

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Diseño y Construcción de un Horno de Crisol para Fusión  
de Metales por Inducción**

**Andrea Carolina Landázuri Flores**

Tesis de grado presentada como requisito para la  
obtención del título en Ingeniería Química

Quito, Julio 2007

**Universidad San Francisco de Quito  
Colegio Politécnico**

**HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS**

**Diseño y Construcción de un Horno de Crisol para Fusión  
de Metales por Inducción**

**Andrea Carolina Landázuri Flores**

Gustavo Muñoz Rivadeneira, Ph.D. ....  
Director de Tesis y  
Miembro del Comité de Tesis

Carlos Fabara, M.Sc. ....  
Miembro del Comité de Tesis

César Zambrano, Ph.D. ....  
Miembro del Comité de Tesis

Fernando Romo, M.Sc .....  
Decano del Colegio Politécnico

Quito, Julio 2007

© Derechos de autor  
Andrea Carolina Landázuri Flores  
2007

*A Dios,*

*a mis padres, Pablo y Carmita,  
quienes me brindaron su ayuda siempre que la necesité,*

*a mi hermano, Pablo,  
a quien le debo el gran cambio que di a mi vida,*

*a mi esposo, David,  
quien me impulsó a seguir adelante y a lograr nuestros  
sueños,*

*a mis sobrinos, Martín, Emilio y Benjamín o Emanuela.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi director de tesis, Gustavo Muñoz Rivadeneira, a mis padres, amigos y amigas, quienes colaboraron en la búsqueda de materiales para la construcción del horno.

A mi tío César Flores por su ayuda en la construcción del sistema basculante para el horno.

Un especial agradecimiento al Ingeniero Patricio Estupiñán, Jefe del Departamento de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional, por la gran ayuda ofrecida durante la ejecución de este proyecto.

## RESUMEN

El diseño y construcción de un horno de crisol para fusión de metales por inducción han sido explorados a partir de cálculos fundamentales y principios que rigen la inducción electromagnética. El horno tiene un volumen de  $1300 \text{ cm}^3$ , con una relación altura-diámetro de 1.43, y 13 espiras de tubería de cobre de  $\frac{1}{4}$  de pulgada. El modelo teórico se realizó en base a la fusión de aluminio y estaño, y el código desarrollado utilizando el programa Matlab<sup>®</sup> es fácilmente modificable, y adaptable a los criterios del usuario. El crisol contenedor es de grafito, cubierto con tela aislante de fibra cerámica, y rodeado de una bobina de cobre que posee conectores para refrigeración de agua y aplicación de corriente. Posee además una estructura externa de concreto aislante sostenido en un sistema basculante que permite el colado del metal fundido. Se proponen varios escenarios para la fusión de distinta cantidad de carga metálica para lo cual se ha establecido que los parámetros de control sean la potencia, frecuencia y densidad de corriente. El proyecto culmina con las experiencias obtenidas durante la fundición de 2 kg de aluminio en el sistema de inducción VIP POWER TRAK 100-30<sup>®</sup> del Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional (EPN). Se sugiere que en próximos proyectos se investigue sobre la posibilidad de acoplamiento del horno construido en el sistema de la EPN, o la construcción de un tablero de control computarizado adecuado para el mismo.

## ABSTRACT

A crucible-type induction furnace for melting metals has been designed and constructed from fundamental principles and equations. The furnace capacity is 1300 cm<sup>3</sup>, with a height-to-diameter ratio of 1.43 and its graphite crucible is surrounded by an induction coil formed by 13 turns of ¼ inches copper tubing. A theoretical model has been formulated based on aluminum and tin melting data, and the programming code has been developed using Matlab<sup>®</sup>. The code can be easily modified if different conditions are to be investigated. The crucible is properly insulated from the coil using ceramic fiber, and the inlet and outlet parts of the tubing has connectors for cooling water and electric current. The crucible-coil system is supported by a concrete structure which is held up by a tilting mechanism to easily pour molten metal. Control parameters of power, frequency and current density were investigated for different metal charges. This project ends with the experience obtained during the visit to the Foundry Laboratory of the Escuela Politécnica Nacional (EPN), where 2 kg of aluminum were melted in the VIP POWER TRAK<sup>®</sup> induction system. The performance of the designed furnace should be investigated in future projects, and this may be achieved by coupling the furnace to the EPN control system or by the creation of a new, suitable and computerized control panel.

## TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	5
1.1 Calentamiento por Inducción Electromagnética .....	5
1.2 Componentes del Sistema de Calentamiento por Inducción.....	7
1.3 Hornos de Inducción Electromagnética.....	11
1.3.1 Hornos de inducción sin núcleo. ....	13
1.3.2 Hornos de inducción con núcleo. ....	14
1.4 Otros Hornos de Tratamiento Térmico.....	15
1.4.1 Hornos tipo batch y continuos.....	16
1.4.2 Hornos según el medio de transferencia de calor .....	16
1.4.3 Hornos de crisol .....	17
1.4.4 Hornos de fusión.....	18
1.5 Ventajas y Desventajas del Calentamiento Eléctrico .....	19
CAPÍTULO II ANÁLISIS TEÓRICO DE DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO.....	21
2.1 Proceso Tecnológico.....	21
2.2 Parámetros Geométricos .....	22
2.3 Balance de Materiales.....	25
2.4 Balances de Energía y Parámetros Eléctricos .....	25
2.4.1 Determinación de Potencia Total Requerida.....	25
2.4.2 Determinación del número de vueltas del bobinado de cobre .....	31
2.5 Análisis Teórico.....	32
2.6 Diseño Teórico y Dimensionamiento.....	45
2.7 Códigos en Matlab®.....	51
CAPITULO III CONSTRUCCIÓN DEL HORNO DE INDUCCIÓN.....	52
3.1 Disponibilidad de materiales .....	52
3.1.1 Crisol de grafito.....	52
3.1.2 Tela aislante de fibra cerámica .....	52
3.1.3 Tubería de cobre.....	52
3.1.4 Estructura aislante externa .....	52
3.1.5 Sistema basculante.....	54
3.1.6 Material complementario.....	54
3.2 Construcción del horno .....	55
3.2.1 Armado del sistema crisol – aislante – serpentín .....	55
3.2.2 Construcción de estructura aislante y sistema basculante.....	55



CAPÍTULO IV FUNDICIÓN DE ALUMINIO EN EL SISTEMA DE INDUCCIÓN VIP POWER TRAK 100-30® .....	64
4.1 Operación del Equipo.....	64
4.2 Fusión de Aluminio en el sistema de inducción VIP POWER TRAK 100-30®	68
4.3 Discusión .....	78
 CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	81
 REFERENCIAS.....	85
 ANEXO A .....	88
A.1 HORNO_INDUCION.m .....	88
A.2 Int3.m.....	88
A.3 IntB60 .....	90
A.4 Perdidas_Calor .....	95
A.5 Escenarios.m.....	96
 ANEXO B .....	99
B.1 Catálogo de Tela Aislante de Fibra Cerámica .....	99
B.2 Concreto Aislante Coral 80®.....	101
B.3 Tubería de cobre flexible Tipo L .....	103
 ANEXO C .....	105

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Sistema de calentamiento por inducción electromagnética.....	6
1.2	Operación de un sistema de calentamiento por inducción .....	8
1.3	Configuraciones típicas de serpentines inductores .....	9
1.4	Pieza cilíndrica ubicada fuera del centro geométrico del serpentín.....	10
1.5	Horno de inducción modelo AMFH de Insertec sin núcleo magnético .....	14
1.6	Horno de inducción con núcleo magnético Modelo PMF .....	15
2.1	Esquema general del sistema crisol-fibra cerámica-serpentín .....	22
2.2	Calor necesario para fundir aluminio y estaño .....	34
2.3	Potencia inducida versus tiempo de calentamiento.....	36
2.4	Densidad de flujo vs. tiempo para diferentes masas .....	36
2.5	Variación de la frecuencia mínima según el diámetro del crisol .....	37
2.6	Densidades de flujo vs. tiempo para fundir 3.5 kg de aluminio a frecuencia mínima y de 60 Hz .....	37
2.8	Número de vueltas de tubos de cobre <i>flexible Tipo L</i> según el tiempo de calentamiento de 3.5 kg de aluminio a varias frecuencias .....	40
2.9	Número de vueltas, de tubos de cobre <i>flexibles Tipo L</i> , necesarias según el tiempo de calentamiento de 9.5 kg de estaño a varias frecuencias .....	40
2.10	Frecuencias de operación según el tiempo de operación para la fusión de 3.5 y 9.5 kg de aluminio y estaño, en un horno con 13 espiras y $J=0.2 \text{ A/mm}^2$ .....	41
2.11	Frecuencias de operación según el tiempo de operación para la fusión de 3.5 y 9.5 kg de aluminio y estaño, en un horno con 13 espiras y $J=0.4 \text{ A/mm}^2$ .....	41
2.12	Porcentaje de pérdida de calor por conducción y por resistencia a la corriente con respecto a la corriente de operación .....	43
2.13	Profundidad de penetración de las líneas de campo magnético del bobinado de cobre con respecto a la frecuencia de operación .....	44
3.1	Crisoles de grafito .....	53
3.2	Presentación tela aislante de fibra cerámica .....	53
3.3	Presentación de tubería de cobre de $\frac{1}{4}$ in.....	54
3.4	Presentación Concreto aislante Coral 80 de 30 kg .....	54
3.5	Sistema crisol-fibra cerámica .....	56
3.6	Sistema crisol-fibra cerámica-serpentín .....	56
3.7	Esquema explicativo de las dimensiones de la estructura externa del aislante Coral 80.....	57
3.8	Moldes de cartón con mangueras para brindar resistencia .....	59
3.9	Moldes con mangueras y forros plásticos .....	59
3.10	Preparación de (a) mezcla y (b) construcción de la estructura 1.....	60
3.11	(a) Colocación de moldes para formación de estructura aislante 2 (b) Formación de paredes .....	61

3.12 Sistema Basculante.....	62
3.13 Sistema crisol-fibra cerámica-serpentín acoplado al concreto aislante .....	62
3.14 Estructura final del horno de inducción.....	63
3.15 Horno de Inducción con 13 espiras y volumen de 1300 cm <sup>3</sup> .....	63
4.1 Diagrama simplificado de la operación del VIP POWER TRAK.....	65
4.2 Diagrama de flujo simplificado del sistema de refrigeración para el VIP POWER TRAK 70	
4.3 Secuencia de pasos a seguir para llevar a cabo la primera fundición del VIP POWER TRAK. ....	71
4.4 Vista superior del horno junto con piezas de aluminio. ....	72
4.5 Vista Frontal del tablero de control.....	73
4.6 (a) Vista lateral del panel de control, (b) Tablero de encendido y apagado del horno. 74	
4.7 Aluminio Fundido.....	76
4.8 Cajones rellenos con óxido de aluminio como moldes.....	77
4.9 Culminación del proceso de fundición. El metal es colocado en moldes.....	78

## LISTA DE TABLAS

1.1	Capacidades y Potencias de los hornos de inducción .....	12
1.2	Consumo energético de algunas aleaciones.....	12
2.1	Propiedades de la carga metálica .....	33
2.2	Propiedades del serpentín de cobre, crisol de grafito y tela aislante.....	33
2.3	Parámetros fijados .....	33
2.4	Dimensiones teóricas del sistema de inducción .....	46
2.5	Especificaciones técnicas de materiales de construcción del horno .....	47
2.6	Potencia Inducida en cargas metálicas contenidas en un crisol de 1.3 L de capacidad y con 13 espiras de tubería de cobre de ¼ in .....	48
2.7	Pérdidas de calor por conducción y por corriente y porcentaje de calor perdido según tamaño de carga y tiempo de operación.....	48
2.8	Frecuencias de diferentes cargas metálicas en un crisol de 1.3 L de capacidad, relación altura-diámetro de 1.43, y 13 espiras de tubería de cobre de ¼ de pulgada .....	49
4.1	Valores registrados durante práctica de fundición.....	75

## INTRODUCCIÓN

La fusión es un proceso físico que consiste en el cambio de estado de la materia, de sólido a líquido. Existen diversos métodos de calentamiento y fusión de materiales metálicos en hornos. Estos son compartimientos en los que se almacena calor generado, sea por medio de la combustión de combustibles, o por medio de electricidad. La mayor parte de hornos de fusión emplean el calentamiento de combustibles produciéndose gases de combustión, los cuales tienen efectos dañinos al ambiente y a los seres vivos. Al proceso completo de fabricación de piezas, comúnmente metálicas, en el que se funde un material y es introducido en un molde, donde se solidifica, se denomina fundición. Es así que durante el proceso de fundición de un metal es necesaria la fusión de éste.

En el Ecuador existen fundidores artesanales que tratan los desperdicios metálicos de cobre, zinc, aluminio y hierro utilizando aceite quemado como combustible, y se ha encontrado que la quema de combustible produce dioxinas y furanos. Éstos son compuestos orgánicos clorados de estructura similar y se forman de manera espontánea como subproductos de procesos industriales en los que interviene el cloro, como en la producción de PVC, o durante procesos de combustión de compuestos organoclorados (ARCA, 2004).

En el Ecuador existe una legislación ambiental que prohíbe el funcionamiento de aquellas plantas de incineración de residuos u de otro tipo de tratamiento térmico,

que no cuenten con sistemas adecuados de control de emisiones. Sin embargo, la condición actual de los empresarios y trabajadores informales es que no poseen ni la capacidad económica, ni la capacitación necesaria para realizar las instalaciones para control de emisiones adecuadas (Jiménez y Wiesner, 2005).

Los hornos de inducción, en cambio, forman parte de los hornos eléctricos, y éstos ofrecen múltiples ventajas sobre los hornos calentados por combustible. El calentamiento se produce por la resistencia que ofrece el material metálico a las corrientes inducidas por un campo magnético generado por una bobina, usualmente de cobre. Durante éste proceso no existe emanación de gases, ni suciedad, polvos o ceniza como ocurre durante procesos de calentamiento utilizando combustibles, o en los que la pieza está expuesta a atmósferas de lecho fluidizado o de baños líquidos.

Adicionalmente, el calentamiento y fusión por inducción propone una conversión de electricidad en calor mucho mayor que la proporcionada por los hornos de combustible. El método de tratamiento térmico por inducción no se restringe al calentamiento y fusión de metales, sino también a materiales como el vidrio, plástico, entre otros (Ordoñez, 2004; González, 2005).

A nivel mundial, existen diversos proyectos que pretenden mejorar los procesos de fundición por combustible y por inducción, y afectan directamente a los campos del reciclaje y minero-metalúrgico. En países más industrializados que el Ecuador, la fundición por medio de combustible está siendo sustituida por el método de inducción, y éste último, abarca un área que todavía no se ha desarrollado en el Ecuador. No obstante, la conciencia del cuidado del medio ambiente y de la salud se manifiesta en algunas investigaciones, como es la de la Escuela Politécnica del

Litoral, en la que se propone, utilizar una mejor mezcla de combustibles durante la fusión de metales, que como consecuencia reducen las emisiones de dioxinas y furanos y por lo tanto, los problemas ambientales y de salud. Este proyecto se llama “Mejoramiento de la Operación de Horno de Fusión por medio del uso de Quemadores de Combustible Mixto Enriquecido con Oxígeno,” y propone cambios en cuanto a los métodos de calentamiento de hornos de fusión por medio de combustible (Jiménez y Wiesner, 2005).

Por los antecedentes planteados anteriormente, se ha propuesto diseñar y construir un horno de inducción sin núcleo de  $1300 \text{ cm}^3$  de capacidad y comprobar que éste funda la cantidad de material metálico deseada bajo las condiciones especificadas y encontradas a partir de la aplicación de ecuaciones de diseño y balance de materiales y energía. Se realizará una fundición de aluminio utilizando el sistema de inducción del Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), y se analizará la posibilidad del funcionamiento del horno construido con el tablero de control de la EPN.

En esta tesis el lector encontrará cinco capítulos dentro de los cuales se explican los fundamentos teóricos detrás del principio de inducción electromagnética, su aplicación en los tipos principales de hornos de inducción, el diseño teórico del horno propuesto, el método de construcción del mismo, y los resultados y conclusiones pertinentes.

Se espera que este proyecto atraiga a personas y las conciencie sobre la importancia del reciclaje del material metálico. Además, se propone esta tesis como herramienta para los estudiantes de ingeniería que estén interesados en desarrollar

nuevos métodos de fusión, o mejorar los actuales. De esta forma no solo se puede reducir el impacto ambiental y convertir estos procesos en unos ambientalmente amigables; sino que también, la salud de las personas que trabajan en las fundiciones de desperdicios metálicos se verá menos afectada. Por otro lado, se considera que la aplicación de nuevos métodos de fundición permitirá generar nuevas fuentes de trabajo, sobre todo para aquellos trabajadores informales que conocen sobre la inducción, transformadores de energía, y otros temas relacionados, pero que sólo han aplicado sus conocimientos en lo que comúnmente se utiliza. Este proyecto es uno integral que abarca no sólo conocimientos de ingeniería química, sino otras ramas de la ingeniería como la eléctrica, ambiental y civil.



## CAPÍTULO I

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 1.1 Calentamiento por Inducción Electromagnética

El calentamiento por inducción es frecuentemente utilizado en procesos de fusión y calentamiento de materiales que pueden conducir electricidad como es el caso de los metales. Este fenómeno ocurre debido a la resistencia que tiene el metal a las corrientes eléctricas producidas o inducidas por un campo electromagnético. Todos los metales tienen resistencia a la electricidad, y esto provoca pérdidas en la potencia manifestándose en forma de calor (Ordoñez, 2004; Callebaut y Laborelec, 2007). Mientras menor sea la resistencia que posee un material al flujo de corriente, menor será la pérdida de calor durante ese proceso, y el material sería considerado como un buen conductor de electricidad. James Joule desarrolló la ecuación [1.1] que describe el efecto de disipación de potencia, de la siguiente manera:

$$P = i^2 R \quad [1.1]$$

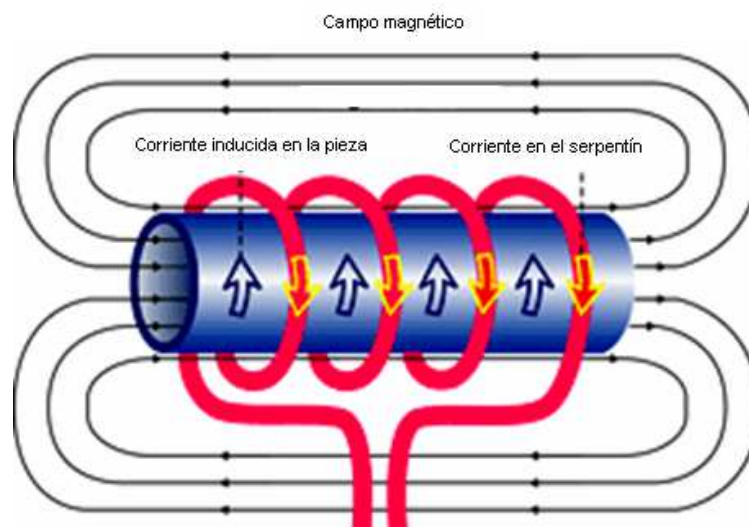
donde:

$P$ : pérdidas de calor debido a la resistencia a la corriente [W],

$i$ : corriente eléctrica [A], y

$R$ : resistencia del material [ $\Omega$ ].

Un sistema básico de calentamiento por inducción básicamente comprende de una fuente de electricidad y del material a ser calentado. La fuente consiste en un serpentín o bobina, usualmente de cobre, y el material debe ser un metal como se muestra en la Figura 1.1. A su vez, el bobinado actúa como un transformador primario, y el metal a ser fundido o calentado, como un transformador secundario. Cuando una corriente alterna se aplica al transformador primario se crea un campo magnético alterno, y de acuerdo a la Ley de Faraday, si el transformador secundario es colocado en medio del campo magnético, se inducen corrientes eléctricas en el metal. Como consecuencia, el metal se calienta debido a la resistencia que posee al paso de la corriente. Las corrientes fluyen en contra de la



**Figura 1.1** Sistema de calentamiento por inducción electromagnética. Tomado de: Induction Atmospheres, 2007.

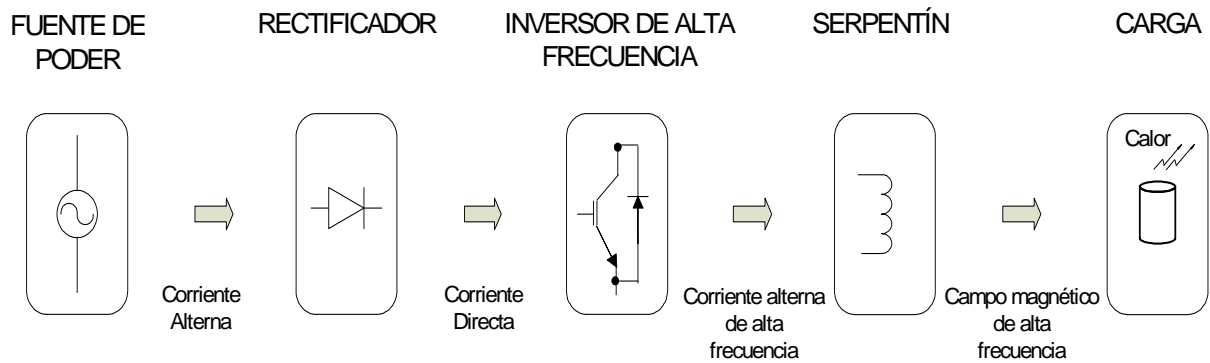
resistividad eléctrica del metal, generando un calentamiento localizado y preciso sin necesidad de un contacto directo entre el serpentín y la pieza (Haimbaugh, 2001; Induction Atmospheres, 2007). Se conoce a la resistividad como el inverso de la conductividad eléctrica. En la sección 1.2 se explica en detalle los componentes que constituyen el sistema de calentamiento por inducción.

## **1.2 Componentes del Sistema de Calentamiento por Inducción**

El sistema de calentamiento por inducción comprende los siguientes componentes básicos: a) fuente de poder, b) estación de calentamiento, c) serpentín o bobina inductora, y d) carga metálica. En la Figura 1.2 se resume el proceso que se lleva a cabo durante el calentamiento.

La fuente de poder recibe la corriente alterna (CA) que debe ser rectificadora y regulada, es decir que es transformada en una corriente directa (CD). La corriente rectificadora es alimentada al convertidor de frecuencia que permite generar un campo magnético en el serpentín. La frecuencia de operación de la corriente tiene una relación inversamente proporcional con la profundidad de penetración de las líneas de flujo magnético sobre la carga. La corriente inducida es más intensa en la superficie y decae rápidamente bajo la superficie. De hecho, el 80% del calor producido en la pieza se concentra en la superficie, conocida también como piel exterior (Haimbaugh, 2001; González, 2005).

A menor frecuencia, mayor es la profundidad de penetración y el efecto es menos superficial. Se deduce entonces que las frecuencias bajas son efectivas para

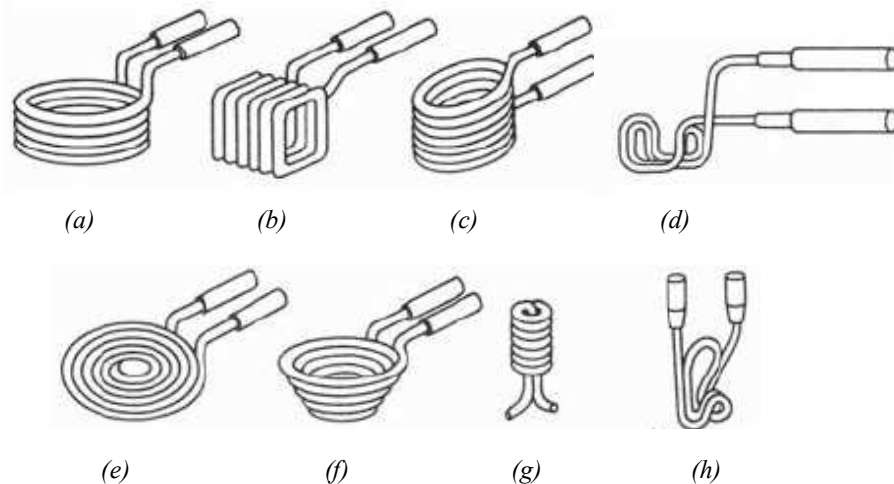


**Figura 1.2** Operación de un sistema de calentamiento por inducción. Tomado de: <http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9012.pdf>, 2000.

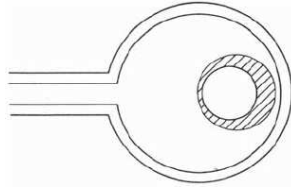
materiales gruesos que requieren mayor penetración de calor, y las altas para piezas pequeñas donde se demanda menos penetración. Se considera como frecuencia baja a aquella que esté en el rango de los 50 Hz hasta 30 kHz, y como frecuencia alta a la que esté dentro del rango de 100 a 400 kHz. A nivel de calentamiento y fusión microscópica la frecuencia puede llegar hasta los 60 MHz. Además, se genera calor más rápidamente cuanto mayor es la frecuencia.

La velocidad de calentamiento de la carga depende de la potencia de la fuente. Aquellos equipos que trabajan a potencias altas de 50 a 250 kW requieren de la circulación de agua de enfriamiento en el inversor de frecuencia e incluso en el serpentín. La estación de calentamiento posee capacitores de resonancia que tienen por objetivo ajustar la frecuencia y el voltaje de operación. Éstas son normalmente enfriadas por circulación de agua y conforman las terminales de conexión eléctrica y de agua de enfriamiento para los tubos del serpentín. El serpentín inductor tiene la forma geométrica de la pieza y está fabricado con tubos de cobre. Si es que la carga

a fundir es cilíndrica, entonces el inductor tendrá forma solenoidal (Curtis, 1950; <http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9012.pdf>, 2000; Ordoñez, 2004; González, 2005). Existen otras configuraciones como son las rectangulares, redondas, de lazo simple o múltiple, entre otras, como se muestra en la Figura 1.3. Además existen varias consideraciones a la hora de diseñar el serpentín inductor. El serpentín debe estar lo más cerca posible a la pieza para asegurar una transferencia de energía efectiva; el flujo magnético se concentra más en la parte cercana a las vueltas de cobre como se puede evidenciar en la Figura 1.4. Por otro lado, se desea que exista un mayor número de líneas de flujo magnético que atraviesen la carga metálica, pues al aumentar la densidad de flujo, aumenta la corriente generada en la pieza (Zinn y Semiatin, 1988).



**Figura 1.3** Configuraciones típicas de serpentines inductores. (a) Redonda, (b) rectangular, (c) formada, (d) para calentamiento localizado, (e) pancake, (f) hélice-espiral, (g) interna, (h) localizada. Tomado de: Curtis,1950.



**Figura 1.4** Pieza cilíndrica ubicada fuera del centro geométrico del serpentín. Sección sombreada indica que la mayor parte de flujo está concentrada en la parte cercana a la bobina. Tomado de: Zinn y Semiatin, 1988.

El calentamiento por inducción se aplica normalmente sobre materiales ferromagnéticos. Éstos se calientan más fácilmente que los materiales diamagnéticos, es decir, los no-magnéticos, pues existe un calentamiento adicional por el efecto de histéresis. La histéresis es la oscilación producida por la fricción de los dipolos magnéticos del material que se encuentran bajo la acción del campo electromagnético alternado. En otras palabras, la histéresis se puede entender como la resistencia natural de los materiales al cambio rápido en el sentido del flujo magnético. Por el contrario, los materiales diamagnéticos generan en sí mismo un campo magnético opuesto, que debilita el campo magnético exterior. La permeabilidad magnética de un material es la medida de esta resistencia, y valores cercanos a uno representan a los materiales diamagnéticos, en tanto que para los ferromagnéticos, los valores varían entre 100 y 500 (Haimbaugh, 2001; González, 2005). A partir de esto, se tiene que a mayor permeabilidad, menor profundidad de penetración y en consecuencia es mayor la rapidez de calentamiento.

Es importante señalar que la inducción puede ser aplicada también en la transferencia de calor a materiales como el vidrio, plástico, entre otros; como también en procesos de calentamiento de fluidos, secado de pinturas y sellado de plásticos. Para esto se debe hacer uso de materiales metálicos, para que actúen como medio de calentamiento. Un ejemplo claro y sencillo de éste mecanismo, es una olla arrocera. En este caso, un serpentín tipo pancake es el transformador primario, y la olla el secundario. Se produce el calentamiento de la superficie de la olla y en consecuencia el arroz se cocina debido al calor emanado durante el proceso (<http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9012.pdf>, 2000; González, 2005).

### **1.3 Hornos de Inducción Electromagnética**

Los hornos de inducción pertenecen a la clasificación de hornos eléctricos y de fusión de materiales férreos o no férreos, según sea el requerimiento. Existen dos tipos principales de hornos que son: los de inducción sin núcleo y los de inducción con núcleo. Ambos hornos se clasifican por su frecuencia de trabajo de la siguiente manera: a) hornos de baja frecuencia o frecuencia industrial que operan 50 ó 60 Hz, 150 ó 180 Hz, y 200 Hz; b) hornos de media frecuencia con un rango de 200 a 10000 Hz; y c) hornos de alta frecuencia que trabajan sobre los 10000 Hz. En la Tabla 1.1 se presentan las capacidades y potencias comunes de los tres tipos de hornos según las frecuencias de operación, y en la

Tabla 1.2 se presenta algunos ejemplos de materiales metálicos y los respectivos consumos energéticos en hornos de media frecuencia cuando éstos son fundidos (Ordoñez, 2004).

**Tabla 1.1** Capacidades y potencias de los hornos de inducción.

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Capacidad (kg)</b>	<b>Potencia (kW)</b>
Baja	6000 a 60000	1000 a 17000
Media	2 a 10000	3 a 3000
Alta	Nivel laboratorio o tamaño escala	

**Tabla 1.2** Consumo energético de algunas aleaciones.

<b>Metal o Aleación</b>	<b>Consumo energético [kWh/Ton]</b>
Acero	620
Bronce	420
Aluminio	610

Como se mencionó en la sección 1.2, mientras más grande sea la carga a fundirse, se requerirá menos frecuencia, y se observa que las capacidades a baja frecuencia pueden llegar a ser realmente grandes: de 6 hasta 60 toneladas de material a ser fundido. La frecuencia de operación no solo depende del tamaño de la carga, sino también de la resistividad que ésta presenta. Como una idea general, se encuentra que el consumo energético, al llevar a cabo la fusión de 1 tonelada de aluminio, acero y bronce, es de aproximadamente 600 kWh.

Se tiene entonces que los parámetros de diseño más importantes son: a) el material a ser fundido, b) el tamaño del horno definido por la máxima cantidad de carga, c) la potencia según el calor específico, la masa, la producción hora necesaria, y posibles pérdidas de calor, y d) la frecuencia, definida en general por las



propiedades del material y su tamaño. Según la Materials Information Society el porcentaje de calor perdido durante el proceso es de aproximadamente 50% (Haimbaugh, 2001); es decir que, si la potencia que debe ser inducida a la pieza es de 25 kW, la potencia operacional debe ser 50 kW.

**1.3.1 Hornos de inducción sin núcleo.** Consisten en un crisol de material refractario, que es un material que posee relativamente baja conductividad pero no permite el paso de corriente, en el que se coloca una carga metálica y es rodeado de una bobina de cobre, refrigerada, por la cual circula corriente. El campo electromagnético generado induce corrientes en la carga. Estas corrientes son conocidas también como corrientes parásitas o de Foucault. La bobina viene a ser el primario de un transformador y el metal es el secundario, y las transformaciones de energía que se llevan a cabo durante el proceso son: en el primario, de energía eléctrica en magnética; y en el secundario, de energía magnética en eléctrica, y de energía eléctrica en energía calórica (Serway, 1990; Ordoñez, 2004).

En este tipo de calentamiento no es necesario el contacto directo y mientras más delgada sea la pared de refractario, el rendimiento de fusión es mayor. En cuanto a la temperatura de la bobina, no debe exceder los 318 K; pasados los 333 K los canales pueden verse afectados debido a la formación de incrustaciones. Para este fin se debe emplear un sistema de refrigeración adecuado de la bobina. Por otro lado, la frecuencia de alimentación a la bobina depende de la resistividad del material y del diámetro del crisol; además, es importante reconocer que a menor carga metálica, mayor es la frecuencia requerida (Zinn y Semiatin, 1988; Ordoñez, 2004). Adicionalmente, la potencia será fijada a partir de la masa a ser fundida y del

tiempo de operación. En la Figura 1.5 se puede visualizar un horno típico de inducción sin núcleo magnético que incluye el crisol, sistema basculante, bobina de inducción y sistema de refrigeración.

**1.3.2 Hornos de inducción con núcleo.** Los componentes de estos hornos son básicamente los mismos que los anteriores, excepto en que en lugar de poseer un sistema de refrigeración se utilizan núcleos constituidos de acero al silicio como se muestra en la Figura 1.6. La acción del campo electromagnético en la parte externa de la bobina puede provocar el sobrecalentamiento de ésta, por lo que, la bobina atraviesa los núcleos los cuales actúan como blindaje, y de esta forma se evita la dispersión del campo electromagnético externo (Insertec, 2005b).



**Figura 1.5** Horno de inducción modelo AMFH de Insertec sin núcleo magnético. Tomado de: Insertec, 2005a. Este horno incluye un sistema basculante que permite el colado del metal líquido.



**Figura 1.6** Horno de inducción con núcleo magnético Modelo PMF Tomado de: Insertec, 2005b.

#### **1.4 Otros Hornos de Tratamiento Térmico**

Existen diversos tipos de hornos de tratamiento térmico que se distinguen por su funcionamiento, diseño, tamaño, fuente de calentamiento, temperatura de operación, medio de transferencia, y demás. Básicamente los hornos pueden ser de tipo batch o continuo, y según los requerimientos y proceso tecnológico los hornos pueden operar bajo cierto tipo de atmósferas, sea al vacío, en atmósferas gaseosas, en baño líquido, o lecho fluidizado. Por otro lado, se tienen también los hornos de fusión de materiales férricos y no férricos; también, hornos que pueden ser calentados mediante combustibles en forma directa o indirecta, en cuyo caso la pieza queda aislada de los gases de combustión; y existen, además, hornos que son calentados

por resistencia eléctrica. A continuación se presenta una clasificación general de los tipos de hornos existentes en el mercado y sus principales características.

**1.4.1 Hornos tipo batch y continuos.** Cuando se carga al horno una determinada cantidad de muestra y se cierra el horno para que empiece el tratamiento térmico durante un tiempo preestablecido, se emplean hornos tipo batch. A diferencia de éstos, en los de tipo continuo, la carga es empujada periódicamente a la entrada del horno y es transportada usualmente por medio de un sistema de poleas y cadenas con rodillos. Además, los hornos continuos constarán siempre de una entrada y de una salida por las cuales fluye el material. Éstos pueden ser calentados por eléctricamente y trabajar en distintas atmósferas.

**1.4.2 Hornos según el medio de transferencia de calor.** En general, la elección de la atmósfera en un horno a la cual está expuesta la muestra, se basa en el nivel de protección que se requiere para evitar cambios en las condiciones iniciales y evitar cambios superficiales de ésta. Las atmósferas gaseosas más comunes que se utilizan en la industria son: a) naturales – aire convencional, b) de productos de combustión, c) exotérmicos, d) endotérmicos, e) de nitrógeno, f) de vacío, g) de amoníaco disociado, h) de hidrógeno seco, argón, entre otros. Además de las atmósferas gaseosas, existen hornos de baño líquido en los que las piezas son sumergidas en líquidos que sirven como un medio eficiente para calentarlas y permiten que queden totalmente protegidas.

Un sistema simple de calentamiento por inmersión de la pieza consta de un recipiente metálico que contiene una sal de bajo punto de fusión y posee calefactores eléctricos, y la temperatura de operación es de 448 a 623 K. También se pueden

utilizar hornos de sales tipo electrodo inmerso y sumergido en los que el calor es producido por la resistencia al flujo de corriente a través de la sal fundida desde un electrodo a otro, y así se crea una agitación en el sector de los electrodos que genera temperaturas uniformes dentro del baño. Los hornos de sales producen calentamiento por convección, en el caso de los de tipo electrodo inmerso, y por conducción y radiación; de ahí que, la velocidad de calentamiento es mucho mayor que en el caso de los hornos de atmósfera gaseosa.

Con el fin de incrementar la velocidad de transferencia de calor, se puede utilizar hornos de lecho fluidizado de partículas inertes como el óxido de aluminio. Éste permite un flujo calórico de hasta diez veces más que en el de hornos convencionales de calentamiento directo y que en el de baños de sales. Las partículas no se adhieren a las piezas, poseen un comportamiento casi constante, y pueden utilizarse para tratamiento térmico de materiales ferrosos y no ferrosos. Existen dos tipos de hornos de lecho fluidizado: de calentamiento interno y de calentamiento externo. En el primero la mezcla combustible gas/aire se encuentra en una cámara de pleno ubicada debajo de la cámara donde se encuentran las piezas, mientras que, en el segundo, la mezcla gaseosa se encuentra en contacto directo con las partículas del lecho, y se combustiona inicialmente en la parte superior hasta estabilizarse sobre el contenedor cerámico o de metal.

ERROR: syntaxerror  
OFFENDING COMMAND: --nostringval--

STACK:

false