



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTROMECAÁNICA**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE
INDUCCIÓN DE BAJA POTENCIA UTILIZANDO IGBT’s PARA
FUNDIR METALES LIGEROS (<1200 °C)”.**

**AUTORES: AGUIRRE GUACHAMÍN, RUBÉN DARIO
PLASENCIA LEMA, FREDDY GEOVANNY**

DIRECTOR: ING. PÉREZ GUTIÉRREZ, MILTON FABRICIO

LATACUNGA

2018



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE INDUCCIÓN DE BAJA POTENCIA UTILIZANDO IGBT’s PARA FUNDIR METALES LIGEROS (<1200°C)”** fue revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señores por **FREDDY GEOVANNY PLASENCIA LEMA Y RUBÉN DARÍO AGUIRRE GUACHAMIN** para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 23 de julio del 2018

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la del Ing. Fabricio Pérez, escrita sobre un fondo blanco.

Ing. Fabricio Pérez

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros los señores **FREDDY GEOVANNY PLASENCIA LEMA Y RUBÉN DARÍO AGUIRRE GUACHAMIN**, declaramos que este trabajo de titulación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE INDUCCIÓN DE BAJA POTENCIA UTILIZANDO IGBT’s PARA FUNDIR METALES LIGEROS (<1200°C).**” Se desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello me declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 23 de julio del 2018

FREDDY GEOVANNY PLASENCIA LEMA

C.C.: 0503139222

RUBÉN DARÍO AGUIRRE GUACHAMIN

C.C.: 0502784911



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros los señores **FREDDY GEOVANNY PLASENCIA LEMA Y RUBÉN DARÍO AGUIRRE GUACHAMIN**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el repositorio institucional el proyecto de titulación denominado “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE INDUCCIÓN DE BAJA POTENCIA UTILIZANDO IGBT’s PARA FUNDIR METALES LIGEROS (<1200°C)**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 23 de julio del 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Freddy Plasencia Lema".

FREDDY GEOVANNY PLASENCIA LEMA

C.C.: 0503139222

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Rubén Darío Aguirre Guachamin".

RUBÉN DARÍO AGUIRRE GUACHAMIN

C.C.: 0502784911

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios ya que por él vivimos y para él son todas las cosas, a mi familia en especial a mis padres. Holgué Plasencia (+) y Rosa Lema quienes han sido de una u otra manera mi apoyo incondicional, mi fuerza, a quienes le debo todo, aunque ya no esté conmigo papito cumplí la promesa que te hice y ahora puedo decir lo logramos un Dios le pague papito.

A mi hija consentida Bayolet Noely quien es mi razón de seguir luchando día a día.

Dedico también a las personas que lean este trabajo y consideren en su contenido una fuente importante de investigación.

Freddy Plasencia

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios que siempre guía mi camino, a mi padre Patricio Aguirre quien desde inicio a fin estuvo apoyándome presente con sus palabras de aliento y apoyo incondicional para poder lograr mi objetivo.

A mi madre Lucrecia Guachamín quien estuvo presente apoyándome, pero ahora que no se encuentra junto a mí para disfrutar de esta victoria juntos como ella quería.

A mi hija consentida Kaylina Aguirre quien es mi razón de seguir luchando día a día.

Darío Aguirre

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi Dios porque con su poder ha hecho menos mis problemas y dificultades, con su sabiduría ha guiado mi camino y mis objetivos, y con humildad y apegada a su amor entiendo que muchas veces hay que empezar de nuevo para poder superar.

Agradezco a mi papito Holguer Plasencia (+) que con su amor, tiempo, consideración, confianza y apoyo incondicional con mis deseos de superación personal y profesional.

A la universidad en especial a la carrera de ingeniería electromecánica las cuales me han dado mucho, gracias por permitirme formarme como profesional y como persona.

Gracias por ser parte de mi vida y por permitirme ser parte de las suyas.

Freddy Plasencia

AGRADECIMIENTO

Mi más grande agradecimiento es a Dios quien con su poder ha hecho menos mis problemas y dificultades, con su sabiduría ha guiado mi camino y mis objetivos fue mi roca fuerte en los momentos más difíciles y a quien nunca le perdí la fe, gracias por darme la vida y colmarla de bendiciones incluso en momentos cuando todo parecía perdido.

A mi padre Patricio Aguirre que estuvo en todas las etapas de este proyecto solidarizándose con mí objetivo brindándome confianza e incondicional apoyo con mis deseos de superación personal y profesional. A mi madre Lucrecia Guachamin quien lamentablemente ya no se encuentra presente.

Agradezco a mi director de este proyecto de investigación Ing. Milton Pérez quien estuvo presente ayudándome con sus amplios conocimientos teóricos y técnicos dando el tiempo necesario para poder aclarar cualquier duda el momento en que era necesario.

Darío Aguirre

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE ECUACIONES	xv
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii

CAPÍTULO I

PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.1.1 Formulación del problema.....	2
1.2 Antecedentes	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Importancia.....	4
1.5 Objetivos.....	5
1.5.1 Objetivo general	5
1.5.2 Objetivos específicos	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes investigativos	6
2.2 Fundamentación teórica.....	7
2.2.1 Antecedentes de la investigación	7
2.3 Fundamentación conceptual.....	8

2.3.1 Bases Teóricas	19
2.4 Fundamentación Legal.....	23
2.5 Sistema de variables.....	25
2.5.1 Definición nominal	25
2.5.2 Definición conceptual.....	27
2.5.3 Definición operacional.....	27
2.6 Hipótesis	27
2.7 Cuadro de operacionalización de variables.....	27

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Modalidad de la investigación	30
3.2 Tipos de investigación	30
3.3 Diseño de la investigación.....	31
3.4 Población y muestra	32
3.5 Técnicas de recolección de datos	32
3.5.1 Instrumentos.....	32
3.5.2 Validez y confiabilidad	33
3.6 Técnicas de análisis de datos	33
3.7 Técnicas de comprobación de hipótesis	34

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Análisis de resultados	36
4.2 Discusión de los resultados	36
4.3 Comprobación de la hipótesis.....	36

CAPÍTULO V

PROPUESTA

5.1 Datos informativos	38
5.2 Antecedentes de la propuesta.....	51

5.3	Justificación.....	51
5.4	Objetivos.....	52
5.5	Fundamentación propuesta.....	52
5.6	Diseño de la propuesta.....	52
5.7	Metodología para ejecutar la propuesta.....	78
5.8	Pruebas y análisis de resultados	86
5.9	Discusión de los resultados	97

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES.....	99
--------------------------	-----------

RECOMENDACIONES.....	100
-----------------------------	------------

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
--	------------

ANEXOS	105
---------------------	------------

ANEXO A. DIAGRAMA TOTAL DEL HORNO DE INDUCCIÓN CON SUS
DIFERENTES COMPONENTES.

ANEXO B. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL IGBT'S

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades Físicas de los materiales a temperatura de 20 °C.	15
Tabla 2. Operacionalización de variable independiente	28
Tabla 3. Operacionalización de variable dependiente.....	29
Tabla 4. Datos de fundidoras de la ciudad de Latacunga.....	34
Tabla 5. Parámetros para la selección del IGBT	68
Tabla 6. Ficha de datos del IGBT	69
Tabla 7. Características técnicas de la tarjeta de control MF15.....	70
Tabla 8. Tabla de pruebas.	87
Tabla 9. Valores obtenidos al inicio de la muestra 1.	88
Tabla 10. Valores obtenidos al final de la prueba 1.....	89
Tabla 11. Límites de voltaje de distorsión	90
Tabla 12. Límites de distorsión para sistemas con clasificación hasta 161 kV	91
Tabla 13. Resultados de las pruebas del horno	92
Tabla 14. Valores medios de las pruebas del horno.....	92
Tabla 15. Ponderación de parámetros de funcionamiento	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación y tipos de hornos de fundición.....	9
Figura 2. Horno de inducción sin núcleo magnético.....	11
Figura 3. Condensadores de potencia.....	13
Figura 4. Frecuencia y potencia de trabajo de semiconductores.....	13
Figura 5. Símbolos alternativos de los transistores IGBT's.....	18
Figura 6. Módulo de transistores IGBT.	19
Figura 7. Circuito equivalente del inductor de la carga.	21
Figura 8. Red de categorización.....	25
Figura 9. Método de selección y prueba.	31
Figura 10. Tiempo empleado para fundir por empresa.	34
Figura 11. Sistema de calentamiento por inducción.	38
Figura 12. Crisol de grafito.	39
Figura 13. Conjuntos de bobinas – Piezas.	40
Figura 14. Diseño de bobinas de espiras múltiples de varias formas.....	40
Figura 15. Ladrillos refractarios.....	41
Figura 16. Construcción de la estructura.....	42
Figura 17. Inversor VSI.....	43
Figura 18. Torre de refrigeración.	46
Figura 19. Esquema del proceso de transferencia de una gota.	47
Figura 20. Tiro Forzado Y Contracorriente.	48
Figura 21. Tiro Inducido Y Contracorriente.	48
Figura 22. Torre de tiro Natural.	49
Figura 23. Distribución de agua.	50
Figura 24. Diseño de la parte de fundición de material.	54
Figura 25. Distribución del revestimiento refractario.	55
Figura 26. Espesores del tubo de cobre.....	55
Figura 27. El capacitor conectado en paralelo con la inductancia de la bobina.....	61
Figura 28. Potencia vs frecuencia.	62
Figura 29. Circuito representativo de la inductancia.	65
Figura 30. Bobina de inducción magnética de 10 espiras.	78

Figura 31. Aislamiento con la reata aislante.	79
Figura 32. Aislamiento con la reata aislante.	79
Figura 33. Construcción de la caja para la bobina inductora.	80
Figura 34. Acople de bobina de inducción en la caja.	80
Figura 35. Horno de inducción.	81
Figura 36. Construcción de la estructura.	81
Figura 37. Terminación de la estructura.	82
Figura 38. Estructura con sus accesorios.	82
Figura 39. Horno terminado.	83
Figura 40. Torre de refrigeración de tiro natural.	85
Figura 41. Curva de VTHD.	90
Figura 42. Del TDD.	91
Figura 43. Comparación del consumo de potencia.	93
Figura 44. Comparación de niveles de tensión.	94
Figura 45. Comparación de consumo de corriente.	94
Figura 46. Comparación de valores de frecuencia.	95
Figura 47. Comparación de valores de tiempo.	956
Figura 48. Comparación de valores de temperatura.	97

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ley de Ampere.....	19
Ecuación 2. Fuerza electromotriz.....	20
Ecuación 3. Potencia disipada.....	20
Ecuación 4. Coeficiente de transmisión K.....	21
Ecuación 5. Pérdidas de calor por conducción.....	22
Ecuación 6. Pérdidas de calor por radiación.....	22
Ecuación 7. Cálculo de muestra en universo finito.....	32
Ecuación 8. Entalpia del aire húmedo.....	46
Ecuación 9. Volumen del cilindro.....	53
Ecuación 10. Longitud de cada espira.....	55
Ecuación 11. Número de espiras.....	55
Ecuación 12. Longitud total de la espira.....	56
Ecuación 13. Resistencia eléctrica de la bobina de inducción.....	56
Ecuación 14. Superficie lateral.....	57
Ecuación 15. Superficie del fondo.....	58
Ecuación 16. Superficie superior.....	59
Ecuación 17. Calor de fusión.....	59
Ecuación 18. Calor latente de fusión.....	60
Ecuación 19. Calor de evaporación del aluminio.....	60
Ecuación 20. Potencia total requerida para la fundición.....	61
Ecuación 21. Voltaje eficaz.....	62
Ecuación 22. Impedancia inductiva.....	63
Ecuación 23. Impedancia capacitiva.....	63
Ecuación 24. Impedancia inductiva.....	64
Ecuación 25. Ecuación del Transformador.....	66
Ecuación 26. Potencia en el primario del transformador.....	66
Ecuación 27. Potencia de la superficie en la pieza.....	67
Ecuación 28. Campo magnético.....	67
Ecuación 29. Diferencia entre temperatura de entrada y salida de la torre.....	70
Ecuación 30. Cantidad de calor transferido.....	70

Ecuación 31. Factor de refrigeración β	71
Ecuación 32. Pérdidas por evaporación.	71
Ecuación 33. Balance de energía para el sistema.....	72
Ecuación 34. Cálculo de la Entalpía de la mezcla aire- vapor de agua.....	73
Ecuación 35. La humedad absoluta de la mezcla aire-vapor de agua.	73
Ecuación 36. Volumen húmedo de la mezcla aire-vapor de agua.	73
Ecuación 37. Carga de calor (Q.)	74
Ecuación 38. Relación (L/G).....	75
Ecuación 39. Número de Unidades de Difusión.	76

RESUMEN

En la actualidad en las industrias se necesita el calentamiento o fundición de los metales de forma rápida y controlada. En un horno de inducción el calor es generado por la inducción eléctrica de un metal que se encuentra en un crisol, alrededor del cual se encuentran enrolladas bobinas magnéticas. Este proceso de calentamiento se puede realizar mediante las leyes de (Faraday y Ampere) y el efecto joule, aumentando la temperatura del metal se somete a fundir. los componentes de un sistema de inducción son: las bobinas, conformado por las bobinas de fuerza y por las bobinas de refrigeración, la fuente de alimentación, la etapa de acoplamiento de la carga, el sistema de enfriamiento, el material refractario que protege a las bobinas de la pieza a fundir. Este trabajo se realiza el diseño y construcción del horno de inducción y del sistema de refrigeración incorporada la más avanzada tecnología de transistores de potencia de tipo IGBT's. Con el correcto cálculo de diseño, se construyó un prototipo que se evaluara en condiciones reales de operación, mediante una prueba de una muestra de aluminio se obtuvo valores de medida para realizar el análisis, los mismos que están dentro de la norma IEEE 159 del CONELEC, cumpliendo con el porcentaje de la norma que es de 5% del VTHD y TDD.

PALABRAS CLAVE:

- **HORNO DE INDUCCIÓN**
- **TRANSISTOR BIPOLAR DE PUERTA AISLADA**
- **BOBINAS DE INDUCCIÓN**
- **FUNDICIÓN DE META**

ABSTRACT

Nowadays in the industries the heating or melting of the metals is needed in a fast and controlled way. In an induction furnace the heat is generated by the electrical induction of a metal found in a crucible, around which magnetic coils are wound. This heating process can be done by the laws of (Faraday and Ampere) and the joule effect, by increasing the temperature of the metal it undergoes melting. The components of an induction system are: the coils, formed by the coils of force and by the cooling coils, the power supply, the stage of coupling the load, the cooling system, the refractory material that protects the coils from cast to cast. This work is carried out the design and construction of the induction furnace and the cooling system incorporated the most advanced technology of power transistors of IGBT type. With the correct design calculation, a prototype was built to be evaluated under real operating conditions, by means of a test of an aluminum sample, measurement values were obtained to perform the analysis, the same ones that are within the norm IEEE 159 of the CONELEC, complying with the percentage of the standard that is 5% of VTHD and TDD.

KEYWORDS:

- **INDUCTION OVEN**
- **INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR**
- **INDUCTION COILS**
- **METAL FOUNDRY**

CAPÍTULO I

1 PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

La fundición de metales es una de las actividades más difundidas a nivel mundial, en escalas artesanal e industrial, debido al uso extendido de productos metalúrgicos para la construcción de máquinas e infraestructuras, el reciclaje de materiales ya procesados, así como para la creación de piezas ornamentales o bajo pedido (Peiro, 2017). Los procesos industriales implican el uso de técnicas que permitan abaratar costos para obtener la mayor ganancia posible, debido a esto la mayor parte de empresas dedicadas a esta actividad en los países desarrollados utilizan combustibles fósiles y vegetales para producir la cantidad de energía suficiente que les permita obtener, producir y procesar la materia prima hasta obtener metales con el grado de pureza requerido por las normas establecidas en la industria, sin consideración de los efectos secundarios hacia el medio ambiente (Santiago, 2000).

En el Ecuador, las empresas dedicadas a la metalurgia tienen dos frentes de trabajo, la extracción de minerales para exportación y el reciclado de metales en productos de consumo local, siendo el segundo la actividad que requiere aplicar la fundición de metales, ya sea a escala industrial, como las plantas de acero y aluminio que utilizan calderos u hornos de resistencia eléctrica para alcanzar la temperatura necesaria para el procesamiento, o a nivel artesanal, en metal-mecánicas locales que realizan esta actividad para satisfacer la demanda de artesanos o mecánicos que utilizan materiales como el aluminio o el bronce en trabajos específicos (Mipro, 2014)

En la ciudad de Latacunga, este tipo de fundidoras de baja escala emplean crisoles adaptados para fundir los metales utilizando como fuente de energía cilindros GLP y oxígeno, lo cual no solo representa una fuente de contaminación, sino que también existe el peligro de explosión de los envases o cilindros. El uso de un método que pueda ser controlado de forma precisa mediante la aplicación de elementos eléctricos y electrónicos, debe ser investigado en favor de los esfuerzos para reducir la contaminación y salvaguardar la integridad de las personas que se dedican a esta actividad, brindando un consumo eficiente de energía con

resultados de buena calidad. Por lo visto anteriormente surge la necesidad de desarrollar un horno de fundición basado en inducción, que, además de no necesitar de elementos contaminantes para su funcionamiento, permite reducir el riesgo de accidentes laborales asociados con esta actividad.

1.1.1 Formulación del problema

¿Cuáles son los parámetros que permitirán el diseño y construcción de un horno de inducción de baja potencia utilizando IGBT'S para fundir metales ligeros (<1200°C) en un proceso eficiente que evite impurezas en la fundición?

1.2 Antecedentes

La fundición de metales en pequeñas empresas de la ciudad de Latacunga se realiza a baja escala, de manera artesanal empleando hornos de crisol adaptados para quemar combustibles fósiles, principalmente gas licuado de petróleo, o una mezcla del mismo con oxígeno industrial, de tal manera que se mejora el proceso de combustión, obteniendo una mejor combustión.

Este mismo proceso es empleado en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE Extensión Latacunga para la demostración práctica de los procesos de fundición y modelado de aluminio o bronce en la asignatura de Mecánica de Materiales, realizándose bajo la supervisión del docente o instructor de la cátedra, en apego de las normas de seguridad vigentes en el establecimiento y con el uso del equipo de seguridad adecuado

Sin embargo, tanto en las empresas fundidoras de la ciudad de Latacunga como en la Universidad, lo importante de este proceso no es el método empleado para fundir el metal, sino el resultado, para ambos el objetivo es realizar el vaciado en moldes, en el primer caso para obtener piezas que posteriormente se van a mecanizar y en el otro para observar la formación de estructuras microscópicas.

En el Ecuador, los accidentes que involucran al GLP o a los dispositivos empleados para su manejo y distribución, provocan daños materiales, así como la pérdida de vidas, siendo un peligro latente para quienes lo manipulan, dejando un

claro antecedente para la búsqueda de métodos que permitan reemplazar el uso de estos dispositivos.

El uso de la inducción electromagnética como un método seguro y eficiente para producir calor hasta alcanzar la temperatura necesaria para realizar el proceso de fundición de metales ligeros no ferrosos es una alternativa que se viene desarrollando de forma continua no solo a nivel local, y la investigación que surge alrededor de este método para aplicarlo en procesos artesanales conlleva a una vinculación con la colectividad para dar solución a problemas más específicos, que permitirán un desarrollo más rápido de la industria local manteniendo y elevando el nivel tanto de calidad de los productos, como de seguridad para las personas que realizan esta actividad.

1.3 Justificación

En la actualidad el uso de máquinas alcanza casi todas las actividades humanas, cuyos desarrollos implican el uso de tecnologías que no se han modernizado o han cambiado muy poco desde la revolución industrial. La fundición de metales no es ajena a esta evolución, tomando en cuenta que hace solo unas décadas este proceso se hacía en su totalidad utilizando hornos que se calentaban empleando combustibles como el carbón vegetal o el coque, y que hoy en día han sido reemplazados en gran medida por sistemas de fundición de arco eléctrico, el paso hacia los sistemas de inducción es una realidad cercana en el corto plazo, que empieza a tener acogida en lugares donde se realiza esta actividad en pequeña escala y baja potencia de consumo.

El estado ecuatoriano, con la finalidad de transformar la matriz productiva, en el Plan Nacional del Buen Vivir, en el objetivo número 10, literal 2a: “Articular la investigación científica, tecnológica y la educación superior con el sector productivo, para una mejora constante de la productividad y competitividad sistémica, en el marco de las necesidades actuales y futuras del sector productivo y el desarrollo de nuevos conocimientos”, (Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017) señala claramente como las universidades deben vincularse al proceso de mejora de los sistemas de producción (Plan Nacional del Buen Vivir O. 1., 2013-2017).

También promueve el uso eficiente de los recursos energéticos como se indica en el objetivo número 11, literal 1d: “Incentivar el uso eficiente y el ahorro de energía, sin afectar la cobertura y calidad de sus productos y servicios.”, (Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017), por lo que la implementación de sistemas que permitan disminuir el consumo de electricidad para actividades comerciales se enmarca dentro de esta investigación.

Finalmente, dado que la fundición de metales conlleva el uso de combustibles fósiles y sintéticos, el desarrollo de tecnologías que permiten, no solo disminuir su uso, sino que lo eliminan por completo, se acoge al objetivo número 7, literal 8h: “Desarrollar e implementar normas técnicas y estándares de calidad ambiental en el manejo integral de todo tipo de residuos, especialmente desechos peligrosos, aceites, minerales usados, hidrocarburos, desechos especiales, eléctricos y electrónicos, sustancias químicas y radioactivas, emisiones y vertidos y los contaminantes orgánicos persistentes, así como el uso de las radiaciones ionizantes, para precautelar la salud de las personas y reducir la contaminación ambiental.”, (Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017), ayudando de forma contundente a la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera (Plan Nacional del Buen Vivir O. 7., 2013-2017).

En la ciudad de Latacunga, las pequeñas empresas de metalurgia buscan constantemente la mejora de los procesos de trabajo, ya sea mediante el uso de mejores materiales, equipos o procesos que les permitan diversificar sus productos y servicios, por lo que el acercamiento de la universidad a través de sus estudiantes para modernizar los sistemas de fundición de metales ligeros, ayudando a reducir costos y mejorando la eficiencia del proceso con el diseño y construcción de un horno que utiliza IGBT's para alcanzar temperaturas de hasta 1200°C.

1.4 Importancia

La necesidad de mejorar continuamente procesos conlleva al uso de nuevas tecnologías y a la experimentación de técnicas que se desarrollan por parte de empresas y centros de investigación para un mejor uso de los recursos. La importancia de llevar a cabo el diseño y construcción de un horno de fundición de

metales ligeros por inducción, radica en tres ejes: aumentar la eficiencia energética y operativa del proceso, disminuir los riesgos de accidentes laborales, y disminuir el impacto ecológico.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Diseñar y construir el horno de inducción de baja potencia utilizando IGBT's para fundir metales ligeros (<1200°C) en la ciudad de Latacunga

1.5.2 Objetivos específicos

- Describir el estado del arte que contribuye a fundamentar los principios que rigen el desarrollo del presente estudio.
- Establecer una metodología para el dimensionamiento de un horno de inducción.
- Diseñar los sistemas de control, potencia y seguridad del horno de inducción
- Construir el horno de inducción siguiendo los parámetros de diseño.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes investigativos

En el presente trabajo se busca dar una alternativa para la fundición de metales ligeros a baja escala mediante el uso de elementos eléctricos, electrónicos y mecánicos. Los antecedentes que servirán de ayuda son los siguientes:

Flores & Orellana. (2014) Diseño y construcción de un horno de crisol para aleaciones no ferrosas. Previo a la obtención del título en Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador.

Los autores llegan en su investigación a las siguientes conclusiones.

El horno tiene una capacidad de operación de hasta 1700°C en vacío, es decir sin material de trabajo en el crisol, por lo que se lograron validar los parámetros de diseño empleados, sin embargo aclaran que es poco seguro para los operarios trabajar a esa temperatura, a pesar de que en las pruebas se demostró que la selección de materiales refractarios, aislantes y pintura fueron adecuados (FLORES & ORELLANA, 2014).

Acevedo, A. (2007) Metodología para la construcción de un horno de inducción electromagnética. Para la obtención del título en Maestría en Ingeniería en área de Electrónica de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.

El autor llega en su investigación a las siguientes conclusiones:

Se debe utilizar transistores tipo MOSFET para la implementación de los interruptores que realizan la etapa inversora del convertidor resonante para potencias superiores a 1 kW con frecuencias de trabajo comprendidas entre 20 y 100 kHz, además el desarrollo de la bobina se realiza en función del valor de la inductancia necesaria para trabajar con el condensador disponible en el mercado, así como las condiciones de trabajo a las que será sometida, principalmente la temperatura que se desea transmitir al material en el crisol .

También hace énfasis en la simulación de los dispositivos de control para corregir la presencia de elementos parásitos en el circuito impreso en caso de que la fabricación del mismo se haya llevado a cabo en una empresa local. Además menciona que, tomando en cuenta la normativa para la calidad del servicio de energía eléctrica es necesario diseñar un rectificador con corrección del factor de potencia (Acevedo, 2007).

Trujillo, S. (2005) Diseño y construcción de un horno de crisol para fundición utilizando gas natural. Previo a la obtención del título en Ingeniería Mecánica de la Universidad San Francisco de Quito

El autor llega en su investigación a las siguientes conclusiones

El prototipo debe funcionar obligatoriamente con un flujo de aire para suministrar oxígeno para una combustión óptima, además los rangos de temperatura se modifican controlando la abertura de la ventana de succión y debe existir una presión constante de gas de 1 bar, lo que denota poca exactitud en el sistema de control de los parámetros de funcionamiento.

La temperatura alcanzada por el crisol es drásticamente reducida por las paredes de ladrillo refractario, haciéndolo seguro para la persona que deba manipularlo (Trujillo Roldán, 2005).

2.2 Fundamentación teórica

2.2.1 Antecedentes de la investigación

La producción de calor mediante inducción electromagnética es un método eficiente y sin contacto, aplicable a la fundición de metal. La generación de calor es inherente al fenómeno que bien controlado puede ser rápido, suministrando un incremento de temperatura oportuno y localizado, características que no puede ser reproducida por otros métodos de generación de calor. El diseño y construcción de bobinas de inducción depende del patrón de calentamiento requerido para una particular aplicación, frecuencia de trabajo y densidad de potencia.

Según González (2013), en la actualidad el calentamiento por inducción se utiliza en varios campos de la industria, debido a su gran versatilidad se puede

encontrar en aplicaciones como, fundición y templados de metales, entre muchos más, debido a que se puede realizar en un tiempo controlado y sin presencia de ningún combustible (González, 2013).

2.3 Fundamentación conceptual

Teoría del calentamiento por inducción

Para hablar de hornos de inducción, hay que remontarse a los años 50s, cuando la industria de la fundición se da cuenta de las ventajas económicas de los sistemas eléctricos frente a la producción con otras clases de hornos convencionales. A mediados de los 70s, se convierten en la mejor opción para fundir materiales conductores y en los 80s surgen unidades de alta potencia y frecuencia que demuestran mayor eficiencia y productividad. Convirtiéndose así, en la manera preferida de fundir metales (Kamimathyr, 2015).

La llegada de los hornos de inducción ha permitido a las empresas seguir produciendo grandes volúmenes de producto, y al mismo tiempo reducir los riesgos para los trabajadores y el medio ambiente. Todos los procesos de fundición de metales hacen que se quemen humos y gas. Los hornos de inducción, sin embargo, liberan menos gases que los hornos estándar o tradicionales a gas. (Miley, 2018).

En la actualidad el calentamiento por inducción se utiliza en varios campos de la industria, debido a su gran versatilidad se puede encontrar en aplicaciones como, fundición y templados de metales, entre muchos más. Debido a que se puede realizar en un tiempo controlado y sin presencia de ningún combustible.

Los elementos básicos de un sistema de calentamiento por inducción son un generador de corriente alterna, una bobina inductora, y la pieza de trabajo (material que se va a calentar o tratar) (González, 2018)

El calor de inducción generada en la bobina hecha con un tubo de cobre hueco produce calor. El agua fluye en el interior de las bobinas enfriándolas, el tamaño y forma de la bobina puede ser determinada según la aplicación. La fuente de alimentación de corriente alterna hace que la corriente fluye a través de la bobina de inducción y genera un campo magnético. Una vez que el material se coloca

dentro de la bobina, el campo magnético produce las corrientes de Foucault que circulan dentro del material (Celia Pacheco; José Alfonso Soto, 2009).

Hornos de fundición de metales

En el sitio web Tecnología Acero (2018), se describe los factores que determinan la clasificación de hornos de fundición:

“Los hornos para fundir metales varían mucho en capacidad y diseño, desde los pequeños de crisol que contienen unos cuantos kilos de metal a aquellos de hogar abierto con varias centenas de toneladas de capacidad. Pueden determinarse por los siguientes factores: la necesidad de fundir y elevar a la temperatura de vaciado rápidamente, la necesidad de mantener la pureza de la producción, la producción requerida y por el costo de la producción”

También en el mismo sitio se menciona otra clasificación de acuerdo al contacto entre la carga de metal con el combustible empleado o el producto usado como combustible. Finalmente se describen los tipos de horno empleados, donde se juntan algunas características de las clasificaciones anteriores. En la figura 1 se puede ver la clasificación y tipos de hornos empleados para fundición. (Acero, Clasificación de los hornos usados para la fusión, 2011).

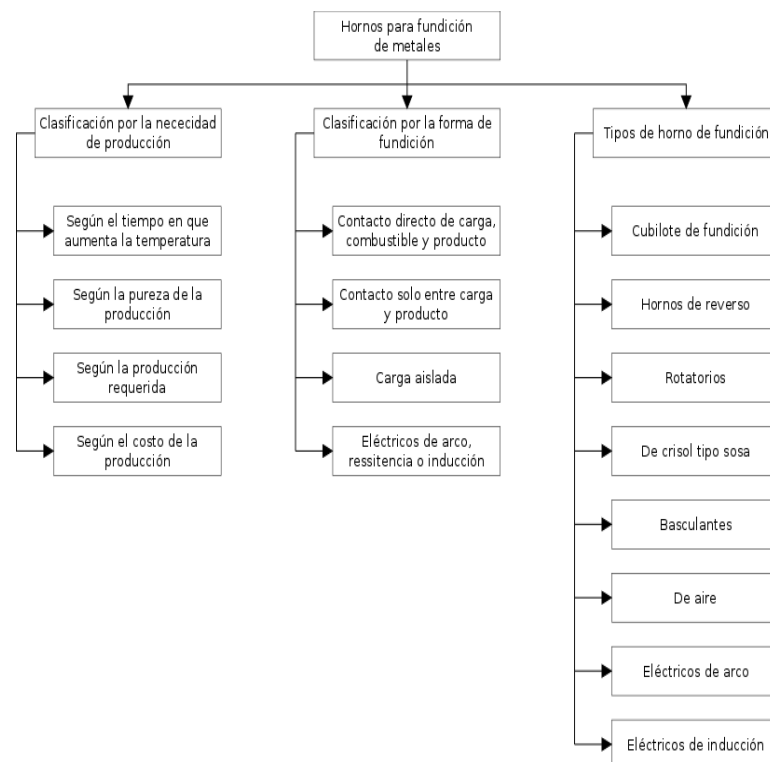


Figura 1. Clasificación y tipos de hornos de fundición.

Fuente: (Acero, Clasificación de los hornos usados para la fusión, 2011).

Hornos de inducción

Es un horno eléctrico en el que el calor es generado por la inducción eléctrica de un medio conductor (un metal) en un crisol, alrededor del cual se encuentran enrolladas bobinas magnéticas. El calentamiento por inducción se aplicó industrialmente a la fundición de metales como ejemplo; aluminio, hierro y clasifican en dos grupos (EcuRed, 2018):

- Equipos con núcleo magnético.
- Equipos sin núcleo magnético.

Equipos con núcleo magnético

Estos equipos tienen una bobina pequeña; es decir, la bobina o bobinas hace las veces de primaria y el secundario, tiene una sola espira, lo que quiere decir que para iniciar el funcionamiento de un horno de inducción de baja frecuencia debe emplearse un poco de metal fundido, de modo que forme el secundario. Éste induce a sí mismo una corriente eléctrica de baja tensión y gran amperaje que produce el calor necesario para fundir.

Equipos sin núcleo magnético

El equipo consta de un crisol totalmente rodeado de una bobina de cobre, enfriada por agua, a través de la cual pasa la corriente que genera el campo magnético y funde el metal. Los sistemas de alta frecuencia facilitan un buen control de la temperatura y la composición. Dado que se presenta una fuerte acción de agitación electromagnética durante el calentamiento por inducción, este tipo de horno tiene excelentes características de mezcla para aleaciones y para agregar nuevas cargas de metal.

El calentamiento por inducción tiene tres fenómenos físicos sucesivos, pero simultáneos:

- Transferencia de energía del inductor al cuerpo conductor.
- Transformación en el cuerpo conductor de la energía eléctrica en calor por efecto Joule.
- Transmisión de calor por conducción entre cuerpos sólidos en contacto (Albán & Álvarez, 2008).



Figura 2. Horno de inducción sin núcleo magnético.

Fuente: (Albán & Álvarez, 2008)

Basándose en el mapa conceptual de la figura 1, el proyecto de investigación se basa en un horno de inducción de crisol.

Un horno de tipo crisol, es un horno de inducción sin núcleo, consistente en una bobina solenoide enrollada sobre un crisol. Dependiendo de la aplicación, el crisol puede estar hecho de un material eléctricamente conductor, como el acero o el grafito, o un material no conductor, es el caso de la arcilla y los cerámicos. Los crisoles conductivos se calientan como resultado de las corrientes de Foucault inducidas desde la bobina, incrementando la eficiencia eléctrica del inductor cuando se funden materiales de baja resistencia, como el aluminio, el cobre o sus aleaciones, magnesio y algunos metales preciosos. El proceso de fundición ocurre gracias a la conducción térmica desde el crisol caliente hacia el metal a ser trabajado. (Rudnev, 2017).

Los elementos básicos de un sistema de calentamiento por inducción son un generador de corriente alterna, una bobina inductora, y la pieza de trabajo (material que se va a calentar o tratar). Adicionalmente, el calor producido debe ser disipado mediante haciendo pasar agua a través de la bobina, que debe ser hecha de tubo de cobre. (Rudnev, 2017).

Fuente de alimentación

Corresponde al generador de corriente alterna para el inductor y no al dispositivo que alimenta a todo el conjunto, ya sea un generador o la red de distribución eléctrica. Las fuentes de alimentación para calentamiento por inducción son variadores de frecuencia, que transforman la potencia de entrada a una frecuencia dada disponible en la línea de transmisión a una potencia de una sola fase a la frecuencia apropiada para una aplicación particular. La fuente de alimentación por es una combinación de rectificadores e inversores u osciladores. La parte de rectificadores convierten la corriente alterna (AC) de línea en corriente directa (DC), y el inversor u oscilador cambia la corriente directa en corriente alterna de una sola fase. Los componentes que forman parte de la fuente de alimentación incluyen resistencias, bobinas, condensadores, transformadores y semiconductores de potencia. Cuando se forma un conjunto entre resistencias, condensadores y bobinas, se obtiene un circuito resonante, que tiende a oscilar a una única frecuencia determinada por el valor de los componentes empleados. (Rudnev, 2017).

Bobinas

Los sistemas modernos de calentamiento por inducción son de tipo carga resonante. Esto significa que la parte inductiva y resistiva del circuito de generación de potencia son proporcionadas por la bobina de trabajo y la resistencia del material calentado. La geometría de la bobina es la que determina el valor de la inductancia y resistencia. (Rudnev, 2017).

Condensadores

Los condensadores de potencia empleados sistemas de inducción deben ser capaces de soportar alto voltaje, mientras conducen altas corrientes a la frecuencia de trabajo del inductor. Generalmente estos dispositivos están refrigerados y empaquetados en carcasas de aluminio, con terminales grandes que le permiten conectarse mediante barras. Es importante que el condensador tenga muy baja resistencia interna e impedancia para reducir las pérdidas de potencia y caídas de voltaje en este elemento. (Rudnev, 2017). En la figura 3 se puede ver varios ejemplos de condensadores de potencia.

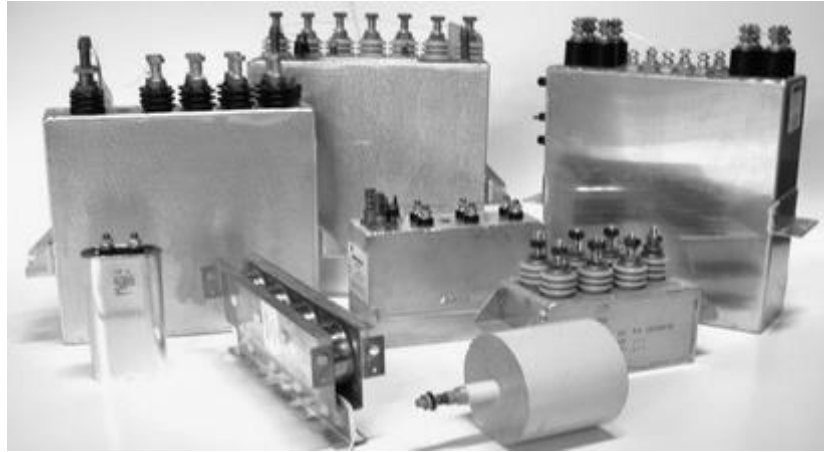


Figura 3. Condensadores de potencia.

Fuente: (Rudnev, 2017).

Semiconductores de potencia

Se emplean semiconductores de potencia como tiristores (SCR), diodos o transistores (MOSFET o IGBT) para cambiar la dirección del flujo de corriente proveniente de una fuente continua para producir corriente alterna a una frecuencia apropiada para una aplicación particular (Rudnev, 2017). En la figura 4 se muestra el rango de frecuencia y potencia de trabajo de los semiconductores empleados en potencia.

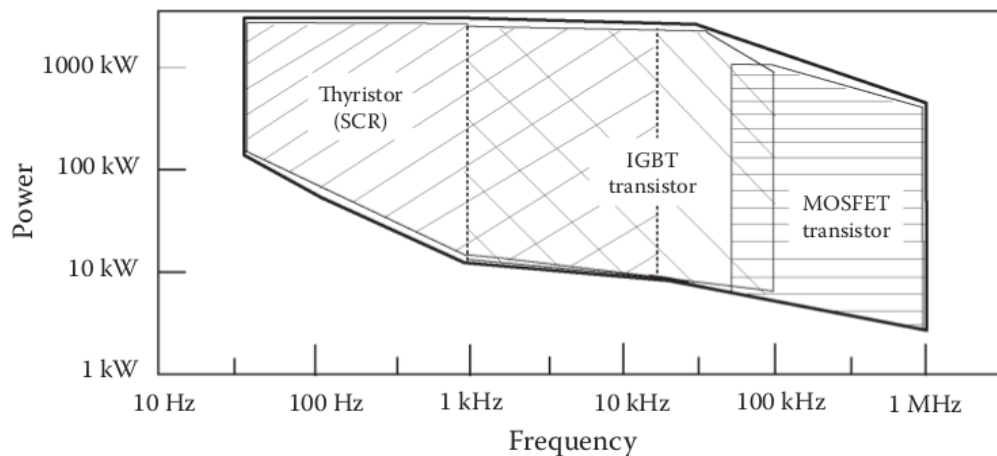


Figura 4. Frecuencia y potencia de trabajo de semiconductores.

Fuente: (Rudnev, 2017).

Los rectificadores controlados de silicio o tiristores actúan como puertas con un solo picaporte que, de ser empleado, permitirá que se abra en un solo sentido. Si la corriente intenta pasar a través del tiristor sin estar activado, no será posible,

y de igual manera si la corriente trata de pasar en sentido contrario el dispositivo no lo permitirá, incluso si la compuerta se encuentra activada o en conducción. (Rudnev, 2017).

Los transistores, sean MOSFET o IGBT, son más complicados de controlar, debido a que actúan como una compuerta grande controlada por una pequeña válvula, entre más se abra la válvula, mayor será el flujo permitido, similar a la ganancia de los transistores bipolares. La apertura de dicha puerta limita el flujo que la atraviesa, por tanto, el tamaño del transistor está ligado a la cantidad de corriente que puede manejar. Para que un transistor de potencia sea útil en aplicaciones de calentamiento por inducción debe cumplir 3 características, debe bloquear altos voltajes, permitir el flujo de grandes corrientes y hacer un cambio de estado muy rápido. (Rudnev, 2017). En la figura 6 se puede ver un módulo de IGBT doble de 300 y 50 amperios.

Propiedades de la carga

En los principios físicos de calentamiento por inducción se han usado básicamente las siguientes propiedades.

- Conductividad eléctrica σ . Es la capacidad de un material para dejar pasar la corriente eléctrica a través de él. Depende de la estructura atómica y molecular del material.
- Conductividad térmica. Es la capacidad de un material de transferir calor por conducción, esto es, por contacto directo y sin intercambio de materia (net E. , 2014).
- Calor específico. Es la cantidad de calor que se debe suministrar a toda la masa de una material para elevar su temperatura en una unidad (kelvin o grado Celsius).
- Permeabilidad magnética relativa μ_r . Es la capacidad de una materia o medio para atraer y hacer pasar a través de ella campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la inducción magnética existente y la intensidad de campo magnético que aparece en el interior de dicho material (All Rights Reserved, 2017).

Las propiedades físicas de 2 metales no ferrosos, se puede observar en la Tabla1.

Tabla 1.

Propiedades Físicas de los materiales a temperatura de 20 °C.

Material	Aluminio	Cobre
Conductividad Térmica (W/K.m)	237	372,1-385,2
Calor específico (J/Kg. K)	909	389
Conductividad eléctrica (S/m)	37800000	59600000
Permeabilidad magnética relativa	1	0.99999

Aplicaciones del calentamiento por inducción

Las aplicaciones de calentamiento por inducción se dan fundamentalmente en la industria de renovación de metales. A continuación, tenemos las más importantes.

Fusión

Los materiales son llevados a su temperatura de fusión en el interior de un crisol.

Forja

Se consigue un calentamiento homogéneo del material para un posterior proceso mecánico.

Tratamientos térmicos

Los tratamientos más comunes son los temple (aumentar la dureza y resistencia del material) y revenidos (tiramiento térmico a temperaturas bajas) de piezas de acero.

En revenidos y los calentamientos controlados de la pieza reducen tensiones mecánicas.

Soldadura

Mediante un calentamiento media/alta la temperatura de una misma pieza o piezas distintas se consiguen unir con aportación de material del mismo, obteniendo soldaduras de alta calidad.

Fabricación de semiconductores

El calentamiento por inducción se utiliza también en procesos de crecimiento de cristales de germanio y silicio, dopaje y deposición.

Curado de adhesivos y pastas sellantes

En el sector del automóvil se suelen usar pastas especiales para asegurar el perfecto sellado y unión de diversas piezas sobre todo de la carrocería de los vehículos. Mediante el calentamiento por inducción de las superficies metálicas donde han sido depositadas estas pastas se obtiene una gran mejora del curado de estas, optimizando su distribución y acelerando su fraguado (Rodríguez, Rivas, & Lara, 2005).

Sellado de envases

Se denomina sellado por inducción, a un método de calentar un disco metálico para sellar herméticamente la parte superior de recipientes de plástico o de vidrio. Este proceso de sellado se realiza luego que el contenedor ha sido llenado con su contenido y la tapa se ha colocado en su posición (plasticos, 2013).

Introducción a los semiconductores de potencia

Intervienen la electricidad y la electrónica, pues se utiliza el control que permiten los circuitos electrónicos para controlar la conducción (encendido y apagado) de semiconductores de potencia para el manejo de corrientes y voltajes en aplicaciones de potencia, entre los cuales tenemos:

- Dispositivos no controlados: en este grupo se encuentran los Diodos.
- Dispositivos semicontrolados: en este grupo se encuentran, dentro de la familia de los Tiristores, los SCR y los TRIAC.
- Dispositivos totalmente controlados: en este grupo encontramos los transistores bipolares BJT, MOSFET, IGBT y GTO.

Diodos de potencia

Los diodos se caracterizan porque en estado de conducción, deben ser capaces de soportar una alta intensidad con una pequeña caída de tensión.

Los estados de conducción o cierre (ON) y bloqueo o abertura (OFF) dependen del circuito de potencia. Por tanto, no disponen de ningún control externo.

Las características que se persiguen en ellos son:

- Que en polarización directa sean capaces de conducir una elevada corriente con una baja caída de tensión.
- En sentido inverso, deben ser capaces de soportar una fuerte tensión negativa de ánodo con una pequeña intensidad de fugas.

Tiristores

El tiristor engloba una familia de dispositivos semiconductores que trabajan en conmutación, teniendo en común una estructura de cuatro capas semiconductoras en una secuencia P-N-P-N, la cual presenta un funcionamiento biestable (dos estados estables). La conmutación desde el estado de bloqueo (“OFF”) al estado de conducción (“ON”) se realiza normalmente por una señal de control externa. La conmutación desde el estado “ON” al estado “OFF” se produce cuando la corriente por el tiristor es más pequeña que un determinado valor, denominada corriente de mantenimiento, específica para cada tiristor. Es decir, se tiene un control externo de la puesta en conducción, pero no así del bloqueo del dispositivo. Dentro de la familia de los tiristores podemos destacar los SCRs (tiristores unidireccionales) y TRIACs (tiristores bidireccionales).

Transistores

Los transistores son utilizados como interruptores. Los circuitos de excitación (disparo) de los transistores se diseñan para que éstos trabajen en la zona de saturación (conducción) o en la zona de corte (bloqueo). Los transistores tienen la ventaja de que son totalmente controlados, Los tipos de transistores son utilizados en los circuitos electrónicos de potencia incluyen los transistores BJT, los MOSFET y dispositivos híbridos, como, por ejemplo, los transistores de unión bipolar de puerta aislada (IGBT). A continuación, hablaremos del IGBT's.

IGBT'S

El transistor IGBT, de las siglas en inglés “Insulated Gate Bipolar Transistor”, es un dispositivo híbrido, el IGBT reúne la facilidad de disparo de los MOSFET con las pequeñas pérdidas en conducción de los BJT de potencia. La puerta está aislada del dispositivo, con lo que se tiene un control por tensión relativamente sencillo. Entre el colector y el emisor se tiene un comportamiento tipo bipolar, con lo que el interruptor es muy cercano a lo ideal. La Figura 5 muestra la simbología (alternos) para este tipo de transistores (Sons, 1995).

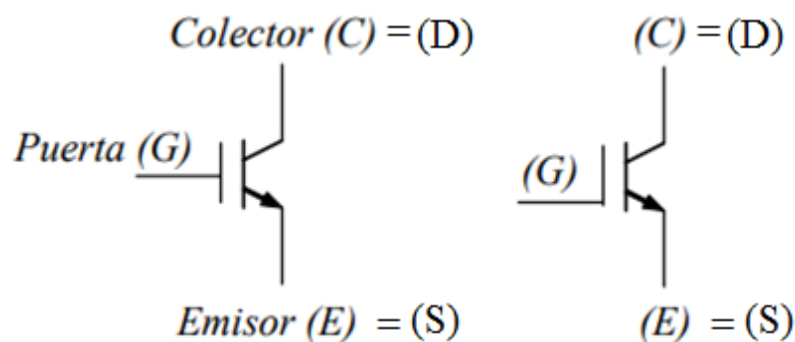


Figura 5. Símbolos alternos de los transistores IGBT's.

Es un componente de tres terminales que se denominan Gate (G) o puerta, Colector (C) o (D) y Emisor (E) o (S).

Funcionamiento de un IGBT's

Cuando se aplicado un voltaje V_{GE} a la puerta, el IGBT conducida la corriente del colector I_C y el voltaje V_{CE} se va desde el valor de bloqueo hasta cero. La corriente I_C persiste para el tiempo de encendido en que la señal en la puerta es aplicada. Para encender el IGBT, el terminal C debe ser polarizado positivamente con respecto a la terminal E. La señal de encendido es un voltaje positivo V_G que es aplicado a la puerta G (EcuRed, 2018).

Ventajas del IGBT's

El IGBT ofrece a los usuarios las ventajas de entrada MOS, más la capacidad de carga en corriente de los transistores bipolares:

- Trabaja con tensión.
- Tiempos de conmutación bajos.

- Disipación mucho mayor (como los bipolares) y alta potencia.
- Bajos tiempos de respuesta (t_{on} , t_{off}), para conseguir una alta frecuencia de funcionamiento.
- Alta concentración de intensidad por unidad de superficie del semiconductor.
- Que el efecto avalancha se produzca a un valor elevado (V_{CE} máxima elevada).
- Que no se produzcan puntos calientes (grandes di/dt) (maringil, 2015).

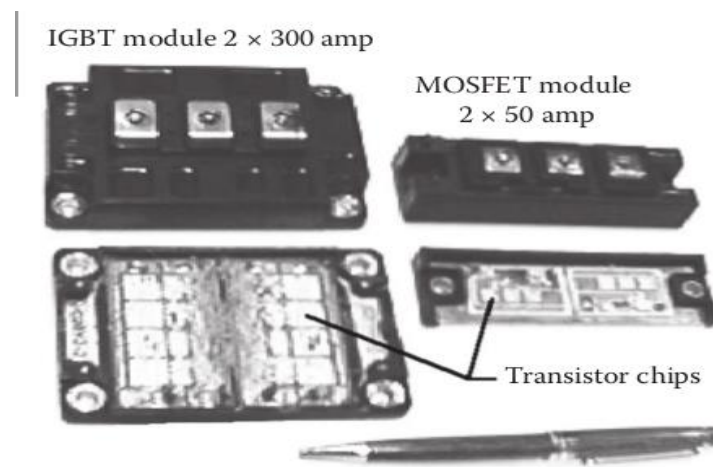


Figura 6. Módulo de transistores IGBT.

Fuente: (Rudnev, 2017).

2.3.1 Bases Teóricas

Principio de calentamiento por inducción.

El calentamiento por inducción está dado por las leyes (Faraday y Ampere) y del efecto Joule. En un dispositivo apropiado llamado inductor, (arrollamiento de bobinas), se hace pasar una determinada corriente eléctrica, que generara un campo magnético cuya amplitud y distribución viene dado por la ley de Ampere ecuación 1.

$$ni = \oint \vec{H} \cdot \overline{\partial L}$$

Ecuación 1. Ley de Ampere.

Fuente: (Rodriguez, Rivas, & Lara, 2005).

Dónde:

n : Número de espiras del inductor o bobina.

i : Corriente que atraviesa al inductor.

\vec{H} : Intensidad de campo magnético.

$\vec{\partial L}$: Diferencial de línea.

La corriente alterna aplicada al inductor crea un campo magnético variable. La mayor intensidad del campo se da en el núcleo del inductor, y depende de la fuerza de la corriente de excitación y del número de espiras de la bobina. Donde Φ es el flujo magnético que pasa a través del conductor. La ley de Faraday dice; en todo material conductor que se encuentra en el interior de un campo magnético variable se genera una fuerza electromotriz cuya ecuación 2 es.

$$FEM = -n \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

Ecuación 2. Fuerza electromotriz.

Fuente: (Rodríguez, Rivas, & Lara, 2005).

Dónde:

FEM : Fuerza electromotriz.

n : Número de espiras del inductor o bobina.

ϕ : Flujo del campo magnético (Rodríguez, Rivas, & Lara, 2005).

Las corrientes provocadas por esta FEM en el interior del material conductor se le llama corrientes inducidas o corrientes de Foucault i_f y son las responsables del efecto Joule cuya ley está dada por la ecuación 3.

$$P = i_f^2 R_{eq}$$

Ecuación 3. Potencia disipada.

Fuente: (Rodríguez, Rivas, & Lara, 2005).

Dónde:

P = Potencia disipada.

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

i_f = Corrientes inducidas o corrientes de Foucault.

La disipación de calor por efecto Joule se realiza en el interior mismo (material), donde han sido creadas las corrientes inducidas con lo que el

calentamiento por inducción se convierte en un método de calentamiento de materiales conductores en el que no hay transferencia de calor desde una fuente, de modo que no hay pérdidas de energía por este proceso de transmisión. Es decir, desde el inductor se transfiere energía "electromagnética" que se convierte en energía "calorífica" directamente en el material a calentar (Gómez, 1999).

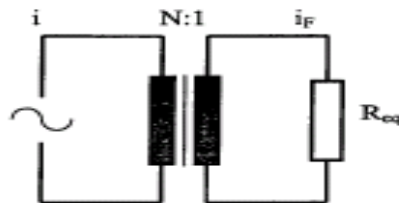


Figura 7. Circuito equivalente del inductor de la carga.

Fuente: (Rodríguez, Rivas, & Lara, 2005).

Pérdidas por calentamiento

En el proceso real se dan pérdidas por contacto directo de la carga con la intemperie, además debido a que se utiliza material sólido y el gas se encuentra cerrado en los poros, el material utilizado para la fundición no es puro, en consecuencia, tenemos las siguientes pérdidas que se dan en el sistema de inducción.

- Pérdidas de calentamiento por inducción.
- Pérdidas de calentamiento por conducción.
- Pérdidas de calentamiento por radiación.

Pérdidas de calentamiento por inducción

Se dan en los hornos a través del revestimiento refractario, desde interior del crisol hasta la bobina de cobre refrigerado por agua.

El revestimiento está compuesto de dos capas de espesores $e_1; e_2$ y conductividades térmicas $\lambda_1; \lambda_2$ respectivamente para determinar el coeficiente de transmisión \mathbf{K} (Albán & Álvarez, 2008).

$$\frac{1}{\mathbf{K}} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} \left[\frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \right]$$

Ecuación 4. Coeficiente de transmisión \mathbf{K} .

Fuente: (Rodríguez, Rivas, & Lara, 2005)

Dónde:

e_1 : Espesor del revestimiento del cemento.

e_2 : Espesor del revestimiento del crisol de grafito.

λ_1 : Conductividad térmica del cemento.

λ_2 : Conductividad térmica del crisol de grafito.

K: Coeficiente de transmisión.

Pérdidas de calentamiento por conducción.

Es un fenómeno que consistente en la propagación de calor entre dos cuerpos o partes de un mismo cuerpo a diferente temperatura (cecatherm, 2010) . Su valor se calcula mediante la ecuación 5.

$$P_p = K(T_c - T_b) \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Ecuación 5. Pérdidas de calor por conducción.

Fuente: (cecatherm, 2010)

Dónde:

P_p : Pérdida de calor por conducción.

T_c : Temperatura de la carga en °C.

T_b : Temperatura de la bobina en °C.

K: Coeficiente de transmisión.

Pérdidas de calor por radiación.

Significa pérdida de calor en forma de ondas electromagnéticas. Es decir, existe un intercambio de energía electromagnética entre el cuerpo y el medioambiente. Estas pérdidas pueden calcular utilizando la ecuación 6.

$$P_r = (5.67 \times 10^{-8}) \cdot e \left[(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right] \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Ecuación 6. Pérdidas de calor por radiación.

Fuente: (Albán & Álvarez, 2008)

Dónde:

P_r : Pérdidas de calor por radiación.

e : Emisividad superficial de carga.

T_s : Temperatura superficial en °C.

T_a : Temperatura ambiental en °C.

De acuerdo a Albán & Álvarez, (2008), valores de emisividad se pueden tomar las siguientes:

- 0.8 para el acero.
- 0.5 para el cobre y
- 0.3 para el aluminio (Albán & Álvarez, 2008).

2.4 Fundamentación Legal

Legal

La base legal para el desarrollo de esta investigación parte del Artículo 334, numeral 3, de la Constitución de la República del Ecuador, sobre el régimen de desarrollo, donde se indica: “Impulsar y apoyar el desarrollo y la difusión de conocimientos y tecnologías orientados a los procesos de producción”, (Constitución de la República del Ecuador, 2008) culminación de este trabajo, servirá no solo para las fundidoras locales de la ciudad de Latacunga en sus procesos de producción, sino que también será útil para futuras investigaciones de estudiantes de la misma Universidad y otros centros de educación superior (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

Medioambiental

El Plan Nacional del Buen Vivir hace referencia al manejo adecuado de residuos de toda clase y al manejo de las emisiones en el objetivo número 7, literal 8h, donde se menciona: “Desarrollar e implementar normas técnicas y estándares de calidad ambiental en el manejo integral de todo tipo de residuos, especialmente desechos peligrosos, aceites, minerales usados, hidrocarburos, desechos especiales, eléctricos y electrónicos, sustancias químicas y radioactivas, emisiones y vertidos y los contaminantes orgánicos persistentes, así como el uso

de las radiaciones ionizantes, para precautelar la salud de las personas y reducir la contaminación ambiental.”, (Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017), que es una de las finalidades de la presente investigación al eliminar el uso de combustibles derivados del petróleo, y por ende, la eliminación de las emisiones producidas por dichos agentes.

Social

La investigación de este tema promueve la vinculación entre la sociedad, representada por los dueños de pequeñas fundidoras de la ciudad de Latacunga, y la Universidad, facilitándoles el acceso a nuevas tecnologías, pero procurando que sean acordes a sus necesidades específicas, de forma que se fomenta la mejora en la producción y competitividad, como se menciona en el Plan Nacional del Buen Vivir, en el artículo 10, literal 1a, “Articular la investigación científica, tecnológica y la educación superior con el sector productivo, para una mejora constante de la productividad y competitividad sistémica, en el marco de las necesidades actuales y futuras del sector productivo y el desarrollo de nuevos conocimientos”, (Plan Nacional del Buen Vivir O. 7., 2013-2017).

Económico

De acuerdo al Plan Nacional del Buen Vivir, en su objetivo 11, literal 1d, donde se señala: “Incentivar el uso eficiente y el ahorro de energía, sin afectar la cobertura y calidad de sus productos y servicios.”, (Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017), el desarrollo de esta investigación se enmarca en la mejora del uso de la energía eléctrica que es distribuida a nivel nacional a través de las empresas públicas regionales, por lo tanto su desarrollo mejora el uso de estos recursos para los empresarios locales y para el estado (Plan Nacional del Buen Vivir O. 1., 2013-2017).

2.5 sistema de variables

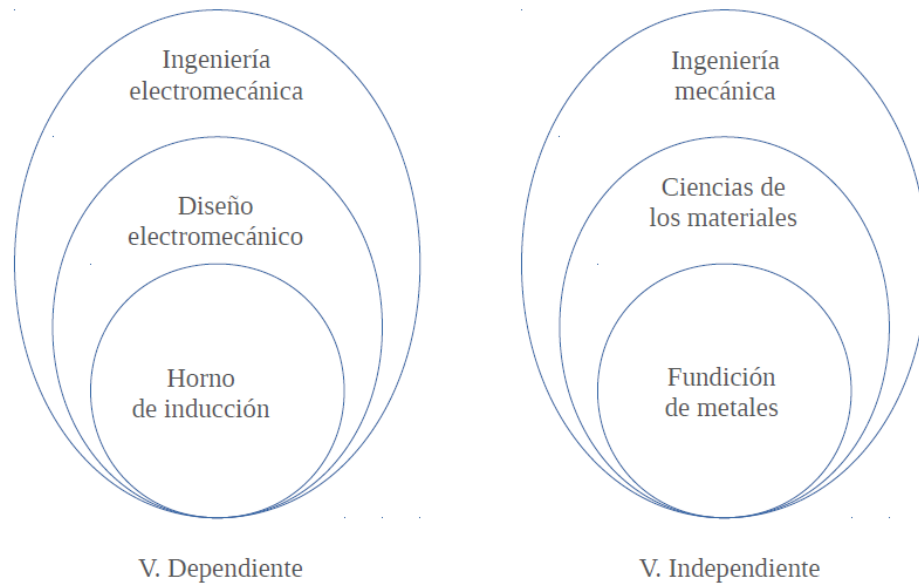


Figura 8. Red de categorización.

2.5.1 Definición nominal

Variable independiente

La ingeniería mecánica es la aplicación de los principios físicos para la creación de dispositivos útiles, como objetos y máquinas. Los ingenieros mecánicos usan los principios como calor, conservación de la masa y la energía, y fuerza para analizar sistemas físicos estáticos y dinámicos, contribuyendo a diseñar una gran variedad de máquinas y utensilios que sirven en la vida cotidiana. La ingeniería mecánica comprende el diseño, construcción, supervisión, instalación, mejoramiento y mantenimiento de sistemas mecánicos relacionados con las actividades industriales, agrícolas y comerciales, usando eficientemente el recurso con que cuenta el medio (química, 2017)

Dentro de la ingeniería mecánica, la ciencia de los materiales es un campo multidisciplinario que estudia conocimientos fundamentales sobre las propiedades físicas macroscópicas de los materiales y los aplica en varias áreas de la ciencia y la ingeniería, consiguiendo que éstos puedan ser utilizados en obras, máquinas y herramientas diversas, o convertidos en productos necesarios o requeridos por la sociedad. (EcuRed, 2018).

La fundición de metales y sus aleaciones permite fabricar piezas a medida listas para una labor específica o reducir el tiempo de mecanizado. Este proceso se puede llevar a cabo empleando diferentes técnicas, cada una de las cuales varía desde aspectos como los materiales utilizados para elevar la temperatura del metal de trabajo, la cantidad procesada, el tiempo empleado para la producción, y las características deseadas del producto final. Los métodos modernos para la fundición de metales están enfocados hacia el uso de la energía eléctrica como fuente de calor, ya sea por arco, resistencia o inducción, siendo esta última la que presenta mejor eficiencia por lo tanto se selecciona como variable independiente (1).

Variable dependiente

En el sitio web de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE Extensión Latacunga (2009), se dice sobre esta facultad: la ingeniería electromecánica abarca áreas de conocimiento relacionadas con la electricidad, la mecánica, los automatismos, la administración. Esta Ingeniería se basa en principios científicos y tecnológicos relacionados con:

- Fuentes alternativas de energía, eficiencia energética y uso racional de la energía.
- Automatización industrial, mediante equipos: electro-neumáticos, electro-hidráulicos, dispositivos electrónicos y programadores lógicos controlables.
- Mecánica en el diseño, selección y utilización de máquinas herramientas, máquinas de conversión de energía, y diferentes equipos y/o elementos que permitan la transmisión de la misma.

El diseño electromecánico conjuga las capacidades del ingeniero para diseñar piezas mecanizadas o moldeadas, con la finalidad de que estas puedan interactuar con sistemas o dispositivos eléctricos, que también han sido concebidos por parte de los profesionales de esta u otras ingenierías afines.

El calentamiento por inducción se utiliza en varios campos de la industria, debido a su gran versatilidad se puede encontrar en aplicaciones como, fundición

y templados de metales, entre muchos más, porque se puede realizar en un tiempo controlado y sin presencia de ningún combustible (Rudnev, 2017). Por lo tanto, se selecciona como variable dependiente (2)

2.5.2 Definición conceptual

Un horno de inducción es un horno eléctrico donde el calor es generado por la inducción eléctrica de un medio conductor en un crisol, alrededor del cual se encuentran enrolladas bobinas magnéticas las cuales generan un campo magnético dando como resultado la fundición del material.

El tiempo de fundición es la duración del periodo desde que se empieza a aumentar la temperatura del horno, hasta cuando el material tiene un cambio de fase de estado sólido a líquido.

2.5.3 Definición operacional

Variable independiente: Fundición de metales ligeros

Variable dependiente: Horno de inducción

La fundición de metales ligeros consiste en volver líquido un metal por transferencia de calor desde un recipiente, apropiadamente seleccionado, que convierte la inducción electromagnética en energía térmica.

El diseño del horno de inducción va a depender de factores como el material que se desea fundir, el volumen o masa, la velocidad con que aumenta la temperatura y la potencia empleada.

2.6 Hipótesis

El diseño y construcción de un horno de inducción utilizando IGBT's para fundir metales ligeros (<1200°C) permitirá reducir el tiempo de fundición y reducir la contaminación ambiental, con un manejo eficiente de energía en la ciudad Latacunga.

2.7 Cuadro de operacionalización de variables

Tabla 2.

Operacionalización de variable independiente

VARIABLE INDEPENDIENTE	CONCEPTO	OPERACIONALIZACIÓN		TÉCNICA OPERACIONAL	INSTRUMENTOS	UNIDAD
		DIMENSIONES	INDICADORES			
(1) Diseño y dimensionamiento de un horno de inducción	Un horno de inducción es un horno eléctrico donde el calor es generado por la inducción eléctrica de un medio conductor en un crisol, alrededor del cual se encuentran enrolladas bobinas magnéticas.	Diseño y selección de componentes del sistema de control.	Componentes del sistema de control con IGBT.	Cálculo de componentes	Fórmulas de circuitos RLC	Henrios, Ohmios, Faradios
		Selección de materiales.	Materiales de temperatura de fusión <1200°C	Comparación de características de los componentes	Hojas de datos de elementos electrónicos	Voltios, Amperios, Hertzios, Vatios, Segundos
		Diseño del intercambiador de calor.	20% de calor disipado	Comparación de hojas de datos de materiales.	Tablas de propiedades de metales no ferrosos del Manual de Ingeniería Mecánica	°C, Kilogramos
				Cálculo de calor sustraído del horno por convección forzada	Ecuación de transferencia de calor en un intercambiador de sección circular	Litros/hora, Vatios/m ²

Tabla 3.*Operacionalización de variable dependiente*

VARIABLE DEPENDIENTE	CONCEPTO	OPERACIONALIZACIÓN		TÉCNICA OPERACIONAL	INSTRUMENTOS	UNIDAD
		DIMENSIONES	INDICADORES			
(2) Reducir el tiempo de fundición	El tiempo de fundición es la duración del periodo desde que se empieza a aumentar la temperatura del horno, hasta cuando el material tiene un cambio de fase de estado sólido a líquido	Tiempo de fundición	Tiempo empleado en fundidoras locales.	Pruebas de campo y comparación de tiempos empleados.	Encuesta a fundidoras y tablas de medidas.	Minutos
		Temperatura de fundición	Temperatura alcanzada en hornos convencionales.	Pruebas de campo y comparación de temperaturas.	Encuesta y medición de temperaturas	°C
		Potencia necesaria para la fundición	Cantidad de combustible o potencia empleada para la fundición.	Comparación de cantidades empleadas.	Encuesta a fundidoras y registros de cargas.	Kilogramos, Vatios
		Emisión de gases contaminantes	Niveles de contaminación lanzados a la atmósfera.	Cálculo de emisiones en base a combustible empleado.	Ecuaciones y fórmulas	Gramos, partes por millón

CAPÍTULO III

3 METODOLOGÍA

La metodología empleada en la realización de la investigación es la experimental, puesto que se realizaron diferentes pruebas para verificar el funcionamiento de los sistemas que componen el horno de inducción, y se recolectaron datos para corroborar los cálculos que determinaron la selección de los elementos, también porque los resultados visibles se obtuvieron luego de realizar una experimentación con diferentes condiciones de funcionamiento.

3.1 Modalidad de la investigación

La investigación se realizó utilizando el método de campo, pese a que se partió de fuentes primarias que consistían en investigaciones previas sobre fundición de metales y el diseño de hornos de inducción, posteriormente se buscó información real de un grupo específico como son las pequeñas fundidoras de la ciudad de Latacunga, donde haciendo uso de encuestas sobre la forma en que realizan los procesos de fundición y observaciones a sus métodos de trabajo para mayor certeza de las respuestas proporcionadas, se obtuvieron datos que permitieron enfocar la investigación hacia la reducción de tiempo del proceso de fundición de metales ligeros, principalmente aluminio, procurando ser eficientes en el manejo del consumo energético, manteniendo el enfoque de la fundamentación legal del tema de investigación.

3.2 Tipos de investigación

Se reconocen dos tipos de investigación empleados, la teórica que permitió recoger los datos necesarios para la selección de elementos y el diseño de los sistemas que componen el horno de inducción, y la experimental que es parte del método de campo, para realizar encuestas a las personas dedicadas a esta actividad, además de las pruebas pertinentes que demuestren que los resultados esperados corresponden a los obtenidos o en qué nivel se aproximan, para realizar correcciones y ajustes a los parámetros de funcionamiento del conjunto, los elementos o los materiales empleados.

3.3 Diseño de la investigación

El proceso empleado para verificar el funcionamiento del horno de inducción construido parte desde la verificación de los elementos constitutivos, hasta la realización de pruebas de comprobación de cumplimiento de los parámetros mínimos de funcionamiento, es decir, que alcance la temperatura de fundición de metales ligeros sin presentar fallas. El diseño se puede apreciar en el diagrama de flujo de la figura 9.

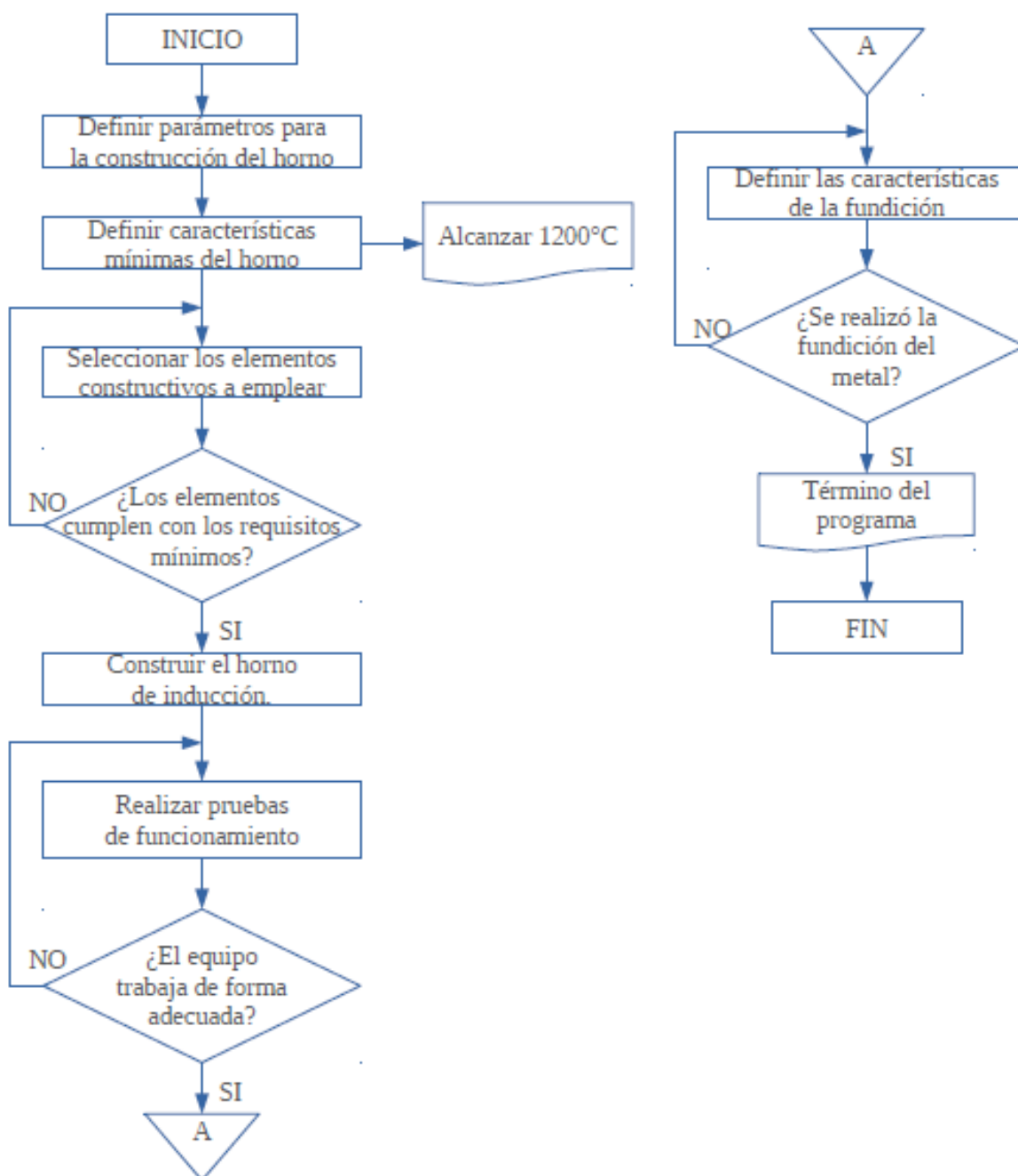


Figura 9. Método de selección y prueba.

3.4 Población y muestra

La población corresponde al número de fundidoras pequeñas de la ciudad de Latacunga, que por su capacidad pueden ser consideradas como artesanales o incluso solo una sección de una empresa metal-mecánica más grande, que también ofrece los servicios de fundición de metales bajo pedido.

Una investigación realizada en la Cámara de Industrias de Cotopaxi mostró que existe una población de 5 fundidoras pequeñas en la ciudad de Latacunga, a partir de la ecuación 7 de cálculo de muestra en un universo finito se obtiene:

$$n = \frac{N * Z_{\alpha}^2 * p * q}{d^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p * q}$$

Ecuación 7. Cálculo de muestra en universo finito.

Fuente: (Edback Networks Technologies, 2001-2013)

Dónde:

n : Es el tamaño de la muestra.

N : Es la población.

Z_{α} : Es el nivel de confianza deseado, equivale a 1.645 para una confianza del 90%.

p : Es la proporción esperada, se usa 50% para maximizar el tamaño muestral.

q : Equivale a $1 - p$

d : Es la precisión o nivel de error, aceptable un 5%

3.5 Técnicas de recolección de datos

La técnica empleada para esta investigación de campo consiste en encuestas realizadas a los operadores de las fundidoras pequeñas de la ciudad de Latacunga, además de la observación del proceso para corroborar la información proporcionada por los establecimientos.

3.5.1 Instrumentos

La encuesta realizada consistió en 6 preguntas, de las cuales 1 es informativa, 3 cualitativas y 2 cuantitativas:

- Nombre de la empresa.
- Proceso (método para elevar la temperatura).

- Material empleado.
- Condición del material.
- Cantidad trabajada en cada fundición.
- Tiempo empleado desde que inicia hasta que el material está fundido.

La segunda pregunta, referente al proceso, busca averiguar tanto el método empleado para la fundición, como el combustible usada si se da el caso.

3.5.2 Validez y confiabilidad

Se parte del cálculo de la muestra, empleando los valores siguientes:

Población: 5

Confianza del 90%: 1.645

Proporción esperada: 50% (0.5)

Error: 5% (0.05) (Edback Networks Technologies, 2001-2013).

Reemplazándolos en la ecuación 7, quedando de la siguiente forma:

$$n = 4.93$$

$$n \simeq 5$$

Dado que la muestra es igual a la población, se debe realizar la investigación de campo en todas las fundidoras de la ciudad de Latacunga.

Según la estadística descriptiva si el universo tiene menor de 30 elementos la muestra será todo el conjunto (Edback Networks Technologies, 2001-2013).

3.6 Técnicas de análisis de datos

Las técnicas de análisis de datos empleados consisten en el cálculo de la media y la mediana de los valores de “Tiempo de fundición” de cada una de las fundidoras encuestadas dado que éste es el único conjunto de datos que varía de forma significativa, es el parámetro que permite realizar una mejor comprobación de la hipótesis nula o alternativa. Los resultados de las encuestas realizadas a las diferentes fundidoras de la ciudad de Latacunga se muestran en la tabla 4:

Tabla 4.*Datos de fundidoras de la ciudad de Latacunga*

Empresa	Proceso	Material	Calidad de material	Cantidad del material	Tiempo de fundición
Mónica Suárez	GLP	Aluminio	Chatarra	1kg.	3 minutos
Mena e hijos	GLP	Aluminio	Puro	1kg.	4 minutos
Marco Pastuña	GLP	Aluminio	Chatarra	1kg.	3 minutos
Fundidora Granizo	Diésel	Aluminio	Chatarra	1kg.	4 minutos
Almendaris e hijos	GLP	Aluminio	Chatarra	1kg.	4 minutos

En la figura 10 se aprecia la distribución de los datos de tiempo.

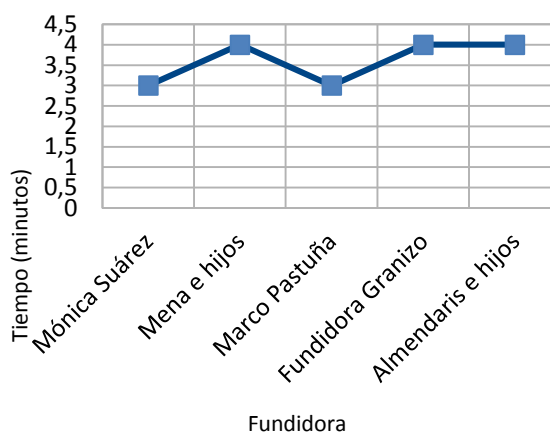


Figura 10. Tiempo empleado para fundir por empresa.

3.7 Técnicas de comprobación de hipótesis

La técnica de comprobación de la hipótesis es de intervalos de confianza, verificando que el tiempo que el horno de inducción con IGBT's demora en fundir un kilogramo de aluminio, no sobrepasa los intervalos de tiempo de los hornos de las demás fundidoras, y principalmente que no sobrepase el tiempo de la media aritmética calculado mediante el software estadístico R.

R es un software para el análisis estadístico de datos considerado como uno de los más interesantes. Apoyan esta opinión la vasta variedad de métodos estadísticos que cubre, las capacidades gráficas que ofrece y, también muy importante, se realiza en una serie de pasos, para ser observados o analizados posteriormente (Team, 2005).

El cálculo de la media y la mediana se realizaron mediante el software estadístico R, a través de su interfaz gráfica R-commander. Primero se ingresaron las datos del tiempo en un vector “t”, mediante la orden `t<-c(3,4,3,4,4)`, el resultado es un vector en una dimensión expresado como:

```
>t  
[1] 3 4 3 4 4
```

Después se ordenó los valores obtenidos de menor a mayor mediante la función `sort()`, en un nuevo vector “t1” escribiendo `t1<-sort(t)`, dando como resultado:

```
> t1  
[1] 3 3 4 4 4
```

El cálculo de la media se realizó con la función `mean()`, guardando el resultado en un vector “ma” usando `ma<- mean(t1)`:

```
> ma  
[1] 3.6
```

Finalmente, en el caso de la mediana se usa un arreglo del cuantil 50% usando las funciones `quantile()` para seleccionar el rango de datos y `probs()` para indicar el porcentaje, se almacena en un vector “mn” obteniendo el comando `mn<- quantile(t1, probs(0.5))`, pero primero es necesario cargar el paquete “quantreg” del software R, el resultado es:

```
> mn  
50%  
4
```

A simple vista también se puede apreciar que este valor coincide con la moda, dado que la mayoría de las fundidoras de la muestra se demoran 4 minutos en alcanzar la temperatura de vaciado.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se realiza la comparación de los tiempos obtenidos por medio de una encuesta en el capítulo 3.

4.1 Análisis de resultados

En la figura 10 se muestra los intervalos de tiempo que los GLP y Diésel emplearon para fundir un kilogramo de aluminio, en base a los cuales se calculó el valor de la media y mediana para hacer la comparación con el tiempo de las empresas fundidoras empleando el software estadístico R.

La media de tiempo que los hornos de GLP y Diésel demoró en alcanzar la temperatura de vaciado es de 3.5 minutos, la moda y la mediana tienen el mismo valor que corresponde a 4 minutos, que en los tres casos es mayor a la media de tiempo calculada que emplean las fundidoras de la ciudad de Latacunga.

Esta diferencia es más significativa cuando se compara con la mediana, dado que este valor indica que más de la mitad de las fundidoras encuestadas emplean hasta 4 minutos para fundir aluminio.

Finalmente, dado que el tiempo de fundición del horno de GLP y Diésel es de 3.6 minutos la media y la mediana de 4 minutos. Las fundidoras emplean de 3 a 4 minutos en alcanzar una temperatura de 660°C para fundir 1Kg de aluminio en la ciudad de Latacunga, se puede afirmar que la hipótesis propuesta es verdadera y no se requiere de la hipótesis nula.

4.2 Discusión de los resultados

Todas las fundidoras de aluminio encuestadas para la investigación utilizaban como fuente de energía para elevar la temperatura de los hornos a un hidrocarburo, ya sea GLP o diésel, y en todos los casos el tiempo empleado para procesar el material fue mayor o igual a 3 minutos, lo que deja en claro la diferencia de tiempos con respecto al horno inducción propuesto en esta investigación que utilizan energía eléctrica para el proceso de fundición de todo los metales ligeros menores a 1200 °C, de acuerdo a la información recopilada en el estado del arte, el tiempo de fundición

es menor con respecto al horno de GLP y Diésel . Adicionalmente se podría considerar los gases emitidos a la atmósfera al quemar un combustible fósil son mayores, que en el caso del horno de inducción se reduce a los gases provocados por la humedad e impurezas presentes en los elementos de trabajo.

4.3 Comprobación de la hipótesis

Dado que el tiempo de fundición del horno de inducción con IGBT's no supera la media ni a mediana de los tiempos empleados en las fundidoras de la ciudad de Latacunga, se puede afirmar que la hipótesis es verdadera, que el este tipo de hornos es más eficiente que los usados actualmente en las pequeñas industrias, e incluso es más seguro para el personal que lo opera, por tanto, no se requiere del planteamiento de una hipótesis alternativa

CAPÍTULO V

5 PROPUESTA

Se propone el diseño y construcción de un horno de inducción de baja potencia utilizando IGBT'S para fundir metales ligeros ($<1200^{\circ}\text{C}$) en un proceso eficiente que pueda implementarse en las fundidoras pequeñas de la ciudad de Latacunga, en reemplazo de los equipos actuales que utilizan combustibles fósiles como fuente de energía para su funcionamiento.

5.1 Datos informativos

Análisis de bloques

Desde sus inicios la construcción del horno o sistema de calentamiento por inducción se basa en cinco partes fundamentales como se observa en la Figura 11 que son:

- Tanque resonante.
- Fuente de alimentación (transformador).
- Sistema de control.
- Banco de condensadores.
- Sistema de refrigeración.

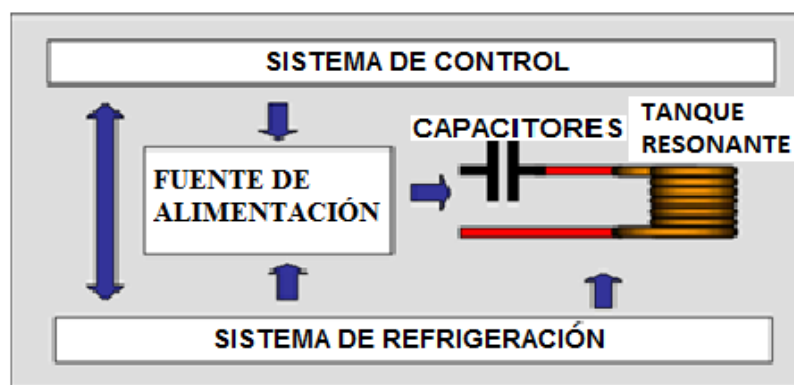


Figura 11. Sistema de calentamiento por inducción.

Tanque resonante

El tanque resonante se conforma de diferentes componentes como son:

- Crisol.
- Inductor o bobina.
- Revestimiento refractario.
- Estructura del horno.

Selección del crisol

El crisol es una cavidad que contiene al metal fundido como se puede observar en la Figura 12. Los parámetros que hay tener en cuenta al momento de seleccionar un crisol son:

Material. Normalmente este fabricado de grafito con ciertos contenidos de arcilla para la fundición solo de aluminio y está diseñado para soportar altas temperaturas ($< 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Peso. Se refiere a la cantidad del material a fundir (1kg de aluminio).

Volumen. Es la cantidad de material que pasa de estado sólido a un estado líquido, que pueda contener el crisol.



Figura 12. Crisol de grafito.

Los hornos de crisol ofrecen a la industria una gran flexibilidad y una amplia variedad de opciones con respecto al tipo de metal a fundir, La capacidad del crisol puede variar de apenas unas cuantas onzas para fundiciones de laboratorio hasta 1400 kg (3000 lb) para la fundición en grandes industrias (México, 2006).

Selección de la bobina de inducción

La bobina de inducción es el elemento más importante del horno. Por ser muy elevada la corriente que circula por la bobina, se construye con un perfil de cobre hueco para la refrigeración por agua. Por lo tanto, debe ser cilíndrica circular.

Las geometrías en bobinas de inducción varían según su aplicación y en general no tiene que tener una forma específica. Una de las ventajas que no solo es posible calentar materiales conductores de cualquier dimensión o forma, además se puede calentar solo la porción deseada. Incluso es posible calentar diferentes zonas

de la pieza con diferentes temperaturas mediante un diseño adecuado de la geometría. El diseño y construcción de bobinas de inducción depende del patrón de calentamiento requerido para una aplicación, frecuencia de trabajo y de potencia. Figura 13 (Diseño Y Construcción De Bobinas De Inducción Para Hornos, 2013).

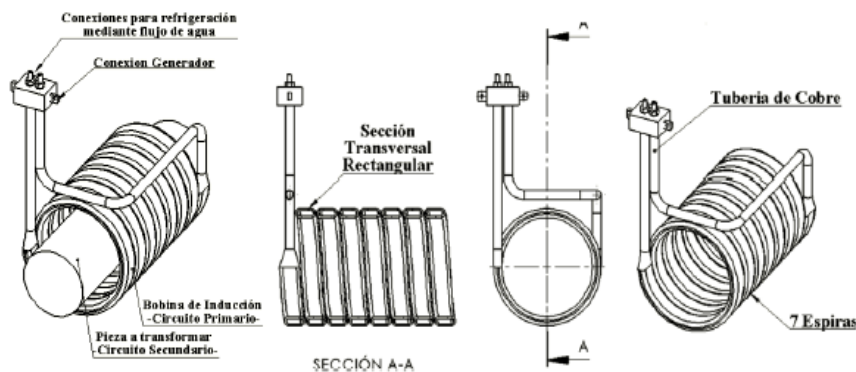


Figura 13. Conjuntos de bobinas – Piezas.

Fuente: (Diseño Y Construcción De Bobinas De Inducción Para Hornos, 2013).

a. Tipos de bobinas de inducción

La forma de la bobina inductora es muy importante para controlar el flujo de líneas de fuerza sobre la zona a calentar. En la Figura 14 se muestran diversos modelos de espiras.

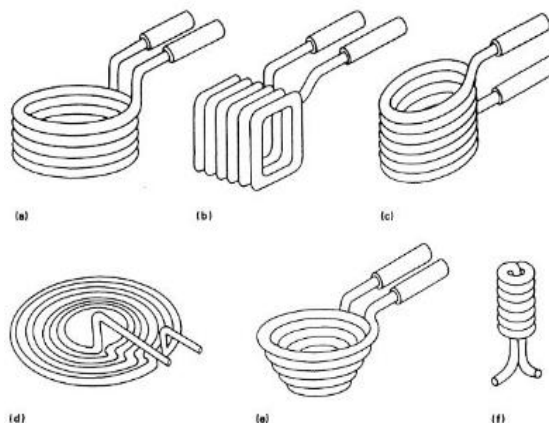


Figura 14. Diseño de bobinas de espiras múltiples de varias formas.

Fuente: (JORQUERA JUSTAVO, 2015)

b. Condiciones necesarias para tener en cuenta en el diseño de la bobina son las siguientes:

- Cuanto mayor acercamiento entre la zona a calentar y las espiras de la bobina, mayor concentración de líneas de fuerza del campo magnético, dando mayor

intensidad a las corrientes parásitas y por ende, mayor temperatura por efecto Joule.

- La mayor concentración de líneas de fuerza se encuentra en el centro de la bobina, en forma longitudinal (ESTRUCTURA DE LA MATERIA, 2014).

De acuerdo con estas condiciones se puede utilizar la bobina de tipo (a y c), bobina sinusoidal para obtener mayor concentración de líneas de fuerza del campo magnético en el centro en forma longitudinal y se soporta calentamientos a altas frecuencia. Se seleccionó la bobina de la forma a debido a que el crisol que se encontró en el mercado es cilíndrico recto.

Selección del material refractario

El material refractario normalmente es un material no metálico que suelen ser usados para procesos de altas temperaturas en el sector industrial, soportan temperaturas superiores a 600°.

Esta selección del material refractario se hace con el fin de contrarrestar las pérdidas de calor. Los más recomendados dentro de material refractario son:

- Ladrillo refractario.
- Cemento.

El tipo de material se elige de acuerdo con el metal de fundición. Desde el punto de vista eléctrico interesa un aislamiento mínimo para mejorar el acoplamiento entre la bobina y la carga y mejorar el factor de potencia. Figura 15 (FLORES & ORELLANA, 2014).



Figura 15. Ladrillos refractarios.

Fuente: (FLORES & ORELLANA, 2014).

Estructura del horno

La estructura para el tanque resonante para la fundición de aluminio se encuentra en forma de reposo durante el proceso, luego en la fase de colada el tanque resonante se balanceado con un mecanismo de giro. Se implementa un sistema hidráulico manual principalmente por dos razones:

- Es más fácil girar el horno manualmente, con sus respectivos componentes (crisol, bobina, material refractario, material fundido y la carcasa).
- Por la manera en que se vierte el aluminio líquido del horno. Un horno que se gira manualmente tiene la característica que su eje de rotación se encuentra en el centro de masa del horno, por lo que el pico del crisol tiende a realizar un movimiento de rotación para el vaciado correcto del líquido fundido.

El diseño de la estructura está basado en un mecanismo de giro, pues la estructura sostendrá al horno por medio de ejes montados sobre chumaceras fijadas a la estructura. Al diseñar la estructura se selecciona el ángulo de acero con el que se construye la estructura completa Figura 16.



Figura 16. Construcción de la estructura.

Sistema de control

La Figura 17 muestra un inversor monofásico VSI (inversor de fuente de voltaje) acoplado a la red eléctrica a través de una bobina de acople (L_r).

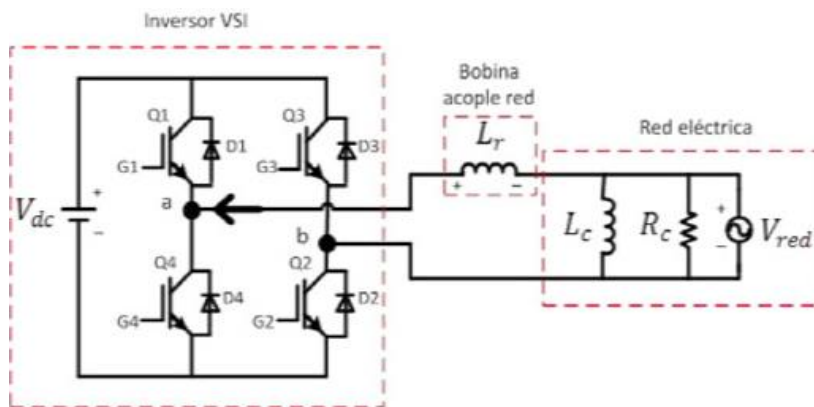


Figura 17. Inversor VSI.

Fuente: (Nicolás Muñoz-Galeano, 2016)

El inversor está compuesto por un bus DC y un puente H de dos ramas. Cada rama contiene dos interruptores que conmutan de acuerdo con la estrategia de control. Cada interruptor del puente H está compuesto por un IGBT (Q1, Q2, Q3 y Q4) y un diodo en anti paralelo (D1, D2, D3 y D4). El disparo de los interruptores se realiza mediante señales digitales en las puertas G1, G2, G3, y G4. El inversor convierte la tensión DC del bus de continua en corriente alterna AC inyectando corriente a la bobina (Nicolás Muñoz-Galeano, 2016).

Protección para encendido y apagado de los IGBT's

Esta protección más conocida como red snubber, se puede considerar como un conjunto de componentes (pasivos y/o activos) que se incorporan a un circuito de potencia, para la protección de dispositivos de conmutación contra las transiciones de encendido y de apagado, asegurando un régimen de trabajo seguro. La función principal que desarrollan los circuitos snubber es absorber la energía procedente de los elementos reactivos del circuito durante el proceso de conmutación controlando parámetros tales como la evolución de la tensión o corriente en el interruptor, o bien limitando los valores máximos de tensión que ha de soportar. Se incrementa de esta forma la fiabilidad de los semiconductores al reducirse la degradación que sufren debido a los aumentos de potencia disipada y de la temperatura de la unión. Aunque existen distintos tipos de circuitos, en el diseño solamente se utilizar el Snubber de Tensión RCD, el cual es un tipo de circuito que encuentra un amplio campo de aplicación en la protección de interruptores, como es el caso de los transistores bipolares (Patiño, 2008).

Banco de capacitores

El banco capacitores conectados en paralelo, tiene dos funciones primero es corregir el factor de potencia del inductor para que sea lo más cercano a uno, segundo es permitir que en la bobina exista una corriente mayor que la disponible en la fuente de alimentación.

Sistema de refrigeración

Introducción

Las torres de enfriamiento son equipos que se usan para enfriar agua que sale de las bobinas, extrayendo el calor del agua mediante evaporación o conducción. El proceso es igual que un intercambiador de calor.

El agua se introduce por el domo de la torre por medio de vertederos o por boquillas para distribuir el agua en la mayor superficie posible de la bandeja. El enfriamiento ocurre cuando el agua, al caer a través de la torre, se pone en contacto directo con una corriente de aire que fluye a flujo laminar con una temperatura mayor, en estas condiciones, el agua se enfría por transferencia de masa (evaporación), originando que la temperatura del aire y su humedad aumenten y que la temperatura del agua descienda; a condiciones normales. (Espectador, 2006).

Bases conceptuales previas

Calor

Es una energía térmica, generada por el movimiento molecular en la materia, esta energía se transfiere por diferencia de temperatura.

Calor sensible

Es el calor que se puede medir o sentir, provoca un cambio de temperatura, pero no un cambio de su estado, el agua al estar en estado líquido, sólido o gaseoso contienen calor sensible hasta cierto grado, hasta que sus temperaturas sean mayores que el cero absoluto.

Calor específico

Es la capacidad de un cuerpo para absorber calor.

Transferencia de calor por conducción

Es la transferencia de energía desde las partículas más energéticas de una sustancia a las partículas adyacentes, menos energéticas, como resultado de la interacción entre partículas.

Transferencia de calor por convección

Es la transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente que se encuentra en movimiento.

Refrigerantes

Son los fluidos de trabajo utilizados en los ciclos de refrigeración, que tienen características principales de evaporarse a bajas presiones y temperaturas, a altas presiones y temperaturas y son capaces de absorber calor de un ambiente. (Guanipa, 2010).

Aire seco

Es un caso ideal en el que el aire no tiene ningún contenido de vapor de agua.

Aire saturado

A una temperatura y presión determinadas el aire contiene la mayor cantidad posible de vapor de agua. Cualquier exceso de vapor de agua condensaría instantáneamente. Si se produce un enfriamiento del aire saturado el vapor en exceso condensa.

Punto de rocío

Temperatura a la que una mezcla de aire y vapor de agua está en equilibrio, el aire no puede contener más vapor de agua, un aumento de este empezaría a condensar.

Temperatura seca o de bulbo seco T_s (°C).

La temperatura del ambiente medida con un termómetro normal.

Temperatura húmeda o de bulbo húmedo T_h (°C)

Temperatura de equilibrio que alcanza una superficie de agua cuando está expuesta a una corriente de aire.

Entalpía del aire húmedo

Es una función de estado que representa termodinámicamente su contenido energético, es la suma de las entalpías de sus componentes (aire seco y vapor de agua).

$$H = m_a \cdot h_a + m_v \cdot h_v \text{ (Kcal.)}$$

Ecuación 8. Entalpía del aire húmedo.

Fuente: (Morales & Zhini Lazo Saúl Marcelo, 2014)

H: Calor total (Kcal.).

m_a : Calor sensible.

h_a : Entalpía específica del aire seco.

m_v : Calor latente.

h_v : Entalpía específica del vapor de agua.

Calor latente de vaporización

Es la cantidad de calor necesaria para que un gramo de líquido se vaporice a temperatura constante. (Morales & Zhini Lazo Saúl Marcelo, 2014).

Enfriamiento evaporación

El enfriamiento sufrido por el agua en una torre de refrigeración se basa en la transmisión combinada de masa y calor al aire que circula por el interior de la torre como se observa en la Figura 18.

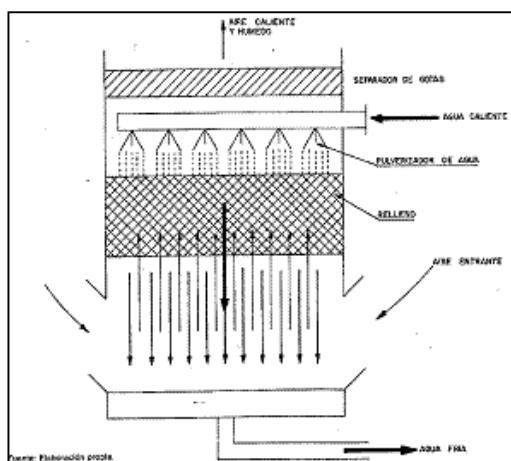


Figura 18. Torre de refrigeración.

Fuente: (Diffor & Martinez Del Pozo, 2012).

En el centro de las torres según el relleno se produce una fina pulverización o una delgada película. El contacto aire-agua produce una evaporación de parte del agua. Como se muestra en la Figura 19 el agua debe absorber calor para pasar de líquido a vapor a presión constante.

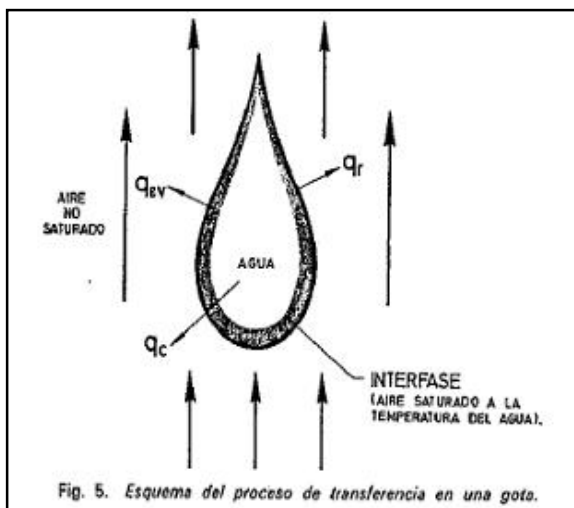


Figura 19. Esquema del proceso de transferencia de una gota.

Fuente: (Diffor & Martinez Del Pozo, 2012).

Dónde:

q_r : Por radiación, casi despreciable.

q_{EV} : Por evaporación, el más importante.

q_c : Por conducción puede llegar como máximo a un tercio del calor total. (Diffor & Martinez Del Pozo, 2012).

Clasificación de las torres

Las torres de refrigeración se clasifican en:

Tiro mecánico

La torre de tiro mecánico proporciona un control total sobre el caudal de aire suministrado también controla de forma precisa la temperatura de salida del agua.

Según donde esté situado el ventilador estas torres se pueden clasificar en tiro forzado, el ventilador está situado en la entrada de aire, o tiro inducido, cuando está situado en la zona de descarga del aire.

a. Tiro forzado

En este tipo de torres el aire entra por la base, donde está montado el ventilador, y se expulsa por la parte superior a baja velocidad. En la Figura 20 el tipo de torre está sujeta a una recirculación grande del aire debido a la baja velocidad con la que sale de la torre (Diffor & Martinez Del Pozo, 2012).

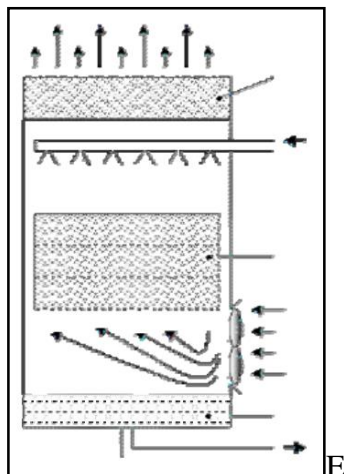


Figura 20. Tiro Forzado Y Contracorriente.

Fuente: (Diffor & Martinez Del Pozo, 2012).

b. Tiro inducido

Las torres de tiro inducido o del flujo a contracorriente, significa que el aire se mueve verticalmente a través del relleno, de manera que los flujos de agua y de aire tienen la misma dirección, pero sentido opuesto como se observa en la Figura 21.

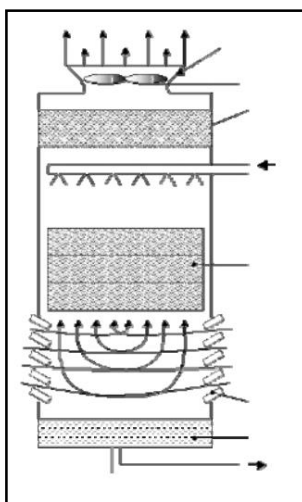


Figura 21. Tiro Inducido Y Contracorriente.

Fuente: (Diffor & Martinez Del Pozo, 2012).

c. Tiro natural

El aire es inducido por una gran chimenea situada sobre el relleno. Las condiciones porque el aire es inducido dentro de la torre son:

- La diferencia de densidades entre el aire húmedo caliente y el aire de fuera de la torre.
- La diferencia de velocidades entre el viento a nivel del suelo y el viento que circula por la parte superior de la chimenea (Diffor & Martinez Del Pozo, 2012).

Partes de una torre de tiro natural

Explicaremos las diferentes partes de una torre de tiro natural, ya que en nuestra investigación será de este tipo. Como se observa en la Figura 22 la torre con sus diferentes partes:

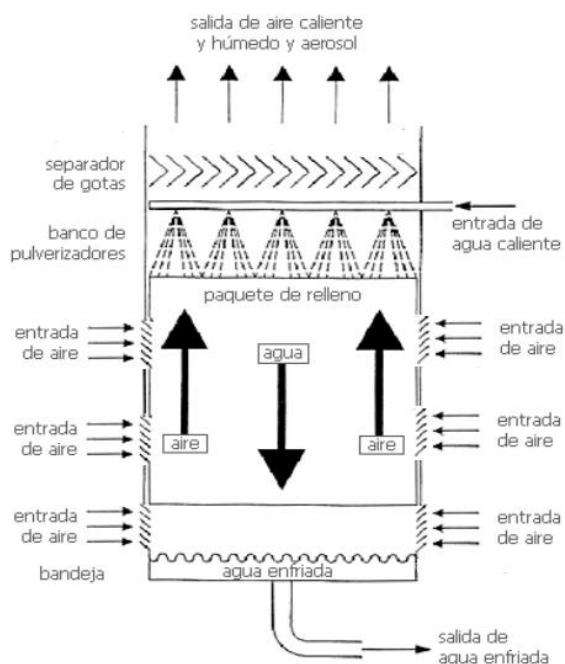


Figura 22. Torre de tiro Natural.

Sistema de distribución de agua

Se eligió el sistema de distribución por gravedad para la caída del agua por sus ventajas, en la Figura 23 se observa la distribución uniforme del agua:

- Su principal ventaja es la poca altura que necesita para el bombeo lo que se traduce en bajo costo de operación.

- El caudal se puede regular con una simple inspección visual, variando la lámina de agua.
- El mantenimiento se puede hacer con la torre en operación.

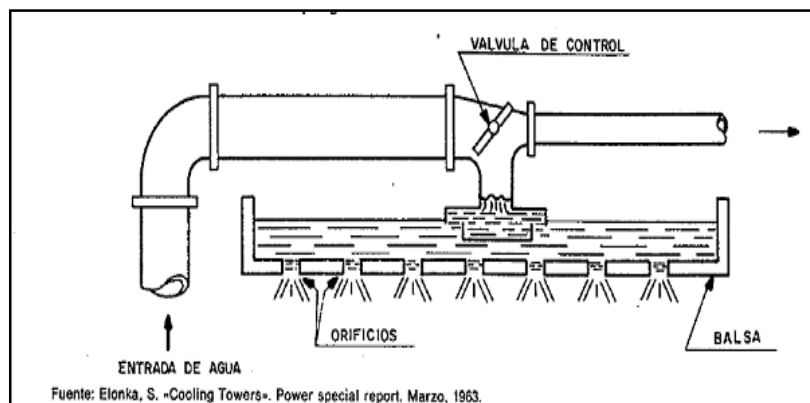


Figura 23. Distribución de agua.

Fuente: (Diffor & Martinez Del Pozo, 2012).

Relleno

El relleno es la parte más importante en el proceso de intercambio de calor, tiene dos funciones principales:

- Proporcionar una superficie de contacto lo más grande posible entre el agua y el aire, aumenta el tiempo de intercambio de calor entre el agua y el aire.
- La distribución del agua a través del relleno se puede hacer de tres maneras: salpicadura o goteo, película o laminares y de tipo mixto.

Relleno por película o laminar

Este tipo de relleno distribuye el agua en una fina película que fluye por la superficie. Esta película debe ser muy delgada y cubrir la mayor superficie posible, procurándose que el agua descienda adherida a la superficie del relleno, evitando que el aire pueda separar el agua del relleno.

Relleno por goteo o salpicadura

En los rellenos por salpicadura o goteo, el agua cae en listones o rejillas, que están superpuestos en diversos pisos. El aire se mueve de manera vertical u horizontal, mientras el que agua se va fraccionando en gotas cada vez más pequeñas, al ir

chocando con los diversos listones o rejillas. La superficie de estas gotas constituirá el área de intercambio de calor. (Diffor & Martinez Del Pozo, 2012).

5.2 Antecedentes de la propuesta

Los hornos utilizados para fundir metales ligeros en las empresas fundidoras de la ciudad de Latacunga utilizan combustibles fósiles como fuente de energía, lo que conlleva a la producción de gases residuales.

El uso del horno de inducción con IGBT's elimina la mayor parte de los efectos de la contaminación del aire ya que los únicos residuos que produce son aquellos propios de las reacciones químicas a alta temperatura y de la combustión de impurezas presentes en la materia procesada o el lugar de trabajo, reduciendo drásticamente la generación de dióxido y monóxido de carbono.

La eficiencia del horno de inducción frente a los hornos de combustión es notable, ya que, comparando la media aritmética del tiempo empleado en cada uno, existe una diferencia de más de un minuto, y dependiendo del establecimiento donde se realizó la medición de tiempo, puede ser hasta casi dos minutos, adicionalmente, el horno de inducción es de ciclo de trabajo continuo y no necesita detenerse para reponer el combustible consumido.

Una desventaja que presenta el dispositivo está en que requiere de un tipo específico de crisol, ya sea de grafito o algún material ferromagnético que actúe como núcleo y permita crear la inducción que elevará la temperatura y fundirá el aluminio.

5.4 Justificación

De lo analizado en la metodología y análisis de resultado los hornos tradicionales a gas y diésel no cumplen con un proceso eficaz y seguro en el proceso de fundición mientras que el horno de inducción es el más adecuado para realizar procesos de fundición de materiales ligeros para reducir tiempo ay la contaminación ambiental, con un ahorro eficiente de la energía eléctrica.

5.5 Objetivos

Objetivo general

- Diseñar y construir el horno de baja potencia utilizando IGBT's para fundir metales ligeros (<1200°C).

Objetivos específicos

- Describir el estado del arte que contribuye a fundamentar los principios que rigen el desarrollo del presente estudio.
- Establecer una metodología para el dimensionamiento de un horno de inducción.
- Diseñar los sistemas de control, potencia y seguridad del horno de inducción
- Construir el horno de inducción siguiendo los parámetros de diseño.

5.6 Fundamentación propuesta

La fundamentación se realiza sobre los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con el equipo de fundición, en las cuales se demuestra la mayor eficiencia de éste, debido a la disminución del tiempo empleado para alcanzar la temperatura de vaciado del material procesado, además de la reducción de emisiones por la combustión de derivados del petróleo que se usan actualmente en las fundidoras de la ciudad de Latacunga.

Adicionalmente, la fundamentación legal empleada para llevar a cabo la investigación, también sirve como un precedente para llevar a cabo la implementación de la propuesta, ya que se enmarca en varios de los objetivos nacionales del programa del Buen Vivir, así como en artículos de la constitución sobre la contaminación y la matriz productiva.

5.6 Diseño de la propuesta

Cálculo y diseño de la bobina de inducción

El diseño final del horno para fundición de aluminio de 1kg. Dicho diseño y cálculo consiste en la descripción detallada de los diferentes componentes: bobina, estructura de soporte y el cálculo de (voltaje corriente y frecuencia de trabajo). Los sistemas que interviene en la construcción del horno de inducción son los siguientes:

- Calculo de volumen del crisol.
- Calculo de la bobina de inducción.
- Calculo de pérdidas del sistema.
- Calculo de la (potencia, Voltaje y frecuencia de trabajo) requerida para la fundición del material.
- Diseño del sistema de refrigeración.

Calculo de volumen del crisol

En el diseño del baño, interviene directamente la cantidad de aluminio a fundir, en este caso particular es de 1 Kg, sabiendo también que la densidad del aluminio es de 2.7 Kg/m^3 se puede obtener el volumen del cilindro:

Datos:

Cantidad de aluminio a fundir: $m= 1\text{Kg}$

Densidad del aluminio:

$$\delta=2.7\text{Kg/m}^3$$

Se puede obtener el volumen del cilindro:

$$V = \frac{m}{\delta}$$

Ecuación 9. Volumen del cilindro.

Fuente: (Rodriguez, Rivas, & Lara, 2005)

$$V = \frac{1\text{Kg}}{2.7\text{Kg/m}^3}$$

$$V = 0.370\text{m}^3$$

Debido a que el crisol que obtuvo en el mercado para elaborar la bobina es circular, nuestro tanque resonante está diseñado de la siguiente manera como se observa en la Figura 24.

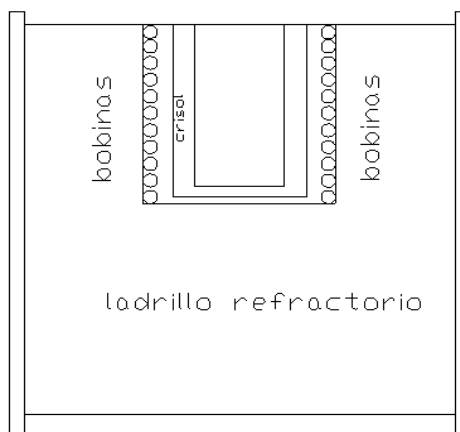


Figura 24. Diseño de la parte de fundición de material.

a. Obtención de datos a partir del crisol

$h = 10\text{cm}$; Altura del crisol.

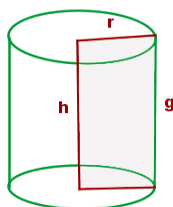
$d = D = 6\text{cm}$; Diámetro inferior y diámetro superior respectivamente del crisol.

La generatriz es:

El cilindro del crisol es un cuerpo de revolución engendrado por un rectángulo al girar en torno a uno de sus lados, que será la altura del cilindro y el lado opuesto será la generatriz. Por tanto, la altura del cilindro será igual a la generatriz.

$$h = g$$

$g = 10\text{cm}$: Generatriz



Cálculo y diseño de la bobina de inducción

Para la construcción de la bobina, se empleó una tubería de cobre, justificando en la baja resistividad eléctrica del cobre, la posibilidad de ser refrigerada, su maleabilidad y bajo costo comercial.

Para deducir el diámetro interior de la espira se necesita saber cuál es el espesor del revestimiento refractorio a utilizar tanto del cemento como del crisol Figura 25.

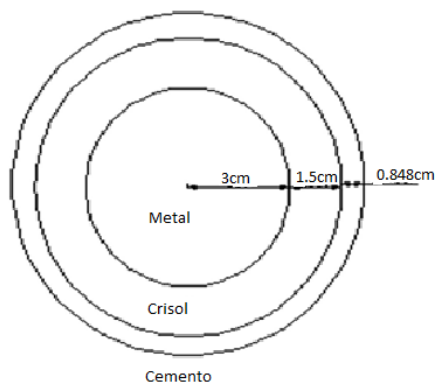


Figura 25. Distribución del revestimiento refractario.

Hay una gran corriente a traviesa a la bobina, por lo que la bobina debe ser enfriada por agua. Como se puede apreciar, el diámetro interior de la espira es de 10.696cm, mientras que el tubo de cobre tiene un diámetro exterior de 0.952cm, un diámetro interior de 0.62cm y un espesor de aislante de 0.1cm como se ve en la Figura 26.

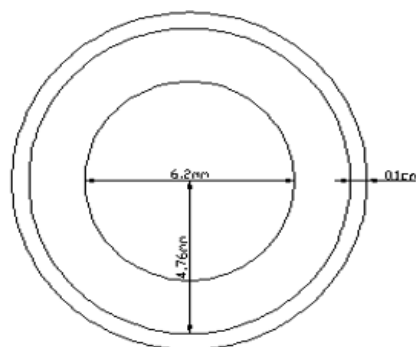


Figura 26. Espesores del tubo de cobre.

La longitud de cada espira se debe tomar en cuenta el radio del revestimiento de los materiales refractarios:

$$l_{\text{espira}} = 2\pi r = 2\pi \times 5.348\text{cm}$$

Ecuación 10. Longitud de cada espira.

$$l_{\text{espira}} = 33.6\text{cm}$$

l_{espira} : longitud de espira.

El número de espiras depende de la altura del crisol, sería entonces:

$$\text{Espiras} = \frac{h}{D_{\text{espira}} + E_{\text{aislante}}}$$

Ecuación 11. Número de espiras.

$$Espiras = \frac{10cm}{0.952cm + 0.01cm}$$

$$Espiras = 10.33 = 10$$

Dónde:

$Espiras$: Numero de espiras = n_1

D_{espira} : Diámetro exterior de la espira.

$E_{aistante}$: Espesor del aislante.

$$l_{cu} = L_{espiras} \times Espiras$$

Ecuación 12. Longitud total de la espira.

$$l_{cu} = 33.6cm \times 10cm$$

$$l_{cu} = 3.36m$$

l_{cu} : Longitud de cobre

Resistencia eléctrica de la bobina de inducción:

$$R_{Bobina} = \frac{l_{cu}}{S\pi \times \sigma_{cu}}$$

Ecuación 13. Resistencia eléctrica de la bobina de inducción.

$$R_{Bobina} = \frac{l_{cu}}{(r_{ext}^2 - r_{int}^2)\pi \times \sigma_{cu}}$$

$$R_{Bobina} = \frac{33.6m}{(0.00476^2 - 0.0031^2)\pi \times 5.8 \times 10^7}$$

$$R_{Bobina} = 1.345 \times 10^{-3} \text{ Ohmio}$$

Dónde:

S : Espesor del tubo de cobre:

σ_{cu} = Conductividad eléctrica del cobre [S/m]

R_{Bobina} = Resistencia de la bobina de cobre.

r_{ext}^2 = Radio exterior del tubo de cobre.

r_{int}^2 = Radio interior del tubo de cobre.

Pérdidas del sistema

Las pérdidas de calor que intervienen en el horno de inducción pueden calcularse con las siguientes ecuaciones, el revestimiento refractario está compuesto de cemento con una conductividad térmica de 1.040 W/mK y el crisol de grafito con una conductividad térmica de 129 W/mK.

a. Pérdidas de calor en las paredes laterales

S_L = Superficie lateral:

$$S_L = \pi \left(\frac{D}{2} + \frac{d}{2} \right) g$$

Ecuación 14. Superficie lateral

$$S_L = \pi x (0.06) x 0.10$$

$$S_L = 0.00188m^2$$

Coefficiente de transmisión

$$\frac{1}{K} = \frac{e1}{\lambda1} + \frac{e2}{\lambda2}$$

$$\frac{1}{K} = \frac{0.015}{129} + \frac{0.00848}{1.040}$$

$$K = 0.00827 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Dónde:

$e1$: Espesor del revestimiento del cemento.

$e2$: Espesor del revestimiento del crisol de grafito.

$\lambda1$: Conductividad térmica del cemento.

$\lambda2$: Conductividad térmica del crisol de grafito.

K : Coeficiente de transmisión.

Para una temperatura de bobina eléctrica de 80 °C.

$$P1 = K(T_c - T_b)S[W]$$

$$P1 = 0.00827x(660 - 80)x0.00188[W]$$

$$P1 = 0.009017KW$$

Dónde:

P_1 : Pérdida de calor en paredes laterales.

K : Coeficiente de transmisión.

T_c : Temperatura de fusión del aluminio.

T_b : Temperatura del cobre.

b. Pérdidas de calor en el fondo

S_F = Superficie del fondo:

$$S_F = \pi \frac{D_{IB}^2}{4}$$

Ecuación 15. Superficie del fondo.

$$S_F = \pi \frac{0.0062^2}{4}$$

$$S_F = 0.00486 m^2$$

D_{IB} : Diámetro interior de la bobina.

Coeficiente de transmisión

$$\frac{1}{K} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2}$$

$$\frac{1}{K} = \frac{0.015}{129} + \frac{0.00848}{1.047}$$

$$K = 0.00827 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Para una temperatura de bobina inferiores a 80 °C

$$P_2 = K(T_c - T_b)S[W]$$

$$P_2 = 0.00827 (660 - 80) \times 0.00486 [W]$$

$$P_2 = 0.0233 W$$

Dónde:

P_2 : Pérdida de calor en fondo.

K : Coeficiente de transmisión.

T_c : Temperatura de fusión del aluminio.

T_b : Temperatura del cobre.

c. Pérdidas de calor por contacto con el medio ambiente

S_s = Superficie superior.

$$S_s = \frac{\pi D^2}{4}$$

Ecuación 16. Superficie superior.

$$S_s = \pi \frac{0.006^2}{4}$$

$$S_s = 0.00486 m^2$$

Pérdidas de calor

$$P_3 = (5.67 \times 10^{-8}) \cdot e \{ (T_s - 273)^4 - (T_a - 273)^4 \} \cdot S$$

$$P_3 = (5.67 \times 10^{-8}) \times 0.00476 \{ (660 - 273)^4 - (15 - 273)^4 \} \times 0.00486$$

$$P_3 = 0.0240 \text{ KW}$$

Dónde:

P_3 : Pérdidas de calor por contacto con el medio ambiente.

T_a : Temperatura del ambiente.

e : Emisividad superficial de carga.

Potencia requerida para la fundición del material

Calor requerido para la fundición del material, interviene el calor de fusión, calor latente de fusión y calor de vaporización. Se debe calcular la cantidad de calor necesario para cambiar la temperatura del aluminio y la energía necesaria para cambiar de fase.

$$Q = m C_p \Delta T$$

Ecuación 17. Calor de fusión.

Fuente: (SegovIA, 2014-2015)

$$Q_{Al1} = m_{Al} C_{p-Als} \Delta T = 1Kg \times 900 \frac{J}{kg^{\circ}C} \times (660 - 20)^{\circ}C$$

$$Q_{Al1} = 576kJ$$

Dónde:

Q_{Al1} : Calor de fusión.

C_p : Coeficiente del calor especifico del aluminio.

m_{Al} : Masa del aluminio.

ΔT : Diferencia de temperatura del aluminio.

A esto se le agrega el calor latente de fusión:

$$Q_{Al2} = m_{Al} h_{Alf}$$

Ecuación 18. Calor latente de fusión.

Fuente: (SegovIA, 2014-2015)

$$Q_{Al2} = 1Kg \times 10.79 \frac{KJ}{mol} \times \frac{mol}{0.027Kg} = 399.62KJ$$

Dónde:

Q_{Al2} : Calor latente de fusión.

h_{Alf} : Coeficiente del calor latente de fusión.

Si se sobrecaliente el aluminio hasta llevarlo a la temperatura de colada de 750°C.

$$Q_{Al3} = m_{Al} C_{p-Als} \Delta T$$

Ecuación 19. Calor de evaporación del aluminio

$$Q_{Al3} = 1Kg \times 1089 \frac{J}{Kg^{\circ}C} (750 - 660)^{\circ}C$$

$$Q_{Al3} = 163.35KJ$$

Dónde:

Q_{Al3} : Calor de sobrecalentamiento.

C_{p-Als} : Coeficiente de fusión del aluminio.

Por lo tanto: el calor requerido para la fundición de aluminio.

$$Q_{Al} = Q_{Al1} + Q_{Al2} + Q_{Al3}$$

$$Q_{Al} = 576kJ + 399.62kJ + 163.35kJ$$

$$Q_{Al} = 1078.97kJ = 0.299Kwh$$

$$P_{Al} = 0.299Kwh$$

$$P_{Al} = 0.299Kwh \times 60min / 2.5min$$

$$P_{Al} = 7.17Kw$$

P_{Al} : Potencia requerida para la fundición del aluminio.

$$1 kJ = 0.000278 Kwh$$

$t=2.5min$: tiempo de fusión del aluminio.

a. Potencia total requerida para fundición del aluminio

$$P_{Total} = P1 + P2 + P3 + Pbaño$$

Ecuación 20. Potencia total requerida para la fundición.

$$P_{Total} = 0.009017KW + 0.0233KW + 0.0240KW + 7.176Kwh$$

$$P_{Total} = 7.23Kw$$

b. Factor de potencia de la bobina

Para que el factor de potencia sea igual a 1, se utiliza un condensador que está en paralelo con la inductancia (bobina) como se muestra en la Figura 27 sirve para corregir el desfase probando que la corriente y el voltaje esté en fase, por lo tanto, no existe potencia reactiva o es un valor mínimo despreciable o que tiende a cero, de tal manera que la potencia activa en vatios es igual a la potencia aparente en volta-amperios en un circuito resonante.

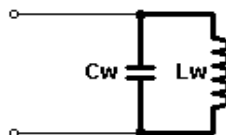


Figura 27. El capacitor conectado en paralelo con la inductancia de la bobina.

Fuente: (Nicolás Muñoz-Galeano, 2016)

$$P(w) = S(VA)$$

$$P_{Total} = S(VA)$$

$$S(VA) = 7.23KVA$$

Dónde:

$P(w)$: Potencia activa.

$S(VA)$. Potencia aparente.

c. Cálculo de la corriente que pasa por la bobina

La corriente que atraviesa por la bobina es la división de la potencia aparente con respecto al voltaje RMS de la fuente.

$$I_p = S(VA) / V_{RMS}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}} \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right) V_{LL}$$

Ecuación 21. Corriente y Voltaje eficaz.

Fuente: (Nicolás Muñoz-Galeano, 2016)

$$V_{RMS} = 513.63 \text{ V}$$

$$I_{Tp} = 7230 \text{ VA} / 513.63 \text{ V} = 14.07 \text{ A}$$

Dónde:

V_{RMS} : Voltaje RMS de la fuente.

V_{LL} : Voltaje de línea a línea.

I_{Tp} : Es la corriente total del primario consumida por el sistema después de rectificar

Determinar la frecuencia de trabajo

Se determina mediante la Figura 28 Potencia vs Frecuencia.

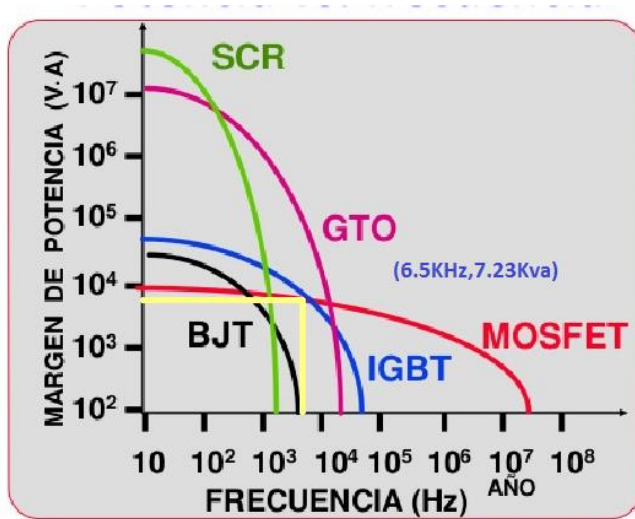


Figura 28. Potencia vs frecuencia.

Fuente: (Murria, 2016)

Mediante el valor de la potencia calculada tenemos 7.23KVA y la frecuencia de trabajo de acuerdo con la Figura 28 es de 6.5KHz.

d. Cálculo y Justificación del condensador

La función del condensador consiste en provocar un retraso en la forma de onda de la corriente con respecto al voltaje de 90° , para compensar el adelanto de 90° provocado por la inductancia de la bobina. Para calcular el valor de capacitancia necesario se debe tomar en cuenta que la impedancia inductiva debe ser igual a la impedancia capacitiva. La impedancia inductiva se obtiene directamente de la ley de ohm

$$X_L = \frac{V}{I}$$

Ecuación 22. Impedancia inductiva

$$X_L = \frac{450V}{16.5A}$$

$$X_L = 27.27\Omega$$

La impedancia capacitiva se obtiene de la ecuación

$$X_C = \frac{1}{2\pi FC}$$

Ecuación 23. Impedancia capacitiva.

Dónde:

F : Es la frecuencia de trabajo en Hz

C : Es la capacitancia en microfaradios

Despejando la capacitancia y reemplazando el valor de la impedancia capacitiva por el mismo de la impedancia inductiva se obtiene:

$$C = \frac{1}{2\pi * 6.4kHz * 27.27\Omega}$$

$$C = 9.11\mu F$$

Para corregir el factor de potencia provocando que la corriente y el voltaje estén en fase solo para circuito resonante LC.

El banco capacitivo RFM0.75-500-15S tiene un valor de capacitancia de 9.41 μ F y soporta una tensión de 750V a 15kHz, por lo que es adecuado para su uso con la inductancia utilizada en esta aplicación.

Justificación de diodos

El voltaje que pasa por cada par de diodos corresponde al voltaje de una sola línea, entonces es 380V_{RMS}. El voltaje máximo que debe soportar cada diodo es el voltaje pico, que corresponde a:

$$V_D = V_{RMS}/0.707$$

Ecuación 24. Impedancia inductiva.

$$V_D = (380/0.707)V$$

$$V_D = 537.40V$$

Dónde.

V_D : Voltaje del diodo.

La corriente que atraviesa cada par de diodos viene determinada por la carga y corresponde a un tercio del total

$$I_D = I_{Tp}/3$$

Dónde.

I_D : Es la corriente del par de diodos de una fase

I_{Tp} : Es la corriente total del primario consumida por el sistema después de rectificar

Para una corriente total del sistema de 14.07 amperios, la corriente de cada par de diodos será:

$$I_D = (14.07/3)A$$

$$I_D = 4.69A$$

En el mercado los diodos disponibles que soportan esta corriente, no trabajan con el valor de voltaje pico calculado, pero existen puentes trifásicos completos que soportan cubren ambos valores. El dispositivo VUO25-14NO8 del fabricante IXYS soporta una corriente de 20A rectificadas a la salida y 1500V_{RMS}.

Se utiliza modulación de ancho de pulsos (PWM) para provocar que se forme una onda de tipo senoidal mediante la activación y desactivación de la base o compuerta de un elemento semiconductor, sea un transistor, MOSFET o IGBT, durante espacios de tiempo periódicos, con aumento y disminución de la duración de los pulsos para que la señal de salida pueda variar en frecuencia y amplitud.

Se usa PWM porque es más fácil de controlar, ya sea mediante un microcontrolador u ordenador, aunque requiere una serie de cálculos dependiendo de la carga que se quiere energizar, para disminuir la presencia de armónicos en la onda senoidal de salida, producto de la activación y desactivación de los elementos semiconductores por el tiempo de cambio de estado y de recuperación.

Cálculos para encontrar el número de vueltas de la bobina y el amperaje requerido para inducir calor en un cilindro dado.

El ensamblaje de la bobina consiste en un arreglo de varias vueltas de cable y una pieza cilíndrica de grafito que sirve como núcleo y secundario.

El número de amperios por vuelta debe ser igual en el bobinado primario y secundario.

En la figura 29 se muestra el circuito eléctrico representativo de la analogía entre el calentamiento por inducción y el principio de un transformador.

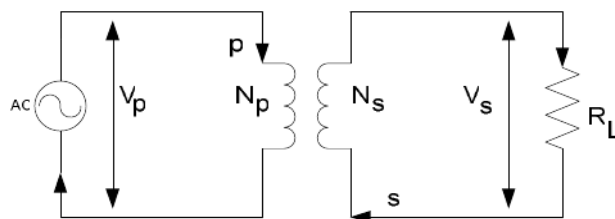


Figura 29. Circuito representativo de la inductancia.

Fuente: (Aplicada, 2014)

Dónde:

V_p Es el voltaje del primario en voltios

I_p Es la corriente del primario en amperios

N_p Es el número de vueltas del primario

V_s Es el voltaje del secundario en voltios

I_s Es la corriente del secundario en amperios

N_s Es el número de vueltas del secundario

R_L Es la carga resistiva

Del modelo equivalente se puede aplicar la ecuación del transformador

$$I_p N_p = I_s N_s$$

Ecuación 25. Ecuación del Transformador.

Pero en este caso el secundario tiene una sola vuelta

$$N_s = 1$$

Por tanto:

$$I_p N_p = I_s$$

$$I_s = 14.70 \text{ A}$$

El calor generado en la pieza de trabajo está dado por:

$$P = I_s^2 R (\text{watts})$$

Donde R es la resistencia del conductor que provoca la corriente de Foucault, por tanto, la potencia se puede definir como:

$$P = \frac{(I_p N_p)^2 \pi \rho D}{\delta l}$$

Ecuación 26. Potencia en el primario del transformador.

Fuente: (Turmero, 2016)

Dónde:

D es el diámetro del crisol

l es la longitud del crisol

δ es el espesor del crisol

ρ es la resistividad del material del crisol

Los datos del crisol son: $D=0.09\text{m}$, $l=0.10\text{m}$, $\delta=0.015\text{m}$ y $\rho=6\text{E-}7\text{ohm}\cdot\text{m}$. Para una corriente del primario de 16.5A con una bobina de 10 vueltas, la potencia será:

$$P = \frac{(14.07 * 10)^2 \pi * 0.0000006 * 0.09}{0.015 * 0.10}$$

$$P = 2.24\text{watts}$$

La densidad de potencia o potencia de la superficie proporciona la cantidad de potencia empleada por unidad de área del crisol.

Como el área del cilindro es:

$$A = \pi * D * l$$

La potencia de la superficie será:

$$P_{sur} = \frac{P}{\pi D l} \text{ watt/m}^2$$

Ecuación 27. Potencia de la superficie en la pieza.

ó

$$P_{sur} = \frac{(I_p N_p)^2 \pi \rho D}{\delta l \cdot \pi D l} \text{ watt/m}^2$$

Que despejo.

$$P_{sur} = \frac{(I_p N_p)^2 \rho}{\delta l^2} \text{ watt/m}^2$$

Reemplazando con los valores previamente obtenidos queda:

$$P_{sur} = \frac{(14.07 * 10)^2 * 0.0000006}{0.015 * 0.10^2}$$

$$P_{sur} = 79.18 \text{ watt/m}^2$$

La fuerza magnética es

$$H = \frac{I_p N_p}{l}$$

Ecuación 28. Campo magnético.

$$H = \frac{14.07 * 10}{0.1}$$

$$H = 1407 \text{ amperio.vuleta/m}$$

Fuente de alimentación (Transformador)

Se utiliza una fuente trifásica para que, manteniendo la misma potencia, disminuya el consumo de corriente en los conductores y por tanto el efecto Joule, con lo cual se consigue una mejor eficiencia del sistema. Además, al rectificar el voltaje de un sistema trifásico en un puente de diodos, el rizado de la onda de salida disminuye sin la necesidad de utilizar un filtro capacitivo.

Para la fuente de alimentación eléctrica se utilizó un transformador de 20kva trifásico con conexión delta que eleva el voltaje de entrada de 220 a 380 V. Se adquirió este tipo de transformador de acuerdo con los siguientes parámetros:

- La potencia aparente calculada para la fundición del aluminio es de 7.23 Kva los transformadores están fabricados en forma estándar (5, 15, 20Kva).
- La tarjeta de control que más adelante se ve, utiliza voltaje de entrada de 380V.
- Se sobre dimensiona la potencia ya que este proyecto se utilizará en pequeños procesos de inducción y se necesita implementar el taller con más equipos.

Selección del IGBT's

Para la selección del IGBT se utiliza los siguientes parámetros como se puede ver en la Tabla 5.

Tabla 5.

Parámetros para la selección del IGBT

Parámetros	Valor
Voltaje	513.63V + 50% V
Corriente	14.07 A
Frecuencia de trabajo	6.5KHz

La frecuencia que el IGBT debe mantener es de 6.5kHz, además le atravesará una corriente de 14.07 amperios. El dispositivo BSM 50 GB 120 DN 2 es un IGBT doble

en un solo encapsulado, cuyas características según la hoja de datos se encuentran en la Tabla 6 y [Anexo B]. Además, incorpora un diodo rápido de potencia para la protección del semiconductor, que sirve como red Snubber.

Tabla 6.

Ficha de datos del IGBT

Producto:	IGBT's
Corriente pulsante máximo	200A
Max. Voltaje V_{CE}	1200V
Voltaje de saturación Colector-Emisor	2,5
Colector de corriente continua a 80°C	50A
Tiempo de demora de apagado	400ns
Tiempo de demora de encendido	130ns
Temperatura de trabajo mínima	-40 °C
Temperatura de trabajo máximo	+150 °C
Máximo voltaje puerta- emisor	20V

Los parámetros calculados para el inductor del tanque resonante son muy importantes para la selección del IGBT, se encuentra el voltaje y la corriente dentro de rango de la ficha técnica de la Tabla 7 como se puede apreciar.

Selección de la tarjeta de control

Para el sistema de control se eligió la tarjeta modelo MF-15 debido a que está dentro de los valores para la selección del IGBT. Como se puede observar las características técnicas del módulo están dentro de los parámetros de los cálculos realizados, como se visualiza en la Tabla 7.

Tabla 7.*Características técnicas de la tarjeta de control MF15*

Potencia de entrada	15KW
Corriente de salida	3 a 22 A
Tensión de salida	70 a 520V
Entrada de fase	380V tres fases \pm 20%, 60HZ
Frecuencia del IGBT's	1KHZ a 20KHZ

Fuente: (LANSHUO, 2015).**Conceptos para el diseño de una torre de enfriamiento****Caudal de diseño**

Caudal de agua por unidad de tiempo, para el cual se diseña el equipo; se expresa en l/h, m³/h.

Salto térmico

Es la diferencia entre temperatura de entrada y salida de la torre o intercambiador.

$$\Delta T = T_i - T_o$$

Fuente: (Refrigeracion, 2002-2016).**Ecuación 29.** Diferencia entre temperatura de entrada y salida de la torre.

Dónde:

T_i=Temperatura de salida de agua a la torre de enfriamiento.T_o= Temperatura de entrada de agua a la torre de enfriamiento.**Capacidad de refrigeración**

Es la cantidad de calor que una torre puede disipar, se mide en Kcal/h

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Fuente: (Refrigeracion, 2002-2016).**Ecuación 30.** Cantidad de calor transferido.

Dónde:

Q = cantidad de calor transferido (Kcal).

m = Cantidad de agua (kg)

ΔT = Diferencia de temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)

C = Calor específico del agua ($\text{Kcal/kg } ^{\circ}\text{C}$).

Factor de refrigeración β

Parámetro sin dimensiones que relaciona el flujo de agua con el flujo de aire seco referidos a la superficie de la torre.

$$\beta = L/G$$

Ecuación 31. Factor de refrigeración β .

Fuente: (Refrigeracion, 2002-2016).

Dónde:

L = caudal de agua por unidad de área (kg/hm^2).

G = Caudal de aire por unida de área (kg/hm^2).

Pérdidas por arrastre

Es la cantidad de agua que sale de la torre en forma de llovizna, arrastrada por el flujo de aire. Se expresa en tanto por ciento de caudal recircularte. La Normativa actual determina que tiene que ser inferior al 0,05% del caudal de agua circulante.

Pérdidas por evaporación

Es la cantidad de agua que se pierde por evaporación en el proceso de enfriamiento. Por cada 100 kg de agua al perder 10°C de temperatura se desprende 1.000 kcal, el porcentaje de evaporación será de 1 % por cada 10°C de salto térmico:

$$\text{Evaporación (\%)} = (q \times \Delta T) / (100 \times 10)$$

Ecuación 32. Pérdidas por evaporación.

Fuente: (Refrigeracion, 2002-2016).

Dónde:

q = Caudal de agua que entra en la torre de enfriamiento.

Recirculación

Es el fenómeno que se produce cuando el aire saturado de vapor que sale de la torre vuelve a entrar en ella mezclado con el aire ambiente (Refrigeracion, 2002-2016).

Estructuras y cerramiento

- La estructura es el elemento principal de la torre desde el punto de vista de su comportamiento mecánico, resistencia, y constituye el armazón donde se soportan todos los componentes.
- La estructura de la torre debe tener resistencia mecánica y química.
- Actualmente se emplean diferentes materiales en función del costo de la inversión y la vida útil del equipo.

Paso de agua por el sistema es de 10 lt/min = 2.6417gpm

$$10 \frac{\text{l}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ gpm}}{3.7854} = 2.6417\text{gpm}$$

Temperatures son:

$$T_i = 45^\circ\text{C} = 113^\circ\text{F}$$

$$T_o = 14^\circ\text{C} = 57.2^\circ\text{F}$$

$$t_b = 14^\circ\text{C} = 57.2^\circ\text{F}$$

$$dT = (45^\circ\text{C} - 14^\circ\text{C}) = 31^\circ\text{C} = 55.8^\circ\text{F}$$

Dónde:

T_i: Temperatura de ingreso de agua caliente a la torre.

T_o: Temperatura de ingreso de agua fría a la bobina.

dT: Rango de enfriamiento del agua

Ecuación de balance de energía para el sistema se tiene.

$$L * CL * \Delta = G * \Delta H$$

Ecuación 33. Balance de energía para el sistema.

L, G: Flujo de agua y aire respectivamente, lb I h

CL: Calor específico del agua, BTU/ (lb* F)

ΔH : ($H_1 - H_2$), diferencia de entalpía

H_1 : Entalpía de entrada de la mezcla aire-vapor de agua a t_b , Btu/lb aire seco

H_2 : Entalpía de salida de la mezcla aire-vapor de agua a t_2 , Btu/lb aire seco

t_b : Temperatura de bulbo húmedo del aire de ingreso.

t_2 : Temperatura de bulbo húmedo del aire de salida.

Ecuación para el cálculo de la Entalpía de la mezcla aire- vapor de agua.

$$H = (0.24 + 0.45 * Y)(t - 32) + 971.625 * Y$$

Ecuación 34. Cálculo de la Entalpía de la mezcla aire- vapor de agua.

Dónde:

971.625 Es el calor latente de vaporización, Btu/ lb a $t = 32^\circ\text{F}$.

Y: Humedad absoluta de la mezcla, lb agua/lb aire seco.

Para las condiciones de saturación:

$$H * = (0.24 + 0.45 * Y_s) * (t - 32) + 971.625 * Y_s$$

Para el cálculo de la humedad absoluta de la mezcla aire-vapor de agua.

$$Y = \frac{0.622 * p}{(14,696 - p)}$$

Ecuación 35. La humedad absoluta de la mezcla aire-vapor de agua.

$$Y_s = \frac{0.622 * P_s}{(14,696 - P_s)}$$

Dónde:

p, P_s : Presión parcial del vapor en la mezcla y en la saturación, respectivamente.

Y s: Humedad de la mezcla en la saturación, a la presión de saturación P_s .

La tabla con los valores de P_s y se presenta en Apéndice

Cálculo del volumen húmedo de la mezcla aire-vapor de agua.

$$V_h = (0.0252 + 0.0405Y)(t + 460)$$

Ecuación 36. Volumen húmedo de la mezcla aire-vapor de agua.

Dónde:

Vh: Volumen húmedo, pie³/lb aire seco.

Cálculo de la entalpía de ingreso del aire (H1):

Se tiene las siguientes propiedades:

$$P_s = (t_b = 57.2^\circ\text{F}) = 0.195 \text{ psi}$$

$$Y_s = \frac{0.622 * P_s}{(14,696 - P_s)}$$

$$Y_s = \frac{0.622 * 0.195}{(14,696 - 0.195)}$$

$$Y_s = 0.00836 \frac{\text{lb agua}}{\text{lb aire seco}}$$

$$H_1 = (0.24 + 0.45 * Y_s) * (t - 32) + 971.625 * Y_s$$

$$H_1 = (0.24 + 0.45 * 0.00836) * (57.2 - 32) + 971.625 * 0.00836$$

$$H_1 = 14.2697 \frac{\text{BTU}}{\text{lb de aire seco}}$$

Cálculo de la entalpía de salida del aire (lb).

Se tiene las siguientes tablas:

$$P_s (t_2 = 72.2^\circ\text{F}) = 0.375 \text{ psi}$$

$$Y_s = \frac{0.622 * 0.375}{(14,696 - 0.375)}$$

$$Y_s = 0.0162 \frac{\text{lb agua}}{\text{lb aire seco}}$$

$$H^* = (0.24 + 0.45 * Y_s) * (t - 32) + 971.625 * Y_s$$

$$H^* = (0.24 + 0.45 * 0.0162) * (72.2 - 32) + 971.625 * 0.0162$$

$$H^* = 25.6813 \frac{\text{BTU}}{\text{lb de aire seco}}$$

Cálculo de la carga de calor (Q).

De la ecuación se tiene la carga de calor en el sistema:

$$Q = L * C_L * \Delta T$$

Ecuación 37. Carga de calor (Q.)

Por el diseño

$$CL = 8.34 \text{ Densidad del agua, } \frac{\text{lb}}{\text{gal}}$$

$$Q = 2.6419 * 8.34 * (113 - 64.4)$$

$$Q = 1070.05 \frac{\text{lb}}{\text{min}} * \frac{60\text{min}}{1\text{h}}$$

$$Q = 64203 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

Cálculo de la relación (L/G).

$$\frac{G}{L} = \int \frac{dH}{H2 - H1}$$

Ecuación 38. Relación (L/G).

$$\frac{L}{G} = \frac{25.6813 - 14.2697}{80.06 * 1}$$

$$\frac{L}{G} = 0.1425$$

Cálculo del fluido de aire seco requerido (G).

$$G = \frac{L}{0.1425}$$

$$G = 2.6417 * 8.34 * 60 / 0.1425$$

$$G = 9276 \frac{\text{Lb de aire seco}}{\text{h}}$$

Cálculo de la humedad de salida de la mezcla aire-vapor de agua (V^b).

Tenemos

$$t = 72.2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$Y = 0.0162 \frac{\text{lb agua}}{\text{lb aire seco}}$$

$$V_h = (0.0252 + 0.0405Y)(t + 460)$$

$$V_h = (0.0252 + 0.0405 * 0.0162)(72.2 + 460)$$

$$V_h = 13.76 \frac{\text{pie}^3}{\text{lb de aire seco}}$$

Cálculo del fluido volumétrico de aire requerido (G):

$$G = 9276 * \frac{13.625}{60}$$

$$G = 2106.425 \text{ CFM}$$

Número de Unidades de Difusión

De la relación:

$$nd = K * a * \frac{V}{L} = \int \frac{dt}{(H^* - H)}$$

Ecuación 39. Número de Unidades de Difusión.

Dónde:

K: Coeficiente de transferencia de masa global

a: Área específica del empaque por volumen unitario del empaque

V: Volumen del empaque, (área)-(altura)

H*: Entalpía de la mezcla aire-vapor de agua saturado a la temperatura (T) del agua

H: Entalpía de la mezcla aire-vapor de agua a la temperatura (t) del aire.

El cálculo de la entalpía de saturación (H*) es a cada temperatura del agua

$$P_s (T = 64.4^\circ\text{F}) = 0.255 \text{ psi}$$

$$Y_s = \frac{0.622 * 0.255}{(14,696 - 0.255)}$$

Pero $Y = Y_s$

$$Y = 0.0109 \frac{\text{lb agua}}{\text{lb aire seco}}$$

$$H^* = (0.24 + 0.45 * Y_s) * (t - 32) + 971.625 * Y_s$$

$$H^* = (0.24 + 0.45 * 0.0109) * (64.4 - 32) + 971.625 * 0.0109$$

$$H^* = 18.5256 \frac{\text{BTU}}{\text{lb de aire seco}}$$

El cálculo de la entalpía (H).

Se obtiene a partir de la línea de operación de la mezcla aire-vapor de agua

$$H_2 = H_1 + \frac{L}{G} * CL * \Delta T$$

Así tenemos para $T = 66.9 \text{ F}$, $\Delta T = 2.5 \text{ }^\circ\text{F}$

$$H = H_1 + \frac{L}{G} * \Delta T$$

$$H = 14.2697 + 0.1425 \cdot (66.9 - 62.4)$$

$$H = 14.6259 \frac{\text{BTU}}{\text{lb de aire seco}}$$

Con la integración se obtiene área entre la línea de saturación $\Delta T = 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$

En la tabla de integración se obtiene el área entre saturación y diferencias finitas

$$n^d = K^a \frac{V}{L} = \int \frac{dt}{(H^* - H)} = 3.5421$$

$$n^d = 3.5421$$

$$\text{En si } \frac{L}{G} = 0.1425$$

$$K^a \frac{V}{L} = 3.5421$$

$$\text{Nog} = K^a \frac{V}{G} = 2.94$$

Se tiene empaques o bandejas laminares de acero inoxidable $V = 450 \text{ pie}^3/\text{min}$

Para las condiciones de diseño se estableció. $G = 2106.425 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}}$

$$A_{\text{aire}} = \frac{G}{V}$$

$$A_{\text{aire}} = \frac{2106.425 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}}}{450 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}}} = 4.68 \text{ pie}^2$$

$$A_{\text{aire}} = \sqrt{4.48} \text{ pie}^2 = 2.11 * \frac{30.48 \text{ m}}{\text{pies}} = 64.51 \text{ cm}$$

$$A_{\text{aire}} = a^2 = \sqrt{4.48} = 2.11 \text{ cm}^2$$

Por este material puede fluir $V_{\text{max}} = 4 \text{ gal}/(\text{min} * \text{pie}^2)$

Área del empaque para estas condiciones de diseño el flujo de agua es de $L = 2.6417$

$$A_{\text{agua}} = 2.6417/4$$

$$A_{\text{agua}} = 0.66 \text{ pie}^2$$

$$\text{Aagua} = \sqrt{0.66} = 0.8112 \text{pies} \frac{30.48 \text{ m}}{\text{pies}} = 24.76 \text{ cm}$$

Por las curvar de empaque ubicamos $L/G = 0.1425$ y $nd = 3.5421$ y una velocidad de 450 pie / min la altura que satisface es 4 niveles la separación entre niveles es 0.53pies (16cm)

Largo = 2.11 pie (64.51cm)

Ancho = 0.81pie (24.76 cm)

Altura = 0.53 pie (16 cm)

Las dimensiones finales de la torre son de:

Lado = 2.11 pie (0.645 m).

Altura = 3.0943 pie (0.9904 m).

5.7 Metodología para ejecutar la propuesta

Construcción de la bobina de inducción.

En la construcción de la bobina de inducción, se escogió un tubo de cobre debido a su alta conductividad eléctrica $\delta_{CU} = 5.8 \times 10^7 \left[\frac{S}{m} \right]$ para disminuir el calentamiento producido por el efecto Joule, teniendo entonces la longitud del cobre ($l_{cu} = 3.36$), el número de vueltas ($n_1 = 10$) y diámetro del cilindro exterior ($D_{ind} = 10.696\text{cm}$), se procedió a envolver el tubo de cobre para formar el inductor Figura 30.



Figura 30. Bobina de inducción magnética de 10 espiras.

A continuación, se procede a colocar pernos de sujeción para la alimentación eléctrica. Luego, se procedió a envolver a la bobina de inducción con reata aislante para asegurar el correcto aislamiento entre cada una de las espiras que forman al inductor Figura 31.



Figura 31. Aislamiento con la reata aislante.

La bobina debe colocarse en una base dentro de una caja para no tenga ningún movimiento de la bobina inductora. Luego se procede a forrar las espiras con cemento refractario Figura 32.



Figura 32. Aislamiento con la reata aislante.

Construcción de la caja para la bobina de inducción.

Para la construcción de la caja se debe tomar en cuenta cuanto de ladrillo y cemento refractario va alrededor de la bobina, en nuestro caso se realizó una caja de (31x31) respectivamente. Para lo cual utilizamos madera y planchas de tol, en la parte lateral de la caja se realizó la soldadura de un tubo para poder realizar el vaciado Figura 33.



Figura 33. Construcción de la caja para la bobina inductora.

Una vez construida la caja se procede a colocar en el exterior un reductor de velocidad que va ensamblado en la estructura para que funcione como eje en el vaciado. A continuación, se coloca el ladrillo refractario en la caja, como una base de sujeción para la bobina. Para luego realiza la colocación de ladrillo alrededor de la bobina que es cubierta en su totalidad con cemento refractario para que no muevan durante rotación del vaciado de la colada Figura 34.



Figura 34. Acople de bobina de inducción en la caja.

Después de haber realizado este procedimiento se realiza la colocación del crisol en la bobina de inducción, él crisol se sujeta con cemento la parte superior que se encuentra fuera de la bobina para luego construir la parte del reverbero de la boca del crisol para el vaciado de la colada, Figura 35.



Figura 35. Horno de inducción.

Construcción de la parte mecánica del conjunto para el vaciado.

Después de haber asegurado la bobina de inducción, se procedió a construir el sistema mecánico para el vaciado de la colada. Los ejes, los rodamientos, una rueda dentada y un volante son los encargados de proporcionar al usuario un correcto movimiento para el vaciado del material a alta temperatura.

Para la construcción de la estructura del vaciado se utiliza ángulos de acero de 60 x30mm, el acero se corta con las medidas correspondientes para luego soldar y así forma la estructura del vaciado Figura 36.



Figura 36. Construcción de la estructura.

La estructura completa se le pinta para que no se dañe al pasar del tiempo. También se le implementó cuatro llantas para su mejor movilidad, en la misma estructura se acopla el reductor de velocidad para la rotación del horno para su vaciado correcto Figura 37.



Figura 37. Terminación de la estructura.

Se Implementó las chumaceras para girar el horno para el vaciado y engranes cónicos para el reductor de velocidad este accesorio se consiguió debido a la necesidad de hacer más fácil el vaciado de la colada Figura 38.



Figura 38. Estructura con sus accesorios.

Al terminar la construcción de la estructura y de la caja que contiene a la bobina de inducción, se procede al montaje de la caja sobre la estructura para formar un solo conjunto calentamiento por inducción Figura 39.



Figura 39. Horno terminado.

Construcción del sistema de refrigeración

En la fase de diseño, se procede a adquirir los materiales, equipos a instalar en función del dimensionamiento, determinado por los cálculos de cargas térmicas, en este punto se tienen en consideración criterios tanto de tipo técnico como económico. Los puntos que se tendrán en consideración en este apartado serán los siguientes:

Características técnicas de la torre.

- Caudal de agua por enfriar (m³/h)
- Temperatura del agua a enfriar (°C).
- Temperatura de salida requerida del agua (°C).
- Materiales
- Facilidad de desmontaje para la limpieza completa
- Facilidad de desaguado de la torre
- Calidad del separador de gotas

Se tomó varias consideraciones al dimensionamiento de la torre de enfriamiento entre estas:

- Se eligió la torre por las siguientes ventajas;
- Las torres de tiro natural resultan ser las más eficientes cuando se desea trabajar con pequeños caudales y más económicos.
- No existen problemas de distribución y recirculación de aire
- Diseño más compacto todas sus partes se instalan en un área muy pequeña
- De fácil instalación todas sus partes son desmontables.
- El aire puede entrar a lo largo de una o más paredes de la torre, y como resultado, la altura requerida de la torre para entrada de aire es pequeña.
- El intercambiador de calor establece que trabaja en condiciones estacionarias la temperatura del fluido es uniforme en las bandejas

A mayor caudal mayor número de bandejas necesitaremos

Se realizó 5 pruebas en las cuales se fundió un kilogramo de aluminio puro hasta la temperatura de vaciado para verificar el funcionamiento, de esta manera se conseguía las mismas condiciones de trabajo y de cantidad de procesamiento de las fundidoras de la ciudad de Latacunga.

Los valores iniciales que se obtuvo de temperatura y caudal en la construcción del sistema de refrigeración, se expresarán los diferentes requerimientos, limitaciones y consideraciones que se expondrán en el dimensionamiento de la torre natural de enfriamiento, se implementó el tanque que contenga un volumen de 353 cm³ como se observa en la figura 40.



Figura 40. Torre de refrigeración de tiro natural.

El sistema de refrigeración es cerrado, que lo conforma el tanque, una bomba, acoples, bobina y otros componentes.

Se construye 3 bandejas de enfriamiento que constituyen el intercambiador deben de ser de un material inoxidable ya que estas van a estar en contacto con el fluido y se encuentran separadas a 30cm cada una. Se utilizó acero dulce inoxidable, es común para estructura de torre y empaque, espesores adecuados de galvanizado dará una satisfactoria vida del empaque y escogemos tol acero inoxidable de 0.7 mm para las bandejas que se encuentran en contacto con el agua, tienen una pérdida de 10°C en cada bandeja respectivamente por la distribución del agua que es uniforme y cae en flujo laminar, llegando con una temperatura inicial de 14°C al tanque de reserva.

Se utilizó tol aluminio porque es relativamente barato, es un metal ligero de excelente conductividad eléctrica y térmica, de buena resistencia a la corrosión por su alta pureza con un espesor de 1 mm como material base para el tanque de reserva.

5.8 Pruebas y análisis de resultados

Desarrollo.

La finalidad es lograr fundir 1kg de aluminio para lo cual se utiliza un horno de inducción.

- Se inicia con la implementación del tanque resonante del horno de inducción con sus respectivos accesorios.
- Una vez implementado del horno se realiza la conexión eléctrica del transformador al circuito de control verificando que las conexiones este correctamente.
- Acoplar el sistema de refrigeración al sistema de control y al horno de inducción.
- En el tanque de agua para el sistema de refrigeración se debe llenar como mínimo con 353lt.

Proceso de fundición.

- Prender la bomba para refrigerar con agua el horno durante y el sistema de control durante un tiempo de 5 min, para luego verificar si no existen fugas en el sistema ya que esto puede causar daños a los equipos electrónicos de control.
- Realizado este procedimiento se pone en funcionamiento el horno.
- El operador colocará las piezas de aluminio o chatarra dentro del crisol del horno de inducción, luego encenderá el horno para iniciar el proceso de fusión de una muestra. Es recomendable la adición de más carga de aluminio en este proceso, ya que el aluminio fundido transmite mejor el calor.
- Con la ayuda de un crisol, el aluminio se coloca de forma segura dentro del mismo. Siempre que sea necesario se puede cortar en piezas más pequeñas para asegurarse de que entre adecuadamente para un proceso de fusión eficaz.
- Cuando la temperatura del metal alcanza (660°C) se convierte en líquido. Cualquier residuo de recubrimiento flotará en la superficie del líquido de fusión. Este subproducto se llama escoria y se puede quitar con una cuchara de colada de acero. Esto necesita enfriarse antes de que pueda ser eliminado de manera segura.

- A continuación, el crisol (horno) derramará aluminio puro. Por lo general, se utiliza un mecanismo basculante hidráulico para verter el metal líquido.
- Por último, con cuidado, el cobre fundido se vierte en un recipiente para que se enfríe para ser luego utilizado.
- Después de terminar el proceso de fundición se recomienda que el sistema de control y el sistema del horno siga circulando el agua durante 5 min después del proceso.

Los datos de las pruebas realizadas se muestran en la tabla 8.

Tabla 8.

Tabla de pruebas.

Potencia (kW)	Tensión (V)	Corriente (A)	Frecuencia (kHz)	Tiempo (minutos)	Temperatura (°C)
7.1	449	14.2	6.5	2.30	680
7.2	444	14.4	6.6	2.20	685
7.0	451	15.8	6.8	2.25	685
7.1	449	14.8	6.6	2.30	685
7.4	452	15	6.8	2.30	680

A continuación, utilizando el equipo analizador de energía FLUKE 1975 obtenidos de los valores de:

- Tensión
- Corriente
- Potencia
- Frecuencia
- Tiempo

Para obtener los valores de medición en el FLUKE durante la fundición de 1Kg de aluminio tomamos como mínimo dos valores de medición de la muestra uno.

Se tomó una muestra al inicio de la prueba obteniendo los siguientes valores como se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 9.

Valores obtenidos al inicio de la muestra 1.

Tensión	370,06V	365,62 V	365,12 V
Corriente	13A	13A	13A
Tensión de Pico	507,3V	499,8 V	503,7V
Corriente de Pico	24A	26A	24A
Factor Cresta Tensión	1,37	1,37	1,38
Factor Cresta Corriente	327,67	327,67	327,67
Tensión de Medio Ciclo	370,44V	366,12 V	365,54 V
Corriente de Medio Ciclo	13A	13A	13A
Potencia Activa			6,7KW
Potencia Aparente			6,8KVA
Potencia Reactiva			0,5KVar
Factor de Potencia			0,82
DPF			0,98
Frecuencia			59,998H z
Factor K A	9,91	10,52	10,4
THD V	4,97%	4,58%	4,98%
THD A	59,40%	64,04 %	63,43%
Desequilibrio Vn			0,87%
Desequilibrio An			4,82%

La otra muestra se tomó al final del proceso obteniendo valores de medición como se observa en la tabla 10.

Tabla 10.

Valores obtenidos al final de la prueba 1.

Tensión	370,06V	365,62V	365,12V
Corriente	13A	13A	13A
Tensión de Pico	507,3V	499,8V	503,7V
Corriente de Pico	24A	26A	24A
Factor Cresta Tensión	1,37	1,37	1,38
Factor Cresta Corriente	327,67	327,67	327,67
Tensión de Medio Ciclo	370,44V	366,12V	365,54V
Corriente de Medio Ciclo	13A	13A	13A
Potencia Activa	6,7KW		
Potencia Aparente	6,8KVA		
Potencia Reactiva	0,5KVar		
Factor de Potencia	0,82		
DPF	0,98		
Frecuencia	59,998Hz		
Factor K A	9,91	10,52	10,4
THD V	4,97%	4,58%	4,98%
THD A	59,40%	64,04%	63,43%
Desequilibrio Vn	0,87%		
Desequilibrio An	4,82%		

Los valores de la muestra tanto del inicio como del final tienen los mismos valores no cambia ningún valor durante el proceso de fundición.

Utilizando el mismo equipo obtenemos los valores de los armónicos en el sistema durante la prueba. Los equipos analizadores de armónicos graban y registran los niveles individuales y la THD (Distorsión armónica total) del circuito a analizar. Los resultados de estas mediciones se deben encontrar dentro de parámetros que estén bajo norma ya que de lo contrario se deben de tomar otras medidas.

Como un ejemplo se tomó el valor del VTHD de la tabla 10 para verificar que el valor obtenido está representado en forma gráfica en la figura 41.

VTHD.

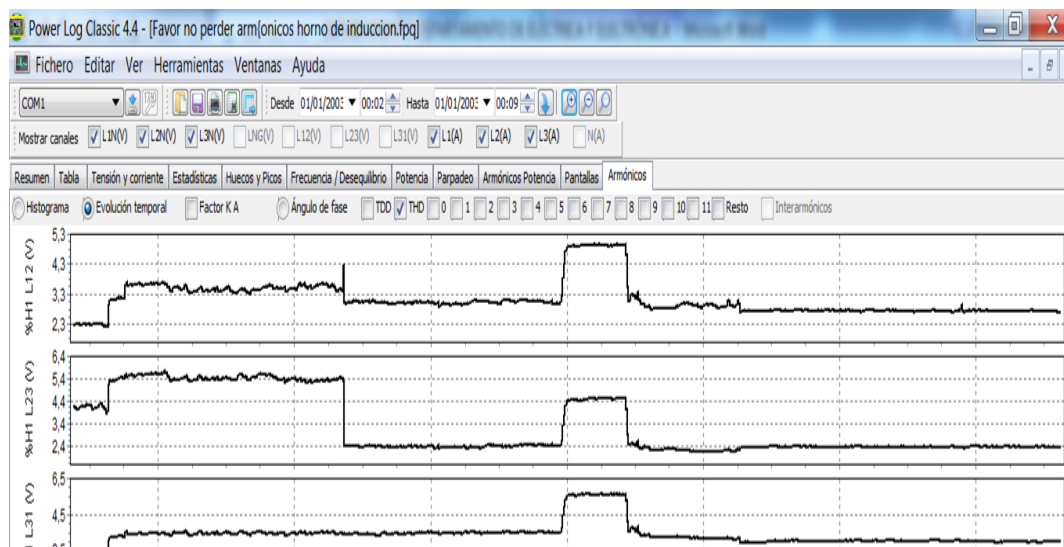


Figura 41. Curva de VTHD.

Al realizar los análisis de los valores límites de los contenidos armónico del VTHD en la figura 41 se puede observar que gráfica comienza con un mínimo 2.3% de la distorsión llegando a un intervalo de tiempo que alcanza un máximo de 4.97% para luego posteriormente regresar al valor mínimo. Los valores tomados de la muestra cumplen con lo indicado en la norma IEEE519 Harmonic Control. La tabla 11 que se indica a continuación muestran los valores de VTHD.

Tabla 11.

Límites de voltaje de distorsión

Bus voltage V at PCC	Individual Harmonic (%)	Total Harmonic Distortion TDH (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,58

Como se puede observar en la figura 41 el valor de VTHD obtenidos en las pruebas cumple con valores establecidos en la norma IEE519, que es el mínimo del 5% de acuerdo a la tabla 11.

TDD.

Los niveles *TDD* (Distorsión armónica de la demanda total) del circuito a analizar. Los resultados de estas mediciones se deben de encontrar dentro de parámetros que estén bajo norma ya que de lo contrario se deben de tomar otras medidas de acuerdo a la figura 42.

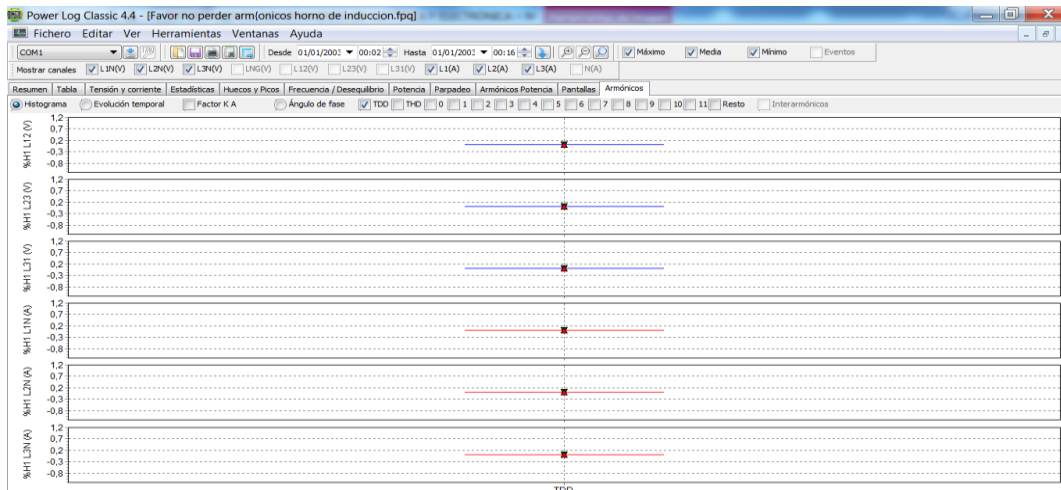


Figura 42. Del TDD.

Como se observa los valores límites del TDD que se indicado en la figura 42 con un valor de 0%, La tabla 12 que se indica a continuación tiene el límite de TDD%.

Tabla 12.

Límites de distorsión para sistemas con clasificación hasta 161 kV

Maximum harmonic current distortion						
In percent of I_L						
Individual harmonic order (<i>oddharm</i>onics)^{a,b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD(%)
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1	15
0						
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20

Como se puede observar en la figura 42 el valor de TDD no pasa del 5% por lo tanto, cumple con valores establecidos en la norma IEE519 que se muestran en la tabla 12.

Los datos recopilados de las pruebas realizadas con un kilogramo de aluminio se muestran en la tabla 13.

Tabla 13.

Resultados de las pruebas del horno

Potencia (kW)	Tensión (V)	Corriente (A)	Frecuencia (kHz)	Tiempo (minutos)	Temperatura (°C)
7.1	449	14.2	6.5	2.30	680
7.2	444	14.4	6.6	2.20	685
7.0	451	15.8	6.8	2.25	685
7.1	449	14.8	6.6	2.30	685
7.4	452	15	6.8	2.30	680

Los valores de la media de cada parámetro se muestran en la tabla 14, fueron calculados en R y sirvieron para relacionar aquellas pruebas que tuvieron un menor consumo de potencia, mayor tensión, menor corriente, menor duración, mayor frecuencia y mayor temperatura.

Tabla 14.

Valores medios de las pruebas del horno

Potencia (kW)	Tensión (V)	Corriente (A)	Frecuencia (kHz)	Tiempo (minutos)	Temperatura (°C)
7.16	449	14.84	6.66	2.27	683

Análisis de la potencia

En el gráfico de barras de la figura 43 se ve la variación de consumo de potencia en cada una de las pruebas, además del valor medio marcado en distinto color. Dado que el consumo de potencia es un factor determinante en la eficiencia del horno, aquellos valores que se encuentran por debajo de la media son de mayor interés.

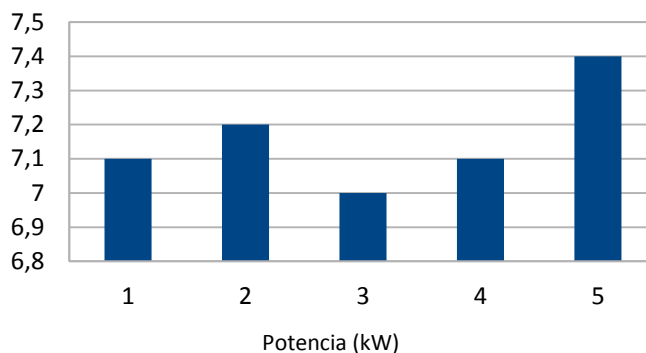


Figura 43. Comparación del consumo de potencia.

Las pruebas 2 y 5 tienen el mayor consumo, mientras que, de las restantes la prueba 3 es la que mejor resultado presenta. A pesar de que en la escala de los kW las variaciones de cada prueba no parezcan representativas, hay que tomar en cuenta que este es un proceso que se llevará a cabo varias veces al día, durante varios días cada mes, por lo tanto, esas pequeñas variaciones pueden representar un valor considerable a pagar.

Análisis de voltaje

La en el caso de la tensión empleada para llevar a cabo la fundición, no se considera aquellos valores más bajos, sino que al contrario son deseables aquellos valores más altos, porque ayudan a mantener el nivel de potencia con un menor consumo de corriente. En la gráfica de barras de la figura 44 se puede ver la comparación de las tensiones en cada prueba.

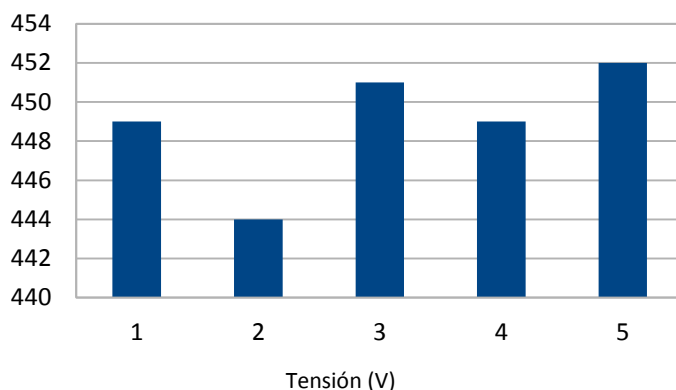


Figura 44. Comparación de niveles de tensión.

En este caso el valor de la prueba número 2 es el más bajo y por tanto el menos deseable, los valores de las pruebas 3 y 5 están sobre la media de 449V, siendo la tercera solo un voltio menor que la última.

Análisis de corriente

El gráfico de barras de la figura 45 muestra la comparación de las corrientes consumidas y el valor de la mediana en verde, en este caso es preferible el valor más bajo, ya que el consumo de corriente está relacionado con el efecto Joule que incrementa la temperatura de la carga y el conductor de manera proporcional al incremento de amperaje, sin embargo, dada la elevada temperatura que en si conlleva el uso de este equipo podrían provocarse otros efectos.

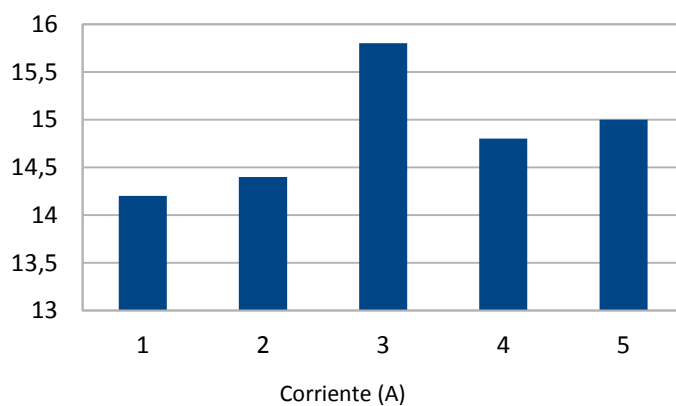


Figura 45. Comparación de consumo de corriente.

En este caso la evidencia de manera contundente como la corriente de la tercera prueba es superior a las demás, pese a que el valor de tensión potencia es el más bajo y de tensión el más alto lo cual podría implicar que el incremento de temperatura afecta las propiedades eléctricas de la carga (inductancia). El mejor consumo de corriente es el de la primera prueba.

Análisis de frecuencia

La comparación de las frecuencias se muestra en la gráfica de barras de la figura 46 y es especialmente útil para determinar cómo es afectado el consumo de potencia y la relación que guarda con el consumo de corriente, dado que el desfase provocado por la variación de frecuencia se puede ver afectado debido a que los valores de capacitancia e inductancia son fijos, provocando un aumento en el valor de la potencia reactiva.

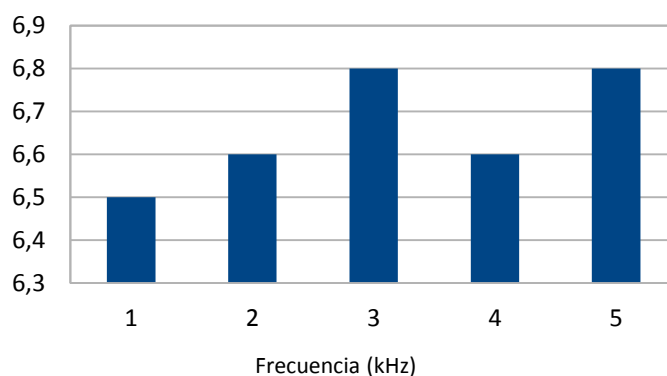


Figura 46. Comparación de valores de frecuencia.

Las frecuencias de las pruebas 3 y 5 son las más elevadas, lo cual sigue la tendencia de tensión y corriente, pero es diferente para la potencia de la tercera prueba, de manera que es probable que la potencia mostrada en la pantalla del sistema de control no corresponda a la potencia real.

Análisis de tiempo

La comparación de los valores de tiempo se muestra en la gráfica de barras de la figura 47, en este caso también es preferible obtener el menor tiempo posible, aun cuando sean solo fracciones de minuto, la suma de todos esos intervalos en un día de

trabajo puede representar un mayor pago en el consumo de electricidad o una mayor cantidad de material procesado.

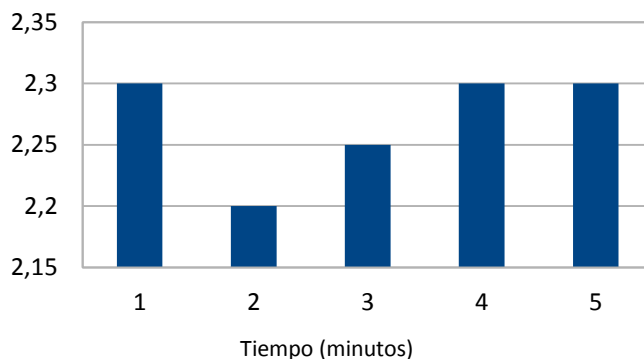


Figura 47. Comparación de valores de tiempo.

El menor valor de tiempo empleado corresponde a la segunda prueba, la tercera también está por debajo de la media, lo que hace que seleccionar estas condiciones de trabajo sean las mejores, debido a que también corresponde a la prueba con menor consumo de potencia, y por tanto es la prueba que demuestra la mejor eficiencia posible.

Análisis de temperatura

En el caso de la temperatura, cuya comparación se muestra en la gráfica de barras de la figura 48, no resulta ser un parámetro determinante, en tanto el material alcance el punto de vaciado y se mantenga estable estará bien.

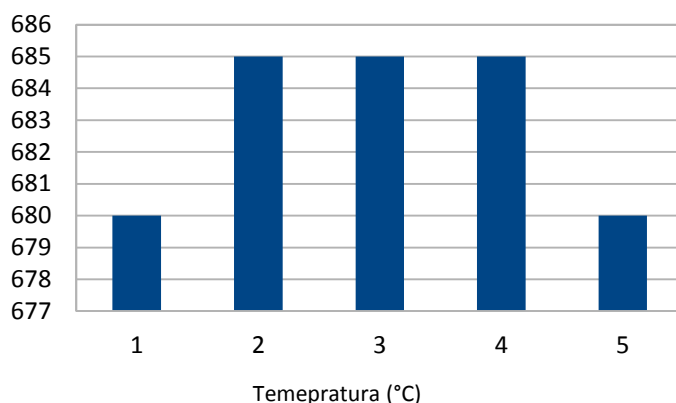


Figura 48. Comparación de valores de temperatura.

Las variaciones de temperatura ayudan a determinar que pruebas fueron peores por alcanzar una temperatura menor, lo que implica que existen pérdidas de potencia en otras partes del sistema. En el caso de la prueba 5, se aprecia que a pesar de haber sido en la que se consumió el mayor nivel de potencia, no alcanza la mayor temperatura, manteniéndose por debajo de la media aritmética, por tanto, las condiciones en que se dio esa prueba son las menos favorables para la operación del equipo.

5.9 Discusión de los resultados

Las condiciones de la tercera prueba son las mejores en eficiencia energética y tiempo, pues representan el menor consumo de potencia con 7kW y un tiempo por debajo de la media de 2.25 minutos, pese a tener un consumo elevado de corriente que normalmente no es deseable, en este caso no sería un inconveniente, dado que el objetivo de este sistema es precisamente elevar la temperatura, sin embargo, si se pudiera corregir o determinar si existe una fuga de corriente en alguno de los elementos del sistema, podría mejorarse la eficiencia. Por otra parte, la prueba con el peor resultado es el número cinco, siendo en la que existió el mayor consumo de potencia, acompañada de un tiempo superior a la media y una temperatura baja, dando como resultado que sus condiciones sean poco deseables.

Dando una ponderación numérica a los valores de los parámetros obtenidos en las pruebas, que va desde 5 hacia abajo, siendo el mayor el que obtuvo mejor resultado, se puede ver gráficamente cuáles son las mejores condiciones. En la tabla 16 se puede observar la ponderación dada, repitiéndose el valor asignado en caso de que fueran iguales los valores de dicho parámetro.

Tabla 15.*Ponderación de parámetros de funcionamiento*

Parámetro/prueba	1	2	3	4	5
Potencia	4	3	5	4	2
Tensión	3	2	4	3	5
Corriente	2	5	4	2	2
Frecuencia	5	4	3	4	3
Tiempo	2	5	4	2	2
Temperatura	4	5	5	5	4
TOTAL	23	23	22	21	18

El análisis deja claro que además de las condiciones de la prueba 3, las condiciones de la prueba 1 también son deseables en el sistema.

Adicionalmente, y como se había mencionado antes, todos los resultados obtenidos de tiempo superan a los resultados obtenidos de las fundidoras de la ciudad de Latacunga en el tiempo empleado para alcanzar el punto de vaciado

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES.

- Se concluye que el horno de inducción diseñado y construido con IGBT's funde metales ligeros (<1200°C) en un tiempo promedio de 2.30 minutos, con un manejo eficiente de la energía, además presenta mejoras con respecto al horno GLP y diésel al reducir la contaminación en el medio ambiente.
- Se concluyó que el estado del arte permitió recopilar información para el desarrollo del proyecto de investigación que fue importante para comprender el principio de calentamiento por inducción y el funcionamiento del mismo.
- Se estableció una metodología para el dimensionamiento del horno de inducción basándose en métodos de diseño y parámetros de construcción para la selección de los diferentes elementos, que nos permite que el horno se construya de acuerdo a los cálculos y a la necesidad de las pequeñas fundidoras para el proceso de fundición de aluminio.
- Se diseñó el sistema de control de potencia en base a transistores IGBT's ya que en este proyecto de investigación se trabaja con potencia de 7.4 Kw y frecuencia de 6.5 KHz, para reducir el tiempo de fundición, para esto se utilizó los parámetros de cálculos y selección de los materiales para el diseño del horno de inducción.
- Se construyó la bobina de inducción con 10 espiras, para que soporte una temperatura de 1200 °C y una corriente de 14.07 A, las bobinas están hecho de un tubo hueco de cobre que es enfriado con agua.
- Los transistores IGBT's utilizados para construir el horno de inducción, entrega una señal de salida en respuesta a una señal de entrada, cumpliendo funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador para el tanque resonante.
- Se concluyó que los resultados obtenidos de los armónicos durante el proceso de fundición se encuentran en un valor de 4.9%, cumpliendo con lo indicado en la norma IEEE519 Harminic Control.
- Se concluyó que en el proceso de fundición del aluminio el consumo de potencia no varía, tomando en cuenta que se llevó a cabo varios procesos durante el día.

RECOMENDACIONES.

- Se recomienda construir un horno de inducción de baja potencia utilizando IGBT`s para fundir metales ligeros ya que en este proyecto de investigación se demostró que es más eficiente con respecto a los tiempos y costos de fundición de hornos tradicionales a gas y diésel.
- Se recomienda establecer una metodología clara y confiable con respecto a la información adquirida para la construcción e implementación del horno de inducción, esto permite guiar en el proceso investigativo de forma eficaz.
- Se recomienda diseñar o implementar el sistema de control utilizando IGBT`s ya que en este proyecto de investigación se trabaja con frecuencia adecuadas de control, para reducir el tiempo y costos de producción para esto se utilizó los parámetros de cálculos y selección de los materiales para el diseño del horno.
- Se recomienda verificar el proceso de operación de la puesta en marcha y del proceso de fundición, para llegar a conocer datos que permiten comparar el valor real con respecto a los valores de los parámetros diseño y calculo, estos datos demuestran que el horno cumplió los parámetros esperados de operación y diseño, que los elementos seleccionados y dimensionados, cumplieron satisfactoriamente.

El operador debe cumplir con la siguiente guía de trabajo.

- Antes de realizar el proceso de fundición se debe verificar que el peso del material sea el adecuado, ya que el crisol del horno es para 1Kg.
- Para la implementación del sistema de refrigeración se debe tomar en cuenta el valor de la temperatura de salida de la bobina para establecer la diferencia de temperatura en la torre de refrigeración.
- Se debe utilizar el adecuado equipo de protección personal (guantes, mandil, calzado de cuero, casco, gafas oscuras) para realizar el proceso de fundición, para evitar quemaduras, deslumbramientos, aspirar gases, etc.

Trabajos a futuros.

- Queda a consideración que se podría realizar una investigación para hornos de inducción utilizando transistor Mosfet para controlar frecuencias altas hasta 100KHz

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Diseño y construcción de bobinas de inducción para hornos. (marzo de 2013). Recuperado 15 de febrero de 2017. Obtenido de winder.gonzalez@igi.cnr.it, jaller@usb.ve, jose.aller@gmail.com, <http://prof.usb.ve/jaller>.

Acero, T. (mayo de 2011). Clasificación de los hornos usados para la fusión. Recuperado 20 de abril de 2018. Obtenido de <https://elementosdemetalurgia.blogspot.com>.

Acevedo, A. R. (noviembre de 2007). Metodología para la construcción de un horno de inducción electromagnética. Bucaramanga: Cemos. Recuperado 03 de febrero de 2018.

Albán, C., & Álvarez, O. (Octubre de 2008). Proceso de fundición. Recuperado 20 de 08 de 2017. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2169>.

All rights reserved. (2017). Recuperado 5 de enero de 2018. Obtenido de Docx, Pdf, Txt or read online from Scribd: <https://es.scribd.com/doc/237522382/>

Permeabilidad-magnetica.

Aplicada, E. P. (05 de 02 de 2014). Vicente Garcia. Recuperado 3 de enero de 2018. Obtenido de <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/aislamiento-galvanico>.

Cecatherm, G. (2010). Radiación, convección, conducción. Recuperado 1 de noviembre de 2017. Obtenido de <http://www.cecatherm.com/calefaccion-radiante/radiacion-conveccion-conduccion>.

Celia Pacheco; José Alfonso Soto. (2009). Universidad de Valencia. Recuperado 30 de febrero de 2018. Obtenido de <https://www.uv.es>.

Diffor, F. J., & Martinez Del Pozo, J. (Agosto de 2012). Diseño de un sistema industrial de Madrid. Obtenido de <https://www.iit.comillas.edu>

EcuRed. (02 de marzo de 2018). Horno de inducción. Artículos de actualidad. Recuperado 02 de marzo de 2018. Obtenido de https://www.ecured.cu/Horno_de_induccion.

Eedback Networks Technologies, S. (2001-2013). Calcular la muestra correcta. Recuperado 04 de enero de 2018. Obtenido de <https://www.feedbacknetworks.com/cas/aviso-legal/aviso-legal.html>.

Espectador, E. (Septiembre de 26 de 2006). Recuperado 5 de enero de 2017. Obtenido de <https://www.quiminet.com>.

Estructura de la materia. (2014). Metalografía y Tratamientos Térmicos. Recuperado 28 de enero de 2017. Obtenido de <https://www.frro.utn.edu.ar>. FLORES, E. Y., & Orellana, R. E. (septiembre de 2014). Diseño y construcción de un horno de crisol. Recuperado 15 de mayo de 2017. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv>.

Gómez, V. E. (junio de 1999). Universidad de València. Recuperado 13 de octubre de 2017. Obtenido de <https://www.uv.es/~vesteveg/Tesis.pdf>.

González, I. G. (2018). Aplicación de calentamiento por inducción electromagnética en el procesamiento de prfv. Recuperado 3 de febrero de 2018. Obtenido de <http://www.emmafiorentino.com.ar>.

González, W. A.-B. (2013). Diseño y control de bobinas de calentamiento para hornos de inducción Electromagnética. En C. y. Universidad.

Guanipa, G. (2010). Sistema de refrigeración. Francisco de Miranda.

Jorquera Justavo. (2015). Investigación e implementación de mecanismo de temple por inducción. Recuperado 10 de octubre de 2017. Obtenido de repopib.ubiobio.cl/jspui/bitstream.

Kamimathyr. (15 de mayo de 2015). Tipos de hornos para la fundición de metales. Recuperado 2 de marzo de 2016. Obtenido de <https://plus.google.com/106783142129695429841>.

marinjl. (10 de 12 de 2015). www.uv.es. Recuperado 7 de noviembre de 2016. Obtenido de <http://www.uv.es/marinjl/electro/transistores>.

México, U. d. (2006). Los hornos de crisol trabajan por combustión. En J. Pablo. México. Recuperado 5 de febrero de 2018.

Miley, E. (1 de febrero de 2018). Acerca de los hornos de inducción. Recuperado 01 de marzo de 2018. Obtenido de <https://www.geniolandia.com/13063241/acerca-de-los-hornos-de-induccion>.

Mipro. (2014). Feria inversa metalúrgica y siderúrgica para el sector automotriz. Recuperado 14 de enero de 2018. Obtenido de <http://www.youtube.com/watch?v=MqCixN1Z4L4>.

Morales, m. V., & Zhini Lazo Saúl Marcelo. (2014). En simulación de los procesos psicrométricos utilizando en Cuenca (pág. 27).

Murria, G. (16 de agosto de 2016). Dispositivos electronicos. Recuperado 6 de enero de 2018. Obtenido de <https://es.slideshare.net>.

Net, E. (2014). Conductividad eléctrica y térmica. Recuperado 2 de enero de 2017. Obtenido de <http://www.escolares.net/fisica/conductividad-electrica-y-termica/>.

Nicolás Muñoz-Galeano, J. B.-Q.-L. (2016). Enseñando el funcionamiento de los Inversores Puente H. Análisis del intercambio de potencia entre bobinas y condensadore (Vol. Form. Univ. vol.9 no.1). (L. Serena, Ed.) Colombia. Recuperado 2 de enero de 2018.

Patiño, C. R. (Diciembre de 2008). Diseño y construcción de un inversor trifásico . Pereiara: ISSN 0122-1701 . Recuperado 12 de febrero de 2017.

Peiro, J. (2017). Hierro y acero maravillas modernas. Recuperado 20 de abril de 2018. Obtenido de <http://www.youtube.com/watch?v=ovgJBHKBDYA>.

Plan Nacional del Buen Vivir, O. 1. (2013-2017). Recuperado 3 de abril de 2018. Obtenido de ww.buenvivir.gob.ec/objetivos-nacionales-para-el-buen-vivir

Plan Nacional del Buen Vivir, O. 7. (2013-2017). Recuperado 03 de abril de 2018. Obtenido de ww.buenvivir.gob.ec/objetivos-nacionales-para-el-buen-vivir

plasticos, T. d. (30 de diciembre de 2013). Tecnologia de los plasticos. Recuperado 03 de enero de 2018. Obtenido de <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/12/termosellado.html>.

quimica, L. i. (26 de febrero de 2017). Ingeniería Mecánica. Recuperado 03 de marzo de 2018. Obtenido de tareasuniversitarias.com.

Refrigeracion, F. d. (2002-2016).

Rodriguez, D., Rivas, D., & Lara, A. (09 de 12 de 2005). Principio de calentamiento por inducción. Recuperado 20 de noviembre de 2017. Obtenido de www.gilba.com/nuevaweb: www.gilba.com/nuevaweb.

Rudnev, V. L. (2017). Handbook of induction heating. CRC press.

Santiago. (2000). Compendio de normas para productos de acero. Recuperado 2 de marzo de 2018. Obtenido de <http://www.aza.cl>.

SegovIA, C. C. (2014-2015). Trabajo, calor y energía. Recuperado 2 de Enero de 2018. Obtenido de www.colegiocooperativaalcazar.e.

Sons, J. W. (1995). Dispositivos de Electrónica de Potencia. Nueva York: segunda.

Team, R. D. (16 de mayo de 2005). Introducción a R. Obtenido de <https://cran.r-project.org/doc/contrib/R-intro-1.1.0-espanol.1.pdf>.

Trujillo Roldán, S. A. (2005). Diseño y construcción de un horno de crisol para fundición utilizando gas natural. Quito: Quito: USFQ, 2005. Recuperado 10 de febrero de 2018

Turmero, P. (2016). Monografias.com. (2016) Recuperado 10 de enero de 2018. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos101/horno-induccion/horno-induccion.shtml>.

ANEXOS



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor o señorita:
Freddy Geovanny Plasencia Lema Y Rubén Darío Aguirre Guachamin.

En la ciudad de Latacunga, a los 23 días del mes de julio del 2018.

Ing. Fabricio Pérez

DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:

Ing. Katya Torres

DIRECTOR DE CARRERA



Dr. Rodrigo Vaca

SECRETARIO ACADÉMICO