

Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Predicción de la Dinámica Térmica de un Horno de Inducción Industrial Mediante el Método de Elementos Finitos



Autor: **John M. Correa Toloza**

Profesor Supervisor: **Dr. Juan Tapia L.**
Profesores Co-guías: **Dr. Dino Risso R.**
Dr. Rodolfo Rodríguez A.

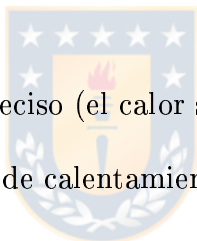
Trabajo de Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias
Mención Ingeniería Eléctrica

Concepción - Chile
Julio 2004

Introducción

La tecnología del calentamiento inductivo se ha utilizado con éxito en el calentamiento de piezas metálicas desde mediados de la década del 20 del siglo pasado [1]. Las aplicaciones industriales incluyen fundición de metal, tratamiento térmico para endurecimiento, crecimiento de cristales semiconductores, sellado y empaque de alta velocidad, soldadura de piezas, entre muchas otras. Las ventajas de esta tecnología con respecto al método tradicional de calentamiento mediante hornos de combustión son,

- Una alta velocidad de calentamiento ($6000\text{ }^{\circ}F/s$) en láminas
- Partida y parada instantánea
- Patrón de calentamiento muy preciso (el calor se concentra donde se necesita)
- No hay contacto entre el equipo de calentamiento y la pieza metálica



Un sistema de calentamiento inductivo, consta fundamentalmente de tres partes: la fuente de poder (oscilador), un circuito de adaptación de impedancia (transformador) y la carga que es una bobina cercana a una pieza metálica. La bobina normalmente es un tubo de cobre de alta conductividad eléctrica por donde circula agua des-ionizada para refrigerarla [2].

En operación normal, el oscilador suministra una corriente alterna a la bobina, la que produce un campo magnético variable en el tiempo. Debido a la alta conductividad de la pieza metálica inmersa en este campo magnético, se inducen corrientes de fuga (*eddy currents*) las que producen pérdidas calóricas que elevan la temperatura. También existen otros mecanismos de pérdidas calóricas como las pérdidas por magnetización alterna e histéresis, las cuales son más importantes en materiales ferromagnéticos [3]. Llama la atención que dada la gran utilización de estos equipos en el rubro industrial, el diseño e ingeniería todavía recurre a modelos empíricos muy simples asistidos por datos experimentales obtenidos en ensayos de laboratorio.

Gran cantidad de fabricantes de estos equipos tomaron una postura conservadora a la hora de adoptar la simulación numérica, debido a que los modelos simplificados y ensayos experimentales han funcionado muy bien hasta ahora. Sin embargo, en las últimas décadas los fabricantes han considerado el uso de herramientas de simulación en las distintas fases del proceso de desarrollo del equipo, debido a la facilidad de uso, requerimientos moderados de

infraestructura computacional, reproducción de diversos escenarios operacionales, flexibilidad y lógicamente un reducido costo de implementación.

La característica particular que distingue al problema de simulación del calentamiento inductivo, es que involucra la solución de un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que pueden estar fuertemente acopladas. Por ejemplo, en cada instante de tiempo, el campo electromagnético depende explícitamente de la evolución del campo térmico debido a la dependencia térmica de los parámetros magnéticos como la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética. Por tanto los problemas magnético y térmico no pueden resolverse de manera aislada uno de otro, existiendo una gran variedad de métodos de tratamiento numérico para este sistema acoplado.

El mayor interés de los fabricantes en estos momentos es obtener simulaciones que permitan predecir la distribución de las corrientes de fuga y la temperatura de una determinada configuración bobina-pieza. Además es de natural interés conocer el comportamiento eléctrico en los terminales de la bobina para determinadas condiciones de carga (piezas de diverso tamaño o circulando con velocidad uniforme). Un estudio en este sentido permitiría optimizar el diseño del sistema de control de potencia eléctrica.

Resumiendo lo anterior se puede afirmar que una adecuada simulación permitirá al diseñador optimizar el equipo de modo que la pieza pueda alcanzar su temperatura final en un mínimo de tiempo, con una alta uniformidad térmica y con una alta eficiencia en el consumo de energía [1].

El objetivo fundamental de este trabajo es continuar con la línea de investigación impulsada por el Grupo de Cálculo Científico Aplicado (GCCA) de la Universidad del Bío-bío, respecto al modelamiento numérico del fenómeno de calentamiento inductivo.

En un trabajo previo, se abordó el estudio del calentamiento inductivo de una placa rectangular de metal de parámetros materiales constantes sometida a un campo magnético transversal generado por una bobina con geometría arbitraria [4]. En un segundo trabajo se modeló una geometría 3D con simetría cilíndrica bajo el efecto del campo de varias espiras filamentosas circulares concéntricas. Se desarrolló un método analítico para el cálculo de las corrientes de fuga acoplada con la resolución de la ecuación térmica considerando la variación de los parámetros electro-térmicos [5].

El presente trabajo aborda el uso del método de elementos finitos (MEF) para modelar el horno de inducción aplicado a una barra de geometría cilíndrica en 2D y una bobina toroidal de cobre macizo. El método permite predecir la evolución de la temperatura generada por las corrientes de fuga considerando parámetros materiales variables. El método numérico puede ser extendido fácilmente a otras geometrías incluso sin simetría y también puede ser ampliado al análisis de geometrías en 3D.