)$$

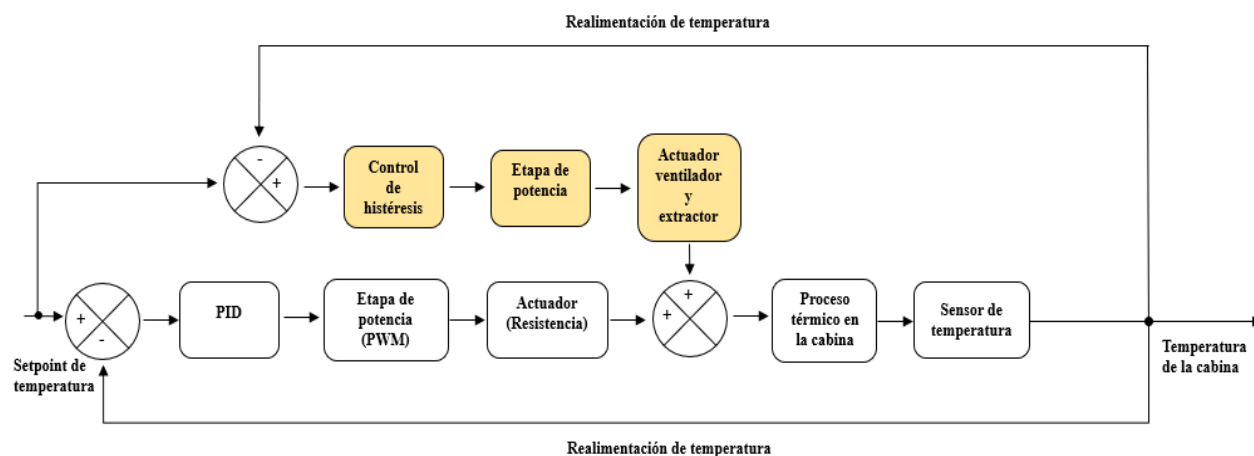
**Ecuación 10. Función de transferencia total del sistema con control PID**

Esta función representada en la Ecuación 10 el sistema bajo control reacciona a las entradas de control, teniendo en cuenta la influencia del controlador PID. El análisis de esta función confirma que el sistema cumple con los requisitos de estabilidad, tiempo de respuesta y precisión, permitiendo controlar la temperatura dentro del rango deseado con un mínimo margen de error.



## Sintonización control de Histéresis

Para la sintonización del controlador de histéresis, se definió un margen de activación y desactivación de  $0.8^{\circ}\text{C}$  por encima del punto de referencia, basado en las características dinámicas del sistema de control de temperatura.



*Figura 28. Controlador de histéresis y actuadores*

Este valor fue seleccionado después de realizar varias pruebas en las que se observaron las fluctuaciones naturales de la temperatura alrededor del punto de consigna y el tiempo de respuesta del sistema de calefacción.

La Figura 28 muestra un sistema de control de temperatura en la cabina mediante un esquema de retroalimentación. El sistema comienza con un punto de referencia de temperatura, que se compara con la temperatura actual de la cabina, generando una señal de error. Este error es procesado por un controlador PID que ajusta la señal hacia la etapa de potencia PWM, la cual activa el actuador de resistencia para aumentar la temperatura.

De forma paralela, un control de histéresis también influye en la etapa de potencia, que a su vez activa un ventilador y un extractor para regular la temperatura en caso de sobrecalentamiento. La temperatura de la cabina se mide mediante un sensor, cuya señal de retroalimentación permite ajustes continuos, manteniendo así la temperatura cercana al valor deseado. Este sistema asegura una regulación precisa de la temperatura en función de los parámetros establecidos.

*Tabla 4. Sintonización control Histéresis*

<b>Margen de Histéresis</b>	<b>Sobrepaso Observado</b>	<b>Tiempo de Estabilización (min)</b>	<b>Frecuencia de Activación del Ventilador</b>
0.2	4.0	25	Alta, se activa frecuentemente
0.5	3.5	20	Moderada, menos activaciones, pero aún inestable
<b>0.8</b>	<b>2.0</b>	<b>15</b>	<b>Baja, control eficiente y estable</b>
1.0	2.8	18	Baja, pero con sobrepaso notable
1.5	3.0	22	Muy baja, mayor sobrepaso, menor precisión

En la Tabla 4 se muestra el efecto de diferentes márgenes de histéresis en el desempeño de un sistema de control de temperatura, evaluando el sobrepaso observado, el tiempo de estabilización y la frecuencia de activación del ventilador. A menor margen de histéresis, el sobrepaso es más controlado, aunque el ventilador se activa con mayor frecuencia, mientras que un margen mayor reduce la frecuencia de activación, pero puede aumentar el sobrepaso y disminuir la precisión del control. La tabla ilustra cómo un margen de histéresis adecuado permite equilibrar la estabilidad, el sobrepaso y la frecuencia de activación del ventilador para lograr un control estable de la temperatura.

Se determinó que un margen de  $0.8^{\circ}\text{C}$  permitía un control eficiente al activar el sistema de calefacción únicamente cuando la temperatura excedía ese límite, evitando que el sistema se encendiera y apagara con demasiada frecuencia. Si se hubiese elegido un valor menor, el controlador podría haber sido demasiado sensible, lo que habría causado activaciones constantes y desgaste en los componentes del sistema. Por otro lado, un valor mayor podría haber permitido sobrepasos considerables antes de activar el control, comprometiendo la precisión del sistema. El valor de  $0.8^{\circ}\text{C}$  resultó ser el equilibrio ideal para mantener la estabilidad, evitar el sobrepaso y

reducir el tiempo de estabilización, todo esto sin afectar la vida útil de los componentes del sistema.

### **Integración del Controlador PID y el Controlador de Histéresis**

La unión de ambos controladores se llevó a cabo de forma secuencial. Mientras que el controlador PID regula de manera continua la temperatura dentro de un rango cercano al punto de referencia, el controlador de histéresis se encarga de activar o desactivar el sistema de calefacción únicamente cuando la temperatura sobrepasa el margen de  $0.8^{\circ}\text{C}$ . Esto permitió que el PID realizara los ajustes finos necesarios para mantener la precisión en el control de la temperatura, mientras que la histéresis actuaba como una capa adicional para prevenir oscilaciones más grandes y evitar el sobrepaso.

La lógica de operación resultante fue sencilla pero efectiva el controlador mantiene el control continuo, corrigiendo el error de forma suave, el controlador de histéresis supervisa el sistema y activa la calefacción solo cuando la temperatura supera el límite definido. Una vez que la temperatura baja al punto de referencia, el controlador de histéresis apaga el sistema, asegurando así un control eficiente sin generar ciclos innecesarios de encendido y apagado. Esta integración de ambos controladores permitió una regulación de la temperatura más estable y precisa.

Como resultado de la integración de ambos controladores, el sistema de control de temperatura fue capaz de mantener la temperatura dentro del rango deseado con alta precisión, sin sobrepasos significativos y con un tiempo de estabilización optimizado. El controlador PID proporcionó la corrección continua y precisa, mientras que el controlador de histéresis actuó como un mecanismo de protección para asegurar que el sistema operara de manera eficiente y estable a largo plazo.



*Figura 29. Interfaz de resultados*

La Figura 29 muestra el panel de control de un sistema de regulación de temperatura e irradiancia en una cabina de pruebas. En la pantalla se visualizan los valores de puntos de referencia para la temperatura e irradiancia, junto con las lecturas actuales del sistema. El panel también incluye un codificador rotativo que permite ajustar los valores de referencia, facilitando el control manual de los parámetros deseados en el sistema de pruebas.

#### B. Implementación del controlador

Para el sistema de control de temperatura de la cabina de pruebas de paneles fotovoltaicos, se seleccionaron componentes clave como sensores, relés de estado sólido, resistencias de calefacción y sistemas de ventilación. Estos elementos, conectados y gestionados por el controlador PID, permitieron un control preciso de la temperatura, garantizando estabilidad y respuesta rápida. En la Tabla 3 se presenta una lista de los principales componentes utilizados y sus especificaciones.

*Tabla 5. Componentes control temperatura*

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Rango de Operación</b>
Sensor de Temperatura (DS18B20)	1	-55°C a +125°C
Relé de Estado Sólido Trifásico (100A) ref. LCTH480100DA	1	24-480 VAC, 100A, Control 3-32VDC
Relé de Estado Sólido Monofásico (SSR-40 DA)	2	24-480 VAC, 40A, Control 3-32VDC
Resistencias (2000 Watts)	3	2000W
Ventilador Interno	1	220/240V, 2600 RPM, -10°C a 50°C
Extractor	1	220/240V, 2600 RPM, -10°C a 50°C

Los relés de estado sólido, tanto trifásico como monofásicos, se conectaron a las resistencias y al sistema de control basado en el sensor DS18B20. Estos componentes fueron ensamblados en la cabina junto con el ventilador y el extractor, garantizando una correcta distribución y extracción del calor.

Se recopilaron datos experimentales del comportamiento del sistema de calefacción, los cuales se utilizaron para diseñar el controlador PID, optimizando sus parámetros mediante simulaciones en MATLAB. La respuesta del sistema se ajustó utilizando pruebas de respuesta al escalón, lo que permitió verificar tanto la rapidez del calentamiento como la estabilidad del sistema al alcanzar el punto de referencia de temperatura.

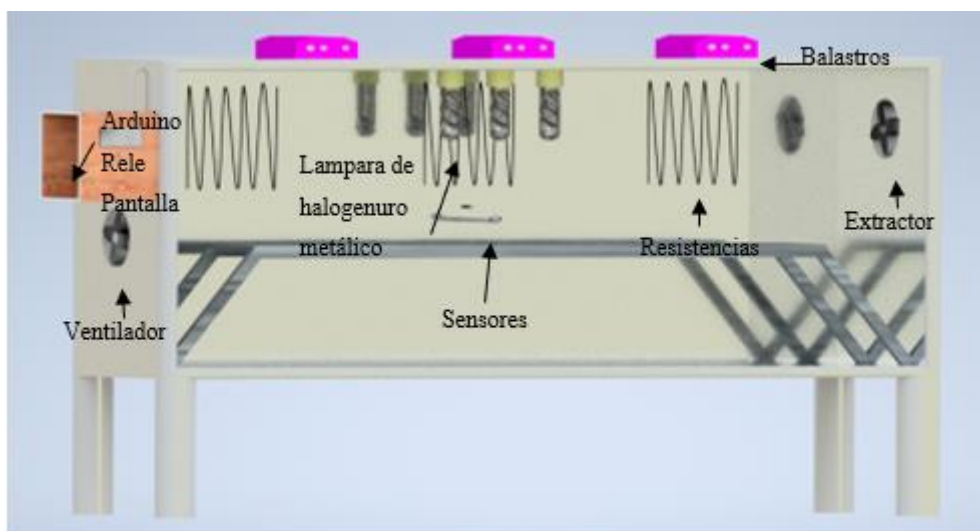
Se evaluó la capacidad del sistema para elevar la temperatura desde el ambiente hasta los 50°C en un tiempo máximo de 20 minutos. El sistema demostró una respuesta rápida, con un sobrepaso máximo controlado de 4°C, seguido de una estabilización dentro del margen permitido de  $\pm 2^\circ\text{C}$ .

Se llevaron a cabo pruebas de estabilización durante las cuales el sistema mantuvo la temperatura objetivo durante largos periodos sin fluctuaciones significativas. Se monitorearon los tiempos de respuesta del ventilador interno y del extractor, confirmando que el sistema era capaz de mantener la temperatura estable dentro del rango esperado.

### 5.1.2 Control en lazo abierto de la irradiancia

#### A. Diseño del mecanismo de automatización

La Figura 30 muestra el diseño interno de una cabina de pruebas, que incorpora diversos componentes necesarios para el control de temperatura e irradiancia. Se observa la ubicación de varios elementos clave, como el Arduino, los relés y la pantalla de control, que están instalados en la parte izquierda. También se identifican las lámparas de halogenuro metálico, montadas en la parte superior, y conectadas a balastos para controlar la potencia. Los sensores y resistencias están distribuidos en el interior de la cabina, aunque su disposición exacta no es clara, lo que podría dificultar la visualización de su ubicación en relación con los actuadores. En la parte lateral se encuentran el ventilador y el extractor, utilizados para regular el flujo de aire y mantener condiciones de temperatura controladas dentro de la cabina.



*Figura 30. Diseño estructural cabina de pruebas*

El sistema desarrollado permite la variación de la irradiancia en la cabina de pruebas dentro de un rango de  $220 \text{ W/m}^2$  a  $380 \text{ W/m}^2$ . Esta variación es ajustada manualmente por el usuario mediante una pantalla interactiva equipada con un codificador (codificador rotativo). El ajuste es preciso y está controlado por servomotores que regulan la posición de los balastos, lo cual permite modificar la potencia de las lámparas.



*Figura 31. Configuración setpoint de irradiancia*

Durante las pruebas, el sistema debe mantener la irradiancia seleccionada por el usuario con una tolerancia máxima de  $\pm 8 \text{ W/m}^2$ , lo que garantiza la consistencia del entorno de prueba. El sistema está provisto de una interfaz gráfica que facilita al usuario la selección y ajuste del valor de irradiancia deseado. A través del codificador rotativo, el usuario puede modificar manualmente los puntos de referencia (punto de referencias), y el microcontrolador Arduino Mega 2560 es responsable de procesar estas entradas y ejecutar las instrucciones correspondientes para el control de los servomotores.



*Figura 32. Diagrama de bloques control de irradiancia*

El sistema de control de irradiancia fue implementado como un sistema de lazo abierto. Aunque un control de lazo cerrado podría ofrecer mayores ventajas al permitir ajustes automáticos en tiempo real, no fue posible implementarlo debido a las características de los balastos utilizados, que solo permiten una variación discreta de la irradiancia en lugar de una variación continua. Estos balastos, al no contar con un mecanismo de ajuste progresivo, limitan

el sistema a niveles específicos de irradiancia, que se mantienen constantes durante cada experimento.

Para manejar estos niveles discretos, el microcontrolador Arduino Mega 2560 procesa las entradas del usuario a través de un codificador rotativo KY-040, ajustando la posición de los servomotores para seleccionar manualmente el valor de irradiancia deseado. A diferencia del control de temperatura, que requiere ajustes dinámicos para cumplir con los objetivos experimentales, la irradiancia se establece en un nivel fijo al inicio de cada experimento, eliminando la necesidad de retroalimentación continua. Esta configuración permite que el sistema funcione dentro de las limitaciones de los actuadores y garantiza que el usuario pueda predefinir el nivel de irradiancia sin necesidad de ajustes adicionales durante el desarrollo de las pruebas.

Para regular la irradiancia en la cabina, el sistema utiliza tres balastos que controlan la potencia de las lámparas de halogenuros metálicos. Uno de los balastos opera a una potencia fija de 400 W, mientras que los otros dos pueden variar su potencia entre dos niveles predefinidos de 250 W (mínimo) y 400 W (máximo), permitiendo distintas combinaciones de irradiancia.

Para una mejor comprensión, se recomienda revisar la Figura 33, que ilustra la disposición de los servomotores, su estructura de montaje y su interacción con las perillas de los balastos para controlar la irradiancia en la cabina de pruebas.



*Figura 33. Montaje del servomotor con el balasto para ajuste de irradiancia*



Los servomotores juegan un papel fundamental en este proceso, ya que están montados en una estructura que se adhiere directamente a las perillas de ajuste de los balastos. Al cambiar el ángulo de los servomotores, estos giran las perillas de los balastos, ajustando la potencia de salida de cada uno de ellos. Esto permite que el sistema cambie la irradiancia en la cabina según las selecciones realizadas en la interfaz de usuario. Este diseño garantiza un ajuste preciso de los niveles de irradiancia, sin la necesidad de un sistema de control en lazo cerrado.

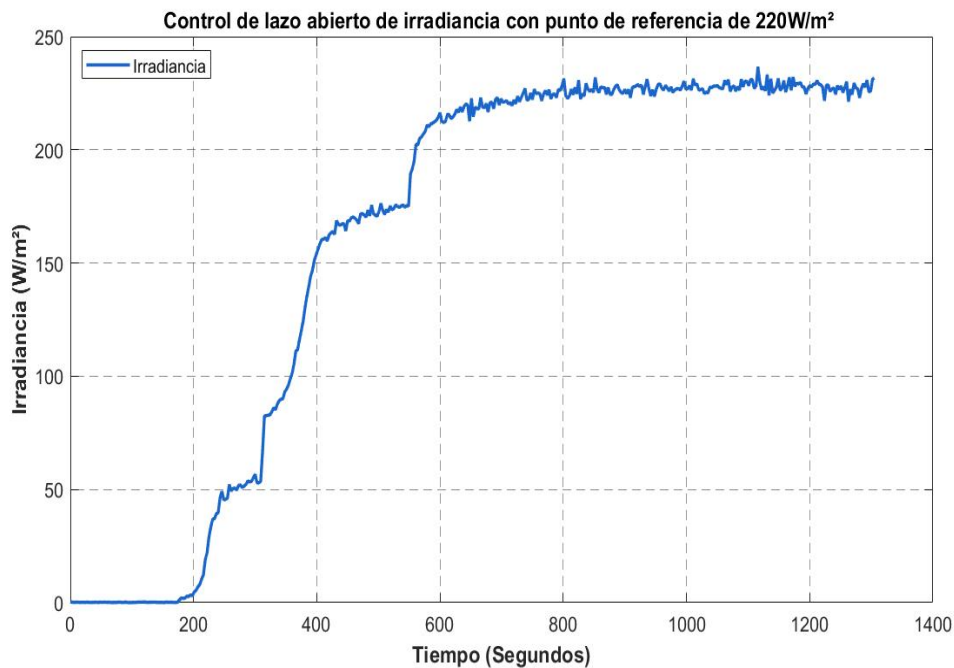
*Tabla 6. Tabla de irradiancias a partir de las potencias*

<b>Irradiancia</b>	<b>Balastro 1</b>	<b>Balastro 2</b>	<b>Balastro 3</b>
<b>220W/m<sup>2</sup></b>	250w	400w	250w
<b>300W/m<sup>2</sup></b>	250w	400w	400w
<b>380W/m<sup>2</sup></b>	400w	400w	400w

La Tabla 6 presenta combinaciones de potencia en tres balastos para lograr diferentes niveles de irradiancia en la cabina de pruebas. Cada fila muestra cómo configurar las potencias de los balastos para alcanzar irradiancias de 220 W/m<sup>2</sup>, 300 W/m<sup>2</sup> y 380 W/m<sup>2</sup>. A medida que se incrementa la irradiancia deseada, también se aumenta la potencia en los balastos, optimizando así la iluminación generada por el sistema.

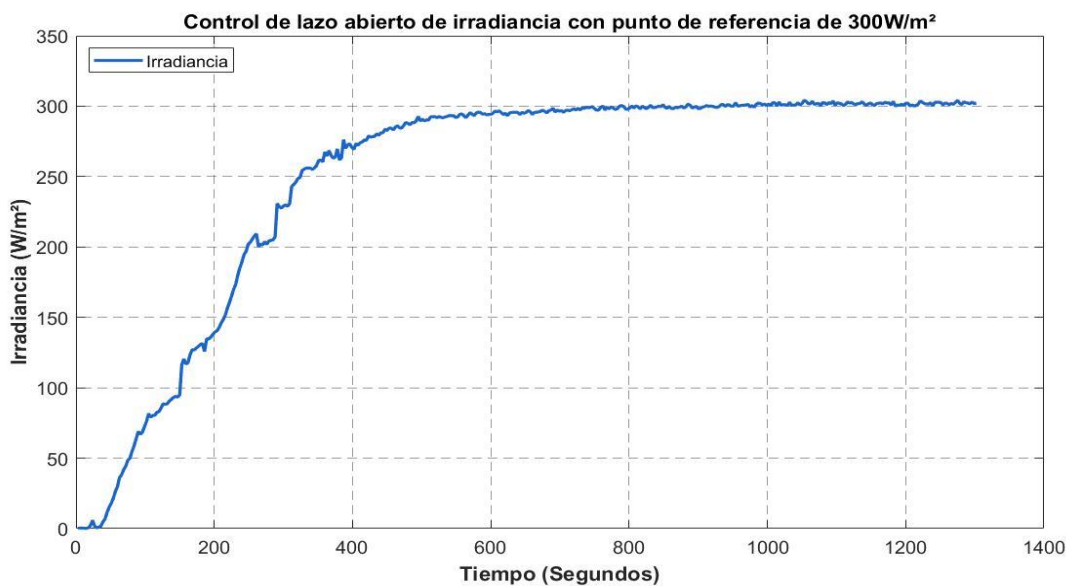
Esto significa que los balastos variables solo pueden tomar uno de estos dos valores de potencia, lo que establece claramente que la variación de irradiancia en el sistema es discreta. Al alternar entre estos dos niveles, los servomotores ajustan la potencia de las lámparas para cambiar la irradiancia en la cabina, permitiendo que el sistema funcione de manera estable y con un rango de ajuste limitado.

Figura 34 cuando ambos balastos variables están configurados en 220 W, la irradiancia en la cabina es baja.



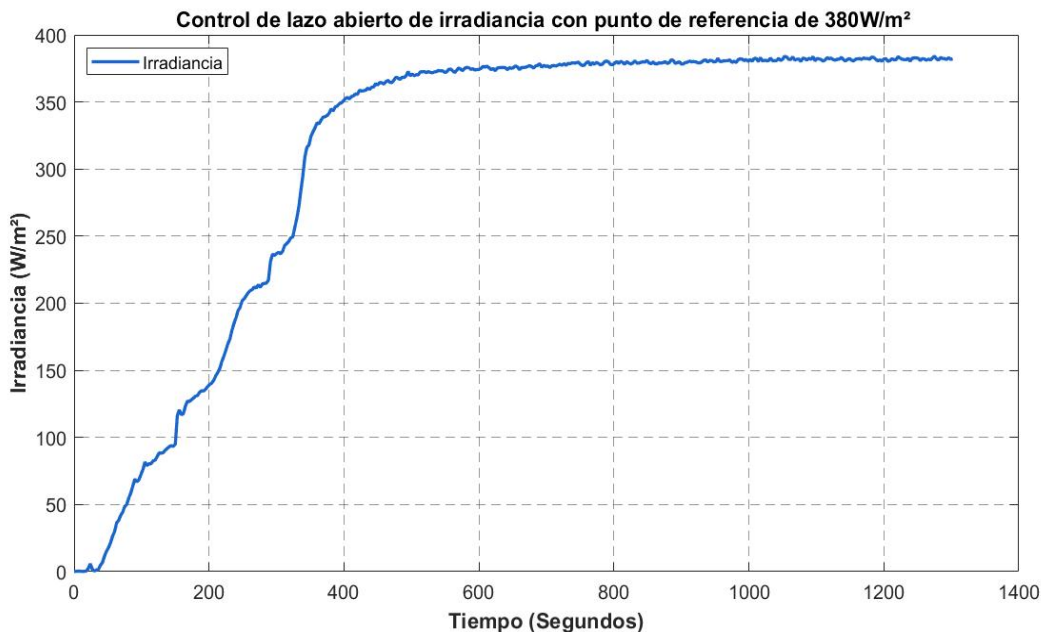
*Figura 34. Control de lazo abierto de irradiancia 220w/m*

Figura 35 cuando uno de los balastos variables está configurado en 300 W, la irradiancia en la cabina es media.



*Figura 35. Control de lazo abierto de irradiancia 300w/m*

Figura 36 cuando los dos balastos variables están configurados en 380 W, la irradiancia en la cabina es alta.



*Figura 36, Control de lazo abierto de irradiancia 380w/m*

Sin embargo, dado que solo existen dos valores posibles para los balastos variables, el ajuste de la irradiancia no es gradual, sino que se realiza en dos niveles discretos.

El sistema implementado permite que el usuario seleccione el nivel de irradiancia deseado mediante un codificador rotatorio KY-040, que se utiliza para navegar y seleccionar opciones en la interfaz de la pantalla. Este dispositivo permite al usuario girar un dial para desplazarse entre las diferentes configuraciones de irradiancia y presionarlo para confirmar la selección. Aunque el codificador KY-040 mide posiciones angulares, en este sistema no mide directamente la irradiancia. En su lugar, actúa como un dispositivo de entrada para que el usuario defina el valor de referencia de irradiancia en la pantalla.

Una vez que el usuario establece el valor de referencia, el codificador envía esta información al microcontrolador Arduino, que ajusta la posición de los servomotores en consecuencia. Esto permite alternar entre los dos valores de potencia disponibles (250 W y 400 W) en los balastos variables y cambiar la irradiancia en la cabina de acuerdo con la selección del usuario.

El algoritmo de control implementado en el microcontrolador Arduino recibe el valor de referencia de irradiancia definido por el usuario y ajusta los servomotores para activar los balastos en el nivel de potencia correspondiente. Aunque el sistema opera en lazo abierto, es decir, sin retroalimentación, esta estructura proporciona un control adecuado para las necesidades del sistema, ya que la relación entre la potencia de las lámparas y la irradiancia es directa. Cuando los balastos están en 250 W, la irradiancia es baja, y cuando se cambian a 400 W, la irradiancia aumenta proporcionalmente.

La implementación de un control en lazo cerrado para el sistema de irradiancia presenta limitaciones debido a las características de los balastos utilizados. Los balastos Lumatek instalados permiten ajustar la potencia de manera discreta, con niveles fijos de 250W, 400W. Esta configuración implica que el sistema no puede realizar ajustes continuos de potencia, lo cual es esencial para un control en lazo cerrado que pueda alcanzar y mantener un nivel de irradiancia exacto en todo momento.

Para automatizar el ajuste de estos niveles, se acopló un servomotor que permite modificar el dial de los balastos de manera remota, facilitando un cambio rápido y confiable entre los niveles de potencia disponibles. Este mecanismo permite que el sistema de control en lazo abierto gestione la irradiancia de manera estable y efectiva dentro de los parámetros de diseño, adaptándose a los requisitos específicos de las pruebas en la cabina.

Con este enfoque, el sistema asegura la operación en los niveles de irradiancia necesarios para los experimentos, aprovechando al máximo el hardware disponible. Así, el control en lazo abierto se presenta como una solución optimizada y adecuada para los recursos técnicos específicos de la cabina de pruebas, garantizando un control confiable y robusto conforme a los objetivos del proyecto.

## B. Implementación y programación

La Tabla 7 detalla los componentes utilizados para la automatización del sistema de irradiancia en la cabina de pruebas. Cada componente, incluyendo sensores, balastos y servomotores, contribuye al control preciso de la irradiancia, asegurando que se mantenga dentro de los niveles deseados para los experimentos. La tabla especifica la cantidad, rango de operación y características técnicas de cada uno de estos elementos.

*Tabla 7. Componentes automatización irradiancia*

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Rango de Operación</b>
Piranómetro (PYR20)	1	2000 W/m <sup>2</sup>
Balastro de 600W ref. Lumatek	1	600W, Frecuencia: 120KHz, 220-240V
Balastro modelo SW-400CF	1	400W, 50/60Hz, 220-240V
Balastro FOXLIGHT	1	400W, 50/60Hz, 220-240V
Servo Motores MG995	2	4.8V-7.2V

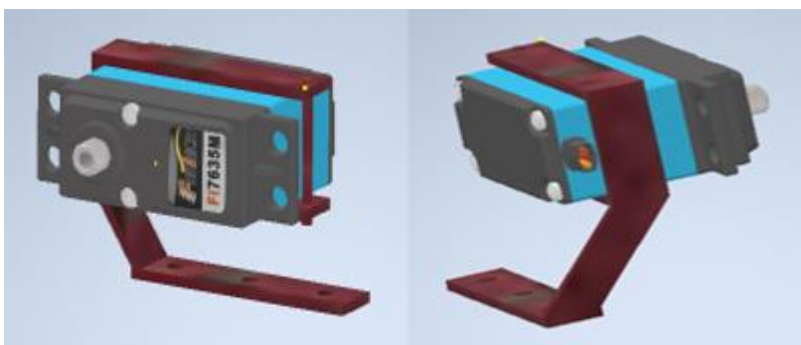
Se ensamblaron los componentes principales, incluyendo el Arduino Mega 2560, el codificador rotatorio y los servomotores. Estos fueron conectados al sistema de balastos que regulan la potencia de las lámparas, el código fue realizado para permitir que el Arduino Mega 2560 reciba las entradas del codificador rotatorio. El código fue diseñado para ajustar la posición de los servomotores en función del punto de referencia de irradiancia ingresado por el usuario.

Se implementaron instrucciones precisas para que los servomotores ajusten la configuración de los balastos de las lámparas, modificando así la potencia de las lámparas y alcanzando el nivel de irradiancia deseado. Cada servomotor está acoplado a la perilla de control del balastro, permitiendo que, al girar el servomotor a un ángulo específico, se seleccione uno de los niveles de potencia predefinidos (250W, 400W). Este cambio en el ángulo de la perilla modifica directamente la potencia de salida de las lámparas y, en consecuencia, la irradiancia en la cabina.

El usuario realiza un ajuste manual seleccionando el nivel de potencia deseado a través de la interfaz de usuario establecida en la pantalla. El Arduino envía instrucciones al servomotor para que mueva la perilla del balastro a la posición adecuada, ajustando así la irradiancia de acuerdo con la selección del usuario. Dado que el sistema utiliza balastos dimerizables con

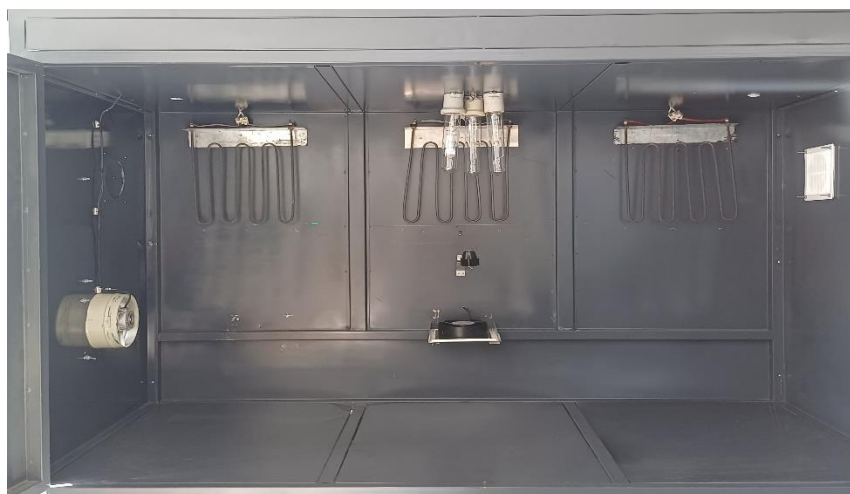
ajustes de potencia fijos, no se requiere retroalimentación en esta fase, ya que el sistema responde directamente al valor de potencia configurado por el usuario.

Además, se instaló una pantalla que muestra el nivel de irradiancia correspondiente al ajuste de potencia seleccionado, brindando una referencia visual y asegurando que el usuario esté al tanto del valor configurado en el sistema. Este diseño permite al usuario cambiar manualmente el nivel de irradiancia y supervisar el valor seleccionado, aunque sin ajustes automáticos, ya que los niveles disponibles están predefinidos por las posiciones de los balastros dimerizables



*Figura 37. Soporte de servomotores*

El codificador rotativo permite al usuario seleccionar un nivel de irradiancia deseado girándolo. Este dispositivo funciona enviando señales incrementales o decreméntales al Arduino, las cuales corresponden a distintos valores de irradiancia dentro del rango de 250 W/m<sup>2</sup> a 400 W/m<sup>2</sup>. Cuando el usuario gira el codificador, cada paso o posición del codificador representa un cambio en el valor de irradiancia.



*Figura 38. Interior cabina de pruebas de paneles fotovoltaicos*

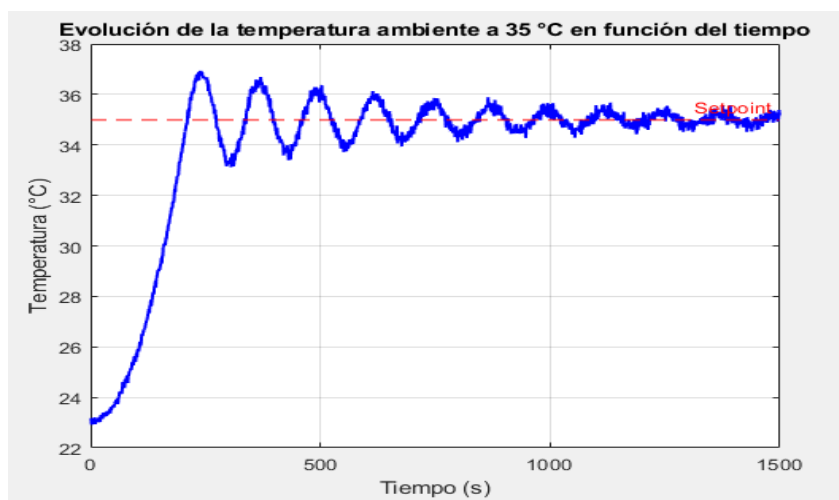
El Arduino recibe estas señales del codificador, interpreta el nivel de irradiancia seleccionado y traduce este valor en una señal de control específica para los servomotores. Los servomotores, a su vez, ajustan los balastos para modificar la irradiancia emitida en la cabina. Así, el codificador, el Arduino y los servomotores están coordinados en una secuencia de control en la que cada cambio en el codificador se traduce en una adaptación en los niveles de irradiancia mediante el ajuste físico de los componentes controlados por los servomotores.

Cada servomotor, acoplado a la perilla de ajuste del balastro, gira hasta el ángulo correspondiente para seleccionar uno de los niveles de potencia del balastro (por ejemplo, 250W, 400W). Al ajustar la potencia del balastro, se modifica la irradiancia en la cabina de acuerdo con el valor de referencia establecido por el usuario.

## 5.2 Evaluación del desempeño del sistema de control para la regulación de las variables irradiancia y temperatura.

### *Análisis de desempeño en la regulación de la temperatura a 35 grados*

La Figura 39 se muestra la evolución de la temperatura ambiente en función del tiempo, con un punto de referencia establecido en 35 °C. La curva azul representa la respuesta del sistema, que inicialmente aumenta hasta acercarse al valor de referencia y luego oscila antes de estabilizarse en torno al punto de referencia. Este gráfico permite observar la capacidad del sistema para alcanzar y mantener la temperatura deseada, así como la estabilidad y precisión de la regulación térmica.



*Figura 39. Evaluación temperatura en un punto de referencia bajo*

El error es la diferencia entre el valor deseado (punto de referencia) y el valor medido en cada instante de tiempo. La fórmula utilizada es.

$$e(t) = T_{ref} - T_{medido}(t) \quad (11)$$

*Ecuación 11. Cálculo del error en la temperatura*

En este análisis, el error fue calculado para cada punto de datos, lo que permitió identificar tanto los errores instantáneos como acumulativos.

El sobrepaso se refiere al valor máximo que la temperatura alcanzó por encima del punto de referencia durante la fase de calentamiento. Se calcula como.

$$Sobrepaso = T_{max} - T_{ref} \quad (12)$$

*Ecuación 12. Cálculo del sobrepaso de temperatura*

En este caso, el valor máximo de temperatura registrado fue de 36.38°C, resultando en un sobrepaso de:

$$36.38 - 35 = 1.38$$

Esto representa un sobrepaso del 3.94% respecto al valor de referencia, lo cual está dentro de un margen aceptable para sistemas de control de temperatura.

El tiempo de estabilización es el tiempo que tarda el sistema en mantener la temperatura dentro de un margen pequeño alrededor del punto de referencia, generalmente  $\pm 2\%$  del valor de referencia. Para este análisis, el margen considerado fue de  $\pm 0.7^\circ\text{C}$  alrededor de  $35^\circ\text{C}$  (2% de  $35^\circ\text{C}$ ).

Para calcular este tiempo, se identificó el primer instante en que la temperatura medida se mantuvo dentro del rango de  $34.3^\circ\text{C}$  a  $35.7^\circ\text{C}$  y no salió de ese rango posteriormente. En este caso, el tiempo de estabilización fue de 126 segundos (es decir, después de 126 segundos, la temperatura se mantuvo estable dentro del margen permitido).

La IAE mide el error acumulado a lo largo del tiempo. Se calcula como:

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (13)$$

*Ecuación 13. Integral del Error Absoluto (IAE)*



En este caso, se utilizó la regla del trapecio para aproximar la integral del error absoluto a partir de los datos discretos. El valor resultante fue:

$$IAE=1146.59$$

Esto refleja el error total acumulado durante toda la prueba, con valores más bajos indicando mejor desempeño.

La ITAE penaliza más los errores que persisten por más tiempo. La fórmula es.

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)|dt \quad (14)$$

*Ecuación 14. Integral del Error Absoluto Ponderado por el Tiempo (ITAE)*

En este caso, también se aplicó la regla del trapecio para aproximar esta integral. El valor obtenido fue:

$$ITAE=160,915.4$$

Un valor bajo de ITAE indica que los errores fueron corregidos rápidamente, mientras que un valor alto sugiere que los errores se prolongaron en el tiempo.

Integral del Uso del Actuador (IAU)

La IAU es una métrica que evalúa el esfuerzo realizado por el actuador (en este caso, las resistencias de calefacción). Aunque no se disponía de datos directos sobre el uso del actuador, se asumió que este es proporcional al error, ya que el sistema ajusta la potencia en función del error. Por tanto, se calculó como.

$$IAU = \int_0^T |e(t)|dt \quad (15)$$

*Ecuación 15. Integral del Uso del Actuador (IAU)*

El valor obtenido fue 1146.59, igual al IAE, debido a la correlación directa entre el error y el esfuerzo del actuador en este caso.

## Evaluación de los resultados

A continuación, se realiza la evaluación del desempeño del sistema de control, con los parámetros calculados:

**Sobrepaso:** El valor del sobrepaso fue de  $1.38^{\circ}\text{C}$ , lo que representa un 3.94% por encima del punto de referencia de  $35^{\circ}\text{C}$ . Este valor es relativamente bajo y sugiere que el sistema es capaz de alcanzar la temperatura objetivo sin grandes oscilaciones. Un sobrepaso inferior al 5% se considera generalmente aceptable en sistemas de control de temperatura, lo que indica que el sistema tiene un buen rendimiento.

**Tiempo de estabilización:** El sistema logró estabilizarse en aproximadamente 126 segundos. Este es un tiempo bastante rápido para este tipo de control, lo cual es favorable. Los tiempos de estabilización más largos podrían indicar una respuesta lenta del sistema, pero en este caso, el sistema mostró una rápida convergencia hacia el punto de referencia.

**IAE:** El valor de 1146.59 para el IAE sugiere que, aunque el error fue corregido rápidamente, hubo una acumulación significativa de error en los primeros instantes de la prueba (durante la fase de calentamiento). No obstante, este valor es razonable para este tipo de sistemas y está dentro de lo esperado para la regulación de la temperatura en este rango.

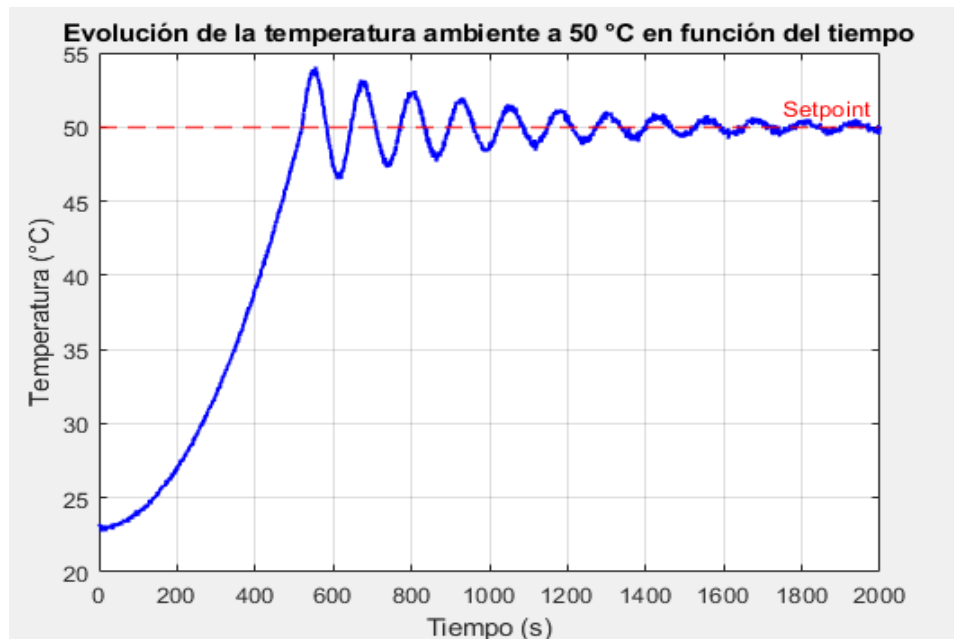
**ITAE:** Un ITAE de 160,915.4 indica que el sistema penaliza más los errores en el tiempo, lo cual es deseable. Un valor más bajo de ITAE indicaría que el error fue corregido de manera aún más eficiente. Sin embargo, este valor se considera aceptable dado que los errores se corrigieron relativamente rápido.

**IAU:** Aunque el IAU es igual al IAE debido a la suposición de proporcionalidad, el valor indica que el sistema necesitó un esfuerzo moderado para corregir el error durante el proceso de control de la temperatura. Esto es consistente con el comportamiento esperado de un sistema que ajusta su potencia en función del error.

### *Análisis de desempeño en la regulación de la temperatura a 50 grados*

La Figura 40 muestra la evolución de la temperatura ambiente en función del tiempo, con un punto de referencia fijado en  $50^{\circ}\text{C}$ . La curva azul representa la respuesta del sistema, que inicialmente sube hasta aproximarse al valor de referencia y luego presenta oscilaciones antes de estabilizarse alrededor del punto de referencia. Este gráfico permite analizar la eficacia del

sistema en alcanzar y mantener la temperatura objetivo, evaluando su capacidad de control y estabilidad térmica.



*Figura 40. Evaluación temperatura en un punto de referencia alto*

El valor del sobrepaso fue de 1°C, lo que representa un 2% por encima del punto de referencia de 50°C. Este valor es bajo y sugiere que el sistema es capaz de alcanzar la temperatura objetivo sin grandes oscilaciones. Un sobrepaso inferior al 5% es generalmente aceptable en sistemas de control de temperatura, lo que indica que el sistema tiene un buen rendimiento.

El sistema logró estabilizarse en aproximadamente 389 segundos. Este tiempo es más largo en comparación con el punto de referencia de 35°C, lo que puede sugerir que el sistema requiere más tiempo para alcanzar la estabilidad a temperaturas más altas. No obstante, este tiempo de estabilización sigue siendo razonable para este tipo de aplicación.

El valor de 4514.14 para el IAE sugiere una acumulación significativa de error a lo largo del tiempo, lo que es esperable dado que el sistema tuvo que superar un margen mayor de temperatura para alcanzar los 50°C. Este valor indica que el sistema tuvo que realizar ajustes más prolongados en esta prueba.

El valor del ITAE fue de 645,407.4, lo que indica que el sistema penaliza más los errores que persistieron durante un tiempo considerable. Este valor es significativamente más alto que en

la prueba de 35°C, lo que sugiere que el sistema requirió más tiempo para corregir los errores a 50°C.

Aunque el IAU es igual al IAE debido a la suposición de proporcionalidad, este valor indica que el sistema necesitó un esfuerzo considerable para corregir el error durante el proceso de control de la temperatura a 50°C. Esto es consistente con un proceso que requiere más energía para alcanzar una temperatura objetivo más alta.

*Tabla 8. Desempeño del control de temperatura 35°C vs 50°C*

<b>Parámetro de evaluación</b>	<b>Punto de referencia: 35°C</b>	<b>Punto de referencia: 50°C</b>
<b>Sobrepaso (°C)</b>	1,38	1
<b>Sobrepaso (%)</b>	3.94%	2.0%
<b>Tiempo de Estabilización (s)</b>	126	389
<b>IAE</b>	1146,59	4514,14
<b>ITAE</b>	160915,4	645407,4
<b>IAU</b>	1146,59	4514,14

#### *Tiempos de Estabilización de la Irradiancia*

Durante las pruebas, se evaluó el tiempo que tarda el sistema en estabilizar la irradiancia dentro de la cabina de pruebas tras realizar ajustes de los balastos. Se identificaron tres configuraciones principales de irradiancia (220 W/m<sup>2</sup>, 240 W/m<sup>2</sup> y 380 W/m<sup>2</sup>), y se registró el tiempo necesario para que el sistema alcanzara el punto de referencia deseado con una tolerancia máxima de  $\pm 8$  W/m<sup>2</sup>.

En promedio, el tiempo de estabilización de la irradiancia fue de:

220 W/m<sup>2</sup>: 291 segundos

300 W/m<sup>2</sup>: 342 segundos

380 W/m<sup>2</sup>: 789 segundos

La diferencia en el tiempo de estabilización se debe a la inercia térmica de las lámparas de halogenuros metálicos, ya que alcanzar niveles más altos de irradiancia requiere un mayor ajuste de los balastos y, por ende, más tiempo para estabilizar la potencia de las lámparas.

Variabilidad Máxima y Mínima Después de la Estabilización

Una vez que la irradiancia se estabilizó, se evaluó la variabilidad del sistema para mantener la irradiancia constante durante periodos prolongados. Se encontró que la variabilidad osciló de la siguiente manera:

Variabilidad Máxima: +6 W/m<sup>2</sup> por encima del punto de referencia, en condiciones de máxima potencia (380 W/m<sup>2</sup>).

Variabilidad Mínima: -4 W/m<sup>2</sup> por debajo del punto de referencia, en condiciones de mínima potencia (220 W/m<sup>2</sup>).

Esta variabilidad es aceptable dentro del margen de tolerancia predefinido de  $\pm 8$  W/m<sup>2</sup>, lo que indica que el sistema mantiene una irradiancia estable con mínimos desvíos una vez alcanzado el punto de referencia

La Tabla 9 presenta los resultados de la eficacia de irradiancia, calculada tomando como referencia tres valores específicos de irradiancia ( $V_{pi}$ ) y comparándolos con los valores de irradiancia entregada ( $V_{ci}$ ) en el sistema. Cada punto de referencia (240, 300 y 385) representa un valor de irradiancia de referencia, mientras que los valores de irradiancia entregada muestran la salida del sistema para cada uno de esos puntos. Para obtener estos resultados, se tomaron aproximadamente 40 datos en cada punto de referencia y se calculó un promedio representativo. Luego, la eficacia de irradiancia se determinó usando la Ecuación 8.

*Tabla 9. Tabla de eficacia de irradiancia*

<b>Irradiancia de referencia (<math>V_{pi}</math>)</b>	<b>Irradiancia entregada (<math>V_{ci}</math>)</b>	<b>Eficacia de irradiancia (%)</b>
240	221.98	92.49
300	276.02	92.00
385	345.7	89.79

La Tabla 10 presenta los resultados de la eficacia de temperatura, calculada tomando como referencia tres valores específicos de temperatura ( $V_{pt}$ ) y comparándolos con los valores de temperatura entregada ( $V_{ct}$ ) en el sistema. Cada punto de referencia (25.0, 35.0 y 50.0) representa un valor de temperatura de referencia, mientras que los valores de temperatura entregada muestran la salida del sistema para cada uno de esos puntos. Para obtener estos

resultados, se tomaron aproximadamente 40 datos en cada punto de referencia y se calculó un promedio representativo. Luego, la eficacia de temperatura se determinó usando la Ecuación 8.

*Tabla 10. Tabla de eficacia de temperatura*

<b>Temperatura de referencia (Vpt)</b>	<b>Temperatura entregada (Vct)</b>	<b>Eficacia de temperatura (%)</b>
25.0	23.5	94.0
35.0	33.93	96.94
50.0	48.4	96.8

La Tabla 11 presenta los resultados de la eficacia total, calculada tomando como referencia tres valores específicos de irradiancia (Vpi) y temperatura (Vpt) y comparándolos con los valores de irradiancia entregada (Vci) y temperatura entregada (Vct) en el sistema. Cada punto de referencia (240, 300 y 385 para irradiancia; 25.0, 35.0 y 50.0 para temperatura) representa valores de referencia que se contrastan con los valores de salida del sistema para cada caso.

Es importante señalar que, para evaluar la eficacia, se utilizó el tiempo de asentamiento como criterio. Se consideraron los valores registrados después de que las variables alcanzaron un margen estable alrededor de sus valores de referencia, sin presentando algunas fluctuaciones. Esto garantiza que los resultados reflejen condiciones controladas del sistema, minimizando la influencia de variaciones transitorias en los cálculos de eficacia.

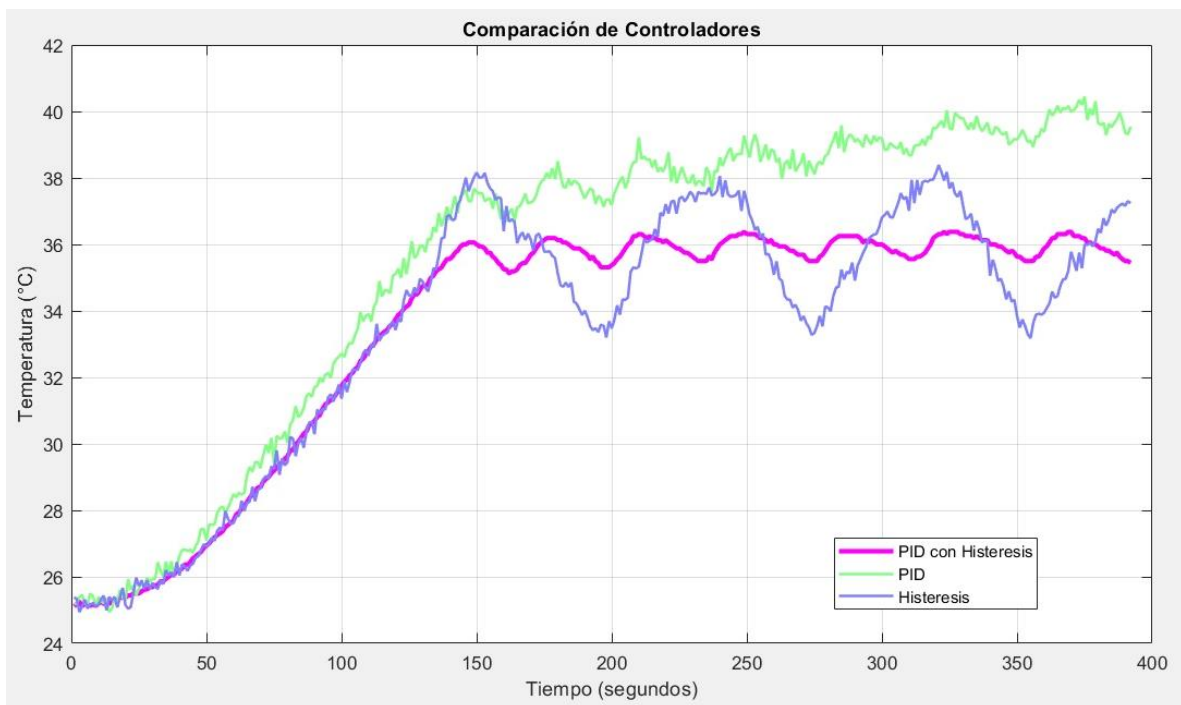
*Tabla 11. Tabla de eficacia completa de los controladores*

<b>Irradiancia de referencia (Vpi)</b>	<b>Irradiancia entregada (Vci)</b>	<b>Temperatura de referencia (Vpt)</b>	<b>Temperatura entregada (Vct)</b>	<b>Eficacia total (%)</b>
240	221.98	25.0	23.5	86.94
300	276.02	35.0	33.93	89.19
385	345.7	50.0	48.4	86.91

## 6. Análisis de Resultados

En el presente estudio, se ha realizado una comparación exhaustiva de tres enfoques de control de temperatura ampliamente utilizados en sistemas de regulación térmica: el controlador basado exclusivamente en histéresis, el controlador proporcional-integral-derivativo (PID), y una combinación de ambos métodos (PID + histéresis). La motivación detrás de esta investigación es identificar el enfoque que ofrezca el mejor desempeño en la regulación de temperatura, maximizando la estabilidad y precisión del sistema mientras se minimizan las fluctuaciones y el desgaste de los componentes.

El objetivo de esta comparación fue, por lo tanto, evaluar cuál de estos enfoques proporciona el mejor desempeño en términos de regulación de temperatura, utilizando métricas clave como el tiempo de respuesta, el sobreimpulso, la estabilidad y la precisión. Los resultados obtenidos permitirán establecer una recomendación fundamentada sobre el tipo de controlador más adecuado para aplicaciones que requieren un control de temperatura confiable, considerando tanto las características del sistema como los requerimientos específicos de desempeño.



**Figura 41. Resultado y comparación de los controladores**

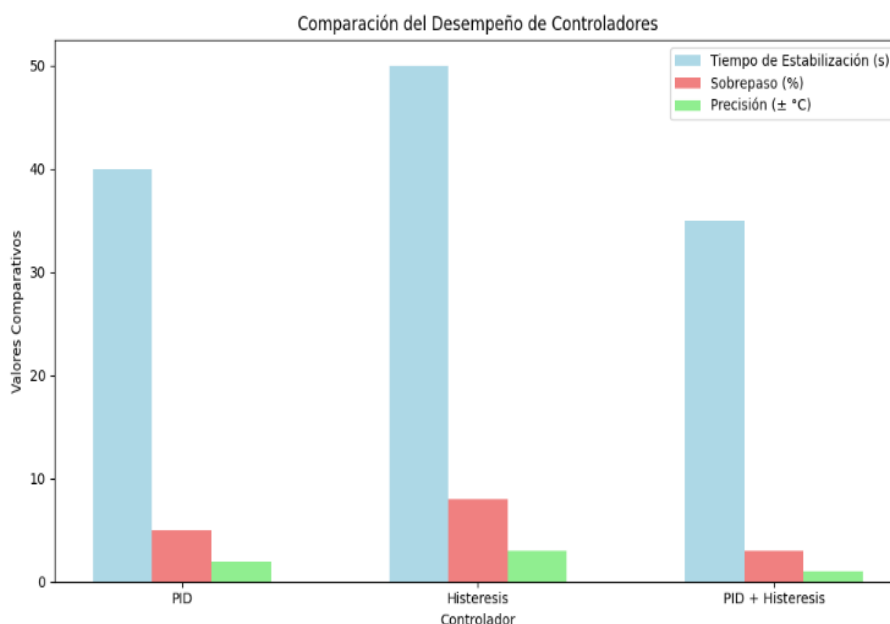
La Figura 41 se compara el desempeño de tres controladores: PID con histéresis (magenta), PID sin histéresis (verde) y control por histéresis (azul). Se observa que el PID con histéresis logra una mayor estabilidad en la temperatura, mientras que los otros presentan más fluctuaciones. Esto permite evaluar la eficacia de cada método de control en la regulación térmica.

El controlador de histéresis se caracteriza por su simplicidad y robustez, sin embargo, presenta importantes desventajas en aplicaciones donde la precisión y rapidez son esenciales. Uno de los problemas más notables es su tiempo de respuesta lento, ya que el sistema tiende a reaccionar de forma tardía a cambios rápidos en la temperatura. Además, se observó un alto sobre impulso, lo que genera fluctuaciones significativas antes de que el sistema se estabilice dentro de la banda de histéresis. En cuanto a la precisión, la histéresis mantiene la temperatura dentro de un margen aceptable, pero no es adecuado para aplicaciones que requieren un control fino y constante.

El controlador PID mostró un mejor desempeño en términos de precisión y tiempo de respuesta. Gracias a su capacidad de ajuste continuo, el PID es capaz de corregir rápidamente desviaciones de la temperatura objetivo. No obstante, su principal desventaja es la tendencia a generar oscilaciones antes de estabilizarse, lo que puede causar problemas en aplicaciones donde la estabilidad inmediata es crucial. Además, la correcta sintonización de los parámetros PID es un desafío, ya que una mala configuración puede comprometer su efectividad.

El controlador PID con un controlador de histéresis resultó ser la solución más adecuada para lograr una regulación de temperatura precisa y estable en la cabina de pruebas fotovoltaicas. La combinación permitió aprovechar las fortalezas de ambos controladores: el PID aportó la precisión necesaria mediante ajustes continuos, mientras que el controlador de histéresis actuó como una capa de protección adicional, reduciendo las oscilaciones y evitando un sobrepaso significativo.





**Figura 42. Comparación desempeño de los controladores**

En la Figura 42, el diagrama de barras ilustra visualmente las diferencias entre los tres controladores, facilitando su comparación y destacando el rendimiento superior del controlador PID con Histéresis. Los datos en la Figura 42 confirma que el controlador combinado de PID con Histéresis es la opción más adecuada para sistemas de regulación de temperatura que requieren estabilidad, precisión y un tiempo de respuesta óptimos.

**Tabla 12. Comparación de desempeño controladores**

Controlador	Tiempo de Estabilización (s)	Sobrepasso (%)	Precisión de Control (± °C)
PID	40	5	±2
Histéresis	50	8	±3
PID + Histéresis	35	3	±1

En la Tabla 12 se comparan los tres controladores (PID, Histéresis y PID con Histéresis) en términos de tiempo de estabilización, sobrepasso y precisión. El controlador PID con Histéresis destaca con un tiempo de estabilización de 35 segundos, un sobrepasso del 3% y una

precisión de  $\pm 1^\circ\text{C}$ , lo que lo convierte en la opción más eficiente para lograr un control rápido y preciso de la temperatura.

A lo largo del desarrollo del proyecto, se presentaron varios inconvenientes que debieron ser resueltos para optimizar el desempeño del sistema de control de temperatura e irradiancia en la cabina de pruebas de paneles fotovoltaicos. Estos problemas surgieron tanto a nivel estructural como en la implementación del sistema de control y la alimentación de los componentes.

Uno de los primeros desafíos fue la disposición inicial de los ventiladores dentro de la cabina. En la configuración original, el ventilador se encontraba demasiado cerca del sensor de temperatura (DS18B20), lo que causaba fluctuaciones significativas en la lectura del sensor debido a la corriente de aire directa sobre este. Para corregir este problema, fue necesario reubicar el ventilador a una posición más adecuada. Adicionalmente, se identificó una distribución desigual de la temperatura en diferentes áreas de la cabina, lo que afectaba la uniformidad de las pruebas. Para mitigar este inconveniente, se incorporó un ventilador adicional que funcionaba como mezclador, ayudando a distribuir el aire caliente de manera uniforme por todo el interior de la cabina, garantizando así que la temperatura fuera homogénea en todos los sectores.

En cuanto al sistema de irradiancia, uno de los inconvenientes principales fue la ubicación y separación de las lámparas de halógenos metálicos. Inicialmente, las lámparas estaban demasiado separadas, lo que provocaba que el piranómetro (PYR20), encargado de medir la irradiancia, solo registrara la irradiancia de la lámpara más cercana. Esta situación comprometía la precisión de la medición, ya que no se capturaba adecuadamente la irradiancia total en el interior de la cabina. La solución fue reducir la separación entre las lámparas y reubicar el piranómetro en un punto equidistante a todas las fuentes de luz, lo que permitió una medición más precisa y estable de la irradiancia disponible en la cabina.

Otro de los desafíos significativos surgió al momento de alimentar los diferentes componentes del sistema, como los sensores, el piranómetro, la pantalla, los relés y otros elementos conectados al microcontrolador Arduino Mega 2560. La sobrecarga generada por la pantalla y los relés causaba inestabilidad en el sistema, provocando fallos en la lectura de datos y control. Para resolver este problema, fue necesario implementar fuentes de alimentación independientes para varios de los componentes, reduciendo así la carga sobre el Arduino y mejorando la estabilidad del sistema.

En cuanto al sistema de control, inicialmente se optó por implementar un controlador de histéresis para la regulación de la temperatura. Si bien este controlador ofrecía una estructura simple y robusta, las pruebas revelaron que presentaba fluctuaciones excesivas en torno al punto de referencia de temperatura. El sistema encendía y apagaba los relés con demasiada frecuencia, lo que resultaba en un control impreciso y oscilante.

Posteriormente, se decidió probar con un controlador PID, el cual proporcionó un control más preciso al ajustar continuamente las variables del sistema. Sin embargo, este enfoque trajo consigo un tiempo de estabilización más largo y un sobrepaso mayor de la temperatura objetivo, lo que no era ideal para las necesidades del proyecto.

Finalmente, se decidió combinar las ventajas de ambos controladores: el control PID, que proporcionaba mayor precisión y un ajuste continuo, con el control de histéresis, que prevenía sobrepasos importantes y mantenía la estabilidad del sistema. Esta combinación permitió desarrollar un controlador híbrido que ofreció una mayor precisión, una respuesta más rápida y un menor sobrepaso, optimizando tanto el tiempo de estabilización como la vida útil de los componentes del sistema al reducir las activaciones innecesarias.

En el sistema de control implementado para la cabina de pruebas de paneles fotovoltaicos, se optó por una solución basada en un controlador PID combinado con histéresis, evitando el uso de controladores más complejos como los predictivos o difusos (Fuzzy). Esta decisión se justifica por el desempeño adecuado del PID junto con la histéresis, que ya proporciona el equilibrio óptimo entre precisión y estabilidad.

Además, los componentes utilizados, como las resistencias de calefacción, no son particularmente rápidos en su respuesta, ya que tienen un tiempo elevado tanto para calentar como para enfriar. Esto hace que controladores más avanzados, como los predictivos, resulten innecesarios, ya que sus rápidos ajustes no tendrían un impacto significativo en el desempeño del sistema debido a la naturaleza lenta de los componentes.

Controladores más sofisticados tienden a realizar ajustes más frecuentes, lo que podría generar un desgaste acelerado en los relés y otros componentes, afectando su durabilidad. El sistema actual, al operar de manera más gradual y estable, no somete a los componentes a un estrés innecesario, prolongando su vida útil.

## Conclusiones

El sistema implementado para la regulación de la irradiancia y la temperatura demostró cumplir con los objetivos planteados de manera satisfactoria. La integración del controlador PID con la automatización de los balastos permitió un control preciso de las variables, con un sobrepaso dentro de márgenes aceptables y tiempos de estabilización rápidos.

La cabina de pruebas permite replicar condiciones controladas, cruciales para estudiar el comportamiento de los paneles solares bajo diversas condiciones de irradiancia y temperatura. Esto posibilita investigaciones futuras orientadas a mejorar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos sin depender de factores ambientales impredecibles

El diseño de controladores y la arquitectura modular del sistema lo hacen fácilmente adaptable a nuevas necesidades, lo cual permite ajustes según el tipo de panel solar o los objetivos de cada experimento. Esto abre la puerta a personalizaciones y mejoras continuas.

El uso de esta cabina de pruebas también contribuye a la investigación y desarrollo de energías renovables, alineándose con la creciente demanda de soluciones sostenibles y menos contaminantes para la producción de energía.

## Recomendaciones

Desarrollar mejoras en el sistema para ampliar el rango de operación de temperatura e irradiancia, permitiendo pruebas en condiciones más extremas, como simulaciones de entornos con radiación solar alta o temperaturas bajo cero. Esta expansión estuvo limitada por el actuador, específicamente el balastro, que restringe la capacidad del sistema para alcanzar niveles de irradiancia y temperatura más elevados.

Aunque los sensores actuales han demostrado ser efectivos, se recomienda la inclusión de otros sensores, como los de humedad o presión atmosférica, para obtener un control más preciso de las variables ambientales dentro de la cabina y estudiar el impacto de otras condiciones climáticas en el rendimiento de los paneles fotovoltaicos. No obstante, estos sensores adicionales no tendrían una relación directa con la generación de potencia, ya que no influyen en el funcionamiento del controlador principal; su función sería únicamente monitorear variables adicionales para un análisis más completo del entorno.

Desarrollar un sistema de alertas que notifique al operador en caso de que las variables se salgan de los rangos esperados o que se produzcan fallos en los componentes, como los servomotores o relés. Estas alarmas podrían ser enviadas mediante notificaciones a dispositivos móviles o correos electrónicos.

Se sugiere la integración de un sistema que permita almacenar de manera continua y segura los datos generados por los sensores de irradiancia y temperatura durante las pruebas. Este sistema podría consistir en una base de datos local o en la nube, donde se guarden los datos de cada experimento, permitiendo su análisis posterior.

## Bibliografía

- [1] F. javier Erazo Checa, O. ferledy Erazo de la cruz, and E. Escobar Rosero, *Energía fotovoltaica modelos y respuestas a condiciones meteorológicas*. 2017.
- [2] Programa de Ingeniería Electrónica, “Proyecto Educativo del programa. Pasto: Universidad CESMAG.,” p. 67, 2015.
- [3] Z. Arifin, I. W. Kuncoro, and M. Hijriawan, “Revista internacional de calor y tecnología,” vol. 39, pp. 1741–1747, 2021.
- [4] R. Castañeda and A. Nava, “Sistema de control de aire y temperatura para una cabina de pintura, controlada por medio de un dispositivo móvil.,” 2018, [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Reference/ClientPrint>
- [5] D. Martinez, “Diseño e implementación de un sistema electrónico para el control de luminosidad, temperatura y humedad ambiental para el Terrario de orquídeas Telipogon en el Jardín Botánico de Quito.,” pp. 27–28, 2017.
- [6] E. C. Damian and F. Sangucho, “Controlador PID de temperatura tipo didactico,” 1999.
- [7] Z. Liu, L. Chang, Z. Luo, and F. Ning, “Design of vehicle-mounted medical temperature control system,” *Proc. - 2016 6th Int. Conf. Instrum. Meas. Comput. Commun. Control. IMCCC 2016*, vol. 1, pp. 57–60, 2016, doi: 10.1109/IMCCC.2016.183.
- [8] M. Translated, M. Kermadi, and E. M. Berkouk, “Reseñas renovables y sostenibles Marca de la cruz,” 2017.
- [9] M. Translated and G. Kashweka, “de la luz y las sombras artificiales en Paneles Solares Fotovoltaicos,” 2013, doi: 10.5923/j.ijee.20130301.03.
- [10] X. Alvarez Brotons, “Control predictivo de canales de riego utilizando modelos de predicción de tipo Muskingum (primer orden) y de tipo Hayami (segundo orden),” *Esc. Tècnica Super. d’Enginyers Camins, Canals i Ports Barcelona - Eng. Camins, Canals i Ports*, vol. 2240, pp. 5–12, 2004.
- [11] M. Gamboa, “Universidad de Costa Rica Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Eléctrica Análisis y configuración del sistema de control digital Cactus Mónica Loría Gamboa Análisis y configuración del sistema de control digital Cactus,” 2009.
- [12] B. Kuo, “Sistemas de Control Automático,7ed,931p.pdf.” p. 931, 1996.
- [13] K. Ogata, *Ingenía de control moderna*. 2010.

- [14] P. Guillén, “Guía Controladores tipo P, PI y PID,” *Univ. Don Bosco, Salvador*, pp. 1–8, 2013.
- [15] A. Creus, *Instrumentación industrial*. 2010.
- [16] A. L. Angulo Salas, “Pontificia universidad catòlica del perù,” *Lima - Perú*, pp. 1–95, 2016, [Online]. Available: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6856>
- [17] B. M. O. Donell, J. D. Sandoval, and F. Paukste, “Fuentes Luminosas,” *Iluminacion Efic.*, pp. 1–68, 2002.
- [18] D. Pérez, “Medida de la radiación solar,” *Procedimientos Manten. y calibracion Estac. radiométrica*, pp. 2–30, 2015.
- [19] OMM, “Guia de instrumentos y métodos de observación meteorológicos,” *Organ. Meteorológica Mund.*, vol. 8, no. 6, p. 528, 2012.
- [20] D. DE Del Sistema Medición Y Despliegue De and L. Antonio Sierra García Asesorado por el Ing Guillermo Antonio Puente Romero, “SENSOR DS18B20 MEDIANTE EL PROTOCOLO DE TRANSMISIÓN 1-WIRE.”

## Anexos

Se presenta el código utilizado para el control del sistema de temperatura e irradiancia en el proyecto. El código integra la gestión de un sensor de temperatura, un servomotor y un controlador PID para mantener los parámetros deseados, mostrando los resultados en una pantalla TFT.

```
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <MCUFRIEND_kbv.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <Codificador rotativo.h>
#include <Servo.h> // Librería para controlar el servomotor
// Pines y configuración del sensor DS18B20
#define ONE_WIRE_BUS 33
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
// Pines del codificador rotativo rotativo
#define CLK 22
#define DT 26
#define SW 24
Codificador rotativo myEnc(CLK, DT);
```



```

    long oldPosition = 0; // Valor inicial a 0
        long newPosition = 0;
        MCUFRIEND_kbv tft;
        Adafruit_GFX_Button regresar_btn;
        enum Screen { PUNTO DE REFERENCIA_TEMP, PUNTO DE
REFERENCIA_IRRADIANCIA, RESULTADOS }; // Pantallas disponibles
Screen currentScreen = PUNTO DE REFERENCIA_TEMP; // Pantalla inicial
        // Variables para el punto de referencia de temperatura e irradiancia
        int punto de referenciaTemp = 15; // Valor inicial del punto de referencia de temperatura
        int punto de referenciaIrradiancia = 50; // Valor inicial del punto de referencia de irradiancia
            // Límites del slider para temperatura
            int minPunto de referenciaTemp = 15;
            int maxPunto de referenciaTemp = 60;
            // Límites del slider para irradiancia (ajustado a 50 y 100)
            int irradianciaValues[] = {50, 100};
        int currentIrradianciaIndex = 0; // Índice actual de irradiancia
        // Temporizador para actualizar la temperatura cada segundo
            unsigned long lastUpdateTime = 0;
            const long interval = 1000; // Intervalo de 1 segundo
// Almacenamiento del último valor de punto de referencia mostrado para evitar actualizaciones
            innecesarias
            int lastPunto de referenciaTemp = -1;
            int lastPunto de referenciaIrradiancia = -1;
        // Almacenamiento del último valor de temperatura e irradiancia mostrado
            float lastTemperature = -999.0;
            float lastIrradiancia = -999.0;
            // Configuración del servomotor
            Servo servoMotor; // Crear un objeto Servo
            const int SERVO_PIN = 31; // Pin del servomotor
            // Definiciones de colores
            #define BLACK 0x0000

```

```

#define BLUE 0x001F
#define RED 0xF800
#define GREEN 0x07E0
#define CYAN 0x07FF
#define MAGENTA 0xF81F
#define YELLOW 0xFFE0
#define WHITE 0xFFFF
#define LIGHTGREY 0xC618

#include <PID_v1.h>

#define RELE_PIN 35 // Pin del relé de estado sólido
#define SENSOR_PIN 33 // Pin del sensor de temperatura DS18B20
#define VENTILADOR_PIN 37 // Pin del ventilador

// Variables PID
double punto de referencia; // Temperatura deseada en grados Celsius
double input; // Lectura de temperatura actual
double output; // Salida del PID (40 a 255)

// Parámetros del PID
double Kp = 3.0, Ki = 0.8, Kd = 0.5; // Ajustes del PID
PID myPID(&input, &output, &punto de referencia, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

// Variables para el control no bloqueante
unsigned long lastTime = 0;
unsigned long interval1 = 500; // Intervalo para lectura de temperatura y ajuste del PID en
                               // milisegundos

// Rango de operación del ventilador
double rangoVentilador = 0.8; // Rango para activar/desactivar el ventilador

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  sensors.begin();
  uint16_t ID = tft.readID();
  Serial.print("TFT ID = 0x");
  Serial.println(ID, HEX);

```

```

    if (ID == 0xD3D3) ID = 0x9486; // write-only shield
        tft.begin(ID);
        tft.setRotation(1);
        // Iniciar el servomotor y configurar el pin
servoMotor.attach(SERVO_PIN); // Conectar el servomotor al pin definido
servoMotor.write(0); // Iniciar el servomotor en 0 grados
        // Mostrar la pantalla de bienvenida al inicio
        showWelcomeScreen();
        // Inicialización de botón regresar
regresar_btn.initButton(&tft, 160, 280, 200, 50, WHITE, BLUE, WHITE, "Regresar", 2); //
        Botón Regresar
drawPunto de referenciaTempScreen(); // Dibujar la pantalla de punto de referencia de
        temperatura
        pinMode(RELE_PIN, OUTPUT);
        pinMode(VENTILADOR_PIN, OUTPUT);
        digitalWrite(RELE_PIN, LOW); // Asegurar que el relé esté apagado al inicio
digitalWrite(VENTILADOR_PIN, LOW); // Asegurar que el ventilador esté apagado al inicio
        // Configurar sensor de temperatura
        sensors.begin();
        // Configurar PID
        myPID.SetMode(AUTOMATIC);
        myPID.SetOutputLimits(40, 255); // Mantener los límites de 40 a 255 para la salida
        myPID.SetSampleTime(500); // Reducir el tiempo de muestreo para mejorar la respuesta
Serial.println("Ingrese el valor de punto de referencia de temperatura (en grados Celsius:");
        }
        void loop(void) {
            newPosition = myEnc.read() / 4; // Ajustar la sensibilidad dividiendo por 4
                if (newPosition != oldPosition) {
                    if (currentScreen == PUNTO DE REFERENCIA_TEMP) {
                        if (newPosition > oldPosition && punto de referenciaTemp > minPunto de referenciaTemp)
                            {

```

```

    punto de referenciaTemp--; // Disminuir el punto de referencia de temperatura
} else if (newPosition < oldPosition && punto de referenciaTemp < maxPunto de
    referenciaTemp) {
    punto de referenciaTemp++; // Aumentar el punto de referencia de temperatura
    }
    oldPosition = newPosition;
    if (punto de referenciaTemp != lastPunto de referenciaTemp) {
updatePunto de referenciaTempDisplay(); // Actualizar el valor del punto de referencia
    lastPunto de referenciaTemp = punto de referenciaTemp;
    drawSliderTemp();
    punto de referencia = punto de referenciaTemp;
    }
} else if (currentScreen == PUNTO DE REFERENCIA_IRRADIANCIA) {
    if (newPosition > oldPosition && currentIrradianciaIndex > 0) {
    currentIrradianciaIndex--; // Disminuir el punto de referencia de irradiancia
    } else if (newPosition < oldPosition && currentIrradianciaIndex < 1) {
    currentIrradianciaIndex++; // Aumentar el punto de referencia de irradiancia
    }
    oldPosition = newPosition;
if (punto de referenciaIrradiancia != irradianciaValues[currentIrradianciaIndex]) {
    punto de referenciaIrradiancia = irradianciaValues[currentIrradianciaIndex];
updatePunto de referenciaIrradianciaDisplay(); // Actualizar el valor del punto de
    referencia de irradiancia
    drawSliderIrradiancia();
int servoAngle = map(punto de referenciaIrradiancia, 50, 100, 0, 35); // Mover el
    servomotor al ángulo calculado
    servoMotor.write(servoAngle);
    }
    }
    }
if (digitalRead(SW) == LOW) {

```

```

delay(200); // Pequeño delay para evitar rebotes
    selectMenuOption();
    }

    if (currentScreen == RESULTADOS) {
        unsigned long currentTime = millis();
        if (currentTime - lastUpdateTime >= interval) {
            lastUpdateTime = currentTime;
            updateTemperature();
            updateIrradiancia();
        }
    }
}

// Pantalla de bienvenida
void showWelcomeScreen() {
tft.fillScreen(BLUE); // Fondo azul para la pantalla de bienvenida
    tft.setTextColor(WHITE);
        tft.setTextSize(3);
            centerText("Bienvenido", 50); // Texto "Bienvenido"
                tft.setTextSize(2);
                    centerText("Sistema de Control", 100); // Texto descriptivo
                        tft.setTextSize(2);
                            centerText("Iniciando...", 150); // Mensaje adicional
                                delay(10000); // Mantener la pantalla de bienvenida durante 10 segundos
                                    }

// Pantalla de punto de referencia de temperatura
void drawPunto de referenciaTempScreen() {
    tft.fillScreen(BLACK);
    tft.fillRect(0, 0, 320, 30, BLUE);
    tft.setTextColor(WHITE);
    tft.setTextSize(2);
    centerText("Temperatura", 5); // Título "Temperatura" centrado

```

```

tft.drawLine(10, 40, 310, 40, LIGHTGREY); // Línea divisoria
tft.setTextColor(YELLOW);
tft.setTextSize(2);
centerText("Selecciona el valor", 50);
centerText("deseado de temperatura", 80); // Mensaje centrado de selección del punto de
referencia
updatePunto de referenciaTempDisplay(); // Mostrar el valor inicial del punto de referencia
drawSliderTemp(); // Dibujar slider visualmente más claro
regresar_btn.drawButton(false); // Dibujar el botón OK
tft.setTextColor(LIGHTGREY);
tft.setTextSize(1); // Tamaño reducido
centerText("Usa el codificador rotativo para seleccionar", 210); // Mensaje centrado para usar
el codificador rotativo
}

// Pantalla de punto de referencia de irradiancia
void drawPunto de referenciaIrradianciaScreen() {
tft.fillRect(0, 0, 320, 30, BLUE);
tft.setTextColor(WHITE);
tft.setTextSize(2);
centerText("Irradiancia", 5); // Título "Irradiancia" centrado
tft.drawLine(10, 40, 310, 40, LIGHTGREY); // Línea divisoria
tft.setTextColor(YELLOW);
tft.setTextSize(2);
centerText("Selecciona el valor", 50);
centerText("deseado de irradiancia", 80); // Mensaje centrado de selección del punto de
referencia
updatePunto de referenciaIrradianciaDisplay(); // Mostrar el valor inicial del punto de
referencia de irradiancia
drawSliderIrradiancia(); // Dibujar slider visualmente más claro
regresar_btn.drawButton(false); // Dibujar el botón OK

```

```

        tft.setTextColor(LIGHTGREY);
        tft.setTextSize(1); // Tamaño reducido
centerText("Usa el codificador rotativo para seleccionar", 210); // Mensaje centrado para usar
        el codificador rotativo
        }
        // Pantalla de resultados
        void drawResultadosScreen() {
            tft.fillScreen(BLACK);
            tft.fillRect(0, 0, 320, 30, RED);
            tft.setTextColor(WHITE);
            tft.setTextSize(2);
            centerText("Resultados", 5); // Título "Resultados" centrado
            tft.setTextSize(2);
            tft.setTextColor(CYAN);
centerText("Temp. Punto de referencia: " + String(punto de referenciaTemp), 50); // Mostrar
        punto de referencia de temperatura
centerText("Irrad. Punto de referencia: " + String(punto de referenciaIrradiancia), 80); //
        Mostrar punto de referencia de irradiancia
            tft.setTextColor(YELLOW);
            updateTemperature(); // Mostrar la temperatura actual
            updateIrradiancia(); // Mostrar la irradiancia actual
        }

// Función para actualizar la pantalla con el valor de punto de referencia de temperatura
        void updatePunto de referenciaTempDisplay() {
            tft.fillRect(0, 110, 320, 50, BLACK); // Limpiar área antes de mostrar nuevo valor
            tft.setTextColor(CYAN);
            tft.setTextSize(3);
            centerText("Punto de referencia: " + String(punto de referenciaTemp), 120);
        }

// Función para actualizar la pantalla con el valor de punto de referencia de irradiancia
        void updatePunto de referenciaIrradianciaDisplay() {

```

```

tft.fillRect(0, 110, 320, 50, BLACK); // Limpiar área antes de mostrar nuevo valor
    tft.setTextColor(CYAN);
    tft.setTextSize(3);
centerText("Punto de referencia: " + String(punto de referenciaIrradiancia), 120);
    }

// Función para dibujar el slider de temperatura
void drawSliderTemp() {
    int sliderWidth = 200;
    int sliderX = 60;
    int sliderY = 160;
    int sliderHeight = 30;

    tft.fillRect(sliderX, sliderY, sliderWidth, sliderHeight, WHITE);
int filledWidth = map(punto de referenciaTemp, minPunto de referenciaTemp, maxPunto de
    referenciaTemp, 0, sliderWidth);
    tft.fillRect(sliderX, sliderY, filledWidth, sliderHeight, GREEN);
    }

// Función para dibujar el slider de irradiancia
void drawSliderIrradiancia() {
    int sliderWidth = 200;
    int sliderX = 60;
    int sliderY = 160;
    int sliderHeight = 30;

    tft.fillRect(sliderX, sliderY, sliderWidth, sliderHeight, WHITE);
int filledWidth = map(currentIrradianciaIndex, 0, 1, 0, sliderWidth); // Ajustado a dos valores
    tft.fillRect(sliderX, sliderY, filledWidth, sliderHeight, GREEN);
    }

// Función para centrar texto en la pantalla
void centerText(String text, int y) {
    int16_t x1, y1;
    uint16_t w, h;
tft.getTextBounds(text, 0, y, &x1, &y1, &w, &h);

```



```

int x = (320 - w) / 2;
tft.setCursor(x, y);
tft.print(text);
}

// Función para seleccionar las opciones del menú
void selectMenuOption() {
  if (currentScreen == PUNTO DE REFERENCIA_TEMP) {
    drawPunto de referenciaIrradianciaScreen(); // Ir al menú de irradiancia
    currentScreen = PUNTO DE REFERENCIA_IRRADIANCIA;
  } else if (currentScreen == PUNTO DE REFERENCIA_IRRADIANCIA) {
    drawResultadosScreen(); // Mostrar la pantalla de resultados
    currentScreen = RESULTADOS;
  } else if (currentScreen == RESULTADOS) {
    drawPunto de referenciaTempScreen(); // Volver al menú de temperatura
    currentScreen = PUNTO DE REFERENCIA_TEMP;
  }
}

// Función para actualizar la temperatura
void updateTemperature() {
  sensors.requestTemperatures();
  float temperatureC = sensors.getTempCByIndex(0);
  if (temperatureC != lastTemperature) {
    tft.fillRect(50, 150, 300, 40, BLACK); // Limpiar área de temperatura
    tft.setCursor(50, 150); // Coordenada ajustada
    tft.setTextColor(WHITE);
    tft.setTextSize(2);
    tft.print("Temperatura: ");
    tft.print(temperatureC);
    tft.print(" C");
    lastTemperature = temperatureC;
  }
}

```

```

    }
    // Función para actualizar la irradiancia
    void updateIrradiancia() {
        int irradianciaRaw = analogRead(A0); // Lectura del piranómetro en A0
        float irradiancia = map(irradianciaRaw, 0, 1023, 0, 1000); // Conversión a W/m^2
        if (irradiancia != lastIrradiancia) {
            tft.fillRect(50, 200, 300, 40, BLACK); // Limpiar área de irradiancia
            tft.setCursor(50, 200);
            tft.setTextColor(WHITE);
            tft.setTextSize(2);
            tft.print("Irradiancia: ");
            tft.print(irradiancia);
            tft.print(" W/m^2");
            lastIrradiancia = irradiancia;
        }

        // Leer el valor del punto de referencia desde el Monitor Serial
        if (Serial.available() > 0) {
            double nuevoPunto de referencia = Serial.parseFloat(); // Leer el valor ingresado
            if (nuevoPunto de referencia >= 0 && nuevoPunto de referencia <= 100) {
                punto de referencia = nuevoPunto de referencia;
                Serial.print("Punto de referencia de temperatura establecido en: ");
                Serial.println(punto de referencia);
            } else {
                Serial.println("Por favor ingrese un valor válido de temperatura (0 a 100 °C).");
            }
        }

        // Leer la temperatura y calcular el PID de forma no bloqueante
        unsigned long now = millis();
        if (now - lastTime >= interval) {
            lastTime = now;
            sensors.requestTemperatures(); // Obtener la temperatura actual

```

```

input = sensors.getTempCByIndex(0); // Validar que la temperatura leída sea correcta
    if (input != DEVICE_DISCONNECTED_C && input != -127.0) {
        myPID.Compute(); // Calcular la salida del PID
        if (input < punto de referencia) {
output = constrain(output + 50, 40, 255); // Aumentar la potencia bruscamente cuando esté
        por debajo del punto de referencia
            }
        if (input > punto de referencia + rangoVentilador) {
digitalWrite(VENTILADOR_PIN, HIGH); // Encender el ventilador si la temperatura está
        muy por encima del punto de referencia
            } else if (input <= punto de referencia + rangoVentilador) {
digitalWrite(VENTILADOR_PIN, LOW); // Apagar el ventilador cuando esté cerca del
        punto de referencia
            }

        // Convertir la salida del PID en un tiempo de encendido
int cicloPWM = 1000; // Duración total del ciclo de PWM en milisegundos
int tiempoEncendido = map(output, 40, 255, 0, cicloPWM);
unsigned long cicloInicio = millis(); // Control del relé
    if (tiempoEncendido > 0) {
        digitalWrite(RELE_PIN, HIGH); // Encender el relé
            }
        while (millis() - cicloInicio < tiempoEncendido) {
// Mantener encendido el tiempo correspondiente (no bloqueante)
            }
        digitalWrite(RELE_PIN, LOW); // Apagar el relé
        while (millis() - cicloInicio < cicloPWM) {
// Mantener apagado el tiempo correspondiente (no bloqueante)
            }

        // Mostrar temperatura y salida del PID
        Serial.print("Temperatura actual: ");
        Serial.print(input);

```

```
Serial.print(" valor punto de referencia: ");
Serial.print(punto de referencia);
Serial.print(" °C, Salida PID: ");
Serial.println(output);
} else {
Serial.println("Error: No se pudo leer la temperatura del sensor.");
}
}
}
```

 <p>UNIVERSIDAD <b>CESMAG</b> NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	<b>CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)</b>	<b>CÓDIGO:</b> AAC-BL-FR-032
		<b>VERSIÓN:</b> 1
		<b>FECHA:</b> 09/JUN/2022

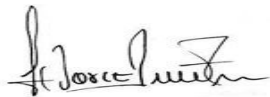
San Juan de Pasto, 27 de noviembre de 2024

Biblioteca  
**REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.**  
Universidad CESMAG  
Pasto


Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado Sistema de control para la regulación de las variables irradiancia y temperatura al interior de una cabina orientada a pruebas de paneles fotovoltaicos., presentado por el (los) autor(es) Ana Estefanny Piandoy Ruales, y Bryan Alexander Puerres Delgado del Programa Académico Ingeniería Electrónica al correo electrónico biblioteca.trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,




-----  
**John Evert Barco Jimenez**  
87067512  
Programa Ingeniería Electrónica  
3158222096  
jebarco@unicesmag.edu.co

 <b>UNIVERSIDAD CESMAG</b> <small>NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</small>	<b>AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>CÓDIGO:</b> AAC-BL-FR-031
		<b>VERSIÓN:</b> 1
		<b>FECHA:</b> 09/JUN/2022

<b>INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)</b>	
<b>Nombres y apellidos del autor:</b> Ana Estefanny Piandoy Ruales	<b>Documento de identidad:</b> 1233192712
<b>Correo electrónico:</b> aepiandoy.2712@unicesmag.edu.co	<b>Número de contacto:</b> 3153367257
<b>Nombres y apellidos del autor:</b> Bryan Alexander Puerres Delgado	<b>Documento de identidad:</b> 1233193983
<b>Correo electrónico:</b> bapuerres.3983@unicesmag.edu.co	<b>Número de contacto:</b> 3234066892
<b>Nombres y apellidos del asesor:</b> John Evert Barco Jimenez	<b>Documento de identidad:</b> 87067512
<b>Correo electrónico:</b> jebarco@unicesmag.edu.co	<b>Número de contacto:</b> 3158222096
<b>Título del trabajo de grado:</b> Sistema de control para la regulación de las variables irradiancia y temperatura al interior de una cabina orientada a pruebas de paneles fotovoltaicos.	
<b>Facultad y Programa Académico:</b> Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Electrónica	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el término en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve (mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje (mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.
- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor

 <p>UNIVERSIDAD <b>CESMAG</b> NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	<b>AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>CÓDIGO:</b> AAC-BL-FR-031
		<b>VERSIÓN:</b> 1
		<b>FECHA:</b> 09/JUN/2022

sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndose indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.


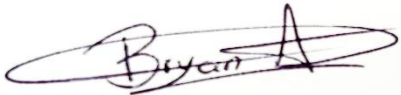

- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

**NOTA:** En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 27 días del mes de noviembre del año 2024

	
Nombre del autor: Ana Estefanny Piandoy Ruales	Nombre del autor: Bryan Alexander Puerres Delgado
 <hr/> Nombre del asesor: John Evert Barco Jimenez	