

**FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HORNOS DE INDUCCIÓN  
ELECTROMAGNÉTICA PARA LA INDUSTRIA METALMECÁNICA**

**FUNDAMENTALS FOR THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF ELECTROMAGNETIC  
INDUCTION FURNACES FOR METAL-MECHANICS INDUSTRY**

**MC. Gonzalo Guízar Martínez**  
**Universidad Tecnológica de  
Jalisco**

*Profesor asociado "C" UTJ,  
TSU-Mecatrónica área  
Automatización, Cuerpo  
académico UTJAL-CA-10.  
Luis I Jiménez 577,  
Guadalajara, México.  
gonzalo.guizar@utledu.mx*

**PhD. Fredy Alberto Sanz Ramirez**  
**Institución Universitaria**

**Salazar y Herrera, Centro de  
Investigación, Grupo de  
investigación GEA.**

*Carrera 70 No.52-49, Medellin,  
Colombia. fsanz@iush.edu.co*

**MC. Carlos Alberto Partida  
Carvajal**

**Universidad Tecnológica de  
Jalisco**

*Profesor asociado "C" UTJ,  
TSU-Mecatrónica área  
Automatización, Cuerpo  
académico UTJAL-CA-10.  
Luis I Jiménez 577,  
Guadalajara, México.  
cpartida@utledu.mx*

(Recibido el 10-01-2014. Aprobado e123-03-2014)

**Resumen:** El presente trabajo presenta la fundamentación requerida para el diseño y la construcción de hornos de inducción electromagnética, utilizados por la industria metalmeccánica, especialmente por empresas que poseen limitaciones en sus recursos de inversión, como lo son las pesquerías y medianas empresas (PYMEs). Este artículo es derivado del proyecto realizado de diseño y construcción de un prototipo de horno de inducción. Inicialmente se indago sobre el fenómeno de inducción electromagnética, basándose en las leyes físicas elementales (como la ley de Faraday y la ley de Joule), mismas que son parte esencial dentro de las consideraciones para el diseño e implementación de estos equipos, pues los elementos eléctricos utilizados (como transformadores, bobinas o capacitores) dependen directamente de dichos principios para su Optima elección. Otro aspecto fundamental a tomar en cuenta, es el estudio de las propiedades de los materiales, ya que los parámetros eléctricos manipulados por estos equipos de inducción dependen de las características de los metales empleados. Por último, otro aspecto considerado en este trabajo es el rastreo de dispositivos electrónicos que permitan controlar las seriales eléctricas utilizadas, pues tanto la eficiencia del sistema como la optimización en el use de recursos, principalmente el de energía eléctrica, deben ser objetivos planteados en proyectos de actualización de sistemas ya existentes, como es el caso de los hornos de inducción.

**Palabras clave:** inducción electromagnética, horno de inducción, Ley de Faraday, Ley de Joule, dispositivos electrónicos.

**Abstract:** this paper presents the required fundaments for design and construction of electromagnetic induction furnaces used by the metal-mechanics industry, especially for companies with low investment capacity, such as small and medium enterprises (SMEs). This article is generated from an existing project based on the induction furnace prototype design and construction. First the phenomenon of electromagnetic induction was researched, based on elementary physical laws (such as Faraday's law and Joule's law), these laws play an essential role for the design and implementation considerations, because electrical elements (such as transformers, inductors or capacitors) have direct dependence on these principles for optimal selection. And the other hand, is important to consider the materials properties to be processed, because the manipulated electrical parameters of these induction

devices are related with the characteristics of the used metals. Finally, another important aspect in this work is the search or tracking of electronic devices that make the control stage of the electric signals used, because system efficiency and resource optimization, but mainly the electric energy, are the project objectives to improve existing systems.

**Keywords:** electromagnetic induction, induction furnace, Faraday's law, Joule's law, electronic devices.

## 1. INTRODUCCIÓN

Algunos de los principales aspectos sobre los que es relevante puntualizar son los principios del fenómeno de calentamiento de los metales por medio de la inducción electromagnética, debido a que es uno de los elementos fundamentales del funcionamiento de los hornos de inducción.

Aunque los hornos de inducción han sido utilizados aproximadamente desde la mitad del siglo XX, con la presente investigación se pretende cimentar las bases para mejorar y reducir costos en el diseño y construcción de este tipo de equipos. Ha sido necesario investigar desde los fundamentos del principio de inducción electromagnética hasta las características de dispositivos eléctricos y electrónicos de vanguardia, que permitan, ante todo, tener procesos eficientes y que contribuyan en el ahorro de energía. Además de conocer los detalles más importantes del sistema, es de gran relevancia estudiar la composición y propiedades de los principales metales y las aleaciones que se usan en la industria metalmeccánica, para una mejor explotación del sistema que se diseñe y/o construya.

Otro aspecto primordial que se deriva de la investigación, es que provee documentación relevante para el usuario la cual puede ser de ayuda para futuros ajustes o mantenimientos, representando ahorros significantes al propiciar información confiable, para que el personal técnico y de mantenimiento pueda intervenir los equipos.

## 2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

### 2.1. Procedimiento

Derivado del estudio de las necesidades de tecnología para el tratamiento térmico de metales de algunas PYMEs del sector metalmeccánica, se procedió a la investigación de los fundamentos teóricos del principio de inducción electromagnética y su aplicabilidad para el procesamiento de metales en la elaboración de piezas metálicas.

Una vez ubicada la viabilidad del desarrollo de este tipo de sistemas, se procedió, con la colaboración de investigadores y estudiantes, a explorar el fenómeno

de calentamiento por inducción electromagnética y los materiales a procesar para comprender las características que debe poseer el prototipo a desarrollar.

### 2.2. Fundamentos teóricos

La ley de Faraday resulta trascendental cuando se habla del fenómeno electromagnético, pues esta ley establece que se pueden inducir corrientes entre bobinas (inductores) debido a campos magnéticos variables en el tiempo. Para el caso de la bobina inductora que poseen los hornos de inducción, puede considerarse y calcular los niveles de los campos magnéticos, las frecuencias de oscilación y las corrientes inducidas, las cuales son de vital importancia para el diseño de los componentes.

La ley de Faraday establece lo siguiente:

"La fuerza electromotriz (fem) inducida en una espira cerrada es igual al negativo de la relación de cambio con respecto al tiempo de flujo magnética a través de la espira". (Sears, 2004)

La expresión para la ley de Faraday es:

$$\epsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Donde  $\Phi_B$  es el flujo magnético

Además,  $\Phi_B$  se encuentra a través de la ecuación siguiente:

$$\Phi_B = \int B \, dA$$

Siendo  $B$ , el campo magnético y  $dA$  el elemento infinitesimal del área del campo. (Sears, 2004).

Otra ley de la Física que resulta primordial a considerar, es la de Joule. Dicha ley especifica que parte de la corriente eléctrica que circula a través de los conductores y elementos eléctricos se transforma en calor; dicho fenómeno, establecido por la ley de Joule, es de gran jerarquía en el calentamiento de metales, pues la corriente inducida por la bobina se hace circular por el metal a procesar, provocando que este se caliente y puedan manipularse sus propiedades mecánicas.

Otro fenómeno importante, aunque no contribución mayoritaria al momento de calentar un metal por medio de la inducción electromagnética, la histéresis magnética también aporta al calentamiento, pues la relación del campo magnética empleado y la magnetización producida, forman parte del proceso. La histéresis magnética es una propiedad que presentan los materiales ferromagnéticos al ser sometidos a un campo magnética externo. Si se comienza a aplicar un campo  $H$ , el material tendrá una magnetización Gradual hasta llegar a un nivel máximo, denominado como magnetización de saturación  $M_s$ , ante el cual no se presentan mayores incrementos a pesar de aumentar el campo. Si se deja de aplicar el campo, se empieza a desmagnetizar el material, pero esta des magnetización no pasa por cero, sino que queda un remanente  $M_r$ . Si se aplica otro campo, pero en sentido inverso  $-H$ , ahora se magnetizara hasta alcanzar la saturación nuevamente pero con una polaridad contraria  $-M_s$ . Esto forma un bucle, conocido como curva de histéresis. Este proceso de magnetización y desmagnetización produce pérdidas de energía y por ende, calor en el material.

Los materiales tienen ejes con cierta facilidad de magnetización de acuerdo con el campo aplicado, esto puede darse con un campo paralelo o un campo perpendicular. Esa "preferencia" de magnetización producida por un campo, ya sea paralela o perpendicular, se conoce como eje de fácil magnetización. La tendencia de magnetización a lo largo del llamado eje fácil, se representa por el término de densidad de energía  $E_a$ :

$$E_a = K_s \sin^2 \theta$$

Donde  $\theta$  es el Angulo entre  $M_y$  el eje de anisotropía y  $IC$ , es la constante de anisotropía. "La anisotropía magnética significa que el eje ferromagnético o anti ferromagnético de una muestra se encuentra a lo largo de una dirección fija". (Coey, 2009).

De los efectos eléctricos presentes para el calentamiento de metales mediante inducción, la corriente de Foucault es la de mayor relevancia, debido a esta corriente, aunado a la frecuencia de oscilación y el tiempo exposición, se determina la penetración de calor en el material utilizado. Las corrientes de Foucault se conocen también como corrientes parasitas, son corrientes circulantes inducidas que se mueven a tray& de un campo magnética.

Estas corrientes se neutralizan dentro del mismo medio, formando "remolinos", y son las responsables de generar calor por el efecto Joule. Dicho efecto representa el principio de conservación de la transformación de la energía eléctrica en calor. Se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t$$

Donde:

$Q$ = calor producido (joules).

$R$ = resistencia del material conductor (ohms).

$I$ = corriente circulante (amperes).

$t$ = el tiempo transcurrido (segundos).

El efecto Joule, se puede establecer de la siguiente manera: "La cantidad de energía producida en un conductor en un tiempo  $t$  por el paso de una corriente eléctrica constante, es proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente  $I$  por la resistencia  $R$  del conductor". (Santamaria, 2009).

Las pérdidas de energía por corrientes de Foucault crecen al cuadrado en relación a la frecuencia de la corriente alterna. De tal manera, que para el calentamiento de los metales a través de inducción, la histéresis, las corrientes de Foucault y el efecto Joule representan la causa del calentamiento de materiales. Además de los fundamentos relacionados a los parámetros eléctricos, las características de los materiales a procesar son otro factor de gran relevancia al diseñar un sistema de calentamiento por inducción. Pues el calentamiento por inducción es producido por la distorsión de los dominios magnéticos de los metales. Dicha distorsión se debe a la alternancia de polaridad del campo generado en la bobina inductora. La magnetización de los materiales, para el caso del presente proyecto, ferromagnéticos, también puede verse afectada por la llamada temperatura de Curie, que es un valor térmico al cual se presenta el decremento de las propiedades magnéticas.

### 2.3. Selección de componentes

Identificados los principios eléctricos y electromagnéticos, se propició el reconocimiento de las características que se requieren, de tal manera que se Rev. () a cabo la selección de dispositivos que componen el sistema. Cabe señalar que muchos de los valores de parámetros en los componentes eléctricos resultantes no son comunes en el mercado, por lo que se dio a la tarea de buscar distribuidores del material con valores muy aproximados a los encontrados en el análisis de cálculo.

La bobina inductora es el elemento primordial y que propicia la excitación el material metálico a procesar, que para este caso, es metal ferromagnético, logrando calentarlo hasta que sus propiedades mecánicas puedan ser manipuladas. Para provocar dicha inductancia se utiliza, otro transformador toroide que inducir la corriente a la bobina inductora construida en forma de espiras, empleando tubo hueco de cobre, y al no existir un núcleo, el metal que se introduzca en las espiras, se convertirá en ese nudo que será calentado por un campo magnético que alternar su polaridad.

Dentro de las indagaciones de mayor grado, para la selección de componentes, es la de los dispositivos electrónicos a elegir para la etapa de potencia. Se consideraron dos tipos de componentes que permitan conmutar las señales eléctricas que estarán circulando por la bobina inductora: MOSFET (Metal oxide semiconductor Field effect transistor) o IGBT (Insulate gate bipolar transistor). Se analizaron las características de dichos componentes y se realizaron las comparaciones pertinentes, eligiéndose el MOSFET por tener la versatilidad de su funcionamiento a mayores frecuencias, además de contar con un coeficiente de temperatura positivo, mientras que el IGBT comúnmente trabaja a frecuencias menores y posee un coeficiente de temperatura negativo. Una ventaja del IGBT, que para el prototipo diseñado no se consideró tan significativo en contraste a las ventajas brindadas por el MOSFET, es el nivel de voltaje que puede soportar, el cual está por encima de 1000 V, pues el MOSFET trabaja comúnmente en 250 V o menos, siendo útil para el nivel manejado en el proyecto.

Debido a que los elementos del equipo también son susceptibles al calentamiento, se incluyó un sistema de enfriamiento consistente en ventiladores, disipadores en algunos componentes y una bomba que hará circular agua por el tubo de cobre que funge como bobina inductora.

### 3. Implementación y construcción

Una vez seleccionados los componentes del sistema, se procedió al ensamble y a las pruebas funcionales de los módulos del equipo en cuestión, para su integración. Los módulos que conforman el equipo son considerados de la siguiente manera: Alimentación del sistema, módulo de control, etapa de potencia y circuito resonante (conformado por capacitores, transformador toroide y la bobina inductora).

De manera resumida se puede explicar cada módulo:

- **Módulo de alimentación:** Cuenta con un transformador toroide que provee de tres valores de voltaje distintos. Uno de los voltajes obtenidos sirve para alimentar un microcontrolador usado para el módulo de control; otra de las tensiones que entrega el transformador toroide es para provocar la saturación los transistores MOSFET usados en la etapa de potencia; además, una señal de voltaje que es acondicionada para emitirse como corriente oscilante que circula por la bobina inductora y que genera el campo magnética.
- **Módulo de control:** La oscilación se controla por modulación por ancho de pulso (*PWM*, por sus siglas en inglés) empleando a un microcontrolador.
- **Módulo de potencia:** Esta etapa está conformada principalmente por transistores MOSFET, los cuales realizan la función de conmutación.
- **Módulo de resonancia:** Consiste en un circuito que contiene dos subsistemas eléctricos, conformados por un banco de capacitores e inductores (transformador toroide y bobina inductora). En este se llevó a cabo el cálculo de los elementos pasivos para la frecuencia de oscilación requerida. El circuito LC (inductivo capacitivo) obtenido, al estar en resonancia, no requiere corrección del factor de potencia, pues este tiene un valor de 1, ya que los valores de las reactancias inductiva y capacitiva poseen valores iguales.

### 4. CONCLUSIONES

Los sistemas de calentamiento por inducción electromagnética son una alternativa viable en el tratamiento térmico de metales, explotando sus propiedades mecánicas, para los diferentes procedimientos en la fabricación de partes.

Los hornos de inducción electromagnética proveen muchos beneficios, siendo uno de ellos, los considerables ahorros en el consumo de energía.

Con el diseño y construcción del prototipo de horno de inducción, se abre la posibilidad de que empresas con baja capacidad de inversión, como las PYMEs de este ramo, puedan incorporar nuevas tecnologías donde se contenga información técnica importante para llevar a cabo mantenimientos, reparaciones o ajustes necesarios.

El renovar sistemas existentes conduce a la mejoría de los procesos. No únicamente invenciones asombrosas son útiles y vanguardistas. En el caso del presente proyecto, se retoma tecnología ya conocida, donde se adaptan a condiciones actuales, de esta forma se plasma la labor investigativa.

Utilizar componentes con tecnología actualizada permite hacer más eficientes los sistemas y reducir el consumo de energía.

La trascendencia del desarrollo del proyecto radica en trasladar el prototipo a la escala industrial. Se mencionó anteriormente que el prototipo está diseñado para calentar materiales ferromagnéticos debido a la frecuencia manejada, pero gracias a las investigaciones realizadas, se pueden realizar los ajustes necesarios en el diseño, para aplicarse en otros metales no ferromagnéticos.

## 5. REFERENCIAS

Cheng, D. K. (1998). *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. Mexico: Pearson.

Miihlbauer, A. (2008). *History of induction heating & melting*. Essen: Vulkan Verlag.

Zinn, S. (1988). *Elements of induction heating. Design, control and applications*. Columbus: Carnes Publications Services, Inc.

Rashid, M. H. (2004). *Electrónica de Potencia*. México: Pearson Educación.

Serway, R. A. (2009). *Física Electricidad y Magnetismo*. México: CENGAGE Learning.

Sadiku, M. N. (2012). *Elementos de Electromagnetismo*. México: Alfaomega.

Shakelford, J. F. (2010). *Introducción a la ciencia de los materiales para ingenieros*. Madrid: Pearson.

Santamaría, G. (2009). *Electrotecnia*. Madrid: Editex.

Sears, F. W. (2004). *Física Universitaria*. México: Pearson Educación.

Coe, J. M. (2009). *Magnetism and magnetic materials*. New York: Cambridge University Press.

## SITIOS WEB

Fairchild Semiconductor. (Julio de 2000). <https://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9012.pdf>