VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

# Desarrollo de un sistema de control de temperatura de alta precisión para una fuente de calibración de cuerpo negro infrarrojo

Development of a High-Precision Temperature Control System for an Infrared Blackbody Calibration Source

Daniela Valentina Avila Plascencia, Sergio Duván Rangel Balandrán, Arturo González Vega, Carlos Villaseñor Mora*
División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato, León, Guanajuato, México.
*vimcarlos@ugto.mx

## Resumen

La calibración de cámaras termográficas requiere fuentes de referencia con elevada estabilidad térmica y alta emisividad, las cuales suelen tener un costo considerable cuando se adquieren comercialmente. En este trabajo se presenta el desarrollo de una fuente de calibración de cuerpo negro infrarrojo basada en una placa de aluminio controlada mediante un algoritmo PID implementado en un microcontrolador ESP32. El sistema emplea cuatro termistores de precisión distribuidos estratégicamente sobre la superficie, mientras que cuatro celdas Peltier proporcionan el calentamiento controlado mediante señales PWM independientes. Como superficie emisora se utilizó un recubrimiento de negro de humo, con el cual se obtuvo una emisividad cercana a 0.99. El prototipo fue evaluado para temperaturas objetivo de 30, 35, 37 y 40 °C, obteniéndose errores absolutos entre 0.6 y 1.1 °C durante las pruebas preliminares. Los resultados demuestran la factibilidad de desarrollar una fuente de calibración de bajo costo utilizando componentes electrónicos comerciales y constituyen una plataforma para futuras investigaciones orientadas a la caracterización metrológica, la evaluación de la estabilidad a largo plazo y la determinación de la incertidumbre de medición.

**Palabras clave**: cuerpo negro infrarrojo; termografía; control PID; ESP32; calibración térmica; emisividad.

## Introducción

La termografía infrarroja constituye una de las técnicas de medición sin contacto más utilizadas en la actualidad debido a su capacidad para determinar la distribución de temperatura superficial de un objeto de forma rápida, remota y no invasiva. Sus aplicaciones abarcan numerosos campos, incluyendo el mantenimiento predictivo industrial, la inspección de sistemas eléctricos y mecánicos, la investigación biomédica, la agricultura de precisión, la caracterización de materiales y el monitoreo ambiental (Minkina y Dudzik, 2009; Vollmer y Möllmann, 2018).

La exactitud de una medición termográfica depende de diversos factores, entre ellos la calibración radiométrica de la cámara infrarroja, la emisividad de la superficie observada y la estabilidad térmica de las referencias utilizadas durante el proceso de calibración (Kaplan, 2007). Por esta razón, las fuentes de radiación tipo cuerpo negro representan el patrón más ampliamente empleado para verificar y calibrar cámaras termográficas, pirómetros y otros instrumentos que operan en la región infrarroja del espectro electromagnético.

Un cuerpo negro ideal se define como un objeto capaz de absorber la totalidad de la radiación electromagnética incidente y emitir la máxima cantidad de energía térmica permitida por su temperatura, de acuerdo con la ley de Planck. Aunque dicho comportamiento ideal no puede alcanzarse físicamente, diversos desarrollos tecnológicos permiten fabricar superficies con emisividades superiores a 0.98, suficientemente cercanas al comportamiento ideal para aplicaciones de calibración radiométrica (Modest, 2013).

Las fuentes comerciales de cuerpo negro ofrecen una elevada precisión y estabilidad térmica; sin embargo, su costo representa una limitante importante para laboratorios de docencia, grupos de investigación y desarrollos experimentales. Esta situación ha motivado el desarrollo de alternativas de menor costo que

permitan obtener un desempeño comparable mediante el empleo de materiales accesibles y sistemas electrónicos de control de alta precisión.

En los últimos años, el crecimiento de la electrónica embebida ha facilitado la implementación de sistemas de control térmico de altas prestaciones mediante microcontroladores de bajo costo. Paralelamente, la disponibilidad de convertidores analógico-digitales de alta resolución y sensores de temperatura de precisión ha permitido desarrollar sistemas capaces de mantener variaciones térmicas del orden de centésimas de grado Celsius, suficientes para numerosas aplicaciones de investigación e instrumentación.

En este trabajo se presenta el desarrollo de una fuente de calibración de cuerpo negro infrarrojo basada en una superficie de aluminio recubierta con negro de humo para incrementar su emisividad. La regulación de temperatura se realiza mediante un controlador PID implementado en un microcontrolador ESP32, mientras que la medición térmica se lleva a cabo utilizando termistores de precisión y un convertidor analógico-digital ADS1220 de 24 bits. La combinación de estos elementos permitió obtener una superficie con una emisividad cercana a 0.99 y un sistema de control térmico de alta resolución, constituyendo una alternativa de bajo costo para aplicaciones de investigación, docencia y calibración de equipos termográficos.

Aunque el presente trabajo se enfoca principalmente en el diseño e implementación del sistema, la plataforma desarrollada constituye la base para futuras investigaciones orientadas a la caracterización metrológica de la estabilidad térmica, la uniformidad espacial y la incertidumbre de medición de la fuente de referencia.

## Diseño del sistema de control

El sistema de control implementado se basa en un esquema de control en lazo cerrado cuyo objetivo es mantener la temperatura del prototipo cercana a los 37 ºC. Para ello, el sistema utiliza cuatro sensores de temperatura ubicados estratégicamente en forma de cruz, a 45º respecto a las celdas peltier que calientan y enfrían la placa de aluminio, los cuales proporcionan información en tiempo real al microcontrolador ESP32.

El ESP32 adquiere continuamente las mediciones de los cuatro termistores y calcula la temperatura correspondiente a cada una de las cuatro zonas de control (Norte, Sur, Este y Oeste). Posteriormente, compara dichas temperaturas con la referencia establecida y determina el error de control. A partir de este error se implementa un control proporcional, integral y derivativo (PID), y para manejar la señal de error y controlar el elemento final de control, en este circuito mosfet para cada celda Peltier, se usa una señal PWM independiente para cada Celda, controlando así el voltaje de alimentación de cada celda.

Las señales PWM controlan una etapa de potencia basada en MOSFETs, encargada de regular la potencia eléctrica suministrada a las celdas Peltier. De esta manera, la potencia entregada a cada celda se ajusta dinámicamente de acuerdo con la diferencia de temperaturas medidas desde dos termistores para cada Celda Peltier. Las celdas Peltier reciben además la energía proveniente de una fuente de alimentación de corriente continua (CD), mientras que la etapa de potencia (MOSFETs) se controlan con las salidas PWM del ESP32. Finalmente, las variaciones de temperatura producidas por las celdas Peltier son nuevamente detectadas por los termistores, cerrando así el ciclo de retroalimentación y permitiendo la actualización continua de la acción de control. En la siguiente Figura 1, se presenta una representación a bloques del sistema de control.

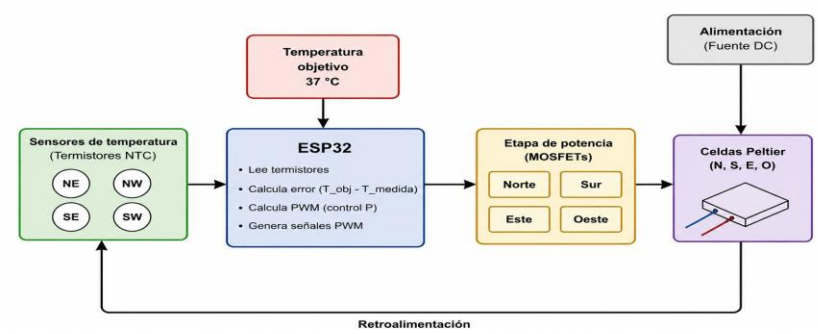



*Figura 1. Diagrama de bloques simplificado del sistema de control implementado en el prototipo.*

La Tabla 1, presenta los principales componentes empleados en la construcción del prototipo, indicando la cantidad utilizada, una breve descripción de su función y el costo aproximado de cada elemento.

***Tabla 1:*** *Materiales, cantidades y costos aproximados del prototipo de incubadora para microscopía.*

| Material | Cantidad | Descripción | Costo aprox. (MXN) |
|---|---|---|---|
| Microcontrolador ESP32 | 1 | Placa de desarrollo para el algoritmo de control PID y generación de PWM | $150–$200 |
| Celda Peltier TEC1-12706 | 4 | Módulos termoeléctricos ubicados en posiciones cardinales (N, S, E, O) | $240–$400 |
| Termistor 10 kΩ | 4 | Sensores de temperatura en posiciones intercardinales (NE, NO, SE, SO) | $40–$60 |
| MOSFET IRFZ44N | 4 | Transistores de potencia para la conmutación PWM individual de cada celda | $40–$80 |
| Placa circular de alumínio | 1 | Base mecanizada en aluminio de forma circular a usarse como referencia cuerpo negro | $150–$300 |
| Fuente de alimentación 24V @10A | 1 | Fuente de alimentación conmutada | $250–$450 |

## Ubicación de Sensores y Estimación de Temperatura

Para lograr un calentamiento uniforme, los actuadores y sensores se distribuyeron con un desfase espacial de 45◦:

- Celdas Peltier (Actuadores): Posiciones cardinales: Norte (PN ), Sur (PS), Este (PE) u Oeste (PO).
- Termistores (Sensores): Posiciones intercardinales: Noreste (TNE), Noroeste (TNW ), Sureste (TSE) y Suroeste (TSW ).

La temperatura estimada para cada celda Peltier (Test,i) se obtiene promediando los dos termistores adyacentes a su posición:

$$T_{est,N} = \frac{T_{NE}+T_{NW}}{2} \qquad T_{est,\mathrm{S}} = \frac{T_{\mathrm{SE}}+T_{\mathrm{SW}}}{2}$$

$$T_{est,\mathrm{E}} = \frac{T_{\mathrm{NE}}+T_{\mathrm{SE}}}{2} \qquad T_{est,\mathrm{O}} = \frac{T_{\mathrm{NW}}+T_{\mathrm{SW}}}{2}$$

## Algoritmo de Control y Salida PWM

Se eligió un control Proporcional, integral y derivativo (PID) debido a la alta inercia térmica del aluminio, así el control permite estabilizar la temperatura deseada $T_{ref}$ compensando muy bien las variaciones de temperatura para lograr la precisión requerida, debido a las condiciones de los materiales y equipos con los que se contaron en el laboratorio, solo se permitió el control de temperaturas más altas al ambiente, dejando para un trabajo a futuro la implementación de un sistema de refrigeración adecuado para poder mantener temperaturas de referencia más bajas que la temperatura ambiente.

El error de temperatura $e_i(k)$ y la señal de control $u_i(k)$ para cada cuadrante *i* en el instante *k* se calculan como:

$$e_i(k) = T_{ref} - T_{est,i}(k)$$

$$u_i(k) = K_p \times e_i(k) + K_i \times e_i(k) + K_d \times e_i(k)$$

Donde los coeficientes de las partes proporcional, integral y derivativa se calcularon siguiendo el procedimiento descrito en el trabajo de González et. al. (González Anaya Alan, 2025).

La salida calculada $u_i(k)$ se acondiciona y escala para determinar el ciclo de trabajo del PWM que activara la compuerta del MOSFET y con ello suministrar la potencia $P_i(k)$ a cada celda Peltier con las siguientes condiciones, recordando que solo se permiten temperaturas superiores a la temperatura ambiente:

$$P_i(k) = \begin{cases} 0\ \% & si\ e_i(k) \leq 0 \\ \left(\frac{u_i(k)}{u_{max}}\right) \times 100\% & si\ 0 < u_i(k) < u_{max} \\ 100\ \% & si\ u_i(k) \geq u_{max} \end{cases}$$

Esta expresión representa la función de saturación que transforma la salida del algoritmo de control en el porcentaje de potencia $P_i(k)$ suministrado a cada celda. Su funcionamiento se divide en tres condiciones de operación:

- Potencia nula (0%): Se activa cuando la zona iguala o supera la temperatura deseada $T_{ref}$ esto causaría un error positivo que por el momento no se implementó, por ello la señal de error se manda a cero, $e_i(k) \leq 0$, apagando la celda para evitar sobrecalentamientos.
- Regulación proporcional $0 < P_i(k) < 100\%$: Se aplica cuando el sistema ya se encendió, pero no ha llegado a la temperatura deseada $0 < u_i(k) < u_{max}$, ajustando la energía de forma gradual para alcanzar el equilibrio térmico sin sobrepasos, para ello las acciones P, I y D contribuyen a nunca superar la $T_{ref}$.
- Potencia máxima (100%): Se activa cuando la temperatura medida está muy por debajo de la temperatura deseada ($T_{ref}$), teniendo $u_i(k) \geq u_{max}$, entregando la máxima energía para acelerar el calentamiento inicial.

## Circuito de Control

La Figura 2 muestra el diagrama esquemático del sistema de control de temperatura en lazo cerrado gobernado por un microcontrolador ESP32. Para el monitoreo térmico, cuatro termistores de 10 k$\Omega$ (RT1–RT4) se integran en divisores de tensión junto con resistencias fijas (R1–R4) de 10 k$\Omega$ alimentadas a 3.3 V; sus voltajes son leídos por los pines analógicos D34 (RT3), D35 (RT4), D32 (RT1) y D33 (RT2).

El control de las cuatro celdas Peltier (C1–C4) se realiza de forma independiente mediante señales PWM generadas desde los pines D25, D26, D27 y D14, los cuales conmutan las compuertas de cuatro MOSFETs IRLZ44N (Q1–Q4) en configuración low-side. Las celdas son alimentadas por una fuente externa (V1) con tierra compartida hacia el ESP32 y están montadas sobre la placa de aluminio circular de 4 pulgadas de diámetro, esta placa fue la que se proporcionó para el desarrollo del presente trabajo pero el sistema funciona

independiente de la topología y dimensiones de la placa, permitiendo una regulación térmica precisa y localizada en tiempo real.

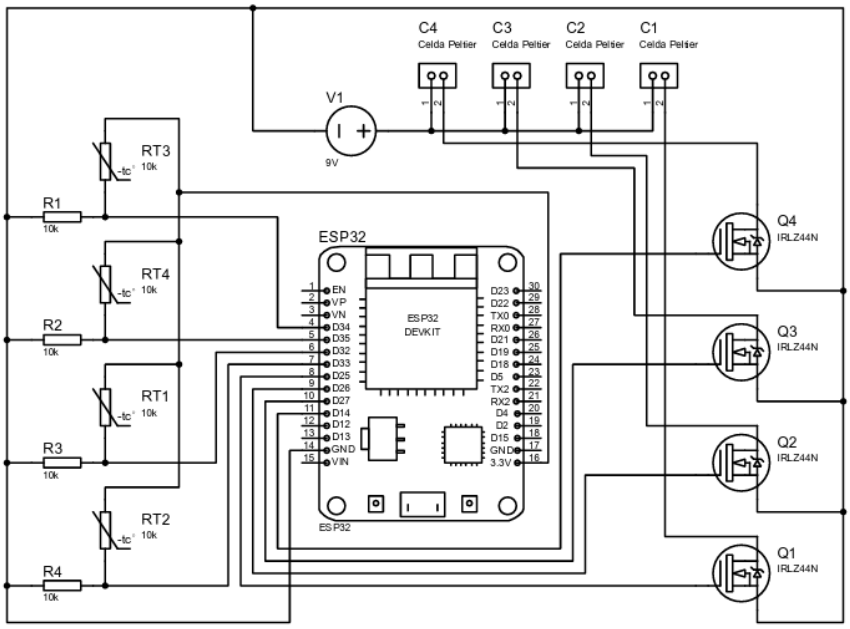
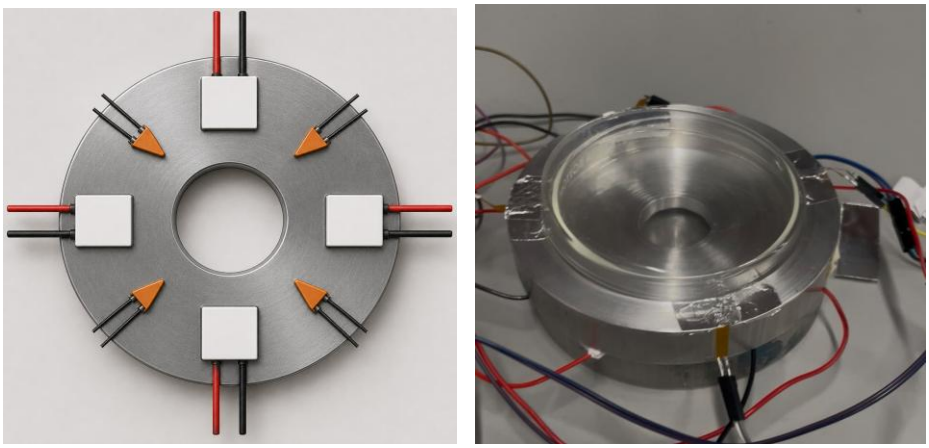



*Figura 2: Diagrama esquemático del circuito de adquisición, procesamiento y etapa de potencia del prototipo.*

## Resultados

La Figura 3 presenta el sistema desarrollado para el control de temperatura. La Figura 3(a) muestra la disposición de los principales componentes que conforman el sistema, incluyendo las cuatro celdas Peltier, los cuatro termistores y el circuito de control basado en un microcontrolador ESP32. Por su parte, la Figura 3(b) corresponde al prototipo físico implementado durante las pruebas experimentales, el cual fue utilizado para validar el funcionamiento del sistema de control térmico.

Para evaluar el desempeño del sistema se realizaron pruebas experimentales utilizando temperaturas objetivo de 30, 35, 37 y 40 ◦C. Para cada condición de prueba se permitió que el sistema operara durante aproximadamente 30 minutos con el fin de alcanzar el régimen permanente. Una vez estabilizada la temperatura, se efectuó una primera tanda de mediciones registrando la temperatura reportada por un termómetro digital Fluke 54, con sonsa tipo K, poniéndolo en contacto en cada región del disco de aluminio donde se posicionaron cada uno de los cuatro termistores. Posteriormente se dejó transcurrir un minuto y se realizó una segunda tanda de mediciones bajo las mismas condiciones. De esta manera, para cada temperatura objetivo se obtuvieron ocho mediciones en total, cuyo promedio se empleó como valor representativo para el análisis.



(a) (b)

*Figura 3: (a) Disposición de los principales componentes del sistema de control térmico. (b) Prototipo físico implementado y utilizado durante las pruebas experimentales.*

Los resultados experimentales obtenidos se presentan en la Tabla 2.

***Tabla 2:*** *Resultados experimentales del sistema de control proporcional de temperatura.*

| Temperatura objetivo (◦C) | Temperatura promedio (◦C) | Error absoluto (◦C) |
|---|---|---|
| 30.0 | 31.1 | 1.1 |
| 35.0 | 35.9 | 0.9 |
| 37.0 | 37.6 | 0.6 |
| 40.0 | 40.6 | 0.6 |

Como se observa en la Tabla 2, el sistema alcanzó temperaturas cercanas a las consignas establecidas para todas las condiciones evaluadas. Las temperaturas promedio obtenidas fueron de 31.1, 35.9, 37.6 y 40.6 ◦C para referencias de 30, 35, 37 y 40 ◦C, respectivamente, correspondiendo a errores absolutos de 1.1, 0.9, 0.6 y 0.6 ◦C.

## Discusión

Los resultados obtenidos demuestran que la arquitectura propuesta permite regular la temperatura de una superficie emisora mediante un esquema de control distribuido basado en cuatro celdas Peltier y cuatro sensores de temperatura. La estrategia de ubicar los actuadores en posiciones cardinales y los sensores en posiciones intercardinales permitió estimar la temperatura de cada región del disco de aluminio y aplicar acciones de control independientes, favoreciendo una distribución térmica más uniforme sobre la superficie emisora.

Las pruebas experimentales mostraron que el sistema alcanzó temperaturas cercanas a las consignas establecidas, obteniéndose errores absolutos inferiores a 1.1 °C para todas las temperaturas evaluadas. Se observa además una disminución del error conforme aumenta la temperatura de operación, alcanzándose errores de aproximadamente 0.6 °C para referencias de 37 y 40 °C. Este comportamiento sugiere que la dinámica térmica del sistema resulta más favorable cuando la diferencia entre la temperatura objetivo y la temperatura ambiente es mayor.

Aunque el presente trabajo constituye una validación preliminar del sistema, los resultados son alentadores considerando que el objetivo principal fue desarrollar un prototipo funcional utilizando componentes

comerciales de bajo costo. El empleo de un microcontrolador ESP32 y un algoritmo PID permitió implementar un sistema flexible y fácilmente modificable para futuras mejoras, sin recurrir a controladores industriales especializados.

Un aspecto particularmente relevante del prototipo es la utilización de una superficie de aluminio recubierta con negro de humo, mediante la cual se obtuvo una emisividad cercana a 0.99. Esta característica resulta especialmente importante en aplicaciones de termografía infrarroja, ya que permite aproximar el comportamiento radiativo de un cuerpo negro ideal y reduce los errores asociados a la emisión térmica de la superficie.

Es importante señalar que este trabajo se centra en el diseño e implementación del sistema. Por ello, aún quedan aspectos por investigar, entre ellos la evaluación de la estabilidad térmica durante periodos prolongados de operación, la caracterización de la uniformidad espacial de temperatura sobre toda la superficie emisora, la determinación experimental de la incertidumbre de medición y la comparación directa con fuentes comerciales de referencia bajo condiciones controladas. Estos estudios permitirán establecer con mayor precisión el desempeño metrológico del dispositivo.

## Conclusiones

En este trabajo se desarrolló una fuente de calibración de cuerpo negro infrarrojo con control de temperatura basado en un algoritmo PID implementado sobre un microcontrolador ESP32. La combinación de cuatro sensores de temperatura y cuatro celdas Peltier, permitió implementar un sistema de regulación térmica distribuido, capaz de mantener temperaturas cercanas a las consignas establecidas.

Las pruebas preliminares realizadas demostraron que el prototipo alcanza errores absolutos comprendidos entre 0.6 y 1.1 °C para el intervalo de temperaturas evaluado, lo que confirma la viabilidad de la arquitectura propuesta para aplicaciones de investigación y desarrollo. Asimismo, la utilización de un recubrimiento de negro de humo permitió obtener una superficie con una emisividad cercana a 0.99, característica indispensable para su empleo como referencia en sistemas de medición infrarroja.

El sistema desarrollado representa una alternativa de bajo costo frente a equipos comerciales y proporciona una plataforma flexible para futuras investigaciones en instrumentación térmica. Como trabajo futuro se contempla la incorporación de un sistema de enfriamiento que permita operar por debajo de la temperatura ambiente, así como la evaluación de la estabilidad térmica durante periodos prolongados, la uniformidad espacial de la superficie emisora, la estimación de la incertidumbre de medición y la validación metrológica mediante comparación con fuentes patrón comerciales.

## Referencias

ASTM E1256-22. Standard Test Methods for Radiation Thermometers (Single Waveband Type).

ASTM E2847-23. Standard Practice for Calibration and Accuracy Verification of Wideband Infrared Imaging Systems.

Kaplan, H. (2007). Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment. SPIE Press.

Minkina, W., & Dudzik, S. (2009). Infrared Thermography: Errors and Uncertainties. John Wiley & Sons.

Modest, M. F. (2013). Radiative Heat Transfer (3rd ed.). Academic Press.

Vollmer, M., & Möllmann, K.-P. (2018*). Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications* (2nd ed.). Wiley-VCH.

González Anaya Alan, N. N.-V.-M. (2025). Construcción de control PID de temperatura para muestras biológicas. *Jovenesen la Ciencia*, 1-9.