

# Modelado electrotérmico de un proceso de calentamiento por inducción para aplicaciones industriales

Amaiur Mendi Altube<sup>1,2</sup>, Irma Villar Iturbe<sup>2</sup>, Claudio Carretero Chamarro<sup>1</sup>, Jesús Acero Acero<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Electrónica de Potencia y Microelectrónica (GEPM)

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)

Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.

<sup>2</sup>Ikerlan Technology Research Centre, Basque Research Technology Alliance (BRTA)

e-mail: [amendi@ikerlan.es](mailto:amendi@ikerlan.es)

## Resumen

Este trabajo describe el procedimiento seguido para modelar electromagnética y térmicamente una carga de templado por inducción compuesta de acero 42CrMo4, para lo que deben considerarse la dependencia con el nivel de campo magnético y temperatura de las propiedades físicas del material. Los resultados obtenidos mediante simulación numérica muestran la existencia de un comportamiento crítico entorno a la temperatura de Curie. Finalmente, se ha realizado una comparación entre los resultados de simulación y las mediciones experimentales para evaluar la utilidad del modelado propuesto.

## Introducción

Desde finales del siglo XIX, la tecnología del calentamiento por inducción se ha ido desarrollando y, por tanto, extendiendo su uso [1]. Se utiliza sobre todo en aplicaciones industriales, domésticas y médicas, pero presenta un elevado potencial en diversas aplicaciones [2].

El modelo electrotérmico de estos sistemas permite analizar el comportamiento de la carga, pero el coste computacional para capturar toda la fenomenología es muy elevado y requiere una caracterización precisa de las propiedades de la pieza. Debe indicarse que los cálculos numéricos basados en el método de los elementos finitos (FEM), utilizados en este trabajo, se emplean con regularidad para modelar los sistemas de calentamiento por inducción.

## Descripción del modelo

La carga está compuesta por una pieza cilíndrica calentada por una bobina de 6 vueltas (Figura 1). El material de la carga es acero 42CrMo4, también denominado AISI 4140, que se utiliza habitualmente en la industria para fabricar una amplia gama componentes de diferentes máquinas. Sin embargo,

los fabricantes no suelen proporcionar información completa sobre las propiedades físicas y mecánicas del material, siendo necesaria una caracterización adecuada de las mismas. El nivel de temperatura que implican este tipo de procesos conlleva cambios relevantes en las propiedades del material. Las características del acero de referencia aparecen en estudios previos [3,4]. En el modelo de simulación, se incluirán las propiedades magnéticas, eléctricas y térmicas en función de la temperatura y de la intensidad del campo magnético.

La simulación electromagnética se ha realizado en el dominio de la frecuencia, mientras que para el modelado térmico se ha utilizado simulación en el dominio del tiempo para capturar el comportamiento transitorio de la carga. Ambos tipos de simulaciones pueden acoplarse utilizando los dos módulos respectivos de COMSOL®. Sin embargo, el modelado electromagnético de la carga es una tarea de complejidad elevada debido a la saturación de la curva BH, aunque para facilitar el procesamiento se ha adoptado una simplificación basada en la condición de impedancia de frontera no lineal. Para ello, se ha obtenido la permeabilidad magnética equivalente de la carga dependiente de la temperatura y del campo magnético. Adicionalmente, también se ha incluido en el modelo completo la resistividad eléctrica, la capacidad calorífica y la conductividad térmica dependientes de la temperatura.

Tabla I: Características geométricas de la carga inductiva.

Parámetro	Valor	u.
Número de vueltas	6	
Radio de la bobina	15	mm
Diámetro de la sección interior	4	mm
Diámetro de la sección exterior	6	mm
Distancia entre vueltas	9	mm
Radio de la pieza	10	mm
Longitud de la pieza	75	mm

La simulación se ha realizado para un transitorio de 20 s de duración, alimentando la bobina con una corriente de 12,5 kHz y 440 A rms.

## Resultados de simulación

En la Figura 2, se puede observar el comportamiento transitorio de la impedancia equivalente, expresada como una resistencia en serie con una inductancia, del conjunto inductor-carga, para las condiciones de trabajo indicadas. Esta figura muestra que alrededor de  $t = 7$  s, la impedancia equivalente presenta un cambio brusco. La razón de este comportamiento se asocia a que la superficie que se encuentra cerca del punto medio de la pieza alcanza la temperatura de Curie, lo que significa que una saturación magnética del material puede afectar considerablemente a las características eléctricas del sistema de inducción.

Este comportamiento debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar el control de la electrónica de potencia, con objeto de garantizar que la dinámica en lazo cerrado sea capaz de manejar el cambio en las propiedades eléctricas de la carga.

En resultados adicionales a los mostrados, se puede observar que, por un lado, la potencia transferida a la carga cambia con la resistencia equivalente. Por otro lado, las pérdidas de potencia en la superficie de la pieza asociadas a la convección y la radiación reducen ligeramente la energía neta acumulada por la carga.

## Conclusiones

En este trabajo se ha analizado y validado experimentalmente un modelo de simulación



Figura 1. Sistema de templado por inducción.

electrotérmico del procesado por inducción de una pieza de acero 42CrMo4, que incluye la dependencia de las propiedades del material de la temperatura y del nivel del campo magnético. Una caracterización precisa de las propiedades físicas es fundamental para obtener buenos resultados. Además, el enfoque de sustituir las propiedades eléctricas y magnéticas de la carga por una condición de impedancia de frontera equivalente dependiente de la temperatura y del campo magnético ha demostrado ser una herramienta útil para obtener resultados de simulación fiables.

## REFERENCIAS

- [1]. RUDNEV, V., LOVELESS, D., and COOK, R. Handbook of Induction Heating. CRC Press. 2017.
- [2]. LUCIA, O., MAUSSION, P., DEDE, E. J., and BURDIO, J. M. Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014, 61(5), 2509-2520.
- [3]. SCHWENK, M., HOFFMEISTER, J., and SCHULZE, V. Experimental determination of process parameters and material data for numerical modeling of induction hardening. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013, 22(7), 1861-1870.
- [4]. PIERCE, D. T., MURALIDHARAN, G., TROFIMOV, A., TORRES, J., WANG, H., HAYNES, J. A., SEBECK, K., GINGRICH, E., BYRD, G., and TESS, M. Evaluation of thermal processing and properties of 422 martensitic stainless steel for replacement of 4140 steel in diesel engine pistons. *Materials and Designs*. 2022, 214.

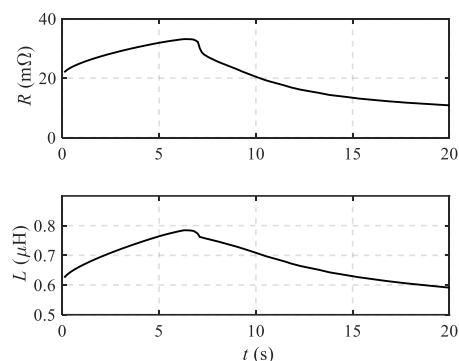


Figura 2. Impedancia equivalente de la carga.