



UNIVERSIDAD CARLOS III

MÁSTER EN ROBÓTICA Y AUTOMATIZACIÓN

**CONTROL INTELIGENTE**

**OPTIMIZACIÓN DE CONTROLADOR TÉRMICO**

Fergus James Proctor

## 1. Introducción y motivación

El presente trabajo surge a raíz de la reciente instalación de un sistema de aerotermia en la vivienda del autor, con el objetivo de sustituir una caldera convencional. El sistema cuenta con un controlador básico tipo termostato *On/Off*, y se complementa con un conjunto de paneles solares capaces de alimentar parcialmente la demanda energética de calefacción.

Tras recibir la primera factura eléctrica correspondiente a un mes de invierno, el autor observó un consumo inesperadamente elevado. Este hecho dio lugar a una serie de interrogantes que motivan este estudio:

- ¿Cuáles son las causas del elevado consumo energético de la vivienda?
- ¿Podría haberse reducido dicho consumo utilizando una estrategia de control más avanzada que el termostato tradicional?
- ¿Qué impacto económico tendría incorporar la generación solar a una estrategia de control optimizada?

Con el objetivo de dar respuesta a las preguntas planteadas, el trabajo se estructuró en distintas fases. Se comenzó con la definición del sistema y sus parámetros físicos y constructivos, seguida de la obtención y adaptación de un modelo térmico de la vivienda. A continuación, se evaluó el comportamiento energético bajo un controlador tipo *On/Off*, y se procedió al diseño y optimización de un controlador PID orientado a la reducción del consumo. Tras unas primeras conclusiones, se extendió el modelo incorporando generación solar fotovoltaica y un controlador greedy que maximiza el uso de energía renovable.

## 2. Definición y parámetros del sistema

La vivienda considerada es una casa unifamiliar de gran volumen, con una geometría regular y una envolvente constructiva convencional (muros de ladrillo sin aislamiento y ventanas de vidrio simple). Se asume una temperatura homogénea en el interior, dado que el uso cotidiano del espacio favorece la mezcla térmica entre estancias. Las puertas interiores se consideran cerradas de forma permanente, por lo que el sistema se modela como un único volumen térmico uniforme.

Tabla 1: Parámetros físicos y térmicos de la vivienda

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Dimensiones en planta	—	$9 \times 9$	m
Altura total	$h$	6	m
Volumen interior	$V$	486	m <sup>3</sup>
Superficie de muro expuesta	$A_w$	198	m <sup>2</sup>
Superficie de cubierta	$A_r$	81	m <sup>2</sup>
Área total de ventanas	$A_v$	9.6	m <sup>2</sup>
Tipo de muro	—	Ladrillo con cámara de aire	—
Tipo de ventana	—	Vidrio simple	—
Temperatura exterior	$T_{\text{out}}(t)$	14 a 4	°C
Temperatura interior objetivo	$T_{\text{set}}$	19.5	°C
Capacidad calorífica del aire	$c$	1005	J/kg·K
Densidad del aire	$\rho$	1.225	kg/m <sup>3</sup>
Masa de aire interior	$M_{\text{air}}$	595	kg
Masa térmica de muros	$M_{\text{wall}}$	99,000	kg
Calor específico del ladrillo	$c_{\text{brick}}$	850	J/kg·K
Potencia térmica de la aerotermia	$Q_{\text{max}}$	14,000	W
Precio de la electricidad	—	0.25 / 3.6e6	€/J

El sistema de calefacción considerado es una bomba de calor tipo aerotermia (modelo *Ferrolli Omnia 3.2*), con una potencia térmica máxima de 14 kW. Se asume que su tiempo de respuesta es inmediato y que opera sin pérdidas internas significativas. En este modelo no se contempla la modulación del coeficiente de rendimiento (COP) en función de la temperatura exterior, aunque esta extensión podría ser incorporada en futuras versiones para mayor realismo.

En secciones posteriores se introduce la generación solar, representada por un conjunto de paneles fotovoltaicos con una potencia máxima de 2 kW. Se analiza cómo esta fuente de energía renovable puede integrarse en la estrategia de control con el objetivo de reducir los costes energéticos del sistema.

### 3. Obtención y adaptación del modelo en Simulink

Como punto de partida, se empleó el modelo térmico de una vivienda proporcionado en la biblioteca de ejemplos de *MATLAB/Simulink*, específicamente el modelo: *Thermal Model of a House* (Fig. 1) [1].

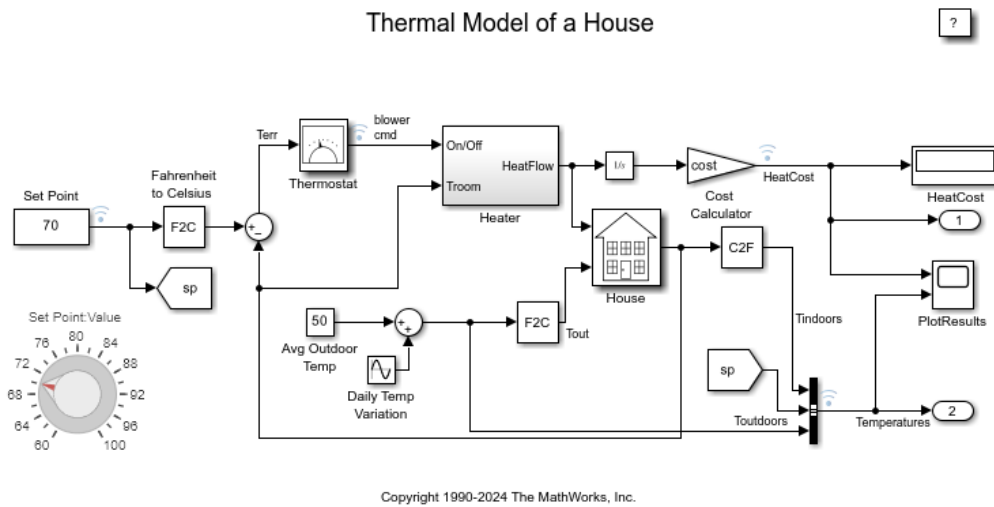


Figura 1: Modelo térmico original utilizado como base para la simulación.

Este modelo base constituye una representación lineal del comportamiento térmico de una edificación simple, con un único volumen de aire interior, un calentador de aire (controlado mediante flujo de calor), y pérdidas por conducción hacia el exterior a través de muros y ventanas.

### 3.1. Comportamientos no lineales introducidos

Aunque el modelo original es completamente lineal, la vivienda considerada en este proyecto presenta ciertas características que requieren la inclusión de comportamientos no lineales, con el objetivo de obtener resultados más realistas. Se han implementado las siguientes modificaciones:

#### a) Variación de la resistencia térmica en función de la temperatura

En viviendas sin aislamiento adecuado, como en este caso, la resistencia térmica de los cerramientos puede variar ligeramente con la temperatura ambiente exterior. Para reflejar este efecto, se implementó una función no lineal que modifica la resistencia térmica efectiva  $R(T)$  según una ley exponencial o lineal aproximada:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T_{in} - T_{out})) \quad (1)$$

#### b) Pérdidas térmicas por radiación

Dada la elevada superficie expuesta de la vivienda (particularmente en la cubierta), se añadió una componente de pérdidas térmicas por radiación al cielo, especialmente relevantes durante la noche. Esta pérdida se modela mediante la ley de Stefan–Boltzmann:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_{\text{in}}^4 - T_{\text{sky}}^4) \quad (2)$$

Este modelo de pérdidas no lineales se presenta en la Figura 2. Las unidades, constantes y parámetros físicos también se cambiaron en base a la Tabla 1.

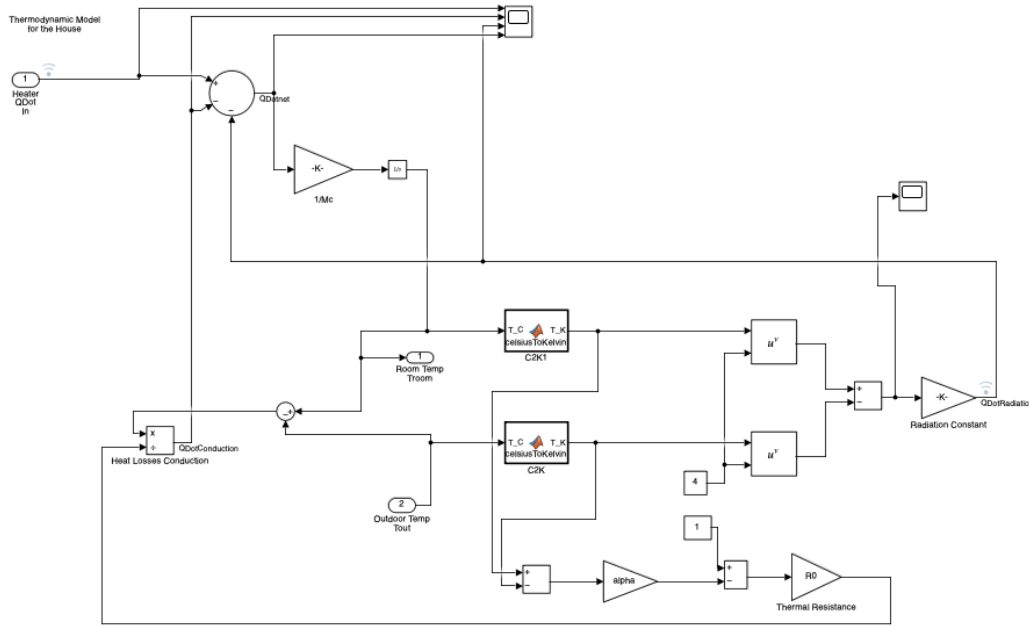


Figura 2: Captura de pantalla del modelo de pérdidas térmicas en Simulink.

## 4. Evaluación de consumo energético con controlador On/Off

Una vez adaptado el modelo térmico en *Simulink*, se evaluó el comportamiento energético de la vivienda utilizando un controlador tipo termostato *On/Off*. Este controlador regula la activación de la aerotermia en función de la temperatura interior, incorporando un margen de histéresis de  $\pm 2^\circ\text{C}$  respecto al valor de consigna, fijado en  $19,5^\circ\text{C}$ .

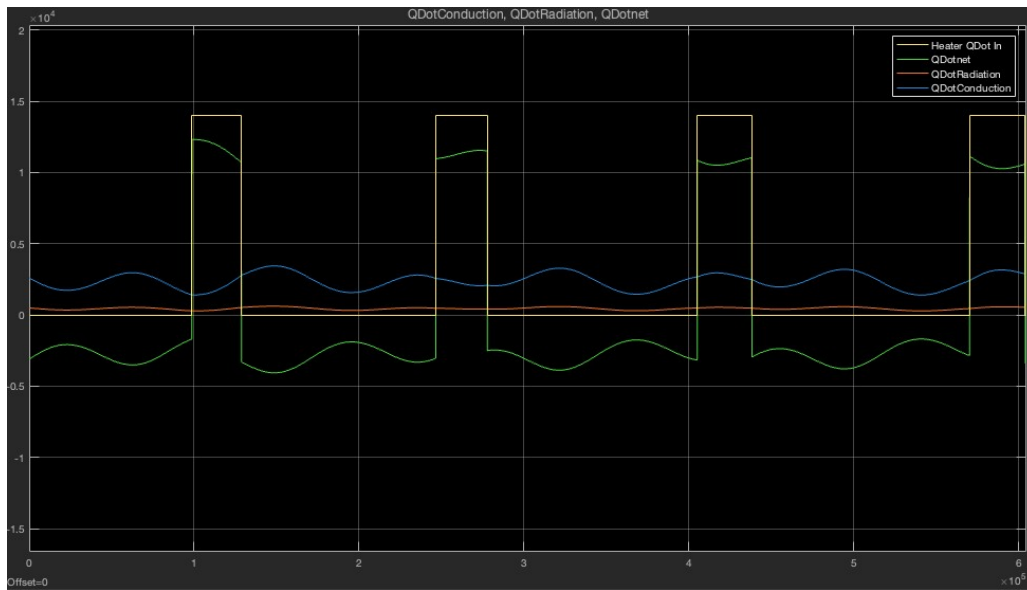


Figura 3: Potencia neta transferida al sistema térmico bajo control On/Off.

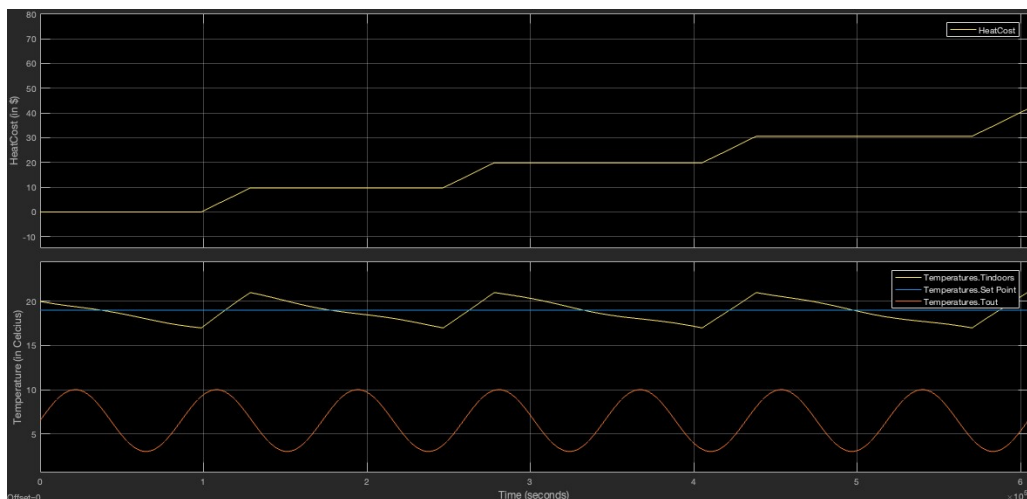


Figura 4: Evolución de la temperatura interior y coste del sistema de calefacción con controlador On/Off.

La simulación se llevó a cabo durante un periodo representativo de una semana invernal, considerando un Coeficiente de Rendimiento (COP) constante de 3 para la bomba de calor. Bajo estas condiciones, el coste energético semanal estimado fue de 41,50 euros.

## 5. Diseño y optimización de un controlador PID

Se reemplazó el controlador On/Off por un controlador PID, considerando la limitación física del actuador (potencia máxima de 14 kW).

El diseño del controlador PID parte de las siguientes hipótesis:

- El sistema térmico puede aproximarse como continuo y de dinámica suave.
- Los retardos internos son pequeños o despreciables.
- El actuador responde proporcionalmente a la señal de control.

Dado que el modelo es no lineal y se trabaja con una simulación de tipo *black-box*, se empleó una estrategia de optimización global basada en simulación.

### 5.1. Formulación del problema de optimización

**Estado a regular:** Temperatura interior.

**Parámetros a optimizar:**  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ .

**Función de coste:** Combinación ponderada de dos términos:

1. **Error térmico (confort):** Medido como el Integral of Squared Error (ISE)

$$J_{\text{temp}} = \int (T_{\text{in}} - T_{\text{set}})^2 dt$$

2. **Consumo energético:** Energía total utilizada por la aerotermia

$$J_{\text{energy}} = \int Q_{\text{heater}} dt$$

La función de coste total es:

$$J = w_1 \cdot J_{\text{temp}} + w_2 \cdot J_{\text{energy}}$$

donde  $w_1$  y  $w_2$  permiten ajustar el compromiso entre confort y eficiencia.

### 5.2. Estrategia de optimización: Particle Swarm Optimization

Se utilizó el script `particle_optimization.m`, basado en el algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO), adecuado para modelos simulados sin función derivada explícita.

**Pasos del procedimiento:**

1. Se definen los límites de búsqueda para  $K_p$  (0-14000),  $K_i$  (0-1000),  $K_d$  (0, ya que la casa tiene una elevada inercia térmica y por lo tanto una dinámica muy lenta).
2. En cada iteración:
  - Se asignan los valores PID al *workspace*.
  - Se ejecuta el modelo en modo *Fixed-step*.
  - Se extraen las señales *Tindoors* y *HeatCost*.
  - Se evalúa la función de coste.

3. Se selecciona el conjunto de parámetros que minimiza  $J$ .

Tras 10 iteraciones y 220 partículas, el algoritmo convergió a los siguientes valores:

$$K_p = 6565,33, \quad K_i = 680,04, \quad K_d = 0$$

### 5.3. Resultados

Aunque el controlador PID proporciona una reducción en el coste energético (de 41,50 a 35.59 euros por semana), su comportamiento se aproxima al de un controlador *On/Off* debido a la alta inercia térmica del sistema (véase Fig. 5). Como resultado, la señal de control suele alcanzar rápidamente su valor máximo, saturando el actuador durante largos periodos.

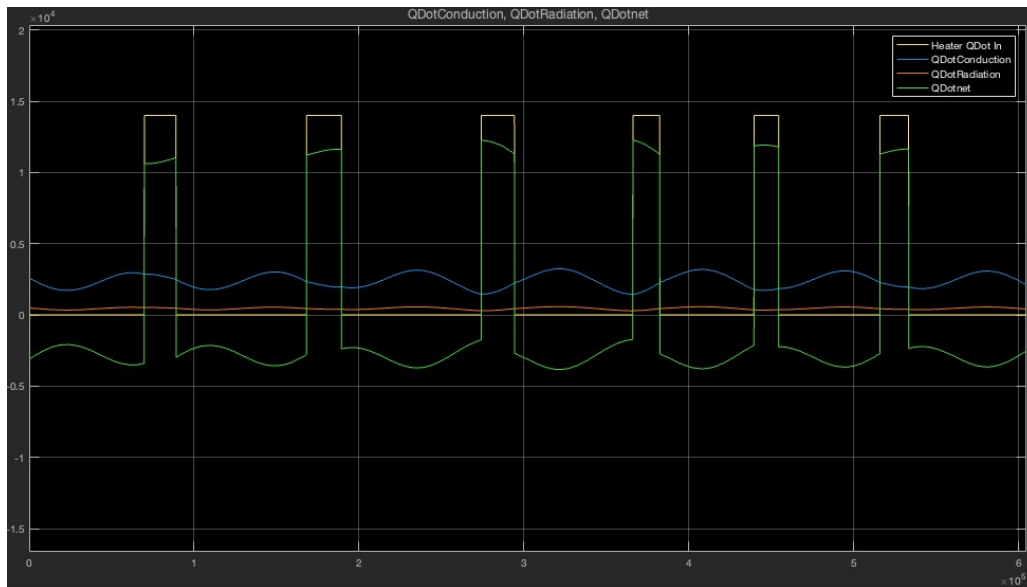


Figura 5: Flujo de calor proporcionado por el controlador PID.

### 5.4. Recomendación: uso de MPC

Dada la naturaleza lenta del sistema, una estrategia más adecuada sería un *Model Predictive Control* (MPC). Este permitiría anticipar la evolución de la temperatura y generar señales de control suaves, optimizando simultáneamente confort y consumo energético dentro de restricciones físicas.



## 6. Extensión del modelo: generación solar y control energético

### 6.1. Incorporación de generación solar fotovoltaica

Tras el diseño del controlador PID, se amplió el modelo térmico incluyendo un sistema de generación solar fotovoltaica, representando los paneles instalados sobre la vivienda. La generación solar se modeló como una señal senoidal positiva durante las horas diurnas, en fase con la temperatura exterior, y con un pico máximo de 2 kW, estimado utilizando datos reales del sistema obtenidos mediante la herramienta *SolarWeb* [2].

### 6.2. Coste energético con precios diferenciados

Se introdujo una función *gridcost* para calcular el coste neto de la energía, diferenciando entre el precio de compra y el de venta a la red:

- Precio de compra: 0,25/kWh
- Precio de venta: 0,07/kWh

Esta lógica penaliza económicamente los momentos en los que se vende energía solar durante el día y se necesita comprar energía más tarde para calefacción. El coste semanal se redujo a 21.86 euros, pero se identificó un margen de mejora.

### 6.3. Control “greedy”: uso térmico prioritario de la energía solar

Para evitar pérdidas económicas asociadas a la venta de energía solar a bajo precio, se planteó una estrategia de control que utiliza la vivienda como batería térmica.

La potencia térmica total inyectada al sistema se define como:

$$Q_{in} = \max(Q_{PID}, P_{solar})$$

donde:

- $Q_{PID}$  es la demanda térmica determinada por el controlador PID.
- $P_{solar}$  es la potencia solar generada disponible.

Esta estrategia garantiza que toda la energía solar generada se aproveche térmicamente, incluso si supera la necesidad instantánea de calefacción. Como consecuencia, se permite un ligero sobrecalentamiento durante las horas de alta producción, favoreciendo el autoconsumo y reduciendo la dependencia de la red.

La lógica de control se implementó en *Simulink* mediante un bloque Max para seleccionar el mayor valor entre  $Q_{PID}$  y  $P_{solar}$ , y un bloque Saturation para limitar la potencia máxima a 14 kW,

correspondiente a la capacidad del sistema de calefacción.

## 6.4. Resultados

Esta estrategia conlleva un seguimiento menos preciso de la temperatura de consigna que el PID estándar, pero reduce significativamente el coste energético semanal a 18.19 euros.

Además, la Figura 6 muestra cómo la energía solar generada es completamente aprovechada térmicamente, evitando su venta a bajo precio y posterior recompra.

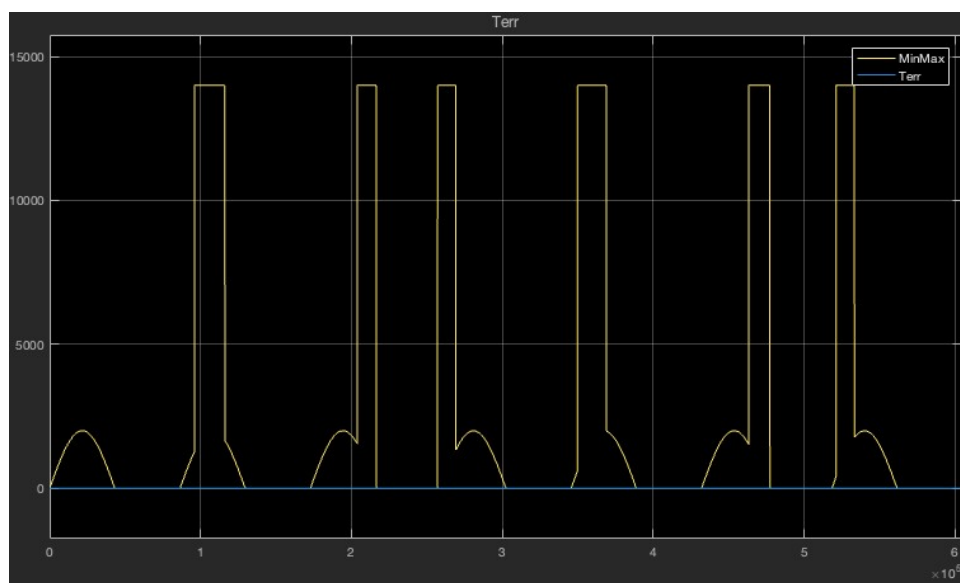


Figura 6: Uso de la energía solar: la señal de control pide el máximo entre el PID y la generación solar.

Estrategia de control	Consumo energético semanal
Termostato On/Off (modelo original)	41,50
Controlador PID	35,59
PID + Generación solar	21,86
Controlador <i>greedy</i> + Generación solar	18,19

Tabla 2

## 7. Conclusiones

Este trabajo ha abordado de forma progresiva el modelado, análisis y control del sistema térmico de una vivienda, con el objetivo de reducir su consumo energético.

- El controlador PID, aunque es continuo en teoría, se comporta de forma similar a un controlador On/Off debido a la elevada inercia térmica del sistema. Esto produce saturaciones rápidas en la señal de control.
- Un controlador predictivo (MPC) sería más adecuado, al permitir anticipar la dinámica térmica y optimizar el control bajo restricciones físicas y económicas.
- La estrategia *greedy* permite utilizar la vivienda como una batería térmica, absorbiendo el excedente de energía solar y permitiendo ligeros sobrecalentamientos para reducir la dependencia de la red.
- Gracias al uso conjunto de generación solar y la estrategia *greedy*, el coste semanal se reduce de 41,50 € a 18,19 €, lo que representa una disminución significativa del gasto energético.

Como continuación de este trabajo, se proponen las siguientes líneas de desarrollo:

- Implementar un controlador MPC para obtener una señal de control más suave, evitar saturaciones y mejorar el rendimiento térmico.
- Realizar un análisis coste-beneficio para:
  - Incrementar la capacidad de generación solar instalada.
  - Incorporar baterías eléctricas en lugar de usar la masa térmica de la vivienda como sistema pasivo de almacenamiento energético.

# Bibliografía

- [1] MathWorks. Thermal model of a house. <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/thermal-model-of-a-house.html>, 2025. Último acceso: junio de 2025.
- [2] Fronius International GmbH. Fronius solar.web. <https://www.solarweb.com/>. Último acceso: junio de 2025.