

Jornadas de Automática

Control en cascada de un sistema térmico basado en módulos Peltier con asimetría y retardo para la simulación de la cadena de frío

Javier M. Garrido-López*, Manuel Jiménez-Buendía, Ana Toledo-Moreo, Pedro A. Buendía-Rivas, Roque Torres-Sánchez

Dpto. de Automática, Ingeniería Eléctrica y Tecnología Electrónica, ETSII, Universidad Politécnica de Cartagena, 30202, Cartagena, España.

To cite this article: Garrido-López, J. M., Jiménez-Buendía, M., Toledo-Moreo, A., Buendía-Rivas, P. A., Torres-Sánchez, R. 2026. Cascade control of a Peltier-based thermal plant with asymmetry and time delay for cold chain simulation. *Jornadas de Automática*, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13648>

Resumen

Las variaciones de temperatura durante el transporte refrigerado afectan considerablemente a la calidad y la vida útil de los productos perecederos, lo que provoca su desperdicio prematuro. Este estudio presenta el diseño e implementación de un sistema de control para una cámara climática de alta precisión basada en módulos Peltier. El objetivo es replicar en tiempo real perfiles térmicos dinámicos registrados durante el transporte de productos perecederos. El sistema se caracteriza por presentar una fuerte asimetría dinámica entre los ciclos de calentamiento y enfriamiento, además de retardos de transporte significativos. Se propone una arquitectura de control en cascada que integra un lazo interno de respuesta rápida para las celdas de Peltier y un lazo externo para la temperatura del aire. Para abordar las no linealidades, se implementan controladores PID de dos grados de libertad con esquemas *anti-windup*, Predictor de Smith para la compensación del tiempo muerto e histéresis para cambiar entre los modos de enfriamiento y calentamiento. Los resultados muestran la capacidad del sistema para seguir consignas variables con alta precisión. Esto permite su uso como gemelo físico de la cadena de poscosecha para evaluar la vida útil de los alimentos a través de modelos predictivos y reducir su desperdicio.

Palabras clave: Cadena de suministro poscosecha, Vida útil, Gemelo físico, Control PID en cascada, Módulos Peltier.

Cascade control of a Peltier-based thermal plant with asymmetry and time delay for cold chain simulation

Abstract

Temperature fluctuations during refrigerated transport significantly affect the quality and shelf life of perishable products, leading to premature waste. This study presents the design and implementation of a control system for a high-precision climate chamber based on Peltier modules. The objective is to replicate, in real-time, the dynamic thermal profiles detected during the transport of perishable goods. The system exhibits strong dynamic asymmetry between heating and cooling cycles, as well as significant transport delays. A cascade control architecture is proposed, integrating a fast-response inner loop for the Peltier cells and an outer loop for the air temperature. To address non-linearities, two-degree-of-freedom (2-DOF) PID controllers with *anti-windup* schemes are implemented, alongside a Smith Predictor for dead-time compensation and hysteresis for switching between cooling and heating modes. The results demonstrate the system's ability to track variable setpoints with high precision. This enables its use as a physical twin of the postharvest chain to evaluate food shelf life through predictive models and reduce waste.

Keywords: Postharvest supply chain, Shelf life, Physical twin, Cascade PID control, Peltier modules.

1. Introducción

La preservación de la calidad de frutas y verduras durante el transporte refrigerado es un desafío crítico en la logística poscosecha (FAO et al., 2024). Estos productos son organismos vivos cuya respiración y degradación dependen estrechamente de las condiciones ambientales (Charpe et al., 2019). Aunque existen sistemas de monitorización, la

capacidad de replicar esas condiciones exactas en un entorno de laboratorio controlado permite realizar análisis fisiológicos precisos sin la incertidumbre del transporte real.

Las cámaras climáticas basadas en compresores convencionales presentan limitaciones debido a su elevada inercia térmica y partes móviles (ASHRAE, 2014; Mazhar et al., 2023). En este contexto, los módulos termoelectrónicos

(celdas de Peltier) surgen como una alternativa eficiente por su capacidad de conmutación rápida entre frío y calor y su tamaño compacto (D. M. Rowe, 2006).

Sin embargo, su control no es trivial debido a varios factores: (i) asimetría dinámica, la inercia del sistema varía dependiendo de si los módulos Peltier están enfriando o calentando (Vasilyev et al., 2024); (ii) no linealidades y tiempos muertos, provocados por el enfriamiento y calentamiento reversibles de las celdas y la inercia térmica del aire (HoSung Lee, 2011); y (iii) saturación, la potencia limitada de los módulos y la necesidad de cambios rápidos de temperatura provocan que los actuadores trabajen frecuentemente en sus límites de saturación, lo que puede degradar la respuesta del sistema (Hussain et al., 2025).

El objetivo de este estudio es el diseño, construcción y validación de una cámara climática basada en módulos Peltier capaz de replicar en tiempo real perfiles térmicos dinámicos, junto a su sistema de control, que presenta una arquitectura de control en cascada con PID (proporcional, integral y derivativo) de dos grados de libertad, método *anti-windup*, Predictor de Smith para compensar los retardos por inercia térmica e histéresis para cambiar entre los modos de enfriamiento y calentamiento.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción del sistema y hardware

La planta experimental (Figura 1) consistió en una cámara climática de dimensiones interiores $600 \times 600 \times 400$ mm con paredes de 50 mm de poliestireno expandido (EPS). En la parte trasera se encontraban 8 celdas de Peltier con disipadores de aluminio a ambos lados, que contaban con ventiladores para disipar el calor por convección forzada.

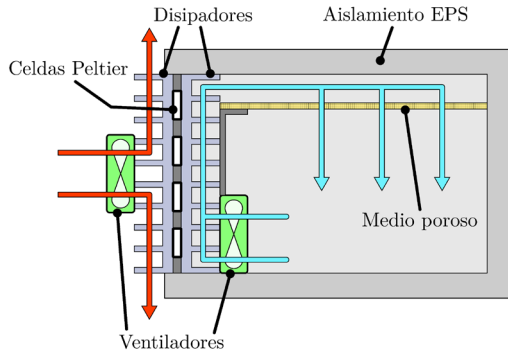


Figura 1: Diagrama de funcionamiento de la cámara climática.

La cámara tenía un medio poroso en la parte superior para homogeneizar el flujo de aire, que consistía en una malla de fibra de vidrio sujeta con perfiles de aluminio. De esta forma, se lograba una temperatura homogénea dentro de la cámara.

El control se ejecutó en un sistema embebido que empleaba el microcontrolador ESP32 de Espressif Systems. Para regular la potencia entregada a las celdas y cambiar su polaridad para enfriar o calentar, se empleó un puente H con cuatro relés de estado sólido optoacoplados que conmutaban según una señal PWM (Pulse Width Modulation) del microcontrolador.

Se midió la temperatura y la humedad relativa en el interior de la cámara con dos sensores SHTC3 de Sensirion y cuatro DS18B20 de Dallas Semiconductor, distribuidos

espacialmente por todo el volumen. Además, las temperaturas de ambas caras de las celdas de Peltier se midieron utilizando termistores NTC (Negative Temperature Coefficient). Se muestra un esquema completo de la electrónica y la instrumentación en la Figura 2:

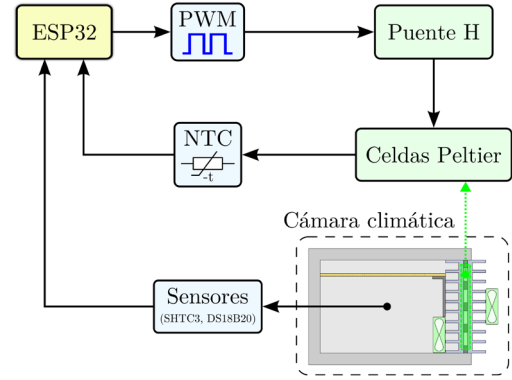


Figura 2: Diagrama completo de la instrumentación y el control.

2.2. Modelado dinámico de la planta

Para caracterizar la inercia térmica del sistema, se puede obtener un modelo analítico aplicando las ecuaciones de conservación del calor en un modelo térmico-eléctrico (J. M. Garrido-López et al., 2026). Si lo representamos en el espacio de estados de la forma $\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{A}\mathbf{T} + \mathbf{B}\mathbf{u}$ ($\mathbf{T} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times p}$, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^p$, con $n = 2$ y $p = 2$), obtenemos la ecuación matricial (1):

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_c(t) \\ \dot{T}_{in}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_\theta C_c} & \frac{1}{R_\theta C_c} \\ \frac{1}{R_\theta C_{in}} & -\frac{1}{C_{in}} \left(\frac{1}{R_\theta} + \frac{1}{R_e} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_c(t) \\ T_{in}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{N_c}{C_c} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_c(t) \\ T_e \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde $T_c(t)$ es la temperatura de las caras interiores de las celdas, $T_{in}(t)$ la temperatura interior de la cámara, $\dot{Q}_c(t)$ el calor de las celdas, T_e la temperatura exterior, $C_c = N_c m_c C_{p_c}$ la capacidad calorífica de las celdas, $C_{in} = \rho V C_p$ la capacidad calorífica de la cámara, $R_e = 1/AU$ la resistencia térmica de pérdidas con el exterior y R_θ la resistencia térmica por convección entre las celdas y el interior de la cámara, siendo $N_c = 8$ el número de celdas, m_c y C_{p_c} la masa y el calor específico de las celdas junto al disipador, ρ la densidad del aire, C_p el calor específico del aire, V el volumen interior de la cámara, A la superficie interior de la cámara y U su coeficiente global de transmisión de calor.

Si expandimos las ecuaciones, obtenemos (2) y (3) para la temperatura interior de la cámara y para la temperatura de las celdas, respectivamente:

$$\rho V C_p \frac{dT_{in}(t)}{dt} = \frac{T_c(t) - T_{in}(t)}{R_\theta} - AU(T_{in}(t) - T_e) \quad (2)$$

$$N_c m_c C_{p_c} \frac{dT_c(t)}{dt} = N_c \dot{Q}_c(t) - \frac{T_c(t) - T_{in}(t)}{R_\theta} \quad (3)$$

Por otra parte, el calor $\dot{Q}_c(t)$ proporcionado por las celdas es debido al efecto Peltier, restando las pérdidas por efecto Joule y la conducción de calor de la cara caliente a la fría (D. M. Rowe, 2006; Jean Charles A. Peltier, 1834):

$$\dot{Q}_c(t) = SI_c(t)T_c(t) + \frac{1}{2}RI_c(t)^2 - K(T_c(t) - T_e) \quad (4)$$

donde $I_c(t)$ es la corriente a través de las celdas y S , R y K son el coeficiente Seebeck, la resistencia eléctrica y la conductancia térmica de las celdas, respectivamente. El calor $\dot{Q}_c(t)$ es positivo cuando las celdas calientan y negativo cuando enfrían, el cual queda determinado por el signo de la corriente. Se asume que la cara exterior de las celdas siempre se encuentra a temperatura ambiente T_e .

La corriente $I_c(t)$ que fluye a través de las celdas se obtiene a partir del voltaje $V_c(t)$ aplicado a las mismas restando el voltaje por efecto Seebeck que se produce por la diferencia de temperatura entre las caras (Schilling et al., 2019):

$$I_c(t) = \frac{V_c(t) - S(T_c(t) - T_e)}{R} \quad (5)$$

Finalmente, el voltaje $V_c(t)$ de las celdas se relaciona con el ciclo de trabajo $D(t)$ de la señal PWM según (6), para un voltaje de alimentación máximo de la celda de V_{CC} :

$$V_c(t) = V_{CC}D(t) \quad (6)$$

El ciclo de trabajo $D(t)$ varía entre -100% y 100% . Un ciclo de trabajo positivo induce un voltaje y una corriente positivos (modo calentamiento), mientras que un ciclo de trabajo negativo invierte la polaridad (modo enfriamiento).

Aunque el modelo analítico ofrece información física, la sintonización práctica de los PID requiere una representación lineal de la planta. Por tanto, se llevó a cabo un proceso de identificación empírico para obtener modelos de primer orden con retardo (FOPDT) adecuados para el diseño del control (Silva et al., 2023). En esta estructura, el término de primer orden captura la inercia térmica dominante, mientras que el tiempo muerto modela fenómenos no ideales como el retraso en el transporte de calor o la dinámica de los sensores y actuadores.

Teóricamente, estos modelos representan la linealización de las ecuaciones no lineales (2)–(6) alrededor de un punto de equilibrio (Katsuhiko Ogata, 2010). Se ha considerado que la planta consiste en dos funciones de transferencia en cascada en el dominio de Laplace: $G_T(s) = \frac{\Delta T_{in}(s)}{\Delta T_c(s)}$ que relaciona la temperatura de las celdas con la temperatura de la cámara (obtenida de (2)) y $G_D(s) = \frac{\Delta T_c(s)}{\Delta D(s)}$ que relaciona el ciclo de trabajo con la temperatura de las celdas (obtenida de (3)–(6)).

Para determinar los parámetros de los modelos empíricamente, se llevaron a cabo ensayos de identificación con entradas escalón, con $D = 100\%$ para calentar y $D = -100\%$ para enfriar, partiendo del estacionario del régimen contrario. Las respuestas experimentales de estos ensayos se

ajustaron al modelo FOPDT teórico: $G(s) = \frac{\Delta\Gamma(s)}{\Delta\Lambda(s)} = \frac{\kappa}{\tau s + 1} e^{-\theta s}$, donde $\Delta\Lambda(s)$ y $\Delta\Gamma(s)$ son la entrada y la salida incrementales alrededor de un punto de equilibrio, respectivamente, κ es la ganancia en estacionario, τ la constante de tiempo y θ el tiempo muerto.

En el dominio del tiempo, para una entrada escalón de amplitud $\Delta\lambda$, se obtiene la salida $\Delta\gamma(t) = \kappa\Delta\lambda(1 - e^{-(t-\theta)/\tau})$, para $t > \theta$. Usando esta expresión analítica, se extrajeron los parámetros para $G_T(s)$ y $G_D(s)$, los cuales se recogen en la Tabla 1. Se observa una asimetría en $G_D(s)$, lo cual se atribuye físicamente a la no linealidad de los módulos Peltier. El efecto Joule siempre genera calor, lo que mejora el rendimiento cuando las celdas calientan pero se opone al efecto Peltier cuando enfrían, lo que da lugar a diferentes ganancias y dinámicas.

Tabla 1: Parámetros identificados de los modelos

	$G_T(s)$	$G_D(s)$	
		Calentar	Enfriar
κ	0,54	144,82 °C	33,46 °C
τ	26,69 min	8,60 min	18,32 min
θ	1,23 min	0,78 min	1,14 min

2.3. Arquitectura de control

Para controlar el sistema, se diseñó un control en cascada, con un controlador $C_T(s)$ para $G_T(s)$ (lazo principal para la temperatura de la cámara) y otro controlador $C_D(s)$ para $G_D(s)$ (lazo secundario para la temperatura de las celdas de Peltier). La arquitectura de control se muestra en la Figura 3.

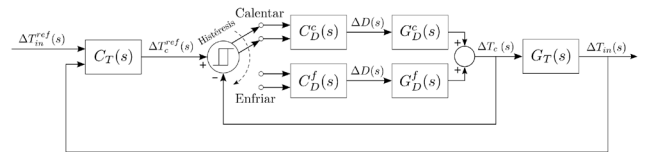


Figura 3: Arquitectura de control en cascada.

Ambos controladores emplean PID de dos grados de libertad (2-DOF PID) ampliados con: (i) filtro derivativo para evitar amplificar ruido de las mediciones; (ii) mecanismo *anti-windup* basado en back-calculation para gestionar la saturación del actuador; y (iii) predictor de Smith con filtro para compensar el tiempo muerto. La ley de control $U(s)$ del 2-DOF PID es la que se muestra en (7):

$$U(s) = K_p \left[(\lambda R(s) - Y(s)) + \frac{1}{T_i s} (R(s) - Y(s)) + \frac{T_d s}{\eta T_d s + 1} (\mu R(s) - Y(s)) \right] \quad (7)$$

donde $R(s)$ es la referencia, $Y(s)$ la salida, K_p la ganancia proporcional, T_i la constante de tiempo integral, T_d la constante de tiempo derivativa, η la constante del filtro

derivativo, y $\lambda, \mu \in [0,1]$ factores para atenuar la influencia de la referencia en los términos proporcional y derivativo, respectivamente.

El método *anti-windup* de back-calculation reduce el error integral acumulado e_i en caso de que la señal de control u se sature ($u > u_{sat}$), según una constante K_b , de la forma $e_i \leftarrow e_i - K_b(u - u_{sat})$. Los valores de saturación fueron $[-15, 165]$ °C para $T_c(t)$ y $[-100, 100]\%$ para $D(t)$.

Para combatir los tiempos muertos de las plantas, se implementó un predictor de Smith que usa un modelo de la planta sin retardo $\tilde{G}(s)$ y el retardo θ . La salida del predictor filtrada $\hat{Y}(s)$ se obtiene mediante:

$$\hat{Y}(s) = F_\nu(s) [Y(s) - \tilde{G}(s)e^{-\theta s}U(s)] + \tilde{G}(s)U(s) \quad (8)$$

donde $F_\nu(s) = \frac{1}{\nu\theta s + 1}$ es un filtro paso bajo usado para aumentar la robustez frente al desajuste del modelo y el ruido de medición.

Para los módulos Peltier, dado que hay dos plantas diferentes dependiendo de si las celdas calientan ($G_D^c(s)$) o enfrían ($G_D^f(s)$), se han sintonizado dos controladores ($C_D^c(s)$ y $C_D^f(s)$, respectivamente), uno para cada planta.

El sistema conmutaba entre una rama u otra del bucle interno dependiendo de si las celdas calentaban o enfriaban. Dado que ambos controladores ($C_D^c(s)$ y $C_D^f(s)$) acumulan historiales integrales diferentes, una conmutación directa provocaría saltos y discontinuidades abruptas en la señal de control $\Delta D(s)$. Para evitarlo y no desestabilizar la planta, se implementó una técnica de transferencia suave reiniciando el estado del integrador de los controladores al conmutar entre ellos, garantizando una transición continua en el actuador. Además, para evitar oscilaciones y transiciones abruptas cerca de la consigna, se aplicó una banda de histéresis de 0,5 °C. Este valor se eligió como un compromiso entre la capacidad de respuesta y la robustez del sistema.

Para sintonizar $C_T(s)$ y $C_D(s)$, primero, se ajustaron los parámetros básicos del PID (K_p , T_i , T_d) utilizando los métodos de Ziegler-Nichols (ZN), Cohen-Coon (CC), Chien-Hrones-Reswick (CHR), Approximate M-constrained Integral Gain Optimization (AMIGO) y Skogestad Internal Model Control (SIMC) (Skogestad & Grimholt, 2012). Además, se tomó como punto de partida para los parámetros auxiliares $\lambda = 0,7$, $\mu = 0$, $\eta = 0,05$ para el 2-DOF PID, $K_b = 1/\sqrt{\tau}$ y $K_b = 1/\sqrt{T_i T_d}$ para el *anti-windup* y $\nu = 0,5$ para el filtro del predictor de Smith.

Para comparar la efectividad de estos métodos, se realizaron simulaciones con entradas escalón de $\Delta T_{in} = +40$ °C para calentar y $\Delta T_{in} = -10$ °C para enfriar, ambos con una duración de 2 horas, y se evaluaron los indicadores de Integral Absolute Error (IAE) y Total Variation (TV):

$$\text{IAE} = \int_0^{t_s} |e(t)| dt \quad (9)$$

$$\text{TV} = \int_0^{t_s} \left| \frac{du(t)}{dt} \right| dt \quad (10)$$

donde $e(t)$ es el error de seguimiento, $u(t)$ la señal de control y t_s el tiempo de establecimiento. El IAE cuantificó la calidad del seguimiento de consigna, mientras que el TV midió el esfuerzo del controlador.

Finalmente, partiendo del mejor candidato de la simulación, se llevó a cabo una sintonización fina heurística en la cámara climática real, donde los parámetros de los controladores se variaron en intervalos de $\pm 10\%$ para minimizar IAE y TV como funciones objetivo.

3. Resultados y discusión

3.1. Sintonización final de los controladores

La sintonización inicial de los controladores (Tabla 2) demostró que SIMC ofrecía el mejor resultado tanto para IAE como para TV, por lo que se usó como punto de partida para la sintonización fina con la cámara real. Los resultados finales obtenidos para todos los parámetros de los controladores se muestran en la Tabla 3.

Tabla 2: Indicadores de error en la sintonía inicial

Método	IAE	TV
SIMC	976,92	842,69
AMIGO	1025,21	1212,65
CHR	1431,36	871,72
CC	1173,76	3767,11
ZN	1209,37	3410,12

Tabla 3: Sintonización final de los controladores

	K_p	T_i	T_d	λ	μ	η	K_b	ν
$C_T(s)$	22,0	8,02	0,44	0,4	0,0	0,06	0,60	0,55
$C_D^c(s)$	0,05	6,81	0,36	0,7	0,1	0,04	1,30	0,55
$C_D^f(s)$	0,26	7,22	0,53	0,7	0,2	0,06	0,96	0,58

3.2. Ensayo con una curva real de temperatura

Para validar el sistema propuesto, se llevó a cabo un ensayo de 24 horas con una curva real de temperatura, con valores registrados de transporte refrigerado (J. Garrido-López et al., 2024). El experimento se centró en el rango de conservación de productos frescos refrigerados (0 a 24 °C), y se seleccionaron respuestas frente a escalones debido a que aíslan las características dinámicas del sistema (tiempo de subida, sobreoscilación, tiempo de establecimiento) con mayor claridad que los perfiles continuos. Los resultados del ensayo se muestran en las Figuras 4 y 5.

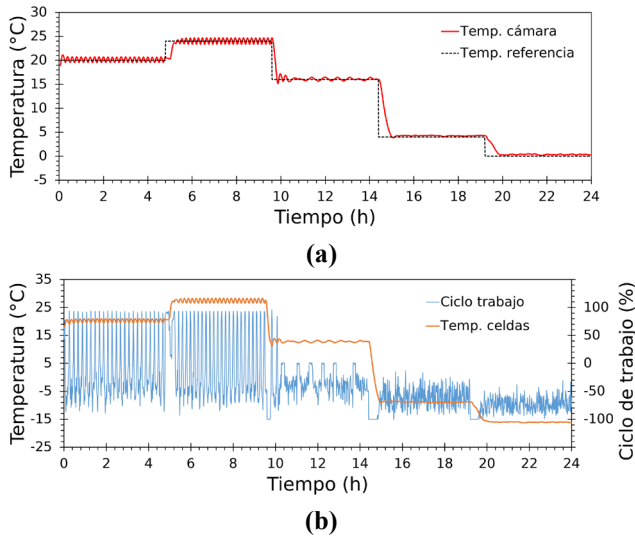


Figura 4: Resultados del ensayo de 24 horas con el sistema completo: (a) $T_{in}(t)$ y temperatura de referencia; (b) $T_c(t)$ y $D(t)$.

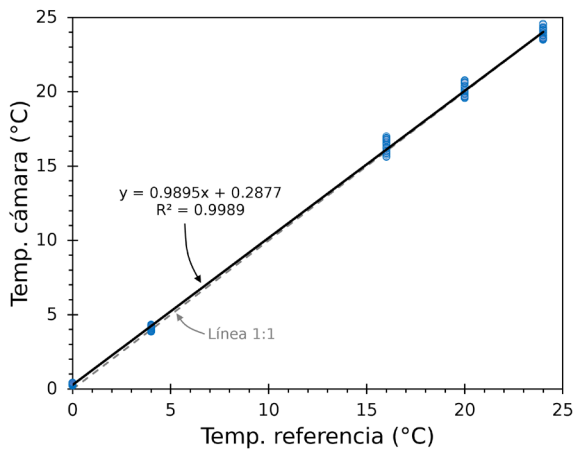


Figura 5: Resultados comparativos del ensayo representando $T_{in}(t)$ frente a la temperatura de referencia en ejes diferentes.

La Figura 4a muestra cómo la temperatura en el interior de la cámara (rojo) fue capaz de seguir la temperatura de referencia (negro discontinuo). Además, los valores de la temperatura de las celdas y del ciclo de trabajo también se muestran en la Figura 4b. Con la arquitectura de control propuesta, el actuador se ajustaba según las necesidades del sistema, evitando saturaciones innecesarias y consiguiendo un funcionamiento óptimo. Además, se observan tiempos de establecimiento bajos y ausencia de sobreoscilaciones cerca de la referencia, aspecto importante para esta aplicación.

La Figura 5 muestra un diagrama de dispersión de la temperatura de la cámara frente a la referencia. Para evaluar la precisión en estado estacionario, se excluyeron los puntos de las respuestas transitorias ante cambios de escalón (donde el sistema físico presenta un retraso respecto al cambio instantáneo de consigna). Se observó un seguimiento muy preciso, con $R^2 = 0,9989$.

Tal y como se observa en la Figura 4a, cerca de la temperatura ambiente (alrededor de 20 °C), se observa un rizado ligeramente mayor en la temperatura de la cámara y en la señal de control. Esto se debe a que, en torno a los 20 °C, la ausencia de un gradiente térmico fuerte con el

exterior reduce la amortiguación natural del sistema, lo que dificulta al controlador la estabilización frente a pequeñas perturbaciones. Por el contrario, a temperaturas más alejadas (especialmente en los tramos de frío), este rizado disminuye, ya que el fuerte gradiente térmico con el exterior actúa como una carga térmica constante que ayuda a la estabilización de la temperatura, aunque a costa de exigir que el actuador trabaje más intensamente (mayor saturación).

La Tabla 4 recoge los errores calculados entre la temperatura de la cámara y la referencia durante el ensayo. Se obtuvieron valores muy bajos, como un error absoluto mediano de 0,32 °C o una raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 0,88 °C, lo que valida el correcto funcionamiento del sistema.

Tabla 4: Errores obtenidos durante el ensayo

Error	Valor
Error absoluto medio (MAE)	0,46 °C
Error absoluto mediano	0,32 °C
Desviación típica error absoluto	0,69 °C
Error relativo medio	0,05
Error relativo mediano	0,02
Desviación típica error relativo	0,16
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	0,88 °C

4. Conclusiones

Este trabajo ha presentado el diseño, construcción y validación de una cámara climática basada en módulos Peltier con una arquitectura de control en cascada. La inclusión de controladores PID de dos grados de libertad combinados con algoritmos *anti-windup* y Predictor de Smith ha resuelto eficazmente los desafíos inherentes de la planta: la fuerte asimetría dinámica entre el calentamiento y enfriamiento, los retardos de transporte del aire y la rápida saturación de los actuadores.

Los resultados experimentales confirman que el sistema propuesto es capaz de replicar perfiles térmicos dinámicos con alta fidelidad. Si bien se elimina por completo el sobreimpulso en las transiciones, las oscilaciones se minimizan de forma significativa, quedando restringidas a un ligero rizado residual e inherente cuando el sistema opera sin un gradiente térmico de apoyo (cerca de la temperatura ambiente). Esta robustez convierte al prototipo en una herramienta innovadora, viable y precisa para la simulación de la cadena de frío en aplicaciones tanto de investigación como para la industria.

El sistema ha validado su robustez ante perturbaciones como la introducción de masa térmica (carga biológica) y variaciones de humedad, manteniendo el seguimiento de la consigna. Su rango operativo óptimo se enmarca en las temperaturas de refrigeración poscosecha (0 a 24 °C); para aplicaciones de ultracongelación, la potencia y naturaleza de una sola etapa de los módulos Peltier actuales supondrían una limitación técnica.

Como líneas de trabajo futuro, se plantea la integración de un lazo de control activo para la humedad relativa y la utilización de este gemelo físico para generar conjuntos de datos de alta fidelidad orientados al entrenamiento de modelos predictivos de vida útil mediante aprendizaje automático, con el objetivo de optimizar la cadena de suministro y minimizar el desperdicio alimentario.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado por MICIU con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) como parte del programa AGROALNEXT y a través del programa FPU (FPU23/00186). También ha sido financiado por la Fundación Séneca con fondos de la CARM y por el programa “Prueba de Concepto” con código 22267PDC-23.

Referencias

- ASHRAE. (2014). *ASHRAE Handbook - Refrigeration*. www.ashrae.org
- Charpe, A. M., Sedani, S. R., Murumkar, R. P., & Bhad, R. G. (2019). *Effect of Temperature on Microbial Growth in Food During Storage*. ISSN 2277-7601.
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP, & WHO. (2024). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2024*. <https://doi.org/10.4060/cd1254en>
- Garrido-López, J., Jiménez-Buendía, M., Toledo-Moreo, A., Giménez-Gallego, J., & Torres-Sánchez, R. (2024). Monitoring Perishable Commodities Using Cellular IoT: An Intelligent Real-Time Conditions Tracker Design. *Applied Sciences*, 14(23), 11050. <https://doi.org/10.3390/APP142311050>
- Garrido-López, J. M., Ramallo-González, A. P., Jiménez-Buendía, M., Toledo-Moreo, A., Giménez-Gallego, J., & Torres-Sánchez, R. (2026). Designing a Static Counterpart for fruits and vegetables in transit to accurately replicate highly time-dependent environmental conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 261, 128556. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.128556>
- Hussain, W., Shahzad, H., Garcia-Salaberri, P. A., Ashraf, H., & Shah, N. A. (2025). Comprehensive review on thermoelectric materials principles, synthesis, Nanostructuring and advance applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 169, 109672. <https://doi.org/10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2025.109672>
- Lee, H. (2011). *Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells* (Inc. John Wiley & Sons, Ed.).
- Mazhar, A. R., Ubaid, A., Shah, S. M. H., Masood, S., & Alvi, M. Z. (2023). Investigation of the Simultaneous Cooling and Heating Using a Thermoelectric Peltier. *Engineering Proceedings 2023, Vol. 45, Page 13*, 45(1), 13. <https://doi.org/10.3390/ENGPROC2023045013>
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (Prentice Hall, Ed.).
- Peltier, J. C. A. (1834). Nouvelles Expériences sur la Caloricité des courans électriques. *Annales de Chimie et de Physique*, 56, 371–386.
- Rowe, D. M. (2006). *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano* (Taylor & Francis Group, Ed.).
- Schilling, A., Zhang, X., & Bossen, O. (2019). Heat flowing from cold to hot without external intervention by using a “thermal inductor.” *Science Advances*, 5(4). <https://doi.org/10.1126/SCIADV.AAT9953>
- Silva, F., Batista, J., Souza, D., Lima, A., Laurinda Dos Reis, & Barbosa, Antonio (2023). Control and identification of parameters of a joint of a manipulator based on PID, PID 2-DOF, and least squares. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(3), 327. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04251-5>
- Skogestad, S., & Grimholt, C. (2012). The SIMC method for smooth PID controller tuning. In *Issue 9781447124245, Pages 147 - 175* (Number 9781447124245, pp. 147–175). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2425-2_5
- Vasilyev, G., Kuzichkin, O., & Surzhik, D. (2024). Nonlinear Control of Thermoelectric Peltier Moduls for Climate Management Systems in Agro-Industrial Complex. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 1130, 148–155. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51127-1_14