

## Dimensionamiento de un horno de fundición por inducción electromagnética y cálculo de los parámetros eléctricos

### Dimensioning of an induction heating furnace and calculation of the electrical parameters

PÉREZ-PÉREZ, Arnulfo †, TÉLLEZ-MARTÍNEZ, Jorge Sergio, HORTELANO-CAPETILLO, Gregorio y BARRAZA-FIERRO, Jesús Israel

*Universidad Politécnica de Juventino Rosas*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Arnulfo, Pérez-Pérez* / ORC ID: 0000-0001-6354-8899, CVU CONACYT ID: 176434

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Jorge Sergio Téllez-Martínez* / ORC ID: 0000-0003-0587-0059, CVU CONACYT ID: 40084

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Gregorio, Hortelano-Capetillo* / ORC ID: 0000-0002-3702-4853, CVU CONACYT ID: 347496

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *Jesús Israel, Barraza-Fierro* / ORC ID: 0000-0003-0905-5924, CVU CONACYT ID: 170811

DOI: 10.35429/JEE.2019.8.3.1.4

Recibido: 18 de Enero, 2019; Aceptado 09 de Marzo, 2019

#### Resumen

En este trabajo se determinó las dimensiones de un horno para fundición de aleaciones ferrosas. El horno tiene un sistema de calentamiento por inducción electromagnética. Además, se calculó los parámetros de alimentación de energía eléctrica como la frecuencia y la potencia. Se propuso una masa de acero fundida de 5kg con una densidad de 7.81 kg/dm<sup>3</sup>. Esto equivale a un volumen del crisol de 0.641 dm<sup>3</sup>. La frecuencia se obtuvo de tablas existentes las cuales toman en cuenta el diámetro del crisol y su valor fue de 1 KHz. La potencia requerida se determinó con el calor requerido para llevar el acero a la temperatura de 1740 K, las pérdidas energéticas a través de las paredes, fondo del crisol y parte superior. Este valor se dividió entre el tiempo de calentamiento (30 minutos) y resultó en una potencia de 4.5 KW. El desarrollo de los cálculos evidencia que la fundición por inducción es un proceso eficiente y permite un calentamiento rápido aleaciones ferrosas.

#### Calentamiento por inducción, Crisol, Frecuencia

#### Abstract

In this work, the dimensions of a furnace for melting of ferrous alloys were determined. The furnace has an electromagnetic induction heating system. In addition, the parameters of electrical power supply such as frequency and power were calculated. A 5kg cast steel mass with a density of 7.81 kg / dm<sup>3</sup> was proposed. This corresponds to a crucible volume of 0.641 dm<sup>3</sup>. The frequency was obtained from tables, which take into account the diameter of the crucible, and its value was 1 KHz. The energy consumption was determined with the heat required to bring the steel to the temperature of 1740 K, the energy losses through the walls, bottom and top of the crucible. This value was divided between the heating time (30 minutes) and resulted in a power of 4.5 KW. The development of the calculations shows that the induction heating is an efficient process and allows a fast melting of ferrous alloys.

#### Induction Heating, Crucible, Frequency

**Citación:** PÉREZ-PÉREZ, Arnulfo, TÉLLEZ-MARTÍNEZ, Jorge Sergio, HORTELANO-CAPETILLO, Gregorio y BARRAZA-FIERRO, Jesús Israel. Dimensionamiento de un horno de fundición por inducción electromagnética y cálculo de los parámetros eléctricos. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2019 3-8: 1-4.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Un método ampliamente utilizado en la industria -cuando se requiere el calentamiento o fundición de metales, en una atmósfera controlada y libre de oxígeno- es el calentamiento por inducción electromagnética. Este proceso se puede modelar mediante la utilización de las leyes de Faraday, Ampere y la aplicación del efecto Joule.

Para aumentar la temperatura del metal que se desea fundir se requiere someter la muestra a un campo magnético variable en el tiempo, y de amplitud considerable.

Bajo estas condiciones, en el interior de la muestra se inducen corrientes que producen disipación de potencia; la cual se manifiesta con un incremento en la temperatura, pudiendo llegar al valor correspondiente que permita la fundición.

## Objetivo general

Obtener los parámetros eléctricos y el dimensionamiento de un horno de fundición de acero por el proceso de inducción electromagnética utilizando las ecuaciones que se recomiendan en la bibliografía.

## Metodología

Los pasos para generar el diseño de un horno de inducción son los siguientes:

1. Diseño del crisol que incluye la determinación de la relación altura/diámetro ( $L_w / D_w$ ), diámetro de la bobina al diámetro de carga  $D_c / D_w$  y el grosor de la pared del crisol.
2. Selección de la frecuencia: La especificación física de la pieza de trabajo y su dimensión determinan la frecuencia de la fuente de alimentación para el proceso térmico. Esta frecuencia debe ser mayor que la frecuencia crítica dada en la siguiente ecuación.

$$f_c = \frac{6.45 \rho}{\mu D_w^2} \quad (1)$$

$f_c$  = Frecuencia crítica.

$\rho$  = resistividad (ohm/m).

$\mu$  = permeabilidad (H/m).

$D_w^2$  = diametro de la carga (m).

3. Determinación de la potencia requerida: la fuente de alimentación se selecciona en base a la potencia y frecuencia requerida para el proceso de fusión. La potencia requerida consiste en: la potencia relativa para fundir la carga y las pérdidas de calor acompañadas del proceso de fusión.
4. Diseño de la bobina de inducción: el cual consiste en el número de conductores de cobre con la sección apropiada para satisfacer la refrigeración requerida.
5. Determinación del enfriamiento requerido.

*Diseño del crisol y grosor de la pared.* La cantidad de acero que se desea fundir es 5 kg, que dado una densidad de 7800 kg/m<sup>3</sup>, resulta un volumen de 0.641 litros o 0.641 dm<sup>3</sup>. Luego, se propone un diámetro de 7 cm y entonces la altura es de 16.7 cm. Se recomienda que la relación diámetro/altura sea menor que la unidad y estos datos propuestos cumplen con esa relación, así que son aceptados. El grosor de la pared del crisol se propone de 2 cm.

*Selección de la frecuencia.* Esto se hace a partir de tablas. Para un diámetro de carga de entre 40 y 175 mm la frecuencia de calentamiento para el acero es de 1000 Hz, misma a la que corresponde una profundidad de referencia (Por el efecto piel) de 13.7 mm.

*Potencia requerida.* La potencia requerida deberá entregar el calor necesario para la fundición en un tiempo que se propone. El calor para la fundición se calcula con la siguiente ecuación.

$$H = \rho V [C_s (T_m - T_o) + H_f + C_l (T_p - T_m)] \quad (2)$$

Donde  $\rho$ =densidad del acero,  $V$ = volumen que se va a fundir,  $C_s$  = Calor específico del acero sólido,  $T_m$ = Temperatura de fusión,  $T_o$ = Temperatura ambiente,  $H_f$ = Calor latente de fusión del acero,  $C_l$ =calor específico del acero en estado líquido y  $T_p$ = Temperatura de colada. Sustituyendo los datos en (2), el calor  $H$  necesario para la fundición es

$$H = 5 \text{ kg} \left[ 473 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} (1689 \text{ K} - 296.15 \text{ K}) + 221274 \frac{\text{J}}{\text{Kg}} + 721 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} (1740 \text{ K} - 1689 \text{ K}) \right]$$

$$H = 4\,584\,670 \text{ J}$$

Si se propone un tiempo de fusión de 30 minutos (1800 s), la potencia requerida para el baño será

$$P=H/t = 4\ 584\ 670\text{J}/1800\text{s} = 2.5\ \text{KW}. \quad (3)$$

A este calor de fusión se agregan las pérdidas de energía a través de la pared del crisol del fondo y del baño descubierto. Para la pared del crisol, el cálculo de la pérdida de energía utiliza la ecuación:

$$P_1 = \frac{\kappa}{\Delta x} (T_c - T_b) (S_1 + S_2) \quad (4)$$

$$P_1 = \frac{1.3 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}}{0.02\ \text{m}} (1740\text{K} - 353\text{K})(0.024\text{m}^2 + 0.009\text{m}^2) = 3.0\ \text{KW}$$

Donde  $P_1$  son las pérdidas a través de la pared del crisol,  $\kappa$  es la conductividad térmica del mismo,  $T_c$  es la temperatura del lado caliente,  $T_b$  es la temperatura del aire, y  $\Delta x$  es el espesor de la pared,  $S_1$  y  $S_2$  son la superficie lateral y del fondo del crisol respectivamente.

En el baño descubierto, la ecuación que se usa es la de transferencia de calor por radiación

$$P_3 = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (5)$$

Donde  $\varepsilon$  es la emisividad del acero (0.8 adimensional),  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzman ( $5.67 \times 10^{-8}\ \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ),  $S$  el área de la superficie emisora de calor y  $T$  la temperatura del cuerpo emisor.

$$P_2 = (5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4})(0.8) * (1740\text{K})^4 * 0.009\text{m}^2 = 3.7\ \text{KW}$$

Con esta información se determina la potencia total requerida para la fundición

$$P_T = P_{\text{baño}} + P_1 + P_2 \quad (6)$$

$$P_T = 2.5\ \text{KW} + 3.0\ \text{KW} + 3.7 = 9.2\ \text{KW}.$$

Diseño de la bobina de inducción. El material que se utilizará en la bobina será un tubo de cobre de diámetro 3/8 de pulgada. Dadas las características del crisol, el diámetro de la bobina será de 11 cm y una longitud de 168 mm. El número de espiras se obtiene con la relación

$$\text{No de espiras} = \frac{L}{\text{diámetro del tubo} + \text{separación entre espiras}} \quad (7)$$

Sustituyendo datos

$$\text{No de espiras} = \frac{169\ \text{mm}}{\left(\frac{3}{8}\ \text{in}\right)\left(\frac{25.4\ \text{mm}}{\text{in}}\right) + 1\ \text{mm}} = 16\ \text{espiras}$$

La longitud del conductor de cobre necesario para la bobina se determina con la siguiente ecuación:

$$l = 2 * \pi * r * \text{No de espiras} \quad (8)$$

$$l = 2 * \pi * 6\ \text{cm} * 16 = 603\ \text{cm}$$

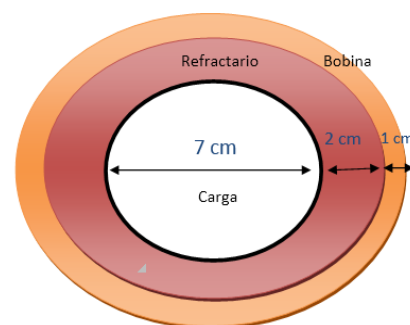
## Resultados

Después de haber seguido la metodología propuesta para el diseño de un horno de inducción, se han determinado los parámetros que se muestran en la tabla 1.

Parámetro	Valor
Capacidad	5 Kg
Volumen de la cámara	0.64 l
No de espiras del inductor	16
Diámetro interior del crisol	7 cm
Altura del crisol	17 cm
Potencia	9.2 KW
Tiempo para la fusión	30 min
Frecuencia	1 khz

**Tabla 1** Parámetros eléctricos y dimensiones calculadas para un horno de fundición de acero por inducción electromagnética

La figura 1 muestra las dimensiones que se aplicarían a la carga (material fundido), las dimensiones de la bobina y el espesor del crisol



**Figura 1** Dimensiones del horno de infuccion propuesto

## Conclusiones

Como lo demuestran los cálculos realizados, la potencia requerida para la fundición estará en función al tiempo propuesto para llevar lograr la fundición. Hay otros valores que quedarían fijos y que no dependen del tiempo como es la pérdida de energía en las paredes que solo dependen de las temperaturas a las que se maneje el baño de acero.

PÉREZ-PÉREZ, Arnulfo, TÉLLEZ-MARTÍNEZ, Jorge Sergio, HORTELANO-CAPETILLO, Gregorio y BARRAZA-FIERRO, Jesús Israel. Dimensionamiento de un horno de fundición por inducción electromagnética y cálculo de los parámetros eléctricos. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2019

Considerando la potencia requerida para el calentamiento de baño y las pérdidas, la potencia total requerida será de 9.2 KW para fundir en un tiempo de 30 minutos.

Puesto que se pretende fundir una masa de 5 kg para elaborar probetas que van a ser utilizadas en trabajos de investigación, las dimensiones del crisol deberán ser de una altura de 17 m y un diámetro interior de 7 cm con un espesor de pared de 2 cm.

Aunque aquí no se plantea, se debe calcular un sistema de enfriamiento del inductor para evitar un sobrecalentamiento que incremente la resistividad eléctrica y disminuya la eficiencia eléctrica del equipo.

### Bibliografía

Alfredo Acevedo. (Noviembre 2007). Metodología para la Construcción de un horno de Inducción Electromagnética.

ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. USA 2005.

Carlos Eduardo Márquez de la Torre. (2002). Tratamiento térmico de Anillos de Acero AISI 4140 (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería mecánica y eléctrica. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

Federico Gonzalo Ochoa Mate. (2006). Prolongación de la vida útil del revestimiento refractario de un horno de inducción INTRANET. 2006, de Escuela asociación politécnica de litoral.

José Luis Enrique Berciano, Et. Al. Monografías sobre tecnología del acero. Parte III. Colada del acero. Madrid 2009.

Luis Fernando Idarraga Ortiz y Rafael Afanador Muñoz. (2006). Calentamiento por inducción: Diseño y construcción del sistema de control de un puente resonante. (Tesis licenciatura). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Omar David Muñoz (2011). Design Strategy for a 3-Phase Variable Frequency Drive (VFD).

Senior project. California Polytechnic State University. San Luis Obispo, Cal. USA.

Sunil M. Jaralikal. (2013). Performance Analysis of an Induction Furnace Employing 12 Pulse Converter- A Case Study. 18/10/2016, de International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering.

William D. Callister, Jr. Fundamentals of materials Science and Engineering. An interactive e-text. Fifth edition. USA 2001.