UNIVERSIDAD SIMÓNBOLÍVAR
CORDINACIÓN DE INGENIERIA ELÉCTRICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BOBINA DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN PARA FUNDICIÓN DE TITANIO

POR
WINDER GONZALEZ

PROYECTO DE GRADO
PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

Sartenejas, Abril de 2008

UNIVERSIDAD SIMÓNBOLÍVAR
CORDINACIÓN DE INGENIERIA ELÉCTRICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BOBINA DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN PARA FUNDICIÓN DE TITANIO

POR
WINDER GONZALEZ

TUTOR: DR. JOSÉ MANUEL ALLER
CO-TUTORES: DR. LÁSZLÓ SAJÓ-BOHUS, DR. JULIO SERGIO WALTER HORVATH

PROYECTO DE GRADO
PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

Sartenejas, Abril de 2008

UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
Decanato de Estudios Profesionales
Coordinación de Ingeniería Eléctrica

ACTA DE EVALUACIÓN DEL PROYECTO DE GRADO

CÓDIGO DE LA ASIGNATURA: EP 3201 FECHA: 17/7/08

ESTUDIANTES: WILDER GONZÁLEZ CARNET: 0133925

_____ CARNET: _____

TÍTULO DEL TRABAJO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BOBINA DE INDUCCIÓN PARA FUNDICIÓN DE TITANIO.

TUTOR: Prof. _____ CO-TUTOR: Prof. _____

JURADO: Profs. _____

APROBADO: [X] REPROBADO: [ ]

OBSERVACIONES: TRABAJO BUENO Y MERITORIO DEBIDO A LAS DIFICULTADES EXPERIMENTALES QUE HA DEBIDO ENFRENTAR EL ESTUDIANTE

El Jurado considera **por unanimidad** que el trabajo es EXCEPCIONALMENTE BUENO:

SI [ ] NO [X]

En caso positivo, justificar razonadamente: _____

UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
CONVERSIÓN DEPARTAMENTO ELECTRÓNICA

ROBERTO ALVES

Jurado **Jurado**

Tutor Académico

Co-Tutor **Jurado**

Nota: Colocar los sellos de los respectivos Departamentos. Para jurados externos, usar el sello de la

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BOBINA DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN PARA FUNDICIÓN DE TITANIO

POR

WINDER GONZALEZ

RESUMEN

El titanio al ser un metal ligero, fuerte, resistente al calor y la corrosión, inerte a los fluidos corporales humanos, es ideal para estructuras de sustitución médica y piezas sometidas a condiciones críticas tales como, la elaboración de blindajes de material radioactivo. La obtención de titanio puro, a partir de los minerales que lo contienen, se logra mediante métodos químicos en atmósfera inerte, evitando la oxidación debido a la afinidad con el oxígeno y otros metales. La transformación del titanio mediante fundición, forja o soldadura se caracteriza en función del volumen, precisión y complejidad de la pieza que se desea elaborar. La fundición de titanio se realiza en el caso de piezas de diseño complejo que hacen difícil el forjado o mecanizado de las mismas. Existen dos métodos principales para la fundición de piezas de titanio, el moldeo de grafito apisonado y el moldeo a la cera perdida. La fundición mediante inducción magnética es un método de no contacto de gran eficiencia, aplicable a la transformación de piezas de titanio. En este trabajo se diseña y construye una bobina de calentamiento por inducción para fundición de metales, en particular orientado a la elaboración de piezas de titanio de interés en aplicaciones médicas y nucleares. Se expone el diseño y construcción de un equipo funcional con una extensión a un posible desarollo comercial, la descripción del sistema, constituido por una cámara de fundición, un sistema de alimentación de gas, agua y energía eléctrica. Se exponen los detalles de cada pieza que constituye el sistema, dificultades en la realización y construcción, problemas encontrados en los materiales y las soluciones aportadas para lograr los objetivos de la tesis. Finalmente se reportan y se discuten los resultados obtenidos.

Dedicatoria

A mi madre y hermano

mi inspiración.

Agradecimientos

A mi equipo de logística, apoyo y amor.. Mi Madre (Carmen Auristela Gonzalez), Mi Hermano (Argenis Rodriguez), Fernando Santana, Lisbeth Chiquin, Andrea, Argenis y Gabriel.

A mi equipo profesional. Quienes representarón la inspiración y motivación para alcanzar el final de este humilde trabajo. Laszlo Sajo Bohus, Julio Walter, Jose Manuel Aller, Raul Colters, Humberto Suazo, Haydn Barros, Juan Carlos Rodriguez.

A mi equipo técnico y de apoyo moral. Judilka Bermudez, Johnny Castillo, Lyzeth Abdala.

Y por último y no menos importante, a todos mis amigos, quienes han estado a mi lado en el comienzo , el andar y el final de este trabajo. Astrid Torres, Maria Oliveros, Karim Rudman, Andres Bohus, Violeta Garcia, David Briceño, Luis Carlos Almada, Alicia, Omar Martinez, Felix Rodriguez, Edison Paz, Jesus Cordero, Daniel Torres, German Riera, Alexander Rangel, Magaly Meza, Carlos Leal. Pido disculpas si no menciono a todos..!

Familia, profesores y amigos, simplemente..... Gracias....!

Índice general

1. INTRODUCCIÓN **1**

2. MARCO TEÓRICO **4**

2.1. Principio de calentamiento inductivo 4

2.2. Geometrías y aplicaciones 8

2.3. Conceptos teóricos 8

2.4. Diseño básico de inductores 12

2.4.1. Principios de fabricación 12

2.4.2. Modelo eléctrico 15

2.5. Generación de calor 18

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN **20**

3.1. Bobina de inducción 20

3.2. La carga 23

3.3. Elección del crisol 24

3.4. Presión parcial de oxígeno 27

3.5. Cámara de fundición 28

4. MODELADO DEL SISTEMA **31**

4.1. Método númerico de elementos finitos (*MEF)*. 32

4.2. Modelo 32

4.2.1. Cálculo de parámetros eléctricos 34
4.2.2. Cálculo de frecuencia de trabajo 36
4.2.3. Cálculo de constante de acoplamiento 37
4.2.4. Transferencia de calor 38
4.2.5. Resistividad, conductividad y temperatura 38

5. PROTOTIPO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES 41

5.1. Sistema de intercambio de gases 43
5.2. Autotransformador trifásico y voltaje rectificado 44
5.3. Potencia activa y factor de potencia 45
5.4. Temperatura 46

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES 49

Índice de tablas

I. Tabla de valores de energía libre de reacción (ΔG_R°) para las reacciones descritas en las ecuaciones (3.3) y (3.4). 25

II. Tabla de valores de energía libre de reacción (ΔG_R°) para la reacción descrita en la ecuación (3.5). 26

III. Valores de energía libre de reacción (ΔG_R°) y presión parcial de oxígeno necesaria para la reacción descrita en la ecuación (3.6). 27

IV. Resumen de propiedades físicas empleadas en el diseño y simulación de la cámara de fundición. 35

V. Tabla de parámetros calculados mediante FEMM 4.0, para el modelo eléctrico del conjunto *bobina-pieza*, equivalente serie. 37

Índice de figuras

2.1. Campo magnético $\vec{B}$, producido por un inductor. 6

2.2. Pérdidas por histéteresis 7

2.3. Región de transición. 9

2.4. a) Distrubución de la densidad de corriente en la sección transversal para una espira de un conductor sólido a 1KHz, con perfil rectangular. b) Distrubución de la densidad de corriente en la sección transversal para una espira de un conductor hueco a 1KHz, con perfil rectangular. 12

2.5. Elementos básicos de un sistema de fundición por inducción. 13

2.6. Patrón de calentamiento inductivo en una barra cilíndrica, producido por una bobina de una sola espira. 14

2.7. Modelo eléctrico del conjunto bobina-pieza, equivalente transformador. 15

2.8. Modelo eléctrico del conjunto bobina-pieza, equivalente serie. 17

3.1. Diseño de bobina de inducción, vista lateral y superior. 21

3.2. a) Comparación de patrones de calentamiento producidos por un tubo circular vs. rectangular. b) Patrón de calentamiento en una pieza cilíndrica usando una bobina de sección rectangular. 23

3.3. Cámara de fundición. 29

3.4. Esquema de interconexiones de válvulas. 30

4.1. Modelo de bobina de inducción para simulación en FEMLAB 3.0. a) Proyección vertical de la cámara de fundición. b) Modelo en 3D de la cámara de fundición. c) Modelo en 3D de la bobina de inducción. . . . 33
4.2. Modelo en FEMM 4.0 : a1) Porción superficial de la pieza de titanio y camisa de grafito consideradas para el cálculo de los parármetros eléctricos, a2) Sección transversal de bobina de inducción. b) Malla de 2775 nodos y segmentos para identificación de condiciones de borde e identificación de propiedades físicas. 36
4.3. Modelo en FEMLAB 3.0 : a1) Pieza de titanio, a2) Argón, a3) Crisol de alúmina, a4) Tubo de cuarzo, a5) Flujo de agua, a6) Aire, a7) Sección transversal de bobina de inducción, a8) Camisa de grafito para precalentamiento. b) Segmentos para identificación de condiciones de borde. c) Áreas internas para identificación de propiedades físicas. . . 39
4.4. a) Malla generada por 15364 nodos para simulación de la cámara de fundición b) Solución obtenida en la simulación de la cámara de fundición para transferencia de calor con una corriente de 250A a 50kHz de frecuencia por 180 segundos. 40

5.1. Esquema de montaje experimental. A) Tablero principal. B) Interruptor. C) Toma trifásica. D) Autotransformador trifásico (208V-12A). E) Generador. F) Llave de paso para suministro de agua. G) Desagüe. H) Sistema de válvulas y mangueras para intercambio de gases. I) Bomba de vacío. J) Cilindro de argón. K) Cámara de fundición. L) Línea de transmisión y bobina de inducción. M) Interconexiones de bronce. . . . 42
5.2. Fotografías del montaje experimental. A) Interconexión de válvulas y mangueras para intercambio de gases. B) Vista superior cámara de fundición, línea de transmisión y conexiones de agua al generador. C) Vista superior bomba de vacío. D) Conexión del cilindro de argón al sistema de válvulas. E) Vista general del montaje. 43

5.3. Esquema eléctrico del montaje experimental. 44
5.4. Gráfico de tensiones de fase vs. voltaje rectificado por el generador. ★) Fase U. ◆) Fase V. ●)Fase W. 45
5.5. Gráfico de potencia activa y factor de potencia vs. tensión regulada por el generador. ●)Potencia activa (W). ★) Factor de potencia. 46
5.6. Gráfico de voltaje rectificado por el generador vs. temperatura en el borde y centro de la carga de $0{,}15 \cdot 10^{-3} Kg$ de hierro. ●) Temperatura en el centro °C. ★) Temperatura en el borde °C. 47
5.7. Carga: $0{,}15 \cdot 10^{-3} Kg$ gramos de hierro, Temperatura promedio 1105 °C 48

Lista de símbolos y abrevaturas

$\vec{B}$: Vector de campo magnético.

$\vec{E}$: Vector de campo eléctrico.

ϵ_0: Constante de permitividad, $(8{,}85 \cdot 10^{-12} F/m)$

$\vec{S}$: Vector normal a la superficie.

ε: Fuerza electromotriz.

R_{eq}: Resistencia equivalente de la pieza a calentar.

q: Carga eléctrica.

E: Campo eléctrico.

N: Número de espiras del inductor.

ϕ_B: Flujo de campo magnético.

i_f: Corriente inducida o *corriente de Foucault*.

P: Potencia eléctrica.

B: Módulo de campo magnético.

ρ: Resistividad eléctrica.

l: Longitud.

f: Frecuencia de trabajo.

μ_0: Permeabilidad magnética del vacío, $(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} H/m)$.

μ_r: Permeabilidad magnética relativa.

σ: Conductividad eléctrica.

K_R: Factor de corrección de la resistencia equivalente.

η_{cal}: Rendimiento del calentamiento.

k: Constante de acoplamiento.

I: Corriente eléctrica.

Jo: Densidad de corriente.

f_{cr}: Frecuencia de trabajo crítica.

L_P: Inductancia de la bobina de inducción.

L_S: Inductancia que forma la espira que aparece en la carga por efecto piel.

R_S: Resistencia óhmica que forma la espira que aparece en la carga por efecto piel.

M: Inductancia mutua entre la bobina de inducción y la carga.

Z_P: Impedancia equivalente de un inductor simple (*no acoplado*).

Z_S: Impedancia superficial.

R_N :Resistencia óhmica por vuelta.

Z_t: Impedancia equivalente total serie vista por los terminales del *primario*.

Z_{PS}: Impedancia equivalente del *secundario* del transformador y una carga cuando aparecen reflejadas en el circuito primario.

R'_S: Resistencia óhmica de la carga reflejada en el *primario* del transformador.

L'_S: Inductancia de valor negativo de la carga reflejada en el *primario* del transformador.

R_P: Resistencia óhmica de la bobina de inducción.

L_t: Inductancia asociada a la línea de trasmisión, acoples eléctricos y otras inductancias parásitas.

Q: Calor.

c: Capacidad calorífica.

T_{final}: Temperatura final.

t: Tiempo.

r: Radio.

h: Altura.

D: Diámetro.

l_{tubo}: Longitud de la tubería de cobre.

ΔG°_R: Energía libre de reacción.

$P(O_2)$: Presión parcial de oxígeno.

I_0: Corriente eléctrica para la simulación.

Js_0: Densidad de corriente superficial en cada espira de la bobina.

T: Temperatura.

T_0: Temperatura de referencia.

α_0: Coeficiente térmico a temperatura de referencia T_0.

ρ_0: Resistividad eléctrica a temperatura de referencia T_0.

f_r: Frecuencia de trabajo en resonancia serie.

A: Potencial vectorial magnético.

a: Área asociada al cálculo integral de inductancia mutua entre la bobina de inducción y la carga.

J: Densidad de corriente.

dV: Diferencial de volumen.

C: Capacitor de compensación.

m: Masa.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Todos los materiales conductores de electricidad ofrecen una resistencia al flujo de las cargas eléctricas, dicha resistencia produce la transformación de la energía eléctrica en energía térmica, ocasionando así un incremento de temperatura en el material conductor, esta transferencia de energía es descrita por la *ley de Joule*[3]. El calentamiento por inducción electromagnética es una aplicación directa de la *ley de Faraday-Maxwell*.

En el pasado la producción de calor por medio de inducción fue considerada una transformación de energía indeseable. Sin embargo, esta visión cambia a partir del estudio de las corrientes parásitas inducidas por campos magnéticos variables en el tiempo, conocidas también con el nombre de *corrientes de Foucault* y en particular el uso de la corriente alterna a mayor frecuencia de trabajo [1]. Es en este momento cuando comienzan a desarrollarse sistemas basados en el aprovechamiento de estos fenómenos. El calentamiento inductivo también se basa en el principio descrito por *Joule*, en la producción de calor por corrientes inductivas en el material conductor, en el cual se desea producir una modificación. A este propósito se requiere de una bobina de particular geometría en la cual se produzca un campo magnético uniforme. El material introducido en un campo magnético variable experimenta la formación

de corrientes parásitas que son las fuentes de calor.

El titanio posee características particulares tales como una alta temperatura de fusión y una gran afinidad a reaccionar a temperaturas elevadas con el oxígeno y algunos metales, lo cual dificulta el proceso de fundición, en este sentido el diseño de la bobina de inducción debe considerar una eficiente ubicación de la pieza a fundir, la existencia de una atmósfera inerte suministrada mediante un sistema de intercambio de gases así como un mecanismo de refrigeración para evitar el recalentamiento de la bobina, estas consideraciones han de ser los aspectos básicos que enmarquen el proceso de diseño. En la práctica el proceso de fundición de piezas de poco volumen y con exigentes requerimientos de calidad tales como prótesis óseas y dentales es elaborado mediante calentamiento inductivo, lo cual estimula el desarrollo de este trabajo a fin de realizar un sistema experimental con un posible desarrollo comercial.

Existen trabajos anteriormente realizados en esta área tales como el estudio de la *Influencia de los Componentes Parásitos en el Análisis y Diseño de Inversores Resonantes Paralelo para Aplicaciones de Calentamiento por Inducción* [4], donde se desarrollan en gran detalle los conceptos aquí tratados así como también el *Desarrollo de un horno de inducción con control de potencia usando técnicas de modulación sobre una carga resonante* [1]. Este trabajo pretende establecer una referencia en el estudio del proceso de fundión de metales mediante inducción electromagnética, respaldado en el registro del proceso de manufacturación, cálculos y observaciones.

El desarrollo de este trabajo fué ejecutado en varias etapas las cuales contemplan la revisión bibliográfica, la construcción de dos prototipos evaluados mediante simulación que posteriormente conyevaron a la elaboración de un sistema experimental final. Cada una de estas etapas se encuentran descritas en detalle en cada capítulo. El marco teórico introduce el fenómeno de calentamiento inductivo, conceptos, geometrías típicas y algunas aplicaciones de las bobinas de inducción, así como el diseño básico de inductores, el modelo eléctrico equivalente y los cálculos relacionados a

la generación de calor. El tercer capítulo muestra el proceso de construcción de la bobina, elección de la geometría y método de refrigeración; se analiza en función de la carga de titanio los posibles materiales a emplear como crisol, la presión parcial de oxígeno necesaria para evitar la oxidación durante el proceso de fundición y se especifican los materiales que componen la cámara de fundición. El cuarto capítulo contiene el registro de las simulaciones y los resultados obtenidos mediante el método numérico de elementos finitos, exposición del método y una breve descripción del programa empleado para la solución. El quinto capítulo describe el prototipo experimental y los resultados obtenidos de una prueba realizada con una carga de hierro de $0{,}15 \cdot 10^{-3} Kg$.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Principio de calentamiento inductivo

Una fuente de *fuerza electromotriz*, se define como todo aquel dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos, siendo su símbolo ε y su abreviatura *fem* [2]. A título de ejemplo podemos mencionar las baterías y los generadores eléctricos. Con una fuente de fem y un circuito compuesto por un alambre conductor se puede establecer una corriente eléctrica capaz de generar un campo magnético $\vec{B}$. Este efecto magnético puede intensificarse enrollando el conductor en forma de bobina con múltiples vueltas aisladas electricamente [3] (esta configuración se conoce como bobina, ver figura (2.1)). Es bien conocido en electromagnetismo las ecuaciones de Maxwell [2], las cuales establecen una relación entre todos lo fenómenos electromagnéticos que se resumen acontinuación.

$$\epsilon_0 \cdot \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = q \tag{2.1}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \tag{2.2}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt} \tag{2.3}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(\epsilon_0 \cdot \frac{d\phi_E}{dt} + i \right) \tag{2.4}$$

La ecuación (2.1), describe el relación existente entre una carga q y el campo eléctrico E, la ecuación (2.2) describe parcialmente el comportamiento del campo magnético, la ecuación (2.3) describe el efecto eléctrico de campos magnéticos variables y la ecuación (2.4) [3], describe el efecto magnético de campos eléctricos o corrientes variables. En particular la ecuación (2.4), describe la fenomenología referida en este estudio.

Sí en un inductor, que normalmente es el arrollamiento bobinado de un conductor, se hace pasar una corriente eléctrica, se generará un campo magnético cuya amplitud y distribución viene dado por la *ley de Ampere* [4].

$$N \cdot I = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = H \cdot l \tag{2.5}$$

Donde N es el número de espiras del inductor, I la corriente que lo atraviesa, H el campo magnético y l la longitud del circuito.

Ahora si la corriente es alterna entonces por la ecuación de *Faraday-Maxwell* se induce un campo magnético variable en el tiempo y en consecuencia para un conductor sumergido en este campo una fem, cuyo valor viene dado por la ecuación (2.6) [1].

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{d\phi_B}{dt} \tag{2.6}$$

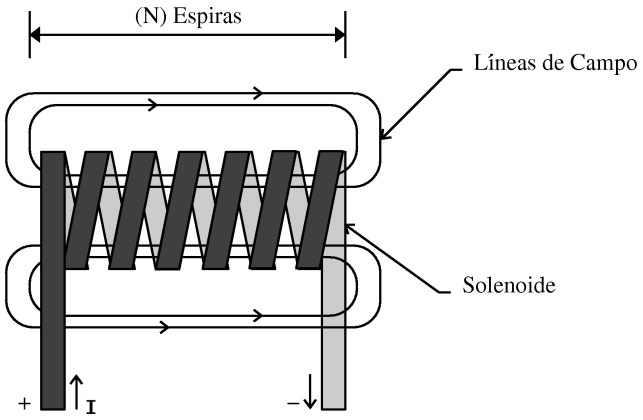


Figura 2.1: Campo magnético $\vec{B}$, producido por un inductor.

Donde ε es la fuerza electromotriz inducida, N el número de espiras del inductor y ϕ_B el flujo del campo magnético.

A la corriente establecida en el interior del material que se desea calentar por inducción electromagnética, debido a la fem inducida, se le denomina corriente inducida o *corriente de Foucault*, i_f, y esta última es la responsable del calentamiento por *efecto Joule*, cuya ley es descrita por la ecuación (2.7).

$$P = {i^2}_f \cdot R_{eq} \tag{2.7}$$

Donde P es la potencia disipada en la resistencia equivalente de la pieza a calentar R_{eq} e i_f es la corriente que circula a través del material conductor.

Existe otro mecanismo mediante el cual se producen pérdidas dentro de un material sometido a un campo magnético variable, el cual es llamado *histéresis* [5], (ver figura (2.2)). El fenómeno de *histéresis* explica la falta de reversibilidad en la curva de magnetización en los materiales ferromagnéticos, en la cual existe un retraso entre la respuesta magnética B del material y el campo H externo aplicado. Las pérdidas por este fenómeno son causadas por el proceso de reorientación de los dipolos

magnéticos en el material.

Debido a que la contribución de las pérdidas por *histéresis* al calentamiento del material es menor que al del *efecto Joule*, y sólo es considerable en materiales ferromagnéticos a temperaturas que estén por debajo de la *temperatura de Curie* [5], no serán consideradas de importancia en este trabajo.

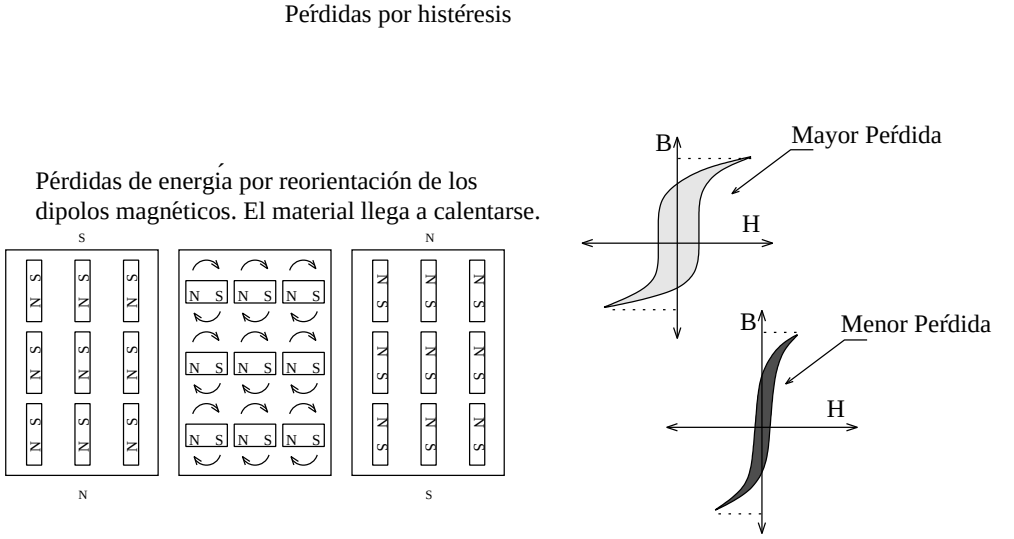


Figura 2.2: Pérdidas por histéteresis .

El calentamiento mediante inducción magnética es un método de no contacto de gran eficiencia, para calentar electricamente objetos conductores sin calentar el medio alrededor de la pieza. La generación de calor es inherente al fenómeno, muy bien controlado puede ser de gran rapidez, suministrando un incremento de temperatura oportuno que no puede ser practicamente realizado por otro método. Debido a que el patrón de calentamiento es reflejo de la geometría de la bobina, la forma del inductor es probablemente la parte más importante en el diseño del sistema de calentamiento [6]. En la figura (3.2), podemos observar la comparación de patrones de calentamiento producidos por un tubo circular vs. rectangular.

2.2. Geometrías y aplicaciones

Las aplicaciones típicas del calentamiento inductivo están localizadas fundamentalmente en la industria de transformaciones metálicas, tales como soldaduras, endurecimiento, forja, fundición, expansión, relajamiento de estrés, templado, etc., así como en otras áreas donde los procesos impiden el uso de otros métodos, tales como la fundición o soldadura en atmósferas inertes o en el vacío.

Las geometrías en bobinas de inducción varian según su aplicación y en general no tiene porque tener una forma específica, ya que cualquier conductor atravesado por corrientes alternas crea un campo magnético también alterno que genera corrientes inducidas en un cuerpo conductor situado en su proximidad. Por lo tanto, se puede decir que no hay ninguna limitación en las dimensiones y forma de material a calentar. Esto supone una nueva ventaja ya que no solo es posible calentar materiales conductores de cualquier dimensión o forma, sino que además, se puede calentar sólo la porción del material que se desea. Es incluso posible calentar diferentes zonas de la pieza con la misma o diferentes temperaturas mediante un diseño correcto de la geometría del inductor o la asociación de varios de ellos [4].

2.3. Conceptos teóricos

El fenómeno de calentamiento inductivo puede ser analizado a partir de la teoría del transformador de corriente alterna, dado que el mecanismo de transferencia de energía entre el inductor y el objeto a calentar es similar [6]. La bobina de inducción es equivalente al *primario* del transformador y la pieza a calentar equivalente al conjunto *núcleo-secundario*. Al *secundario* se suma una resistencia en paralelo equivalente a la resistencia de la pieza a calentar. La relación de transformación será igual al número de espiras que tenga la bobina de inducción, debido a que el objeto a calentar se

comporta como un *secundario* de una sola espira que alimenta a una resistencia [6].

La resistencia equivalente de la pieza a calentar es por lo general de muy bajo valor, por lo tanto, para poder producir un calor apreciable por *efecto Joule* es necesario inducir grandes corrientes en la pieza. Se debe acotar que la geometría de la pieza a calentar es modelada de forma cilíndrica esto justificado en la facilidad que implica suponer la simetría rotacional. Previo al desarrollo del circuito equivalente que forma el conjunto *bobina-pieza*, es necesario definir algunos conceptos.

- **Región de transición:** Se llama región de transición a la zona de la pieza en la cual se inducen campos electromagnéticos, cuando esta se encuentra en el interior de una bobina de calentamiento, sometida a corrientes alternas, (ver figura (2.3)). La región de transición determina el circuito equivalente que forma el conjunto *bobina-pieza*. El circuito equivalente depende básicamente del campo magnético producido por el inductor y de las características electromagnéticas de la pieza a calentar.

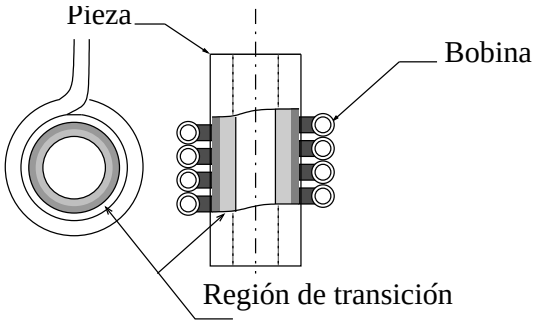


Figura 2.3: Región de transición.

- **Profundidad de penetración:** Es la distancia medida desde la superficie al interior de la pieza a la cual se realiza el cálculo de densidad de corriente. Se expresa por medio de la ecuación (2.8).

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \tag{2.8}$$

Donde ρ es la resistividad eléctrica del material, f la frecuencia de la corriente en la bobina de calentamiento, μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, $(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7})$ y μ_r es la permeabilidad magnética relativa al material.

- **Impedancia superficial:** Este concepto deriva del análisis de los fenómenos electromagnéticos que se producen entre el conjunto *bobina-pieza* y expresa la impedancia en la región de transición. El valor de esta viene dada por la ecuación (2.9).

$$Z_S = \frac{1 + j}{\sigma \cdot \delta} \tag{2.9}$$

Donde σ es la conductividad del material calentado.

- **Potencia disipada en la región de transición:** Es el valor medio temporal de la potencia disipada por unidad de volumen o superficie en la pieza.

- **Resistencia por vuelta:** Concepto que refleja la dependencia geométrica con la resistencia existente en la sección efectiva de la pieza por la que circulan las corrientes superficiales. Se expresa por medio de la ecuación (2.10).

$$R_N = \rho \cdot \frac{P}{\delta \cdot l} \tag{2.10}$$

Donde P es el perímetro de la superficie total calentada y l su longitud.

- **Resistencia equivalente:** Es el valor de la resistencia eléctrica equivalente que presenta una pieza cilíndrica situada en el interior de un inductor de calentamiento. Se calcula por medio de la ecuación (2.11).

$$R_{eq} = K_R \cdot N^2 \cdot \rho \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\delta \cdot l} \tag{2.11}$$

Donde K_R , se denomina factor de corrección de la resistencia equivalente, N es el número de espiras de la bobina de calentamiento. El factor de corrección de la resistencia equivalente viene dado por la ecuación (2.12).

$$K_R = 1 - e^{-\frac{2 \cdot r}{\delta}} \tag{2.12}$$

- **Rendimiento del calentamiento:** Las corrientes que circulan por la bobina de calentamiento son elevadas y debido a esto la resistencia asociada a las vueltas de la bobina deben ser consideradas a efectos de eficiencia. El rendimiento del calentamiento se define como η_{cal}, y es el cociente entre la potencia disipada en la pieza, y la suma de la disipada en la pieza más la disipada en el inductor. Esta expresion viene dada por la ecuación (2.13).

$$\eta_{cal} = \frac{I^2 \cdot R_{eq}}{I^2 \cdot R_{eq} + I^2 \cdot R_P} \tag{2.13}$$

  Donde la R_P es la resistencia del inductor, con corriente I, a una determinada frecuencia.

- **Efecto pelicular:** En un conductor la circulación de la corriente se distribuye en la superficie de su sección de acuerdo a la frecuencia. En corriente alterna de muy baja frecuencia, toda la sección conduce. A medida que la frecuencia aumenta, la circulación sólo se produce en las zonas exteriores del conductor . A frecuencias muy altas, sólo conduce la superficie exterior [1]. Este fenómeno hace que la resistencia efectiva o de corriente alterna del conductor varíe con la frecuencia de la corriente eléctrica que circula por este. La figura (2.4), muestra el resultado de modelar mediante elementos finitos, la distribución de la densidad de corriente Jo de dos espiras con diferente sección tranversal.

- **Frecuencia crítica:** La frecuencia crítica es aquella por debajo de la cual el rendimiento de calentamiento disminuye rápidamente, este concepto está ínti-

mamente relacionado con el factor de corrección de la resistencia equivalente K_R. La frecuencia crítica viena dada por la ecuación (2.14).

$$f_{cr} = \frac{4 \cdot \rho}{\pi \cdot \mu \cdot r^2} \tag{2.14}$$

Donde la f_{cr} es la frecuencia crítica.

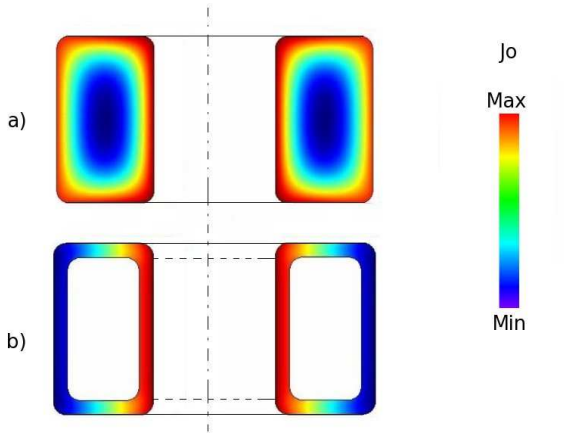


Figura 2.4: a) Distrubución de la densidad de corriente en la sección transversal para una espira de un conductor sólido a 1KHz, con perfil rectangular. b) Distrubución de la densidad de corriente en la sección transversal para una espira de un conductor hueco a 1KHz, con perfil rectangular.

2.4. Diseño básico de inductores

2.4.1. Principios de fabricación

En general el diseño de bobinas de inducción para calentamiento se basa en datos empíricos y cuyo desarrollo se deriva de los resultados del estudio de formas geométricas simples. Por lo tanto, también en este caso el diseño de la bobina se

basa en la experiencia. A continuación se expondrán una serie de consideraciones eléctricas fundamentales que guiará el diseño del inductor. La figura (2.5), muestra los elementos básicos que conforman un sistema de fundición por inducción [6].

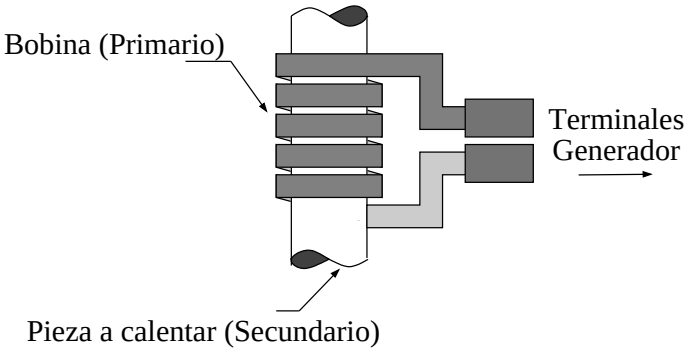


Figura 2.5: Elementos básicos de un sistema de fundición por inducción.

1. **Acoplamiento y eficiencia:** Como se ha mencionado antes, el inductor es similar al *primario* de un transformador y la pieza a calentar es equivalente al conjunto *núcleo-secundario*, por lo tanto, la eficiencia en el acoplamiento entre la bobina y la pieza a calentar, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos.

2. **Máxima transferencia de energía:** La distancia entre la superficie de la pieza y el inductor debe ser lo más estrecha posible para garantizar la máxima transferencia de energía, es deseable que el mayor número de líneas de flujo magnético intersecten la pieza en el área donde se desea calentar. El área donde la densidad de flujo magnético ϕ_B esta concentrada, será el área con mayor densidad de corriente *Jo*.

3. **Máxima velocidad de calentamiento:** Las líneas de flujo magnético concentradas en el centro de la bobina tipo solenoide proveen la máxima velocidad de calentamiento en esta área.

4. **La pieza a calentar:** La geometría de la pieza a calentar es de gran importancia, ya que determina la forma de la bobina.

5. **El centro magnético:** El centro magnético del inductor tipo solenoide no es necesariamente el centro geométrico. Esto se debe a la contribución magnética de las espiras terminales del inductor, las cuales no conservan geometría axial con el resto de las espiras internas. Este efecto se puede visualizar mejor en las bobinas de una sola espira, figura (2.6). La corrección, se realiza mediante el incremento del número de vueltas y ante la imposibilidad de colocar la pieza en en centro mágnetico del inductor, será necesario mover la pieza hacia esta área y hacer rotar, para proporcionar una exposición uniforme.

6. **Prevención de cancelación de campos magnéticos:** Algunas bobinas pueden transferir mayor cantidad de energía a la pieza a calentar, debido a su capacidad de concentrar flujo magnético, por lo tanto, para prevenir pérdidas de energía, es necesario cancelar la inducción que no contribuye con el calentamiento.

7. **Tipo de fuente de poder y velocidad de producción:** La fuente de poder puede variar según la aplicación que va a tener, siendo la capacidad de entregar potencia y la frecuencia de trabajo las características más importantes.

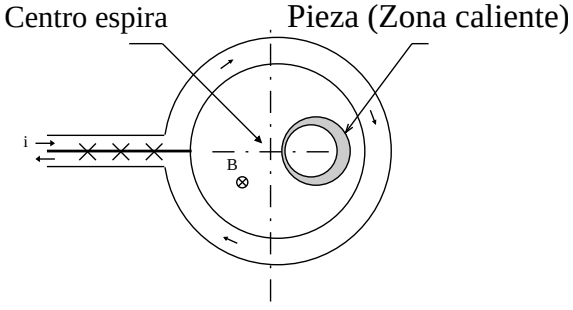


Figura 2.6: Patrón de calentamiento inductivo en una barra cilíndrica, producido por una bobina de una sola espira.

8. **Movimiento de la pieza relativo a la bobina:** Se refiere al empleo de sistemas

donde la pieza es movida dentro y fuera de la bobina, esta consideracion puede requerir grandes modificaciones para lograr un diseño óptimo.

2.4.2. Modelo eléctrico

Partiendo del modelo del transformador y considerando que el acoplamiento magnético es menor a la unidad [1], podemos elaborar el circuito equivalente mediante dos inductancias acopladas, con una resistencia en paralelo al *secundario* del transformador, en representación de la carga. La figura (2.7), muestra el esquema eléctrico general del sistema de fundición.

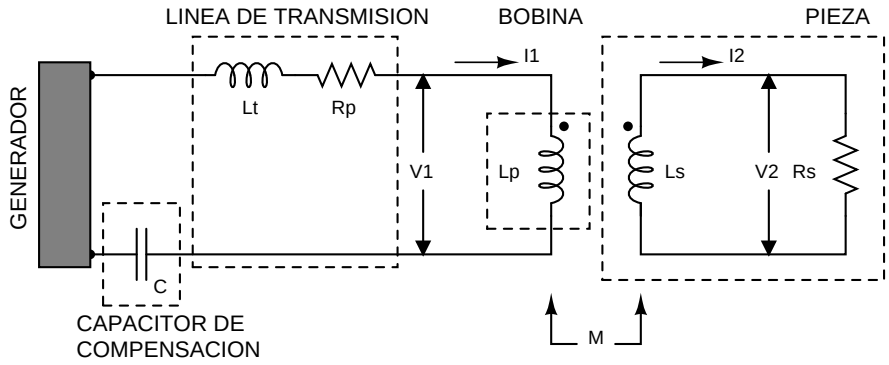


Figura 2.7: Modelo eléctrico del conjunto bobina-pieza, equivalente transformador.

Donde L_P es la inductancia de la bobina de inducción, L_S y R_S son la inductancia y la resistencia óhmica que forma la espira que aparece en la carga por efecto piel y por último M, que representa la inductancia mutua entre ambas bobinas.

Para garantizar la máxima transferencia de potencia entre la fuente de poder y el conjunto *bobina-pieza*, es necesario que el sistema trabaje en régimen resonante permanente, lo cual no es posible realizar por su inherente complejidad, por lo tanto, siendo un sistema dinámico, donde los parámetros eléctricos varian según la frecuencia de operación, los fenómenos electromagnéticos y termodinámicos, es

necesario estimar mediante herramientas de análisis circuital un modelo que de forma simplificada permita conocer las ecuaciones eléctricas que describen el sistema [1]. A continuación se desarrollará el modelo serie del conjuto *boina-pieza*.

Evaluando por la *ley de tensiones de Kirchhoff* el esquema de la figura (2.7), se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$-V_1 + j \cdot w \cdot L_P \cdot I_1 - j \cdot w \cdot M \cdot I_2 = 0 \tag{2.15}$$

$$V_2 + j \cdot w \cdot M \cdot I_1 - j \cdot w \cdot L_s \cdot I_2 = 0 \tag{2.16}$$

Donde $w = 2 \cdot \pi \cdot f$ es la velocidad angular, f la frecuencia de trabajo.

Despejando de la ecuación (2.16), I_2, y sustituyendo $V_2 = R_2 \cdot I_2$, se tiene.

$$I_2 = I_1 \cdot \left[\frac{j \cdot w \cdot M}{j \cdot w \cdot L_S - R_S} \right] \tag{2.17}$$

Sustituyendo $I_2 = f(I_1)$ en la ecuación (2.15) y se obtiene.

$$-V_1 + j \cdot w \cdot L_P \cdot I_1 - j \cdot w \cdot M \cdot I_1 \cdot \left[\frac{j \cdot w \cdot M}{j \cdot w \cdot L_S - R_S} \right] = 0 \tag{2.18}$$

A partir de la ecuación (2.18), se puede despejar la relación $Z_t = \frac{V_1}{I_1}$, que será la impedancia equivalente serie vista por los terminales del *primario*.

$$Z_t = Z_P + Z_{PS} = j \cdot w \cdot L_P + \left[\frac{w^2 \cdot M^2}{R_S + j \cdot w \cdot L_S} \right] \tag{2.19}$$

Donde Z_P, es el equivalente a un inductor simple (*no acoplado*) en serie con una

impedacia Z_{PS}, Z_{PS} representa el efecto del devanado *secundario* y una carga cuando aparecen reflejadas en el circuito primario. La impedancia Z_{PS}, puede ser expresada de la forma.

$$Z_{PS} = \left[\frac{R_S \cdot w^2 \cdot M^2}{R^2{}_S + w^2 \cdot L^2{}_S}\right] - j \cdot w \cdot \left[\frac{w^2 \cdot L_s \cdot M^2}{R^2{}_S + w^2 \cdot L^2{}_S}\right] \tag{2.20}$$

$$R'_S = \left[\frac{R_S \cdot w^2 \cdot M^2}{R^2{}_S + w^2 \cdot L^2{}_S}\right] \tag{2.21}$$

$$L'_S = \left[\frac{w^2 \cdot L_s \cdot M^2}{R^2{}_S + w^2 \cdot L^2{}_S}\right] \tag{2.22}$$

Donde R'_S es la parte real y representa la resistencia óhmica de la carga reflejada en el *primario* del transformador y L'_S es la parte imaginaria y corresponde a una inductancia de valor negativo que se resta a la inductancia del *primario*. La figura (2.8), muestra el circuito equivalente serie del conjunto *bobina-pieza*.

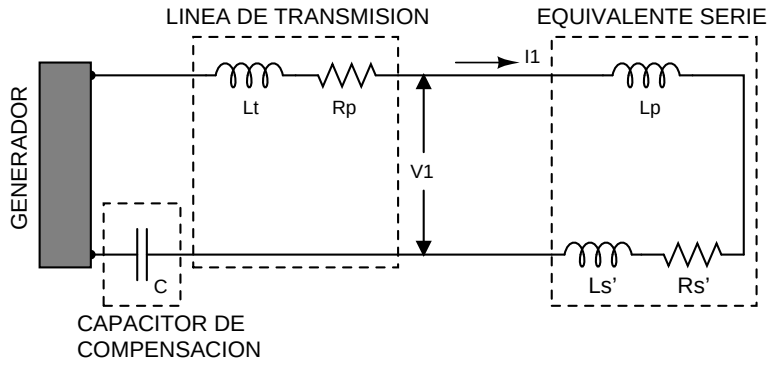


Figura 2.8: Modelo eléctrico del conjunto bobina-pieza, equivalente serie.

Donde R_P corresponde a la resistencia óhmica de la bobina de calentamiento y a la línea de transmisión desde la fuente de poder. Existe así mismo, una inductancia

adicional L_t, en serie, asociada a la línea de trasmisión, acoples eléctricos y otras inductancias parásitas. El cálculo de los parámetros del circuito equivalente serán estimados a partir de un método numérico, denominado método de elementos finitos (MEF), debido a la dificultad que presenta estimar estos de forma analítica.

2.5. Generación de calor

Para alcanzar la temperatura de fusión en la pieza de titanio, es necesario determinar la energía que debe ser transferida a esta, en forma de calor Q, para estimar el valor de Q emplearemos la ecuación (2.23) [7], la cual permite calcular el calor que se debe suministrar a un cuerpo dado, de masa m, y cuyo material constituyente tiene una capacidad calorífica c, para aumentar su temperatura desde una temperatura inicial (T_i) hasta una temperatura final (T_{final}).

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = m \cdot c \cdot (T_{final} - T_i) \tag{2.23}$$

La cantidad de calor Q, expresada en la ecuación (2.23), puede ser expresada por medio de la *ley de Joule*, como la tasa de potencia eléctrica entregada a la pieza durante un período de un segundo. La ecuación (2.24), expresa la igualdad entre el calor Q y la potencia P, como formas de energía.

$$Q = {i^2}_f \cdot R_{eq} \cdot t = P \cdot t \tag{2.24}$$

Donde el tiempo t, esta expresado en segundos.

Considerando la pieza de titanio con una geometría cilíndrica y sus propiedades físicas dadas en la tabla (IV), a continuación se plantean los calculos de cantidad de calor Q.

Consideremos una pieza de radio (r) de $0,35 \cdot 10^{-2} m$, con una altura (h) de $1,2 \cdot 10^{-2} m$, por lo tanto, el volumen de titanio viene dado por la ecuación (2.25).

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \tag{2.25}$$

$$V = \pi \cdot (0,35 \cdot 10^{-2} m)^2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2} m = 4,6182 \cdot 10^{-7} m^3 \tag{2.26}$$

Con el volumen calculado en la ecuación (2.26), y la densidad ρ, del titanio podemos calcular la masa m total mediante la ecuación (2.27).

$$m = \rho \cdot V = 4507 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot 4,6182 \cdot 10^{-7} m^3 \tag{2.27}$$

$$m = 2,0815 \cdot 10^{-3} kg \tag{2.28}$$

Por lo tanto el calor Q, será:

$$Q = 2,0815 \cdot 10^{-3} kg \cdot 520 \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right) \cdot (1941K - 298,15K) = 1778,188J \tag{2.29}$$

Se debe señalar que la Q calculada en la ecuación (2.29), no estima las pérdidas de calor por radiación, ni considera la forma en la cual el sistema de fundición transmite energía a la carga en función de la frecuencia de trabajo. En tal sentido este valor se supone como una aproximación válida a efecto de diseño.

Capítulo 3

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Durante el desarrollo de este trabajo se elaboraron dos prototipos, lo cual permitió experimentar las dificultades técnicas implícitas en la fabricación del sistema, y a su vez hacer la correcta elección de los materiales a ser empleados en la construcción del prototipo final, así mismo, son el testimonio de un proceso continuo de revisión y corrección en el diseño. En la figura (3.1), se puede observar el esquema general de la geomería y dimensiones seleccionadas para la bobina.

Las dificultades presentes en el proceso de construcción derivan de dos aspectos principales, el primero, la manufacturación de la bobina y el segundo, la creación de un ambiente que permita la fundición de la pieza de titanio.

3.1. Bobina de inducción

La construcción de la bobina de inducción fue caracterizada por un proceso constante de ensayo y error, dentro de los parámetros empíricos sugeridos en la literatura, a continuación se hace una breve descripción de los pasos seguidos en su manufacturación.

1. **Elección de la geometría:** Debido a la capacidad de concentrar flujo magnético en su interior y a la factibilidad de construcción, la geometría elegida fue de tipo solenoide con 7 espiras y sección transversal rectangular, garantizando así un modelo que preserva una eficiente relación con las consideraciones eléctricas fundamentales en el diseño de inductores.

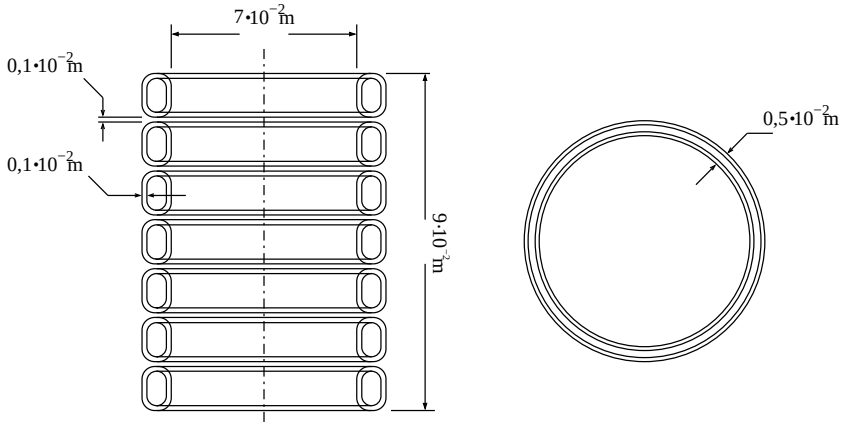


Figura 3.1: Diseño de bobina de inducción, vista lateral y superior.

2. **Material:** Para la construcción de la bobina , se empleó una tubería de cobre de $(9{,}525 \cdot 10^{-3} m)$ de diámetro, justificado en la baja resistividad eléctrica del cobre, la posibilidad de ser refrigerada, su maleabilidad y bajo costo comercial.

3. **Refrigeración:** Durante el proceso de fundición la bobina experimentará pérdidas por *efecto Joule*, debido a su resistencia eléctrica, para evitar que la tubería de cobre incremente su temperatura e influya sobre el sistema de fundición, se hará pasar un flujo de agua dentro de la bobina para refrigerarla.

Manufacturación de la bobina

4. **Dimensiones:** Considerando la bobina de inducción con un diámetro interno D de $(7 \cdot 10^{-2} m)$, un paso entre cada espira de $(0{,}1 \cdot 10^{-2} m)$ y 7 espiras, la longitud

de la tubería de cobre de ($9{,}525 \cdot 10^{-3} m$) de díametro, no debe ser menor a (l_{tubo}), La ecuación (3.1), nos permite estimar el valor de (l_{tubo}).

$$l_{tubo} = \pi \cdot D \cdot 7 \cdot 1{,}2 \tag{3.1}$$

$$l_{tubo} = \pi \cdot 7 \cdot 10^{-2} m \cdot 7 \cdot 1{,}2 = 184{,}7257 \cdot 10^{-2} m \tag{3.2}$$

Donde el factor de (1,2), aporta un 20 % más de longitud para los terminales de conexión al generador.

5. **Sección transversal rectangular:** Para obtener un mayor acople magnético entre la bobina y la carga y un patrón de calentamiento más uniforme, ver la figura (3.2) [6], es necesario tener la mayor superficie conductora de cada espira cercana a la superficie de la pieza. Para lograr este objetivo se modificó la tubería de cobre, transformando la sección transversal de geometría circular en una rectangular.

6. **Recocido:** Para ablandar y así poder doblar con mayor facilidad la tubería de cobre en forma de solenoide, se aplicó previamente un calor intenso a la tubería, con la ayuda de un equipo de soldadura a gas.

7. **Relleno:** Para doblar la tubería de cobre en forma de solenoide, sin que se obstruya el paso de agua en su interior, una técnica es rellenar la tubería con una arena fina u otro material no compactable, tal como la granalla de acero, este método evita que durante el proceso de doblado la tubería se deforme de forma irregular.

8. **Bobina:** Para obtener la forma de solenoide, se utilizó un tubo de hierro de diámetro externo igual a ($7 \cdot 10^{-2} m$), el cual fue inmovilizado verticalmente en un banco de ajuste, luego se procedió a enrrollar la tubería de cobre lentamente

alrededor de este, cuidando que las caras con mayor superficie, queden hacia el centro y lado externo de la bobina.

9. **Revestimiento aislante:** Una vez obtenida la bobina de inducción se procede a recubrirla con un esmalte dieléctrico para transformadores, para ello se debe limpiar la superficie de la bobina con ácido clorhídrico en baja concetración, luego se introduce la bobina en un horno a 45 °C para precalentar la superficie por 20 minutos, se recubre con el esmalte y se deja por otros 20 minutos dentro del horno para secar.

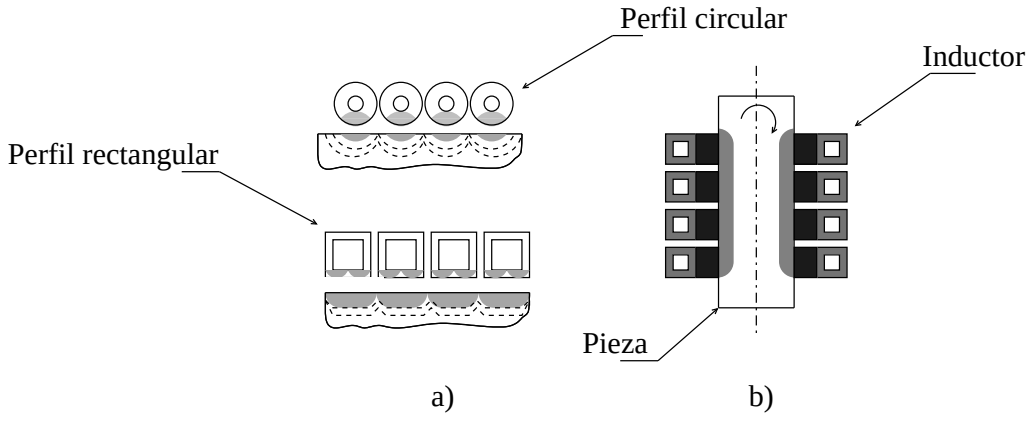


Figura 3.2: a) Comparación de patrones de calentamiento producidos por un tubo circular vs. rectangular. b) Patrón de calentamiento en una pieza cilíndrica usando una bobina de sección rectangular.

3.2. La carga

En este trabajo se selecciona el material titanio por considararse un material de interés, el cual debido a su resistencia y su peso ligero, es usado en aleaciones metálicas y como sustituto del aluminio. La relativa inercia del titanio le hace eficaz como sustituto de los huesos y cartílagos en cirugía, así como para las tuberías y tanques que se

utilizan en la elaboración de los alimentos. Se utiliza en los intercambiadores de calor de las plantas de desalinización debido a su capacidad para soportar la corrosión del agua salada. En metalurgia, las aleaciones de titanio se usan como desoxidantes y desnitrogenantes para eliminar el oxígeno y el nitrógeno de los metales fundidos. El dióxido de titanio (conocido como titanio blanco), es un pigmento blanco y brillante que se utiliza en pinturas, lacas, plásticos, papel, tejidos y caucho [8].

El titanio posee propiedades físicas y químicas especiales, por lo cual requiere un particular tratamiento durante el proceso de fundición. El titanio es un elemento metálico blanco plateado que se usa principalmente para preparar aleaciones ligeras y fuertes. En su estado natural, el metal es extremadamente frágil en frío, pero es muy maleable y dúctil al rojo vivo moderado. Tiene un punto de fusión de 1.941 K.

El titanio reacciona con oxígeno a 883 K formando dióxido de titanio. Ocupa el lugar 9 en abundancia entre los elementos de la corteza terrestre, pero nunca se encuentra en estado puro. Existe como óxido en los minerales ilmenita ($FeTiO3$), rutilo ($TiO2$) y esfena ($CaO \cdot TiO_2 \cdot SiO_2$). Debido a la afinidad del titanio por el oxígeno y por otros metales, es necesario elegir cuidadosamente el crisol en que se va a fundir. Generalmente para la fusión se usa vacío o una atmósfera gaseosa inerte o reductora.

3.3. Elección del crisol

El crisol a ser empleado debe ser de un material con un punto de fusión mayor al del Ti, no conductor y no reccionante en el rango de tempareturas que deseamos experimentar. La literatura menciona el uso de crisoles de grafito y alúmnina para fundición en atmósferas inertes [9], por lo tanto, para hacer la correcta elección del crisol a ser empleado en la fundición de la pieza de Ti, es necesario calcular mediante

termodinámica los valores de energía libre de reacción (ΔG_R°), entre el titanio y el material en que esta compuesto el crisol.

Crisol de grafito: En el caso de realizar la fundición del *Ti* en un crisol de grafito, se pueden producir las siguientes reacciones:

$$Ti_{(S)} + C = TiC \tag{3.3}$$

$$Ti_{(l)} + C = TiC \tag{3.4}$$

Mediante las tablas de energías libres de reacción de *Gibbs* [9], podemos calcular el (ΔG_R°), de las reacciones descritas en las ecuaciones (3.3) y (3.4). En la tabla (I), se puede observar los valores de energía libre de reacción a diferentes temperaturas, para el titanio en contacto con el crisol de grafito.

Tabla I: Tabla de valores de energía libre de reacción (ΔG_R°) para las reacciones descritas en las ecuaciones (3.3) y (3.4).

Valores de energía libre de reacción (ΔG_R°)		
Temperatura *K*	(1120-2000) *K* (ΔG_R°)	(2383-2593) *K* (ΔG_R°)
1120	-171799.6	-
1500	-166776.0	-
2383	-	-241340.6
2500	-	-224211.8

Los valores negativos de la energía libre de reacción (ΔG_R°), indican que el *Ti* reaccionará con las paredes del crisol de grafito, por lo tanto, es necesario descartar este material, y evitar así la contaminación del *Ti*, durante el proceso de fundición.

Crisol de Alumina: Si la fundición del *Ti* se realiza en un crisol de alúmnia, se puede producir la siguiente reacción:

$$\frac{3}{2}Ti + Al2O_3 = \frac{3}{2}TiO_2 + 2Al \tag{3.5}$$

Mediante las tablas de energías libres de reacción de *Gibbs* [9], podemos calcular el (ΔG_R°), de la reacción descrita en la ecuacion (3.5). En la tabla (II), podemos ver los valores de energía libre de reacción a diferentes temperaturas, para el titanio en contacto con el crisol de alúmina.

Tabla II: Tabla de valores de energía libre de reacción (ΔG_R°) para la reacción descrita en la ecuación (3.5).

Valores de energía libre de reacción (ΔG_R°)		
Temperatura K	(1120-2000) K (ΔG_R°)	(2383-2593) K (ΔG_R°)
1120	50303.19	-
1500	46428.76	-
2383	-	38018.32
2500	-	36952.00

Los valores de la energía libre de reacción (ΔG_R°), al ser positivos, indican que el *Ti*, no reaccionará con las paredes del crisol de alúmina. En consecuencia el uso de este no permitirá la contaminación de la pieza durante el proceso de fundición.

3.4. Presión parcial de oxígeno

En el mismo sentido la presencia de oxígeno dentro de la cámara de fundición durante el proceso de calentamiento puede ocacionar la oxidación del titanio produciendo la reacción descrita en la ecuanción (3.6) [9].

$$Ti + O_2 = TiO_2 \tag{3.6}$$

Para evitar la reacción descrita en la ecuación (3.6), es necesario calcular la presión parcial de oxigeno máxima tolerable para no oxidar el titanio, La tabla (III), muestra los valores de energía libre de reacción para el compuesto descrito en la ecuación (3.6) y la presión parcial de oxígeno $P(O_2)$, a diferentes temperaturas.

Tabla III: Valores de energía libre de reacción (ΔG_R°) y presión parcial de oxígeno necesaria para la reacción descrita en la ecuación (3.6).

Temperatura K	(1120-2000) K (ΔG_R°)	(2383-2593) K (ΔG_R°)	$LnP(O_2)$	$LogP(O_2)$
1120	-1772294.80	-	-79.66730175	-34.6
1500	-161255.00	-	-54.10333837	-23.5
2383	-	-123983.57	-26.18437495	-11.4
2500	-	-119045.00	-23.96477101	-10.4

Durante el proceso de calentamiento dentro de la cámara de fundición se reemplazará el oxígeno mediante una bomba de vacío por argón, si el argón contenido en la cámara de fundición contiene $2ppm$ de O_2, el Ti se oxidará, para evitar la oxidación se debe disminuir los $2ppm$ de O_2 del argón. Para ello será necesario hacer pasar el gas a través de un horno con virutas de Cu, antes de introducirlo al sistema. El

horno será una trampa de oxígeno, lo cual garantizará una presión parcial de oxigeno menor a la necesaria para la reacción entre el O_2 y el Ti.

3.5. Cámara de fundición

En base a las consideraciones anteriormente enumeradas, la construcción de la cámara de fundición es el resultado final del proceso de diseño, esta representado por el conjunto de elementos que contienen y soportan el sistema de fundición, a continuación se expondrá cada una de sus partes.

Tubo de Cuarzo: El tubo de cuarzo contiene en su interior una atmósfera inerte de argón (necesaria para lograr la fundición del titanio), la camisa de grafito, el crisol y la pieza de Ti, a su vez soporta las conexiones de gas.

Bobina externa: La geometría de la bobina permite su ubicación externa al tubo de cuarzo, de esta forma se evitan las complicaciones propias del sistema de refrigeración y conexiones al generador.

Tapones de Goma: los tapones de goma permiten el sellado de la cámara de fundición.

Crisol de alúmina: El crisol de alúmnia es el soporte de fundición del titanio.

Tubos y soporte de alúmina: La alúmina al ser un material no conductor y especialmente apto para aplicaciones en donde la temperatura es un factor crítico, representa un material ideal para el soporte de conexiones de gas y piezas en proceso de fundición.

Camisa de grafito: Para evitar el choque térmico entre la pieza de titanio y el crisol de alúmina es necesario precalentar el crisol de alúmina, el grafito al ser un

elemento conductor, experimentará corrientes inducidas al igual que la pieza de titanio, el calor generado por estas corrientes calentará el grafito y por contacto este calor será transmitido al crisol de alúmnia.

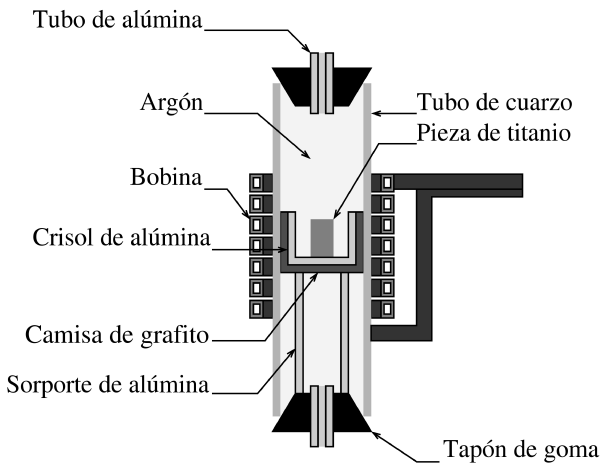


Figura 3.3: Cámara de fundición.

Sistemas de válvulas: Para realizar el intercambio del aire por argón dentro de la cámara de fundición, se empleó un sistemas de válvulas y mangueras que interconectan una bomba de vacío y un cilindro de argón con la cámara de fundición, la figura (3.4), muestra el esquema de interconexiones.

Entre los detalles presentes en el desarrollo del sistema se pueden mecionar el empleo de herramientas de plomería y herrería, las cuales permitieron la interconexión y construcción de partes, tales como las adaptaciones a la mesa de soporte del sistema, las conexiones de gas, el sellado de conexiones, entre otras. Es importante señalar que la construcción del sistema se llevó a cabo de forma manual, por cual, los pasos en el diseño y construcción tratados en este capítulo, son soluciones que aportan una alternativa limitada por la disponiblilidad de materiales, máquinas y herramientas.

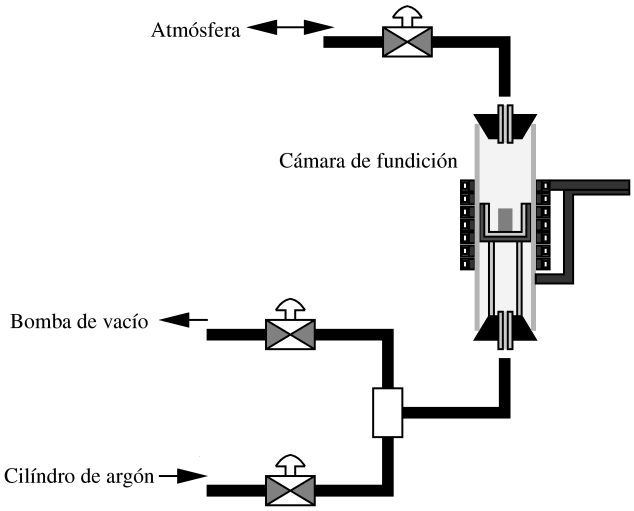


Figura 3.4: Esquema de interconexiones de válvulas.

Capítulo 4

MODELADO DEL SISTEMA

Una vez elegida la geometría de la bobina, la ubicación de la carga dentro de la cámara de fundición y todos lo detalles constructivos del sistema, es necesario calcular los parámetros eléctricos R_P, L_P, M, L_S y R_S, para poder estimar la frecuencia de resonacia del circuito serie equivalente, ver figura (2.8). El cálculo de los parámetros eléctricos del sistema son difícilmente cuantificables de manera analítica, por ello es necesario emplear un método numérico que permita extraer los parámetros de interés del sistema.

Los cálculos serán realizados mediante dos herramientas de programación, para el cálculo de transferencia de calor será empleado un programa comercial cuyo nombre es FEMLAB 3.0 [10], y para estimar los parámetros eléctricos de interés será empleado un programa libre cuyo nombre es FEMM [11], los cuales emplean el método numérico de elementos finitos (MEF). A continuación se describe brevemente este método.

4.1. Método númerico de elementos finitos (*MEF).*

El método de elementos finitos es un método de aproximación de problemas continuos, del tal forma que:

- El continuo se divide en un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados nodos. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.
- La solución del sistema complejo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos.

El *MEF*, por lo tanto, se fundamenta en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado , se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por lo tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos [12].

4.2. Modelo

Calcular los parámetros eléctricos y simular el fenómeno de transferencia de calor del conjunto *bobina-pieza* mediante FEMM [11] y FEMLAB 3.0 [10] respectivamente,

consiste en reproducir en un plano de geometría axial, con corriente azimutal, la proyección vertical de la cámara de fundición, al cual mediante cuadros de diálogo, se le asignan variables escalares, condiciones de borde, variables de acoplamiento entre dominios y ecuaciones, es decir, las propiedades físicas que identifican a cada una de las regiones que simulan los elementos físicos reales.Ver las figuras (4.1-a) y (4.2-b).

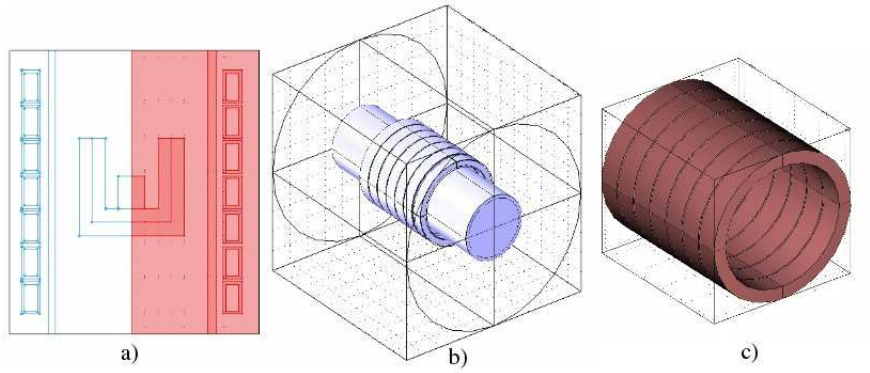


Figura 4.1: Modelo de bobina de inducción para simulación en FEMLAB 3.0. a) Proyección vertical de la cámara de fundición. b) Modelo en 3D de la cámara de fundición. c) Modelo en 3D de la bobina de inducción.

Las figuras (4.2-b) y (4.3-a), muestran los esquemas bidimensionales simétricos de la bobina de inducción, el cual representa el punto de partida en la simulación del sistema para ambos programas de cálculo. La introducción de los datos a resolver por los programas deben seguir una serie de consideraciones descritas a continuación.

1. **Variables escalares y constantes:** Los parámetros numéricos de entrada a los programas pueden ser programados e identificados por asignación de símbolos. Las propiedades físicas dadas en la tabla (IV), la corriente de simulación I_0, la frecuencia de trabajo f, la densidad de corriente superficial en cada espira de la bobina Js_0 y las ecuaciones de conductividad eléctrica para cada material (ver ecuación (4.6)), fueron introducidas de esta forma.

2. **Variables de acoplamiento:** El algoritmo del programa FEMLAB 3.0 [10] , permite establecer funciones que asocian diversos resultados producto de la solución de diferentes sistemas de ecuaciones diferenciales.

3. **Geometría axial:** Los programas resuelven una región que guarda simetría axial, la cual está representada por un esquema bidimensional a escala real, ver la figura (4.2-a) y (4.3-a). La solución es posteriormente integrada para el volumen total.

4. **Corriente azimutal:** La dirección del flujo de corriente en la bobina de inducción es perpendicular al plano del esquema bidimensional, positivo si entra en el plano y negativo en caso contrario.

5. **Condiciones de borde:** Cada uno de los elementos que conforman el esquema bidimensional, se encuentran representados por líneas y curvas, las cuales debe ser identificadas según sus características eléctricas, especialmente aquellas que sean frontera, ver la figura (4.3-b).

6. **Propiedades físicas:** La región interna de cada uno de los elementos que conforman el esquema bidimensional, son considerados subdominios, estos deben ser identificados según sus propiedades físicas,ver las figuras (4.3-c) y (4.2-b). Los elementos empleados y sus respectivas propiedades físicas estan dados en la tabla (IV).

4.2.1. Cálculo de parámetros eléctricos

Los parámetros del modelo eléctrico del conjunto *bobina-pieza* fueron estimados por simulación mediante FEMM [11]. La elección de este programa se justifica por ser un programa práctico, asequible y diseñado específicamente para la resolución de problemas magnéticos. La introducción del problema para su solución sigue los

Tabla IV: Resumen de propiedades físicas empleadas en el diseño y simulación de la cámara de fundición.

Elemento	$\rho_D\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	$c\left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$	$T_f(K)$	$\lambda\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$	$\rho_0(\Omega \cdot m)$	$\alpha_0(K^{-1})$
Titanio (Ti)	4507	520	1941	15	$0{,}48 \cdot 10^{-6}$	0,0033
Alúmina (Al)	3900	850	2345	26	–	–
Grafito (C)	2260	710,6	3800	19,9	$3{,}5 \cdot 10^{-5}$	−0,0002
Argón (Ar)	1,784	520	–	0,01772	–	–
Cuarzo (SiO_2)	2650	670	1988	1,46	–	–
Cobre (Cu)	8940	385	1356	390	$0{,}0172 \cdot 10^{-6}$	0,0043
Aire	1,293	1010	–	0,026	–	–

pasos ya mencionados. En la figura (4.2), podemos ver los esquemas que emplea el programa para el procesamiento de los calculos. Se puede destacar que a efectos de cálculo sólo se utiliza la superficie de la carga y camisa de grafito, que aparece por efecto piel, ver la figura (4.2-a1)).

Los cálculos fueron realizados para una carga de titanio con un volumen aproximado del 80% de la capacidad total del crisol de alúmina. El programa posee herramientas de procesamiento para el cálculo de inductancia denominados *integración de bloques*, el cual establece las siguientes definiciones relevantes.

$$L_p = \frac{\int A \cdot J \cdot dV}{I^2} \tag{4.1}$$

$$M = \frac{\int A_1 \cdot J_2 \cdot dV_2}{I_1 \cdot I_2} = \frac{N_2}{I_1 \cdot a_2} \cdot \int A_1 \cdot dV_2 \tag{4.2}$$

Donde L_P y M son las inductancias propias y mutua de las bobinas del sistema; A es el potencial vectorial magnético, J la densidad de corriente, dV el diferencial de

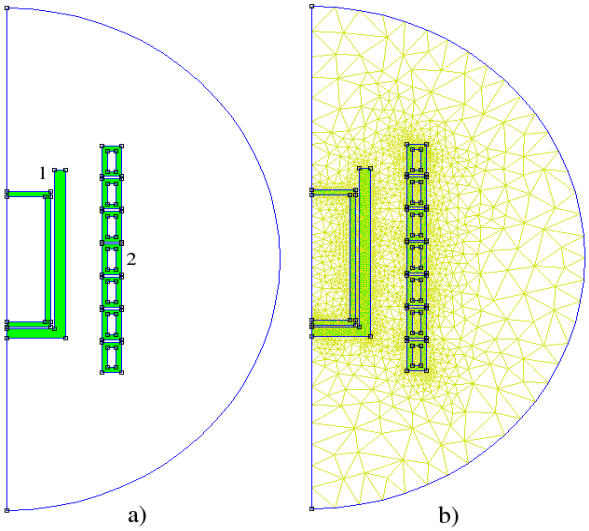


Figura 4.2: Modelo en FEMM 4.0 : a1) Porción superficial de la pieza de titanio y camisa de grafito consideradas para el cálculo de los parármetros eléctricos, a2) Sección transversal de bobina de inducción. b) Malla de 2775 nodos y segmentos para identificación de condiciones de borde e identificación de propiedades físicas.

volumen, a el área asociada, N en número de espiras e I la corriente total. Los subíndices numéricos se refieren a la bobina particular: 1 es la bobina de calentamiento y 2 la carga [1]. Los resultados obtenidos mediante la *integración de bloques*, son mostrados en la tabla (V).

El programa a su vez calcula la resistencia equivalente de la bobina de calentamiento R_P y la carga R_S, estos valores de resistencia son calculados para una frecuencia de trabajo de $6,6kHz$, la cual es la frecuencia de trabajo del sistema según lo estimado en la ecuación (4.3).

4.2.2. Cálculo de frecuencia de trabajo

El generador trabaja en régimen de resonancia serie, por lo cual la frecuencia de trabajo del mismo puede ser estimada a partir de la ecuación (4.3), la frecuencia ob-

Tabla V: Tabla de parámetros calculados mediante FEMM 4.0, para el modelo eléctrico del conjunto *bobina-pieza*, equivalente serie.

Parámetro	Unidad	Valor calculado
L_p	H	$2,17049 \cdot 10^{-6}$
L_s	H	$8,29262 \cdot 10^{-9}$
M	H	$6,27058 \cdot 10^{-8}$
R_p	Ω	$3,34832 \cdot 10^{-3}$
R_s	Ω	$1,4355 \cdot 10^{-4}$

tenida será una aproximación válida para el diseño. El generador posee un capacitor C de compensación con un valor de $2,718 \cdot 10^{-6}F$ y para efecto de cálculo debemos recordar que $L_S = -L'_S$ corresponde a una inductancia de valor negativo que se resta a la inductancia del *primario*.

$$f_r = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{C \cdot (L_P + L'_S)}} = 65,651kHz. \tag{4.3}$$

4.2.3. Cálculo de constante de acoplamiento

El programa a su vez calcula la resistencia equivalente de la bobina de calentamiento R_P y la carga R_S, estos valores de resistencia son calculados para una frecuencia de trabajo de $65,651kHz$, la cual es la frecuencia de trabajo del sistema según lo estimado en la ecuación (4.3).

Una vez calculados los parámetros electricos del circuito equivalente serie, es posible calcular el valor de la constante de acoplamiento entre la bobina de inducción y la carga. La ecuación (4.4) muetra el cálculo de esta constante.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_P \cdot L_M}} = 0,4674 \tag{4.4}$$

Como puede apreciarse, el coeficiente de acople es bastante bajo, lo que justifica plenamente el uso del modelo basado en inductores acoplados [1].

4.2.4. Transferencia de calor

Las simulación del modelo eléctrico del conjunto *bobina-pieza* para el fenómeno de transferencia de calor se realizó en FEMLAB 3.0. El uso de este programa permite resolver numéricamente sistemas de ecuaciones diferenciales acoplados para dar solución a los problemas magnéticos y de transferencia de calor de forma simultánea. La introducción de los datos del problema para su simulación sigue los pasos ya mencionados. En la figura (4.3), se pueden ver los esquemas que emplea el programa como punto de partida para el procesamiento de los cálculos.

4.2.5. Resistividad, conductividad y temperatura

Entre de las propiedades físicas de los elementos que constituyen la cámara de fundición se encuentra la conductividad eléctrica, y como es bien conocido, esta propiedad varía a consecuencia de los cambios en la temperatura del material, la resistividad *rho* de un material cualquiera a una temperatura T se puede obtener a partir de un ajuste lineal empírico como [13]:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot (T - T_0)) \tag{4.5}$$

Donde ρ es la resistividad del material a una temperatura T y ρ_0 es la resistividad del material a una temperatura T_0 , con un coeficiente térmico α_0.

Con frecuencia se habla de la conductividad (σ) de un material, en vez de mencionar su resistividad. Estas dos cantidades son recíprocas y su relación viene dada por la ecuación (4.6).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot (T - T_0))} \tag{4.6}$$

Para los subdominios que representan el grafito, el titanio y el cobre, la conductividad debe ser introducida en forma de ecuación (4.6). Ver la figura(4.3-c).

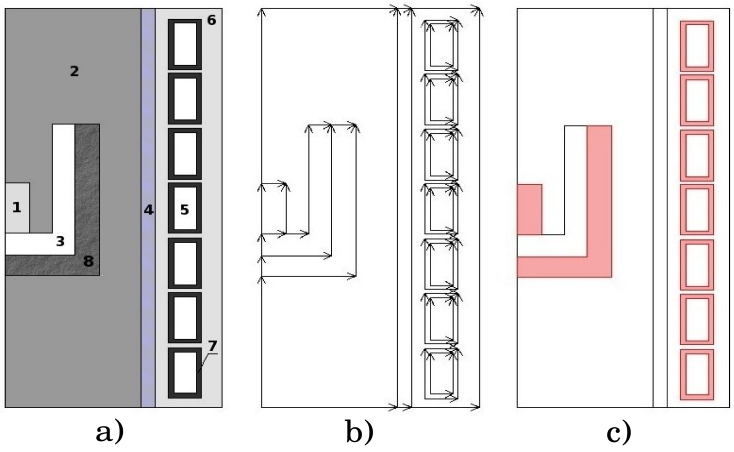


Figura 4.3: Modelo en FEMLAB 3.0 : a1) Pieza de titanio, a2) Argón, a3) Crisol de alúmina, a4) Tubo de cuarzo, a5) Flujo de agua, a6) Aire, a7) Sección transversal de bobina de inducción, a8) Camisa de grafito para precalentamiento. b) Segmentos para identificación de condiciones de borde. c) Áreas internas para identificación de propiedades físicas.

En la figura (4.4), podemos observar el resultado obtenido para la simulación de transferencia de calor en la cámara de fundición con una corriente de 250A a 50kHz de frecuencia por 180 segundos en la bobina de inducción, en el cual se comprueba

que el sistema alcanza los 1663K; se debe hacer notar que el calor generado en la bobina de inducción por efecto *Joule* no es superior a 300K, debido al intercambio de calor entre esta y el agua que fluye en su interior, de igual forma se comprueba la temperatura cercana a los 1663K que experimentará la camisa de grafito como elemento concentrador de calor en el sistema.

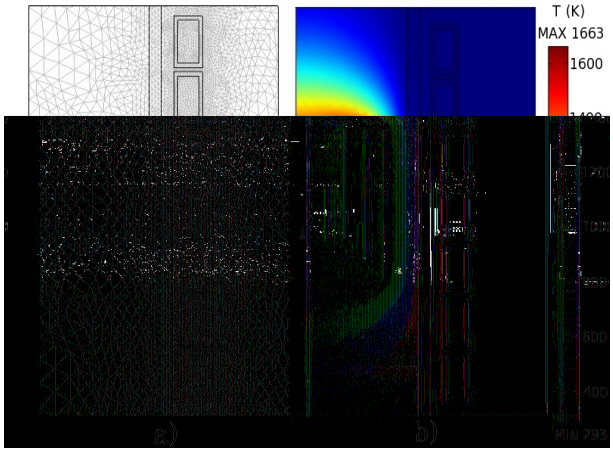


Figura 4.4: a) Malla generada por 15364 nodos para simulación de la cámara de fundición b) Solución obtenida en la simulación de la cámara de fundición para transferencia de calor con una corriente de 250A a 50kHz de frecuencia por 180 segundos.

Capítulo 5

PROTOTIPO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

El sistema diseñado fue construido y ensamblado según el esquema mostrado en la figura (5.1) y el esquema de conexiones electricas mostrado por la figura (5.3). Se realizaron pruebas del sistema, en vacío y con cargas de aluminio, hierro y acero. Los ensayos permitieron determinar las limitaciones y ventajas del sistema en presencia de diferentes tipos de carga. A continuación se hace referencia a las medidas realizadas para una carga de hierro de $0{,}15 \cdot 10^{-3} Kg$ gramos en el crisol de alumina y con camisa de grafito.

Para ejecutar las mediciones se emplearon los siguientes equipos:

- Multímetro, FLUKE. Pinzas con relación de transformación ($2mA = 2A$).
- Cosfímetro, YOKOGAWA ELECTRIC LTD. Tipo 2039.
- Transformador de corriente, relación de transformación ($15A = 5A$).
- Termómetro infrarojo 3M, Serie IR.
- Osciloscopio digital, TDS3000B.

El montaje experimental está compuesto por todos los elementos mostrados en

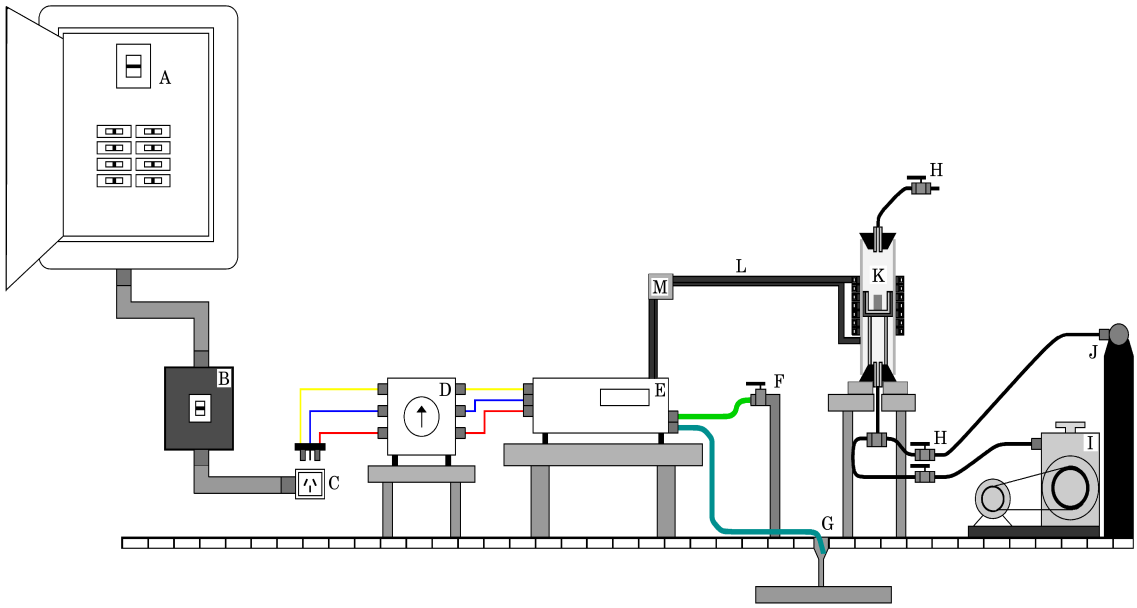


Figura 5.1: Esquema de montaje experimental. A) Tablero principal. B) Interruptor. C) Toma trifásica. D) Autotransformador trifásico (208V-12A). E) Generador. F) Llave de paso para suministro de agua. G) Desagüe. H) Sistema de válvulas y mangueras para intercambio de gases. I) Bomba de vacío. J) Cilindro de argón. K) Cámara de fundición. L) Línea de transmisión y bobina de inducción. M) Interconexiones de bronce.

la figura (5.1), destacando que la presencia del horno con virutas de cobre para la reducción del oxígeno en el argón no fue instalado debido a que la incorporación de este dispositivo era un paso programado posterior a las pruebas con hierro y acero alcanzando sus respectivas temperaturas de fusión, lo cual no fue posible debido a la limitación en regulación de voltaje impuesta por el autotransformador. La figura (5.2) presenta algunas vistas del montaje experimental.

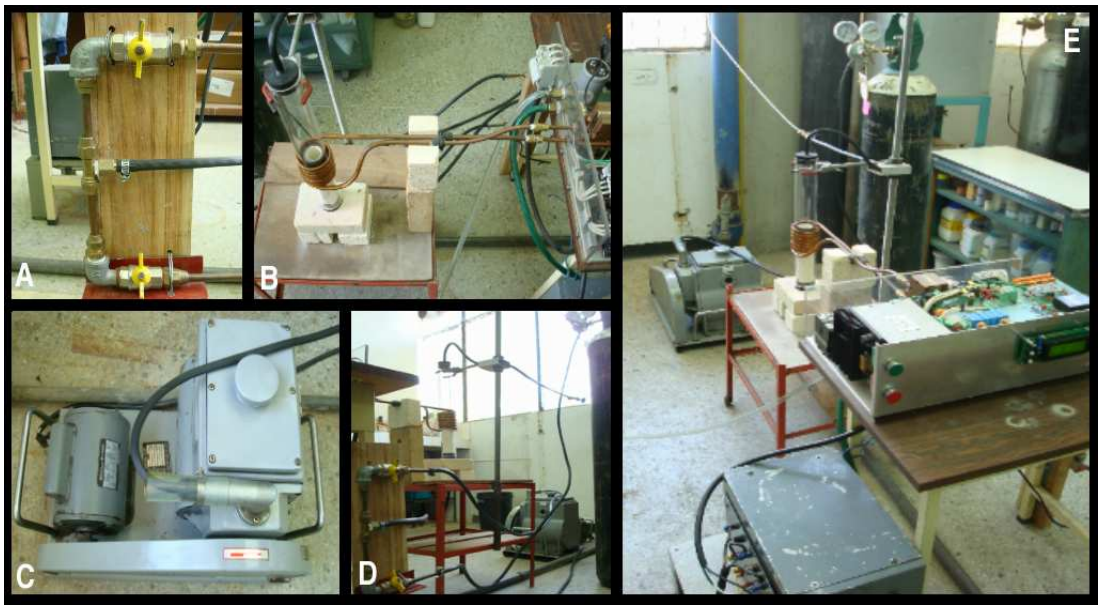


Figura 5.2: Fotografías del montaje experimental. A) Interconexión de válvulas y mangueras para intercambio de gases. B) Vista superior cámara de fundición, línea de transmisión y conexiones de agua al generador. C) Vista superior bomba de vacío. D) Conexión del cilindro de argón al sistema de válvulas. E) Vista general del montaje.

5.1. Sistema de intercambio de gases

El sistema de válvulas y mangueras funcionó correctamente, no obstante es necesario mencionar los siguientes hechos. Se observó un alto nivel de succión en los tapones de goma, debido a la alta capacidad de succión de la bomba de vacío, lo cual colocó en peligro de ruptura los bordes de el tubo de cuarzo. En este sentido fue necesario realizar el intercambio de aire por argón con mucho cuidado. De igual forma durante el proceso de calentamiento el argón se expandió dentro de la cámara de fundición debido a su aumento en temperatura lo cual condujo a un aumento en la presión interna, para solucionar este efecto fue necesario regular la salida de argón mediante la válvula con salida a la atmósfera.

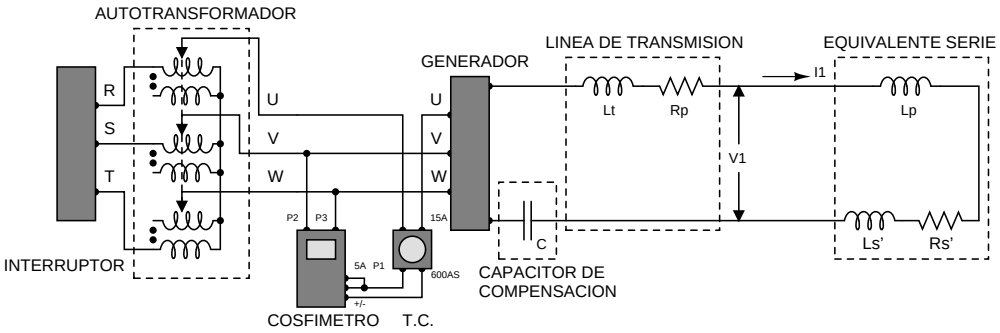


Figura 5.3: Esquema eléctrico del montaje experimental.

5.2. Autotransformador trifásico y voltaje rectificado

El generador también conocido como (*horno de inducción*), es alimentado por un autotransformador trifásico ($208V - 12A$), como fuente regulable de energía. El generador rectifica la tensión trifásica y posteriormente la transforma en una señal variante el tiempo por medio de un inversor con control de potencia usando técnicas de modulación sobre una carga resonante [1]. La energía regulada por el autotransformador es controlada por un sistema electrónico microcontrolado, el cual suministra la energía a la bobina de inducción. Durante la experiencia se registraron los valores de corriente y voltaje para cada fase, factor de potencia, voltaje rectificado, temperatura en los transistores de potencia del generador, corriente en la bobina de inducción y temperatura en la carga para cada uno de los valores de tensión establecidos por el operador en el autotransformador. A continuación la figura (5.4), muestra los niveles de tensión de las fases U-V-W, en relación con el voltaje rectificado por el generador.

En la figura (5.4), podemos observar el desbalance que ocurre en las fases U-V-W del autotransformador a partir de 120 voltios rectificados, lo cual se debe a un mal funcionamiento en el sistema mecánico interno y al recalentamiento de las partes móviles. El desbalance y recalentamiento presentado por el autotransformador no permitió seguir con el desarrollo experimental, sin embargo los resultados obtenidos

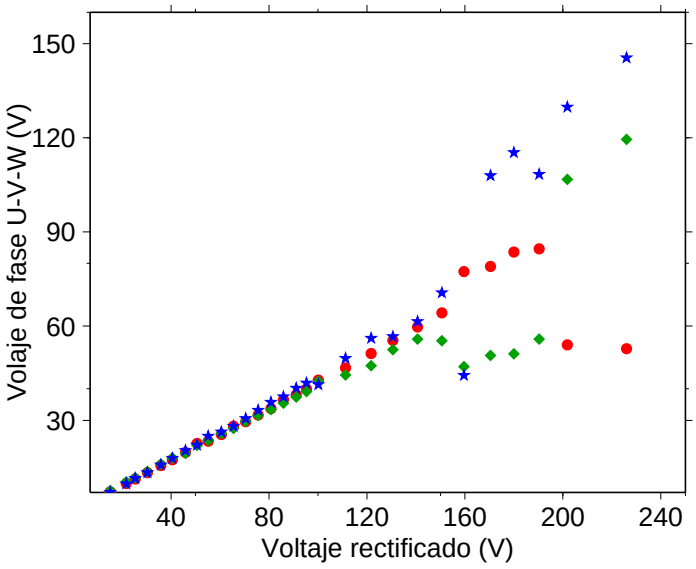


Figura 5.4: Gráfico de tensiones de fase vs. voltaje rectificado por el generador. ★) Fase U. ◆) Fase V. ●)Fase W.

muestran el buen funcionamiento de la cámara de fundición como máquina de reacción para fundición de metales con un alto grado de temperatura de fusión como lo es el titanio.

5.3. Potencia activa y factor de potencia

La potencia suministrada por el transformador al sistema y la potencia consumida por la carga estan íntimamente relacionadas con la eficiencia del generador y la frecuencia de trabajo en resonancia serie f_r . La medición de frecuencia de trabajo sobre el inductor coincidió con el valor estimado teóricamente a partir de la ecuación (4.3), con un error no mayor al 3%, lo que conlleva a concluir que el sistema microcontrolado ejecutó correctamente su función, en este sentido el desarrollo en la entrega de potencia activa consumida por sistema muestra un incremento sotenido y ordenado hasta los 160 voltios rectificados, donde comienza a variar en forma

irregular coincidiendo con el desbalance en las tensiones suministradas por el autotransformador. El autotransformador alcanzó el valor de 2040,15W, en potencia activa entregada al sistema por un período de tiempo no mayor a 1 minuto, lo cual ocasionó la suspención de la prueba debido a su recalentamiento.

El desarrollo en los valores de factor de potencia mostró un continuo aumento en el consumo de potencia reactiva a medida de que se producía el aumento de tensión regulada a la entrada del generador, lo cual puede ser interpretado como consecuencia del desbalance en las tensiones de entrada y el consumo reactivo del sistema al no establecerse con exactitud una frecuencia de resonancia serie.

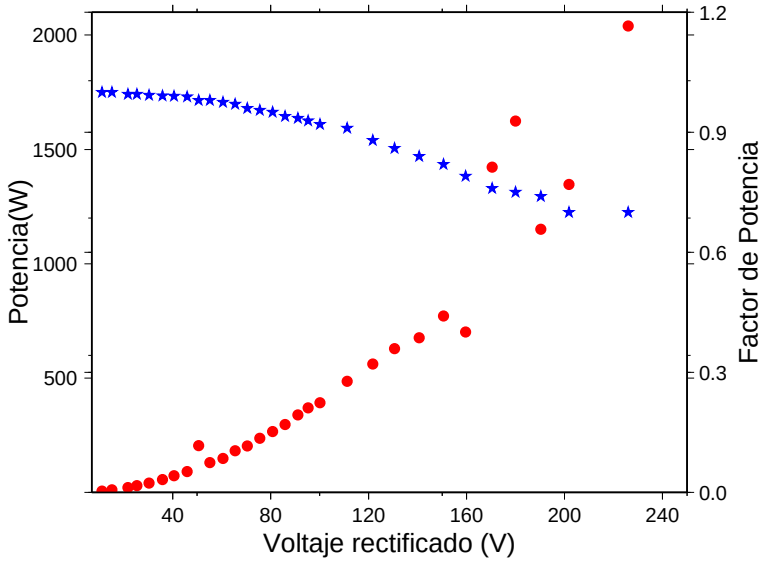


Figura 5.5: Gráfico de potencia activa y factor de potencia vs. tensión regulada por el generador. ●)Potencia activa (W). ★) Factor de potencia.

5.4. Temperatura

La temperatura alcanzada en la carga fue de 1105 °C. No se logró alcanzar la temperatura de fusión del hierro (1536 °C), como consecuencia de las limitaciones

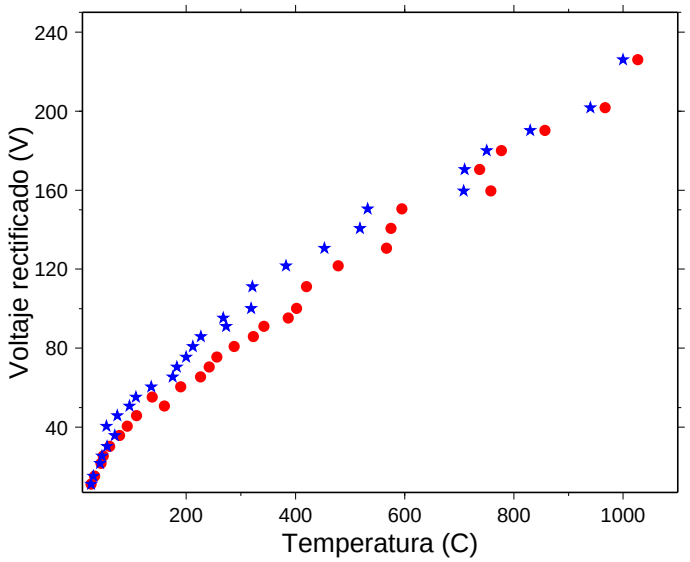


Figura 5.6: Gráfico de voltaje rectificado por el generador vs. temperatura en el borde y centro de la carga de $0{,}15 \cdot 10^{-3} Kg$ de hierro. ●) Temperatura en el centro °C. ★) Temperatura en el borde °C.

impuestas por la potencia del autotransformador. La cámara de fundición mostró un correcto funcionamiento en término de acoplamiento magnético, velocidad de transferencia de energía y prevención de cancelación de campos magnéticos. Se realizaron medidas de temperatura en promedio para el centro y borde de la carga. En la figura (5.6), podemos observar estas dos temperaturas en relación al voltaje rectificado. No se estimaron las pérdidas de calor por radiación.En la figura (5.7) podemos observar imágenes de los $0{,}15 \cdot 10^{-3} Kg$ gramos de hierro a una temperatura promedio de 1105 °C.

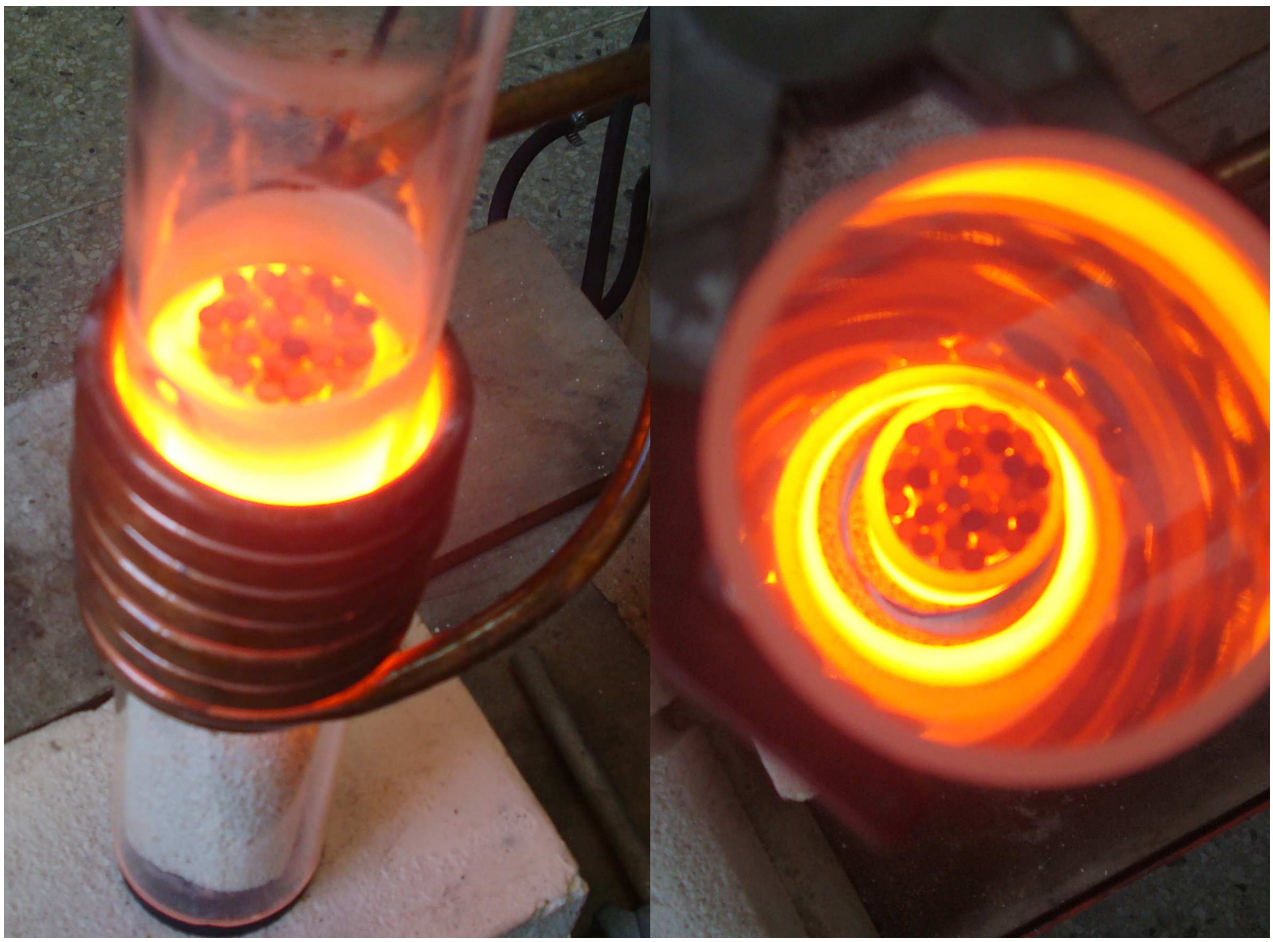


Figura 5.7: Carga: $0{,}15 \cdot 10^{-3} Kg$ gramos de hierro, Temperatura promedio 1105 °C

Capítulo 6

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El proceso de diseño y construcción de la bobina de inducción fue caracterizado por el avance simultáneo en las áreas de investigación, simulación y construcción del sistema experimental. Las observaciones y conclusiones formuladas para cada una de estas áreas serán presentadas a continuación.

1. El proceso de investigación permitió conocer los fundamentos teóricos del fenómeno de calentamiento inductivo, exponiendo las variables involucradas en el proceso de diseño y los aspectos físicos y químicos presentes en el sistema.

2. Se desarrollaron y aplicaron los principios teóricos y prácticos en el diseño de inductores para equipos de fundición, dando como resultado la elaboración de una bobina de tipo solenoide, con sección transversal rectangular, mayor superficie de acoplamiento magnético y refrigerable por medio de un fluido interno. Los aspectos considerados con mayor importancia fueron la dispersión del flujo magnético y la eficiencia en la transferencia de energía. Un aspecto no desarrollado en este trabajo es el uso de concentradores de flujo magnético y el uso de conexiones flexibles para la línea de trasmisión, lo cual representaría un paso más en el mejoramiento de la eficiencia en el sistema de calentamiento inductivo.

3. La elaboración de la cámara de fundición es el resultado del proceso de diseño de un ambiente apropiado para la fundión de titanio. La elección de los materiales fue un proceso caracterizado por la investigación, simulación computarizada y asesoramiento de expertos en el área de fundición.

4. Las características químicas de la alúmina hacen de este material el más apropiado para contener la carga de titanio y a su vez ser el material de soporte del las secciones de la cámara de fundición expuestas a altas temperaturas por radiación y conducción.

5. La elección del tubo de cuarzo como contenedor de la atmósfera de argón es un recurso empleado en sistemas de fundición de materiales tales como el titanio, una de sus ventajas es que hace posible visualizar el proceso de fundición y por lo tanto permite hacer un seguimiento de este para tomar medidas correctivas en caso de ser necesario; la desventaja observada durante el desarrollo experimental es la fragilidad que presenta ante esfuerzos radiales desde su interior en sus bordes por la fuerza ejercida por los tapones de goma, con riesgo de ruptura, para lo cual se recomienda realizar el intercambio de gases de forma controlada.

6. El grafito como elemento conductor y concentrador de calor en la cámara de fundición es un recurso que permite el aumento en la velocidad de calentamiento y evita el choque térmico entre la carga y el crisol. A su vez disminuye el consumo de potencia activa debido a su coeficiente térmico el cual produce la disminución de la resistividad al aumentar su temperatura.

7. El sistema de válvulas y mangueras para el intercambio de gases representa una solución práctica y eficiente para la sustitución del aire por un gas inerte tal como el argón.

8. El generador (*horno de inducción*), equipo experimental diseñado y construido

por el profesor Julio Walter H. en su tesis doctoral, representó la fuente de energía controlada para la bobina de inducción y la cámara de fundición. El uso de este equipo presentó una algunos inconvenientes tales como la imposibilidad de controlar la potencia de entrada, por lo cual fue necesario el empleo de un autotransformador como sistema de regulación de tensión trifásica.

9. Durante el desarrollo experimental se empleó un autotransformador trifásico (208V-12A), el cual mostró un incorrecto funcionamiento en los niveles de tensión transformados a su salida, sumado a un súbito recalentamiento de las partes móviles, lo cual llevo a limitar las pruebas. Sin embargo, se lograron realizar diferentes pruebas de calentamiento con diferentes materiales tales como alumnio, plomo, hierro y acero. En las pruebas con aluminio el sistema mostró una gran dificultad para poder alcanzar altas temperaturas dado que la geometría de la carga no cumplía con las consideraciones del diseño. Por otra parte durante las pruebas con hierro se alcanzaron las mayores temperaturas, estas pruebas fueron satisfactorias debido a las características ferromagnéticas del material.

10. Ante las pruebas realizadas, la cámara de fundición mostró un correcto funcionamiento y desempeño, evidenciado en las bajas temperaturas medidas en el exterior del tubo de cuarzo y superfície de la bobina de inducción.

11. Debido a las dificultades antes mencionadas no se pudo realizar la prueba con titanio, la razón principal fue la falta de un transformador capaz de suministrar la potencia necesaria. Se alcanzó una temperatura de 1105 °C con tan solo el 60% de la potencia máxima disponible, lo cual indica que con la disponibilidad de un transformador adecuado se podría culminar esta prueba con una alta probabilidad de alcanzar la temperatura de fusión del titanio.

Bibliografía

[1] Walter.J.

``Desarrollo de un horno de inducción con control de potencia usando técnicas de modulación sobre una carga resonante´´

Tesis Doctoral, Universidad Simón Bolívar. Sartenejas, 2006.

[2] Munir.H.:Morton. B.

``Electricity and Magnetism´´

University of Illinois at Urbana- Champaigm. 1985. PP: 287-327

[3] Halliday.D.:Resnick.R.

``Física parte 2´´

Compañía Editorial Continental, S.A. México, 1983. PP: 147-345

[4] Goméz.V.

``Influencia de los Componentes Parásitos en el Análisis y Diseño de Inversores Resonantes Paralelo para Aplicaciones de Calentamiento por Inducción ´´

Tesis Doctoral, UNIVERSITAT DE VALÉNCIA. Valencia, Junio 1999.

[5] ASM International.
¨Chapter 2: Theory of Heating by Induction¨
Practical Induction Heat Treating
www.asminternational.org/bookstore

[6] Zinn.S.:Semiatin.S.
¨Coil design and fabrication: basic design and modification¨
Heat Treatin. June, 1988.

[7] Halliday.D.:Resnick.R.
¨Física parte 1¨
Compañía Editorial Continental, S.A. México, 1983. PP: 473-503

[8] ¨Propiedades del titanio¨
http : //*es.encarta.msn.com/encyclopedia*$_7$61569280/*Titanio.html*

[9] Kubaschewski.O.:Alcock.C
¨Metallurgical Thermochemestry¨
Pergamon Press.1979. PP: 1-57,383

[10] COMSOLAB
Femlab. Versión 3.0.
http : //*www.comsol.com/*

[11] Meeker.D.
Finite Element Methods Magnetics, Versiones 4.01 (10/04/2006 Build)

http://femm.foster-miller.net

[12] Frías.E.

``Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos´´.

Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Eléctrica,UPC.Cataluña, 2004.

[13] Arata.I.:Arrufat.F.:Palacios.P.:Folie.S.

``Variación de la resistencia con la temperatura.´´

Laboratorio de física 2, Univ. Favaloro.Argentina, 2001.

APÉNDICES