

Jornadas de Automática

Modelado y evaluación de un sistema Peltier para conservar alimentos

Gómez-Ruiz, Gabriel*, Sánchez-Herrera, Reyes, Orihuela, María del Pilar, Andújar, José Manuel

Centro de Investigación en Tecnología, Energía y Sostenibilidad (CITES), Universidad de Huelva, 21007 Huelva, España.

To cite this article: Gómez-Ruiz, Gabriel, Sánchez-Herrera, Reyes, Orihuela, María del Pilar, Andújar, José Manuel. 2025. Modeling and evaluation of a Peltier system for food preservation. *Jornadas de Automática*, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12105>

Resumen

Este trabajo presenta el diseño, modelado y evaluación de un sistema de refrigeración portátil basado en células Peltier, orientado a la conservación de alimentos. El sistema fue desarrollado a petición de la empresa POLISUR 2000 S.L.U., interesada en una solución eficiente para neveras portátiles. A partir del recipiente entregado por la empresa, se diseñó el sistema de refrigeración a instalar y se modeló la dinámica del sistema completo mediante un enfoque de caja gris. El modelo se evaluó mediante validación cruzada y métricas estándar como el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2). Con el modelo identificado, se simuló y evaluó la capacidad del sistema para alcanzar temperaturas en torno a 5 °C. Finalmente, se analizó mediante simulación un rediseño estructural que permitió cumplir con el requisito operativo definido por la empresa, y se estimó el coste energético asociado al funcionamiento del nuevo diseño del sistema.

Palabras clave: identificación para control, modelado de caja gris, validación de modelos.

Modeling and evaluation of a Peltier system for food preservation

Abstract

This work presents the design, modeling, and evaluation of a portable cooling system based on Peltier modules, aimed at food preservation. The system was developed in collaboration with the company POLISUR 2000 S.L.U., which was interested in an efficient solution for portable coolers. Based on the container provided by the company, the cooling system to be installed was designed, and the dynamics of the complete system were modeled using a gray-box approach. The model was calibrated with experimental data and validated through cross-validation and standard metrics such as the root mean square error (RMSE) and the coefficient of determination (R^2). Using the identified model, the system's ability to reach temperatures around 5 °C was simulated and assessed. Finally, a structural redesign was simulated, which enabled compliance with the operational requirement defined by the company, and the energy cost of operating the new system design over a 24-hour period was estimated.

Keywords: grey box modeling, identification for control, model validation.

1. Introducción

En el contexto actual, los sistemas de refrigeración de pequeña escala, como las neveras portátiles empleadas para conservar alimentos, bebidas o medicamentos, han adquirido una creciente relevancia debido a su aplicabilidad en sectores donde la portabilidad, la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental son factores clave (Lawal and Chang, 2021). Frente a los sistemas de compresión de vapor

tradicionales, los sistemas de refrigeración termoelectrónicos basados en células Peltier ofrecen una serie de ventajas, como el menor tamaño y peso del equipo de refrigeración, la ausencia de partes móviles, su funcionamiento silencioso, y una mayor capacidad de control de temperatura. No obstante, el bajo coeficiente de rendimiento (COP) de las células Peltier —estimado en 0.69 según los ensayos realizados por (Hermes and Barbosa, 2012)— y su comportamiento térmico no lineal

plantean importantes desafíos en términos de diseño y optimización.

La literatura refleja un interés creciente en el modelado preciso de sistemas termoelectrónicos, con el fin de simular su comportamiento y optimizar su rendimiento energético bajo distintas condiciones de operación (Díaz-Londono et al., 2020; Gómez-Ruiz et al., 2024). En este marco, los modelos de tipo caja gris se han consolidado como una herramienta eficaz para capturar la dinámica de sistemas termodinámicos con modelos parcialmente conocidos. Dichos modelos combinan ecuaciones basadas en leyes termodinámicas con parámetros que, a priori, son desconocidos y que deben ser identificados a partir de datos experimentales (Bermejo et al., 2023). Debido a la naturaleza no lineal de la respuesta térmica de las células Peltier, la identificación del modelo puede abordarse de dos maneras, en función de su complejidad. Cuando el modelo es complejo, es habitual recurrir a una aproximación mediante linealización por tramos (Pajares et al., 2023); en cambio, si la formulación es manejable, puede adoptarse por trabajar directamente con el modelo no lineal completo (Huicapi et al., 2017).

Este trabajo se enmarca en un contrato de investigación con la empresa POLISUR 2000 S.L.U., interesada en evaluar la viabilidad de un sistema de refrigeración basado en células Peltier. El objetivo principal consiste en determinar si, bajo ciertas condiciones de tensión aplicada a las células y de temperatura ambiente, el sistema es capaz de alcanzar una temperatura de 5°C en el interior del recipiente en régimen estacionario. Para ello, se formuló un modelo del sistema de refrigeración, y se identificaron sus parámetros a partir de datos experimentales. Con el modelo identificado, se simuló y evaluó el comportamiento del sistema bajo los requerimientos definidos por la empresa.

Las principales contribuciones de este artículo son:

- (1) La formulación e identificación de un modelo termodinámico de un sistema de refrigeración basado en el efecto Peltier mediante técnicas de caja gris.
- (2) La validación del modelo empleando estrategias de validación cruzada y métricas estándar.
- (3) La simulación del sistema modelado bajo condiciones de operación específicas.
- (4) La evaluación de la viabilidad del sistema en términos de los requerimientos operativos y energéticos.

El resto del artículo se organiza tal y como sigue: la Sección 2 describe los materiales y métodos empleados en esta investigación; la Sección 3 detalla el procedimiento de formulación del modelo e identificación de parámetros; en la Sección 4 se analizan los resultados obtenidos; y, finalmente, en la Sección 5 se exponen las conclusiones principales.

2. Materiales y métodos

Los materiales y métodos empleados en este trabajo se organizan en cuatro apartados: el primero describe el marco teórico y la formulación del modelo; el segundo describe las características físicas del sistema a modelar; el tercero aborda el sistema de adquisición de datos empleado para registrar las variables de interés; y el cuarto presenta los ensayos experimentales para la identificación y validación del modelo.

2.1. Marco teórico

En este trabajo se adoptó un enfoque de modelado de caja gris para obtener un modelo termodinámico de la nevera analizada. Este enfoque representa un punto intermedio entre los modelos de caja negra, basados exclusivamente en datos, y los modelos de caja blanca, basados exclusivamente en leyes físicas. Su aplicación está ampliamente respaldada en la literatura especializada en sistemas termodinámicos como el que se presenta en este artículo. En este contexto, el enfoque de caja gris permite combinar el conocimiento físico disponible con la identificación de parámetros, independientemente de que sean constantes o no, a partir de datos experimentales, lo que facilita representar el comportamiento dinámico del sistema sin necesidad de conocer en detalle todos los fenómenos involucrados (Gómez-Ruiz et al., 2024). El modelo de caja gris propuesto se basa en el modelo resistencia-capacitancia (RC) de primer orden que se observa en la Figura 1. En este modelo se definen dos nodos térmicos: T_{in} , que representa la temperatura en el interior de la nevera, y T_{out} , que corresponde a la temperatura del ambiente donde ésta se encuentra. Cabe destacar que la evolución de la temperatura en la pared externa de la nevera es aproximadamente igual a la del ambiente, por lo que se descartó la incorporación de un tercer nodo térmico que describiera la temperatura en dicha pared. Los nodos térmicos T_{in} y T_{out} se encuentran separados por una resistencia térmica R_{th} que modela la oposición a la transferencia de calor entre ambos nodos y que, en el sistema objeto, representa el aislamiento térmico de la nevera. Por otro lado, al nodo térmico T_{in} se le asocia una capacitancia térmica C_{th} , que modela la capacidad de retención de energía en dicho nodo y que, en el sistema objeto, representa la inercia térmica del interior de la nevera. Siguiendo el enfoque propuesto, ambos parámetros, R_{th} y C_{th} , necesitan ser identificados en base a datos experimentales (Bermejo et al., 2023).

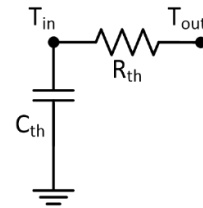


Figura 1: Modelo RC empleado.

Partiendo del modelo RC que se presenta en la Figura 1 y aplicando el principio de conservación de la energía en el nodo térmico T_{in} , se llega al balance energético mostrado en (1):

$$C_{th} \frac{dT_{in}}{dt} = \frac{T_{out} - T_{in}}{R_{th}} - Q_c(t) \quad (1)$$

donde $Q_c(t)$ representa la potencia del sistema de refrigeración de la nevera. Este sistema está compuesto por 8 células Peltier, cada una de las cuales genera una potencia $Q_{Peltier}(t)$, definida según (Díaz-Londono et al., 2020) como se muestra en (2):

$$Q_{Peltier}(t) = \frac{\alpha V T_c}{R_e} - \frac{V^2}{2R_e} - K(T_h - T_c) \quad (2)$$

donde V es la tensión aplicada a la célula Peltier, T_h es la temperatura en la cara de la célula que tiende a calentarse, T_c es la temperatura en la cara que tiende a enfriarse, α es el

coeficiente de Seebeck, R_e es la resistencia eléctrica de la célula, y K es la conductancia térmica. Dada la dificultad práctica para medir directamente las temperaturas T_h y T_c en operación, se optó por simplificar (2), dando lugar a (3):

$$Q_{\text{Peltier}}(t) = a \cdot V(t)^2 + b \cdot V(t) + c \quad (3)$$

donde el coeficiente a está asociado al calentamiento por efecto Joule, b al efecto Peltier, y c recoge posibles desviaciones. Estos parámetros se identifican a partir de datos experimentales y absorben implícitamente el comportamiento térmico asociado a T_h y T_c . Esta simplificación se justifica, además, por la evolución lenta y continua de las temperaturas en sistemas termodinámicos como el analizado. Se considera que $Q_c(t) = 8 \cdot Q_{\text{Peltier}}(t)$.

Dadas las ecuaciones físicas que rigen la dinámica del sistema, véanse (1) y (3), se optó por representar el modelo mediante una formulación en espacio de estados y en tiempo discreto. El modelo es lineal respecto al estado y los parámetros, pero presenta una no linealidad en la entrada, que proviene de la relación cuadrática entre la tensión aplicada y la potencia térmica generada por la célula Peltier. El modelo se define por las ecuaciones (4) y (5):

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), \theta) \quad (4)$$

$$y(k) = h(x(k), u(k)) \quad (5)$$

donde k representa el índice de muestreo asociado a un intervalo de tiempo discreto Δt . La variable de estado $x(k) \in \mathcal{R}$ representa la temperatura en el interior de la nevera, $T_{\text{in}}(k)$, que refleja su capacidad para almacenar energía térmica. El vector de entrada $u(k) \in \mathcal{R}^2$ está compuesto por la temperatura ambiente $T_{\text{out}}(k)$ y la tensión aplicada $V(k)$, ambas variables que influyen directamente en la evolución de $T_{\text{in}}(k)$. La salida del sistema, $y(k) \in \mathcal{R}$, coincide con la variable de estado, es decir, con $T_{\text{in}}(k)$. El vector de parámetros θ que se muestra en (6) es inicialmente desconocido y debe ser identificado.

$$\theta = [R_{\text{th}} \quad C_{\text{th}} \quad a \quad b \quad c]^T \quad (6)$$

Para abordar la identificación del vector de parámetros θ , se formuló un problema de optimización cuyo objetivo fue minimizar el error entre la temperatura medida en el interior de la nevera y la temperatura simulada por el modelo. Este proceso se implementó en Python 3.13.2 utilizando la función *least squares* del módulo *SciPy*, que resuelve problemas de mínimos cuadrados no lineales bajo restricciones. Por otro lado, se empleó un enfoque de validación cruzada utilizando dos conjuntos de datos independientes, cada uno obtenido a partir de un experimento completo (*fold*). Esta estrategia, ampliamente usada en identificación de sistemas dinámicos, permite evaluar la capacidad de generalización del modelo frente a datos no vistos previamente (Ljung, 1999). Así, cada *fold* corresponde a la totalidad de un ensayo experimental bajo condiciones distintas de tensión. Inicialmente, el *fold* correspondiente al primer ensayo se utilizó para estimar los parámetros del modelo, y el correspondiente al segundo ensayo, para su validación; luego se invirtieron los roles. Para cada caso se calcularon métricas de validación ampliamente reconocidas en la literatura científica, tales como el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el coeficiente de determinación (R^2). Finalmente, se seleccionó

el vector de parámetros θ que correspondía al *fold* con mejores resultados de validación.

2.2. Descripción física del sistema a modelar

La nevera se compone de un recipiente y de un sistema de refrigeración compuesto de cuatro módulos Peltier, tal y como se observa en la Figura 2.



Figura 2: Vistas del recipiente y el sistema de refrigeración. El sistema de refrigeración se compone de cuatro módulos Peltier, estando situados dos de ellos a cada lado del recipiente.

Se utilizó un recipiente térmicamente aislado con un volumen de 150L fabricado en poliestireno expandido (EPS), con una densidad de 24 kg/m^3 . Sus dimensiones externas son $75 \times 50 \times 100 \text{ cm}$, mientras que las internas son $67 \times 42 \times 72 \text{ cm}$. A partir de estos valores, las condiciones iniciales para los parámetros pueden ser conocidas utilizando las expresiones (7) y (8):

$$R_{\text{th}} = \frac{d}{k \cdot A} \quad (7)$$

$$C_{\text{th}} = m_{\text{air}} \cdot c_{p,\text{air}} + m_{\text{EPS}} \cdot c_{p,\text{EPS}} \quad (8)$$

donde d es el espesor promedio de la pared del recipiente; k es la conductividad térmica del EPS; A es el área superficial del recipiente; m_{air} es la masa del aire interno; $c_{p,\text{air}}$ es el calor específico del aire; m_{EPS} es la masa del EPS; y $c_{p,\text{EPS}}$ es el calor específico del EPS. Los valores de las propiedades físicas utilizadas en este trabajo fueron los siguientes: $k = 0.035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $c_{p,\text{air}} = 1005 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, $c_{p,\text{EPS}} = 1300 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, $\rho_{\text{air}} = 1.2 \text{ kg/m}^3$, y $\rho_{\text{EPS}} = 24 \text{ kg/m}^3$.

Con respecto a los cuatro módulos Peltier que se instalaron en el recipiente, cada uno de ellos está compuesto por dos células Peltier (modelo ET-161-12-08-E), tres disipadores de calor (uno para el lado que se calienta y dos para el lado que se enfría), y cuatro ventiladores (dos en el lado que se calienta y dos en el lado que se enfría). En la Figura 3 se muestra uno de los módulos Peltier instalados, con la disposición de los disipadores y ventiladores. Cabe señalar que las dos células Peltier que contiene este módulo no son visibles en la imagen, ya que se encuentran ubicadas entre los disipadores del lado caliente y del lado frío. Esta disposición justifica la simplificación adoptada en (3). Además, para satisfacer los requerimientos de tensión e intensidad del sistema de refrigeración, se emplearon dos fuentes de alimentación AC/DC para las células Peltier (modelo RPS-500-15C), y dos convertidores DC/DC para alimentar los ventiladores (modelo TEN 40-121E).

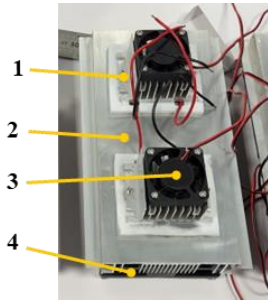


Figura 3: Módulo Peltier con la identificación de sus principales componentes. 1. Disipador del lado frío. 2. Disipador del lado caliente. 3. Ventilador del lado frío. 4. Ventilador del lado caliente.

2.3. Sistema de adquisición de datos

Para la medición de la temperatura en el interior de la nevera se utilizaron diez termopares (modelo DS18B20) ubicados en distintos puntos dentro del recipiente, como se muestra en la Figura 4, con el objetivo de capturar posibles efectos de estratificación térmica. La temperatura ambiente fue registrada mediante un sensor (modelo MCP9808), ubicado en el entorno del recipiente. La adquisición y el registro de datos se realizaron mediante una Raspberry Pi® 3 Model B+, conectada a Internet por una red de área local, lo que permitió la monitorización y el almacenamiento remoto de los datos en un PC del laboratorio. El intervalo de tiempo discreto Δt se estableció en 15 segundos, valor que se justifica dado que los sistemas térmicos, como el modelado en este trabajo, presentan una dinámica lenta asociada a los procesos de transferencia y almacenamiento de calor.

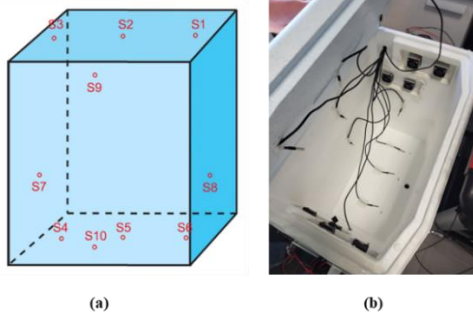


Figura 4: Ubicación de los termopares (modelo DS18B20) dentro de la nevera. (a) Vista esquemática preliminar de la distribución de los termopares. "Sx" hace referencia a un termopar, donde x es la etiqueta correspondiente. (b) Fotografía de la nevera con los termopares instalados.

2.4. Ensayos experimentales

Se llevaron a cabo dos experimentos independientes con el objetivo de caracterizar la respuesta térmica de la nevera bajo condiciones controladas. Cada experimento consistió en ciclos alternados de encendido y apagado del sistema de refrigeración. Durante los periodos de encendido, se aplicó la tensión correspondiente a las células Peltier, mientras que en los periodos de apagado no se suministró tensión. En concreto, los niveles de tensión aplicados durante los ciclos de encendido fueron $V = 13V$ en el primer ensayo y $V = 11.81V$ en el segundo. Las mediciones se realizaron con un intervalo de tiempo discreto $\Delta t = 15$ segundos. Las variables registradas fueron: la temperatura ambiente T_{out} , la tensión aplicada V , y las temperaturas captadas por los diez sensores distribuidos en el interior de la nevera, a partir de las cuales

se calculó la temperatura promedio T_{in} . De cada ensayo se obtuvo un conjunto de datos (*fold*), que se utilizó posteriormente para implementar la estrategia de validación cruzada descrita en la Sección 2.1. La Figura 5 muestra los datos experimentales correspondientes al primer ensayo.

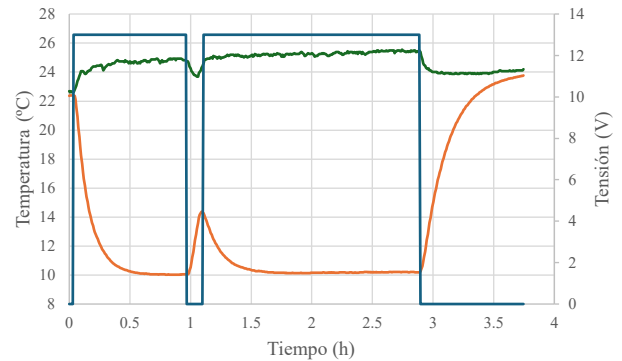


Figura 5: Datos experimentales correspondientes al primer ensayo: tensión aplicada a las células Peltier (en azul), temperatura promedio en el interior de la nevera (en naranja), y temperatura ambiente (en verde).

3. Formulación del modelo y procedimiento de identificación

A partir de las ecuaciones (1) y (3), y siguiendo el enfoque propuesto en (4) y (5), se obtuvo un modelo en tiempo discreto, expresado por las ecuaciones (9) y (10):

$$x(k+1) = x(k) + \Delta t \cdot [\alpha \cdot (u_1(k) - x(k)) - \beta \cdot (au_2(k)^2 + bu_2(k) + c)] \quad (9)$$

$$y(k) = x(k) \quad (10)$$

Las ecuaciones (9) y (10) fueron discretizadas aplicando el método de Euler explícito, considerando un intervalo de muestreo fijo de $\Delta t = 15$ segundos. Este método se seleccionó por su sencillez, la dinámica lenta del sistema (véase la Figura 5) y el paso de muestro fijado, relativamente pequeño en comparación con la dinámica del sistema. No obstante, en el caso de sistemas más complejos o con intervalos de muestreo mayores, el método de Euler podría volverse numéricamente inestable. En tales situaciones, sería recomendable emplear esquemas más robustos, como el método de Runge-Kutta de orden 4(5). En este modelo, $x(k)$ representa la temperatura en el interior de la nevera $T_{in}(k)$; $u_1(k)$ corresponde a la temperatura ambiente $T_{out}(k)$; y $u_2(k)$ a la tensión aplicada a las células Peltier $V(k)$. Los coeficientes $\alpha = 1/(C_{th}R_{th})$ y $\beta = 8/C_{th}$ agrupan los parámetros térmicos del sistema, mientras que a , b y c corresponden a los parámetros del modelo cuadrático de la potencia térmica asociada a la célula Peltier. La salida del sistema, dada por (10), coincide con la temperatura en el interior de la nevera en cada instante de muestreo. Para resolver el problema de optimización no lineal planteado en este trabajo, fue necesario definir un vector de parámetros iniciales θ_0 , dado que los algoritmos de mínimos cuadrados no lineales requieren un punto de partida para iniciar el proceso iterativo de ajuste. A partir de las dimensiones del recipiente, se estimó un espesor promedio de las paredes $d = 0.06$ m y un área superficial externa $A = 3.25$ m². Con estos valores, junto con la conductividad térmica del EPS, se realizó una estimación inicial para la resistencia térmica: $R_{th,0} = 0.55$ K/W. Por otro lado, conociendo la

densidad del aire y del EPS, y considerando nuevamente las dimensiones del recipiente, se estimaron la masa de aire $m_{\text{air}} = 0.24 \text{ kg}$ y la masa de EPS $m_{\text{EPS}} = 4.1 \text{ kg}$. A partir de estas masas y sus respectivos calores específicos, se obtuvo una estimación inicial para la capacitancia térmica: $C_{\text{th},0} = 5600 \text{ J/K}$. En cuanto a los parámetros empíricos a , b y c , se asignaron inicialmente valores pequeños y normalizados con el fin de evitar inestabilidades numéricas en las primeras iteraciones del proceso de optimización. Partiendo del significado físico descrito en la Sección 2.1, se utilizaron los siguientes valores iniciales: $a_0 = -0.1$, $b_0 = 0.1$ y $c_0 = 0$. En relación a los límites admisibles del vector de parámetros θ , se definió el intervalo $\Theta \in ([0.01, 100, -\infty, -\infty, -\infty], [5, 2000, 0, \infty, \infty])$.

4. Resultados y discusión

4.1. Análisis de la estratificación térmica del sistema

Con el fin de evaluar la posible existencia de estratificación térmica, los diez sensores se agruparon en tres niveles según su posición vertical en el interior de la nevera (véase Figura 4): nivel superior (S1, S2, S3 y S9), nivel medio (S7 y S8), y nivel inferior (S4, S5, S6 y S10). A partir de los datos del primer ensayo, se calcularon la temperatura media y la desviación estándar para cada nivel. Las diferencias observadas entre los niveles fueron inferiores a 0.5°C y no mostraron un patrón térmico vertical consistente. Por tanto, se concluye que no se observa estratificación térmica significativa, lo que respalda el uso de la temperatura promedio de los diez sensores como una representación válida del estado térmico del interior de la nevera. La Figura 6 muestra la evolución temporal de la temperatura promedio (en negro) junto con una banda de $\pm 1\sigma$ (una desviación estándar). Se observa que la variabilidad térmica es baja durante todo el ensayo. Durante el análisis se detectó que la magnitud de la estratificación térmica tiende a ser ligeramente menor durante los periodos transitorios en comparación con los periodos estacionarios. Esta diferencia podría estar relacionada con la convección interna inducida por los cambios térmicos, que favorece la homogeneización del aire en movimiento.

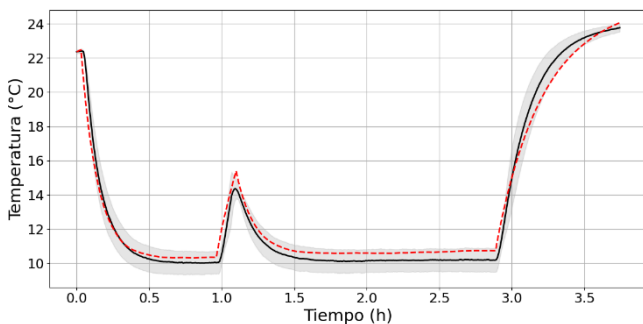


Figura 6: Evolución de la temperatura promedio (en negro) $\pm 1\sigma$ y de la temperatura simulada por el modelo (en rojo discontinuo) en el interior de la nevera durante el primer ensayo (*fold 1*).

4.2. Validación del modelo y parámetros identificados

Para evaluar el modelo identificado, se calcularon el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el coeficiente de determinación (R^2) para los conjuntos de datos (*folds*) utilizados en la validación. La Tabla 2 resume

los resultados obtenidos para ambos *folds*. Los mejores resultados se obtuvieron en el *fold 1*, donde el modelo alcanzó un RMSE de 0.565°C y un R^2 de 0.986 , resultados que se ven respaldados visualmente por los mostrados en la Figura 6. Estos valores son consistentes con los reportados en trabajos previos que emplean modelos de tipo RC para la caracterización térmica de recintos o equipos de refrigeración, como en (Díaz-Londono et al., 2020), en los que se indican valores de RMSE en torno a 1°C . En el *fold* con mejor desempeño (*fold 1*), los parámetros identificados fueron los siguientes: $R_{\text{th}} = 0.1929 \text{ K/W}$, $C_{\text{th}} = 5865 \text{ J/K}$, $a = -0.2820$, $b = 5.4553$, y $c = -0.6707$. Los valores obtenidos para R_{th} y C_{th} son coherentes con las estimaciones iniciales basadas en las propiedades físicas del sistema, que eran $R_{\text{th},0} = 0.55 \text{ K/W}$ y $C_{\text{th},0} = 5600 \text{ J/K}$, respectivamente.

Tabla 2: Resultados de la validación para ambos *folds*. El *fold 1* corresponde a los datos experimentales del primer ensayo ($V = 13\text{V}$), mientras que el *fold 2* se corresponde al segundo ensayo ($V = 11.81\text{V}$).

Métrica	<i>Fold 1</i>	<i>Fold 2</i>
RMSE ($^\circ\text{C}$)	0.5650	0.9820
MAE ($^\circ\text{C}$)	0.4750	0.8640
R^2	0.9860	0.9709

4.3. Análisis dinámico bajo condiciones específicas

Se utilizó el modelo identificado para simular la evolución de la temperatura en el interior de la nevera bajo un perfil de tensión específico y para el cual no se dispone de datos experimentales con los que establecer una comparación directa con observaciones reales. Se aplicó una tensión V de 12V a las células Peltier durante dos horas (periodo de encendido) seguidas de una hora sin tensión, es decir, a una tensión de 0V (periodo de apagado). La Figura 7 muestra la evolución de la temperatura en el interior de la nevera y de la temperatura ambiente durante el tiempo de simulación considerado. Durante el periodo de encendido, la temperatura en el interior de la nevera descendió progresivamente hasta estabilizarse en un valor promedio cercano a 10°C . Este resultado pone de manifiesto que, aunque el sistema tiene capacidad para lograr un enfriamiento significativo con respecto a la temperatura a la que se encuentra el ambiente, no alcanza el umbral requerido por la empresa (5°C).

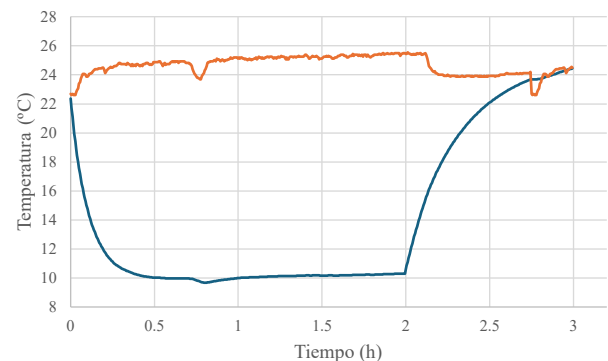


Figura 7: Evolución de la temperatura en el interior de la nevera (en azul) y de la temperatura ambiente (en naranja). La temperatura en el interior de la nevera fue simulada utilizando el modelo identificado, empleando como temperatura ambiente los datos correspondientes a *fold 2*, lo cual representa una aproximación.

4.4. Evaluación del sistema y propuesta de rediseño

Dado que el requisito operativo de la empresa es alcanzar temperaturas de 5°C sin carga en el interior del recipiente, se exploró una configuración alternativa que consiste en reducir el volumen del recipiente manteniendo el mismo material aislante y el número de módulos Peltier considerados hasta ahora. Este rediseño se llevó a cabo de forma heurística, partiendo del modelo matemático previamente formulado en (9) y (10) y del vector de parámetros identificado en la Sección 4.2. Reducir el volumen interno de la nevera afecta directamente a los valores de R_{th} y C_{th} , tal y como se puede deducir de (7) y (8). Desde un punto de vista físico, el parámetro C_{th} representa la capacidad del sistema para almacenar energía térmica, y depende de la masa de aire y del material aislante en el interior del recipiente, ambos directamente proporcionales al volumen del mismo. Por tanto, una reducción del volumen conlleva una disminución de C_{th} . Por otra parte, la resistencia térmica R_{th} , dependiente del espesor de pared y del área superficial del recipiente, aumenta al reducir el volumen si se mantiene constante el espesor de aislamiento, lo que implica una mayor capacidad de aislamiento térmico relativo. A partir de este razonamiento, se ajustaron los parámetros hasta encontrar que, con valores de $R_{th} = 0.4823$ K/W y $C_{th} = 2913$ J/K el sistema es capaz de alcanzar los 5°C requeridos, tal y como se observa en la Figura 8. Los valores de a , b y c que se emplearon fueron los mismos que los identificados en la Sección 4.2. Este resultado valida, al menos en simulación, la estrategia de rediseño planteada.

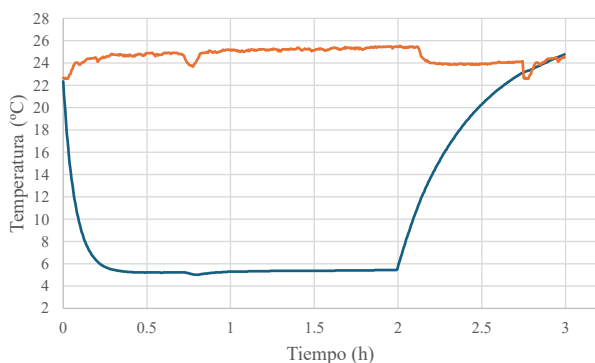


Figura 8: Evolución de la temperatura en el interior de la nevera (en azul) y de la temperatura ambiente (en naranja).

Cabe destacar que el nuevo valor adoptado para la capacitancia térmica del recipiente equivale aproximadamente a la mitad del valor previamente identificado. Dado que C_{th} es directamente proporcional al volumen del recipiente, esta reducción sugiere que dicho volumen también debería disminuir en la misma proporción. En consecuencia, se estima que el nuevo diseño correspondería a un volumen cercano a los 75 litros, en comparación con los 150 litros del diseño original. Es importante señalar que este rediseño no ha sido implementado físicamente, ya que no se disponía de una nevera portátil con dichas dimensiones. Este hecho constituye, por tanto, el siguiente paso en el desarrollo del trabajo: identificar una nevera de 75 litros y validar experimentalmente la estrategia de rediseño propuesta. Finalmente, se estimó el coste energético de operación del

sistema de refrigeración en la nevera de 75 litros. Se consideró el uso de 8 células Peltier (modelo ET-161-12-08) operando en sus condiciones nominales (12 V y 3.54 A, lo que equivale a 42.5 W por célula). En este caso, se asumió un funcionamiento continuo durante 24 horas, lo que resultó en un consumo total de energía de aproximadamente 8.16 kWh. Asumiendo una tarifa eléctrica media en España de 0.25€/kWh, el coste estimado de operación asciende a 2.04€.

5. Conclusiones

Este trabajo ha abordado el diseño, modelado y evaluación de un sistema de refrigeración basado en células Peltier destinado a la conservación de alimentos. El modelo dinámico desarrollado permitió caracterizar con precisión el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones de operación. Los resultados muestran que el sistema, tal como fue inicialmente concebido, no cumple el requisito en cuanto a temperatura establecido por la empresa. No obstante, se propuso y analizó un rediseño que reduce el volumen del recipiente, logrando alcanzar mediante simulación la temperatura objetivo. Además, se estimó el coste energético de funcionamiento del sistema completo durante un periodo de 24 horas.

Agradecimientos

El autor Gabriel Gómez Ruiz disfruta de una ayuda FPU, número FPU21/00468, financiada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Los autores agradecen también la colaboración de la empresa POLISUR 2000 S.L.U. en el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- Bermejo, F.J.S., Laboreo, É.R., Blázquez, C.S., 2023. Análisis de identificabilidad estructural de un sistema de transferencia de calor. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 20, 412–420. <https://doi.org/10.4995/riai.2023.19170>
- Díaz-Londono, C., Enescu, D., Ruiz, F., Mazza, A., 2020. Experimental modeling and aggregation strategy for thermoelectric refrigeration units as flexible loads. *Applied Energy* 272, 115065. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115065>
- Gómez-Ruiz, G., Sánchez-Herrera, R., Andujar, J.M., Rubio Sanchez, J.L., 2024. Simulation-Based Education Tool for Understanding Thermostatically Controlled Loads. *Sustainability* 16, 999. <https://doi.org/10.3390/su16030999>
- Hermes, C.J.L., Barbosa, J.R., 2012. Thermodynamic comparison of Peltier, Stirling, and vapor compression portable coolers. *Applied Energy* 91, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.043>
- Huicapi, V., Herrero, J.M., Blasco, X., Martínez-Iranzo, M., 2017. Non-linear identification of a Peltier cell model using evolutionary multi-objective optimization*. *IFAC-PapersOnLine*, 20th IFAC World Congress 50, 4448–4453. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.372>
- Lawal, O.M., Chang, Z., 2021. Development of an effective TE cooler box for food storage. *Case Studies in Thermal Engineering* 28, 101564. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101564>
- Ljung, L., 1999. *System Identification: Theory for the User*, 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Pajares, A., Vivas, F.J., Blasco, X., Herrero, J.M., Segura, F., Andújar, J.M., 2023. Methodology for energy management strategies design based on predictive control techniques for smart grids. *Applied Energy* 351, 121809. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121809>