

Modelado y Control de Temperatura de Recipientes en Cocinas de Inducción Mediante Sensor de Infrarrojos

C. Franco^{1,2}, D. Paesa^{1,2}, C. Sagües¹, S. Llorente²

¹Dept. Informática e Ingeniería de Sistemas Universidad de Zaragoza María de Luna 3 50015 Zaragoza, SPAIN e-mail: csagues@unizar.es

²BSH Balay, Bosch-Siemens Home Appliances Group, Avda. De la Industria 49, 50089 Zaragoza, SPAIN e-mail: Carlos.Franco-Ext@BSHG.com, David.Paesa-Ext@BSHG.com, Sergio.Llorente@bshg.com

Abstract — En este artículo se presenta el diseño de un controlador robusto para una planta de parámetros desconocidos con un modelo que puede contener un retraso en la medida. Se comparan varios controladores: un PI fijo sin retraso puro, un PI fijo con retraso puro y un controlador adaptativo basado en estrategia multimodelo. La novedad reside en la consideración del retraso puro dentro del control multimodelo. Dicho diseño se ha aplicado al control de temperatura de recipientes en cocinas de inducción mediante sensor de infrarrojos.

I. INTRODUCCIÓN.

En una cocina de inducción doméstica, el usuario controla la temperatura del recipiente variando el nivel de potencia. Sin embargo, el usuario no conoce la temperatura del mismo y tiene que controlar el estado del alimento de forma continua para evitar que se queme, se quede crudo o desborde por encima de las paredes del recipiente. Por ello, es conveniente un control de temperatura para que los alimentos mantengan una temperatura adecuada durante su preparación y se eviten situaciones inseguras.

Con estas premisas se han propuesto diferentes alternativas. Inicialmente, para placas de masa [1],[2] se desarrolló el sistema mostrado en la Fig. 1. La temperatura de la base se medía mediante un termostato hidráulico que controlaba el suministro de potencia. Si la temperatura subía del valor deseado se cortaba la potencia. Este sistema sólo permitía un valor de potencia y el calor de la resistencia perturbaba la medida del sensor por lo que el sistema no era efectivo [3],[4].

Otro procedimiento utilizaba un sensor que tenía que estar en el interior del recipiente para un control adecuado [5]. Este sensor enviaba la medida a través de un cable, por lo que resultaba molesto. También se implementó una solución sobre encimeras radiantes en la que se utilizaba un sensor de infrarrojos [6]. Éste medía la temperatura de la pared del recipiente, pero se propuso un modelo muy complejo cuyos parámetros eran desconocidos, por lo que se realizaba un control fuzzy.

En este artículo se proponen varios algoritmos de identificación y control en línea para un modelo en espacio de estados del sistema encimera de inducción-recipiente con la medida del sensor de infrarrojos

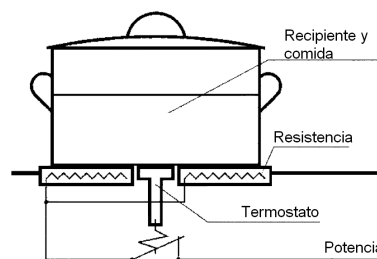


Fig. 1. Esquema control de temperatura en cocina de masa mediante termostato hidráulico en la base del recipiente que controla la entrada de potencia.

Con el sensor de infrarrojos midiendo en la cara lateral del recipiente se tiene una medida de temperatura muy próxima a la temperatura a la que está el alimento (Fig. 2). Esta medida se consigue gracias al fenómeno físico de emisión de radiación electromagnética por cualquier cuerpo que está por encima de 0 K. En el rango de temperaturas de trabajo, entre 0 °C y 300 °C, esta radiación electromagnética se encuentra en el espectro de infrarrojos. Para realizar la medición, se utiliza un espejo cóncavo que focaliza la radiación en el sensor de infrarrojos. El sensor contiene una membrana aislada térmicamente compuesta por SiO-SiN. Ésta, es calentada por la radiación y el calor es medido por unos termopares hechos mediante aluminio y silicona policristalina. Con la medida de los termopares se estima la temperatura a la que está el recipiente.

La dificultad del control de temperatura del recipiente consiste en la gran variabilidad de parámetros y en la existencia de un retraso puro, que de no ser identificado adecuadamente, provoca en el controlador un efecto oscilante indeseado.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección II se realiza un modelo del sistema mediante un circuito térmico y se obtienen las funciones de transferencia del mismo. Posteriormente, en la sección III, se proponen y comparan varios algoritmos de control: un PI fijo sin estimación ni corrección del retraso puro; el mismo controlador PI pero con identificación del retraso puro y por último se prueba un algoritmo de control adaptativo basado en estrategia multimodelo con estimación de parámetros y retraso puro. En la sección IV se muestra un ensayo real sobre

una encimera de inducción y para finalizar en la sección V se presentan las conclusiones obtenidas.

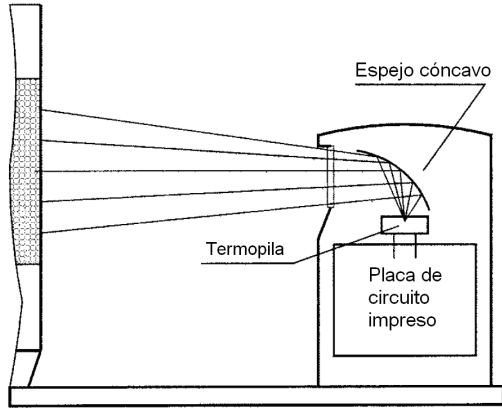


Fig. 2. Sistema de medida de la temperatura del recipiente mediante sensor de infrarrojos basado en tecnología de termopila.

II. MODELADO DEL SISTEMA.

Para realizar el modelo del sistema se efectúa un estudio térmico del mismo en el que se analizan las temperaturas, los flujos de calor dentro del sistema y las pérdidas. En la Fig. 3 se muestra un esquema.

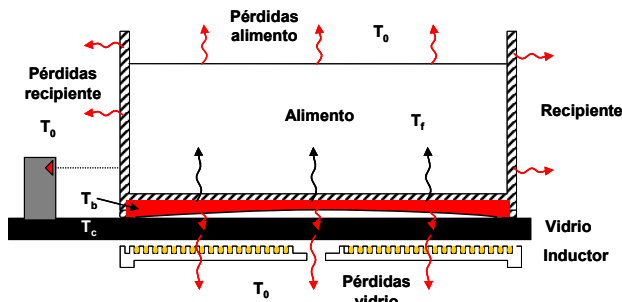


Fig. 3. Esquema térmico representando los flujos de calor y las temperaturas más importantes. Las líneas rojas representan las pérdidas. Las líneas negras representan la transferencia de calor de la base al alimento. Existen pérdidas de calor del recipiente al ambiente, al cristal y pérdidas del cristal al ambiente.

En el esquema térmico se considera despreciable la diferencia de temperatura entre la pared del recipiente y el alimento. También se considera que no existe transferencia de calor en dirección longitudinal del cristal y que la transferencia de calor de la base del recipiente a las paredes del mismo es despreciable.

Este sistema puede ser visto como un circuito eléctrico en el que las temperaturas serían representadas por la tensión en los nodos, los flujos de calor por intensidades, los condensadores representan capacidades térmicas y las resistencias representan la oposición al flujo de calor entre los diferentes elementos. En la Fig. 4 se muestra el equivalente

eléctrico del modelo térmico del sistema y en la Tabla I la lista de símbolos empleados.

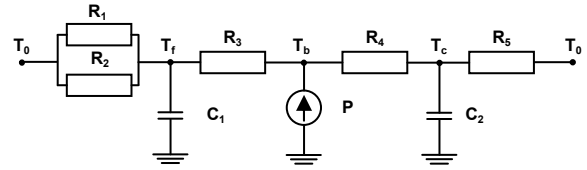


Fig. 4. Esquema del equivalente eléctrico del modelo térmico del sistema.

TABLA I
LISTA DE SÍMBOLOS DEL EQUIVALENTE
ELÉCTRICO DE LA FIG. 4

T_0	Temperatura ambiente
T_f	Temperatura del alimento
T_b	Temperatura de la base del puchero
T_c	Temperatura del cristal
R_1	Resistencia de convección entre el alimento y el ambiente
R_2	Resistencia de convección entre las paredes del recipiente y el ambiente
R_3	Resistencia de convección entre el alimento y la base del recipiente
R_4	Resistencia de contacto entre la base del recipiente y el cristal
R_5	Resistencia de convección entre el cristal y el ambiente
C_1	Capacidad del recipiente
C_2	Capacidad del cristal
P	Potencia

A partir del equivalente eléctrico y aplicando la transformada de Laplace podemos deducir las siguientes funciones de transferencia:

$$T_f = \frac{K_f}{(1 + \tau s)} \cdot P \quad (1)$$

$$T_{IR} = K_{IR} \cdot T_f \cdot e^{-T \cdot s} \quad (2)$$

En las funciones de transferencia anteriores T_{IR} representa la temperatura medida por el sensor de infrarrojos; K_{IR} representaría la constante de medida del sensor cuyo valor es próximo a 1 y el término $e^{-T \cdot s}$ representa un retraso puro de medida del sensor.

Las funciones de transferencia (1),(2) se pueden escribir en forma de espacio de estados como:

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \quad (3)$$

$$y = C \cdot x \quad (4)$$

Variaciones en el tipo de recipiente, cantidad y clase de líquido que contiene hacen que los parámetros del sistema cambien notablemente como se puede ver en la Tabla II. Esta incertidumbre provoca que a pesar de tratarse de un sistema de primer orden, el control del mismo no sea trivial.

Una mala identificación de los parámetros o del retraso puro impide predecir el estado adecuadamente y causa un comportamiento no deseado del sistema. Por esto, es necesario estimar tanto los parámetros como el retraso puro simultáneamente y de forma recursiva.

TABLA II
VARIACION DE LOS PARÁMETROS DE LOS
RECIPIENTES

Valor	K_f	τ [s]	Retraso puro [s]
Máximo	1,725	8000	60
Mínimo	0,425	1000	0

III. EVALUACIÓN DE CONTROLADORES

A continuación se van a presentar varios algoritmos de control y se van a evaluar sus prestaciones en el control del modelo del sistema antes planteado.

A. Controlador PI fijo sin compensación del retraso puro

En primer lugar se va a evaluar un controlador PI con parámetros intermedios fijos respecto del rango de parámetros de la Tabla II y sin compensación del retraso puro.

Al recibir la medida del sensor varios segundos más tarde del instante en el cual se aplica la potencia el controlador muestra un comportamiento oscilante (Fig 5).

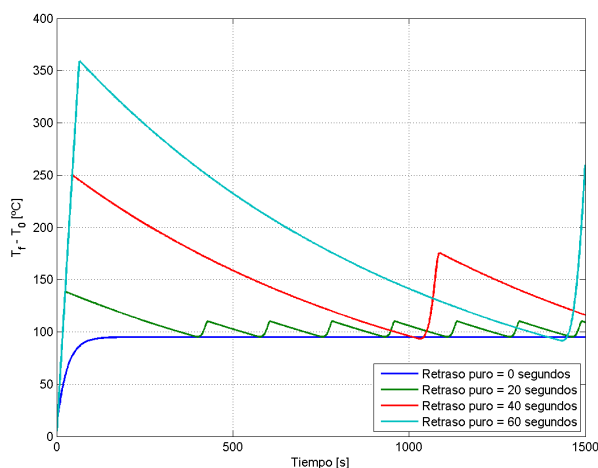


Fig. 5. Controlador PI fijo sin compensación del retraso puro. Se muestra la evolución de la temperatura de un recipiente ($\tau=1000$; $K_f=1.75$) para varios retrasos puros en la medida.

B. Controlador PI fijo con compensación del retraso puro

En segundo lugar se evalúa el controlador PI del apartado anterior, pero se le añade un compensador del retraso puro de la planta. Con el modelo del sistema, de valores medios, el vector de potencias aplicado en los últimos instantes de tiempo y el retraso puro se realiza una estimación del valor de la variable a controlar en el instante actual.

En este caso se tiene un modelo impreciso de la planta y, a pesar de conocer el retraso puro, no se realiza una predicción adecuada del estado actual con las medidas anteriores por lo que no se elimina por completo el comportamiento oscilante (Fig. 6).

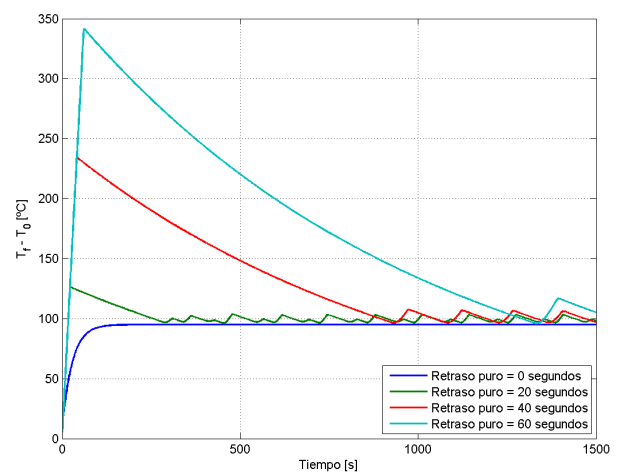


Fig. 6. Controlador PI fijo con compensación del retraso puro. Se muestra la evolución de la temperatura de un recipiente ($\tau=1000$; $K_f=1.75$) para varios retrasos puros en la medida.

C. Controlador adaptativo basado en estrategia multimodelo

Por último se va a evaluar un algoritmo de control adaptativo robusto basado en identificación mediante multimodelo [7]-[9]. Una estrategia multimodelo consiste en incorporar una batería de observadores con valores a lo largo de todo el rango de recipientes y retrasos posibles, de los cuales se elige aquel que tenga mejor comportamiento. A nivel práctico esto supone tener un observador cuyos parámetros cambian en función de las entradas y salidas del sistema para minimizar el error de estimación. El esquema de funcionamiento se muestra en la Fig. 7 donde los M_i representan los “N” modelos simulados y C_i sus respectivos controladores.

Durante la estrategia de observador basada en multimodelo, se tienen “N” modelos del sistema real en paralelo que calculan en cada instante su correspondiente temperatura del recipiente en función de la potencia y de las temperaturas anteriores. El número de modelos tiene que ser elegido dependiendo de la variación de los parámetros del sistema y de la precisión que se desee en el control. Para nuestro caso

se ha elegido una discretización de 70 modelos en τ y 20 en K_f debido a la amplitud del rango de parámetros y la precisión requerida para el control.

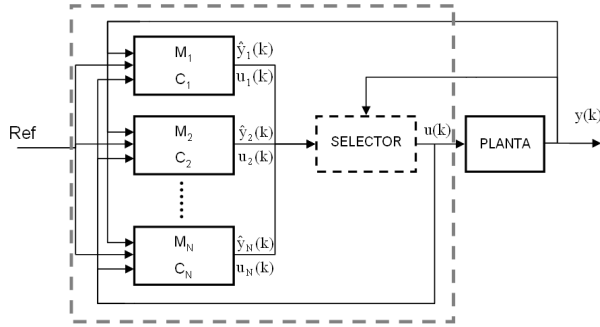


Fig.7. Esquema general de funcionamiento del algoritmo de control adaptativo usando múltiples modelos.

Después, para cada uno de los modelos se compara el valor estimado de la temperatura del recipiente de cada modelo con la medida real del sensor de infrarrojos en ese instante, y se selecciona el modelo que proporciona mínimo error integrado en la estimación de temperatura del sensor. Hay que tener en cuenta también, que para cada uno de los modelos, existe un número de observadores asociado que depende de la cantidad de retraso puro que se estime que puede existir. Por lo tanto, el número de modelos de planta tendría que ser multiplicado por el valor del retraso puro máximo que se estime que puede existir para calcular el número de modelos “N” final. El índice a minimizar sería:

$$J_i(t) = \alpha \cdot e_i^2(t) + \beta \cdot \int_0^t e^{-\lambda \cdot (t-\tau)} \cdot e_i^2(\tau) \cdot d\tau \quad (5)$$

$$\alpha \geq 0; \beta, \lambda > 0$$

Siendo α, β el peso del error instantáneo e integrado respectivamente, e_i el error de estimación de cada uno de los modelos y λ el factor de olvido.

El modelo escogido es empleado para predecir la temperatura del recipiente de ese instante \hat{T}_f y también para calcular el error de control $e_c = T_{\text{Referencia}} - T_f$. Finalmente el controlador calcula la acción necesaria a partir de dicho error (Fig. 8).

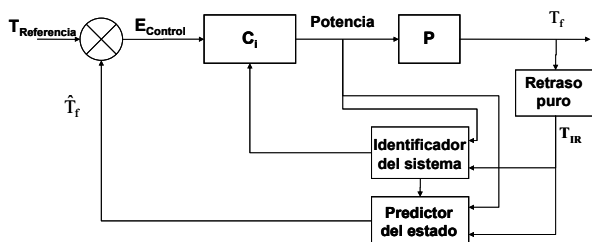


Fig. 8: Diagrama de bloques del sistema de control propuesto.

Para el caso de la aplicación, la medida del sensor coincide con la medida real excepto por el retraso puro, por lo que sería necesario tener un predictor para conocer la temperatura actual:

Discretizando (3) se tiene:

$$x(z) = F \cdot x(z-1) + G \cdot u(z) \quad (5)$$

Para un modelo identificado tendríamos un par (F_i, G_i) de matrices y un valor “r” de retraso puro identificado, por lo que el algoritmo del predictor quedaría:

Desde $m=r-1$ hasta $m=0$

$$\hat{T}_f(z-m) = F_i \cdot \hat{T}_f(z-(m-1)) + G_i \cdot P(z-m) \quad (6)$$

Cada uno de los controladores C_i asociado a cada modelo M_i corresponde con un controlador PI con antiwindup cuyas ganancias están ajustadas para cada modelo para tener el mínimo tiempo de respuesta.

Con este algoritmo se consigue controlar todos los recipientes dentro del rango de variación antes mostrado para cualquier valor de retraso puro. En la Fig. 9 se presenta la evolución de la temperatura del alimento respecto al ambiente ($T_f - T_0$) para una planta ($\tau=1000$; $K_f=1.7$) y en la Fig. 10 se presenta la misma variable de temperatura pero para una planta que se encuentra en el extremo opuesto a la anterior ($\tau=8000$, $K_f=0.4$). A pesar de las diferentes dinámicas de los dos sistemas el control se muestra robusto y lleva el alimento a la temperatura objetivo rápidamente y sin sobreoscilación. El hecho de identificar el sistema y el retraso puro permite predecir el estado actual de forma precisa y realizar el control deseado. El algoritmo también es robusto a perturbaciones como se puede comprobar en la Fig. 11. En ella se ha introducido una perturbación en $t=1000$ segundos que se podría asemejar a la situación real de añadir más carga a una temperatura menor al recipiente. Los sistemas con más retraso puro tardan más en detectar la perturbación, pero el controlador consigue en todos los casos absorberla rápidamente.

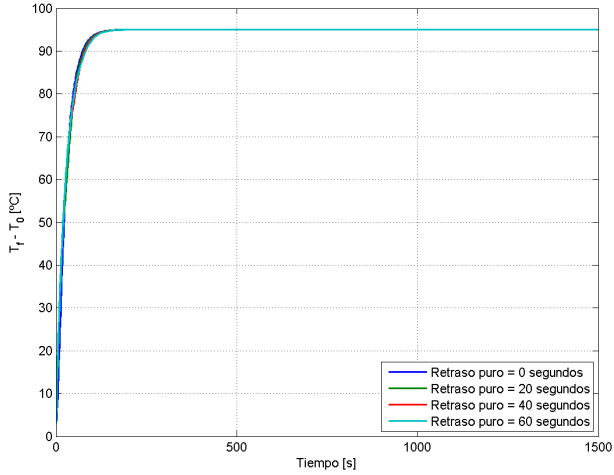


Fig. 9. Control adaptativo de la temperatura de un recipiente ($\tau=1000$; $K_f=1.7$) para varios retrasos puros.

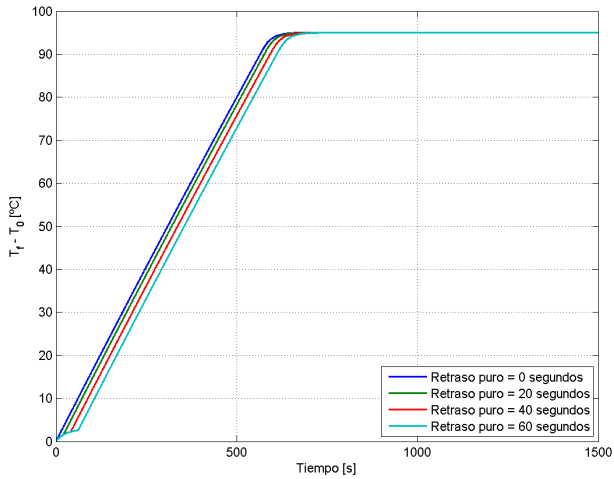


Fig. 10. Control adaptativo de la temperatura de un recipiente ($\tau=8000$; $K_f=0.4$) para varios retrasos puros.

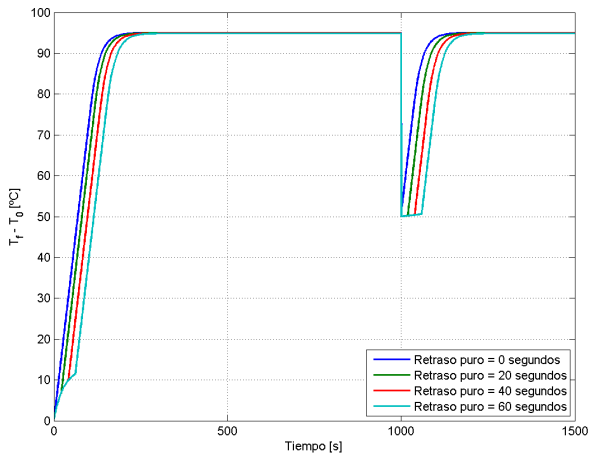


Fig. 11. Control adaptativo de la temperatura de recipiente ($\tau=4500$; $K_f=1$) para varios retrasos puros con perturbación en $t=1000$ s.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Fig. 12 se puede observar una imagen del sistema real donde se ve la encimera de inducción, el recipiente y la torreta que contiene el sensor de infrarrojos y mide la temperatura de la pared lateral del recipiente.

En la Fig. 13 se muestra un ensayo experimental en el que se ha usado el algoritmo de control adaptativo basado en estrategia multimodelo propuesto en el artículo. Se comprueba que se alcanza la temperatura objetivo con un rizado en el permanente de solo 2 °C y sin sobreoscilación. Se concluye que el algoritmo es capaz de controlar la temperatura en sistemas reales.

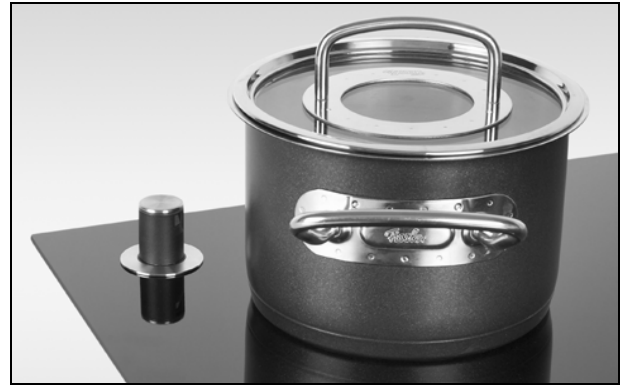


Fig. 12. Imagen del sistema real encimera-recipiente con la torreta donde se aloja el sensor de infrarrojos.

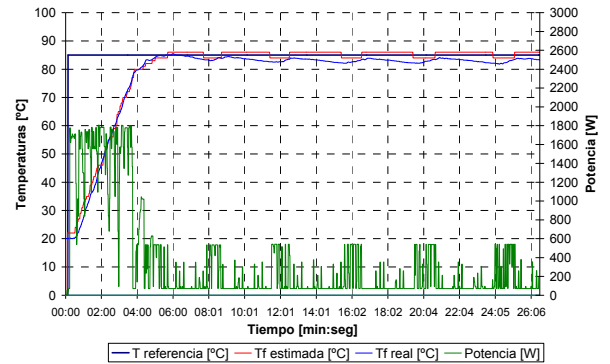


Fig. 13. Ensayo con sistema real del algoritmo de control adaptativo propuesto.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha comparado el funcionamiento de varios algoritmos de control sobre un sistema desconocido con gran incertidumbre en sus parámetros y con la posible existencia de retraso puro. Debido a la variabilidad de los parámetros de la planta y a pesar de ser un sistema de primer orden los algoritmos clásicos de control no son efectivos y es necesario contar con algoritmos de identificación y control en línea que permitan estimar el estado adecuadamente. Con este

propósito se ha implementado un algoritmo de control adaptativo robusto basado en multimodelo. Éste es capaz de identificar tanto los parámetros del sistema como el retraso puro, y predecir con suficiente exactitud el valor la temperatura como para realizar un control sin oscilaciones. Además, se han comprobado las prestaciones del algoritmo en ensayos reales obteniendo resultados satisfactorios.

REFERENCIAS

- [1] W. Renz, "Moderne Elektro-Kochstellen und ihre Steuer- und Regelemente—Part 1," *Elektrotechnik*, vol. 5, pp. 51–55, 1989.
- [2] "Moderne Elektro-Kochstellen und ihre Steuer- und Regelemente—Part 2," *Elektrotechnik*, vol. 6, pp. 63–67, 1989.
- [3] W. Dierker and H. Frohne, "Temperaturregelung bei einer Elektroheizplatte durch Zweipunktregelung," Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und elektrische Meßtechnik, Univ. Hannover, Hannover, Germany, Rep., Sept. 1981.
- [4] "Untersuchung des Temperaturverhaltens eines Systems bestehend aus einer Elektroheizplatte und einem Kochtopf mit Kochgut," Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und elektrische Meßtechnik, Univ. Hannover, Hannover, Germany, Rep., Dec. 1981.
- [5] S. Koide and S. Hiejima, "Temperature controlled induction heating and cooking apparatus" U.S Patent 4 617 441, Oct. 14, 1986.
- [6] U. Has, J. Schieferdecker, and D. Wassilew, "Temperature control for foods in pans on cooking hobs", in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 46, no. 5, pp 1030-1034, Oct 1999.
- [7] M. Athans et al., "The stochastic control of the F-8C aircraft using the multiple model adaptive control (MMAC) method – part I: Equilibrium flight," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 22, no. 5, pp. 768–780, Oct. 1977.
- [8] K. S. Narendra and J. Balakrishnan, "Adaptive control using multiple models," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 42, no. 2, pp. 171–187, Feb. 1997.
- [9] Sajjad Fekri, Michael Athans, Antonio Pascoal, "RMMAC: A Novel Robust Adaptative Control Scheme" 43rd IEEE Conference on Decision and Control, pp 1134-1145. 2004.

saei'09

Resúmenes de las actas del **XVI Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación**

Editado por:

Andrés Barrado Bautista
Antonio Lázaro Blanco
Clara Marina Sanz García
Pablo Zumel Vaquero
Cristina Fernández Herrero
Emilio Olías Ruíz
Vicente Salas Merino
Isabel Quesada Redondo
M^a Carmen Raga Arroyo

Leganés, 1, 2 y 3 de Julio de 2009

ISBN 978-84-692-2596-7