

Construcción de control PID de temperatura para muestras biológicas

González Anaya Alan¹, Nicasio Navarro Anet Gabriela¹, Arturo González-Vega¹, Carlos Villaseñor-Mora^{1*}

¹ División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato, León, Guanajuato, México.
vimcarlos@ugto.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema de control de temperatura para muestras biológicas, este se basa en un control PID programado en una tarjeta de microcontrolador ESP32. El sistema utiliza una celda Peltier montada sobre una placa de aluminio, que además de soporte sirve como disipador para la propia celda; arriba de la celda Peltier se colocó un depósito que fue diseñado e impreso en 3D para contener la muestra biológica. El arreglo permite la aplicación de gotas de una disolución, similar a la lágrima, con el fin de estudiar su comportamiento bajo diferentes condiciones de temperatura y así entender la dinámica de evaporación involucrada. Para monitorear la temperatura y verificar que está dentro del rango deseado, que para este caso se estableció un rango de 30 a 40°C, se utiliza un termistor de película delgada, colocado entre la placa Peltier y el reservorio de la muestra, este termistor permite la retroalimentación del PID al ESP32, calcular el error entre la temperatura deseada y la actual en la placa y hacer el ajuste de la señal de control que se aplica a la compuerta de un MOSFET, para ello se usó la salida PWM de ESP32 con un ciclo de trabajo entre el 5 % y el 25 %; logrando que el MOSFET regulara el flujo de corriente aplicada a la celda Peltier, para que esta temperatura nunca supere la deseada por el usuario, tal como sucede por ejemplo, en el ojo humano. El sistema forma un lazo cerrado de control de temperatura, asegurando estabilidad térmica para experimentos de carácter biológico o físico. El desarrollo se realizó con un presupuesto reducido, priorizando precisión, estabilidad y facilidad de implementación. Los resultados experimentales mostraron una respuesta de tipo primer orden, con tiempo de retardo constante de 2 segundos y constantes de tiempo entre 22 y 25 segundos para el alcance de la temperatura deseada; la ganancia del proceso se mantuvo entre 0.26 y 0.29, y el sistema alcanzó estabilidad térmica en menos de 30 segundos, con variaciones controladas y sin sobre impulsos significativos.

Palabras clave: Control PID, Método Lambda, Control temperatura muestras biológicas.

Introducción

El control de temperatura en la simulación y modelado de muestras biológicas es un proceso crucial; para ello se emplean diversas estrategias con el fin de lograr estabilidad y controlabilidad de la temperatura en periodos variados. En este caso se desarrolló un prototipo para controlar la temperatura en un reservorio diseñado para depositar muestras de lágrima de un grosor de 200 μm . La condición principal es que la temperatura nunca exceda el valor deseado, ya que este es el comportamiento natural del sistema de regulación térmica del ojo.

La modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) es una técnica ampliamente utilizada para el control eficiente de potencia en sistemas electrónicos, especialmente en aplicaciones térmicas donde se busca una regulación precisa sin pérdidas excesivas de energía (Erickson & Maksimović, 2001). Su simplicidad de implementación y compatibilidad con plataformas digitales como el ESP32 la hacen ideal para el manejo de actuadores térmicos como las celdas Peltier en entornos de bajo costo y alta sensibilidad (Harianto *et al.*, 2025).

En este proyecto se implementó un sistema de control térmico basado en PWM para estudiar el efecto de distintos niveles de potencia sobre una celda Peltier acoplada a una superficie de aluminio. El análisis se centró en evaluar la respuesta térmica ante escalones de señal PWM con el objetivo de caracterizar la eficiencia térmica del sistema y su sensibilidad a perturbaciones. Esta evaluación es especialmente relevante en experimentos que involucran volúmenes pequeños de líquidos, como el estudio térmico de gotas que simulan lágrimas humanas, donde pequeñas variaciones de temperatura pueden afectar significativamente el comportamiento físico-químico del sistema (Schmid, 2020; Rahmat *et al.*, 2023).

Estudios recientes demuestran que la elección del algoritmo de control tiene un impacto directo tanto en la calidad de la señal de control, como en la eficiencia energética de los módulos Peltier, al comparar controladores tipo relé, PID paralelo y PID en serie (Lis et al., 2024). Además, investigaciones como la de Kherkhar et al. (2022) han mostrado que la implementación de controladores PID optimizados puede alcanzar diferencias de ± 0.1 °C en menos de 20 s, evidenciando la pertinencia de estos algoritmos en sistemas de refrigeración termoelectrica.

Este tipo de control permite generar superficies térmicamente estables y reproducibles, fundamentales para el análisis de fenómenos de evaporación, difusión térmica o cristalización en gotas (Ulpiani et al., 2016).

Diseño del sistema de control

La Figura 1 presenta una visión general del diseño del sistema de control de temperatura. El dispositivo se divide en tres módulos principales: unidad de detección de temperatura, unidad de control térmico y la interfaz de usuario.

La unidad de detección está compuesta por un termistor que monitorea continuamente la temperatura en la superficie de la celda Peltier. Esta información se envía al microcontrolador, donde se evalúa frente a la temperatura objetivo, establecida por el usuario.

La unidad de control de temperatura ejecuta el algoritmo PID programado en el ESP32. Este algoritmo calcula una señal de control proporcional al error entre la temperatura medida y la deseada. La salida se genera en forma de modulación por ancho de pulso (PWM), que actúa como señal digital equivalente a un control analógico. Dicha señal PWM se envía a un MOSFET de canal N, el cual funciona como un amplificador de potencia conmutado. Al regular la corriente que fluye hacia la celda Peltier, el sistema es capaz de controlar con precisión su capacidad de calentamiento o enfriamiento, logrando una respuesta térmica rápida y estable (Harianto et al., 2025).

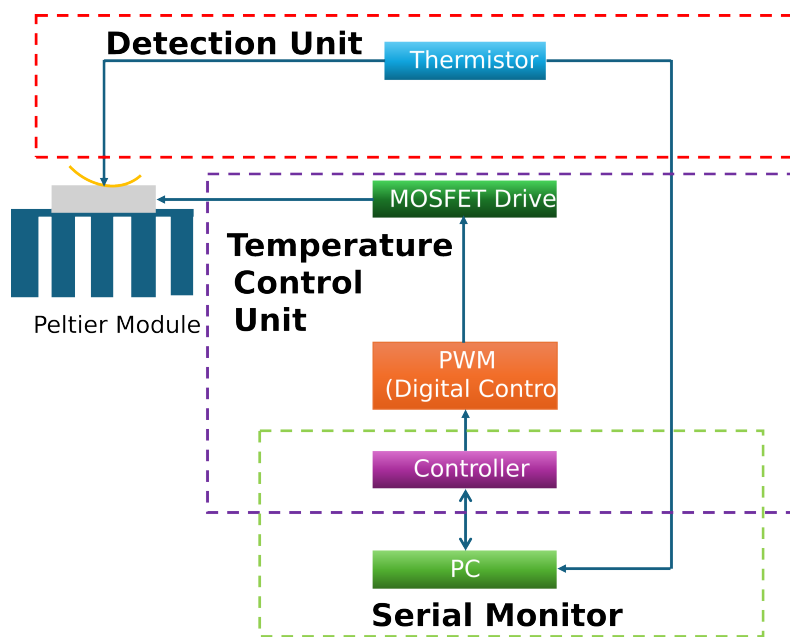


Figura 1. Descripción general del prototipo.

Sistema de control PID

El controlador PID (Proporcional–Integral–Derivativo) es un mecanismo de retroalimentación en lazo cerrado ampliamente utilizado en sistemas de control industrial debido a su simplicidad, eficiencia y capacidad de adaptarse a una amplia variedad de procesos (Dorf & Bishop, 2011). Su función principal es minimizar la diferencia (error) entre una variable medida en este caso, la temperatura detectada por el termistor y un valor deseado (setpoint), ajustando dinámicamente la señal de control aplicada al sistema térmico.

El algoritmo PID se basa en tres parámetros fundamentales: P (proporcional), que responde al error presente; I (integral), que considera la suma de errores pasados, ayudando a eliminar errores de estado estacionario; y D (derivativo), que anticipa errores futuros calculando la tasa de cambio del error y suaviza la respuesta (Kuo & Golnaraghi, 2003). La suma ponderada de estos tres términos modula la potencia entregada a la celda Peltier mediante el MOSFET. De este modo, el sistema puede calentar o enfriar la superficie de aluminio hasta alcanzar y mantener la temperatura deseada.

En este proyecto, se emplearon los tres términos para obtener un equilibrio entre velocidad de respuesta, estabilidad y precisión térmica. Investigaciones como las de Ulpiani et al. (2016) demuestran que los controladores PID, frente a estrategias on/off, mejoran la eficiencia energética y reducen la variabilidad térmica, confirmando su pertinencia en aplicaciones de control ambiental.

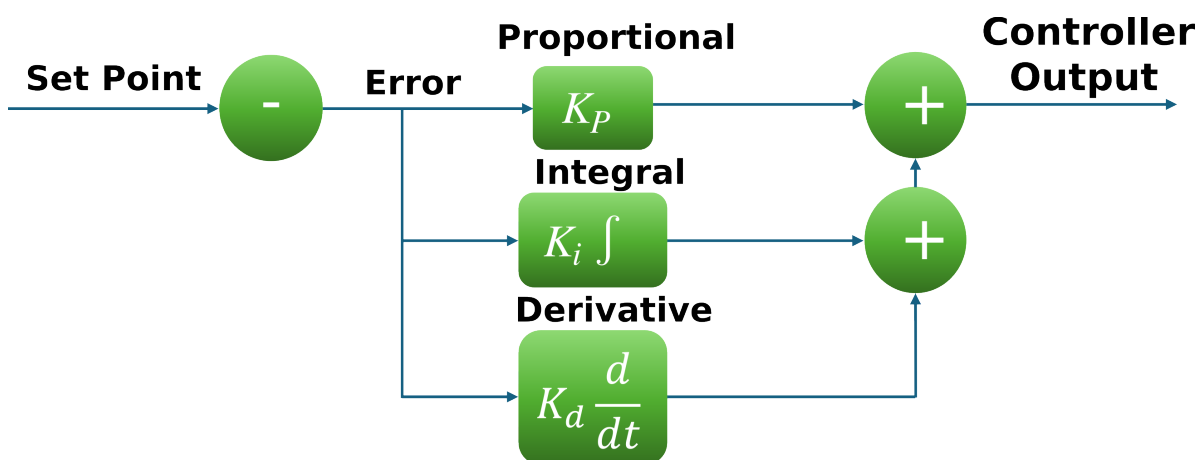


Figura 2. Diagrama de flujo del control PID.

Celda Peltier

Una celda Peltier se basa en el efecto termoeléctrico: un dispositivo termoeléctrico puede generar voltaje cuando hay una diferencia de temperatura (efecto Seebeck) o crear una diferencia de temperatura cuando se le aplica un voltaje (efecto Peltier). La celda Peltier es conocida por este segundo fenómeno (Rowe, 2006). Cuando se aplica una diferencia de voltaje positiva entre los terminales, una de sus caras genera calor mientras que la opuesta absorbe calor; si se invierte la polaridad, ocurre el efecto contrario.

Estudios recientes han optimizado la eficiencia energética de microunidades de enfriamiento con módulos Peltier comparando algoritmos de control (Lis et al., 2024), y otros han demostrado el alto desempeño de estos dispositivos en sistemas portátiles de refrigeración y en prototipos basados en Arduino con control PID (Kherkhar et al., 2022). Gracias a su rápida respuesta y precio accesible, la celda Peltier resulta un componente clave para el diseño de controladores de temperatura en aplicaciones de laboratorio de bajo costo.

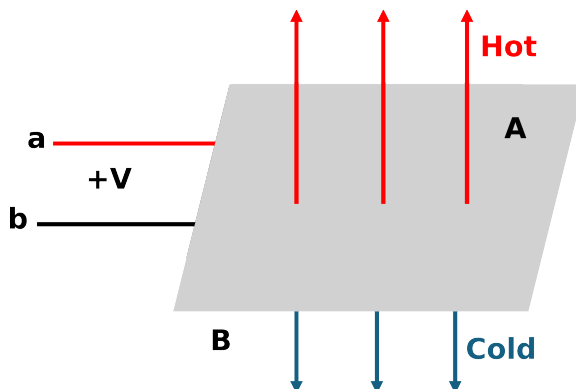


Figura 3. Funcionamiento de la celda Peltier.

Tabla 1. Materiales y costos aproximados del prototipo

Material	Descripción breve	Costo aprox. (MXN)
Microcontrolador ESP32	Placa de desarrollo con Wi-Fi y Bluetooth	\$150–\$200
MOSFET canal N IRFZ44N	Transistor de potencia para conmutación PWM	\$10–\$20
Termistor 10 kΩ	Sensor de temperatura tipo NTC	\$10–\$15
Fuente de alimentación 9 V	Adaptador de corriente para la celda Peltier	\$80–\$120
Celda Peltier TEC1-12706	Módulo termoelectrico de 60 W aprox.	\$60–\$100
Base de aluminio	Placa mecanizada como disipador y superficie para las gotas	\$40–\$70

Circuito de Control

La Figura 4 muestra el diagrama esquemático del sistema de control de temperatura implementado con un microcontrolador ESP32. El circuito está diseñado para regular la temperatura mediante una celda Peltier, controlada mediante PWM a través de un MOSFET tipo IRFZ44N. A continuación, se describen los componentes principales y su conexión:

El ESP32 actúa como unidad central de procesamiento. Se encarga de leer la temperatura a través del termistor, ejecutar el algoritmo PID y generar la señal PWM para controlar la celda Peltier. El pin GPIO32 (D32) se utiliza como entrada analógica para leer el voltaje del divisor de tensión que contiene al termistor. El pin GPIO33 (D33) se configura como salida digital para enviar la señal PWM al MOSFET. El Termistor 10kΩ se conecta en un divisor de voltaje junto con una resistencia fija. Este divisor está alimentado por 3.3 V del ESP32. El voltaje en el punto medio varía según la temperatura y se mide por el pin analógico del ESP32. El MOSFET IRFZ44N funciona como interruptor electrónico. Su compuerta (G) está conectada al pin de salida del ESP32 mediante una resistencia de protección. El drenador (D) se conecta al polo negativo de la celda Peltier, mientras que la fuente (S) está a tierra. La celda Peltier está conectada entre la fuente de alimentación externa (9V o 12V) y el drenador del MOSFET. Al activar el MOSFET con una señal PWM, se controla la cantidad de corriente que fluye por la celda, regulando así su capacidad de calentar o enfriar. Una fuente de voltaje proporciona una alimentación externa independiente para la celda Peltier, ya que su consumo de corriente es mayor al que puede suministrar el ESP32. Esta fuente está conectada directamente a la parte positiva de la celda y a la línea de 12 V del circuito. La celda Peltier está montada sobre una base de aluminio que actúa como superficie de control térmico. Sobre esta se colocarán las gotas de disolución para los experimentos.

Este circuito permite un control térmico preciso y en tiempo real mediante el ajuste de la señal PWM según las condiciones térmicas detectadas, formando un sistema de lazo cerrado.

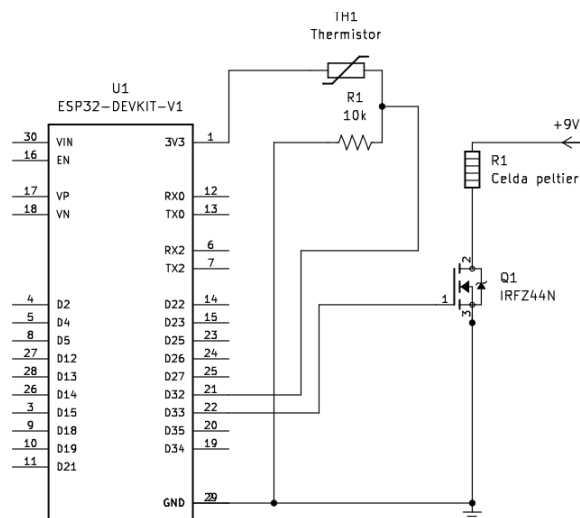


Figura 4. Diagrama del circuito de control.

Resultados

Se realizaron pruebas de identificación del sistema térmico aplicando distintos niveles de señal PWM al MOSFET, con el fin de analizar la respuesta de salida de la celda Peltier y determinar los parámetros del modelo de primer orden con retardo. Las señales de entrada consideradas fueron escalones del 5 % al 25 % de ciclo de trabajo como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros identificados para diferentes escalones de PWM aplicados

PWM aplicado (%)	Δu (Salida)	ΔT (°C)	Kp	Tiempo de retardo θ (s)	Constante de tiempo τ (s)
5.0	12.8	3.52	0.2761	2.0	23.0
10.0	25.5	6.75	0.2647	2.0	22.0
15.0	38.25	11.02	0.2881	2.0	25.0
20.0	51.0	13.32	0.2612	2.0	23.0
25.0	63.75	16.71	0.2621	2.0	24.0

En cada caso, se midió la variación de temperatura (ΔT) correspondiente al cambio en la señal de control (Δu), permitiendo calcular la ganancia estática del sistema (K_p), así como el tiempo de retardo (θ) y la constante de tiempo (τ) mediante análisis gráfico de la curva respuesta. Se observó que la ganancia del proceso se mantuvo relativamente constante en torno a 0.26 a 0.28, lo que indica un comportamiento lineal en ese rango de operación.

El tiempo de retardo fue aproximadamente de 2.00 segundos en todos los casos, reflejando un retraso físico entre la aplicación del PWM y el inicio de la variación térmica detectable por el sensor. La constante de tiempo varió ligeramente entre 22 y 25 segundos, mostrando que el sistema responde con una inercia térmica moderada, propia de la masa térmica del aluminio y las características de la celda Peltier.

La respuesta obtenida bajo distintos niveles de excitación PWM confirma que el sistema puede modelarse adecuadamente como un sistema de primer orden con retardo constante, lo que permite aplicar el controlador PID.

Parámetros característicos del comportamiento térmico

A partir de la respuesta del sistema a diferentes escalones de señal PWM, se determinaron los siguientes parámetros característicos del comportamiento térmico:

Ganancia del sistema (K_p):

$$K_p = \Delta y / \Delta u$$

Representa el cambio de temperatura en régimen estacionario (Δy) que se produce por cada unidad de cambio en la señal de control (Δu). En este caso, se obtuvo un valor promedio de:

$$K_p \approx 0.27(^{\circ}\text{C}/\text{PWM})$$

Tiempo de retardo (θ):

$$\theta = 2 \text{ s}$$

Es el tiempo que transcurre desde que se aplica el escalón hasta que la temperatura comienza a responder de forma perceptible. Representa el retraso inherente del sistema.

Constante de tiempo (τ):

$$\tau = 23.4 \text{ s}$$

Es el tiempo requerido para que la temperatura alcance el 63.2% del cambio total esperado (Δy), a partir del fin del tiempo muerto. Describe qué tan rápido responde el sistema térmico una vez que empieza a actuar.

Sintonización del controlador PID mediante el método Lambda

Para determinar los parámetros del controlador se empleó el método Lambda, el cual permite ajustar la dinámica de un lazo de control de primer orden con retardo. Se estableció como tiempo de cierre deseado un valor igual a la constante de tiempo del proceso ($\lambda = \tau$), con el fin de obtener una respuesta rápida sin sacrificar estabilidad.

El proceso térmico identificado se modeló como:

$$G(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$$

donde K_p es la ganancia del proceso, τ la constante de tiempo y θ el tiempo de retardo.

De acuerdo con el método Lambda, los parámetros del controlador PID se calculan con:

$$K_c = \frac{\tau}{K_p(\lambda + \theta)} \quad \tau_i = \tau \quad \tau_d = \frac{\theta\tau}{2(\lambda + \theta)}$$

Sustituyendo los valores experimentales obtenidos para este sistema:

$$K_p = 0.27 \quad \tau = 23\text{s} \quad \theta = 2\text{s} \quad \lambda = \tau = 23\text{s}$$

se obtiene:

$$K_c = \frac{23}{0.27(23 + 2)} \approx 3.4 \quad \tau_i = 23s \quad \tau_d \approx \frac{2 \times 23}{2(23 + 2)} \approx 0.92s$$

Por lo tanto, el controlador PID implementado en el ESP32 adopta la forma:

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(\xi) d\xi + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

donde $e(t)$ es el error entre la temperatura medida y el valor de consigna (setpoint).

Observaciones de la respuesta del sistema

En la primera prueba, como se muestra en la figura 5, se aplica un escalón del 5 % de PWM, la temperatura inicial era de aproximadamente 23.5 °C y el sistema alcanzó un valor final en régimen cercano a los 26.8 °C aproximadamente. Si bien la forma general de la curva sigue correspondiendo a un sistema de primer orden, se observa un ascenso más lento y una mayor presencia de ruido en la señal térmica. Esto se debe a que, con una entrada más débil, el sistema es más susceptible a perturbaciones externas, como la convección natural del aire o variaciones en la temperatura ambiente.

También, se aplicó un escalón del 25 % de PWM. La temperatura inicial era de aproximadamente 27.5 °C y, tras la aplicación del estímulo, se observó una respuesta rápida con un incremento progresivo de temperatura hasta alcanzar un valor estacionario cercano a los 42.8 °C. La respuesta presenta una forma característica de un sistema de primer orden, con un tiempo de retardo (θ) muy corto, del orden de unos pocos segundos, seguido de un incremento exponencial hacia el nuevo estado estable. El tiempo correspondiente al 63.2 % del cambio total de temperatura permite estimar la constante de tiempo (τ), y el valor de $\theta + \tau$ define la región donde el sistema alcanza aproximadamente el 63.2 % de su respuesta final. La señal registrada es limpia y estable, sin oscilaciones apreciables, lo que indica un buen acoplamiento térmico y una potencia suficientemente elevada para dominar sobre las fluctuaciones ambientales.

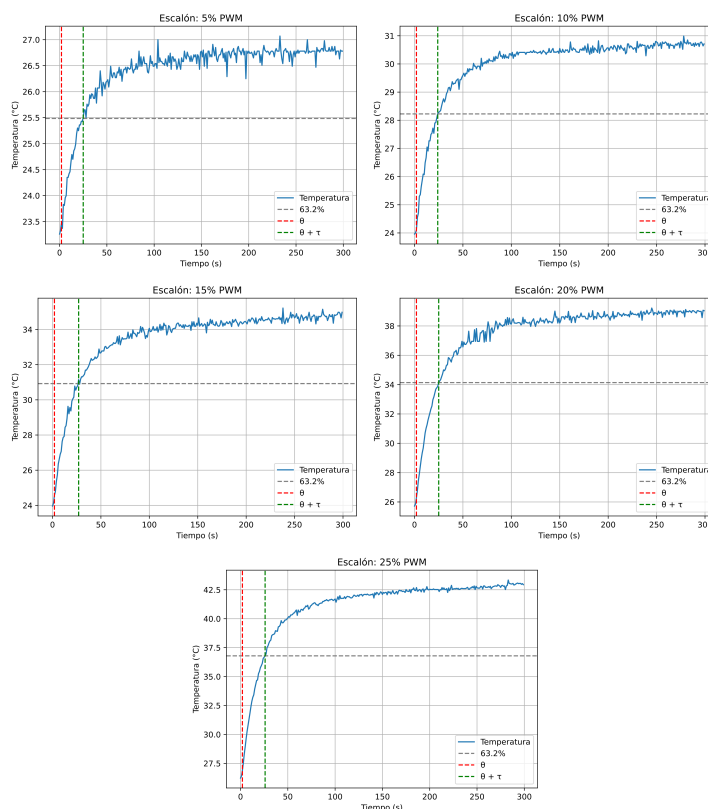


Figura 5. Respuesta térmica del sistema ante un escalón del 5 % al 25%, respectivamente de PWM.

Conclusión

En este proyecto se llevó a cabo el diseño, implementación y caracterización de un sistema de control térmico basado en una celda Peltier y un controlador tipo PID, utilizando un microcontrolador ESP32 como plataforma de control. El sistema se estructura con un sensor de temperatura o termistor y un MOSFET para regular la potencia mediante señales PWM, lo cual permitió establecer una interfaz efectiva para el manejo de la generación de calor en un disipador de aluminio.

Se realizaron distintas pruebas aplicando señales escalón de diferentes niveles de PWM, desde el 5 % hasta el 25 %, con el objetivo de obtener un modelo representativo del sistema. Los resultados experimentales mostraron que la respuesta térmica del sistema puede ser modelada adecuadamente como un sistema de primer orden con retardo. Se determinaron los parámetros dinámicos clave, como la ganancia estática, el tiempo de retardo y la constante de tiempo, cuyos valores oscilaron en rangos estrechos a lo largo de las distintas pruebas, confirmando la estabilidad del sistema.

El comportamiento del sistema ante señales PWM pequeñas (por ejemplo, del 5 %) evidenció mayor sensibilidad al ruido térmico, mientras que señales mayores (como el 25 %) generaron una respuesta más rápida, limpia y estable. Este análisis permitió validar la estructura del modelo y sentar las bases para la sintonización adecuada de un controlador PID capaz de mantener la temperatura deseada con precisión.

En resumen, el sistema desarrollado demostró ser funcional y confiable para el control de temperatura, con un comportamiento consistente que puede ser aprovechado en aplicaciones que requieren estabilidad térmica.

Bibliografía/Referencias

- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2011). *Modern Control Systems* (12th ed.). Pearson.
- Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics* (2nd ed.). Springer.
- Hariato, D., Bintang, H. S., Ardiyanto, A., & Widyawan, V. L. D. (2025). Development and evaluation of an ESP32-based temperature and humidity control unit for textile storage. *International Journal of Engineering Continuity*, 4(1).
- Kherkhar, A., Chiba, Y., Tlemçani, A., & Mamur, H. (2022). Thermal investigation of a thermoelectric cooler based on Arduino and PID control approach. *Case Studies in Thermal Engineering*, 102249.
- Kuo, B. C., & Golnaraghi, F. (2003). *Automatic Control Systems* (8th ed.). Wiley.
- Lis, S., Knaga, J., Kurpaska, S., Famielec, S., Łyszczarz, P., & Machaczka, M. (2024). Optimizing energy efficiency in a Peltier-module-based cooling microunit through selected control algorithms. *Energies*, 17, 5031.
- Rahmat, B., Waluyo, M., & Rachmanto, T. A. (2023). Temperature monitoring via the Internet of Things using PID-iTCLab. *Nusantara Science and Technology Proceedings*, 197-203.
- Rowe, D. M. (2006). *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. CRC Press.
- Schmid, L. (2020). *Microfluidics for Biology: Tools, Techniques and Applications*. Elsevier.
- Ulpiani, G., Borgognoni, M., Romagnoli, A., & Di Perna, C. (2016). Comparing the performance of on/off, PID and fuzzy controllers applied to the heating system of an energy-efficient building. *Energy and Buildings*, 116, 1-15.