

Modelado térmico de alta precisión y baja carga computacional orientado al control de temperatura de encimeras de inducción

Erik Cásedas Laloya, Édgar Ramírez Laboreo

Grupo de Robótica, Visión por Computador e Inteligencia Artificial (RoPeRT)
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)
Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.
Tel. +34-976762707, e-mail: 779288@unizar.es

Resumen

En este trabajo se ha desarrollado un modelo térmico de baja carga computacional del sistema cocina de inducción-recipiente. Usando técnicas MOR (reducción de orden de modelos), un modelo reducido de tres variables de estado logra una precisión comparable a un FEM (modelo de elementos finitos) con miles de nodos.

FEM

Como primer paso de este trabajo, se ha construido el FEM del sistema real (véase Fig. 1), al que posteriormente se le aplicarán técnicas MOR. El sistema real está formado por un recipiente del tipo SCH vacío, el cristal vitrocerámico y un termistor NTC situado debajo del cristal, entre otros componentes. El FEM, construido utilizando COMSOL, cuenta con cuatro cuerpos claramente diferenciados. La capa inferior es el único cuerpo que no modela únicamente un objeto, como puede ser el recipiente, sino que integra todos los objetos situados por debajo del cristal. El mallado del FEM es considerablemente fino, contando con miles de nodos. Entre los parámetros clave se encuentran la conductividad térmica y el calor específico de los distintos materiales, así como las conductancias térmicas entre materiales. Estas conductancias describen la transferencia de calor entre cuerpos, siendo una de las más importantes la que modela el gap de aire [1] entre el recipiente y el cristal. Por otro lado, las capacidades térmicas describen la dinámica térmica de cada cuerpo. Estos parámetros son esenciales para entender y predecir la transferencia de calor. La entrada del FEM es la potencia inducida en la capa inferior del recipiente. Las temperaturas bajo estudio son la media de la capa superior del recipiente y la temperatura del NTC.

Optimización Paramétrica

El FEM generado, aunque es una buena primera aproximación de la realidad, requiere un ajuste de sus

parámetros para que su comportamiento se adapte al real. Por ello, se ha llevado a cabo un proceso de optimización, específicamente una *optimización bayesiana*, definiendo el coste como la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre las salidas experimentales y las simuladas. Los parámetros objeto de la optimización son, por un lado, todos aquellos que no tienen una relación física conocida con el sistema, como las conductancias o calores específicos de cuerpos cuyo material es desconocido (capa inferior). Asimismo, pese a tener una relación física conocida, el calor específico y la conductividad del recipiente también serán optimizadas. Para la captura de datos reales se han realizado un conjunto de ensayos (véase Fig. 2), registrando las temperaturas objetivo frente a una entrada conocida. La duración de los ensayos es de 30 minutos, con el objetivo de captar las dinámicas lentas del sistema. El proceso de optimización logra resultados muy destacables, reduciendo el RMSE de 30 °C a 4,5 °C.

MOR

La técnica MOR utilizada en este trabajo es la *reducción balanceada* [2]. La utilidad de esta radica en reducir modelos lineales en representación de espacio de estados (SS) del orden de miles de variables a modelos de unas pocas variables, basándose únicamente en la estructura del modelo original, sin necesidad de datos de simulaciones. Como primer paso, el FEM se convierte en un modelo SS. Para ello, se utilizan diferentes funciones incluidas en *Livelihood*, una herramienta que permite la interconexión entre COMSOL y MATLAB. Una vez obtenido dicho modelo SS, se genera el modelo balanceado, es decir, un modelo cuyos *gramianos de controlabilidad y observabilidad* son idénticos y diagonales, lo que implica que las variables de estado están desacopladas. Esto significa que los modos que maximizan conjuntamente la controlabilidad y observabilidad del sistema, siendo los más influyentes, corresponden directamente a las variables de estado del modelo balanceado,

ordenadas desde la más influyente hasta la menos. Finalmente, se truncan las matrices del modelo balanceado, conservando las variables más influyentes, obteniendo así el ROM (modelo reducido).

Resultados

En la Fig. 3 se pueden ver las diferencias entre las salidas del ROM con tres variables de estado y las del FEM. Como se puede comprobar, la efectividad del MOR es excelente, ya que el comportamiento del ROM es prácticamente similar al del FEM.

Asimismo, se ha llevado a cabo un análisis del MOR unificado, una técnica desarrollada en este trabajo que busca reducir diferentes modelos generando unas variables de estado de los modelos balanceados idénticas para los diferentes MORs. Esto supone una gran ventaja en cuanto a la interpretabilidad y explicabilidad de dicha técnica en problemas térmicos. En la Tabla 1 se recogen los resultados de diferentes ROMs obtenidos con técnicas MOR estándar y MOR unificadas. De estos resultados se puede extraer que el MOR unificado no induce prácticamente errores adicionales en los ROMs generados.

Conclusiones y Líneas Futuras

Se ha demostrado la eficacia del MOR estándar para generar modelos térmicos de baja carga computacional y alta precisión para el sistema cocina de inducción-recipiente. La aplicación de esta técnica ha permitido reducir un modelo de miles de variables de estado a uno de solo tres, manteniendo un comportamiento similar al modelo original. Esto permite obtener modelos que son útiles para tareas de simulación, estimación y control de temperatura [3]. Además, se ha propuesto una técnica de MOR unificado que mejora la interpretabilidad de la técnica de reducción, sin inducir prácticamente error en los ROMs generados.

Como trabajo futuro se explorarán aplicaciones en otros sistemas como los modelos electromagnéticos. Además, se busca esclarecer la relación entre los parámetros del ROM y los parámetros del FEM. Esto permitiría generar ROMs directamente, sin necesidad de obtener un FEM previo, bastaría con conocer las propiedades del sistema real.

Referencias

[1] BONET-SÁNCHEZ, B., et al. A Combined Experimental-Numerical Investigation of the

Thermal Efficiency of the Vessel in Domestic Induction Systems. *Mathematics*, Mar. 2022, vol. 10, no. 5.

[2] POORT, L., BESSELINK, B., FEY, R. H. B. and VAN DE WOUW, N. Passivity-Preserving, Balancing-Based Model Reduction for Interconnected Systems. 2023.

[3] PAESA, D. Reset Observers and Temperature Control for Induction Hobs. PhD Thesis. 2011.

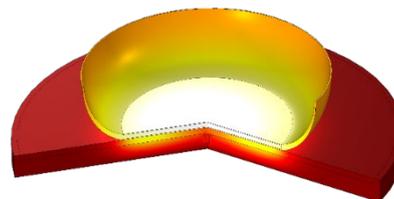


Fig. 1. Imagen del modelo FEM del sistema.



Fig. 2. Setup experimental.

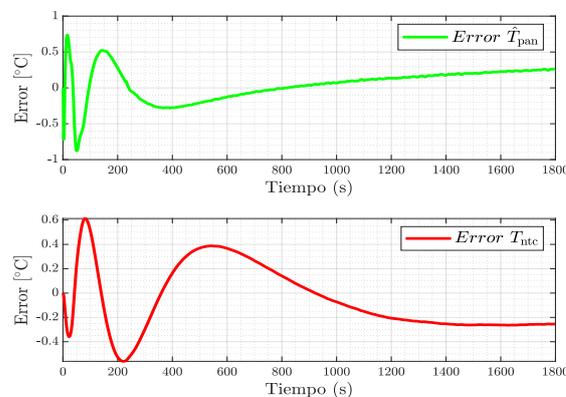


Fig. 3. Errores entre las salidas del ROM y el FEM.

Tabla 1. RMSE de diferentes ROMs con técnicas MOR estándar (RMSEe) frente a unificadas (RMSEu)

ROM	Cambios	RMSE _e	RMSE _u
A.1	1,5 C _{pan}	0,121	1,198
A.2	0,6 C _{pan}	0,804	1,372
B.1	1,5 C _{crystal}	0,443	1,420
B.2	0,6 C _{crystal}	0,117	1,638