

# Índice de Contenidos

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....	14
1.1 Lugar de aplicación.....	15
1.2 El problema (o la oportunidad).....	15
1.3 Área de investigación.....	15
1.4 Área de aplicación .....	16
1.5 Objetivos.....	16
1.5.1 Objetivo General.....	16
1.5.2 Objetivos específicos.....	16
1.6 Resultados tangibles esperados.....	17
1.7 Otros interesados.....	17
1.8 Estado del arte de hornos de inducción .....	17
1.9 Alcances.....	18
1.10 Metodología.....	19
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO .....	21
2.1 Principios Generales .....	22
2.2 Horno de inducción.....	24
2.3 Partes de un Horno de Inducción .....	25
2.3.1 Bobina de inducción .....	26
2.3.2 Tipos de bobina de inducción.....	27
2.3.3 Fuente de alimentación.....	30
2.3.4 Refrigeración de la bobina.....	31
2.3.5 Crisol .....	32
2.3.6 Sistema de control .....	33
2.4 Diseño conceptual del proyecto.....	34
2.5 Etapas desarrolladas en esta Memoria .....	35
2.5.1 Diseño de bobina y circuito resonante.....	35
2.5.2 Diseño del convertidor estático y control de la potencia.....	35
2.5.3 Diseño de mecanismo de vertido de la colada.....	36
Capítulo 3 DISEÑO DE LA BOBINA Y DEL CIRCUITO RESONANTE .....	37
3.1 Análisis electromagnético, matemático de la bobina y el material a fundir ....	38

3.1.1	Campo magnético en el entrehierro.....	41
3.1.2	Flujo magnético total.....	41
3.1.3	Impedancia en los bornes de una bobina.....	42
3.2	Diseño de la bobina.....	44
3.2.1	Cálculos de la bobina.....	45
3.3	Diseño del circuito resonante.....	46
3.3.1	Cálculo del condensador y frecuencia de resonancia.....	47
3.4	Conclusiones respecto de este capítulo.....	48
Capítulo 4 DISEÑO DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO Y DEL SISTEMA DE CONTROL DE POTENCIA .....		49
4.1	Clasificación de Rectificadores .....	50
4.1.1	Rectificadores no controlados .....	50
4.1.2	Rectificadores controlados .....	51
4.1.3	Rectificadores de dieciocho pulsos .....	52
4.2	Diseño del inversor .....	54
4.2.1	Modulación de inversores monofásicos .....	55
4.3	Control de potencia del horno de inducción .....	57
4.3.1	Descripción del controlador de potencia .....	58
4.3.2	Procedimiento para el cálculo de las ganancias proporcional e integral ..	60
4.4	Conclusiones respecto de este capítulo.....	65
Capítulo 5 DISEÑO DEL MECANISMO PARA VERTER LA COLADA .....		67
5.1	Mecanismo de giro del crisol.....	68
5.1.1	Radio de giro del crisol.....	69
5.1.2	Calculo de eje y rodamiento .....	70
5.2	Estructura .....	71
5.3	Base para la bobina y crisol .....	73
5.4	Base de mecanismo de giro.....	74
5.5	Sujeción de la bobina y del crisol .....	75
5.6	Sistema general .....	76
5.7	Consideraciones de seguridad mecánicas del sistema.....	76
5.7.1	Placa protectora .....	77
5.7.2	Freno mecánico.....	77
5.8	Conclusiones respecto de este capítulo.....	80
Capítulo 6 CONCLUSIONES .....		81

6.1	Acerca del trabajo .....	82
6.2	Propuestas futuras .....	83
	Bibliografía.....	84
	Anexo A CÁLCULOS.....	86
	Anexo B HOJAS TÉCNICAS Y PLANOS .....	96

# **Índice de Tablas**

Tabla 1-1. Descripción de actividades con su respectiva herramienta de trabajo .....	20
Tabla 2-1. Eficiencias para tipos de bobina de inducción .....	30
Tabla 2-2. Etapas para el desarrollo del horno de inducción. ....	34
Tabla 3-1. Datos generales y propios del material .....	44
Tabla 3-2. Datos de la bobina. ....	45
Tabla 4-1. Comparación entre inversores en configuración fuente corriente y fuente voltaje .....	55

# Índice de Ilustraciones

Figura 2-1. Curva de la profundidad de penetración en función de la frecuencia para diversos materiales .....	24
Figura 2-2. Esquema de las partes de un horno de inducción .....	26
Figura 2-3. Bobina de inducción. Fuente: Ameritherm INC.....	26
Figura 2-4. Bobina de una espira. Fuente: Induterm.....	27
Figura 2-5. Bobina helicoidal. Fuente: Inducterm.....	28
Figura 2-6. Bobina aplastada. Fuente: Inducterm.....	29
Figura 2-7. Bobina de canal. Fuente: Pillar Induction.....	29
Figura 2-8. Fuente de alimentación de la carga.....	31
Figura 2-9. Crisol de grafito. Fuente: Morganmms.....	33
Figura 3-1. Comportamiento del flujo magnético.....	38
Figura 3-2. Circuito eléctrico equivalente del material, bobina y entrehierro.....	44
Figura 3-3. Circuito equivalente de inducción.....	46
Figura 3-4. Circuito equivalente con los valores de trabajo.....	47
Figura 3-5. Comportamiento del circuito resonante. a) Corriente de entrada (antes del circuito resonante. b) Corriente en la carga.....	48
Figura 4-1. Rectificador trifásico controlado por tiristores con una carga resistiva.....	50
Figura 4-2. Rectificador trifásico no controlado con una carga resistiva.....	51
Figura 4-3. Formas de onda de rectificador fuente voltaje. Puente completo trifásico no controlado. a) Tensión de entrada. b) Corriente de entrada. c) Tensión a la salida de rectificador. d) Corriente a la salida del rectificador.....	51
Figura 4-4. Rectificador controlado de tiristores con una carga RL.....	52
Figura 4-5. Rectificador trifásico de 18 pulsos usado en el desarrollo en esta memoria.....	53
Figura 4-6. a) Voltaje de salida del rectificador de 18 pulsos. b) Corriente de salida. ..	53
Figura 4-7. Señales de modulación. a) Referencia. b) Portadora.....	56
Figura 4-8. Inversor fuente corriente con control PWM.....	57
Figura 4-9. Corriente de salida en la carga.....	57
Figura 4-10. Sensores de voltaje y corriente.....	59
Figura 4-11. Controlador PI completo.....	59
Figura 4-12. Circuito completo indicando la entrada del ángulo.....	60
Figura 4-13. Salida de la respuesta a un escalón.....	61
Figura 4-14. Representación de la recta tangente en busca de parámetros de control. ..	61
Figura 4-15. Comportamiento del circuito con los valores calculados para una referencia de 1200W.....	63
Figura 4-16. Cambios en el set-point. 1200W; 700W y 1000W.....	64
Figura 4-17. Cambios en la carga, a) Disminución del 20%, de la carga (125mili-ohms a 100 mili-ohms). b) Aumento del 20% de carga (125 mili-ohms a 150 mili-ohms). c) Tiempo donde actúa el cambio realizado a la carga.....	65
Figura 5-1. Esquema de rotación para apoyos ubicados en distintas ubicaciones. a) en el centro de gravedad del horno. b) en el costado.....	69

Figura 5-2. Rodamiento utilizado en el diseño.....	71
Figura 5-3. Forma de la estructura a construir y fuerzas aplicadas. ....	72
Figura 5-4. Vista lateral de la estructura.....	73
Figura 5-5. Vista lateral de la base. ....	73
Figura 5-6. Vista isométrica de la base.....	74
Figura 5-7. Cadena y piñones utilizados en el diseño. ....	75
Figura 5-8. Posición del moto-reductor.....	75
Figura 5-9. Instalación de abrazaderas. ....	76
Figura 5-10. Placa protectora.....	77
Figura 5-11. Freno mecánico.....	78
Figura 5-12. Sistema completo sin tapa. Vista isométrica. ....	78
Figura 5-13. Vista de conjunto con el mecanismo en funcionamiento máximo. ....	79
Figura 5-14. Vista del conjunto con tope en el freno. ....	79
Figura 5-15. Vista del conjunto completo con la tapa y abrazaderas.....	80

# Glosario de términos

- $\vec{E}$  : Campo magnético (V/m)
- $\vec{H}$  : Intensidad de campo magnético (A/m)
- $\vec{D}$  : Desplazamiento del campo eléctrico (Colombios/m<sup>2</sup>)
- $\vec{B}$  : Flujo del campo magnético (Weber/m<sup>2</sup>=Tesla)
- $\vec{J}$  : Densidad de corriente (A/m<sup>2</sup>)
- $\rho$  : Densidad de carga (Colombios/m<sup>3</sup>).
- $H_b$  : Intensidad de campo magnético en la bobina.
- $H_c$  : Intensidad de campo magnético en el material.
- $H_e$  : Intensidad de campo magnético en el entrehierro.
- $\Phi_T$  : Flujo magnético total.
- $\Phi_b$  : Flujo magnético en la bobina.
- $\Phi_m$  : Flujo magnético en el material.
- $\Phi_e$  : Flujo magnético en el entrehierro.
- $w$  : Frecuencia de operación. ( $w = 2\pi f$ )
- $\mu$  : Permeabilidad magnética.
- $\mu_r$  : Permeabilidad magnética del material.
- $\varepsilon$  : Coeficiente de emisividad del material acero.
- $\sigma$  : Conductividad eléctrica.
- $I_b$  : Corriente en la bobina.
- $I_c$  : Corriente en la carga.
- $L_b$  : Largo de la bobina.

$N$  : Número de vueltas de la bobina.

$r_b$  : Radio de la bobina.

$r_c$  : Radio de la carga.

$Z_c$  : Impedancia equivalente.

$R_b$  : Resistencia de la bobina.

$X_b$  : Reactancia de la bobina.

$R_b$  : Resistencia del material.

$X_b$  : Reactancia del material.

$X_b$  : Reactancia del entrehierro.

$d_e$  : Diámetro del eje.

$T_a$  : Amplitud del torque variable.

$T_m$  : Magnitud del torque medio.

$M_a$  : Amplitud del momento flector variable.

$M_m$  : Magnitud del momento flector medio.

$S_e$  : Límite de fatiga del eje.

$S_y$  : Límite de fluencia del material.