

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL TÉRMICO CON RASPBERRY PI: UNA PLATAFORMA PARA EL APRENDIZAJE EN INGENIERÍA

Merino Loman Jonatan Natanael, Rueda-Soriano Esteban, López-Morales Virgilio, Ojeda-Misses Manuel Alejandro*

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Área Académica de Computación y Electrónica, Carretera
Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, C. P. 42090, Mineral de la Reforma, Hidalgo.
e-mail: me384706@uaeh.edu.mx, estebanrs@uaeh.edu.mx, virgilio@uaeh.edu.mx,
manuel_ojeda@uaeh.edu.mx

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema de control térmico basado en Raspberry Pi, diseñado como una plataforma educativa para el aprendizaje en ingeniería. El sistema integra sensores de temperatura, módulos de adquisición de datos y algoritmos de control en tiempo real, permitiendo la monitorización y regulación precisa de procesos térmicos. Mediante la combinación de métodos de calentamiento y enfriamiento, se valida experimentalmente la ley de enfriamiento de Newton bajo condiciones controladas. Además, se implementa una interfaz gráfica que facilita la visualización dinámica del comportamiento térmico, promoviendo un aprendizaje práctico y aplicado. Los resultados demuestran la efectividad del prototipo como herramienta didáctica para la enseñanza de conceptos fundamentales de transferencia de calor y control automático, contribuyendo a la formación integral de estudiantes de ingeniería.

Palabras clave: adquisición de datos, ley de enfriamiento de Newton, sistema térmica, sensor, temperatura.

ABSTRACT

This work presents the development of a thermal control system based on Raspberry Pi, designed as an educational platform for engineering learning. The system integrates temperature sensors, data acquisition modules, and real-time control algorithms, enabling precise monitoring and regulation of thermal processes. By combining heating and cooling methods, Newton's Law of Cooling is experimentally validated under controlled conditions. Additionally, a graphical interface is implemented to facilitate dynamic visualization of thermal behavior, promoting practical and applied learning. The results demonstrate the effectiveness of the prototype as a didactic tool for teaching fundamental concepts of heat transfer and automatic control, contributing to the comprehensive training of engineering students.

Keywords: data acquisition, Newton's law of cooling, thermal system, sensor, temperature.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas térmicos implican la transferencia de calor mediante conducción, convección y radiación, y suelen analizarse en términos de resistencia y capacitancia térmica. Aunque en su naturaleza son distribuidos, a menudo se

simplifican utilizando modelos de parámetros concentrados [1]. Diversos estudios han aplicado técnicas de control en sistemas térmicos, como el control predictivo en hornos de cemento [2], el control difuso en fundición de metales [3] o los predictores de Smith en procesos químicos [4].

La ley de enfriamiento de Newton establece que la tasa de transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperatura entre un cuerpo y su entorno. Aunque se utiliza ampliamente, pocos trabajos derivan modelos directamente de esta ley para su aplicación en teoría de control; entre los más relevantes destacan enfoques con cálculo fraccional [5], eficiencia en motores [6], modelado ecológico [7] y termorregulación animal [8]. Este artículo propone validar un modelo basado en la ley de enfriamiento de Newton mediante un prototipo controlado en tiempo real con Raspberry Pi. La disponibilidad de plataformas de bajo costo y alto rendimiento, junto con herramientas como la simulación hardware-in-the-loop (HIL) y el prototipado rápido de control (RCP), permite implementar y validar modelos matemáticos sin necesidad de costosos prototipos físicos, lo que resulta especialmente útil en entornos educativos y de formación técnica. Además, investigaciones recientes han demostrado que el uso de microcontroladores y sistemas embebidos de bajo costo facilita la enseñanza de la teoría de control y mejora la comprensión práctica de fenómenos térmicos en estudiantes de ingeniería [9][15].

2. DESARROLLO

Con base en esta necesidad de integrar teoría y práctica, se procedió al diseño e implementación de un sistema físico de control térmico utilizando una Raspberry Pi, con el objetivo de proporcionar una herramienta accesible, funcional y didáctica que permita al estudiantado experimentar directamente con los principios fundamentales del control automático y la transferencia de calor.

Este trabajo se basa en comprobar empíricamente la ley de enfriamiento de Newton, la cual es modelada mediante la siguiente ecuación diferencial [1]:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_a) \quad (1).$$

Donde T es la temperatura del cuerpo (fluido en el recipiente interno), T_a es la temperatura del medio circundante (pecera) y k es la constante de enfriamiento o calentamiento.

2.1 Prototipo físico

La Figura 1 muestra el diagrama general del sistema diseñado para comprobar experimentalmente la ley de enfriamiento de Newton en condiciones de transferencia térmica controlada. El montaje experimental consiste en una pecera de vidrio de un litro que contiene un volumen de agua a temperatura ambiente, en cuyo centro se sitúa un recipiente cilíndrico más pequeño con un fluido inicial a diferente temperatura. Esta configuración permite evaluar cómo el entorno afecta la disipación de calor del recipiente interno.

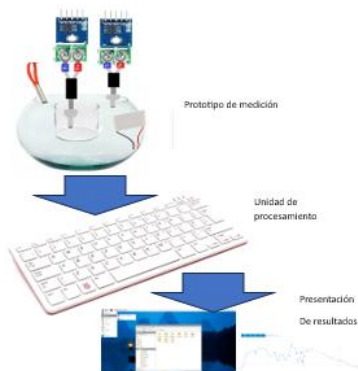


Figura 1. Diagrama del prototipo físico.

El sistema cuenta con una tarjeta Raspberry Pi como unidad de adquisición de datos y control. Esta se encarga de leer temperaturas en tiempo real mediante sensores digitales sumergidos, tanto en el líquido de la pecera como en el recipiente central. Además, controla el encendido y apagado de una etapa de potencia que alimenta celdas Peltier según las condiciones térmicas detectadas. Estas celdas, dispuestas en contacto con las paredes externas de la pecera, permiten inducir un flujo de calor en una dirección definida mediante inversión de polaridad, lo que habilita fases de enfriamiento y calentamiento forzado [7], [9].

Los datos recogidos por la Raspberry Pi son registrados y representados en tiempo real mediante un script en Python, lo que permite observar la evolución térmica del sistema y ajustar parámetros experimentales [4], [5]. El sistema está programado para activar las celdas Peltier si la diferencia de temperatura entre el fluido central y el entorno supera un umbral establecido, simulando un mecanismo de disipación o ganancia térmica acelerada [4], [5]. La etapa de potencia es controlada mediante entradas y salidas de propósito general (General Purpose Input/Output), que permiten modulación por modulación de ancho de pulso (PWM), mejorando la eficiencia del sistema y evitando sobrecargas térmicas [13].

El análisis de los datos permite observar la relación entre la temperatura y el tiempo bajo condiciones naturales y forzadas, así como calcular valores experimentales del coeficiente k , permitiendo validar el modelo teórico. Además, se observa la influencia de factores como el volumen del fluido, el área de intercambio térmico y la activación controlada de las celdas Peltier. Este enfoque proporciona un entorno experimental replicable para validar principios termodinámicos, empleando componentes accesibles como la Raspberry Pi y sensores digitales, lo que lo hace útil en contextos educativos y de investigación aplicada.[15]

2.2 Selección y configuración de materiales

Para el desarrollo del prototipo se eligió una pecera de cristal de un litro como entorno térmico exterior. Su bajo volumen facilita el control de variables externas y reduce el impacto de factores ambientales no deseados, como corrientes de aire. Además, el material transparente permite el monitoreo visual continuo del sistema, mientras que su geometría compacta y paredes delgadas facilitan una disipación de calor efectiva [11][10].

Con el objetivo de intensificar el aislamiento y obtener un gradiente térmico más controlado, se incorporó un recipiente cilíndrico secundario, en forma de bote de especias, fabricado también en cristal, pero con mayor grosor. Este se colocó de manera centrada dentro de la pecera, y funciona como cuerpo de estudio térmico principal. Su masa térmica adicional permite retener el calor durante más tiempo, lo cual resulta fundamental para analizar de forma precisa los procesos de transferencia térmica hacia el medio circundante.

$$V_{\text{termopar}} = S(T_m - T_{\text{ref}}) \quad (2)$$

donde S es la sensibilidad del termopar (en mV/°C), T_m es la temperatura del punto de medición y T_{ref} es la del extremo de referencia (unión fría), para la digitalización y la comunicación es usado el módulo ADS1115, capaz de recibir señales analógicas provenientes de sensores como termistores o sensores de voltaje proporcional a la temperatura, y las convierte en señales digitales de 16 bits. Este dispositivo se comunica con la Raspberry Pi 400 mediante el protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit), una interfaz serial de dos hilos que permite la transmisión de datos entre múltiples dispositivos con alta eficiencia y baja complejidad de conexión. A través de esta comunicación, la Raspberry Pi puede enviar comandos y recibir datos del sensor o del controlador conectado, facilitando la implementación de sistemas de monitoreo y control térmico en tiempo real. El uso de I2C es especialmente ventajoso en aplicaciones embebidas por su compatibilidad con una amplia variedad de periféricos y su capacidad para operar a velocidades moderadas con un bajo consumo de recursos. Los valores digitalizados son modelados como:

$$\text{Valor}_{\text{digital}} = \frac{2^{15-1}}{V_{\text{ref}}} V_{\text{in}} \quad (3)$$

Donde $Valor_{digital}$ es el valor numérico resultante (sin unidad), V_{in} es el voltaje de entrada analógica (V) y V_{ref} es el voltaje de referencia del convertidor analógico digital (V).

En cuanto al procesamiento, visualización y almacenamiento se lleva a cabo mediante un script en Python. Donde los datos se almacenan temporalmente en estructuras circulares, deque (double-ended queue). Se utilizan en este sistema para almacenar y gestionar de manera eficiente las muestras recientes de temperatura. Estas estructuras permiten insertar y eliminar elementos tanto por el frente como por el final, lo que resulta ideal para implementar ventanas deslizantes de datos en tiempo real.

En el contexto del control térmico, un deque circular permite mantener un registro de las últimas n lecturas de temperatura sin necesidad de realinear toda la estructura, lo que optimiza el uso de memoria y reduce el tiempo de cómputo. Este enfoque es especialmente útil para calcular promedios móviles, detectar tendencias o suavizar la señal antes de que sea utilizada por el controlador.

Su integración mejora la robustez del sistema al hacer que las decisiones de control se basen en un historial representativo del comportamiento térmico, en lugar de depender de valores instantáneos que podrían estar afectados por ruido o variaciones abruptas y se suavizan con un filtro de media móvil y se grafican en tiempo real. El filtro aplicado es denotado como:

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[n-k] \quad (4)$$

donde se representa un promedio móvil simple de longitud N , aplicado muestras pasadas de la señal original $x[n-k]$. Esta operación calcula el valor de salida $y[n]$ como el promedio de las N muestras más recientes de la señal de entrada, lo que permite suavizar variaciones rápidas o picos de ruido en los datos.

En el sistema de control térmico, esta fórmula se implementa utilizando una estructura circular tipo deque, donde se almacenan las últimas N lecturas del sensor de temperatura. Cada vez que se recibe una nueva muestra $x[n]$, se actualiza el deque, se recalcula el promedio $y[n]$, y este valor suavizado se usa como entrada para el algoritmo de control.

Este filtrado mejora la estabilidad del sistema, reduce la sensibilidad al ruido de los sensores y permite decisiones de control más robustas en tiempo real.

Para la etapa de control térmico activo, la Raspberry Pi controla transistores MOSFET IRLZ44 para alimentar resistencias cerámicas de 24 V y 40 W. También controla celdas Peltier que extraen calor mediante el efecto termoelectrico. La potencia disipada en una resistencia se modela como:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (5)$$

donde P es la potencia disipada (W), V es el voltaje aplicado (V) y R es la resistencia eléctrica (Ω). En cuanto, al flujo de calor extraído por el lado frío de una celda Peltier se estima como:

$$Q_c = \psi I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T \quad (6)$$

describe el flujo de calor neto Q_c en un dispositivo termoelectrico (como un módulo Peltier), en función de la corriente eléctrica I aplicada. Cada término representa un fenómeno físico distinto asociado a la transferencia de calor. Donde Q_c es el calor extraído del lado frío (W), ψ es el coeficiente Peltier (V), I es la corriente que pasa por la celda (A), R es la resistencia interna de la celda (Ω), K es la conductividad térmica (W/°C) y ΔT es la diferencia de temperatura entre lados caliente y frío (°C).

En otras palabras, ψI es conocido como el efecto Peltier, que describe el calor absorbido o liberado en la unión del material al pasar una corriente I , donde ψ es el coeficiente de Peltier. En

cuanto al termino, $\frac{1}{2} I^2 R$ representa la pérdida por efecto Joule,

correspondientes al calor disipado por la resistencia interna R del dispositivo al circular una corriente eléctrica. Finalmente, $K \Delta T$ representa la conducción térmica, que representa el calor que se pierde o gana por conducción desde el lado caliente al lado frío del dispositivo, siendo la K conductancia térmica y ΔT la diferencia de temperatura entre ambos lados.

Esta ecuación es clave para el diseño y control de sistemas termoelectricos, ya que permite modelar cómo la corriente eléctrica influye en el comportamiento térmico, facilitando el desarrollo de algoritmos de control más precisos y eficientes.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Funcionamiento

El funcionamiento del sistema se basa en la inicialización de la Raspberry Pi, la cual se encarga de establecer la comunicación con dos componentes clave: el ADC ADS1115 mediante el protocolo I2C, y el termopar digital MAX6675 a través del protocolo SPI.

El ADS1115 permite convertir señales analógicas provenientes de sensores (como termistores o sensores de voltaje proporcional a temperatura) en datos digitales de alta resolución, mientras que el MAX6675 proporciona lecturas digitales precisas de temperatura utilizando un termopar tipo K.

Esta configuración híbrida de comunicación I2C/SPI permite que la Raspberry Pi actúe como nodo central de adquisición y control, recolectando datos térmicos en tiempo real y enviando señales de control mediante modulación por ancho de pulso (PWM) para regular la etapa de potencia, asegurando así un control térmico preciso y eficiente del sistema.

Cada segundo, una función se encarga de actualizar las lecturas de temperatura, aplicando un filtro de promedio móvil para suavizar los datos y minimizar el efecto del ruido. Posteriormente, los valores filtrados se grafican en tiempo real,

permitiendo una visualización continua del comportamiento térmico del sistema.

La evolución de la temperatura observada sigue el modelo físico descrito por la ley de enfriamiento de Newton de la ecuación 1, donde la tasa de variación térmica es proporcional a la diferencia entre la temperatura del sistema y la del entorno. Este modelo permite predecir la dinámica térmica y ajustar el control en función del gradiente térmico observado.

La interacción coordinada de estos componentes — resistencias que generan calor, MOSFETs que regulan la energía eléctrica, celdas Peltier que inducen enfriamiento activo, y una Raspberry Pi que centraliza el control y la adquisición de datos — conforma un sistema integral que permite estudiar de forma detallada los fenómenos de transferencia térmica.

Este enfoque facilita la realización de experimentos replicables en los que se pueden observar tanto el enfriamiento pasivo, resultado de la disipación natural, como el enfriamiento activo inducido, con el objetivo de comprobar empíricamente la validez de la ley de enfriamiento de Newton.

3.2 Subsistema de adquisición, visualización y suavizado de señales térmicas

Para verificar experimentalmente la ley de enfriamiento de Newton, se implementó un sistema de adquisición y control térmico que captura datos de temperatura de manera precisa y continua. Basado en tecnologías accesibles, permite monitorear en tiempo real el comportamiento térmico de un cuerpo en contacto con un medio más frío y validar el modelo matemático. La plataforma utiliza una Raspberry Pi con un convertidor analógico-digital ADS1115 para digitalizar señales de sensores de temperatura tipo K mediante el módulo MAX6675. La interfaz en Python permite procesar, visualizar y suavizar las señales térmicas. El sistema está compuesto por cuatro bloques (ver Figura 2).

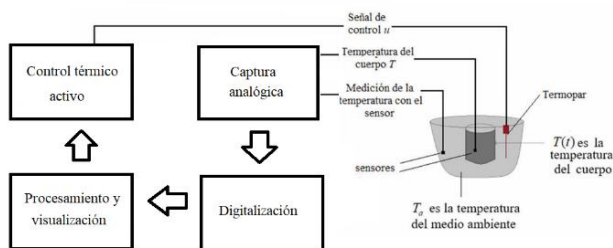


Figura 2. Diagrama del sistema de medición y control.

Las mediciones de temperatura se realizan con termopares tipo K y acondicionamiento de señal para garantizar precisión. El ADC ADS1115 convierte las señales a digital y se comunica con la Raspberry Pi vía I2C. Las lecturas se filtran y se visualizan en tiempo real mediante Python, mostrando el descenso de temperatura hasta el equilibrio térmico.

El control térmico activo regula el calentamiento con resistencias cerámicas y el enfriamiento con celdas Peltier, ambos gestionados por MOSFET IRLZ44 controlados por la Raspberry Pi. Esto permite simular enfriamiento natural y forzado en un entorno controlado.

En los ensayos iniciales, se evaluó el calentamiento de una resistencia cerámica de 40 W y un sensor termopar, registrando el aumento exponencial de temperatura. Posteriormente, se optimizó el diseño usando una pecera de mayor volumen con tres resistencias distribuidas y dos termopares (en el fluido y en el aire), logrando un perfil térmico más homogéneo y permitiendo calcular gradientes respecto al ambiente.

Estos resultados verifican que el prototipo implementado no solo es capaz de reproducir experimentalmente la ley de enfriamiento de Newton, sino que también permite explorar diferentes escenarios de transferencia térmica mediante control activo (ver Figura 3).



Figura 3. Fase final de prototipo.

Al activarse las celdas Peltier, la curva de enfriamiento mostró una pendiente considerablemente más pronunciada, evidenciando una aceleración en el proceso de pérdida térmica. Esta condición permitió evaluar de manera clara el efecto del enfriamiento activo y contrastarlo con la disipación pasiva natural. Además, gracias a que el sistema registra datos en tiempo real y compara ambas fases, se demostró su capacidad para simular distintos escenarios térmicos de forma controlada y precisa, facilitando así un análisis detallado de las temperaturas obtenidas (ver Figura 4).



Figura 4. Obtención de temperatura.

Gracias a la implementación de un sistema de adquisición de datos en tiempo real, fue posible monitorear con precisión los cambios térmicos, como se muestra en la Figura 5, además de generar registros comparativos para ambas fases del experimento: tanto durante el calentamiento como en el proceso de enfriamiento, ya sea pasivo o asistido.

Este enfoque no solo permitió validar experimentalmente los modelos teóricos involucrados, sino que también demostró la capacidad del prototipo para recrear diversos escenarios térmicos bajo condiciones controladas, consolidándolo como una herramienta versátil y eficaz para estudios de transferencia de calor.



Figura 5. Gráfico de comportamiento.

Una parte esencial de este proceso fue el uso de herramientas de visualización desarrolladas en Python, específicamente mediante las bibliotecas Matplotlib y Tkinter, las cuales permitieron graficar en tiempo real los datos recolectados por los sensores. La Figura 5 y la Figura 6 muestran un ejemplo de esta visualización, donde se representan las temperaturas reportadas por dos sensores: el sensor 1 (línea azul), ubicado dentro de la pecera principal, y el sensor 2 (línea amarilla), colocado en el recipiente interno sumergido. Esta disposición permitió registrar de manera diferenciada la temperatura global del sistema y la del elemento focal del estudio, facilitando un análisis más detallado del comportamiento térmico.

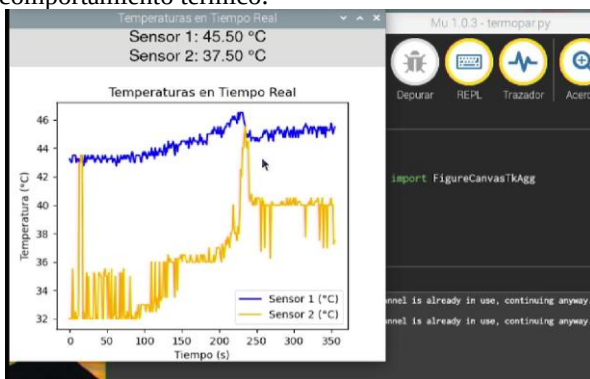


Figura 6. Fase final de prototipo.

El comportamiento térmico de ambos sensores se presenta de manera dinámica conforme avanza el tiempo, lo que facilitó no solo la supervisión visual inmediata de la estabilidad del experimento, sino también la comparación directa entre zonas con distinto comportamiento térmico. Por ejemplo, en el gráfico

se observa que el sensor 1 mantiene una temperatura más alta y estable, mientras que el sensor 2 muestra fluctuaciones más pronunciadas, como se muestra en la Figura 6, características propias de una menor masa térmica y una mayor exposición a los mecanismos de enfriamiento.

3.3 Validación experimental de la ley de enfriamiento de Newton
La validación experimental se valida mediante el modelo aplicado que corresponde a un modelo dinámico de primer orden, derivado de la ley de enfriamiento de Newton [16].

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a)e^{-kt} \quad (7)$$

donde: $T(t)$ corresponde a la temperatura medida en el tubo interno, T_a es la temperatura del medio (pecera), T_0 es la temperatura inicial y k es la constante de enfriamiento determinada experimentalmente.

Es un modelo exponencial de decaimiento (o de relajación), donde la variable dependiente $T(t)$ tiende de forma asintótica hacia la temperatura del medio T_a . En términos físicos, esto significa que el sistema tiende a “relajarse” hacia un estado de equilibrio térmico, y la velocidad de esta relajación está determinada por la constante de tiempo del sistema. Cuando el sistema está en contacto con un ambiente más frío o se activan las celdas Peltier, la diferencia de temperatura genera un flujo de calor que acelera la transición hacia el equilibrio. La ecuación utilizada permite calcular paso a paso cómo varía la temperatura en función del tiempo, considerando la influencia de la temperatura previa y la disipación de calor.

Temperatura tubo (estimada), TEMPERATURA OBTENIDA Y TEMPERATURA OBTENIDA CON CELDAS PELTIER

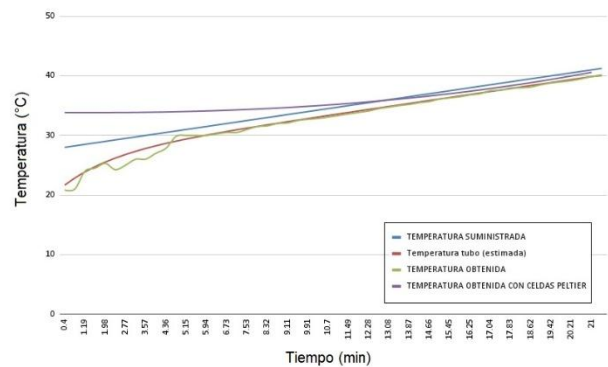


Figura 7. Comparación entre la curva real y la curva teórica basada en la ley de enfriamiento de Newton.

Se puede observar que la curva teórica se ajusta muy bien a los datos experimentales (ver Figura 7), confirmando que la dinámica térmica sigue un comportamiento exponencial de primer orden. Al encender las celdas Peltier, la pendiente de enfriamiento aumenta, mostrando claramente cómo la disipación de calor forzada acelera la estabilización térmica en comparación con la disipación natural.

Aunque se detectaron posibles fuentes de error, como la pérdida de calor por radiación, pequeñas corrientes de aire y la sensibilidad del termopar a cambios brusco, estas se controlaron

mediante la repetición de los experimentos y la toma de múltiples registros, garantizando que los resultados obtenidos sean confiables y útiles para fines didácticos. En la figura 8 se presentan los datos obtenidos junto con las temperaturas estimadas por el modelo y la diferencia absoluta calculada, lo que permite observar la correspondencia entre la simulación y la medición experimental.

TEMPERATURA SUMINISTRADA	Temperatura tubo (estimada)	TEMPERATURA OBTENIDA	TEMPERATURA OBTENIDA CON CELDAS Peltier	Diferencia absoluta
28	21.85483696	20.85	33.8265648	0.8048369636
28.25	22.85933695	21	33.82768546	1.859336955
28.5	23.87444712	24	33.82966723	0.1255528795
28.75	24.75823492	24.5	33.83290006	0.2582349193
31	29.39765131	30	34.01360719	0.6023488855
31.25	29.73342517	30	34.05764702	0.2665748343
31.5	30.05365086	30	34.10662859	0.0536508558
31.75	30.36114679	30.25	34.16063494	0.111467875
32	30.65822048	30.5	34.21975051	0.1582204751
33.75	32.58040574	32.5	34.78401582	0.0604057388
34	32.82790975	32.7	34.8872208	0.1279097524
34.25	33.08569098	32.82790975	34.99636187	0.2577812282
34.5	33.34206171	33.08569098	35.11153877	0.2563707309
34.75	33.59727762	33.34206171	35.23285297	0.2552159133
35	33.85154805	33.59727762	35.36040759	0.2542704286
35.25	34.10504438	33.85154805	35.49430751	0.2534963312
35.5	34.35790694	34.10504438	35.63465939	0.2528625539
35.75	34.6102506	34.5	35.78157165	0.1102505994
36	34.86216943	34.75	35.93515465	0.1121694267
36.25	35.11374043	35	36.09552019	0.1137404295
36.5	35.36502666	35.2	36.26278258	0.1650266579
36.75	35.61607973	35.5	36.430705761	0.1160797326
39	37.87004988	37.98	38.34121783	0.1099501152
39.25	38.1201924	38	38.59243957	0.120192403
39.5	38.37030909	38.12	38.85208499	0.250309087
39.75	38.62040462	38.5	39.12029569	0.1204046198
40	38.87048284	38.8	39.39721561	0.07048283542
40.25	39.12054687	39	39.68289112	0.120546873
40.5	39.3705993	39.2	39.97777105	0.1705992025
40.75	39.62064223	39.5	40.28170673	0.1206422281
41	39.87067737	39.87	40.59495204	0.000677326538

Figura 8. Datos de la curva real y la curva teórica basada en la ley de enfriamiento de Newton.

Finalmente, los resultados muestran que al inicio el error fue mayor (hasta 2 °C) debido a la adaptación inicial del sistema y a la respuesta transitoria del sensor. Conforme avanzó el experimento, el error disminuyó progresivamente hasta estabilizarse por debajo de 0.5 °C, evidenciando una alta correlación entre los datos medidos y la simulación teórica. Este comportamiento, ilustrado en la Figura 9, confirma que el modelo de primer orden basado en la ley de enfriamiento de Newton representa adecuadamente la dinámica térmica del sistema, validando tanto la metodología experimental como su aplicabilidad en contextos académicos.



Figura 9. Curva de diferencia absoluta entre los datos reales y los datos teóricos.

4. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un prototipo de control térmico basado en Raspberry Pi, que integra sensores de temperatura, módulos de adquisición de datos y actuadores controlados por PWM, permitiendo validar experimentalmente la Ley de Enfriamiento

de Newton en condiciones pasivas y con enfriamiento activo. La visualización en tiempo real facilitó la supervisión continua del proceso y la detección rápida de posibles errores, mejorando la confiabilidad de los resultados.

El prototipo constituye una herramienta educativa valiosa, ya que permite interactuar con sensores y algoritmos de control, observar gráficamente la respuesta del sistema y fortalecer el aprendizaje activo de principios físicos y de ingeniería. Su diseño modular, de bajo costo y fácil implementación lo hace replicable para prácticas de laboratorio en cursos de control automático, instrumentación y sistemas dinámicos.

Como trabajo futuro, se propone integrar control avanzado, nuevos sensores y algoritmos de aprendizaje automático, así como desarrollar materiales didácticos complementarios que amplíen su uso como plataforma educativa en ingeniería térmica y control de sistemas.

5. REFERENCIAS

- [1] J. Benítez, H. Martínez, y A. Rojas, "Aplicación de predictores de Smith en procesos con retardo," *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 14, no. 3, pp. 607-620, 2015.
- [2] J. Benítez, P. Torres, y R. García, "Control difuso aplicado a hornos de fundición de aluminio," *Ingeniería Mecánica*, vol. 19, no. 1, pp. 45-53, 2016.
- [3] J. G. Boyles et al., "Ecological applications of Newton's law of cooling," *Ecological Modelling*, vol. 398, pp. 75-82, 2019.
- [4] Y. A. Cengel y M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 8th ed. McGraw-Hill Education, 2015.
- [5] F. García-Sánchez, D. Torres, y A. López, "Sistemas de control térmico aplicados en la industria 4.0," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 18, no. 4, pp. 463-474, 2021.
- [6] D. Halliday, R. Resnick, y J. Walker, *Fundamentals of Physics*, 10th ed. Wiley, 2014.
- [7] F. P. Incropera y D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. Wiley, 2011.
- [8] E. López-González, R. Mejía, y J. Moreno, "Filtrado digital aplicado a señales térmicas para control automático," *Ingeniería Electrónica*, vol. 26, no. 2, pp. 77-86, 2019.
- [9] M. S. Mahmoud et al., "Rapid prototyping and real-time control: A review on industrial trends and recent developments," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 175931-175949, 2020.
- [10] Maxim Integrated, "MAX6675 Cold-Junction Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter," Datasheet, 2013.
- [11] L. Mendoza, M. Ortega, y A. Cordero, "Integración de prácticas experimentales en cursos de control automático," *Revista Educación en Ingeniería*, vol. 17, no. 33, pp. 59-69, 2022.
- [12] S. Xie et al., "Design and implementation of a Peltier-based thermal control system," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 303, p. 111773, 2020.
- [13] F. Yan et al., "Thermal modeling for automotive engine cooling," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 58, pp. 27-35, 2012.
- [14] H. Zhou, Y. Zhang, y L. Chen, "Effect of container material on thermal dissipation in controlled environments," *Thermal Science*, vol. 24, no. 5, pp. 3059-3067, 2020.
- [15] Endah Kristiani, Lu-Yan Wang, Jung-Chun Liu, et al. "An Intelligent Thermal Compensation System Using Edge Computing for Machine Tools" *Sensors*, Vol. 24, No. 8, 2024. DOI:10.3390/s24082531.
- [16] Ojeda-Misses, M.A., González-López, J.C., (2023). Simulación numérica del control de temperatura para un modelo de parámetros concentrados obtenido de la ley de enfriamiento de Newton. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 24 (03), 1-9.
<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2023.24.3.020>