

Jornadas de Automática

Diseño y control de cámara climática basada en celdas de Peltier para la reproducción de condiciones ambientales de manera precisa

Garrido-López, Javier*, Jiménez-Buendía, Manuel, Toledo-Moreo, Ana, Torres-Sánchez, Roque

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

To cite this article: Garrido-López, Javier, Jiménez-Buendía, Manuel, Toledo-Moreo, Ana, Torres-Sánchez, Roque. 2025. Design and control of Peltier cell-based climate chamber for precise reproduction of environmental conditions. *Jornadas de Automática*, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12073>

Resumen

El desperdicio de alimentos en la cadena de suministro es un problema mundial que exige soluciones innovadoras para paliar los impactos sociales, económicos y medioambientales. Este estudio presenta el diseño, construcción y validación de una cámara climática portátil basada en celdas de Peltier (módulos termoelectrónicos) capaz de reproducir dinámicamente curvas de temperatura reales a las que están expuestos los productos en la cadena de suministro. Emplea un sistema de control en cascada con PID de dos grados de libertad, método anti *wind-up* y predictor de Smith para combatir la inercia térmica y los retardos de tiempo, lo cual permite un seguimiento preciso de curvas de temperatura con cambios rápidos. Además, el control utiliza histéresis para cambiar entre los modos de enfriamiento y calentamiento, haciéndolo más eficiente. La validación experimental confirmó la capacidad del sistema de simular con alta precisión las condiciones de la cadena de suministro, manteniendo unos errores dentro de márgenes razonables. La cámara sirve como un gemelo físico de la cadena de poscosecha para, a través de modelos predictivos, evaluar la vida útil de los alimentos y reducir su desperdicio.

Palabras clave: Celdas de Peltier, Control en cascada PID, Predicción de la vida útil, Simulación térmica, Gemelo físico.

Design and control of Peltier cell-based climate chamber for precise reproduction of environmental conditions

Abstract

Food waste in the supply chain is a global problem that requires innovative solutions to reduce the social, economic and environmental impacts. This research presents the design, construction and validation of a portable controlled climate chamber based on Peltier cells (thermoelectric modules) capable of dynamically reproducing real temperature curves to which products in the supply chain are exposed. It employs a cascade control system with two-degree-of-freedom PID, anti-wind-up method and Smith predictor to combat thermal inertia and time delays, allowing accurate tracking of rapidly changing temperature curves. In addition, the control utilizes hysteresis when switching between cooling and heating modes, making it more efficient. Experimental validation confirmed the system's capability to accurately simulate supply chain conditions while keeping errors within reasonable margins. The chamber serves as a physical twin of the postharvest chain to, through predictive modeling, evaluate product shelf life and reduce their waste.

Keywords: Peltier cells, Cascade PID control, Shelf-life prediction, Thermal simulation, Physical twin.

1. Introducción

La pérdida de productos perecederos a lo largo de la cadena de suministro supone un desafío global con graves repercusiones económicas, ambientales y sociales. Según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), cada año se desperdician alrededor de 1.300 millones de toneladas de alimentos —un tercio de los disponibles para el consumo humano—, mientras más de 700 millones de personas padecen hambre en el mundo (FAO et al., 2024). Este desequilibrio subraya la urgencia de

optimizar la eficiencia del sistema alimentario y cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), entre los que se encuentran la meta 2 de “Hambre cero” y, dentro del objetivo 12, la 12.3, que persigue reducir a la mitad el desperdicio de alimentos y las pérdidas en la cadena de suministro para 2030 (United Nations, 2024).

Entre los factores que más inciden en estas pérdidas, destaca la degradación de la calidad de frutas y verduras durante la etapa de poscosecha, dado que son especialmente sensibles a variaciones en las condiciones ambientales, como la

*Autor para correspondencia: javier.garrido@upct.es

temperatura, la humedad o la concentración de gases como el oxígeno o el etileno (Hoffmann et al., 2022; Mahmood et al., 2019). En condiciones reales de transporte y almacenamiento, no siempre se respetan los rangos óptimos en las variables ambientales, lo que acelera procesos de maduración y descomposición, favorece la proliferación microbiana y reduce la vida útil de los productos (Charpe et al., 2019).

Para anticipar y cuantificar estas pérdidas, se han desarrollado modelos matemáticos capaces de predecir la evolución de la calidad y la vida útil en función de los perfiles térmicos a los que han sido expuestos (Blanco - Lizarazo et al., 2024; Choosuk et al., 2022). Sin embargo, el entrenamiento y validación de dichos modelos requiere reproducir con fidelidad las condiciones reales de la cadena de suministro, una tarea compleja y costosa con la tecnología tradicional de cámaras de refrigeración con ciclos térmicos por compresión, cuya inercia térmica dificulta los cambios rápidos de temperatura.

El objetivo de este trabajo es el diseño, construcción y validación de una cámara climática portátil basada en módulos termoelectrónicos (celdas de Peltier), capaz de replicar en tiempo real perfiles térmicos con cambios rápidos. El sistema de control de la cámara se basa en un control en cascada con controladores PID (proporcional, integral y derivativo) de dos grados de libertad, método anti *wind-up* y predictor de Smith para compensar retardos por inercia térmica y minimizar los sobreimpulsos, así como un mecanismo de histéresis para evitar conmutaciones abruptas cuando el sistema cambia entre los modos de calentamiento y enfriamiento. De esta forma, la cámara funcionaría como un gemelo físico capaz de reproducir las condiciones de la cadena de suministro, facilitando el desarrollo y la validación de modelos predictivos de vida útil con el objetivo de construir un gemelo digital que permita utilizar esta información para tomar decisiones acerca del destino de la mercancía, ajustándola al mercado más apropiado y evitar su desperdicio.

2. Materiales y métodos

2.1. Celdas de Peltier

La cámara climática presentada en este trabajo está basada en celdas de Peltier, un dispositivo termoelectrónico que crea un flujo de calor en las uniones de dos materiales diferentes por el conocido efecto Peltier. Las caras de la celda absorberán o expulsarán calor (enfriarán o calentarán) de forma reversible dependiendo de la dirección de una corriente eléctrica. Las celdas consisten en semiconductores tipo P y tipo N unidos mediante conductores de cobre.

La celda se alimenta con una potencia eléctrica P_e que compensa el voltaje Seebeck generado por la diferencia de temperaturas ΔT entre las caras de la celda y las pérdidas por efecto Joule provocadas por la resistencia eléctrica R de los elementos, tal y como se muestra en (1), lo que permite relacionar el voltaje V aplicado a la celda con la corriente I a través de ella:

$$P_e = VI = SI\Delta T + I^2R \quad (1)$$

donde $\Delta T = T_c - T_f$ es la diferencia de temperatura entre la cara caliente (T_c) y la cara fría (T_f) y S es el coeficiente Seebeck del dispositivo. La corriente eléctrica que fluye a través de la celda produce un calor \dot{Q} en ambas caras proporcional a la temperatura T de cada cara, de la forma $\dot{Q} = SIT$. Esto se conoce como el efecto Peltier. Para obtener el

calor absorbido por la cara fría \dot{Q}_f a una temperatura T_f por el efecto Peltier, es necesario restarle las pérdidas por efecto Joule y la conducción de calor de la cara caliente a la fría, proporcional a la conductancia térmica K de los elementos y al salto de temperatura ΔT , como se muestra en (2):

$$\dot{Q}_f = SIT_f - \frac{1}{2}I^2R - K\Delta T \quad (2)$$

Se considera que la mitad de las pérdidas por efecto Joule ocurren en cada una de las caras fría y caliente. Finalmente, el calor disipado por la cara caliente de la celda \dot{Q}_c es la suma de la potencia eléctrica y el calor frío, como se indica en (3). La eficiencia de una celda de Peltier se define a través de su coeficiente de operación (COP), como la relación entre el calor frío que produce y la potencia eléctrica suministrada, de la forma $COP = \dot{Q}_f/P_e$.

$$\dot{Q}_c = P_e + \dot{Q}_f = SIT_c + \frac{1}{2}I^2R - K\Delta T \quad (3)$$

Los parámetros de las celdas de Peltier dependen de sus características constructivas. Los valores de las celdas usadas en este proyecto se recogen en la Tabla 1. También se incluyen los valores máximos de voltaje V_{max} , corriente I_{max} y salto de temperatura entre las caras ΔT_{max} . El voltaje de alimentación nominal de las celdas es de 12 V.

Tabla 1: Valores de los parámetros de las celdas de Peltier

Parámetro celda Peltier	Valor
V_{max}	15,4 V
I_{max}	8,5 A
ΔT_{max}	66 K
R	1,41 Ω
K	0,772 W/K
S	0,0517 V/K

2.2. Diseño constructivo e instrumentación

El diseño constructivo y el funcionamiento de la cámara climática se muestra en la Figura 1. La carcasa tiene unas dimensiones interiores de $600 \times 600 \times 400$ mm y está formada por paredes de 50 mm de espesor con aislante de poliestireno expandido (EPS). Tiene una superficie interior de $A = 1,68$ m² y un volumen interior de $V = 144$ L.

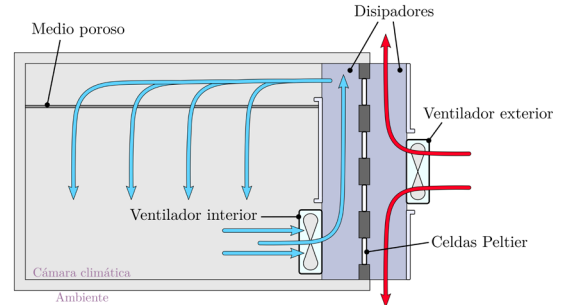


Figura 1: Esquema de funcionamiento de la cámara climática.

La cámara tiene una cavidad rectangular en la parte trasera para insertar las celdas de Peltier, con sus caras fijadas con pasta térmica a dos disipadores de aluminio de 400×150 mm con aletas de 30 mm. En total, se emplearon 8 celdas. Además, los disipadores cuentan con ventiladores de corriente continua para disipar el calor por convección forzada. El ventilador exterior mantiene esa cara de las celdas a temperatura

ambiente, mientras que el interior distribuye el calor o el frío dentro de la cámara.

En el interior, se ha colocado un medio poroso en la parte superior para lograr una mayor homogeneización del flujo de aire. Se trata de una sección de pérdida de presión formada por una malla de fibra de vidrio sujeta con perfiles de aluminio colocada aguas arriba de la zona a climatizar para obtener un flujo lo más laminar posible, consiguiendo así una temperatura más homogénea dentro de la cámara. También, se ha incluido un sistema de purga para expulsar el agua que se forme por condensación del aire húmedo en el disipador interior.

Para gestionar todo el sistema, se ha usado el microcontrolador ESP32 de Espressif Systems (Bibo Road, 690, Shanghai, China), un System-On-Chip (SoC) muy versátil, de bajo coste y alto rendimiento. Para cambiar la polaridad y regular potencia de las celdas de Peltier para enfriar o calentar, se diseñó un puente H con cuatro relés de estado sólido optoacoplados que conmutan en diagonal con una señal PWM (Pulse Width Modulation) del microcontrolador.

Las temperaturas de ambas caras de las celdas de Peltier se midieron utilizando termistores NTC (Negative Temperature Coefficient). Asimismo, se midió la temperatura y la humedad relativa en el interior de la cámara con sensores SHTC3 de Sensirion (Laubisruetistrasse, 50, Stäfa, Switzerland) y DS18B20 de Dallas Semiconductor (South Beltwood Parkway, 4401, Dallas, TX, USA). Toda la electrónica se colocó en el interior de un cuadro eléctrico de ABS con protección IP65.

2.3. Modelado dinámico del sistema

La ecuación general que modela dinámicamente la evolución de la temperatura en el interior de la cámara $T_{in}(t)$ es la que se muestra en (4), considerando el calor proporcionado por las celdas de Peltier y las pérdidas a través de las paredes de la cámara:

$$\rho V C_p \frac{dT_{in}(t)}{dt} = \dot{q}_C(t) - AU(T_{in}(t) - T_e) \quad (4)$$

donde $\dot{q}_C(t)$ es el calor de las celdas, ρ es la densidad del aire, C_p es el calor específico del aire a presión constante, V es el volumen interior de la cámara, A es la superficie interior total de la cámara, U es el coeficiente global de transmisión de calor de la cámara y T_e es la temperatura exterior. El calor $\dot{q}_C(t)$ será positivo o negativo dependiendo de si las celdas calientan o enfrían, respectivamente. Además, la temperatura de las caras interiores de las celdas $T_C(t)$ se relaciona con $T_{in}(t)$ usando el modelo térmico-eléctrico, según (5), (6) y (7):

$$T_C(t) = T_{in}(t) + \dot{q}_C^{cn}(t) R_{tC} \quad (5)$$

$$\dot{q}_C^{cf}(t) = \rho \dot{V}_w C_p (T_C(t) - T_{in}(t)) \quad (6)$$

$$\dot{q}_C(t) = \dot{q}_C^{cn}(t) + \dot{q}_C^{cf}(t) \quad (7)$$

donde $\dot{q}_C^{cn}(t)$ es la transferencia de calor por convección natural, $\dot{q}_C^{cf}(t)$ por convección forzada, \dot{V}_w es el flujo de aire del ventilador interior y R_{tC} es la resistencia térmica entre las caras de las celdas y el interior de la cámara por convección natural. Se considera que la resistencia térmica entre las caras interiores de las celdas y el disipador de aluminio es despreciable, así como la resistencia térmica entre la otra cara de las celdas y el exterior debido a la convección forzada, de forma que se considera que estas caras están siempre a temperatura ambiente.

Por otra parte, las ecuaciones que relacionan la temperatura de las celdas $T_C(t)$ con el calor proporcionado $\dot{q}_C(t)$, la corriente $I_C(t)$ a través de ellas y el voltaje $V_C(t)$ aplicado son las recogidas en (8), (9) y (10), de las ecuaciones mencionadas en la Sección 2.1:

$$m_c C_{p_c} \frac{dT_C(t)}{dt} = \dot{q}_C(t) \quad (8)$$

$$\dot{q}_C(t) = S I_C(t) T_C(t) \pm \frac{1}{2} R I_C(t)^2 \mp K (T_C(t) - T_e) \quad (9)$$

$$I_C(t) = \frac{V_C(t) \mp S (T_C(t) - T_e)}{R} \quad (10)$$

donde m_c y C_{p_c} son la masa y el calor específico de las caras de las celdas junto al disipador y S , R y K son el coeficiente Seebeck, la resistencia eléctrica y la conductancia térmica de las celdas, respectivamente. Los signos superiores de las ecuaciones se usan cuando las celdas calientan, y los inferiores cuando enfrían. Las celdas reciben el voltaje de alimentación $V_C(t)$ a través de la señal PWM proporcionada por el puente H, la cual tiene un ciclo de trabajo $D(t)$. La relación entre estas variables se encuentra en la ecuación (11), donde $V_{CC} = 24$ V es el voltaje de alimentación del puente. El ciclo de trabajo varía entre 0 y 100%. El esquema completo de la electrónica e instrumentación se puede ver en la Figura 2, junto a las medidas de las variables.

$$V_C(t) = V_{CC} D(t) \quad (11)$$

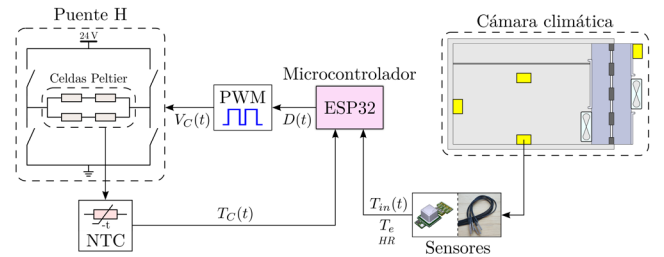


Figura 2: Esquema de funcionamiento del sistema completo.

Para trabajar en el dominio de Laplace, dada la naturaleza no lineal de las ecuaciones, fue necesario llevar a cabo un proceso de linealización. Para ello, se aplicó Taylor de primer orden para varias variables alrededor de un punto de equilibrio y, posteriormente, se aplicó la transformada de Laplace para obtener las funciones de transferencia. Para una variable $x(t)$, se ha usado $x(s)$ como su transformada, y se ha definido $\Delta x(t) = x(t) - x_0$, donde x_0 es su punto de equilibrio. Combinando las ecuaciones (4) a (7) y aplicando el proceso de linealización descrito alrededor de un punto de equilibrio (T_{in_0}, T_{C_0}) , se obtuvo la expresión mostrada en (12) para relacionar $T_{in}(s)$ con $T_C(s)$. Además, se ha incluido un retardo L para modelar fenómenos no ideales como el tiempo de transporte del calor al aire o dinámicas adicionales de los sensores y actuadores.

$$\Delta T_{in}(s) = \frac{\Gamma}{\tau s + 1} e^{-Ls} \Delta T_C(s) = G_T(s) \Delta T_C(s) \quad (12)$$

donde $\Gamma = \gamma(1 + R_{tC} \rho \dot{V}_w C_p)$, $\tau = \gamma R_{tC} \rho V C_p$, con $\gamma = 1/(1 + R_{tC} \rho \dot{V}_w C_p + R_{tC} AU)$. La función $G_T(s)$ representa la relación entre $\Delta T_C(s)$ y $\Delta T_{in}(s)$. Se puede ver que se trata de un sistema de primer orden. Similarmente, combinando las ecuaciones (8) a (11) y linealizando alrededor del punto de

equilibrio (T_{C_0}, D_0) , la función de transferencia que relaciona $T_C(s)$ con $D(s)$ queda definida en (13). Se ha incluido un retardo L' , diferente para cuando las celdas calientan o enfrían.

$$\Delta T_C(s) = \frac{\Omega}{\tau's + 1} e^{-L's} \Delta D(s) = G_D(s) \Delta D(s) \quad (13)$$

donde $\Omega = \varphi V_{CC}(V_{CC} D_0 \pm S T_e)$, $\tau' = \varphi m_c C_{p_c} R$, con $\varphi = 1/(S^2 T_{C_0} + R K)$. La función de transferencia $G_D(s)$ representa la relación entre $\Delta D(s)$ y $\Delta T_C(s)$. Se trata de un sistema de primer orden donde el valor de Ω y τ' dependen de si las celdas están calentando o enfriando. El equilibrio de las salidas (T_{in_0} y T_{C_0}) se obtuvo a partir del de la entrada (D_0) evaluando las ecuaciones en ese punto, sabiendo que las derivadas son cero en ese equilibrio, el cual se seleccionó en la mitad del rango de operación del sistema. Para $D_0 = 50\%$, se obtuvo $T_{in_0} \approx T_{C_0} = 348,94$ K para calentar y $T_{in_0} \approx T_{C_0} = 252,91$ K para enfriar.

Para obtener todas las constantes de las funciones de transferencia presentadas en (12) y (13) globalmente, se llevaron a cabo ensayos de identificación con entradas escalón. Para ello, primero, sabiendo que la respuesta de un sistema de primer orden de la forma $G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\kappa}{Ts+1}$ ante un escalón $X(s) = \Lambda/s$ tiene la forma $y(t) = \kappa \Lambda (1 - e^{-t/T})$ en el dominio del tiempo, se obtuvieron los resultados de todos los parámetros gráficamente ignorando los retardos, ajustando las curvas a partir de las ecuaciones. Después, para el retardo, también se observó gráficamente el tiempo muerto entre cada variable de entrada y la correspondiente salida.

Se hizo un primer ensayo con $D = 100\%$ calentando, mientras se medían los valores de $T_C(t)$ y $T_{in}(t)$. Para ello, las celdas se enfriaron previamente hasta alcanzar el estacionario, momento en el que se les cambió la polaridad, para cuantificar mejor el retardo al cambiar de un régimen de funcionamiento a otro. Igualmente, se hizo otro ensayo con $D = 100\%$ enfriando, partiendo de que las celdas estaban previamente calentadas en estacionario para medir el retardo en el cambio.

2.4. Control del sistema

Para controlar el sistema, se ha diseñado un control en cascada que contiene, en primer lugar, un controlador para la parte principal de la planta según la función de transferencia (12), formando el bucle principal, y un bucle secundario con otro controlador para (13), formando el control en cascada. La Figura 3 muestra la arquitectura de control utilizada.

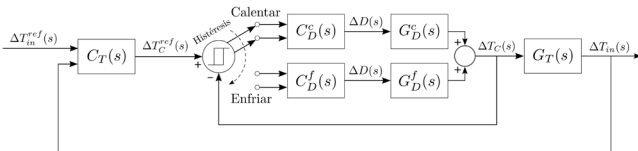


Figura 3: Arquitectura de control de la cámara climática.

El controlador $C_T(s)$ se encarga de controlar la planta $G_T(s)$, la cual presenta un retardo de tiempo. Esta es la parte más importante del control, ya que relaciona la temperatura de las celdas de Peltier con la temperatura del interior de la cámara. Por ello, se ha empleado un PID de dos grados de libertad para separar las señales de error en las partes proporcional, integral y derivativa del controlador, añadiendo un filtro en la parte derivativa. Su señal de control $U(s)$ se define según la ecuación (14), donde $R(s)$ es la referencia,

$Y(s)$ es la salida, K_p es la constante proporcional, T_i es la constante de tiempo integral, T_d es la constante de tiempo derivativa, N es la constante del filtro derivativo y b y c son constantes para atenuar la influencia de la referencia en las señales de error proporcional y derivativa, respectivamente.

$$U(s) = K_p \left((bR(s) - Y(s)) + \frac{1}{T_i s} (R(s) - Y(s)) + \frac{T_d s}{T_d s + 1} (cR(s) - Y(s)) \right) \quad (14)$$

Además, se ha usado el método anti *wind-up* de back-calculation para regular el error integral acumulado de forma que, si el actuador se satura, el error integral disminuye de forma proporcional a la cantidad de saturación. Los valores de saturación son de -15 a 165 °C para $T_C(t)$ y de 0 a 100% para $D(t)$. Además, para combatir el retardo de la planta, se ha añadido un predictor de Smith con un filtro $F_r(s) = \frac{1}{T_f s + 1}$, que separa la planta real con retardo $G(s)$ en una planta sin retardo $\hat{G}(s)$ junto a su retardo $e^{-\theta s}$, de forma que $G(s) = \hat{G}(s)e^{-\theta s}$. La salida $Y_p(s)$ del predictor se relaciona con la salida real $Y(s)$ y la salida del controlador $U(s)$ según (15).

$$Y_p(s) = F_r(s) (Y(s) - \hat{G}(s)e^{-\theta s}U(s)) + \hat{G}(s)U(s) \quad (15)$$

Para controlar $G_D(s)$, se ha usado un controlador $C_D(s)$ con la misma arquitectura que $C_T(s)$, es decir, un PID de dos grados de libertad con anti *wind-up* y predictor de Smith, ya que también tiene un retardo de tiempo. En este caso, se sintonizaron dos controladores distintos, uno para cuando las celdas calientan y otro para cuando enfrían, ya que las constantes y los retardos de la planta cambian en cada caso.

La referencia de $C_T(s)$ es el incremento de temperatura $\Delta T_{in}^{ref}(s)$ deseado dentro de la cámara, y está realimentado con el incremento real en el interior $\Delta T_{in}(s)$, tras la planta $G_T(s)$. La salida de $C_T(s)$ es la referencia para el siguiente controlador en el control cascada, $\Delta T_C^{ref}(s)$, que es el incremento de temperatura requerido en las celdas de Peltier. Debido a que hay dos plantas diferentes, dependiendo de si las celdas calientan, $G_D^c(s)$, o enfrían, $G_D^f(s)$, hay dos controladores, $C_D^c(s)$ y $C_D^f(s)$, respectivamente, sintonizados para cada planta. El sistema conmuta entre una rama u otra del bucle dependiendo de si las celdas calientan o enfrían, con una histéresis de $0,5$ °C para evitar transiciones abruptas. La salida de estos controladores es el incremento en el ciclo de trabajo $\Delta D(s)$ necesario que regula el voltaje de alimentación de las celdas, mientras que la salida de las plantas es el incremento de temperatura real $\Delta T_C(s)$ en las celdas, el cual se realimenta a los controladores en este bucle secundario.

Para sintonizar $C_T(s)$ y $C_D(s)$, primero, se sintonizaron los parámetros básicos del PID (K_p , T_i y T_d) utilizando los métodos de Ziegler-Nichols (ZN), Cohen-Coon (CC), Chien-Hrones-Reswick (CHR), Approximate M-constrained Integral Gain Optimisation (AMIGO) y Skogestad Internal Model Control (SIMC) (Skogestad & Grimholt, 2012). Para el resto de parámetros, se tomó como punto de partida $b = 0,7$, $c = 0$, $N = 20$ para el PID de dos grados de libertad, $T_t = \sqrt{T}$ y

$T_t = \sqrt{T_i T_d}$ para el método anti *wind-up* y $T_f = \theta/2$ para el filtro del predictor de Smith, donde T es la constante de tiempo del sistema y θ el retardo.

La efectividad de estos métodos se comparó mediante simulaciones, utilizando como indicadores de error el Integral Square Error (ISE), el Integral Absolute Error (IAE) y el Integral of Time-multiplied Absolute Error (ITAE), junto con el Total Variation (TV), que cuantifica el esfuerzo del controlador. Todos estos indicadores se definen en la ecuación (16), donde $e(t)$ es la señal de error, $u(t)$ es la señal de control y t_s es el tiempo de establecimiento. Los indicadores se obtuvieron para una entrada escalón de $\Delta T_{in} = 40$ °C para calentar y $\Delta T_{in} = -10$ °C para enfriar, ambos con una duración de 2 horas.

Finalmente, para todos los controladores, se realizó un ajuste fino de sus parámetros mediante prueba y error, con el fin de obtener la mejor respuesta posible que minimizase todos los indicadores de error. Los resultados se pueden ver en la Sección 3.2.

$$\begin{aligned} ISE &= \int_0^{t_s} e^2(t) dt & IAE &= \int_0^{t_s} |e(t)| dt \\ ITAE &= \int_0^{t_s} t|e(t)| dt & TV &= \int_0^{t_s} \left| \frac{du(t)}{dt} \right| dt \end{aligned} \quad (16)$$

2.5. Ensayo con el sistema completo

Para validar el funcionamiento del sistema, se hizo un ensayo de 15 días con una curva que emula las condiciones reales durante el transporte refrigerado. Dicha curva fue generada a partir de los datos obtenidos por un trazador inteligente de diseño propio (Garrido-López et al., 2024) instalado dentro de un camión frigorífico, que registró en tiempo real los datos de temperatura durante el trayecto, enviándolos a través de comunicación inalámbrica (NB-IoT y LTE-M) a un servidor. Durante el ensayo, se monitorizó la temperatura interior y las variables de control. La temperatura ambiente durante las pruebas fue de unos 20 °C, y se llevaron a cabo sin carga térmica para caracterizar de forma aislada la dinámica del sistema de control.

El objetivo del ensayo era verificar que la cámara climática era capaz de reproducir los datos de temperatura enviados como referencia. Para cuantificar la similitud entre la temperatura de referencia y la real, se obtuvieron las medias, medianas y desviaciones típicas de los errores absoluto y relativo, así como la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Los resultados del ensayo se muestran en la Sección 3.3.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados de la identificación del sistema

La Figura 4 presenta los resultados de los ensayos de identificación del sistema. La Figura 4(a) muestra los resultados tras calentar (desde enfriar), mientras que la Figura 4(b) tras enfriar (desde calentar). El ciclo de trabajo varió desde -100% hasta 100% y viceversa; para mayor claridad, este toma valores positivos cuando las celdas calientan y negativos cuando enfrían. Se puede observar que la relación entre las variables a través de $G_T(s)$ y $G_D(s)$ tiene la forma de un sistema de primer orden con retardo, tal y como se presentó en la Sección 2.3. Tras obtener todos los parámetros de las plantas, los resultados se incluyen en la Tabla 2.

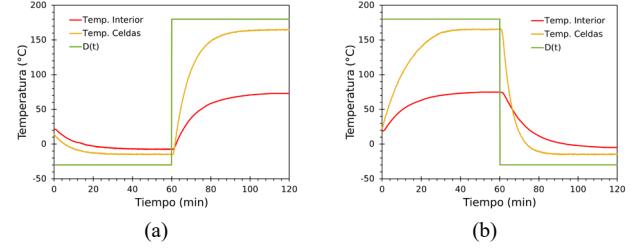


Figura 4: Resultados de los ensayos de identificación del sistema para las celdas (a) calentando y (b) enfriando.

Tabla 2: Valores de las constantes de las plantas

Parámetro	Valor
Γ	0,5441
τ	26,85 min
L	1,17 min
Ω	Calentar 144,93 °C Enfriar 34,67 °C
τ'	Calentar 8,84 min Enfriar 18,17 min
L'	Calentar 0,83 min Enfriar 1,00 min

3.2. Resultados de la sintonización de los controladores

Una vez realizada la sintonización de los controladores con los métodos indicados en la Sección 2.4, incluyendo la sintonización fina y, tras compararlos mediante los indicadores de error, los resultados finales obtenidos para los parámetros de los controladores se recogen en la Tabla 3, incluyendo los PID de dos grados de libertad, el método anti *wind-up* y el predictor de Smith. Se trata de los valores óptimos que obtuvieron la mejor respuesta posible a la vez que minimizaban todos los indicadores de error.

Tabla 3: Sintonización final de los controladores

	K_p	T_i	T_d	b	c	N	T_t	T_f
$C_T(s)$	22,4	7,95	0,50	0,42	0,0	18	1,7	0,6
$C_D^e(s)$	0,05	6,76	0,30	0,76	0,1	24	0,8	0,5
$C_D^f(s)$	0,25	7,18	0,49	0,71	0,2	17	1,0	0,6

3.3. Ensayo con una curva de temperatura

Los resultados del ensayo con el sistema completo controlado se pueden ver en las gráficas de la Figura 5. La Figura 5(a) muestra que la temperatura en el interior de la cámara (rojo) es capaz de seguir correctamente la temperatura enviada como referencia (azul) durante el estudio. Además, también se muestra el valor de la temperatura de las celdas y del ciclo de trabajo en la Figura 5(b). Con el control implementado, se observa que el actuador se ajustaba en todo momento según las necesidades del sistema, evitando saturaciones innecesarias y alcanzando un funcionamiento óptimo. También se observa que los tiempos de establecimiento son considerablemente bajos teniendo en cuenta las grandes fluctuaciones térmicas. Además, no hay prácticamente sobreimpulsos cuando se acerca a la referencia, aspecto clave para la aplicación de este proyecto. Se observa que la señal de control presenta valores más saturados cuanto más nos alejamos de la temperatura ambiente (20 °C).

Adicionalmente, todos los errores calculados durante el ensayo (entre la temperatura de referencia y la del interior de la cámara) se pueden ver en la Tabla 4. Estos errores fueron muy bajos, como un error absoluto mediano de 0,18 °C y un RMSE de 0,53 °C, lo que valida el correcto funcionamiento del

sistema a la hora de reproducir una curva de temperatura deseada en el interior de la cámara.

En otros ensayos realizados, se comprobó cómo un control sin mejoras (sin dos grados de libertad, anti *wind-up* ni predictor de Smith) proporcionaba sobrecalentamientos, sobreenfriamientos y respuestas demasiado largas, ya que no era capaz de anticiparse a los retardos causados por la inercia térmica y los cambios de polaridad de las celdas. Por tanto, el método propuesto en este trabajo permitió, gracias a la rápida respuesta del sistema, realizar cambios rápidos de temperatura en el interior de la cámara, lo que demuestra que los módulos Peltier eran la mejor opción para esta aplicación.

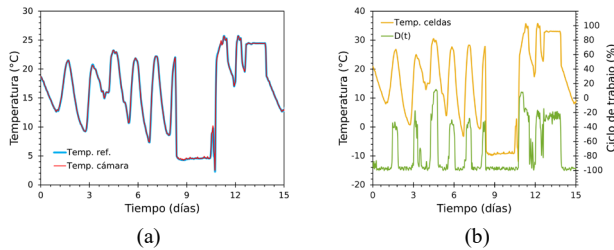


Figura 5: Resultados del ensayo con el sistema completo: (a) temperatura de referencia y $T_{in}(t)$; (b) $T_C(t)$ y $D(t)$.

Tabla 4: Errores obtenidos durante el ensayo

Error	Valor
Error absoluto medio (MAE)	0,27 °C
Error absoluto mediano	0,18 °C
Desviación típica error absoluto	0,43 °C
Error relativo medio	0,03
Error relativo mediano	0,01
Desviación típica error relativo	0,09
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	0,53 °C

4. Conclusiones

En este estudio, se ha desarrollado, construido y validado una cámara climática portátil basada en celdas de Peltier capaz de reproducir de forma precisa y dinámica las fluctuaciones de curvas reales de temperatura, gracias al sistema de control diseñado. Los ensayos demostraron que el sistema es efectivo para simular en tiempo real las condiciones ambientales experimentadas por productos perecederos durante la cadena de suministro gracias a su rápido tiempo de respuesta, permitiendo evaluar su impacto en la calidad y en la vida útil de los alimentos.

Se utilizó un control en cascada basado en controladores PID de dos grados de libertad, método anti *wind-up* y predictor de Smith para gestionar la inercia térmica de las celdas de Peltier y minimizar los efectos de los retardos. El sistema es ágil y versátil, ya que permite enfriar y calentar de forma eficiente a través de una histéresis que reduce los cambios abruptos entre estos modos de funcionamiento. Este enfoque ha demostrado mejorar significativamente la capacidad de la cámara de seguir curvas de temperatura complejas con gran precisión y estabilidad, mejorando la eficiencia térmica del sistema.

La validación experimental incluyó la identificación de la dinámica del sistema, la sintonización de los controladores mediante varios métodos y la reproducción de una curva de temperatura real de un camión frigorífico. Esto confirmó que la cámara climática es capaz de operar de forma precisa y fiable, mostrando unos errores en el ensayo dentro de unos

márgenes aceptables, lo que refuerza la eficacia del diseño propuesto.

Como resultado adicional de nuestra investigación, se observó la evolución de la humedad relativa en el interior de la cámara a medida que cambiaba la temperatura, de forma que un descenso de temperatura ocasionaba, lógicamente, un aumento de humedad. En estos incrementos de humedad, el vapor de agua se condensaba o incluso se congelaba en el disipador de aluminio absorbiendo calor y, aun así, nuestro sistema de control fue capaz de combatir este cambio físico manteniendo su efectividad.

En conclusión, la cámara climática propuesta representa una herramienta innovadora y eficiente tanto para la investigación como para la industria. La posibilidad de simular de forma precisa las condiciones experimentadas por los alimentos en la cadena de poscosecha abre la puerta al desarrollo de estrategias más eficientes para minimizar las pérdidas y optimizar la cadena de suministro.

Como trabajos futuros, se podrían incluir sensores adicionales para medir y controlar otras variables ambientales críticas, controlar la velocidad del ventilador interior para obtener respuestas más rápidas y hacer un estudio para mejorar la eficiencia del sistema buscando un compromiso entre el rendimiento (*COP*) de las celdas y la dinámica del sistema, así como realizar ensayos con carga térmica para analizar su impacto en el modelo. También se podrían integrar algoritmos de Machine Learning para predecir la vida útil de los productos según las condiciones ambientales registradas.

Este proyecto ha sido financiado por MICIU con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.11) 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

- Blanco - Lizarazo, C. M. et al. (2024). Multivariate shelf life model for postharvest *Agaricus bisporus* at different temperatures. *Postharvest Biology and Technology*, 217, 113106. <https://doi.org/10.1016/j.POSTHARVBIO.2024.113106>
- Charpe, A. M., Sedani, S. R., Murumkar, R. P., & Bhad, R. G. (2019). *Effect of Temperature on Microbial Growth in Food During Storage*. www.ycjournal.net
- Choosuk, N., Meesuk, P., Renumarn, P., Phungamngoen, C., & Jakkranuhwat, N. (2022). Kinetic Modeling of Quality Changes and Shelf Life Prediction of Dried Coconut Chips. *Processes*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/pr10071392>
- 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. et al. (2024). Monitoring Perishable Commodities Using Cellular IoT: An Intelligent Real-Time Conditions Tracker Design. *Applied Sciences*, 14(23), 11050. <https://doi.org/10.3390/AP142311050>
- Hoffmann, T. G., Meinert, C., Ormelez, F., Campani, M., Bertoli, S. L., Ender, L., & De Souza, C. K. (2022). Fresh food shelf-life improvement by humidity regulation in domestic refrigeration. *Procedia Computer Science*, 217, 826–834. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.279>
- Mahmood, M. H., Sultan, M., & Miyazaki, T. (2019). Significance of Temperature and Humidity Control for Agricultural Products Storage: Overview of Conventional and Advanced Options. *International Journal of Food Engineering*. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2019-0063>
- Skogestad, S., & Grimholt, C. (2012). The SIMC method for smooth PID controller tuning. In *Issue 9781447124245, Pages 147 - 175* (Issue 9781447124245, pp. 147–175). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2425-2_5
- United Nations. (2024). *THE 17 GOALS | Sustainable Development*. <https://sdgs.un.org/es/goals>