



Proyecto Fin de Carrera

Modelado, análisis y control de hornos domésticos

Autor

Edgar Ramírez Laboreo

Directores:

Carlos Sagüés Blázquez

Sergio Llorente Gil





ÍNDICE

1. Introducción
2. Modelado
3. Identificación
4. Simulación y análisis
5. Control
6. Conclusiones y líneas futuras



1. Introducción

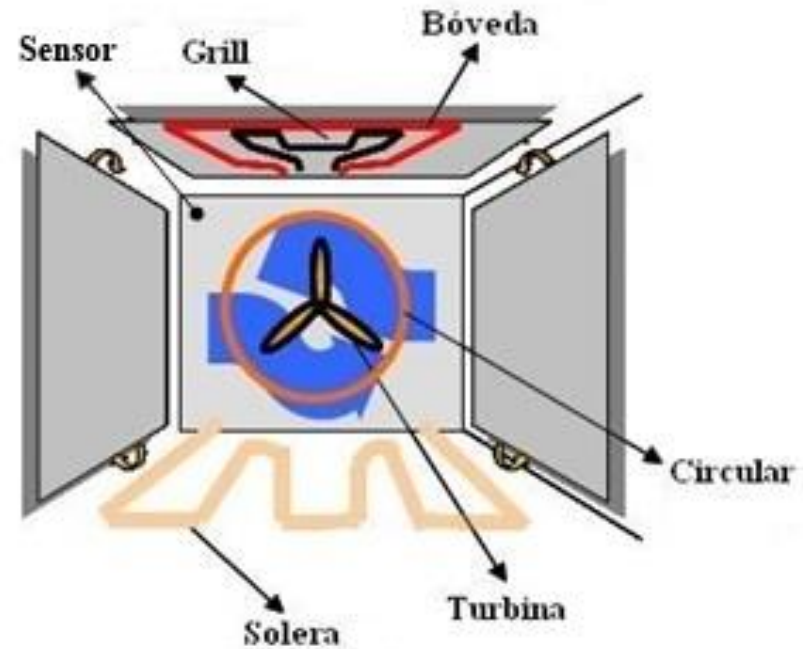
Motivación

Sistema objeto del proyecto: horno doméstico eléctrico

Equipo de uso muy generalizado en los hogares

Principales componentes:

- Cavity interna
 - Elementos calefactores
 - Turbina
 - Sensor de temperatura
- Aislante
- Chapas exteriores
- Puerta
- Otros elementos



Motivación

Laboratorio de hornos de BSH:

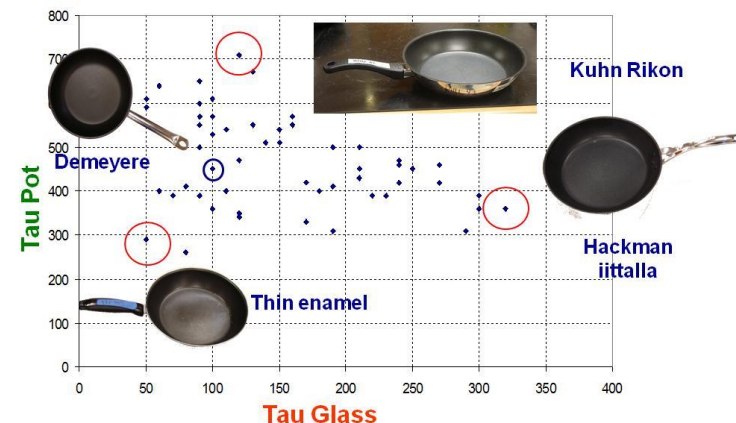
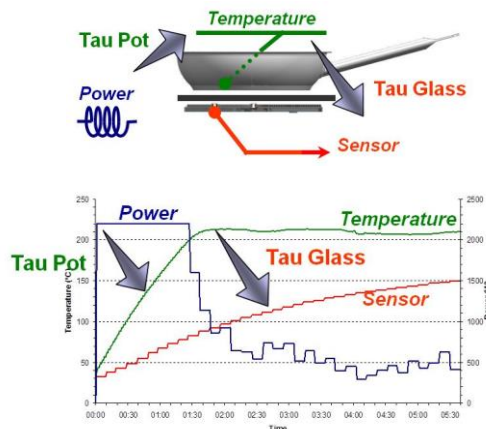
- Homologaciones
- Etiquetado energético
- Nuevas funciones de cocinado
- Reducción del consumo



Laboratorio de referencia de I+D+i en inducción:

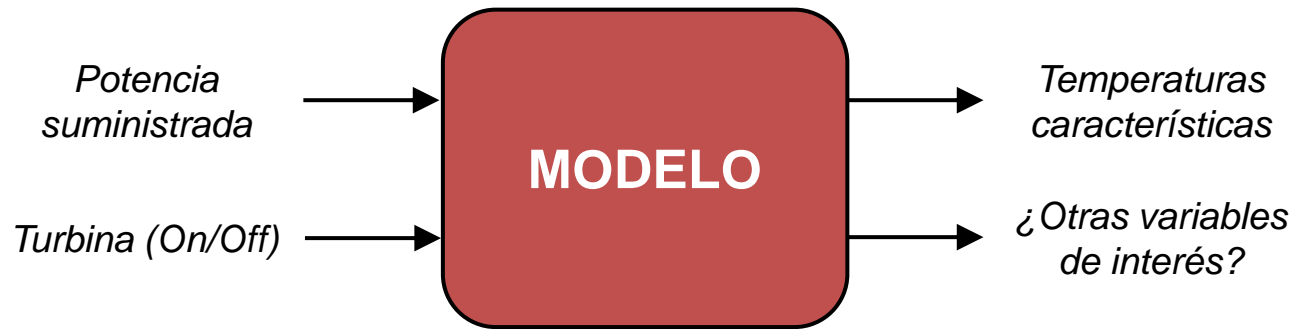
- Experiencia en modelado, identificación y control de sistemas

Modelo térmico inductor-recipiente:



Objetivos

- 1) Desarrollo de un modelo térmico simplificado del horno



- 2) Desarrollo de una herramienta de simulación simplificada
- 3) Análisis del modelo y planteamiento de posibles mejoras constructivas
- 4) Propuesta de nuevas estrategias de control y comparación con las actuales



2. Modelado

Analogía eléctrica

Equivalencia entre ecuaciones de transferencia de calor y eléctricas (Anexo A)

Modelado de un sistema eléctrico mediante un circuito eléctrico

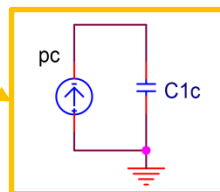
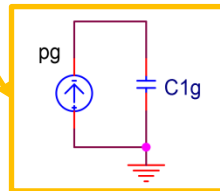
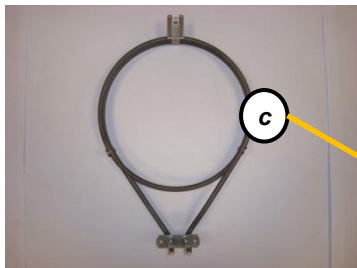
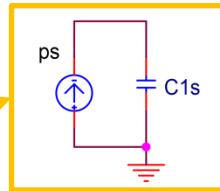
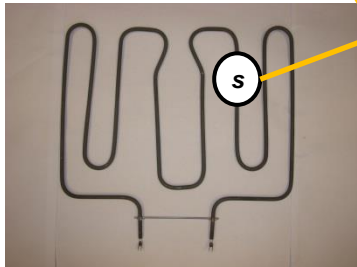
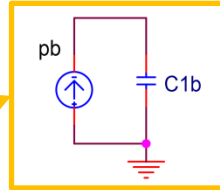
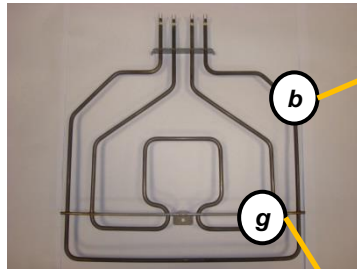
Analogía en variables y constantes:

Electricidad	Calor
$V(t)$	$T(t)$
$I(t)$	$\dot{Q}(t)$
R	$l/kA, 1/hA$
C	$m \cdot c_p$

La precisión del modelo depende de la discretización del sistema en capacidades y resistencias térmicas

Esquema del modelo

Elementos calefactores (4)

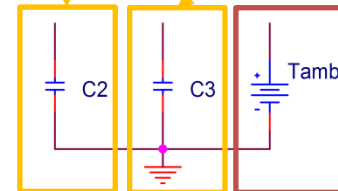


Temperaturas características

Cavidad interna



Partes externas



Temperatura ambiente

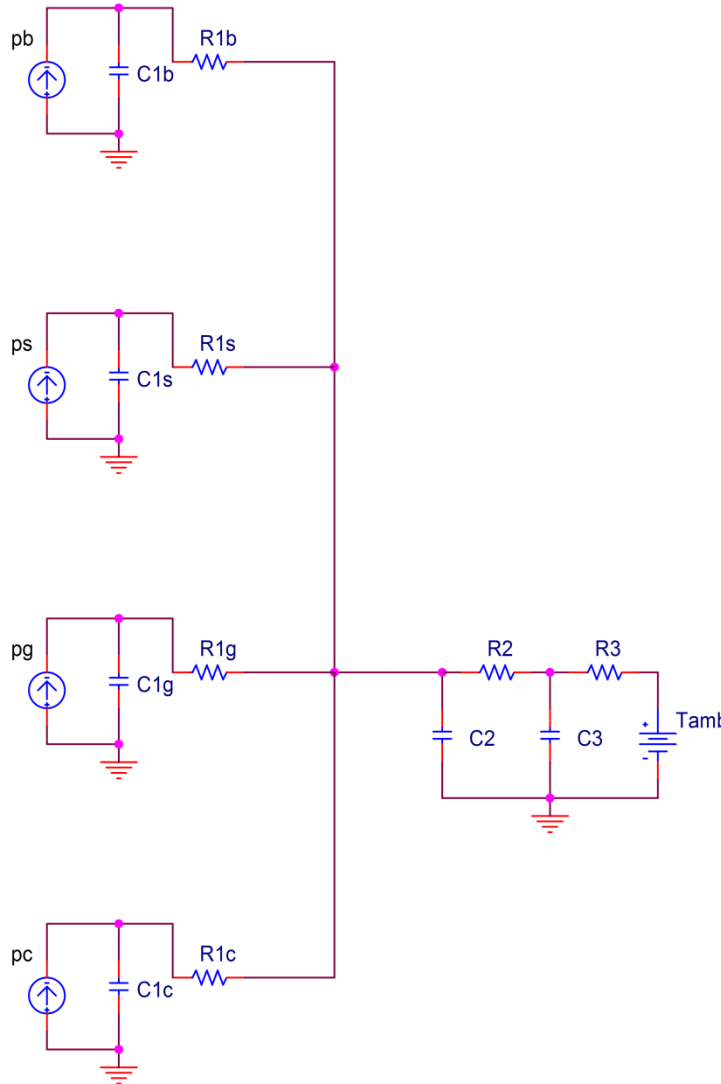


1. Los elementos calefactores elevan la temperatura de la cavidad.

2. La cavidad pierde parte de su energía hacia los elementos exteriores.

3. La parte externa del horno cede energía al ambiente.

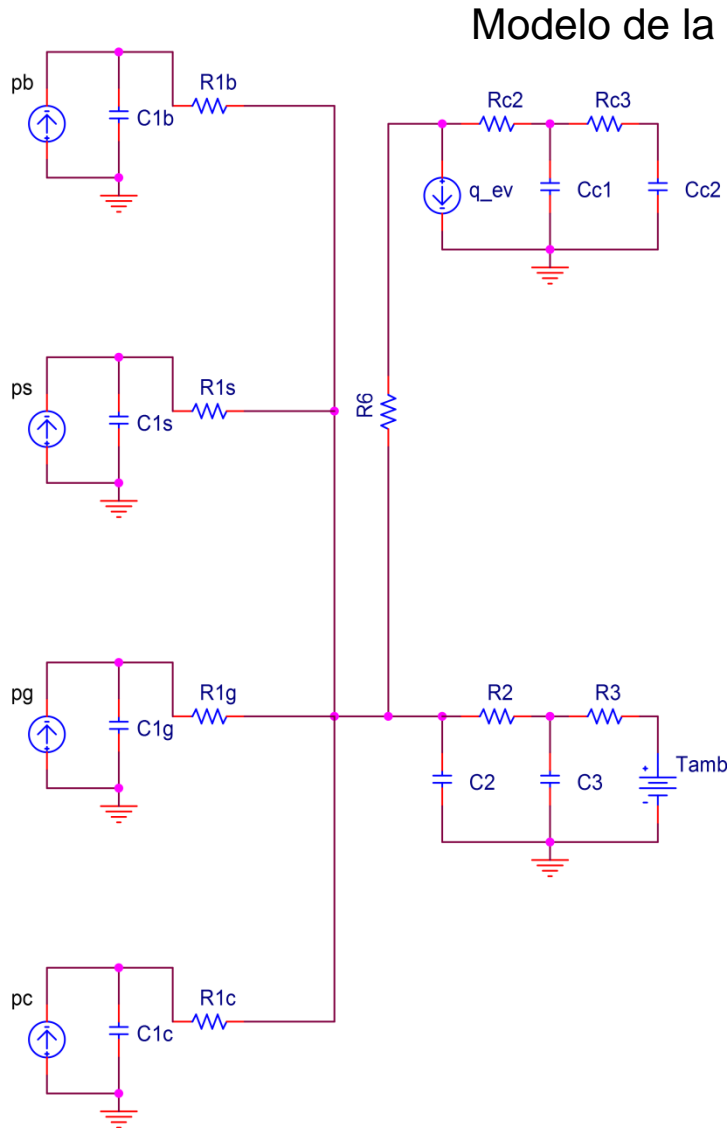
Conexiones térmicas principales

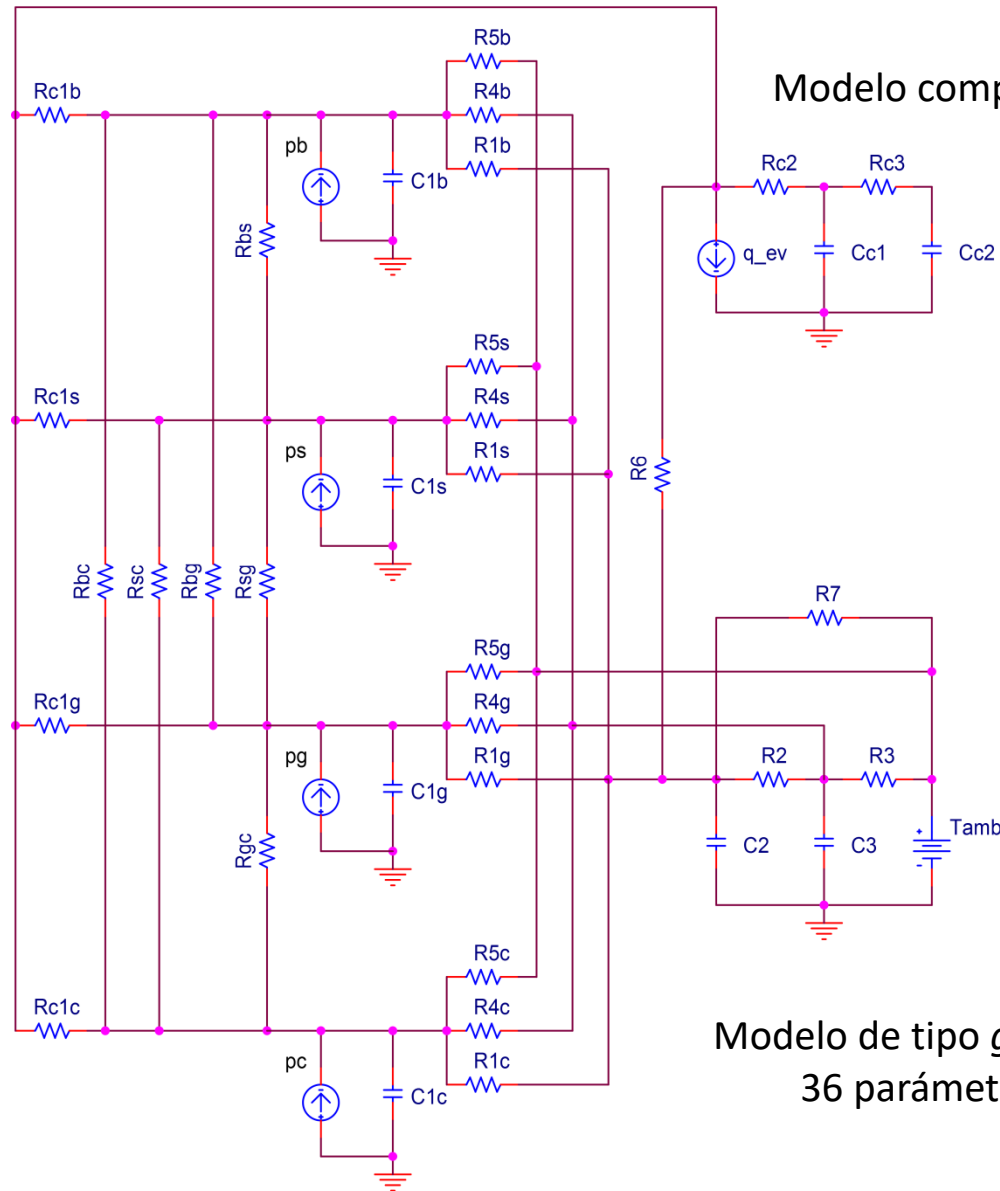


La carga se modela como un objeto de dos capas.

Conectada térmicamente a la cavidad interna.

El término q_{ev} modela la potencia usada para evaporar agua.





Modelo completo

Modelo de tipo *grey-box*
36 parámetros

Espacio de estados

Variables de estado:

$$\mathbf{x} = (T1b, T1s, T1g, T1c, T2, T3, Tc1, Tc2)^T$$

Entradas:

$$\mathbf{u} = (pb, ps, pg, pc)^T$$

Perturbaciones:

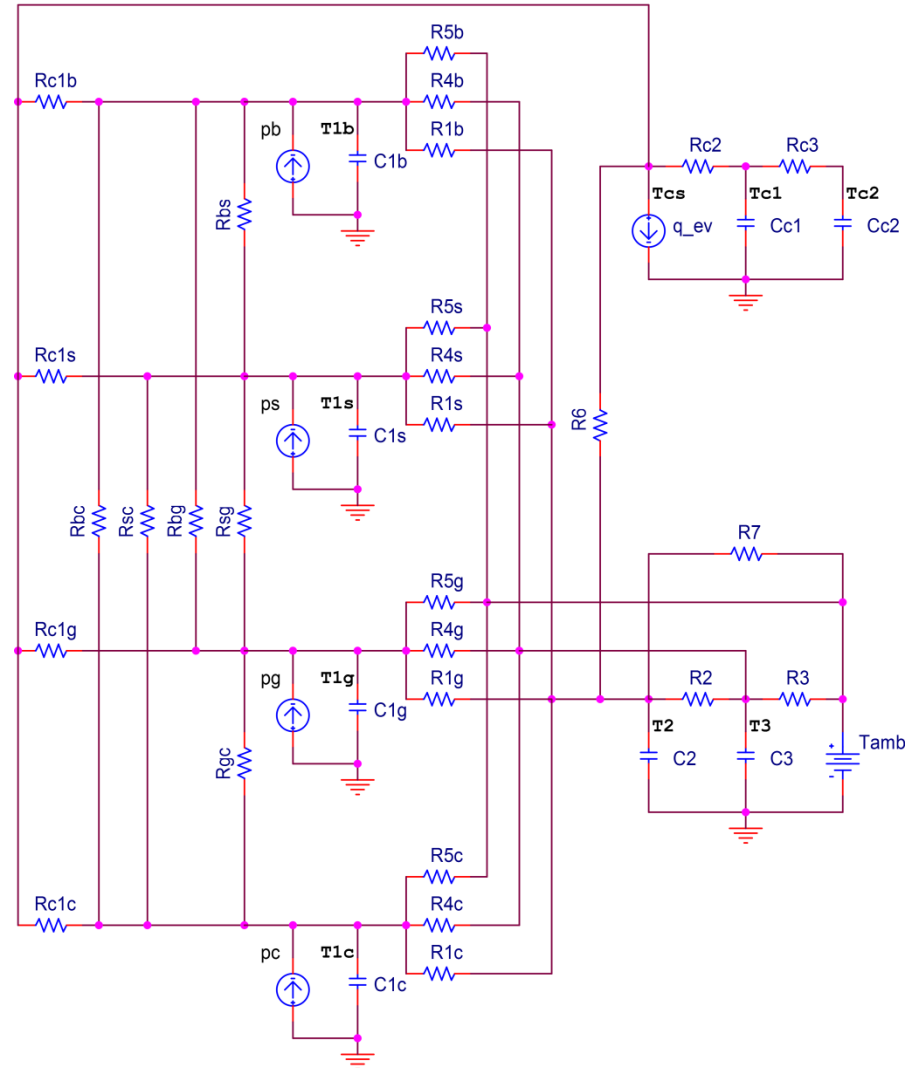
$$\mathbf{p} = (Tamb, q_{ev})^T$$

Salida:

$$y = T2$$

Representación en espacio de estados:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{B}_p\mathbf{p} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases}$$



$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & a_{47} & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & a_{57} & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} & 0 & 0 \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{75} & 0 & a_{77} & a_{78} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{87} & a_{88} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B_p = \begin{pmatrix} b_{p11} & b_{p12} \\ b_{p21} & b_{p22} \\ b_{p31} & b_{p32} \\ b_{p41} & b_{p42} \\ b_{p51} & b_{p52} \\ b_{p61} & 0 \\ 0 & b_{p72} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad C = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$$

Los coeficientes a_{ij} , b_{ij} y b_{pij} dependen de los parámetros del modelo

$$a_{11} = - \left(\frac{1}{R_{bs}} + \frac{1}{R_{bg}} + \frac{1}{R_{bc}} + \frac{1}{R_{1b}} + \frac{1}{R_{4b}} + \frac{1}{R_{5b}} + \frac{1}{R_{c1b}} \right) \frac{1}{C_{1b}} +$$

$$+ \frac{1}{\frac{1}{R_{c1b}} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_{c1b}} + \frac{1}{R_{c1s}} + \frac{1}{R_{c1g}} + \frac{1}{R_{c1c}} + \frac{1}{R_{c2}}} \frac{1}{R_{c1b} C_{1b}}$$



3. Identificación

Casos identificados

Dos estados de la turbina:

1. Encendida
2. Apagada

Dos casos de carga:

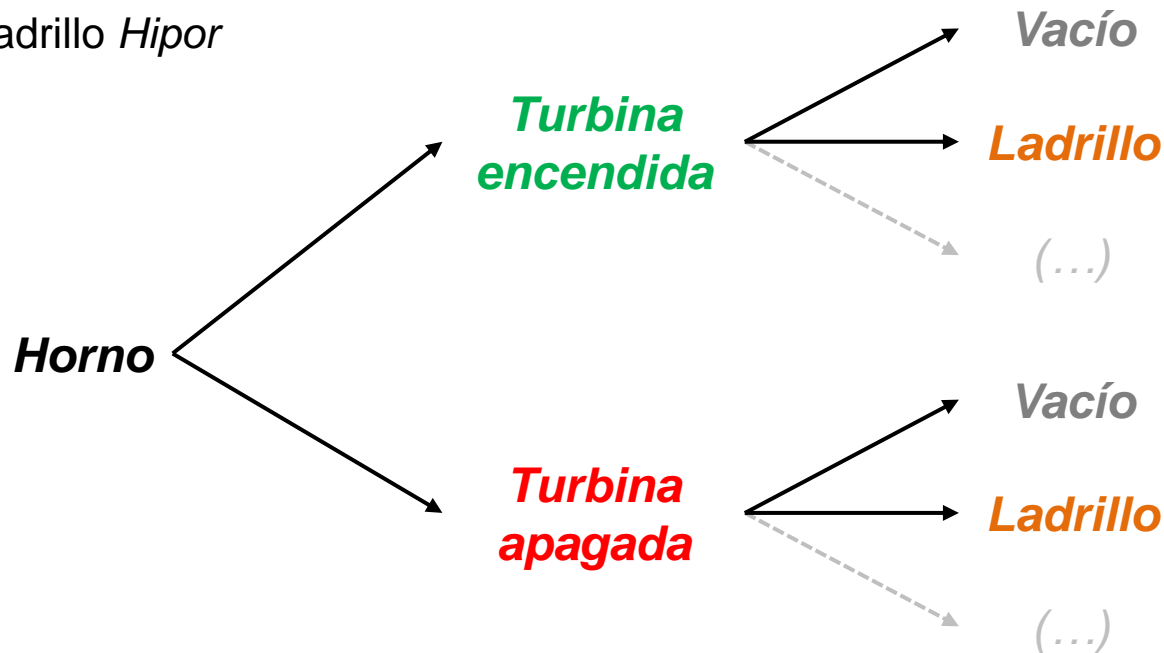
1. Horno vacío
2. Ladrillo *Hipor*



Ladrillo *Hipor*.

Se utiliza en el ensayo de etiquetado energético del horno.

Este ensayo se realiza frecuentemente en el laboratorio.



Datos experimentales

Necesarios para determinar el valor de los parámetros

Horno de ensayos del laboratorio:

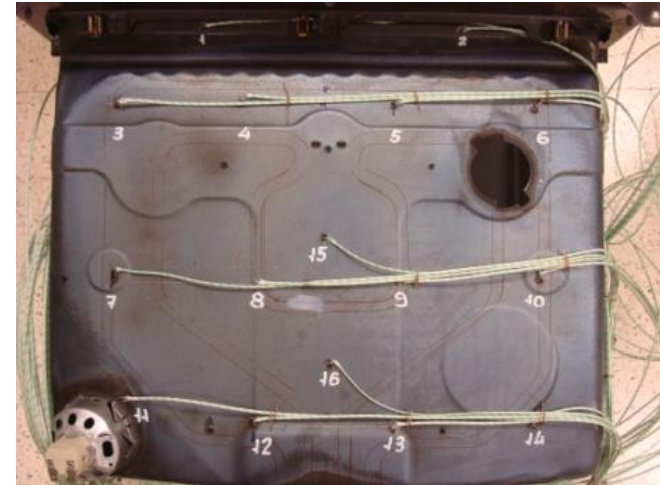
- Termopares
- Vatímetro

La perturbación q_{ev} no se puede medir

→ Correlación empírica (Anexo B)

Ensayos:

1. Turbina encendida, en vacío
2. Turbina encendida, ladrillo *Hipor*
3. Turbina apagada, en vacío
4. Turbina apagada, ladrillo *Hipor*



Datos experimentales



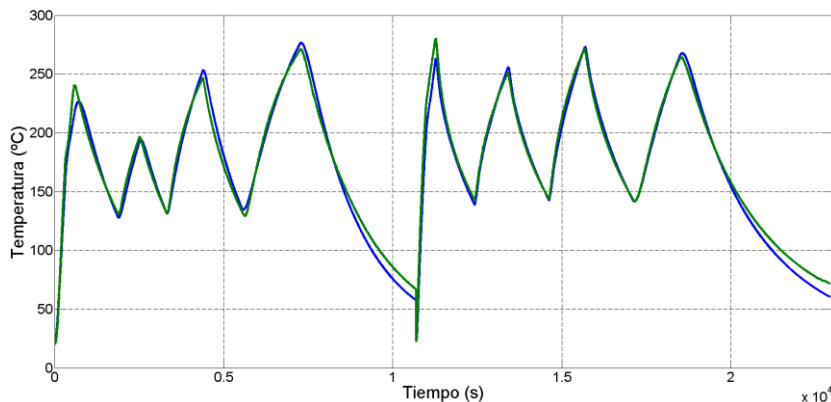
Método

1. La estructura del modelo no permite utilizar técnicas analíticas
2. Los parámetros de la carga y del horno pueden ser identificados por separado
3. Se han introducido algunas restricciones para dar coherencia al modelo

Resultados - Submodelo de la carga

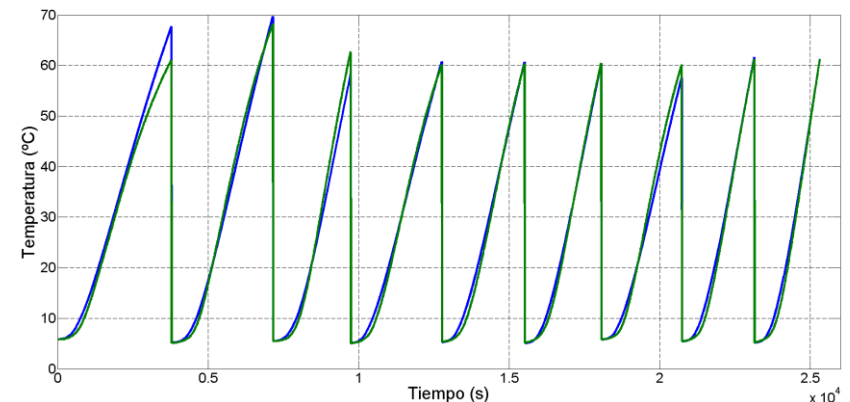
Horno en vacío:

Temperatura	Rango de valores (°C)	Escala (°C)	ECM (°C)	$\frac{ECM}{Escala}$
Tc2	20 - 281	260	7.06	2.7 %



Ladrillo *Hipor*:

Temperatura	Rango de valores (°C)	Escala (°C)	ECM (°C)	$\frac{ECM}{Escala}$
Tc2	5 - 68	63	1.77	2.8 %

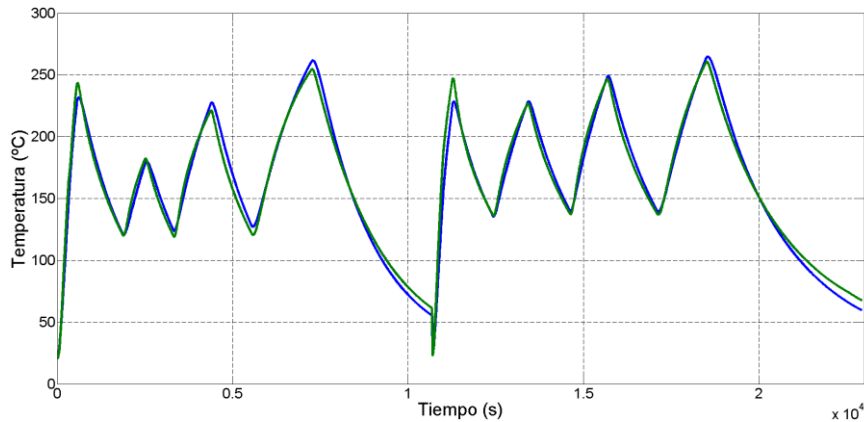


Verde: medida experimental Azul: ajuste

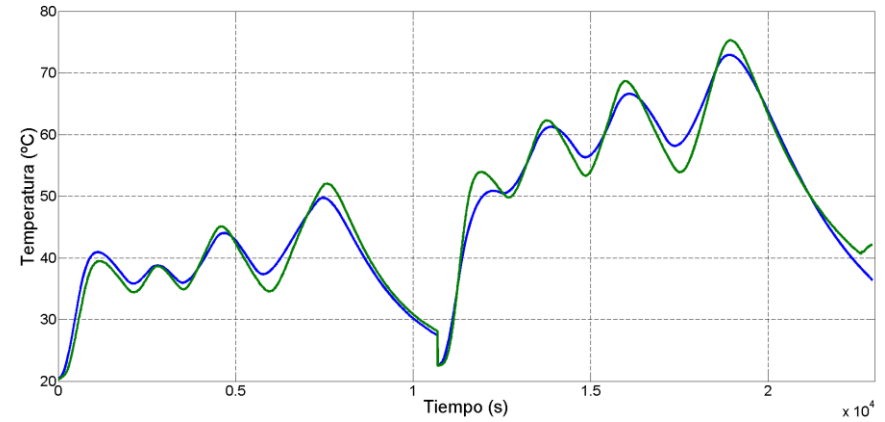
Resultados - Submodelo del horno

Temperatura	Rango de valores (°C)	Escala (°C)	ECM (°C)	$\frac{ECM}{Escala}$
T1b	20 - 699	679	19.4	2.9 %
T1s	20 - 627	607	27.6	4.6 %
T1g	21 - 694	673	22.5	3.4 %
T1c	20 - 922	902	26.2	2.9 %
T2	20 - 261	241	7.20	3.0 %
T3	20 - 75	55	1.90	3.5 %

Temperatura T2



Temperatura T3



Verde: medida experimental **Azul:** ajuste



4. Simulación y análisis

Herramienta de simulación en *Excel*

Diseñada para ser usada por el personal del laboratorio

Permite simular todas las funciones del horno, en vacío y con el ladrillo *Hipor*

Cálculo interno de las matrices de estado → Permite modificar los parámetros

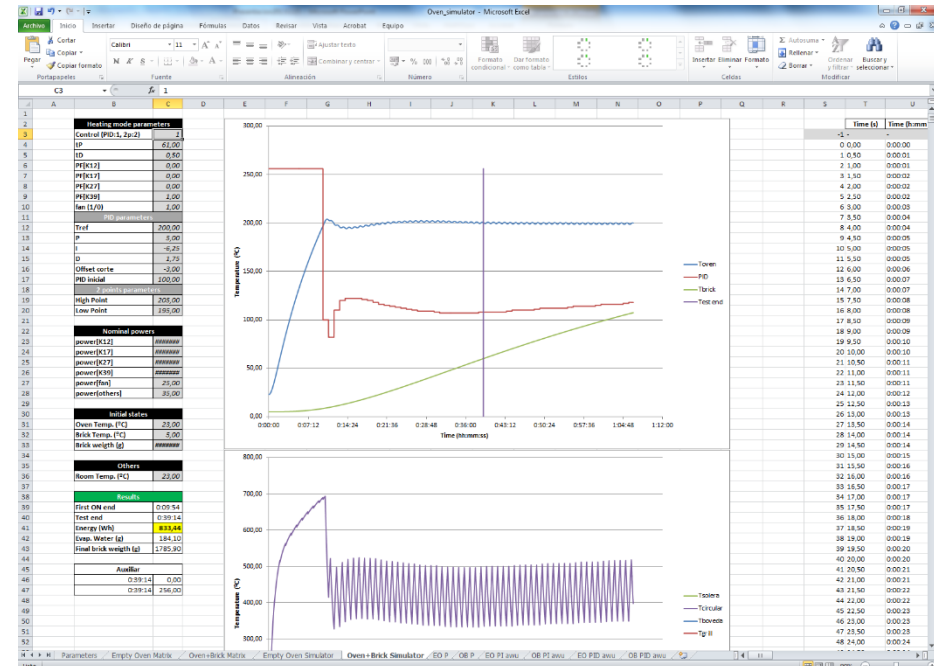
Resultados:

– Gráficos:

- Temperaturas
- Energías
- Flujos de calor

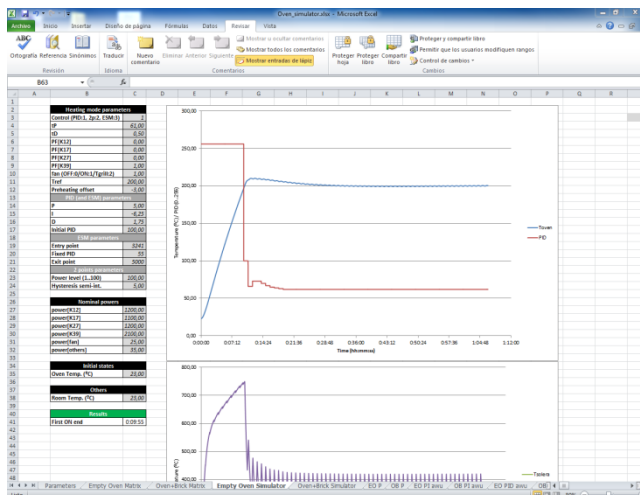
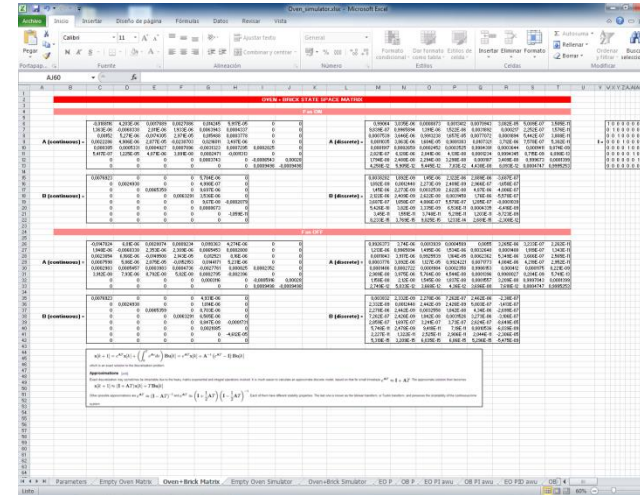
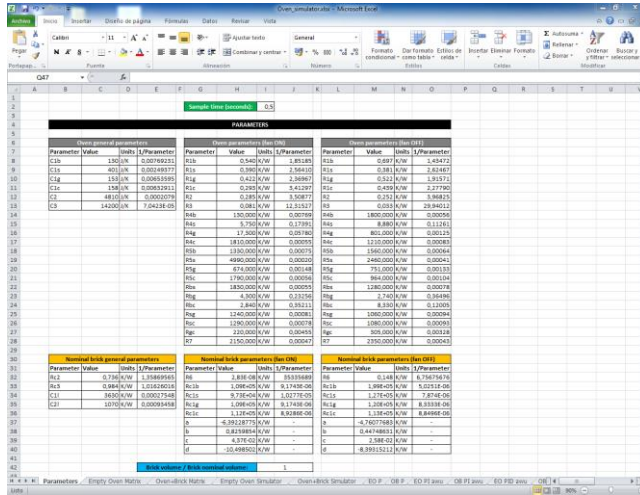
– Numéricos:

- Consumo E-label
- Evaporación de agua
- Duración del ensayo



4. Simulación y análisis

Herramienta de simulación en Excel



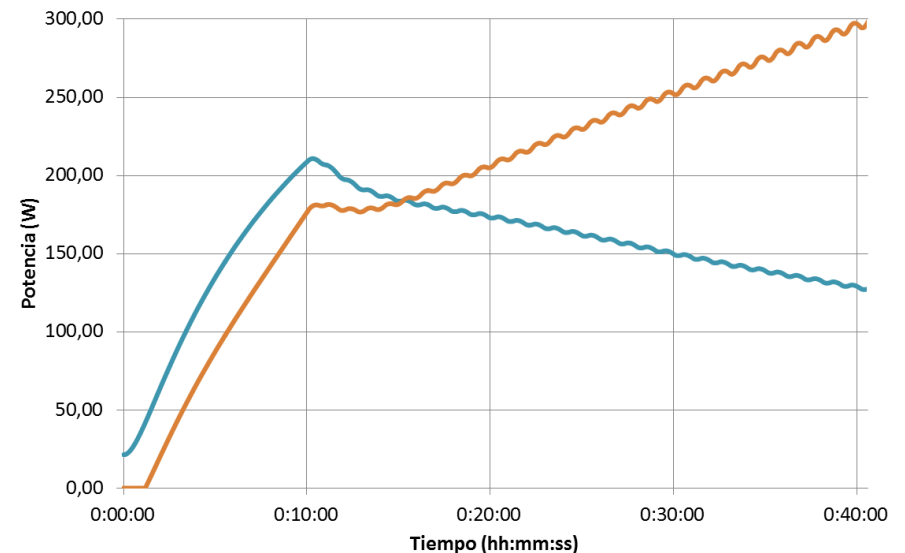
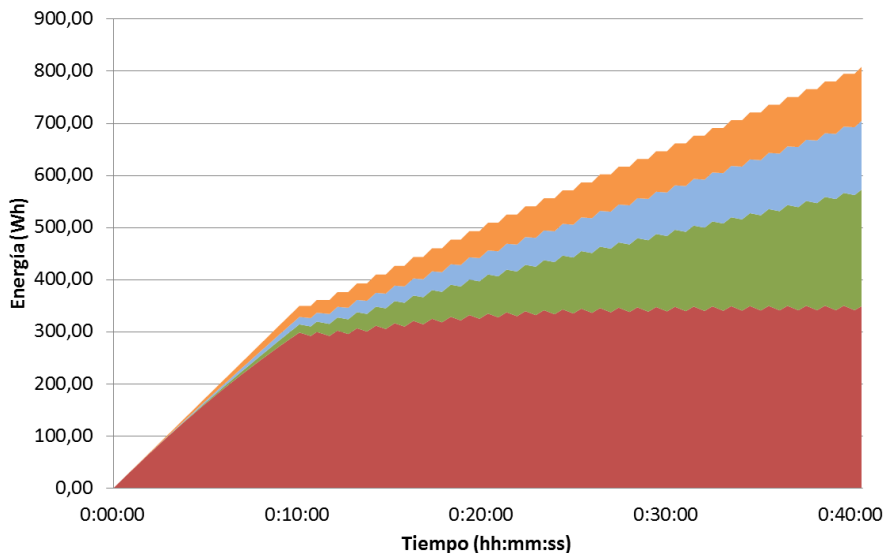
Heating mode parameters		
Control (PID-1, 2p-2, ESM-3)		
TP	62.00	
TD	0.50	
PF[K12]	0.00	
PF[K17]	0.00	
PF[K27]	0.00	
PF[K39]	1.00	
tan (OFF-0/ON-1)/Tgr[IB-2]	1.00	
Tref	200.00	
Preheating offset	-3.00	
PID (and ESM) parameters		
Kp	5.00	
I	-6.25	
D	1.75	
Initial PID	100.00	
ESM parameters		
Entry point	3241	
Fixed PID	55	
Exit point	5000	
Nominal powers		
power[K12]	1200.00	
power[K17]	1100.00	
power[K27]	1200.00	
power[K39]	2100.00	
power[tan]	25.00	
power[others]	35.00	
Initial states		
Oven Temp. (°C)	23.00	
Brick Temp. (°C)	5.00	
Brick weight (g)	2970.00	
Others		
Room Temp. (°C)	23.00	

Results	
First ON end	0:11:27
Test end	0:39:23
Energy (Wh)	568.75
Evap. Water (g)	189.75
Final brick weight (g)	1780.25

Análisis energético

El modelo permite analizar flujos de calor y energía almacenada

Principales energías y algunos flujos de calor durante un ensayo de etiquetado energético



Rojo: energía transmitida a los componentes del horno

Verde: energía usada en compensar pérdidas

Azul: energía usada para evaporar agua

Naranja: energía usada en calentar el ladrillo *Hipor*

Azul: potencia usada en calentar el ladrillo

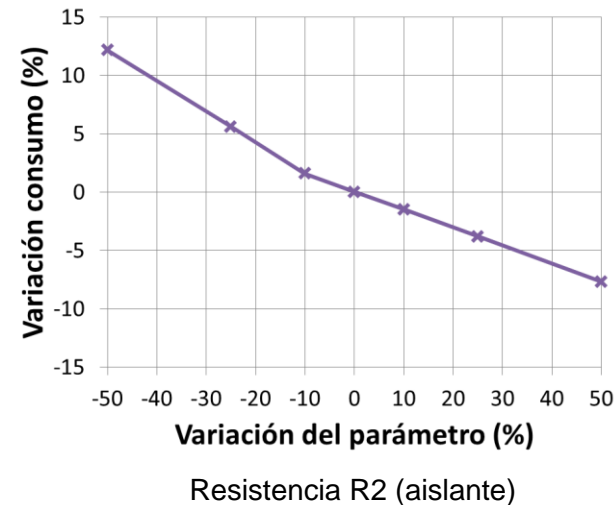
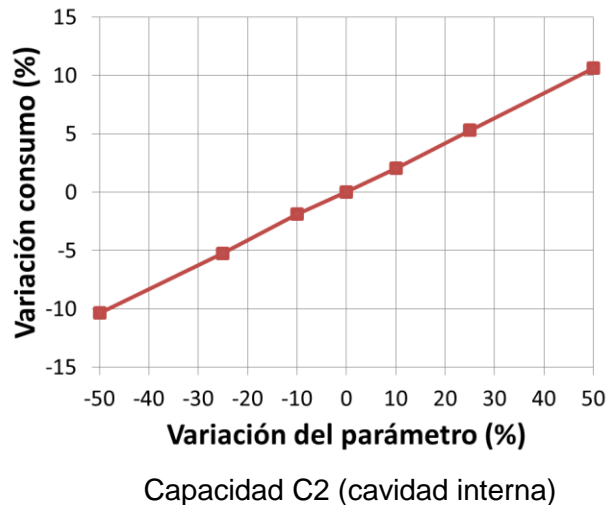
Naranja: potencia usada en evaporar agua

Análisis de sensibilidad

Los parámetros del modelo tienen sentido físico

Análisis de sensibilidad:

- Comportamiento cualitativo
- Parámetros más influyentes



Mejoras de diseño:

- Materiales con menor capacidad térmica ($m \cdot c_p$)
- Materiales con mayor resistencia térmica (l/kA)



5. Control

Control actual

Distintos tipos de control de temperatura:

1. Control todo o nada con histéresis
2. Control PID
3. Función de bajo consumo (bucle abierto)

Todos ellos incluyen una primera fase de precalentamiento

Puntos negativos:

- Gran número de parámetros
- Parámetros fijados de forma experimental (el controlador no está basado en ningún modelo)

Puntos positivos:

- Uso de señales PWM
- Uso de *Power Factors* para elegir la distribución de potencia (aplicación)

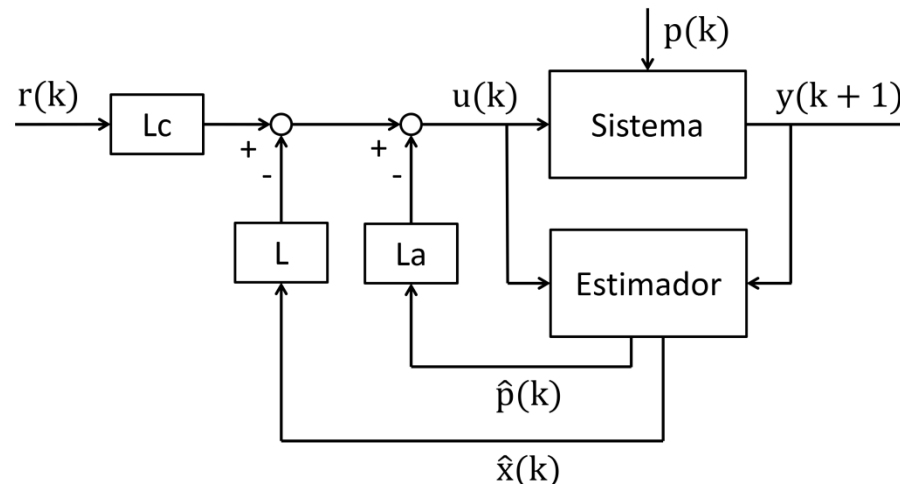
Control en espacio de estados

Se conoce la representación del modelo en espacio de estados

La realimentación de estado permite un comportamiento más preciso

Controlador:

- Realimentación de estado (estimación)
- Prealimentación de consigna
- Prealimentación de perturbaciones (estimación)



No se ha diseñado un único controlador, sino un programa que permite calcular uno para cualquier valor de *Power Factors*, tiempo de respuesta y sobreoscilación.

Control en espacio de estados

En el horno real solo se mide la temperatura de la cavidad interna (T_2)

Necesario un observador de estado

Problemas:

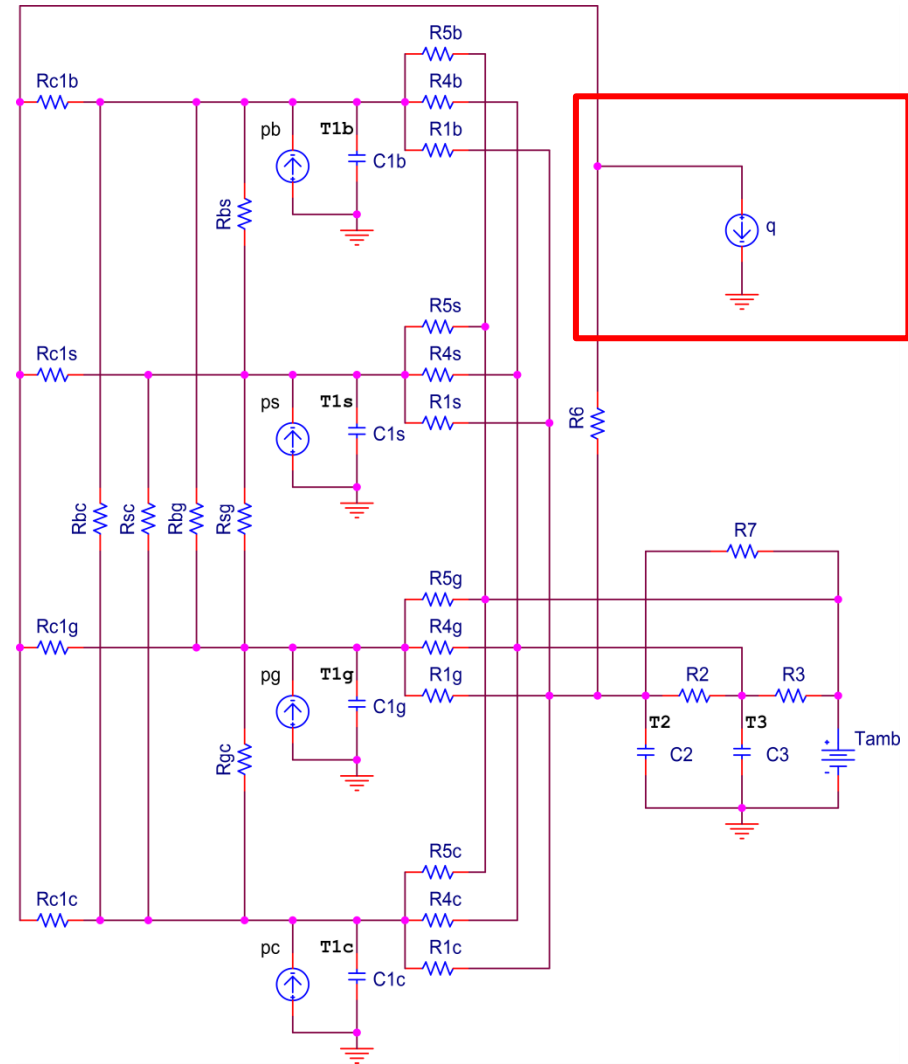
1) El modelo completo no es observable

→ Modelo simplificado

2) Solo se puede estimar una perturbación

→ Se supone $T_{amb} = cte = 23^{\circ}C$

→ Diseño del observador utilizando el esquema de estimación



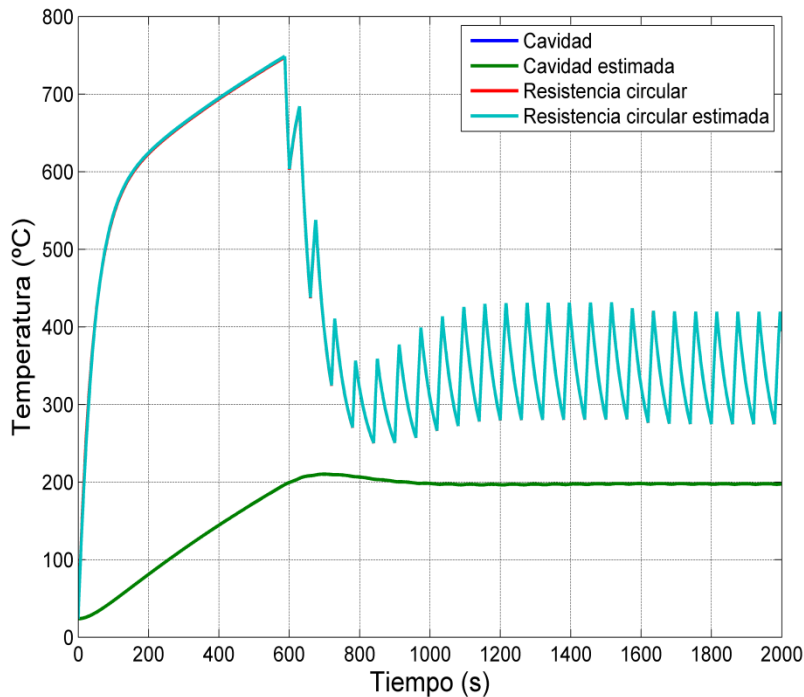
Control en espacio de estados

Ejemplo: elemento calefactor circular y turbina encendida (horno vacío)

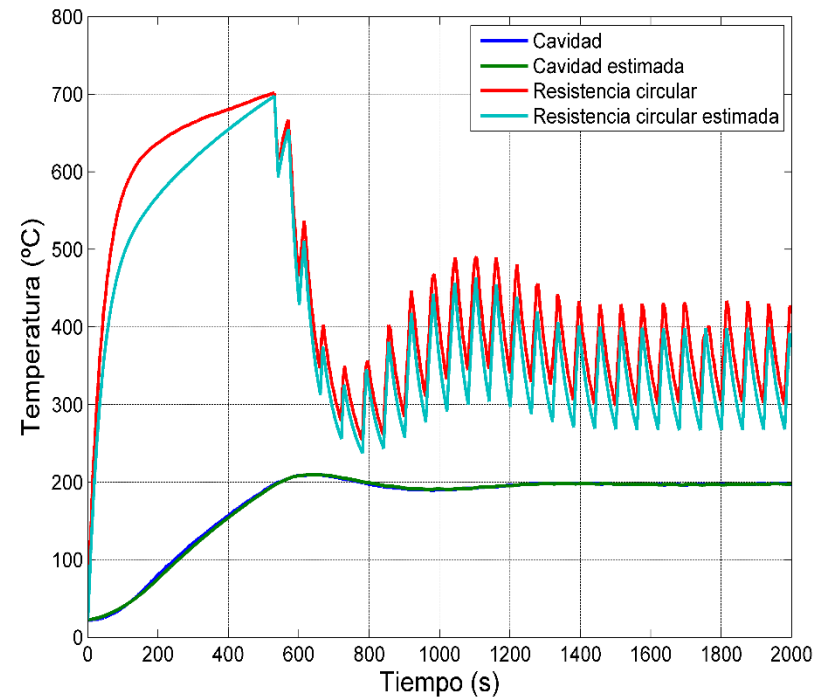
Objetivos: $t_r = 400$ segundos, $SO = 5\%$

Referencia: 200°C

Simulación



Realidad



Control en espacio de estados

Ventajas:

1. El controlador está basado en el modelo:
 - Cálculo analítico (*MATLAB*), no experimental
2. El comportamiento conseguido es exactamente el deseado (salvo saturación de la acción)
3. Estimación de temperaturas:
 - Seguridad (temperaturas máximas)
 - Nuevos procesos de cocinado
4. Estimación del calor absorbido por la carga:
 - Detección de carga



6. Conclusiones y líneas futuras

Conclusiones

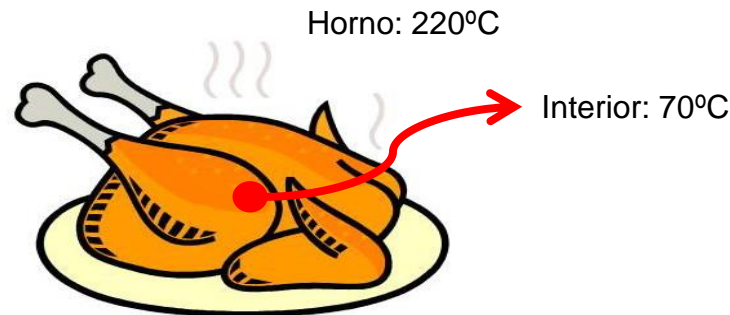
1. Se ha desarrollado un modelo térmico simplificado del horno que se ha ajustado correctamente a los cuatro casos estudiados.
2. Se ha construido una herramienta sencilla de simulación en *Excel*.
3. El modelo y la herramienta han permitido realizar diversos análisis de carácter energético.
4. El modelo ha permitido diseñar nuevas estrategias de control de temperatura.

“Thermal modeling, analysis and control using electrical analogy”, artículo enviado a la *Mediterranean Conference on Control and Automation*



Líneas futuras

1. Detección de la carga:
 - Uso de la estimación del calor absorbido por la carga
 - Técnica del observador multimodelo
 - Estimación de la temperatura interna del alimento
 - Nuevos procesos de cocinado



2. Estudio de la relación específica entre los parámetros del modelo y los componentes del horno.
Los componentes no son capacidades o resistencias térmicas puras.
3. Diseño de nuevas funciones.
La simulación permite resultados prácticamente instantáneos.



Gracias por su atención



This work is licensed under the Creative Commons
Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0
International License. To view a copy of this license, visit
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> or
send a letter to Creative Commons, PO Box 1866,
Mountain View, CA 94042, USA.

