



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR
DE AGUA EN BASE AL ANÁLISIS DE UN SISTEMA
EFICIENTE DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA
HOGARES PERTENECIENTES AL SECTOR SOCIO
ECONÓMICO MEDIO.”**

AUTORES: JACOBO JAVIER CÁCERES RODRÍGUEZ

BYRON VINICIO MONTERO LLUNDO

DIRECTOR: ING. WILSON TRÁVEZ

LATACUNGA

2016



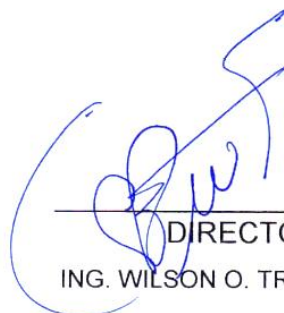
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR DE AGUA EN BASE AL ANÁLISIS DE UN SISTEMA EFICIENTE DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA HOGARES PERTENECIENTES AL SECTOR SOCIO ECONÓMICO MEDIO.”** realizado por los señores: JACOBO JAVIER CÁCERES RODRÍGUEZ y BYRON VINICIO MONTERO LLUNDO; ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto permito acreditarlo y autorizar a los señores JACOBO JAVIER CÁCERES RODRÍGUEZ y BYRON VINICIO MONTERO LLUNDO para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, 19 de diciembre de 2016



DIRECTOR
ING. WILSON O. TRÁVEZ



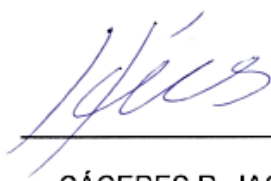
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **JACOBO JAVIER CÁCERES RODRÍGUEZ**, con cédula de identidad N° 1804009858 y **BYRON VINICIO MONTERO LLUNDO**, con cédula de identidad N° 1803992260, declaro que este trabajo de titulación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR DE AGUA EN BASE AL ANÁLISIS DE UN SISTEMA EFICIENTE DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA HOGARES PERTENECIENTES AL SECTOR SOCIO ECONÓMICO MEDIO**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

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

Latacunga, 19 de diciembre de 2016



CÁCERES R. JACOBO J.

C.C.:1804009858



MONTERO LL. BYRON V.

C.C.: 1803992260

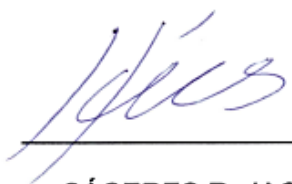


DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **JACOBO JAVIER CÁCERES RODRÍGUEZ** y **BYRON VINICIO MONTERO LLUNDO**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo de titulación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR DE AGUA EN BASE AL ANÁLISIS DE UN SISTEMA EFICIENTE DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA HOGARES PERTENECIENTES AL SECTOR SOCIO ECONÓMICO MEDIO.**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 19 de diciembre de 2016



CÁCERES R. JACOBO J.

C.C.:1804009858



MONTERO LL. BYRON V.

C.C.: 1803992260

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mi madre Eulalia y mi papá Pedro por todo su apoyo y paciencia a lo largo de mi carrera, quienes con su sacrificio han logrado que todo esto sea posible, quienes me han enseñado a jamás rendirme incluso ante la peor de las adversidades, gracias a todo ello estoy culminando una etapa en mi vida, a mi novia Ivette quien ha sido un apoyo incuantificable a lo largo de mi carrera quien me ha levantado incluso cuando me he rendido, a mis hermanos por entregarme en cada paso la mejor versión de sí mismos, para jamás claudicar y seguir siempre adelante

Jacobo

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad todos los días de superarme a mí mismo en este camino tan gratificante como es haber culminado mi carrera.

Como no agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Latacunga y todos sus docentes, de manera especial a mi director Ing. Wilson Trávez, por aportar con todo su conocimiento que me ha permitido culminar este trabajo de titulación.

A toda mi familia por aportar de manera sustancial en cada paso de mi vida, en cada momento ser infalibles y darme siempre palabras de superación, de manera especial a mi padre por jamás rendirse ante las adversidades y brindarme sabios consejos, mi agradecimiento hacia ti es infinito ya que ahora me cuidas desde el cielo.

Agradezco de corazón a mi novia Ivette, por apoyarme en cada decisión y sobre todo a lo largo de mi carrera siendo parte fundamental en mi vida.

También agradezco a mi compañero de tesis con quien hemos finalizado este trabajo, muy importante en nuestra vida universitaria.

Jacobo

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis a mi madre Nancy, por todo el esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional que me ha brindado durante toda mi vida, especialmente en la etapa universitaria, quien me ha demostrado con su ejemplo, a no desfallecer ni rendirme ante nada y perseverar siempre, gracias a ella hoy soy lo que soy.

Gracias mami por haber creído en mí.

Byron

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por haberme dado la paciencia y sabiduría para poder llegar hasta aquí; a mi madre Nancy, mi padre Gustavo, mis hermanos Roberth, Daniel y mi hermana Alejandra quienes han sido durante todo este tiempo mi más grande motivación y apoyo; a mi compañero de tesis con quien fue posible alcanzar este logro, a nuestro tutor Ing. Wilson Trávez por todo el apoyo brindado y finalmente un eterno agradecimiento a esta prestigiosa universidad la cual abrió sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

Byron

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---------------------------------|-------|
| PORTADA..... | i |
| CERTIFICADO..... | ii |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD..... | iii |
| AUTORIZACIÓN..... | iv |
| DEDICATORIA..... | v |
| AGRADECIMIENTO..... | vi |
| DEDICATORIA..... | vii |
| AGRADECIMIENTO..... | viii |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS..... | ix |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xiv |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | xvii |
| RESUMEN..... | xviii |
| ABSTRACT..... | xix |
| PRESENTACIÓN..... | xx |

CAPÍTULO I

| | |
|---|----------|
| FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... | 1 |
| 1.1 Introducción..... | 1 |
| 1.2 Principio del calentamiento por inducción electromagnética..... | 5 |
| 1.2.1 Corrientes parásitas o Foucault..... | 6 |
| 1.2.2 La ley de Ampere..... | 8 |
| 1.2.3 La ley de Faraday..... | 9 |
| 1.2.4 El efecto Joule..... | 11 |
| 1.2.5 Generación de calor mediante leyes de inducción electromagnética..... | 11 |
| 1.3 Propiedades y características del calentamiento por inducción electromagnética..... | 16 |

| | | |
|-------|---|----|
| 1.3.1 | Energía transferida..... | 16 |
| 1.3.2 | Eficiencia eléctrica..... | 18 |
| 1.3.3 | Factor de potencia..... | 18 |
| 1.3.4 | Consumo de energía..... | 19 |
| 1.3.5 | Calidad..... | 19 |
| 1.3.6 | Características del calentamiento inductivo..... | 19 |
| 1.3.7 | Efecto piel profundidad de penetración..... | 20 |
| 1.3.4 | Resistencia equivalente..... | 23 |
| 1.3.5 | Aplicaciones del calentamiento por inducción..... | 25 |
| a. | Temple por inducción..... | 25 |
| b. | Revenido por inducción..... | 25 |
| c. | Braseado por inducción..... | 25 |
| d. | Curado por inducción..... | 26 |
| e. | Soldadura por inducción..... | 26 |
| f. | Recocido por inducción..... | 27 |
| g. | Precalentamiento por inducción..... | 27 |
| h. | Post calentamiento por inducción..... | 27 |
| i. | Forja por inducción..... | 28 |
| j. | Fusión por inducción..... | 28 |
| k. | Enderezado por inducción..... | 29 |
| l. | Producción de plasma por inducción..... | 29 |
| 1.4 | Componentes de un sistema de calentamiento por inducción electromagnética..... | 29 |
| 1.4.1 | Sistema de alimentación eléctrica..... | 30 |
| 1.4.2 | Fuente de alimentación de la carga resonante..... | 31 |
| 1.4.3 | Bobina de inducción..... | 32 |
| 1.4.4 | Convertidor resonante serie..... | 33 |
| 1.4.5 | Rectificadores controlados..... | 34 |
| 1.4.6 | Convertidor resonante..... | 34 |

| | | |
|--------|---|----|
| 1.4.7 | Carga resonante..... | 35 |
| 1.4.8 | Capacitancia..... | 35 |
| 1.4.9 | Inductancia..... | 36 |
| 1.4.10 | Circuitos de potencia..... | 36 |
| 1.5 | Circuitos de disparo de tiristores..... | 40 |
| 1.5.1 | Circuito sincronizador..... | 41 |
| 1.5.2 | Entrada señal de control..... | 42 |
| 1.5.3 | Circuito base de tiempo..... | 42 |
| 1.5.4 | Generación de los pulsos de disparo..... | 42 |
| 1.5.5 | Circuito de aislamiento entre el generador de pulsos y el circuito convertidor..... | 42 |
| 1.5.6 | Protección de la compuerta..... | 43 |
| 1.5.7 | Semiconductores que generan pulsos de disparo..... | 43 |
| 1.6 | Circuitos de apagado de tiristores..... | 44 |
| 1.6.1 | Conmutación natural..... | 44 |
| 1.6.2 | Conmutación forzada..... | 45 |
| 1.6.3 | Métodos de apagado, clasificación..... | 46 |
| 1.7 | Eficiencia energética..... | 47 |

CAPÍTULO II

| | | |
|-------|--|-----------|
| | DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO AGUA POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA..... | 49 |
| 2.1 | Características preliminares..... | 49 |
| 2.2. | Diseño sistema electrónico para el calentamiento de agua por inducción electromagnética..... | 54 |
| 2.2.1 | Circuito de potencia..... | 55 |
| 2.2.2 | Selección del filtro capacitivo..... | 56 |
| 2.2.3 | Diseño del rectificador de onda completa..... | 56 |
| 2.2.4 | Diseño del filtro LC..... | 58 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.2.5 | Diseño del inversor cuasi-resonante..... | 59 |
| 2.3.6 | Dimensionamiento y selección del IGBT..... | 60 |
| 2.3.7 | Selección del driver IGBT..... | 67 |
| 2.3.8 | Simulación y formas de onda circuito de potencia..... | 67 |
| 2.3.9 | Selección de los sensores para el circuito de realimentación corriente..... | 73 |
| 2.4 | Diseño del circuito de realimentación de corriente..... | 76 |
| 2.5 | Circuito sincronización de pulsos para el control del IGBT..... | 79 |
| 2.6 | Etapa de protección por sobre-temperatura..... | 84 |
| 2.6.1 | Circuito de acondicionamiento para la señal del termistor..... | 85 |
| 2.4. | Diseño del circuito de control y algoritmo para el sistema de calentamiento de agua por inducción electromagnética..... | 86 |
| 2.4.2 | Selección de microcontrolador para el sistema de control..... | 88 |
| 2.5.1 | Refrigeración..... | 97 |

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN.....103

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.1. | Construcción de la bobina de inducción electromagnética para el sistema de calentamiento..... | 103 |
| 3.2 | Manufacturación de la bobina..... | 103 |
| 3.3 | Construcción del sistema de calentamiento..... | 103 |
| 3.3 | Implementación del circuito de potencia..... | 105 |
| 3.3.1 | Voltaje en bus dc..... | 106 |
| 3.4 | Implementación del circuito de disparo..... | 108 |
| 3.5 | Implementación de la tarjeta de control..... | 110 |
| 3.7 | Montaje de la carcasa y de los elementos electrónicos..... | 112 |
| 3.8 | Integración de sistemas..... | 114 |

CAPÍTULO IV

| | |
|--|------------|
| PRUEBAS Y RESULTADOS..... | 116 |
| 4.1 Pruebas de funcionamiento del sistema electrónico..... | 116 |
| 4.1.1 Cálculo de consumo de potencia..... | 118 |
| 4.1.2 Comparación de las características de calentamiento de agua en el prototipo de calentamiento de inducción electromagnética y la ducha eléctrica..... | 119 |
| 4.2 Pruebas de funcionamiento de la placa de control..... | 120 |
| 4.4 Validación de la Hipótesis..... | 122 |
| 4.5 Análisis de costos..... | 122 |

CAPÍTULO V

| | |
|--------------------------|-----|
| 5.1 CONCLUSIONES..... | 126 |
| 5.2 RECOMENDACIONES..... | 129 |

| | |
|--|------------|
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 128 |
|--|------------|

| | |
|--------------------|------------|
| ANEXOS..... | 129 |
|--------------------|------------|

ANEXO A. Manual de Usuario

ANEXO B. Data sheet

ANEXO C. Programa de control microcode

ANEXO D. Circuito de Potencia

ANEXO E. Circuito de sincronización de pulsos

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 1. | Campo magnético generado por un inductor..... | 5 |
| Figura 2. | Forma de campos electromagnéticos..... | 7 |
| Figura 3. | Representación de corrientes de Foucault | 8 |
| Figura 4. | Significado de la ley de Lenz | 10 |
| Figura 5. | Pieza a calentar rodeada por la bobina | 13 |
| Figura 6. | Representación del diámetro exterior de la pieza y diámetro interior de la bobina..... | 15 |
| Figura 7. | Profundidad de penetración..... | 21 |
| Figura 8. | Curva de la profundidad de penetración en función de la frecuencia para diversos materiales..... | 23 |
| Figura 9. | Diagrama de bloques componentes del circuito de potencia de un sistema de inducción electromagnética | 30 |
| Figura 10. | Diagrama de bloques de un inversor resonante | 37 |
| Figura 11. | Diagrama de un convertidor estático de energía | 38 |
| Figura 12. | Tipos de convertidores estáticos de energía | 40 |
| Figura 13. | Diagrama de bloques circuito de disparo de tiristores | 41 |
| Figura 14. | Formas de operación comutación forzada..... | 46 |
| Figura 15. | Diagrama de bloques de un Calentador de inducción | 50 |
| Figura 16. | Modos de operación básica del inversor resonante y formas de onda..... | 52 |
| Figura 17. | Modo I de operación del inversor resonante..... | 52 |
| Figura 18. | Modo II de operación del inversor resonante..... | 53 |
| Figura 19. | Modo III de operación del inversor resonante..... | 54 |
| Figura 20. | Modo IV de operación del inversor resonante. | 54 |
| Figura 21. | Representación genérica del circuito de potencia | 55 |
| Figura 22. | Representación gráfica del circuito de potencia | 55 |
| Figura 23. | Ciclo de switcheo inversor del inversor resonante..... | 61 |
| Figura 24. | Formas de onda Zero Voltage Switching | 62 |
| Figura 25. | Diagrama circuito de un inversor simple..... | 64 |

| | |
|---|-----|
| Figura 26. Circuito de Potencia resonador cuasi-resonante, simulación power sim | 67 |
| Figura 27. Corriente de entrada en el circuito de potencia. | 68 |
| Figura 28. Voltaje Rectificado Bus DC | 68 |
| Figura 29. Corriente de Carga medida en el tanque resonante. | 69 |
| Figura 30. Corriente en el colector..... | 69 |
| Figura 31. Forma de onda voltaje en el colector | 70 |
| Figura 32. Interacción formas de onda. | 70 |
| Figura 35. Esquema de control calentador de inducción comercial | 73 |
| Figura 36. Diagrama de bloques de un Calentador de inducción | 74 |
| Figura 37. Circuito de acondicionamiento de sensor de corriente | 75 |
| Figura 38. Forma de onda en realimentación de corriente. | 76 |
| Figura 39. Circuito de realimentación de corriente..... | 78 |
| Figura 40. Forma de onda salida del comparador en la realimentación. | 79 |
| Figura 41. Circuito de sincronización de pulsos..... | 80 |
| Figura 42. Voltaje de colector Vs Voltaje Bus DC , Corriente colector..... | 80 |
| Figura 43. Voltaje de colector Vs Voltaje Bus DC, Corriente colector ampliada | 81 |
| Figura 44. Forma de onda a la salida del sincronizador de pulsos | 82 |
| Figura 45. Polarización del capacitor (calentador off). | 83 |
| Figura 46. Polarización del capacitor (calentador ON)..... | 84 |
| Figura 47. Circuito de etapa de protección por sobre-temperatura..... | 85 |
| Figura 48. Acondicionamiento del sensor de temperatura..... | 86 |
| Figura 51. Diseño de circuito de control realizado en software de diseño electrónico | 91 |
| Figura 54. Carcasa de soporte para la bobina de inducción electromagnética..... | 99 |
| Figura 66. Circuito de disparo de pulsos, realizado en Power Sim..... | 109 |
| Figura 68. Implementación circuito de control, protoboard | 110 |
| Figura 72. Diseño de Carcasa de Bobina de Inducción Electromagnética. .. | 113 |

| | |
|---|-----|
| Figura 74. Sistemas Integrados, prototipo de calentamiento de agua por inducción electromagnética | 114 |
| Figura 76. Medición de corriente de entrada ducha eléctrica..... | 117 |
| Figura 77. Placa de control Sistema de calentamiento de inducción electromagnética..... | 119 |
| Figura 78. Circuito de control Implementado en caja electrónica..... | 119 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tabla 1. | Grupos socioeconómicos..... | 3 |
| Tabla 2. | Porcentaje representado según estrato económico..... | 4 |
| Tabla 3. | Magnitudes aproximadas de la profundidad de penetración..... | 22 |
| Tabla 4. | Variación de voltaje de entrada vs Voltaje en el bus DC, Voltaje de colector y Corriente de colector. | 71 |
| Tabla 5. | Características Micro controlador PIC16F876A..... | 90 |
| Tabla 6. | Resistividad eléctrica en conductores..... | 95 |
| Tabla 7. | Características Mecánicas de algunos materiales | |
| Tabla 8. | Caudal, temperatura bobina de inducción y temperatura de agua a la salida..... | 119 |
| Tabla 9. | Caudal, temperatura bobina de níquelina y temperatura de agua a la salida..... | 120 |
| Tabla 10. | Temperatura de funcionamiento calentador de inducción electromagnética en vacío. | 120 |
| Tabla 11. | Costo de placa de potencia y circuito de disparo..... | 123 |
| Tabla 12. | Costo placa de control..... | 124 |
| Tabla 13. | Costo artículos varios..... | 124 |
| Tabla 14. | Costo de Ingeniería según perfil Ocupacional..... | 125 |

RESUMEN

El trabajo de titulación presenta el diseño y construcción de un calentador de agua en base al análisis de un sistema eficiente de inducción electromagnética; para la presente investigación se realizó el análisis y discernimiento de una cocina de inducción, con la finalidad de aprovechar las aproximaciones de funcionamiento desarrollados en estos equipos, de fácil acceso comercial. El diseño electrónico propuesto se contempla una etapa de potencia, una etapa de realimentación, una etapa de sincronización de pulsos y una etapa de protección del elemento de conmutación sobre temperatura.- En la etapa de potencia se usa un inversor cuasi-resonante el cual permite conmutación a alta frecuencia y genera la resonancia requerida para que la bobina de inducción pueda generar el calor que requiere esta aplicación. Para el caso del calentador de agua de inducción electromagnética se diseñó una bobina con un material ferromagnético en su interior de tal manera que se diferencia de las cocinas de inducción convencionales, el calentador empieza su etapa de resonancia inmediatamente. En el control del calentador de agua por inducción electromagnética se implementa un micro controlador que controla el ancho de pulso para producir el disparo en el conmutador electrónico, posee un display que muestra falla, ya que cuenta con protección sobre corriente, sobre voltaje y sobre temperatura, considerados para el buen funcionamiento y alargar la vida útil del conmutador electrónico.

PALABRAS CLAVE:

- **INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.**
- **INVERSOR CUASI-RESONANTE.**
- **BOBINA DE INDUCCIÓN.**
- **CONMUTADOR ELECTRÓNICO.**

ABSTRACT

The titling work presents the design and construction of a water heater electromagnetic induction based on the analysis of an efficient system of electromagnetic induction, for this research analysis and discernment of an induction cooker was made, in order to take advantage operating approaches developed in these teams, easy trade access. The proposed electronic design a power stage, a stage of feedback, a phase synchronization pulse and a step of protection switching element on temperature in the power stage a quasi-resonant inverter is used which allows switching contemplated high frequency resonance and generates required for the induction coil can generate the heat required for this application. In the case of the water heater electromagnetic induction coil is designed with a ferromagnetic material therein such that differs from the kitchens of conventional induction heater starts its stage resonance immediately. Control of the water heater by electromagnetic induction a microcontroller of microchip family, which controls the pulse width to produce the shot in the electronic switch, has a display showing fails, as it has over current protection, over voltage and over temperature, considered for good performance and extend the life of the IGBT.

KEYWORDS

- **ELECTROMAGNETIC INDUCCTION**
- **QUASI- RESONANT INVERTER**
- **INDUCTION COIL**
- **ELECTRONIC SWICHING**

PRESENTACIÓN

El presente proyecto se desarrolla de la siguiente manera.

En el capítulo 1, se presentan los principios fundamentales en los cuales se base el principio de calentamiento por inducción electromagnética, las propiedades y características del calentamiento por inducción electromagnéticas y los componentes de un sistema de inducción electromagnética, abordando la teoría necesaria para el proyecto.

En el capítulo 2, se presentan las características preliminares del calentador se desarrolla el diseño de los circuitos electrónicos de potencia y control, se seleccionan los sensores y actuadores que intervienen en el sistema de inducción y se diseña el algoritmo de control.

En el capítulo 3, se explica de manera detallada el diseño y construcción de la bobina de inducción electromagnética que se desarrolló en el proyecto, se presenta la construcción del sistema de calentamiento y los elementos utilizados, la implementación del circuito de potencia, desarrollo e implementación del circuito de disparo del IGBT, se explica el programa principal y las subrutinas que forman parte del sistema de control del calentador de inducción, se indica el montaje en la carcasa y se evidencia la integración de todos los sistemas.

En el capítulo 4, se muestran las pruebas y resultados obtenidos en cuanto al sistema electrónico que se separa en potencia y control; se presenta las formas de onda correspondientes a los puntos de prueba; se indica la tabla de propiedades de material escogidos para carcasa del equipo, se muestra el análisis de costos del presente proyecto.

En el capítulo 5, las conclusiones y recomendaciones para promover futuras investigaciones relacionadas con el tema.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Introducción.

En la actualidad ha sido motivo de estudio el calentamiento de agua, lo que ha permitido, en conjunto con el desarrollo de nuevas tecnologías; crear sistemas que presenten una mayor eficiencia en el calentamiento; algo muy importante que se debe discernir, es la aplicación para la cual el dispositivo de calentamiento va a ser diseñado, para este proyecto se analizará los sistemas de calentamiento de agua de uso doméstico.

Los objetivos específicos del presente proyecto de titulación consisten en:

- Diseñar el sistema de calentamiento de agua por inducción electromagnética.
- Diseñar el circuito electrónico de alimentación, potencia y resonancia para el sistema de calentamiento de agua por inducción electromagnética.
- Diseñar y seleccionar el algoritmo de control más adecuado para el sistema de calentamiento de agua por inducción electromagnética.
- Diseñar y seleccionar los materiales idóneos para la estructura del calentador electrónico de bajo consumo energético.
- Validar y verificar el funcionamiento de los diseños mecánico, electrónico y control.
- Construir el calentador electrónico de agua de bajo consumo energético.
- Realizar pruebas de consumo energético en el dispositivo desarrollado.

El alcance de la presente investigación es diseñar y construir un prototipo para el calentamiento de agua mediante técnicas de inducción electromagnética, su capacidad está delimitada por el consumo energético del prototipo en el que se basara el diseño electrónico; donde se justifica que según el plan nacional del buen vivir se deben plantear programas para el uso eficiente de la energía, deberían estar centrados fundamentalmente en los sectores industrial y residencial.

Con el énfasis actual en el cambio de la matriz energética en el Ecuador, se debe generar conciencia del ahorro energético con un consumo racional de la energía.

Como aporte al cambio de la matriz productiva el gobierno incrementa los aranceles en las importaciones dando lugar al desarrollo de tecnologías y productos que aporten al desarrollo del país.

Presentando un estudio previo, se va a realizar una investigación de los hogares que cuentan con sistemas de calentamiento de agua, de algún tipo con lo cual se puede determinar la cantidad de hogares que requiera un sistema de calentamiento de inducción electromagnética, dicho esto continuamos con datos obtenido del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC).

En el resumen metodológico y Principales resultados de la “Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los hogares urbanos y rurales” realizados en el año 2011-2012, en la tabla perteneciente al extracto, “Características de la vivienda y el hogar, página 19”, se menciona el uso de artefactos de calentamiento de agua, de uso doméstico, en donde se señala que la muestra de hogares tomada en el Ecuador el 6.8 % a nivel nacional usan un artefacto de calentamiento de agua de uso doméstico, este dato refuerza aún más la presente investigación ya que según datos oficiales se puede percibir la alta demanda de este tipo de artefactos.

Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, en la “Encuesta de Estratificación del Nivel Socioeconómico NSE 2011”, presentada en diciembre

del 2011, tomando una muestra de 9744 viviendas que corresponden a 812 sectores censales, distribuidas en los dominios Quito, Guayaquil, Cuenca, Machala y Ambato, tomando en cuenta las siguientes dimensiones (vivienda, educación, económica, bienes, tecnología y hábitos de consumo), de un global de 1000 puntos otorgados el porcentaje de dimensiones de estudio se dividen en: Dimensión Vivienda 24%, Dimensión Educación 17%, Dimensión Económica, 17%, Dimensión Bienes 16%, Dimensión Tecnológica 16%, Dimensión de Hábitos de consumo 10%.

Determinando las siguientes etiquetas según el puntaje como se muestran (Tabla1).

Tabla 1

Grupos socioeconómicos

| Grupos Socioeconómicos | Puntaje |
|-------------------------------|----------------------|
| A | De 845 a 1000 puntos |
| B | De 696 a 845 puntos |
| C+ | De 535 a 696 puntos |
| C- | De 316 a 535 puntos |
| D | De 0 a 316 puntos |

Fuente: INEC, estratos.

Para determinar el alcance del proyecto del trabajo de titulación se analizaron los estratos socioeconómicos en la dimensión, “Características de la vivienda”, en donde los hogares que cumplen en promedio con un cuarto de baño con ducha se muestran (Tabla 2).

Tabla 2**Porcentaje representado según estrato económico**

| NIVEL DE ESTRATO SOCIOECONÓMICO | PORCENTAJE QUE REPRESENTA |
|---------------------------------|---------------------------|
| C+ | 22,80% |
| C- | 49,30% |
| TOTAL | 72,10% |

Fuente: INEC, estratos.

Se determina que el alcance de la investigación va dirigida al 72.10 % de un total de 9744 tomadas como muestra, lo cual refuerza aún más la presente investigación.

Brevemente citando los sistemas de calentamiento de agua, entre los principales y más usados en el medio comercial se pueden distinguir los siguientes: sistemas de combustión, sistemas eléctricos, sistemas de energía solar y sistemas de inducción electromagnética, siendo el último el sistema de calentamiento de análisis en la presente investigación, se desea determinar su eficiencia tanto en consumo como en calentamiento.

Como una reseña se puede mencionar que los sistemas de calentamiento por inducción electromagnética han sido principalmente implementados en la industria para diferentes aplicaciones como por ejemplo: temple, revenido, braseado, curado, soldadura, recocido, forja, fusión, enderezado de materiales ferrosos principalmente y últimamente se los ha ido llevando paulatinamente a los hogares ya que una de las principales características es que usan energía limpia, es un método para suministrar el calor de manera rápida, constante, controlable y eficiente.

El proceso de calentamiento por inducción básicamente radica en utilizar las corrientes eléctricas inducidas en el material para producir calor; los últimos

avances de la tecnología del estado sólido han permitido simplificar el calentamiento por inducción, haciendo de este método de calentamiento muy rentable para aplicaciones que impliquen empalmes, tratamiento, calentamiento y prueba de materiales.

El proceso de calentamiento por inducción electromagnética está descrito como una corriente alterna que fluye a través de una bobina, de esta manera se genera el campo. La fuerza del campo depende de la frecuencia aplicada; el campo se concentra en el área contorneada por la bobina; mientras que su magnitud depende de la fuerza de la corriente y el número de espiras de la bobina.

1.2 Principio del calentamiento por inducción electromagnética.

El principio de calentamiento por inducción electromagnética se lo puede resumir como una aplicación directa y es el resultado de combinar leyes del electromagnetismo, de las cuales se puede nombrar a la Ley de Ampere, Ley de Faraday y el efecto Joule, que básicamente se encarga de estudiar el calentamiento que generan las corrientes de inducción, que se forman en el interior de un conductor cuando es introducido en un campo magnético variable.

Si hablamos de la Ley de Faraday, esta consiste en una corriente que circula por un conductor en forma de bobina (inductor), genera un campo magnético a sus alrededores (Figura 1). La fuerza de este campo magnético depende de la corriente aplicada al inductor y el número de espiras que este tenga.

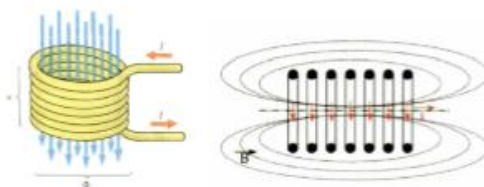


Figura 1 Campo magnético generado por un inductor

Fuente: (Grisales, 2010) Principios del calentamiento por inducción.

Obtener el calentamiento en un material conductor resulta de la existencia de un campo magnético de gran amplitud con variación en el tiempo, este campo debe ser estable ya que los picos de voltaje o corriente pueden ser muy altos y provocar daños en el elemento de conmutación encargado de generar la resonancia, una vez establecido este campo magnético se coloca el elemento a calentar, para aprovechar el efecto de disipación de potencia producido por las corrientes inducidas o también llamadas corrientes parásitas de Foucault.

En aplicaciones de calentamiento de inducción electromagnética, es muy importante tener un campo magnético estable, sin este control es muy difícil que se logre que el elemento de conmutación entre en resonancia, los dispositivos de conmutación no cuentan con protecciones propias sobrevoltaje, sobrecorriente y sobre temperatura, son parámetros que se deben contemplar en el diseño, tanto del circuito de potencia y control.

1.2.1 Corrientes parásitas o Foucault.

Las corrientes parásitas o Foucault se generan cuando un conductor atraviesa un campo magnético variable, el movimiento relativo causa una circulación de electrones o corrientes inducidas dentro del conductor. Estas corrientes inducidas crean electroimanes con campos magnéticos que se oponen al efecto del campo magnético aplicado de manera que mientras más fuerte sea el campo magnético aplicado o mayor la conductividad del conductor o mayor la velocidad relativa del movimiento, mayores serán las corrientes parásitas y los campos opositores generados, como se puede observar en la (Figura 2) la forma de los campos magnéticos en un núcleo ferromagnético.

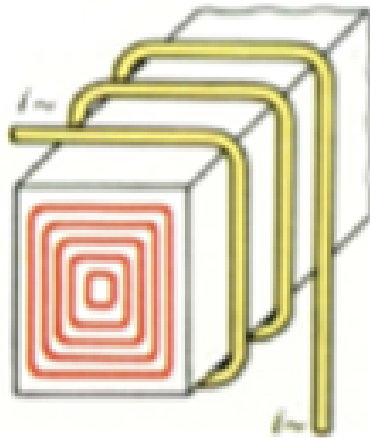


Figura 2 Forma de campos electromagnéticos

Fuente: (Grisales, 2010). Principios del calentamiento por inducción.

Las corrientes de Foucault son inducidas en cualquier objeto conductor de electricidad, por ejemplo una barra de metal, colocada dentro de la bobina.

El fenómeno de resistencia genera calor en el área donde fluyen las corrientes de Foucault. Si se incrementa la fuerza del campo magnético, también se incrementará el efecto de calentamiento. Sin embargo, el efecto total de calentamiento también está influenciado por las propiedades magnéticas del objeto y la distancia entre esta y la bobina.

Las corrientes de Foucault generan su propio campo magnético y se oponen al campo original producido por la bobina. Esta oposición impide que el campo original penetre inmediatamente hasta el centro del objeto rodeado por la bobina. Las corrientes de Foucault presentan mayor actividad cerca de la superficie del objeto calentando), pero se debilita considerablemente al avanzar hacia el centro del objeto, como se muestra en la (Figura 3).



Figura 3 Representación de corrientes de Foucault

Fuente: <http://www.efd-induction.com/~media/pdf/applications/applicationsesp.ashx>

1.2.2 La ley de Ampere

La ley de ampere nos dice que cuando circula una corriente i , por un elemento inductor de N espiras y longitud l , se induce en su interior, una intensidad de campo magnético H descrita por la siguiente ecuación. (Cuenca Alba, s.f.).

$$N_i = \oint \vec{H} d\vec{l} \cong Hl \quad \text{Ecuación 1}$$

i = Es la corriente que circula por el conductor.

N = es el número de espiras.

l = la longitud del circuito.

\vec{H} = el campo magnético.

Si en el interior de la bobina existe una pieza de material conductor que para propósitos de simplificación del modelo, se asume cilíndrica, de radio r , longitud l . resistividad ρ y permeabilidad magnética μ en esta se induce una

fuerza electromotriz (fem.) que se modela mediante la ecuación, donde ϕ es el flujo magnético que atraviesa. (Cuenca Alba, s.f.)

$$fem = -N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{Ecuación 2}$$

La fem (fuerza electro magnética) produce corrientes que son responsables del aumento de la temperatura de la pieza, debido a que existe una disipación de potencia, la cual desde luego, produce un aumento de la temperatura del material conductor que puede en algunos casos alcanzar los niveles adecuados para el calentamiento de agua. La ecuación que representa el efecto Joule, cuantifica la potencia instantánea disipada y está definida en la siguiente ecuación. (Cuenca Alba, s.f.)

$$p(t) = i_F^2 R_{eq} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

i_F = corrientes inducidas.

R_{eq} = resistencia equivalente.

1.2.3 La ley de Faraday

La ley de Faraday establece que si un flujo atraviesa una espira de alambre conductor, se inducirá en este un voltaje directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo con respecto al tiempo. (Chapman, 2012)

$$e_{ind} = - \frac{d\phi}{dt} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde e_{ind} es el voltaje inducido en la espira y ϕ es el flujo que atraviesa la espira. Si una bobina tiene N vueltas y el mismo flujo pasa a través de todas ellas, el voltaje inducido en toda la bobina está dado por. (Chapman, 2012)

$$e_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

e_{ind} = Voltaje inducido en la bobina.

N = Número de vueltas de alambre en la bobina.

ϕ = Flujo que circula en la bobina.

El signo negativo en la ecuación es una expresión de la Ley de Lenz, la cual establece que la dirección del voltaje inducido en la bobina es tal que si los extremos de esta estuvieran en cortocircuito, se produciría en ella una corriente que generaría un flujo opuesto al flujo inicial. Puesto que el voltaje inducido se opone al cambio que lo produce u origina, se incluye el signo menos en la ecuación. Dirección requerida de i . (Chapman, 2012)

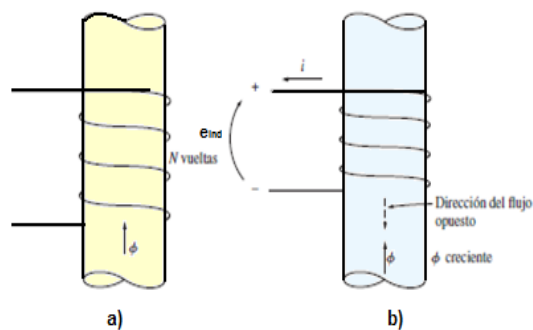


Figura 4 Significado de la ley de Lenz

Fuente: (Chapman, 2012) .Aplicaciones de calentamiento por inducción.

Como se muestra en la (Figura 4) apartado a) Una bobina encierra un flujo magnético creciente, mientras que en el apartado b) Determinación de la polaridad del voltaje resultante.

Como resultado de colocar un material de características ferro-magnéticas dentro de un campo magnético alterno se inducen a este, corrientes parasitas o de Foucault las mismas tienen una gran concentración en la superficie del material, al cual se está induciendo al campo magnético generado, estas

corrientes se neutralizan y generan una especie de ondas las mismas que producen calor debido al efecto joule.

1.2.4 El efecto Joule

Consiste en el efecto de calentamiento que se produce cuando una corriente atraviesa una resistencia. Dentro de este efecto, se incluye también el calentamiento producido por las corrientes de inducción, que se producen en el interior de un conductor cuando es introducido en un campo magnético variable.

“Perdidas por histéresis que se producen en el interior de sustancias ferromagnéticas, cuando son sometidas a un campo magnético variable, son proporcionales al volumen de materia introducido en el campo magnético.”
(Cuenca Alba, s.f.)

El calentamiento por inducción se puede explicar teóricamente mediante la aplicación de las leyes de Faraday y la ley de Ampere lo cual se obtiene como resultado el efecto joule, cabe destacar que para la aplicación del calentador de agua de inducción electromagnética, no es posible la simple aplicación de estas leyes que solo son un sustento teórico.

La tecnología de calentamiento por inducción electromagnético ha avanzado paulatinamente con la creación de dispositivos que generen alta frecuencia con la cual se puede generar un campo magnético considerable, de esta manera con la implementación de componentes electrónicos se puede generar una importante cantidad calórica que se puede usar en este tipo de aplicaciones.

1.2.5 Generación de calor mediante leyes de inducción electromagnética.

En primera instancia se presenta lo siguiente, si aplicamos una corriente a un conductor este genera un campo magnético la cual la distribución viene dada por la ley de ampere en donde la (Ecuación 1) presenta:

$$N_i = \oint \vec{H} d\vec{l} = HI$$

i = Es la corriente que circula por el conductor.

N = es el número de espiras.

l = la longitud del circuito.

\vec{H} = el campo magnético.

El campo magnético, produce magnetizaciones también de la misma manera genera des-magnetizaciones en el material que es sometido al campo, estos generan pérdidas y también se convierten en calor, por lo que las pérdidas son muy importante debido al este proceso.

La potencia que puede ser transmitida a la pieza debido al inductor viene dada por la ecuación:

$$I = \frac{V}{2\pi \cdot F \cdot L_b} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

F = frecuencia en Hz.

L_b = inductancia de la bobina en (H).

La corriente en la pieza que queremos calentar circulará en la corteza exterior calentándola según la ley de joule, como se puede observar en la (Figura 5), en donde se observa la penetración efectiva del calentamiento sometido a inducción electromagnética.

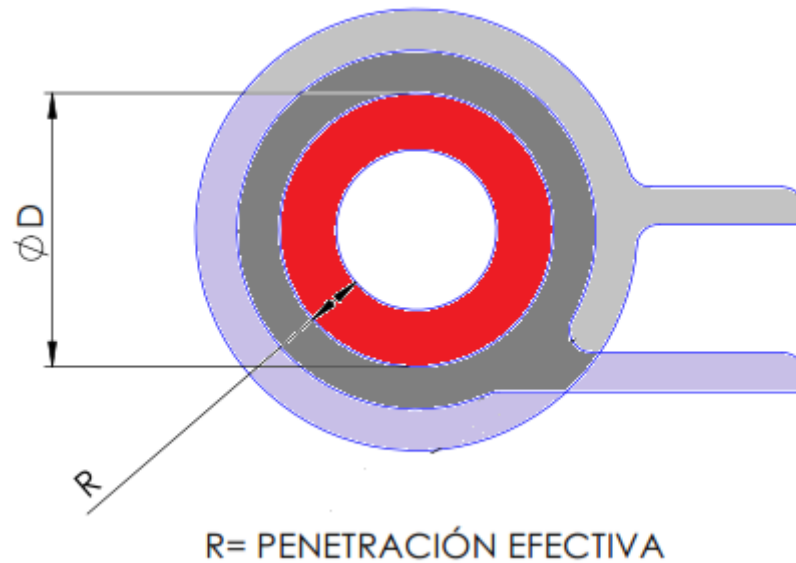


Figura 5 Pieza a calentar rodeada por la bobina

Fuente: (Grisales Garcia, 2010). Principios del calentamiento por inducción

La porción de material que se calentará directamente con un cierto nivel de potencia se denomina penetración efectiva, depende de la resistividad, de la permeabilidad magnética, del material a calentar, y de la frecuencia aplicada a cada instante siguiendo la ley:

$$R = 50.3 \sqrt{\frac{r}{\mu \cdot F}}$$

Ecuación 7

r = Resistividad en micro ohm.cm/cm².

F = Frecuencia.

μ = Permeabilidad.

En el caso de querer calentar una corteza más gruesa, se debe disminuir la frecuencia o dar más tiempo a que la energía se transmita por conducción térmica; el uso de transistores ha permitido que las oscilaciones en la frecuencias se encuentren en un rango de 60Hz hasta los 60MHz, se pueden

alcanzar temperaturas de miles de grados con una gran penetración en el cuerpo a calentar en intervalos cortos de tiempo con gran precisión.

En la aplicación desarrollada en el presente proyecto se usa una tubería de acero galvanizado, por lo que se tiene una corteza aproximadamente de 4 milímetros de espesor para de esta manera aprovechar la mayor cantidad de calor que en la tubería se genere para calentar el agua pasará por la tubería en el menor tiempo posible.

El rendimiento de este proceso se puede ver como una relación entre pieza-inductor, como concepto de la eficacia con que un inductor calentará una pieza, esta relación se ve favorecida por:

- a) Resistividad elevada de la pieza (aceros, grafitos, latones).
- b) Resistividad reducida del inductor (cobre).
- c) Ferromagnetismo del material a calentar (aceros).
- d) Buen acoplamiento geométrico entre pieza e inductor, el cual depende del factor K calculado del siguiente modo:

$$K = \left(\frac{d}{D}\right)^3 \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

d = es el valor del diámetro exterior de la pieza.

D = es el diámetro interior de la bobina.

K varía entre 0 y 1.

Entre más e aproxime el valor a 1 mayor será el rendimiento del proceso.

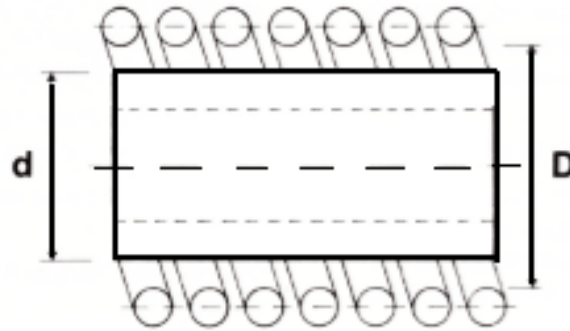


Figura 6 Representación del diámetro exterior de la pieza y diámetro interior de la bobina.

Fuente: (Grisales, 2010). Principios del calentamiento por inducción

- e) La temperatura, incrementa la resistividad y hace que por encima del punto de Curie (750 °C. en los aceros) el material que lo sea deja de ser magnético.

De este principio se puede analizar que el generador baja su rendimiento en el caso de que no se consiga una geometría pieza-inductor aceptable.

Para el prototipo del calentador de agua por inducción electromagnética el realizar el diseño y manufactura de la bobina es de gran importancia ya que conseguir un elemento que se adapte a la aplicación resulta de un proceso de investigación y constante pruebas de ensayo y error

Las ventajas que ofrece un proceso de calentamiento por inducción son varias, se puede citar las siguientes:

- Ausencia de contacto físico.
- Calentamiento con precisión en lugares requeridos.
- Rapidez y control.
- Fácil automatización del ciclo de trabajo.

Para la manufacturación de la bobina prototipo de calentamiento por inducción electromagnética se considera una distancia de separación mínima entre la tubería de acero galvanizado y la bobina, aprovechando las características fundamentales que este sistema de calentamiento ofrece.

1.3 Propiedades y características del calentamiento por inducción electromagnética.

Las propiedades y características del calentamiento por inducción electromagnética que se van a detallar a continuación en donde se desarrolla una serie de subtemas que permitan su mejor entendimiento.

1.3.1 Energía transferida:

La carga de una instalación de inducción es calentada debido al efecto Joule como resultado de las corrientes de Eddy Foucault inducida.

La fórmula para el cálculo de la potencia: $P = R \cdot I^2$ no puede usarse porque la distribución de las corrientes sobre el conductor no es uniforme, más bien es variable por lo cual se usa el siguiente cálculo que se encuentra simplificado.

Se presenta la siguiente ecuación:

$$P = \pi * d * h * H^2 * \sqrt{\pi * \rho * \mu_0 * \mu_r * f * C * F} \quad \text{Ecuación 9}$$

d = Diámetro del cilindro (m).

h =Altura del cilindro (m).

H =Intensidad del campo magnético(A/m).

ρ = resistividad ($\Omega \cdot m$).

μ_0 = Permeabilidad magnética de vacío ($4 \pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$).

μ_r = Permeabilidad relativa.

f = frecuencia (Hz).

C = Factor de acoplamiento.

F = factor de transmisión de potencia.

El factor de acoplamiento y factor de transmisión, en la fórmula funcionan como factores de corrección.

El factor de transmisión de potencia toma en cuenta la relación entre la profundidad de penetración y las dimensiones externas de la carga, la frecuencia depende de la geometría de la carga para el caso del calentador de agua de inducción electromagnética se considerará una carga cilíndrica.

El factor de acoplamiento es un corrector para las dimensiones relativas del inductor y la carga. La corrección es más pequeña si el inductor es más largo y el espacio entre el inductor y la carga es más pequeño.

Deduciendo de la fórmula se puede concretar que la potencia puede incrementarse debido a que es directamente proporcional a la intensidad del campo magnético (H). Esto significa incrementar el número de bobinado del inductor.

Las características del material son muy importantes se puede mencionar la resistividad y la permeabilidad relativa considerando materiales ferromagnéticos resulta muy adecuadas por que permiten máxima transferencia de potencia y altas temperaturas en la carga con pocas pérdidas en la fuente.

1.3.2 Eficiencia eléctrica.

La eficiencia eléctrica se define por la siguiente fórmula:

$$\eta_e = \frac{P}{P+P_i} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

P= potencia inducida en la carga.

P_i= potencia disipada en el inductor.

La eficiencia también puede ser afectada por la relación diámetro versus efecto penetración si se trata del caso de carga cilíndrica.

Finalmente, el diseño del inductor también tiene gran importancia donde se analizan los siguientes puntos:

- Para el inductor se usa materiales con pequeñas resistencias, usualmente el cobre.
- Usar un inductor con pequeñas distancias entre bobinados.
- Proporcionar una buena conexión entre el inductor y la carga.

En la manufacturación de la bobina de inducción en el presente proyecto se utiliza alambre de cobre esmaltado.

1.3.3 Factor de potencia.

Conjuntamente el inductor y la carga normalmente representan una potencia reactiva importante. Por un lado hay un espacio entre el inductor y la carga y por otro lado, la propia carga tiene un carácter inductivo, dependiendo de la relación d/δ (en caso de un cilindro). (Cushicóndor, 2009)

Este es un punto importante en la implementación del circuito, debe cumplir que la corriente se encuentre en fase con el voltaje para corregir el factor de potencia.

1.3.4 Consumo de energía.

Los sistemas de calentamiento inductivo tienen una buena eficiencia energética, por la razón de que calentamiento es localizado en la carga, por lo que puede generar grandes cantidades de calor, la eficiencia energética también depende de las características del material a calentar es por esto que una cantidad importante de las pérdidas de calor pueden ser recuperadas. (Cushicóndor, 2009)

1.3.5 Calidad

En este tema se habla de calidad en donde se puede conseguir al momento de que el sistema de inducción electromagnética se lo aplica en vacío también en atmosferas inertes es un principio ideal de la experimentación de Faraday.

Al ser un calentamiento localizado se lo puede aplicar en un lugar en específico, puede ser regulado mediante la implementación de un controlador.

1.3.6 Características del calentamiento inductivo

Para las aplicaciones del calentamiento por inducción, dos de las características más importantes que definen la eficacia térmica y eficacia energética del proceso, entiéndase por eficacia térmica en lograr un buen calentamiento al hablar que se trata de un calentamiento localizado y se puede

considerar un sistema que denota eficacia energética al tratarse de sistemas que son de bajo consumo energético.

El efecto piel que caracteriza la distribución de las corrientes inducidas en la pieza. La intensidad del campo magnético alterno que penetra en el material decrece rápidamente al aumentar su penetración y por lo tanto también las corrientes inducidas.

Los parámetros más importantes que intervienen en el proceso en el calentamiento por inducción son:

- La frecuencia de la corriente eléctrica.
- La naturaleza del material a calentar y su estado.
- La intensidad del campo magnético inductor.
- El acoplamiento entre el inductor y la pieza a calentar.
- El tipo de inductor y sus características geométricas
- La naturaleza del material conductor inductor. (Cushicóndor, 2009)

1.3.7 Efecto piel profundidad de penetración

Una característica de la corriente alterna es que se concentra en la parte externa del conductor, esto es debido a que la corriente principal en el interior del conductor genera un campo magnético variable, que produce unas corrientes de inducción que tienen el mismo sentido en la parte exterior y contrario en la inferior, como consecuencia de esto la corriente en el centro del conductor se anula y se refuerza en los bordes, el flujo neto de corriente solo se produce en la superficie del conductor. Esto es llamado efecto piel.

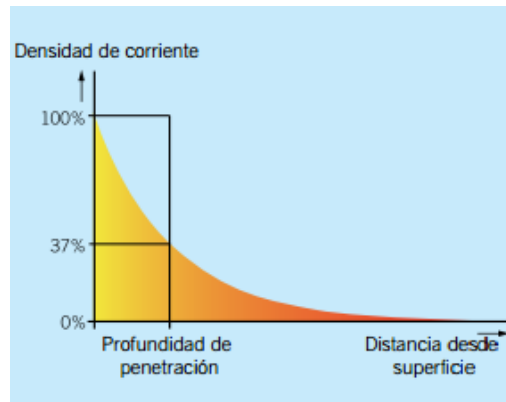


Figura 7 Profundidad de penetración

Fuente: (Grisales, 2010). Principios del calentamiento por inducción

Como se puede observar en la (Figura 7) la profundidad de penetración depende de la densidad de la corriente para la aplicación en el inductor frente a la distancia desde la superficie.

La profundidad de penetración se define según Esteve, V (1991) como:

La corriente de un conductor se concentra mayormente en su superficie, mientras más grande sea la frecuencia, es consecuencia del efecto de difusión del campo magnético y se puede decir que es la noción fundamental que rige el calentamiento por inducción.

La profundidad de penetración puede ser deducida de las ecuaciones de Maxwell.

Para una carga cilíndrica con un diámetro mucho mayor a la profundidad de penetración, la fórmula es la siguiente:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

ρ : Resistividad del material.

μ_0 : Permeabilidad magnética del vacío $4 \pi \times 10^{-7}$.

μ_r : Permeabilidad magnética relativa del material.

f: Frecuencia de trabajo.

Se puede determinar que la profundidad de penetración por un lado depende de las características del material (ρ , μ_0 , μ_r) y por otro lado también es afectada por la frecuencia. La dependencia de la frecuencia da una posibilidad para poder controlar la profundidad de penetración. La profundidad de penetración disminuye cuando la frecuencia aumenta o cuando la permeabilidad magnética del material es mayor, mientras que aumenta cuando lo hace la resistividad del cuerpo conductor a calentar.

Tabla 3

Magnitudes aproximadas de la profundidad de penetración.

| | Acero 20°C | Acero 20°C | Cobre 20°C | Cobre 900°C | Grafito 20°C |
|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| ρ [$\mu.m$] \rightarrow | 0,16 | 0,16 | 0,017 | 0,086 | 10 |
| u_r [.] \rightarrow | 40 | 100 | 1 | 1 | 1 |
| Frecuencia ↓ | δ[mm] | δ[mm] | δ[mm] | δ[mm] | δ[mm] |
| 50 Hz | 4,50 | 2,85 | 9,31 | 20,87 | 255,08 |
| 100 Hz | 3,18 | 2,01 | 6,58 | 14,76 | 159,15 |
| 1 KHz | 1,01 | 0,64 | 2,08 | 4,67 | 50,33 |
| 10 KHz | 0,32 | 0,20 | 0,66 | 1,48 | 15,92 |
| 100 KHz | 0,10 | 0,06 | 0,21 | 0,47 | 5,03 |
| 1 MHz | 0,03 | 0,02 | 0,07 | 0,15 | 1,59 |

Fuente: (Callebaut, 2007).Power quality & Utilization guide, Energy efficiency

Como se muestra en la (Tabla 3) para materiales no magnéticos como el cobre o el grafito la permeabilidad magnética relativa μ_r es aproximadamente igual a 1.

Para materiales ferromagnéticos como el acero y varios tipos de hierro tienen un valor de permeabilidad magnética relativa más alto que el de los no magnéticos, por lo que tienen una profundidad de penetración más pequeña.

En la (Figura 8) se puede observar la evolución de la profundidad de penetración en función de la frecuencia para algunos materiales.

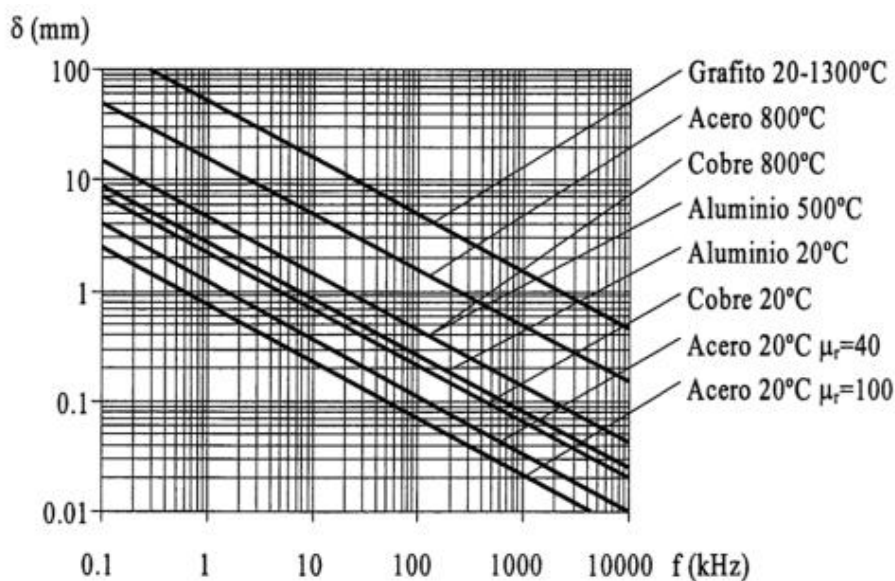


Figura 8 Curva de la profundidad de penetración en función de la frecuencia para diversos materiales

Fuente: (Gómez, 1991). Influencia de los Componentes Parásitos en el Análisis y Diseño de Inversores Resonantes Paralelo para aplicaciones de calentamiento por inducción

1.3.4 Resistencia equivalente

Para piezas con geometría cilíndrica la expresión puede escribirse así:

$$K_R = 1 - e^{-\frac{2r}{\delta}} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$R_{eq} = K_R N^2 \rho \frac{2\pi r}{\delta l} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde

N = número de espiras del inductor de calentamiento.

l = longitud

ρ = resistividad

R = radio de la pieza cilíndrica.

δ = profundidad de penetración.

Teniendo en cuenta que la potencia disipada, para un valor de corriente del inductor I determinada, va a ser directamente proporcional a Req de esta ecuación se pueden extraer las siguientes consecuencias: (Cushicóndor, 2009)

- Las bobinas con mayor número de espiras transfieren más energía.
- La energía disipada, aumentará cuando mayor sea la resistividad del material.

Así se explica que en materiales como el acero se disipe mayor energía a medida que aumente su temperatura (dentro de un rango limitado por la temperatura de Curie) porque también aumenta la resistividad.

La disminución de la profundidad de penetración hace aumentar la energía disipada, por eso para calentar materiales con una elevada conductividad, hay que aumentar la frecuencia con el objeto de disminuir la profundidad de penetración. También se puede observar una caída brusca de potencia disipada cuando se alcanza la temperatura de Curie, puesto que cae la permeabilidad magnética y por tanto aumenta la profundidad de penetración. (Cushicóndor, 2009)

1.3.5 Aplicaciones del calentamiento por inducción

Para fortalecer los conocimientos del tema se tomó como referencia a la empresa Induction, EDF que señalan lo siguiente:

a. Temple por inducción

El temple por inducción utiliza calor inducido y enfriamiento rápido (duchado) para aumentar la dureza y durabilidad del acero. La inducción es un proceso sin contacto que rápidamente genera un calor controlable, localizado e intenso. Con inducción solamente se calienta el área de la pieza a ser templada. La optimización de los parámetros de proceso tales como los ciclos de calentamiento, las frecuencias y el diseño del inductor, producen mejores resultados.

b. Revenido por inducción.

Es un proceso de calentamiento que optimiza las propiedades mecánicas como la resistencia y ductilidad de las piezas ya que han sido templadas.

Se utiliza ampliamente en la industria de automoción para revenir la superficie de elementos templados, tales como ejes barras y juntas.

c. Braseado por inducción.

Es un proceso para unir materiales utilizando un material de aportación (por lo general un anti-oxidante llamado fluxe) para unir dos piezas de metal sin

fundir los materiales de base. Este proceso hace que el calor inducido funda la aportación y que esta penetre en los materiales de base por capilaridad.

d. Curado por inducción.

El curado por inducción utiliza el calentamiento por inducción para curar adhesivos de encolado. La inducción es el principal método para el curado de adhesivos y sellado de componentes de automóvil como puertas, capots, guardabarros, espejos, retrovisor y magnetos. La inducción también cura los adhesivos en las uniones de fibras de carbono y de metal-composite. Existen dos tipos principales de curados para la automoción: curado por segmentos que calienta pequeños segmentos de los materiales a ser unidos curado completo, que calienta completamente las uniones.

e. Soldadura por inducción

Con la soldadura por inducción el calor es inducido electromagnéticamente en el tubo. La velocidad y la precisión de la soldadura por inducción lo hacen ideal para la soldadura el borde de tubos y tuberías. En este proceso, los tubos pasan a gran velocidad por el interior de una bobina de inducción. A su vez, sus bordes se calientan y entonces se aprietan juntos para formar un cordón de soldadura longitudinal. La soldadura por inducción es particularmente adecuada para grandes producciones. Los soldadores pueden también estar equipados con cabezas de contactos, convirtiendo los sistemas de soldadura de doble propósito.

f. Recocido por inducción.

Este proceso calienta metales que ya han sido sometidos a un importante proceso. El recocido por inducción reduce la dureza, mejora la ductilidad y alivia las tensiones internas. El recocido total es un proceso en donde se recuece la pieza completamente. Con el recocido del cordón de soldadura (más conocida como normalización del cordón de soldadura), se trata claramente la zona afectada por el calor producida en el proceso de soldadura.

g. Pre calentamiento por inducción.

El pre calentamiento por inducción es un proceso donde los materiales o las piezas son calentados por inducción como parte previa del proceso. Las razones para el pre calentamiento son varias. En la industria del cable y alambre, los núcleos de los cables son pre calentados antes de la extrusión del aislamiento.

Las bandas de acero son pre calentadas antes de su decapado y su recubrimiento de zinc. El pre calentamiento por inducción también alivia los metales antes de su plegado, y prepara tubos y tuberías antes de soldadura. Las soluciones de pre calentamiento móviles facilitan reparaciones in situ para el montaje y desmontaje de cojinetes.

h. Post calentamiento por inducción

El post-calentamiento por inducción se refiere a cualquier proceso donde la inducción se utiliza para calentar piezas o materiales que ya han sido sometidos

a un proceso anterior importante. Los componentes metálicos y las soldaduras, por ejemplo, a menudo deben post-calentarse para aliviar las tensiones internas causadas por un proceso anterior. El post calentamiento por inducción también se utiliza para calentar núcleos de cable después de su extrusión.

i. Forja por inducción

La forja por inducción utiliza la inducción para calentar piezas metálicas antes de que estas sean conformadas o deformadas en presas o martillos.

Tiene varias ventajas claves con respecto a la forja en horno. La velocidad y la facilidad de control de la inducción garantizan un alto rendimiento. La inducción también minimiza la oxidación y ayuda a mantener la integridad metalúrgica, ofrece un calentamiento localizado, preciso que produce un ahorro de energía. La consistencia y la repetividad de la inducción la hacen ideal para su integración en líneas de producción automatizadas.

j. Fusión por inducción

La fusión por inducción es un proceso donde un metal es fundido en el crisol de un horno. El metal fundido se vierte desde este crisol a un molde.

La fusión por inducción es extremadamente rápida, limpia y uniforme. Cuando se realiza correctamente, la fusión por inducción es tan limpia que permite omitir la fase de purificación necesaria con otros métodos. El calor uniforme inducido en el metal también contribuye a un resultado final de alta calidad. Los sistemas de fusión EFD Inducción tienen avanzadas características ergonómicas.

k. Enderezado por inducción.

El enderezado por inducción utiliza una bobina para generar un calor localizado en áreas de calentamiento pre-definidas. Al enfriarse estas áreas precalentadas se contraen y la chapa metálica tira hasta alcanzar una condición más plana.

Se usa para enderezar mamparos y cubiertas de buques, en la industria de la construcción se puede enderezar vigas, y es más utilizado en la fabricación y reparación de locomotoras.

l. Producción de plasma por inducción.

El plasma es un gas ionizado lo que significa que algunos o todos los electrones han sido despojados de átomos o moléculas y quedan libres para moverse. El calentamiento por inducción produce plasma por medio de un proceso llamado Plasma Acoplado Inductivamente.

El plasma acoplado inductivamente produce fibra óptica, purifica metales y semiconductores, y produce polvos metálicos, cerámicos, y nano polvos.

1.4 Componentes de un sistema de calentamiento por inducción electromagnética.

Basándose en la tesis elaborada por el Ing. Elías Cushicóndor y el Ing. Tito Saraúz es importante destacar partes referenciales entre estas:

Se presentan las características generales que el rectificador, el puente inversor y la carga resonante deben tener cuando hace parte del sistema de inducción.

Un sistema de calentamiento mediante la inducción electromagnética que utiliza una carga resonante serie está conformada al menos por las etapas que se muestran en la (Figura 9), una fuente de alimentación alterna que generalmente puede ser la red eléctrica un rectificador que cuenta con algún tipo de control que permite variar la magnitud de la tensión de salida un puente inversor monofásico que puede conmutar la tensión de salida del rectificador a una frecuencia próxima a la de resonancia de la carga RLC, constituida por la bobina de inducción, en donde existe un efecto disipativo que está estrechamente ligado con la muestra que se pretende calentar, en serie con un condensador.

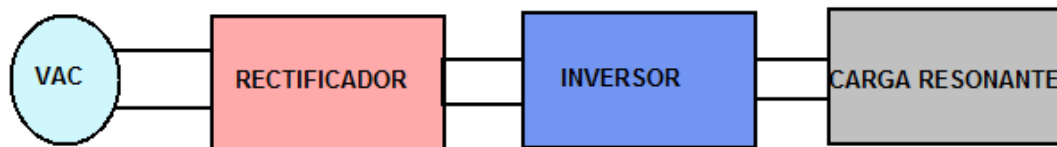


Figura 9 Diagrama de bloques componentes del circuito de potencia de un sistema de inducción electromagnética

1.4.1 Sistema de alimentación eléctrica.

Se encarga de suministrar la energía necesaria para todo el sistema, dependiendo de la potencia y el tipo de conversor, la fuente puede ser de corriente alterna con voltajes que pueden estar en un rango determinado de 110V o 220V o mayor voltaje para aplicaciones industriales y a una frecuencia fija de 50Hz o 60Hz de la redes de distribución.

1.4.2 Fuente de alimentación de la carga resonante

Para lograr el aumento de la temperatura de la muestra, se requiere la generación de una corriente de magnitud apreciable que debe circular por el solenoide para lograr así la inducción de las corrientes de Foucault que son las responsables de la disipación de potencia. Uno de los métodos más eficientes para alcanzar este fin es construir una carga resonante RLC serie o paralelo y excitar la nueva carga mediante una fuente de tensión alterna o de corriente alterna.

Teniendo como punto de partida una carga resonante RLC y la búsqueda de una alta eficiencia en el proceso, se puede utilizar un convertidor resonante para la generación de la corriente requerida.

Un convertidor resonante es básicamente un puente inversor, alimentado de una fuente de tensión continua o corriente continua que alimenta una carga la que generalmente presenta un tipo de resonancia LC. Una de las diferencias de principal importancia de este tipo de convertidor con un inversor clásico, consiste en que durante su operación busca que en todo momento que ocurra una conmutación de los interruptores, sea siempre bajo la condición de tensión o corriente cero. De esta manera las pérdidas por conmutación son reducidas y la frecuencia de operación de los dispositivos puede resultar más alta.

Etapa de rectificación: esta etapa se encarga de convertir la corriente alterna (AC) de la fuente de energía eléctrica en corriente continua (DC) mediante un arreglo de diodos.

Inversor de alta frecuencia: esta etapa convierte las corrientes a frecuencia de la red eléctrica en corrientes a una frecuencia deseada destinada a la alimentación del inductor de calentamiento o bobina de trabajo.

Existe una estrecha relación entre la frecuencia de operación de la corriente que genera el campo y la profundidad de penetración sobre la pieza o material. La corriente inducida que fluye sobre la pieza es más intensa en la superficie, y decae rápidamente bajo la superficie. Por ello el exterior se calienta más rápido que el interior, el 80% del calor producido en la pieza se concentra en la parte exterior.

Cuanto mayor es la frecuencia de operación, menor es la profundidad de penetración, es decir, más superficial es el efecto.

1.4.3 Bobina de inducción.

Es la responsable directa de la generación de campos magnéticos en las proximidades del material a calentar. La concepción geométrica del inductor está en función de la aplicación del calentamiento y su diseño, en ciertos casos es de gran dificultad, en la mayoría de aplicaciones se utiliza tubos huecos para construir la bobina.

Sistema de refrigeración: el inductor y demás componentes (condensadores, bobina, elementos de potencia, etc.) necesitan disipar grandes potencias. El elemento refrigerante utilizado en la mayoría de las aplicaciones suele ser agua aunque hay aplicaciones en las que basta utilizar ventiladores.

Sistema de control: se encarga de generar los pulsos de disparo del conmutador electrónico, también monitorea constantemente los parámetros (potencia, temperaturas, tiempos de calentamiento, etc.) del sistema de calentamiento por inducción y de esta manera poder tomar acciones que permitan el óptimo desempeño de dicho sistema.

Carga o elemento a calentar. Los materiales magnéticos, particularmente los ferromagnéticos, se calientan más fácilmente que los no-ferromagnéticos, debido al calentamiento adicional por el efecto de histéresis.

Otro aspecto a tener en cuenta en relación a la pieza a calentar es la distancia entre el inductor que genera los campos magnéticos y el material a calentar, cuanta más pequeña sea la distancia mayor será la corriente inducida sobre dicho material a calentar y por esta razón la cantidad de calor es mayor.

Un equipo de calentamiento por inducción se compone generalmente por:

- a) Fuente de potencia, recibe la corriente alterna que alimenta al convertidor de frecuencia el cual permite la generación del campo magnético en el espiral. La potencia de la fuente determinará la velocidad relativa con que se calentará la pieza, y actúan con potencias desde 5 -15 KW hasta los mayores de 50 a 250 KW, todos requieren de enfriamiento durante el proceso.
- b) La estación de calentamiento: se encarga de ajustar la frecuencia o el voltaje de operación a la aplicación y el material que se usará, posee sistemas de enfriamiento.
- c) Bobina inductora, se fabrican generalmente con tubos de cobre que se enfrían con agua, su tamaño y forma depende del proceso, del material y de la pieza a calentar.
- d) Los materiales magnéticos, en especial los ferromagnéticos ofrecen un calentamiento más veloz que los diamagnéticos, el tipo de material a usar también depende del trabajo que se desee ya que cada material ofrece una permeabilidad magnética distinta lo que implica un mayor o menor tiempo de calentamiento.

1.4.4 Convertidor resonante serie

En un convertidor resonante serie, como su nombre lo indica, la carga está formada por la combinación serie de al menos una inductancia, una resistencia y una capacitancia. La conversión de tensión continua a tensión alterna se

realiza por medio de un puente inversor monofásico, en el esquema más simple, en el cual, durante la operación a frecuencias próximas a la frecuencia de resonancia de la carga, se presentan tensiones y corrientes senoidales. Bajo estas condiciones de operación, existen instantes de tiempo durante los cuales las tensiones que soportan los interruptores y las corrientes que circulan por estos son despreciables, permitiendo el encendido o el apagado bajo condiciones favorables que reducen las pérdidas.

1.4.5 Rectificadores controlados

La rectificación controlada permite la conversión de corriente alterna en corriente continua además de la variación del nivel de la tensión de salida. La utilización de un convertidor monofásico o uno trifásico, tradicionalmente lo determina el nivel de potencia con el cual se esté trabajando.

Para aplicaciones que se desee superar los 15 KW, se recomienda la utilización del rectificador trifásico, mientras que para potencias más reducidas, justificando en el proyecto destinado a ser de bajo consumo es recomendado utilizar una rectificación monofásica.

En la actualidad es posible implementar los interruptores que forman el rectificador con diversos dispositivos, sin embargo teniendo en cuenta las características que presentan los nuevos IGBT respecto a su velocidad de conmutación y reducidas pérdidas, los hacen especialmente atractivos en este tipo de aplicaciones cuando además de realizar la rectificación también se busca controlar el factor de potencia.

1.4.6 Convertidor resonante

Un convertidor resonante serie está formado por un puente inversor que se alimenta de una fuente de tensión que le entrega potencia a una carga resonante formada por al menos la conexión en serie de una inductancia, una resistencia y una capacitancia. Dado que la frecuencia de conmutación es próxima a la frecuencia de resonancia de la carga, la corriente que circula por la carga es del tipo senoidal.

1.4.7 Carga resonante

La carga resonante básicamente está conformada por una capacitancia en serie con una inductancia. Dado que ambos elementos se encuentran conectados en serie, el condensador debe poseer las características adecuadas para conducir la corriente que se requiere hacer circular por la inductancia para que se desarrolle la intensidad de campo magnético requerida. Por otra parte la inductancia debe contar con un sistema de enfriamiento adecuado para lograr extraer el exceso de calor que recibe por conducción y radiación proveniente de la muestra que se está calentando, la cual debe estar contenida en un recipiente que ofrezca un aislamiento térmico adecuado.

1.4.8 Capacitancia

Generalmente los condensadores que manejan un nivel de potencia importante están especificados por el valor de la capacitancia, la tensión de ruptura del dieléctrico y dv/dt . En el mercado mundial la oferta de condensadores de potencia considerable para un rango de 5 a 15 KW, sin embargo condensadores que puedan operar a frecuencias superiores a los 60Hz y que soporten corrientes por encima de los 100 Amperios pico es reducida.

1.4.9 Inductancia

La construcción de la inductancia requiere de la fabricación de las espiras en un material conductor que de alguna manera facilite la implementación del sistema de enfriamiento adecuado. El material generalmente utilizado en los equipos comerciales es la tubería de cobre de los sistemas de refrigeración que es de fácil consecución en el mercado local. El aislamiento eléctrico se puede lograr mediante la utilización de recubrimientos a base de poliuretanos que son utilizados en la industria automotriz, presentan una resistencia a las altas temperaturas.

El aislamiento térmico se puede obtener de la construcción de un encamisado de material cerámico, del mismo tipo que se emplea en las resistencias de calentamiento utilizadas en la industria. Desde el punto de vista eléctrico, los valores de la inductancia y la resistencia equivalente se pueden obtener de las ecuaciones antes revisadas.

1.4.10 Circuitos de potencia.

Un circuito de Potencia está compuesto de semiconductores de potencia y elementos pasivos, que se liga la fuente primaria de alimentación con la carga.

En este circuito no se utilizan resistencias debido a su elevada disipación de potencia en forma de calor.

En la (Figura 10) se muestra el diagrama de bloques para un inversor resonante tomando en cuenta los siguientes factores que intervienen en donde se destaca el circuito de potencia, el circuito de disparo y el circuito de control.

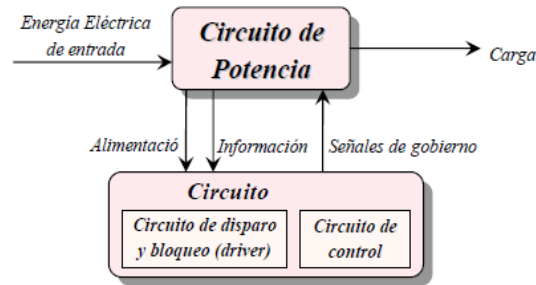


Figura 10 Diagrama de bloques de un inversor resonante

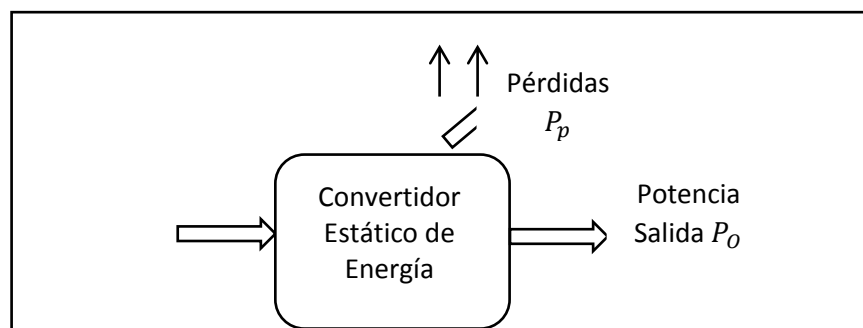
Fuente: (Atigas & Sanz). Introducción a las etapas de potencia

Los sistemas que procesan la energía suelen denominarse convertidores estáticos de energía o simplemente convertidores de energía. El adjetivo "estáticos" se debe a que se trata de circuitos que utilizan semiconductores y no máquinas eléctricas para realizar la conversión, dado que en los primeros años de la electrónica de potencia la conversión de energía se realizaba por convertidores electromecánicos y esencialmente por máquinas giratorias. Hoy en día, estas técnicas no son más utilizadas ya que con el surgimiento de los convertidores estáticos se obtiene un desempeño más adecuado en todos los sentidos.

Por tanto, se puede decir que un convertidor estático de energía es un circuito electrónico constituido por un conjunto de elementos estáticos formando una red que constituye un equipo de conexión y transmisión entre un generador y un receptor.

Un convertidor estático de potencia ideal permite la transferencia de energía eléctrica del generador al receptor con un rendimiento unitario (sin pérdidas).

La (Figura 11) muestra el diagrama de bloques de un convertidor estático de energía aprovechando una potencia de entrada (P_i) para alimentar una carga que absorbe una potencia de salida P_o .



Potencia
Entrada
 P_I

Figura 11 Diagrama de un convertidor estático de energía

Fuente: (Atigas & Sanz). Introducción a las etapas de potencia

Puesto que no es ideal, como es de esperar, se producen unas pérdidas PP, aunque uno de los objetivos de cualquier convertidor de potencia - básicamente por razones energéticas, económicas y ecológicas - es transformar la energía con el mayor rendimiento (η) posible. Para ello, los dispositivos empleados trabajarán como interruptores en conmutación (cerrados y abiertos) y se utilizarán bobinas y condensadores como elementos auxiliares. Excepto en aplicaciones muy específicas se evita el empleo de resistencias y de dispositivos trabajando en la zona lineal.

Por tanto, se puede decir que los elementos que constituyen los convertidores estáticos de potencia son fundamentalmente de dos tipos:

Interruptores estáticos: Son elementos semiconductores de potencia que actúan como interruptores y son llamados de elementos no lineales.

Elementos reactivos: Son condensadores, inductores y transformadores responsables por el almacenamiento y aislamiento (en el caso de los transformadores) de la energía y filtrado de las tensiones y corrientes. También son los principales responsables por el peso, volumen y coste de los equipos.

Los tipos de conversión estudiados en ésta área son: corriente alterna, CA para corriente continua, CC (fija o variable), CC para CA (con tensión y frecuencia variable), CC (fija) para CC (variable) y CA (frecuencia fija) para CA (frecuencia variable).

Cuando en funcionamiento, el convertidor estático de potencia conecta, por intermedio de sus interruptores, las mallas del sistema eléctrico (generador o receptor) permitiendo un flujo controlado de energía entre esos sistemas.

En función de las formas de energía de la entrada y de la salida de un convertidor, podemos clasificarlos como:

- a) Rectificador no controlado: Transforma la corriente alterna de tensión constante en corriente continua de tensión constante. Formado por diodos, constituye montajes irreversibles.
- b) Rectificador controlado: Transforma la corriente alterna de tensión constante en corriente continua de tensión variable. Formado por tiristores. El montaje puede ser reversible, denominándose inversor no autónomo.
- c) Reguladores de AC: Transforman la corriente alterna de tensión constante en corriente alterna de tensión variable y de la misma frecuencia.
- d) Cicloconvertidores: Reguladores de alterna o convertidores directos alterna/alterna de distinta frecuencia.
- e) Ondulador autónomo o inversor: Transforman una corriente continua en corriente alterna de frecuencia fija o variable.
- f) Convertidor CC/CC o Troceador: transforma corriente continua de tensión constante en corriente continua de tensión variable.

Estos convertidores son denominados convertidores directos de energía, pues utilizan una única etapa de potencia para la conversión. Cuando se emplea más de una etapa de potencia para realizar una conversión, entonces se habla de convertidores indirectos de energía, como es el caso de los convertidores indirectos de tensión y frecuencia. La (Figura 12) muestra los diferentes tipos de convertidores de acuerdo a su clasificación.

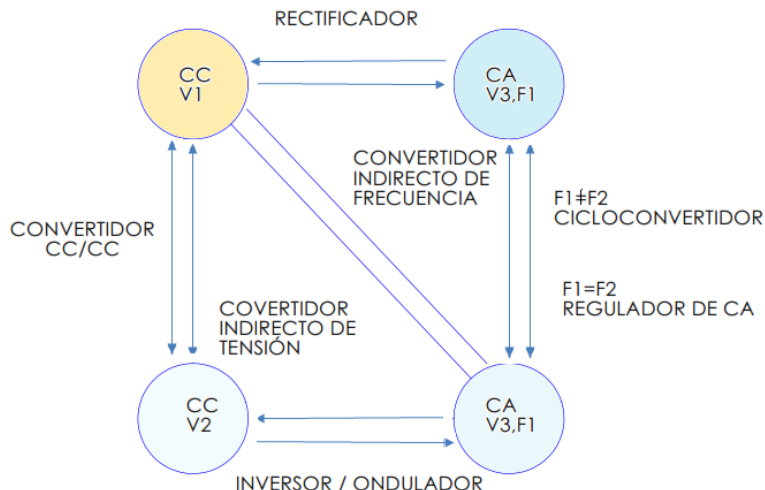


Figura 12 Tipos de convertidores estáticos de energía

Fuente: (Atigas & Sanz). Introducción a las etapas de potencia

1.5 Circuitos de disparo de tiristores

En un artículo desarrollado por García, Manolo se encontró información relevante para la presente investigación presentada a continuación:

El circuito de disparo o excitación de compuerta de los tiristores, es una parte integral del convertidor de potencia. La salida de un convertidor, que depende de la forma en que el circuito de disparo excita a los dispositivos de conmutación (tiristores), es una función directa del proceso de cómo se desarrolla la conmutación.

Podemos decir entonces que los circuitos de disparo, son elementos claves para obtener la salida deseada y cumplir con los objetivos del “sistema de control”, de cualquier convertidor de energía eléctrica. El diseño de un circuito excitador, requiere el conocimiento de las características eléctricas de compuerta del tiristor específico, que se va a utilizar en el circuito principal de conmutación. Para convertidores, donde los requisitos del control no son exigentes, puede resultar conveniente diseñarlo con circuitos discretos. En aquellos convertidores donde se necesita la activación de compuerta con control de avance, alta velocidad, alta eficiencia y que además sean compactos,

los circuitos integrados para activación de compuerta que se disponen comercialmente, son más convenientes.

Las partes componentes de un circuito de disparo para tiristores usados en los rectificadores controlados por fase, a frecuencia industrial, son los siguientes: El circuito sincronizador, el circuito base de tiempo para retrasar el disparo, el circuito conformador del pulso, el circuito amplificador del pulso (opcional), el circuito aislador y finalmente el circuito de protección de la compuerta del tiristor. El diagrama en bloques siguiente, nos da una idea general, de la inter relación de estos componentes:

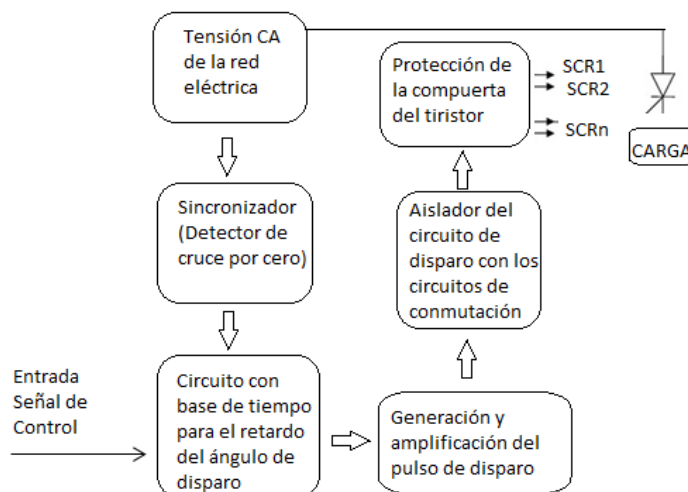


Figura 13 Diagrama de bloques circuito de disparo de tiristores

Fuente: (Garcia, 2015). Circuitos de disparo de tiristores para rectificadores controlados

1.5.1 Circuito sincronizador

Este circuito, se encarga de iniciar la base de tiempo en sincronismo con la frecuencia de red, de manera tal de retrasar el mismo ángulo respecto al cruce por cero de la tensión de red, el pulso de disparo, en todos los hemisiclos.

1.5.2 Entrada señal de control

Esta señal es la que determina el retraso del ángulo de disparo, señal generada en forma manual o a través de un sistema realimentado. Para este último caso, la señal se genera por la interacción de la señal de referencia, la señal realimentada y el algoritmo de control (proporcional, proporcional + integrador).

1.5.3 Circuito base de tiempo

En los circuitos analógicos, la base de tiempo se genera por medio de un circuito tipo RC, o sea a través de la carga de un condensador, con una constante de tiempo $\tau=CR$, hasta una tensión que genera un pulso de disparo. En los sistemas programables, la base de tiempo se genera por programación o por medio de un temporizador interno que se carga también por programación.

1.5.4 Generación de los pulsos de disparo

Para la generación de los pulsos, se disponen de muchas variantes de circuitos, con aplicación de transistores bipolares o mediante semiconductores específicos, que generan, cortos pulsos de disparo.

1.5.5 Circuito de aislamiento entre el generador de pulsos y el circuito convertidor

Fundamentalmente se utilizan dos técnicas. Una es la de utilizar un transformador aislador de pulsos y la otra un dispositivo semiconductor foto controlado de silicio, también llamado opto acoplador. Otra técnica utilizada es a

través de las fibras ópticas con emisor en el circuito de disparo y receptor en el circuito de compuerta.

1.5.6 Protección de la compuerta

Se utilizan circuitos de protección contra disparos por tensiones espurias.

1.5.7 Semiconductores que generan pulsos de disparo

Existe una gran variedad de dispositivos semiconductores que pueden utilizarse para generar pulsos de disparo. Entre ellos tenemos aquellos que actúan como transistores y otros lo hacen como tiristores. Se los utiliza para generar pulsos de disparo en circuitos de relajación (osciladores) o como disparadores por nivel de tensión.

Transistores disparadores:

UJT: Transistor unijuntura.

CUJT: Transistor unijuntura complementario

DIAC: Disparador bidireccional tipo npn.

Tiristores disparadores:

PUT: Transistor unijuntura programable.

LAPUT: Transistor unijuntura programable activado por luz.

DIODO SCHOCKLEY: Diodo tiristor.

SUS: Conmutador unilateral de silicio

DIAC: Diodo tiristor bidireccional

SBS: Conmutador bilateral de silicio.

ST4: Disparador asimétrico de GE.

Lámpara de Neón (poca aplicación o muy limitadas).

1.6 Circuitos de apagado de tiristores

En el documento Electrónica de potencia se trata de los Tiristores circuitos de apagado en el cual el autor Nachez, A. indica que:

Un tiristor es un dispositivo semicontrolado. Si el mismo se encuentra sometido a una tensión ánodo cátodo positiva, éste permanece en la condición de corte bloqueando la tensión aplicada hasta que se lo lleve a conducción. Conducción que es producida por la aplicación de una señal eléctrica adecuada a su terminal de disparo denominado terminal de compuerta o de "gate". Una vez en el estado de conducción, el terminal de compuerta pierde sus posibilidades de control, (exceptuando a los GTO), pudiendo el tiristor retornar a la condición de corte, solo si la corriente ánodo cátodo decrece por debajo del nivel fijado por la corriente de mantenimiento I_H .

El procedimiento de apagado de un tiristor consiste en permitir que el tiristor recupere su capacidad de bloqueo de tensiones directas mediante técnicas que aseguren que su corriente decrezca por debajo de I_H .

Estas técnicas pueden aprovechar el funcionamiento normal del circuito de aplicación o bien utilizar circuitos resonantes LC o RLC subamortiguados, para forzar la corriente del tiristor a cero, cortando en consecuencia al dispositivo. El estudio de las distintas técnicas de conmutación permite analizar las formas de onda de tensión y corriente presentes en cada una de ellas. En general podemos dividir estas técnicas en dos grandes grupos:

- De conmutación natural
- De conmutación forzada

1.6.1 Conmutación natural.

Si la tensión de alimentación es del tipo de corriente alterna, la corriente en el tiristor pasará naturalmente por cero en un momento de su operación, y una tensión inversa será aplicada entre sus terminales de ánodo y cátodo. El tiristor es en consecuencia apagado por la operación normal del circuito.

En este tipo de circuitos el tiristor es disparado en cada semiciclo positivo para controlar la entrega de energía a la carga. El control de potencia podrá ser realizado por control de fase, disparando al tiristor en todos los semiciclos positivos y modificando el ángulo de disparo, o bien actuando sobre el número de semiciclos positivos en los cual el tiristor es disparado y realizando siempre su disparo al inicio de cada semiciclo con ángulo de disparo cero. Los circuitos alimentados con tensión alterna son el ejemplo típico de conmutación natural, pero existe otros circuitos, donde la naturaleza oscilante de la carga hace que la corriente pueda anularse, aún con alimentación de corriente continua.

1.6.2 Conmutación forzada.

En algunas aplicaciones con tiristores, la tensión de alimentación es continua por lo que la corriente ánodo cátodo del tiristor debe ser forzada a cero para su apagado. En operación a muy baja frecuencia podría recurrirse a llaves mecánicas, pero éstas además de su bajo rendimiento presentan el inconveniente adicional de someter al SCR a elevados valores de dv/dt al cerrar la llave de la (Figura 14) en el circuito (a) y al abrirla en el circuito (b). (Nachez)

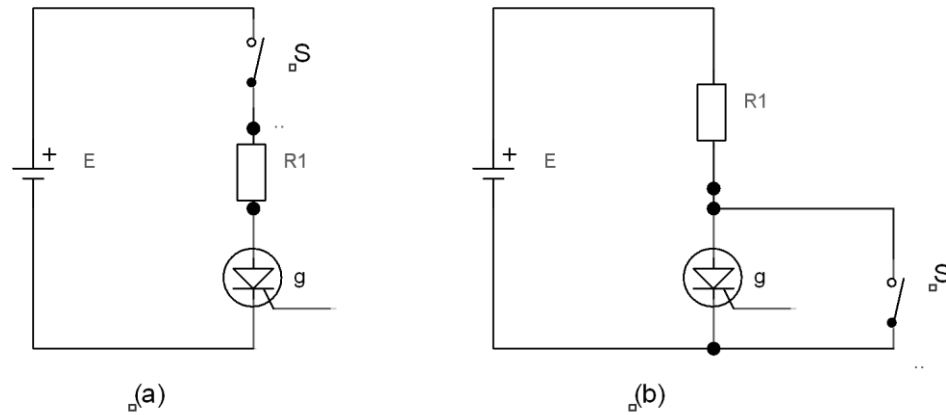


Figura 14 Formas de operación comutación forzada

Fuente: (Nachez).Electrónica de potencia de Tiristores en circuitos de apagado

Es en consecuencia de uso corriente incluir un circuito adicional que fuerce la conmutación del tiristor del estado de conducción al de corte.

1.6.3 Métodos de apagado, clasificación.

Distintos métodos de apagado se utilizan en distintos circuitos del tipo “Convertidores” e “Inversores” tales como.

Rectificadores AC – DC.

Inversores DC – AC.

Convertidores AC – AC.

Convertidor DC – DC.

Ciclo inversores Combinación de Inversor y Ciclo convertidor.

Chopper DC – DC o DC – AC por conmutación de la corriente de carga.

Los distintos métodos de conmutación suelen ser clasificados en seis categorías, correspondiendo el primero y el último de los seis tipos, a conmutación natural y a conmutación forzada los restantes: (Nachez)

Clase A

Auto conmutado por carga resonante.

La carga forma parte del circuito resonante RLC.

Clase B

Auto conmutado por medio de circuito resonante LC adicional.

La carga no forma parte del circuito resonante.

Clase C

Conmutado por medio de C o LC, transfiriendo la carga a otro SCR.

Transfiere la corriente de carga.

Clase D

Conmutación por medio de C o LC utilizando un SCR auxiliar

Sin transferir la corriente de carga

Clase E

Conmutado mediante una fuente de pulsos externa

Clase F

Conmutado por la corriente alterna de alimentación

1.7 Eficiencia energética

Una mejora en la eficiencia de utilización de los recursos energéticos se logra cuando se obtiene de forma costo – efectiva el mismo producto o servicio utilizando una menor cantidad de energía. El concepto de eficiencia energética involucra que el costo de evitar una unidad energética es menor o igual que el costo de generar o producir la unidad de energía evitada. (Ministerio de industria energía y minería, 2014)

Es decir, el uso eficiente de la energía es evitar el consumo de aquella energía que no aporta mejor confort o no contribuye a lograr una mayor producción. Por lo tanto el uso eficiente de la energía no reduce la producción ni afecta el confort, siendo esa la principal diferencia entre la eficiencia energética y el ahorro de energía.

En condiciones de crisis de abastecimiento de energía puede ser necesario recurrir a medidas de ahorro de energía las cuales pueden llegar a afectar los niveles de confort de la sociedad en su conjunto y la producción del país, por ese motivo siempre es importante implementar medidas de largo plazo destinadas a una mejora en la eficiencia en la utilización de los recursos energéticos. (Ministerio de industria energía y minería, 2014)

Evolucionando al concepto de Eficiencia Energética

En los 70's se desarrolló una visión tecnológica, destinada al Uso Racional de la Energía (URE), el URE consiste en utilizar tecnologías y/o prácticas más eficientes en el uso de la energía que se traduzcan en un menor consumo energético.

En los 90's se amplía el concepto de URE incorporándole una visión económica, afianzándose el concepto de Uso Eficiente de la Energía. Una mejora en eficiencia se logra cuando se obtiene de forma costo – efectiva el mismo producto o servicio utilizando una menor cantidad de energía. (Ministerio de industria energía y minería, 2014)

CAPÍTULO II

DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO AGUA POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

2.1 Características preliminares.

Debido al inminente cambio de la matriz energética del país se ve la necesidad de investigar formas de calentamiento que sean eficientes y de bajo consumo.

El costo de energía asociado con el uso de estos equipos aumenta la demanda de energía de la red eléctrica por tal motivo se busca maximizar la potencia consumida mediante calentadores de agua instantáneos de inducción debido a que son los más eficientes la presente investigación se busca empezar el diseño con baja potencia de entrada para reducir el consumo de energía eléctrica del calentador, tomándose en cuenta que se trata de un prototipo, el mismo que tiene como objetivo iniciar más investigaciones relacionadas al tema en el país.

A diferencia de un calentador eléctrico, que presenta pérdidas de energía, presentan un consumo de corriente elevado en un rango de 20 a 40 A, el calentador de inducción utiliza la energía térmica producida por ondas electromagnéticas, de este modo el calentamiento se produce solamente en el material ferro magnético aumentando la eficiencia en el consumo, a las cuales se debe añadir elementos que permitan la conservación de energía calórica para obtener el prototipo deseado.

La (Figura 15) muestra una topología de un solo extremo utilizado para calentamiento por inducción. La energía magnética se genera y transfiere a una superficie ferro-magnética utilizando el principio de la inducción electromagnética y se transforma en energía térmica en la superficie a calentar.

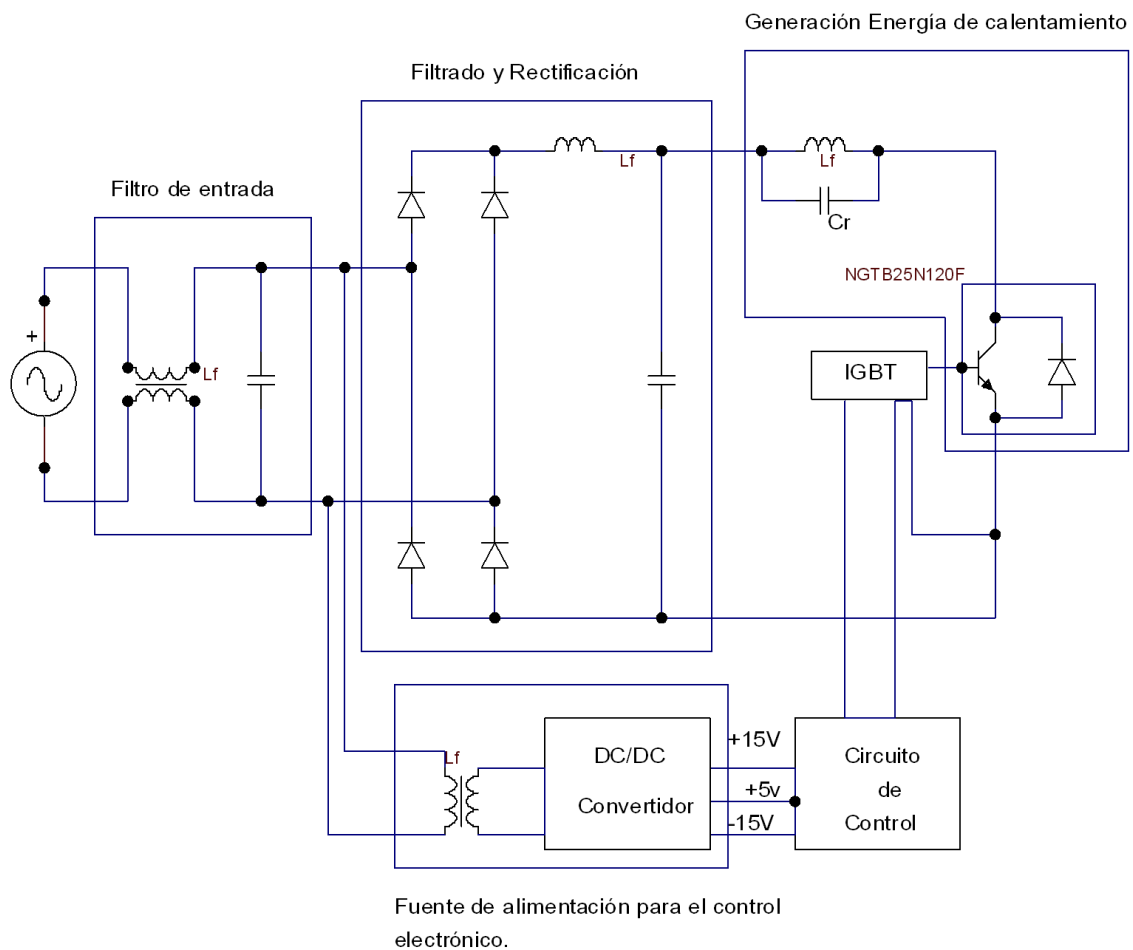


Figura 15 Diagrama de bloques de un Calentador de inducción

Fuente: (Onsemi) IGBT power losses in heating induction applications

Esta topología se conforma de un conversor AC/DC (Rectificador de voltaje) mediante un puente diodos. El bus DC es conectado a un inversor resonante de alta frecuencia, aproximadamente 20KHz a 35KHz produciendo un flujo magnético de alta frecuencia.

La superficie ferro magnética actúa como un núcleo magnético con pérdida que convierte el campo magnético en calor.

Los elementos que permiten generar y transferir esta energía de calor son la superficie ferro magnética, un inductor, un condensador (tanque resonante) y el IGBT.

El Inversor resonante de un solo extremo corresponde a un inversor de clase "E" utilizado en aplicaciones de Calentamiento Inductivo debido a su estructura de menor costo y relativamente alta eficiencia.

Los modos de operación básica y las formas de onda teóricos se ilustran en la (Figura 16), el rectificador, la bobina de choque y el condensador de entrada (C_{in}) componen un filtro pasa bajo (LPF).

La bobina de trabajo se puede considerar como el equivalente de una conexión en serie de la bobina (L_r) y la resistencia (R_{eq}) que compone el tanque resonante con el condensador (C_r).

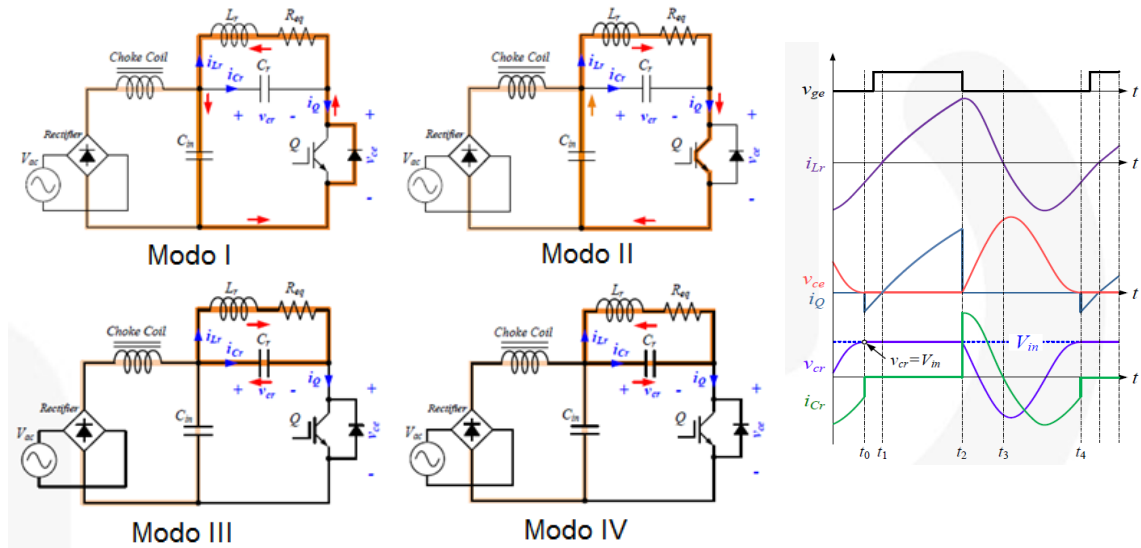


Figura 16 Modos de operación básica del inversor resonante y formas de onda

Fuente: Fairchild's Second-Generation, Field-Stop, Shorted-Anode, Trench IGBTs for Induction Heating Applications.

El funcionamiento del inversor se divide en 4 modos:

1. t_0 a t_1 :

La corriente resonante fluye a través del diodo anti-paralelo, como se muestra en la (Figura 17) por tanto, la tensión colector-emisor (V_{ce}) del IGBT se convierte en cero. El IGBT debe ser activado dentro de este modo para conseguir la conmutación de tensión cero (ZVS).

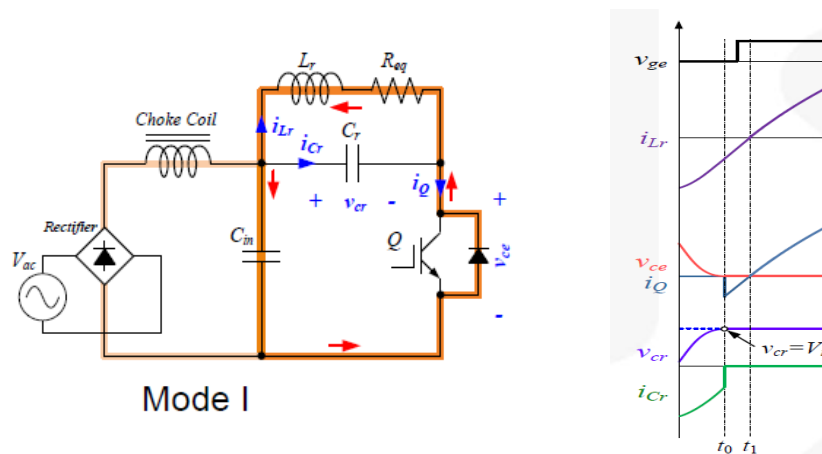


Figura 17 Modo I de operación del inversor resonante

Fuente: Fairchild's Second-Generation, Field-Stop, Shorted-Anode, TrenchIGBTs for Induction Heating Applications.

2. t_1 a t_2 :

La corriente del inductor fluye a través del IGBT, como se muestra en la (Figura 18), el IGBT es apagado en el instante t_2 y empieza el modo 3.

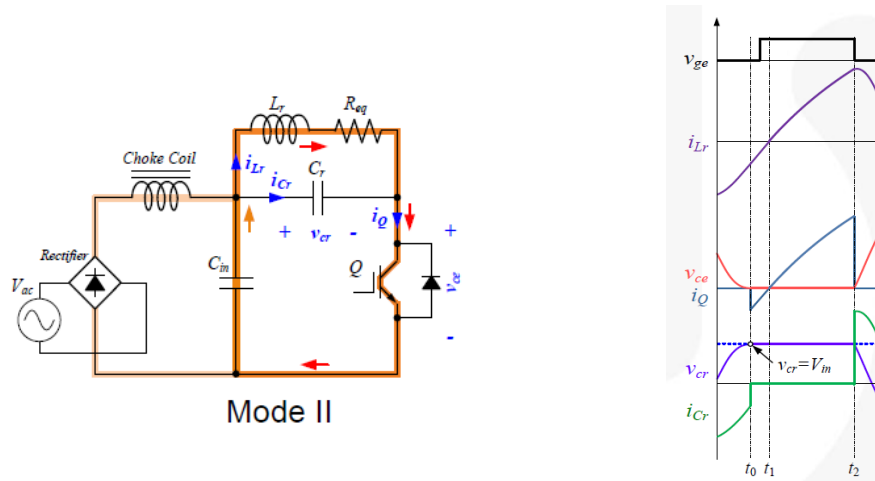


Figura 18 Modo II de operación del inversor resonante

Fuente: Fairchild's Second-Generation, Field-Stop, Shorted-Anode, Trench IGBTs for Induction Heating Applications

3. t_2 a t_3 :

En este modo se forma un circuito cuasi-resonante entre L_r y C_r , como se muestra en la (Figura 19).

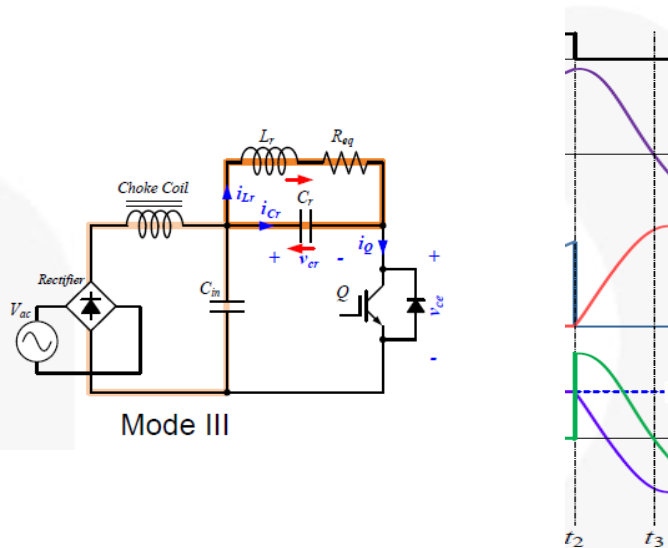


Figura 19 Modo III de operación del inversor resonante

Fuente: Fairchild's Second-Generation, Field-Stop, Shorted-Anode, Trench IGBTs for Induction Heating Applications

4. t3 a t4:

En el instante t3 se produce un cambio de dirección de la corriente resonante y en el instante t4, el voltaje de resonancia se convierte en cero, como se muestra en la (Figura 20).

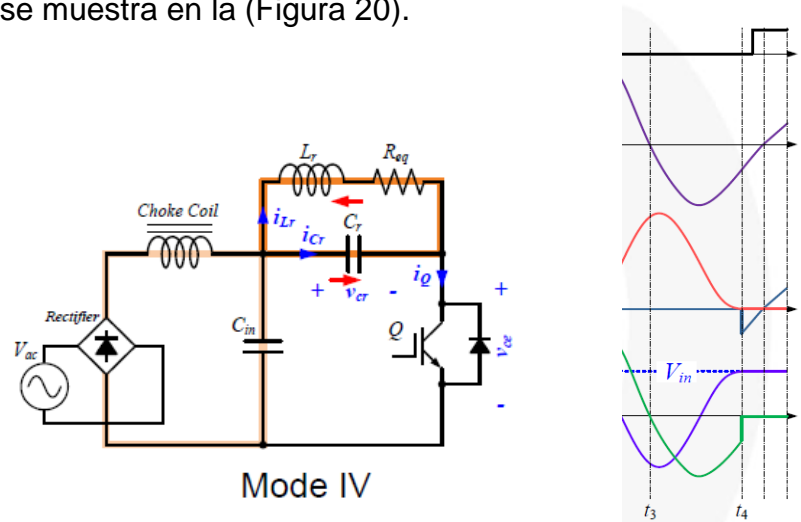


Figura 20 Modo IV de operación del inversor resonante.

Fuente: Fairchild's Second-Generation, Field-Stop, Shorted-Anode, Trench IGBTs for Induction Heating Applications

2.2. Diseño sistema electrónico para el calentamiento de agua por inducción electromagnética.

Una vez que se analizó los diferentes modos de operación del IGBT se realiza el diseño del circuito de potencia teniendo en cuenta las formas de onda que se van a obtener con el circuito a diseñar, de esta manera y de forma genérica como se muestra en la (Figura 21).

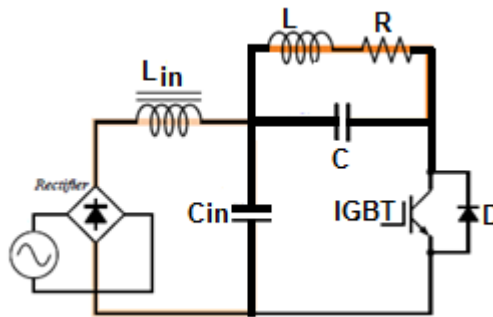


Figura 21 Representación genérica del circuito de potencia

2.2.1 Circuito de potencia

Se presenta la configuración genérica del circuito de potencia propuesta, en base a este diseño se realizó los cálculos para obtener los valores a usar en la simulación e implementación en la (Figura 22) explica lo siguiente:

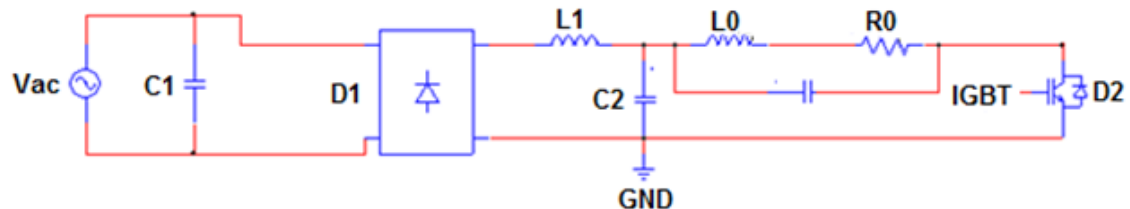


Figura 22 Representación gráfica del circuito de potencia

Se identifican los siguientes elementos que constituyen la etapa de potencia:

- Una fuente de corriente alterna, a la entrada del circuito.
- Filtro capacitivo C1 en la entrada de la línea de corriente alterna AC, para disminuir la interferencia electromagnética intrínseca en la red de alimentación eléctrica y generada por las conmutaciones características del inversor resonante.
- Rectificador no controlado de onda completa, para usar el voltaje DC necesario en la entrada del inversor cuasi-resonante.

- Filtro LC con la capacidad de absorber las corrientes armónicas para evitar la propagación al resto de instalaciones.
- El inversor cuasi-resonante que se constituye por una bobina de inducción diseñada específicamente para la aplicación del calentador de agua genera el campo magnético a altas frecuencias.
- El conmutador electrónico IGBT al cual se va a seleccionar su respectivo driver para su correcto funcionamiento en la posterior implementación.

Para el siguiente diseño se lo va a realizar mediante la selección de dispositivos electrónicos y cálculos que nos permitan obtener resultados de aproximación para generar una simulación que permita obtener resultados muy similares a la futura implementación en donde se obtuvo lo siguiente:

2.2.2 Selección del filtro capacitivo.

Para reducir las interferencias electromagnéticas (EMI) que pueden perturbar al sistema electrónico tanto para control y potencia para el presente diseño se colocó un filtro C1 ($2\mu f$) @ 250 V.

2.2.3 Diseño del rectificador de onda completa

El diseño del rectificador básicamente consiste en la elección del dispositivo electrónico que se adapte a la aplicación requerida gracias a la facilidad que permiten las innovaciones electrónicas que permiten ser aprovechadas en este tipo de circuitos, para evidenciar el cálculo consideramos la potencia máxima de consumo del calentador de inducción electromagnética, para este prototipo colocamos 1000W ya que requerimos que sea de bajo consumo y se lo puede comparar con otros dispositivos eléctricos de calentamiento que consumen potencias superiores, como es el caso de dispositivos eléctricos de calentamiento como son duchas de tipo comercial.

Formulando la potencia se tiene:

$$P = V * I \quad \text{Ecuación 14}$$

$$I = \frac{1000W}{120V}$$

$$I = 8.33 A$$

Se dimensiona el rectificador considerando el valor de voltaje pico inverso:

$$V_{pico_{inv}} = 120 * \sqrt{2} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$V_{pico_{inv}} = 169.70 V$$

Como factor de seguridad en la selección del rectificador se asume un valor de 2 recomendado, con los cálculos realizados se usa un rectificador a 340V y superior a 16.6 A.

Puente rectificador:

$$V_{dc} = \frac{2 * V_{max}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}V_f}{\pi} = \frac{2\sqrt{2} * 120Vac}{\pi} = 108.03 V \quad \text{Ecuación 16}$$

$$I_{dc} = \frac{P}{V_{dc} * n} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$I_{dc} = \frac{1000}{108.03 * 0.8} = 11.57A$$

$$I_{rms} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{2}}$$

$$I_{rms} = \frac{11.57A}{\sqrt{2}} = 8.18A$$

Por tanto, escogemos un puente rectificador de las siguientes características:

$$I_{rms} > 8.18A$$

$$V_{dc} > 108.03V$$

$$V_{peakinv} > 2(169.70) > 339.4 V$$

Escogemos 2 puentes 2 rectificadores **MB354G** en una conexión en paralelo con el objetivo de satisfacer el requerimiento de corriente, en una configuración en paralelo dividimos la corriente que pasa por cada puente a la mitad.

2.2.4 Diseño del filtro LC.

Su aplicación principal en el circuito de potencia es absorber las corrientes armónicas que se producen por las conmutaciones del inversor cuasi-resonante, otra de sus funciones es mejorar el factor de potencia en el sistema, el capacitor se comporta como filtro lo que evita que circule corriente a alta frecuencia del inversor hacia la red eléctrica.

Es un filtro pasa bajos para disminuir las corrientes armónicas generadas por las conmutaciones del inversor, que se encuentran a 31 Khz, es la frecuencia de corte seleccionada en el diseño.

$$f_0 = \frac{1}{\pi\sqrt{LoCo}} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$L = \frac{1}{C(fc*\pi)^2} \quad \text{Ecuación 19}$$

Para C2 asumimos un capacitor de $10\mu f$ para el diseño siempre se asume el valor del capacitor al ser el elemento más difícil de dimensionar.

El valor de L en el filtro es igual a:

$$L = \frac{1}{10\mu f(31000 * \pi)^2}$$

$$L = 10.54\mu H$$

2.2.5 Diseño del inversor cuasi-resonante.

En este diseño es importante considerar la potencia de trabajo del equipo y la frecuencia de resonancia para el prototipo del calentador de inducción se usó los valores indicados anteriormente.

Para $P=1000W$, usando la (Ecuación 14) se tiene:

$$P = V * I$$

$$I = \frac{1000W}{120V}$$

$$I = 8.33 A$$

Con la finalidad de evitar una frecuencia audible al oído humano se presenta el siguiente espectro.

El espectro audible varía según cada persona y se altera con la edad por eso es muy importante cuidarlo y no exponerlo a sonidos o ruidos muy fuertes que pueden dañarlo irremediablemente.

El espectro audible podemos subdividirlo en función de los tonos:

1. Tonos graves (frecuencias bajas, correspondientes a las 4 primeras octavas, esto es, desde los 16 Hz a los 256 Hz).
2. Tonos medios (frecuencias medias, correspondientes a las octavas quinta, sexta y séptima, esto es, de 256 Hz a 2 kHz).
3. Tonos agudos (frecuencias altas, correspondientes a las tres últimas octavas, esto es, de 2 kHz hasta poco más de 16 kHz). (Wikipedia, 2010)

Para esta aplicación se asume una frecuencia de resonancia de 31KHz, se aplica en la (Ecuación 18).

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_o C_o}}$$

De acuerdo con la investigación de calentadores de inducción electromagnética se usan capacitores que sean capaces de soportar voltajes altos, para esta aplicación alrededor de 1200V, implementamos dos capacitores en serie $0.68\mu f @ 850 V$ bajo la ley serie de capacitores, se logra tener un capacitor equivalente a $0.34\mu f @ 1700 V$ solventando las necesidades del inversor.

Partiendo de la (Ecuación 18):

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_o C_o}}$$

Se despeja L_o :

$$L_o = \frac{1}{C_o(f_o * \pi)^2}$$

Ecuación 20

$$L_o = \frac{1}{0.34\mu f * (31000 KHz * \pi)^2}$$

$$L_o = 310.09 Mh$$

2.3.6 Dimensionamiento y selección del IGBT

Para el diseño se toma en cuenta las formas de onda del inversor resonante, una vez analizados los tiempos de operación del inversor, podemos simplificar a simplemente 2 modos de operación como se muestra en la (Figura 23) con sus correspondientes formas de onda:

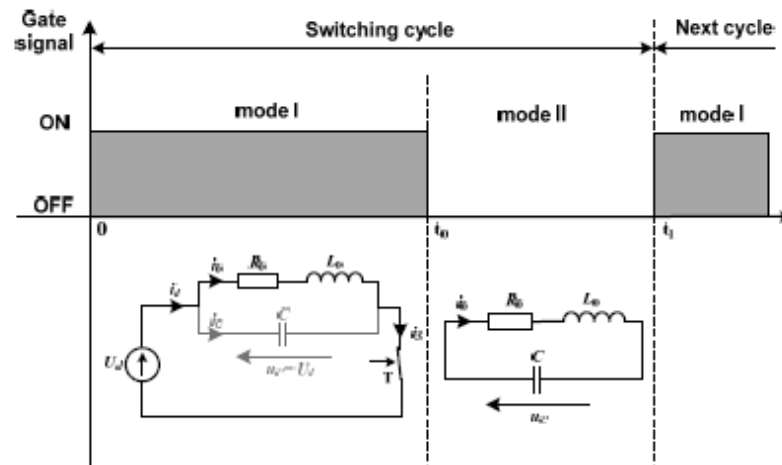


Figura 23 Ciclo de switcheo inversor del inversor resonante

Fuente: ZVS single-switch inverter for induction heating – optimum operation

Analizando los intervalos de conmutación tenemos:

- En el modo I, el IGBT está encendido y conduce corriente eléctrica, el voltaje U_c a través del Capacitor y R_oL_o es prácticamente constante e igual a U_d (Voltage del bus DC de entrada) y la corriente i_o (corriente en la carga) es igual a la corriente en el IGBT y estas aumentan exponencialmente.
- En el modo II, El IGBT se encuentra apagado, en este instante se produce una oscilación en el circuito R_oL_oC que dura hasta que el voltaje U_c alcance el voltaje de alimentación U_d .

Existen dos casos de ZVS (Zero Voltage Switching) en el inversor como se muestra en la (Figura 24):

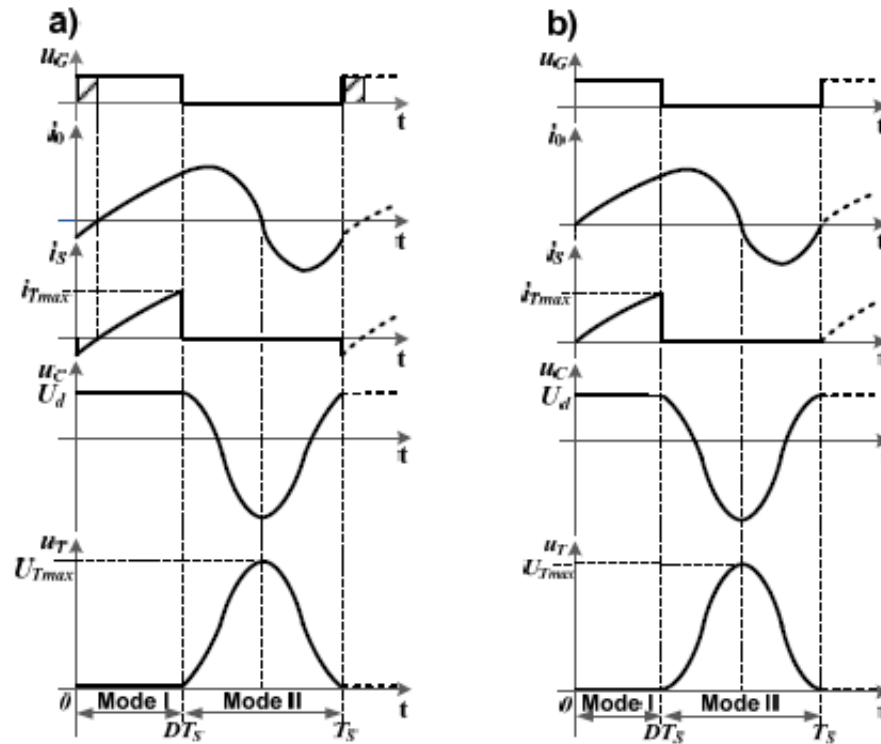


Figura 24 Formas de onda Zero Voltage Switching

Fuente: ZVS single-switch inverter for induction heating – optimum operation

Formas de onda de Corriente y Voltaje en el inversor bajo operación ZVS: a) Operación Sub-óptima; b) Operación Óptima;

U_g = Voltaje Gate,

i_o = Corriente en la carga,

i_s = Corriente en el IGBT,

U_c = Voltaje en el capacitor,

U_t = Voltaje en el colector-emisor IGBT

a) Operación Sub-Óptima: El voltaje U_c alcanza el valor de la fuente U_d mientras la corriente i_o es negativa. El diodo anti-paralelo D comienza a conducir.

b) Operación Óptima: Ocurre si el voltaje U_c alcanza el voltaje U_d al mismo tiempo que la corriente i_o alcanza al valor cero. El IGBT debería ser encendido en ese momento e iniciar el siguiente ciclo de tal manera, el IGBT se enciende a un voltaje y corriente igual a cero, por lo tanto, las pérdidas en el encendido del IGBT son cero.

El inversor también se lo puede hacer funcionar en modo de conmutación dura, es decir, el tiempo de conducción del IGBT es demasiado corto o la amortiguación del circuito resonante es demasiado grande, en este caso, el voltaje U_c nunca llega al voltaje de alimentación en correspondiente al modo II. Como consecuencia, será necesario encender el IGBT a un voltaje distinto de cero (NZVS) lo que genera pérdidas de encendido en el IGBT por tal motivo, este tipo de operación del inversor debe ser evitado.

Para el diseño del inversor nos vamos a basar en el análisis matemático de las formas de onda de corriente en la carga (i_o) y el voltaje en el capacitor (U_c), además, se asumen las siguientes consideraciones:

1. El IGBT y los demás elementos del inversor resonante se consideran ideales.
2. El voltaje de alimentación U_d es constante en un ciclo de switcheo.
3. El inversor funciona en estado estable.

Con estas consideraciones y tomando en cuenta el circuito equivalente cuando el IGBT está conduciendo se obtienen las siguientes expresiones:

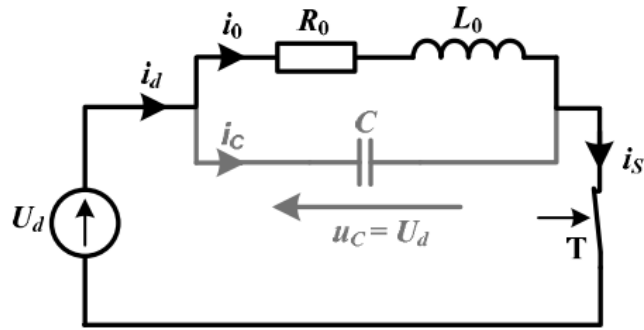


Figura 25 Diagrama circuito de un inversor simple.

Fuente: ZVS single-switch inverter for induction heating – optimum operation

$$U_d - L_0 \frac{di_{L_0}}{dt} - R_0 i_{L_0} = 0 \quad \text{Ecuación 21}$$

$$i_{L_0(\text{on})}(t) = \frac{U_d}{R_0} * \left(1 - e^{-\frac{R_0 t}{L_0}}\right) \quad \text{Ecuación 22}$$

Para calcular la corriente máxima que deberá soportar el IGBT debemos calcular la corriente máxima en la bobina L_0 , debido a que en este intervalo de tiempo son iguales.

El punto donde la corriente de la bobina L_0 es máxima es en el tiempo (t_{on}) del IGBT, de tal manera evaluamos la (Ecuación 22) al tiempo (t_{on}).

El voltaje U_d es el voltaje máximo de salida DC del rectificador, debido a la potencia de consumo se va a utilizar una alimentación de 120Vac.

$$V_{dc} = \frac{2 * V_{max}}{\pi} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{2}V_f}{\pi} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{2} * 120Vac}{\pi}$$

$$V_{dc} = 108.03 \text{ V}$$

$$\rightarrow U_d = 108.03 \text{ V}$$

Para el cálculo del circuito resonante asumimos los siguientes valores:

- $C = 0.33 \mu\text{F}$
- Este tipo de inversores clase "E" ZVS operan usualmente a rangos de frecuencia de 20 a 50 KHz, por tal motivo se asume una frecuencia de operación $f_s = 31 \text{ KHz}$.
- La carga del calentador de inducción va a ser una tubería de material ferromagnético, por ejemplo: acero inoxidable, al momento de operar el calentador de inducción calentará el tubo y a su vez el agua que fluya a través de él mediante transferencia de calor, por tal motivo se asume una resistencia R_o de la tubería de 0.341 Ohm .

La ecuación para la frecuencia de un circuito resonante es la siguiente:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_o * C_o}}$$

De la (Ecuación 18) , despejamos el valor de L_o , entonces:

$$L_o = 310.09 \mu\text{H}$$

Asumimos una relación de trabajo $D = 0.5$, entonces:

$$t_{on} = D * T = 16.12 \text{ seg}$$

$$t_{off} = T (1-D) = 16.12 \text{ seg.}$$

Reemplazando todos los valores en la ecuación Ec. 23 tenemos:

$$i_{L_{o\max}} = 39.83 \text{ A}$$

Entonces, la corriente máxima que debe soportar el IGBT es:

$$i_c > 39.83 \text{ A}$$

Para encender el IGBT bajo condiciones ZVS, se requiere que el IGBT tenga un Diodo de anti-paralelo, incluso cuando conmuta por corto periodo de tiempo.

Durante el tiempo de apagado, se produce un voltaje resonante entre L_o y C , este voltaje requiere un alto voltaje de ruptura del IGBT, generalmente de 100 y 1600 V para aplicaciones de inversores resonantes de un solo extremo.

Tomamos un voltaje de ruptura del IGBT de 1200V.

Con los datos anteriormente mencionados se escoge el siguiente IGBT:

- **INFINEON FF100R12RT4**

$$V_{ces} = 1200\text{V}$$

$$I_c \text{ nom} = 100 \text{ A}$$

El voltaje del capacitor del circuito resonante lo podemos calcular con la siguiente expresión:

$$U_c = U_d - U_{ce}$$

Ecuación 25

Entonces reemplazando valores se obtiene:

$$U_c = 108.03 - 1200$$

$$U_c = 1091.97 \text{ V}$$

Por tal motivo, escogemos un capacitor de 0.33uF @ 1700V

Para el disparo del IGBT se va a utilizar un driver recomendado por el fabricante del IGBT, con el objetivo de evitar pérdidas en el encendido y apagado ya que se va a trabajar a alta frecuencia.

2.3.7 Selección del driver IGBT

El Driver modelo 1EDI05I12AF es apropiado para aplicaciones en Calentadores resonantes de inducción ver Anexo (Datasheet **1EDI05I12AF**)

2.3.8 Simulación y formas de onda circuito de potencia.

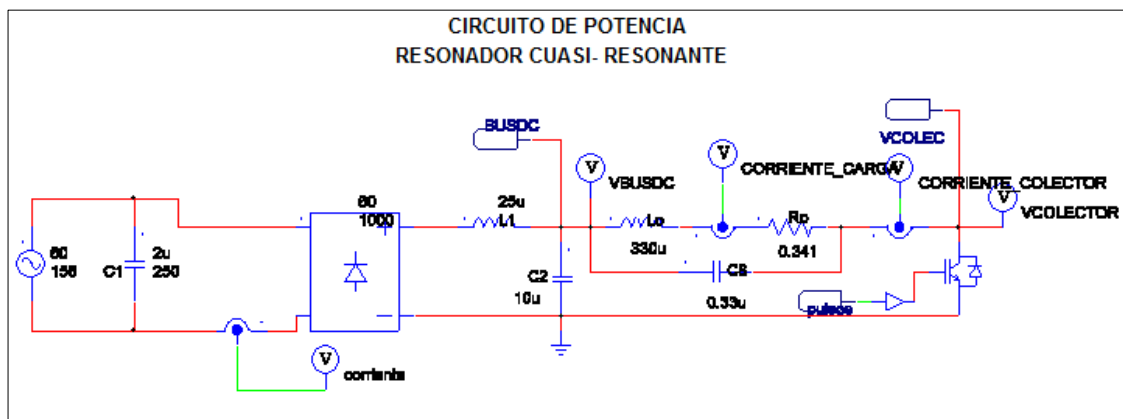


Figura 26 Circuito de Potencia resonador cuasi-resonante, simulación POWER SIM

De la (Figura 26) se pueden observar los puntos de prueba para el análisis del presente circuito de potencia en donde se va a determinar las siguientes formas de onda:

- Corriente de entrada (corriente)
- Voltaje en el bus DC(VBUS DC)
- Corriente de carga (CORRIENTE _CARGA)
- Corriente en el colector, voltaje en el colector (VCOLECTOR).

Se muestra a continuación las formas de onda generadas en los puntos de prueba del circuito de potencia.

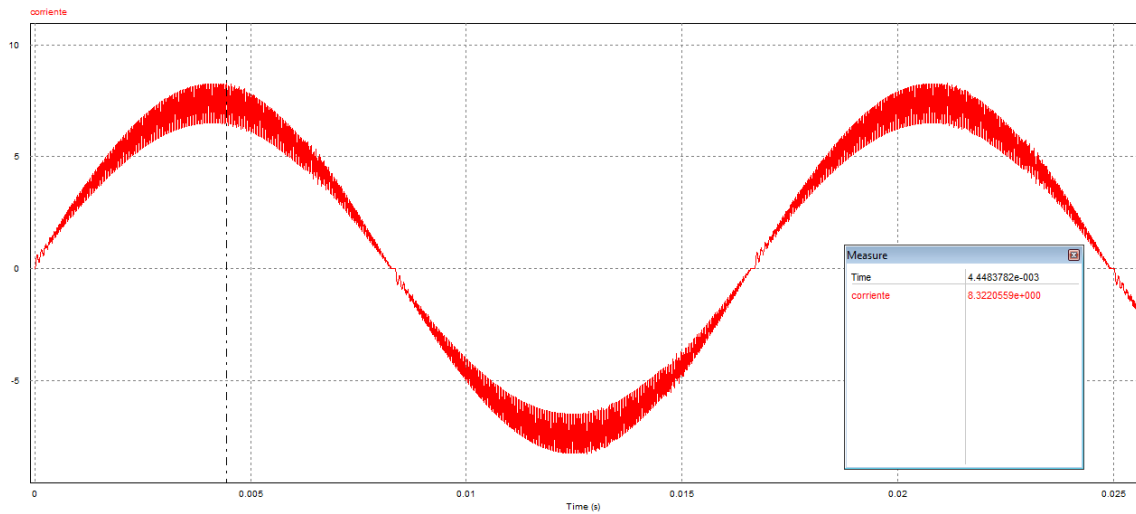


Figura 27 Corriente de entrada en el circuito de potencia.

El valor máximo de corriente que se muestra en la figura es de 8.322 A

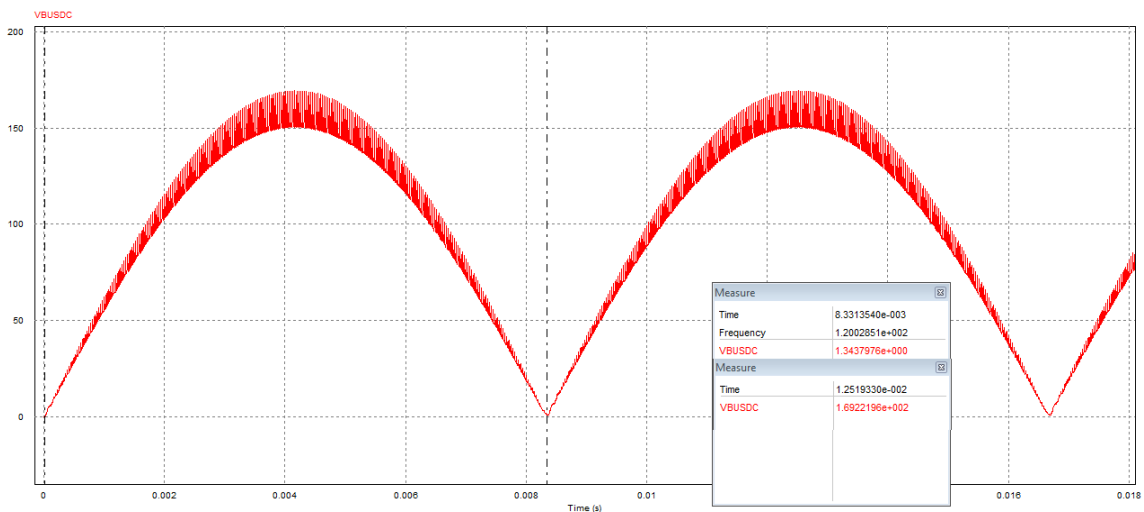


Figura 28 Voltaje Rectificado Bus DC

El valor máximo de voltaje rectificado dado por el software es de 169.22 V para una frecuencia de 120 Hz.

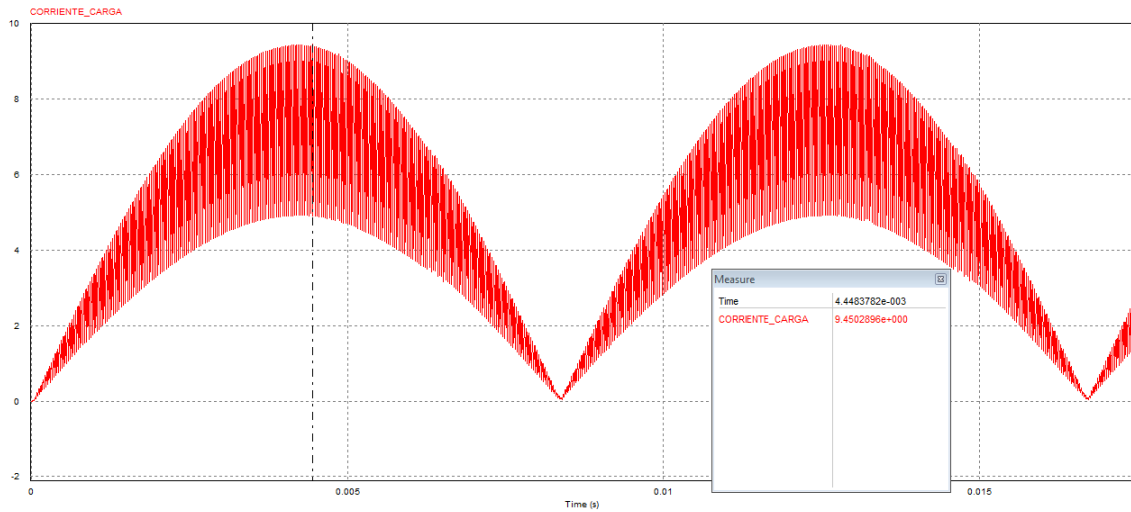


Figura 29 Corriente de Carga medida en el tanque resonante.

El Valor de la corriente máxima obtenida por el software es de 9.45 Amperios.

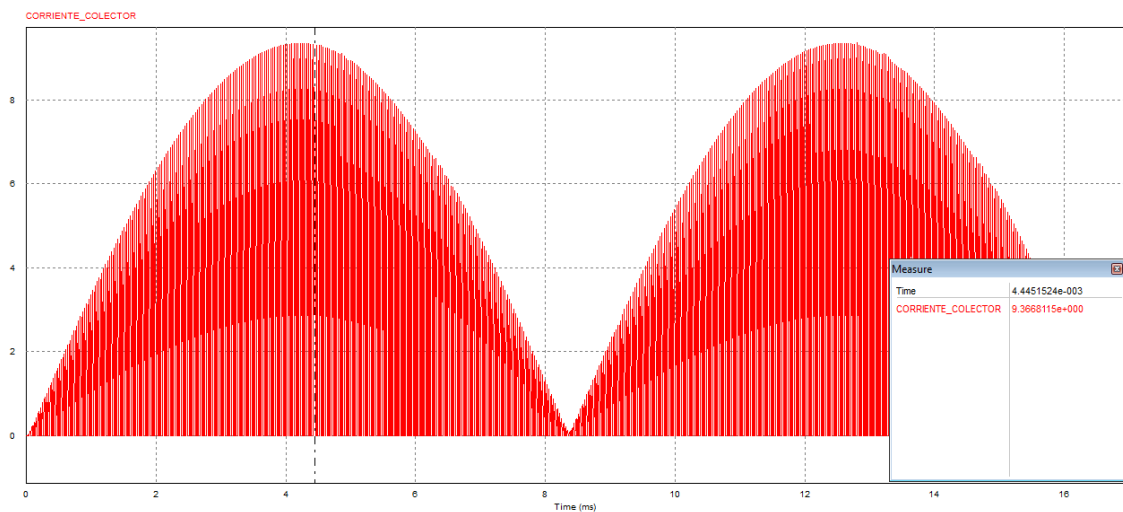


Figura 30 Corriente en el colector.

En la (Figura 30) se puede observar una onda troceada por la alta frecuencia que transcurre dentro de la onda portante de frecuencia 120 Hz, teniendo una corriente máxima de 9.36 Amperios

El voltaje medido en el colector se muestra en la siguiente figura:

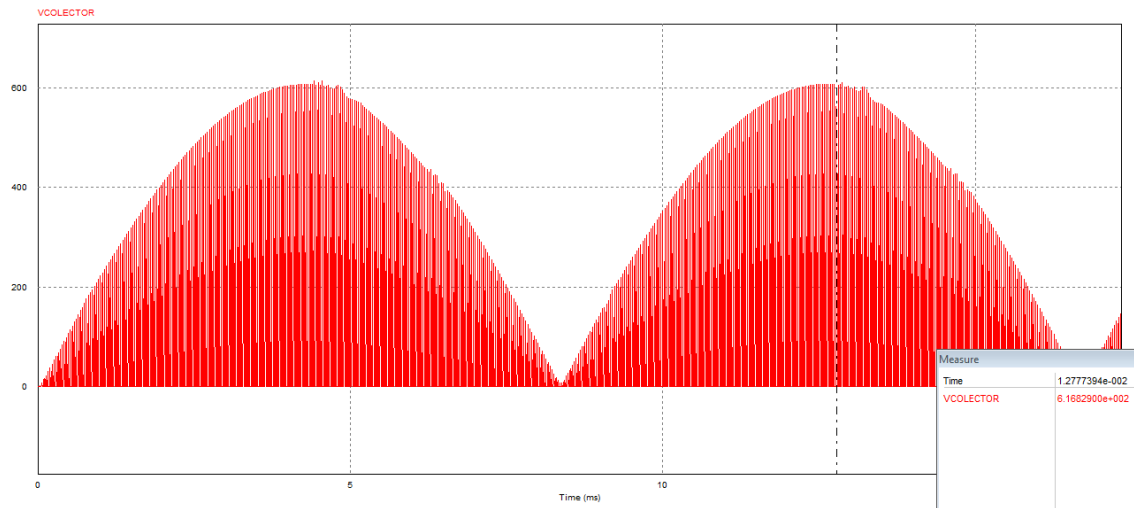


Figura 31 Forma de onda voltaje en el colector

En la figura se puede observar una onda troceada por la alta frecuencia que transcurre dentro de la onda portante de frecuencia 120 Hz, teniendo un voltaje máximo en el colector de 616.82 Voltios.

En la siguiente (Figura 32) se puede observar la interacción de las formas de onda del circuito de potencia, donde se puede observar con claridad el funcionamiento.

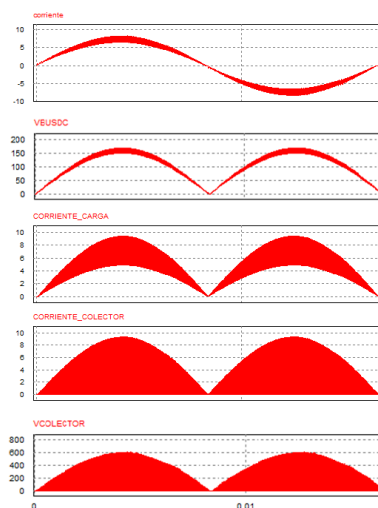


Figura 32 Interacción formas de onda.

Mediante simulación se obtuvieron los siguientes datos con la finalidad de encontrar el voltaje de entrada en la que el sistema fallaría a causa de un sobre voltaje o una sobre corriente ya que los elementos electrónicos están dimensionados a 110 V AC.

Tabla 4

Variación de voltaje de entrada vs Voltaje en el bus DC, Voltaje de colector y Corriente de colector.

| VOLTAJE DE ENTRADA (VAC) | VOLTAJE BUS DC (V DC) | VOLTAJE COLECTOR (V) | CORRIENTE COLECTOR (A) |
|--------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| 220 | 336,28 | 1200,37 | 35,7 |
| 120 | 183,54 | 656,99 | 19,52 |
| 115 | 175,89 | 629,61 | 18,99 |
| 112 | 171,39 | 613,51 | 18,95 |
| 110 | 169,22 | 616,82 | 17,97 |
| 108 | 164,88 | 590,21 | 17,53 |
| 105 | 160,54 | 574,67 | 17,07 |
| 100 | 152,95 | 547,49 | 16,27 |
| 80 | 121,49 | 434,88 | 12,92 |
| 50 | 75,75 | 277,42 | 8,08 |

De los datos obtenidos y mostrados en la (Tabla 4) se puede determinar que el voltaje en el colector se mantiene en un nivel controlable hasta la variación de 115 V AC en la entrada y hasta 105 V AC, para el caso de 220 V AC la corriente en el colector asciende hasta los 35.7 A y 1200.37 V en el colector, a pesar de que el conmutador IGBT su corriente de ruptura es de 100 A y el Voltaje es de 1200 V no se recomendaría trabajar a este voltaje en el circuito presentado ya que en el caso de alguna falla los picos podrían sobrepasar este voltaje y dañar al conmutador.

Para el caso de tener en la entrada 50 V AC el conmutador tampoco va a trabajar de la manera esperada, mediante la tabla se puede determinar que la fuente de voltaje para un óptimo funcionamiento, puede estar en un rango de 110 a 120 V en la entrada.

Se presenta las formas de onda que muestra el simulador al probar con diferentes valores de voltaje se muestran los más críticos en la (Figura 33) y (Figura 34).

A 220 V

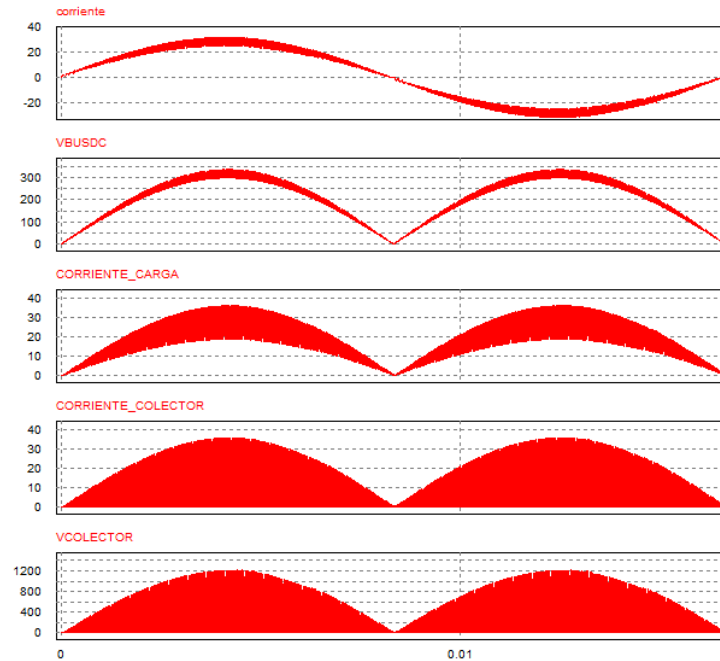


Figura 33 formas de onda a 220 V en la fuente de entrada AC.

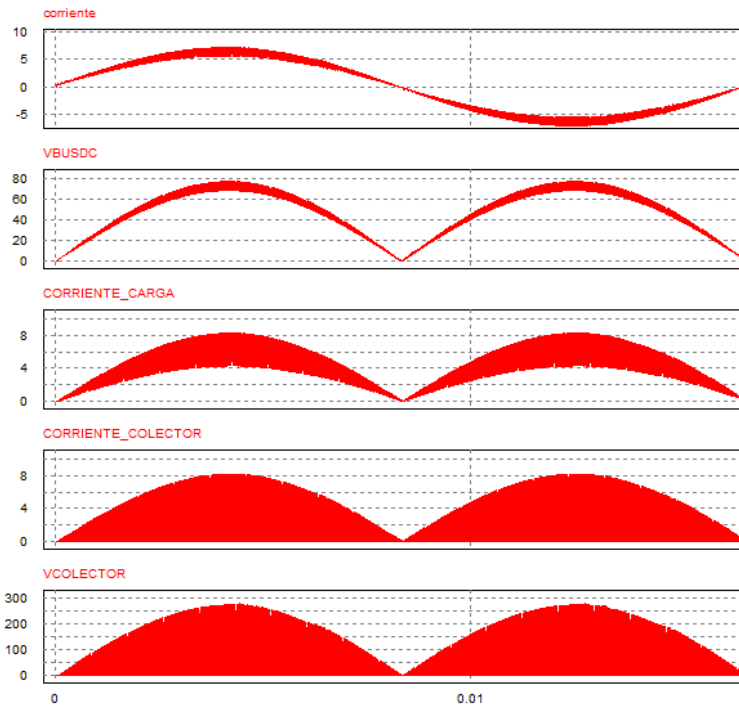


Figura 34 formas de onda a 50 V en la fuente de entrada AC.

2.3.9 Selección de los sensores para el circuito de realimentación de corriente.

Para lograr controlar la potencia del inversor resonante nos basamos del siguiente esquema de control de calentadores de inducción comerciales como se muestra en la (Figura 33)

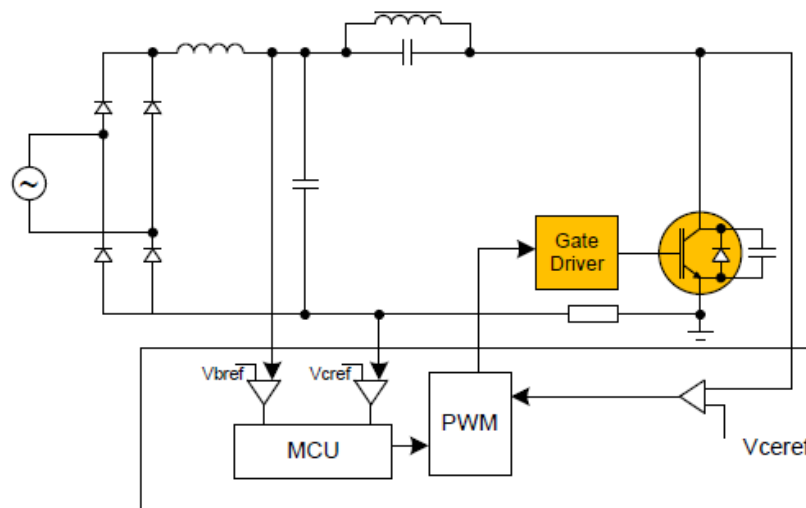


Figura 33 Esquema de control calentador de inducción comercial

Fuente: ZVS single-switch inverter for induction heating – optimum operation

Este esquema mide:

- Voltaje en el bus de DC.
- Voltaje entre colector y emisor del IGBT.
- Corriente en el IGBT.

Entre una de las primeras pruebas de funcionamiento en el sistema de realimentación de corriente se utilizó un transductor de corriente, **HAI5 100-P**, este transductor efecto hall de corriente, mide tanto corriente AC como DC. A la salida entrega un voltaje DC proporcional a la corriente que circula a través del transductor, este voltaje de salida lo ingresamos directamente al microcontrolador donde aparentemente se tenía solucionado según la teoría y

algunos esquemas, el control en la realimentación pero en la implementación el uso de este tipo de sensores no tiene validez ya que no detecta los picos de corriente que se generaron, al tratarse de un sistema resonante que trabaja a altas frecuencias generando que el IGBT entre en corto muchísimo antes de entrar en resonancia, invalidando la aplicación para lo cual se realizó la investigación para solventar este problema.

En el siguiente esquema proporcionado por Onsemi, fabricantes de IGBT, recomienda usar un transformador de corriente para la alimentación del control electrónico, se aplica este concepto en el diseño.

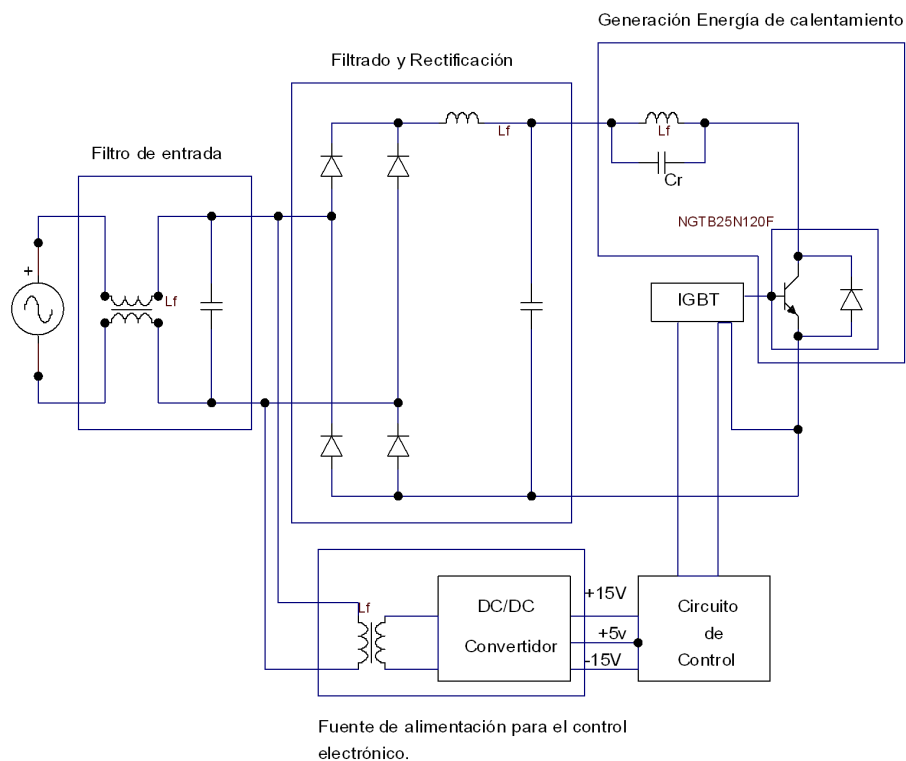


Figura 34 Diagrama de bloques de un Calentador de inducción

Fuente: (Onsemi) IGBT power losses in heating induction applications

Para esta etapa se usa un transformador de corriente, con el cual se puede medir la corriente de entrada para realizar la realimentación de corriente y convertirlo a niveles de voltaje que se puedan ingresar al microcontrolador para

trabajar a la máxima potencia, el transformador seleccionado para el prototipo es uno que presenta una relación de 1:200.

El secundario del transformador genera voltaje alterno para lo cual es necesario realizar otra etapa de rectificación de onda, se usa un puente de diodos, deben trabajar rápidamente, con la finalidad de obtener una buena respuesta de realimentación de corriente para que el microcontrolador pueda ajustar la frecuencia correcta para que el circuito entre en resonancia lo más rápido posible.

Después de la etapa de rectificación se tiene un filtro C6 del circuito se asume un valor de 10 kΩ para cada una de las resistencias.

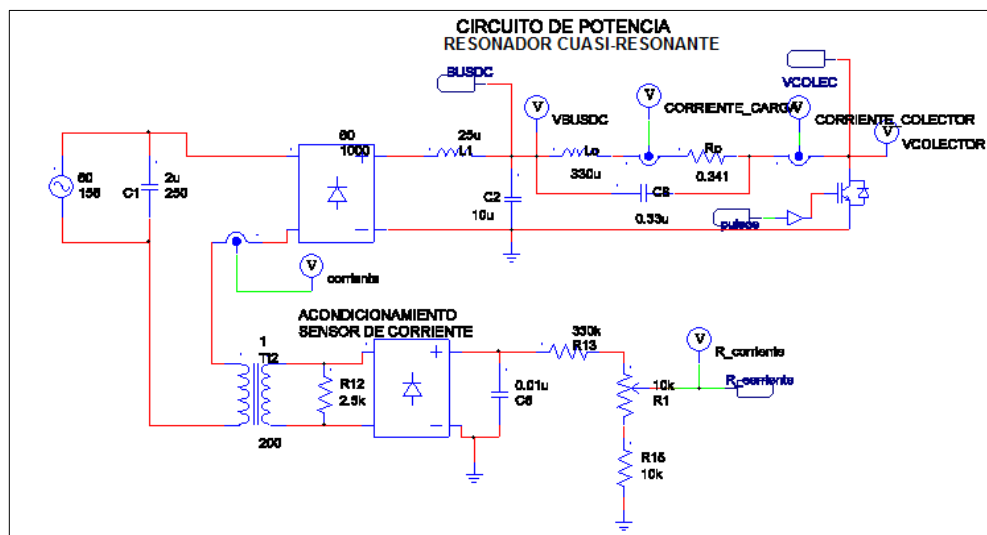


Figura 35 Circuito de acondicionamiento de sensor de corriente

A la salida del sensor de corriente se multiplica por una resistencia con la finalidad de obtener voltaje a la salida, después de realizar un filtrado y un divisor de voltaje el mismo nos entrega la siguiente forma de onda, la misma que ingresa en el circuito de realimentación de corriente.

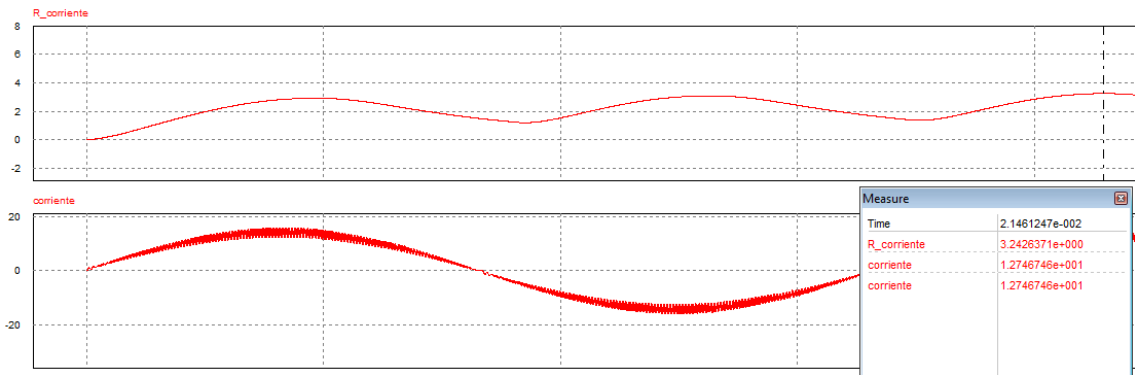


Figura 36 Forma de onda en realimentación de corriente.

Como se observa en la (Figura 36) y en la forma de onda empieza en 0 y su valor máximo en voltios es de 3.24 es el voltaje de referencia con en el cual ingresa en el circuito de realimentación de corriente en donde ingresa a un proceso de comparación de niveles de voltaje.

2.4 Diseño del circuito de realimentación de corriente

Para el explicar el siguiente circuito, se basa en comparar niveles de voltaje éstos se obtienen de la realimentación de corriente a la entrada del convertidor AC/DC; el voltaje de referencia a ser comprado se obtiene a partir de un arreglo de resistencias que se controlan desde el microcontrolador, de esta manera se genera diferentes niveles de voltaje de referencia que van a ser comparados.

Mediante varios arreglos se pueden obtener varios niveles de potencia, los cuales sería de mejor aplicación en una cocina de inducción electromagnética para la aplicación y prototipo del calentador de inducción se va a generar la máxima potencia.

Permite además que la corriente a la entrada del convertidor permanezca constante para tener una mayor eficiencia en el sistema de calentamiento se deben considerar las pérdidas de calor que se tiene por el paso del agua en la tubería de acero galvanizado por lo que se ha diseñado el sistema para que trabaje a la máxima potencia.

El circuito integrado usado como comparador de voltaje en la aplicación del prototipo del calentador por inducción electromagnética es el LM339, este contiene cuatro comparadores con dos entradas y una salida a colector abierto por lo cual es necesario colocar una resistencia a VCC, presenta un bajo consumo de corriente a la entrada, alta velocidad de respuesta y alta sensibilidad.

En el presente diseño se muestra que el voltaje que proviene de la realimentación de corriente, es conectado a la entrada negativa del comparador como se muestra en la (Figura 37) y en la entrada positiva se obtiene mediante un arreglo de resistencias y transistor que es activado por el microcontrolador para obtener la potencia máxima que consume el calentador.

A la salida del comparador se colocó una resistencia R20 que ingresa directamente a un divisor de voltaje formado por las resistencias R21 y R23, presentan la siguiente función.

- Al momento que el voltaje a la entrada negativa del comparador es mayor que el de la positiva, la salida se encuentra en bajo es decir 0 Voltios se puede calcular el voltaje en el divisor de voltaje con la siguiente fórmula.

$$V_2 = VCC * \frac{R20[R23]}{(R20[R23]+R21)} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$V_2 = 18 * \frac{\frac{1}{\frac{1}{4.7} + \frac{1}{20}}}{\left(\frac{1}{\frac{1}{4.7} + \frac{1}{20}}\right) + 20}$$

$$V_2 = 2.87 \text{ Voltios}$$

Si el voltaje de la entrada negativa del comparador es menor que el de la positiva la salida se encuentra en alto y el voltaje del divisor es el siguiente.

$$V_2 = VCC * \frac{R21}{R21+R23}$$

Ecuación 27

$$V_2 = 18 * \frac{20}{20 + 20}$$

$$V_2 = 9 \text{ voltios}$$

Estos dos niveles de voltaje sirven como referencia y son usados por el comparador de la etapa final de disparo, su función es de proteger al circuito sobre corriente para no afectar al sistema; se coloca también un capacitor de 0.1µf para filtrar ruidos que puedan afectar al sistema.

Para un mejor entendimiento, lo que se tiene en el circuito de realimentación de corriente, es colocar SET POINT de corriente por hardware; de esta manera se logra tener una protección sobre corriente para el elemento de conmutación IGBT mediante la comparación de niveles de voltaje que se realizan en el integrado LM339 permite a la salida tener un 0 o 1 depende que se generen o no los pulsos por el micro-controlador.

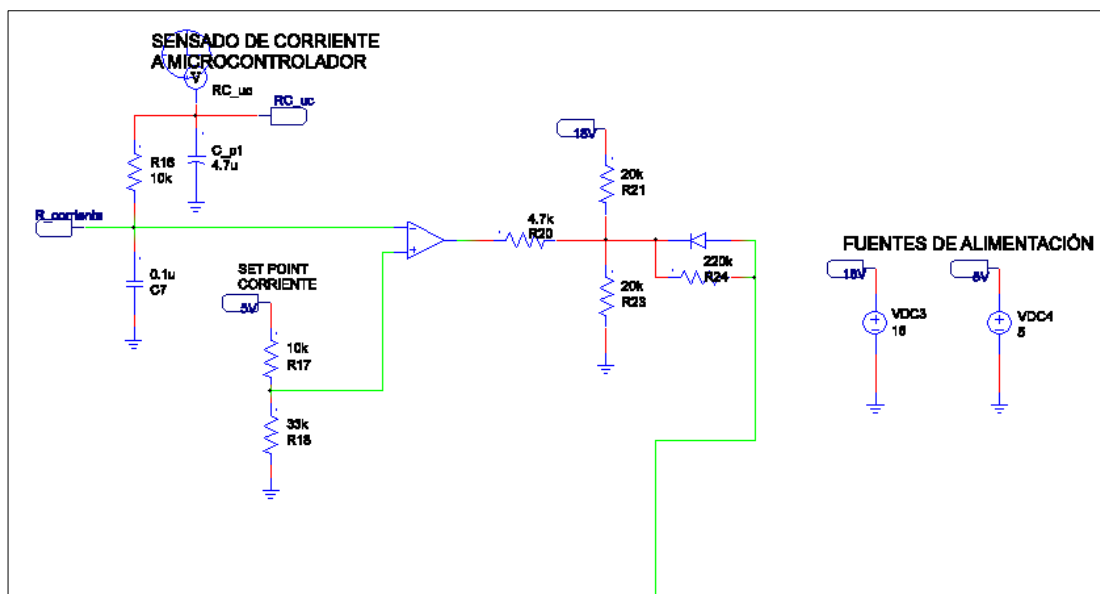


Figura 37 Circuito de realimentación de corriente.

Para la siguiente (Figura 38) se muestra la forma de onda a la salida del comparador, la forma de onda esperada debe ser pulsante ante la constante comparación de los niveles de voltaje.

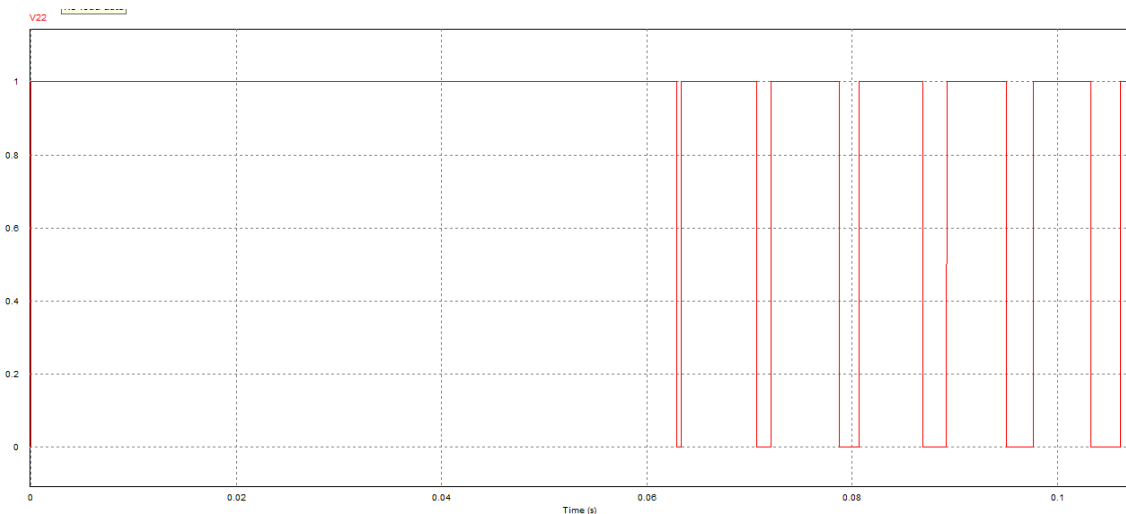


Figura 38 Forma de onda salida del comparador en la realimentación.

En este circuito como se puede observar se coloca el set point el cual se compara con el voltaje proveniente de la realimentación de corriente de donde se obtiene a la salida la forma de onda mostrada en la (Figura 38).

2.5 Circuito sincronización de pulsos para el control del IGBT.

El circuito que se muestra en la figura 37 entre sus funciones principales mantiene la potencia de salida estable y control de la corriente de entrada en el circuito de potencia, como se muestra en el circuito de potencia.

Uno de los principales problemas en una aplicación de inducción electromagnética consiste en las pérdidas que se producen por conmutación que suceden durante la resonancia, controlar el disparo del IGBT cambia adecuadamente la frecuencia de conmutación según la variación de la carga.

La función que realiza este circuito es controlar el límite de voltaje del circuito resonante para obtener los tiempos de encendido y apagado del IGBT por

realimentación de voltaje que se explicó antes del voltaje de la fuente y el voltaje de colector del IGBT (V_{ce}).

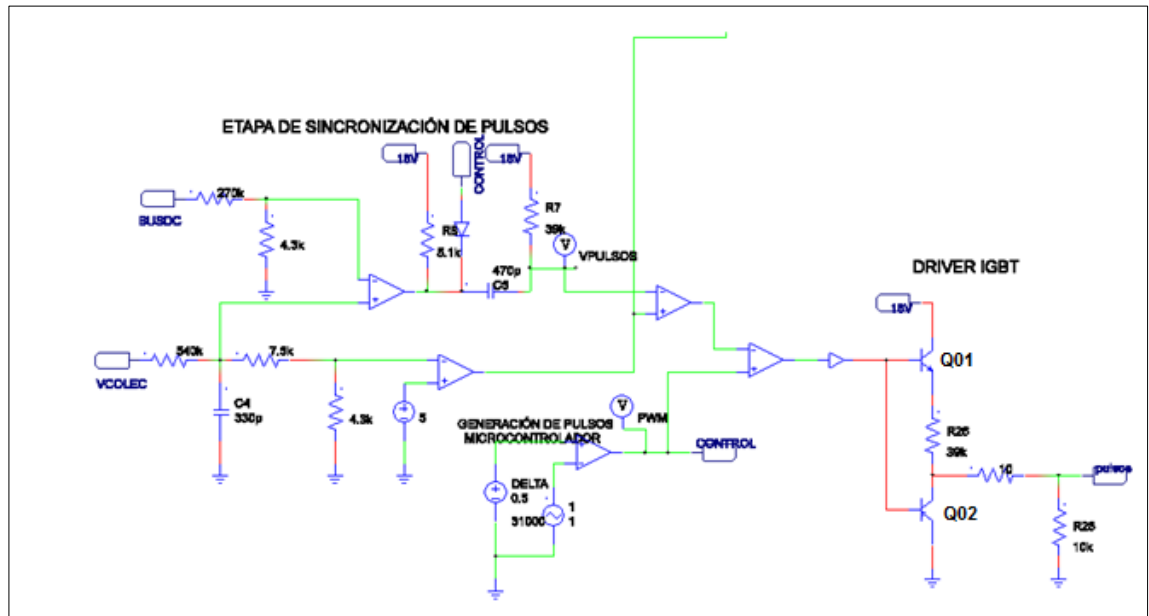


Figura 39 Circuito de sincronización de pulsos

La frecuencia a la salida del rectificador es de 120 Hz al ser de onda completa versus la frecuencia de conmutación que es de 31 Khz como se muestra a continuación el pico de voltaje puede variar dependiendo la amplitud de V_{cd} .

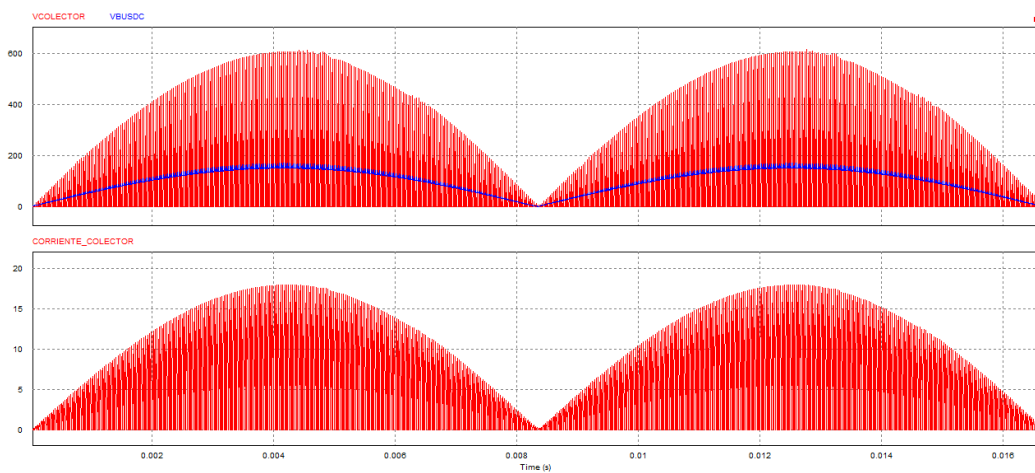


Figura 40 Voltaje de colector Vs Voltaje Bus DC , Corriente colector.

Como se puede observar en la (Figura 40) se obtiene una onda portante la cual corresponde a una frecuencia de 120 Hz, la misma que se encuentra toceada por la frecuencia de corte que se encuentra a 31 KHz

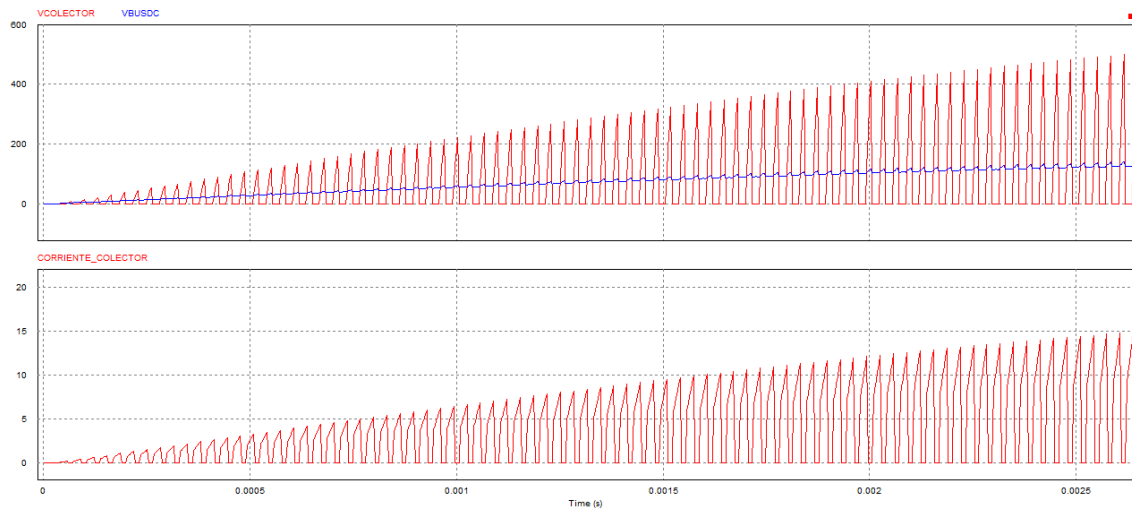


Figura 41 Voltaje de colector Vs Voltaje Bus DC, Corriente colector, ampliada

En la (Figura 41) se puede observar de manera ampliada la sincronización de pulsos que se obtiene en el colector del IGBT.

A la salida del comparador que se muestra en el circuito de la figura 37, el circuito es el que permite generar el pulso de arranque del calentador de agua de inducción mediante el capacitor C5, en ese punto ingresa mediante el diodo R8 la señal PWM proveniente del microcontrolador es usado el diodo para que la corriente no pueda retornar hacia el microcontrolador y causar daños.

Al momento que el IGBT se encuentra saturado el capacitor C5 se carga hasta un tiempo que determina la frecuencia del PWM que envía desde el microcontrolador.

Otra de las funciones que permite el circuito de sincronización de pulsos es controlar el arranque de los pulsos que entran al IGBT, por la señal que envía desde el microcontrolador.

Cuando la señal está en bajo, el voltaje en la entrada negativa del comparador es el mismo valor de la fuente de alimentación del comparador (18V) manteniendo siempre un nivel bajo de voltaje sobre la compuerta del IGBT y de esta manera el circuito de potencia abierto en esas condiciones el capacitor C4 se encuentra polarizado por las resistencias que se muestran en la (Figura 42).

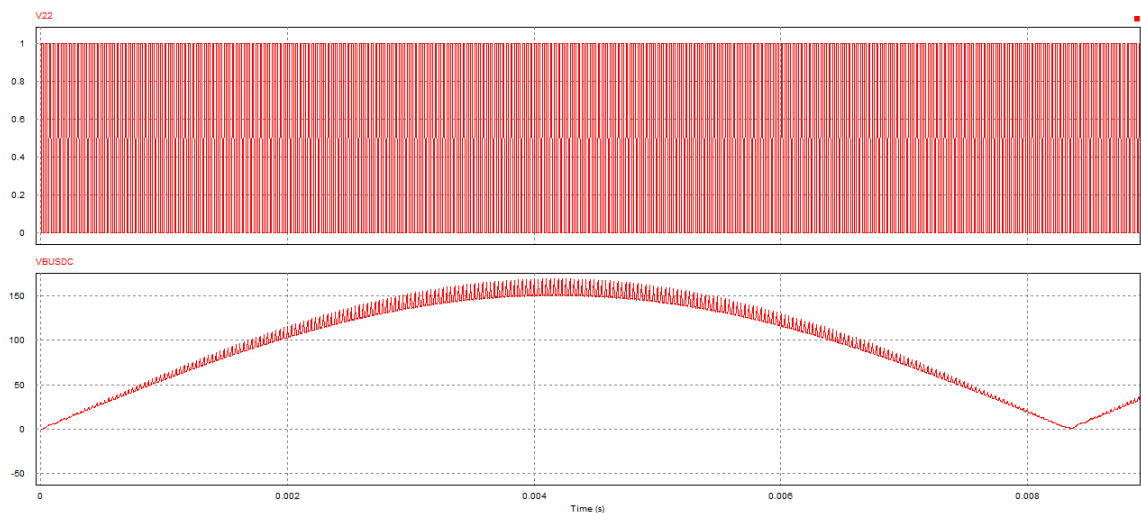


Figura 42 Forma de onda a la salida del sincronizador de pulsos

Como se puede observar es una Onda PWM controlada, la misma que después de cumplir con el proceso ingresa al driver del IGBT.

Para este punto el voltaje que ingresa a la entrada positiva del comparador, que es mayor que el voltaje que se encuentra en la entrada negativa en el mismo comparador, garantiza que la salida se mantenga en nivel alto para evitar que el IGBT pueda conmutar; para que el circuito de potencia entre en resonancia, es requisito que el microcontrolador genere un pulso inicial, para cerrar el circuito de potencia y en ese instante se obtiene el siguiente circuito equivalente.

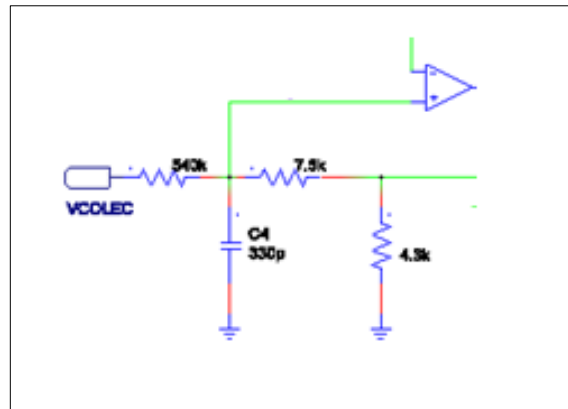


Figura 43 Polarización del capacitor (calentador off).

El voltaje negativo del capacitor que ingresa a la entrada positiva del comparador, lo que produce es cambiar de estado a la salida del comparador de nivel alto a nivel bajo

En la última etapa en el circuito anterior realiza la comparación de las señales en el comparador, en la entrada negativa del comparador se tiene la realimentación de la corriente de sobrevoltaje en el circuito resonante, mientras que en la entrada positiva del comparador se tiene la señal del circuito de sincronización de pulsos.

A la salida de este comparador tiene un circuito formado por transistores, los mismos que componen el driver del IGBT; para el caso de implementación se usó un driver específico para el IGBT; este evita que existan pérdidas por conmutación, con ello se puede lograr que el IGBT se sature de forma correcta.

Para las señales de realimentación de corriente y voltaje se establecen límites a los cuales no debe sobrepasar el voltaje en la entrada positiva se mantiene en 9 voltios, caso contrario si sobrepasan los límites configurados de referencia cambia a un nivel bajo de 3.5 voltios, estas condiciones dan paso para que la señal del circuito de sincronización pueda compararse y generar

una onda cuadrada a la salida del comparador o retraer los pulsos a la salida del comparador.

Para el caso de la señal que llega a la compuerta (gate) del IGBT depende de la salida del comparador.

Si la salida del comparador está en nivel bajo (0 voltios) el transistor Q01 está abierto y al mismo tiempo el transistor Q02 está saturado, lo que mantiene la compuerta del IGBT en nivel bajo el circuito de potencia está abierto y no hay circulación de corriente.- Cuando la salida del comparador está en nivel alto es decir 18 voltios el transistor Q01 está saturado al mismo tiempo el transistor Q02 está abierto por lo que el nivel de voltaje en la compuerta del IGBT es alto (18 voltios) asegura la saturación de la compuerta cada vez que se encuentra en alto.

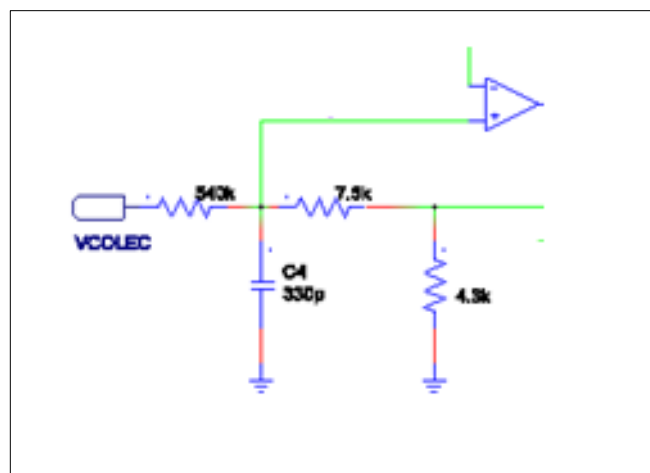


Figura 44 Polarización del capacitor (calentador ON)

2.6 Etapa de protección por sobre-temperatura

En esta etapa se muestra el circuito de protección por sobre-temperatura del IGBT, ya que las especificaciones del fabricante del IGBT en su hoja de datos específica mostrada en los anexos, el bajo rendimiento de este dispositivo ante

el aumento de temperatura, para lo cual es necesario realizar la implementación en el circuito de un termistor NTC del tipo cristal, este sensor monitorea para que la temperatura en el IGBT no supere los 85°C, si excede esta temperatura el sistema automáticamente envía un mensaje de error.

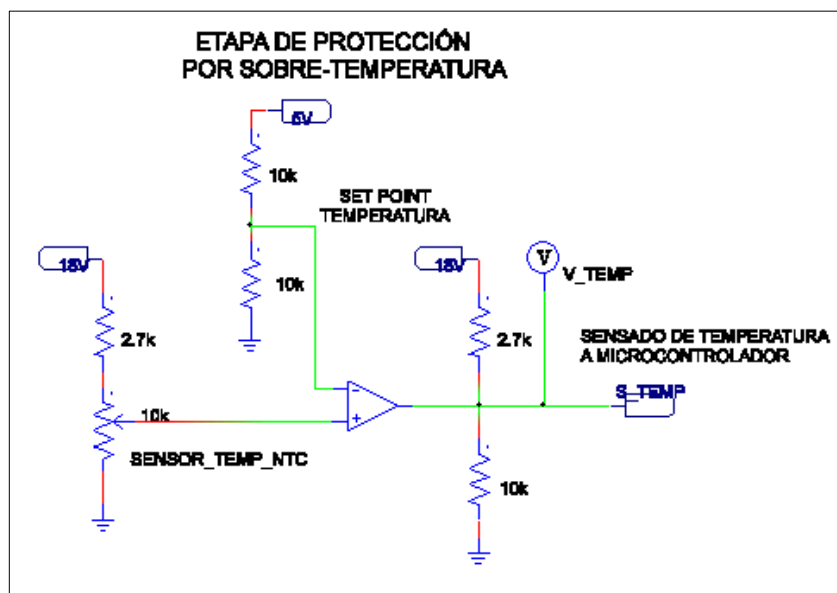


Figura 45 Circuito de etapa de protección por sobre-temperatura.

2.6.1 Circuito de acondicionamiento para la señal del termistor.

Para la aplicación de este proyecto se usó un sensor de temperatura de resistencia variable, también conocido como termistor de coeficiente de temperatura negativo nos permite determinar en el funcionamiento del sistema de calentamiento si la temperatura es excesiva en el IGBT, se lo ha colocado muy aproximado al IGBT de tal manera que pueda detectar el calentamiento del dispositivo y enviar la señal al comparador para detener el circuito.

La temperatura máxima en el IGBT será de 85 °C equivalente a 358 °K

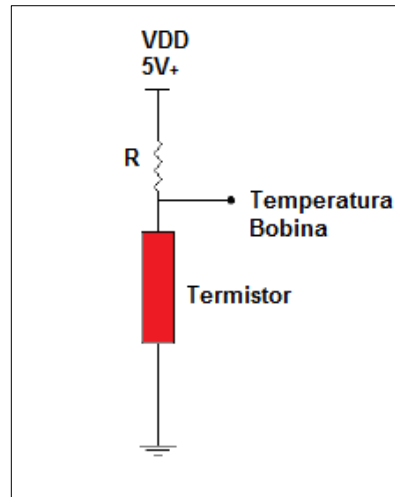


Figura 46 Acondicionamiento del sensor de temperatura.

El acondicionamiento del termistor es muy sencillo se basa en el funcionamiento de un divisor de voltaje para lo cual los valores de las resistencias se pueden tomar de diseños ya establecidos.

Su funcionamiento consiste en el caso de que exista un incremento en el IGBT el valor de la resistencia disminuye y el voltaje del divisor también disminuye, una vez ingresado al comparador como se muestra en la figura 46 como resultado da un valor de 0 lo cual es enviado al micro-controlador para que dé el pulso de fallo.

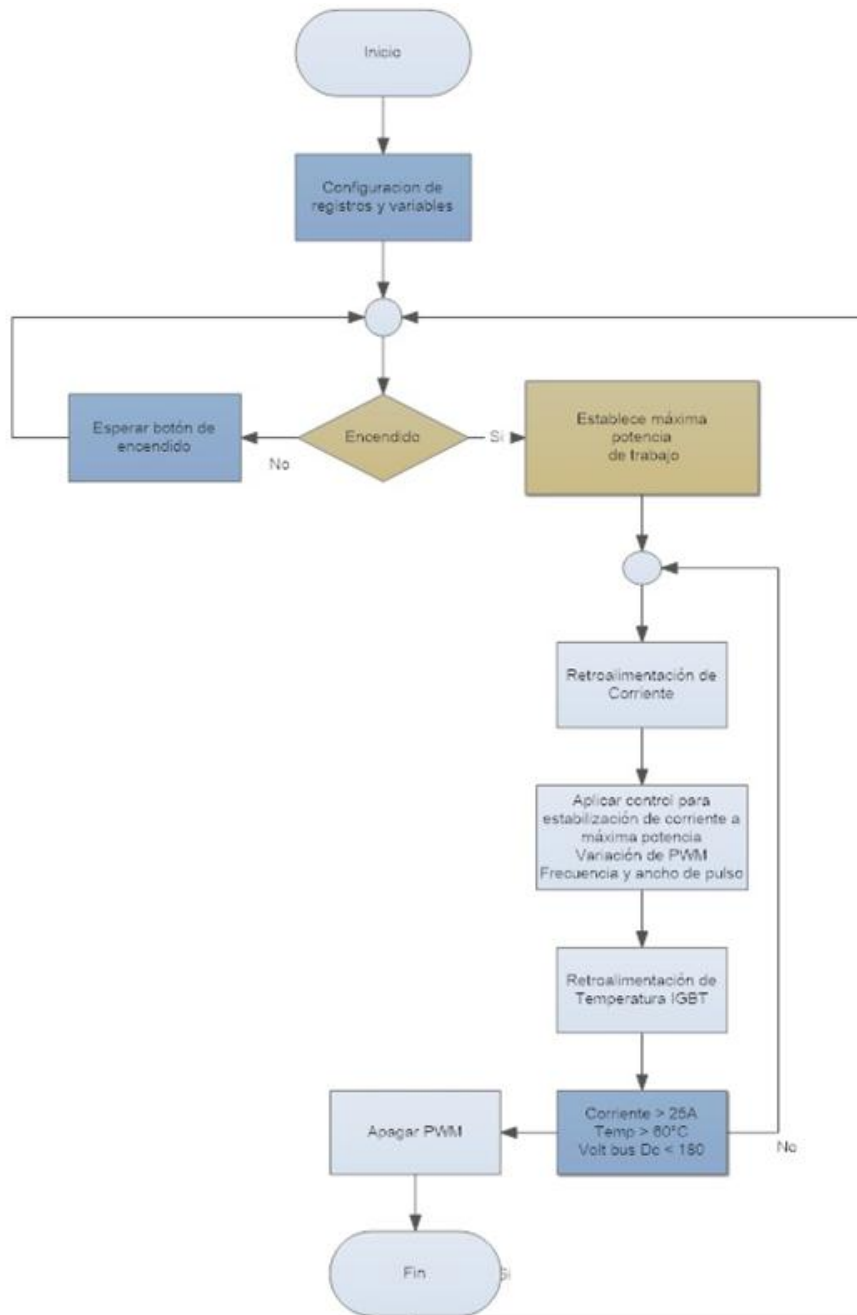
2.4. Diseño del circuito de control y algoritmo para el sistema de calentamiento de agua por inducción electromagnética.

Como parte fundamental del diseño del algoritmo de control es formar el algoritmo describiendo en un diagrama de bloques el comportamiento que se desea realizar, para el caso del calentador de inducción electromagnética el sistema de control es el encargado de controlar el ancho de pulso, que posteriormente ingresa al dispositivo de conmutación con la finalidad de

controlar los picos de corriente y proteger su vida útil, así como también funciones de control en periféricos de entrada, pulsadores y de salida como los display.

2.4.1 Algoritmo de control.

Establece el comportamiento general del sistema de control.



El sistema está diseñado a partir del algoritmo de control, la programación del microcontrolador PIC-16f876 A realizado en microcode, presentado en los anexos , consiste en esperar el encendido del sistema mediante un botón, no requiere del pulso de arranque, ya que este está delimitado por la carga en este caso es la tubería de acero galvanizado; se enciende en el máximo nivel de potencia, dando la opción de intercalar otros niveles de potencia, pasa a la realimentación de corriente mediante la medición realizada por el sensor de corriente el transformador de corriente con relación 1 : 200 una vez realizada la realimentación aplica el control para la estabilización de corriente , pasa mediante el circuito sincronizador de pulsos, la onda PWM modifica los valores de frecuencia y ancho de pulso, se realimenta la temperatura del IGBT en el caso de estar menor a 60 ° Celsius en el IGBT, apaga la PWM, caso contrario regresa a la realimentación de corriente, hasta llegar al set point de corriente, todo este proceso se realiza a una alta frecuencia.

2.4.2 Selección de microcontrolador para el sistema de control.

El desarrollo realizado en la aplicación del calentador de inducción electromagnética está creado en base al microcontrolador PIC 16F631, una vez realizados ensayos con otras tarjetas controladoras y debido a su correcto funcionamiento en pruebas se procedió a implementarlo; se encarga de recibir e interpretar las señales eléctricas que provienen de los sensores, circuitos electrónicos lazos de realimentación en el control, para tomar acciones y presentar un correcto funcionamiento del sistema integral.

Entre las características que el micro controlador presenta son las siguientes, permitiendo elegibilidad para la aplicación.

- El número de entradas y salidas se ajustan a la aplicación de tal manera que no se desperdicia este recurso usando un microcontrolador de mayor gama.

- Tiene una alta velocidad de operación, la cual es necesaria y requerida por la aplicación ya que el sistema trabaja a alta frecuencia usando tarjetas controladoras como arduino, no se obtuvieron los resultados esperados.
- Buena capacidad de memoria.
- Fácil programación, cuenta con un reducido set de instrucciones.

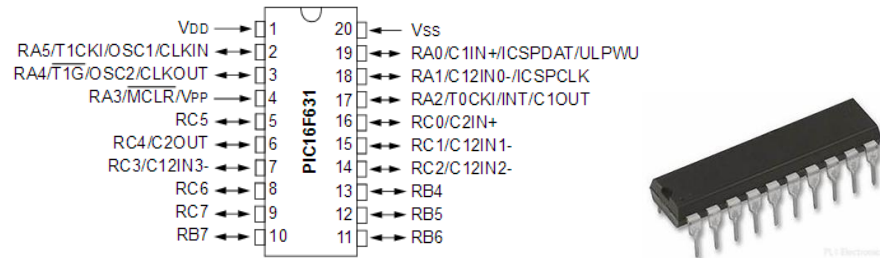


Figura 49 PIC 16F631 y descripción de los pines de entrada y salida

Fuente: <http://mech.vub.ac.be/teaching/info/mechatronica/PIC16F87XA.pdf>

Circuito básico de polarización y de reset para el micro controlador utilizado en el desarrollo del sistema, los valores R1, R22 y C1 se seleccionaron de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

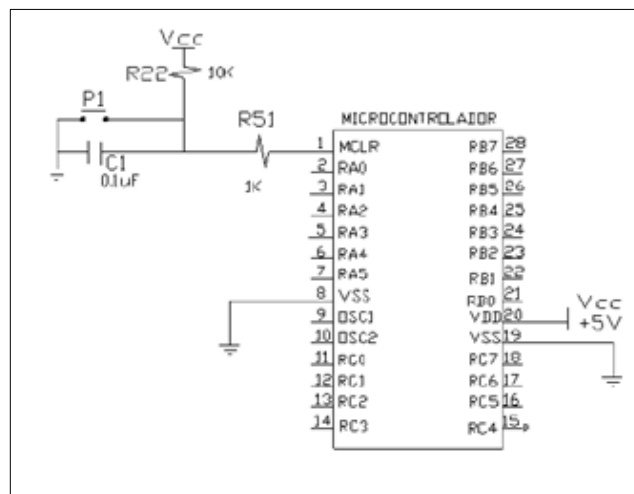


Figura 50 Circuito básico de polarización del reset.

Fuente: <http://mech.vub.ac.be/teaching/info/mechatronica/PIC16F87XA.pdf>

Entre las principales características del micro controlador por las cuales se eligió el controlador se presentan a continuación.

Tabla 5

Características Micro controlador PIC16F631A

| Características | Descripción |
|-------------------------------------|----------------------|
| Frecuencia de Operación | DC-20MHz |
| Memoria de programa FLASH(Bytes) | 8k |
| Memoria de datos(Bytes) | 368 |
| Memoria EEPROM de datos (Bytes) | 256 |
| Fuentes de interrupción | 14 |
| I/O puertos: | Puertos A,B,C |
| Timers | 3 |
| Módulo Captura/Comparación/PWM | 2 |
| Comunicación Serial | MSSPP,USART |
| Modulo Análogo a digital 10 bit | 5 canales de entrada |
| RESET y retardos | POR,BOR(PWRT,OST) |
| Brown-out reset programable | SI |
| Set de instrucciones | 35 instrucciones |

Fuente: <http://mech.vub.ac.be/teaching/info/mechatronica/PIC16F87XA.pdf>

2.4.3 Diseño del circuito de control

En la figura 49 se muestra el diseño realizado en un software de simulación, permitiendo comprobar el comportamiento del circuito antes de la implementación.

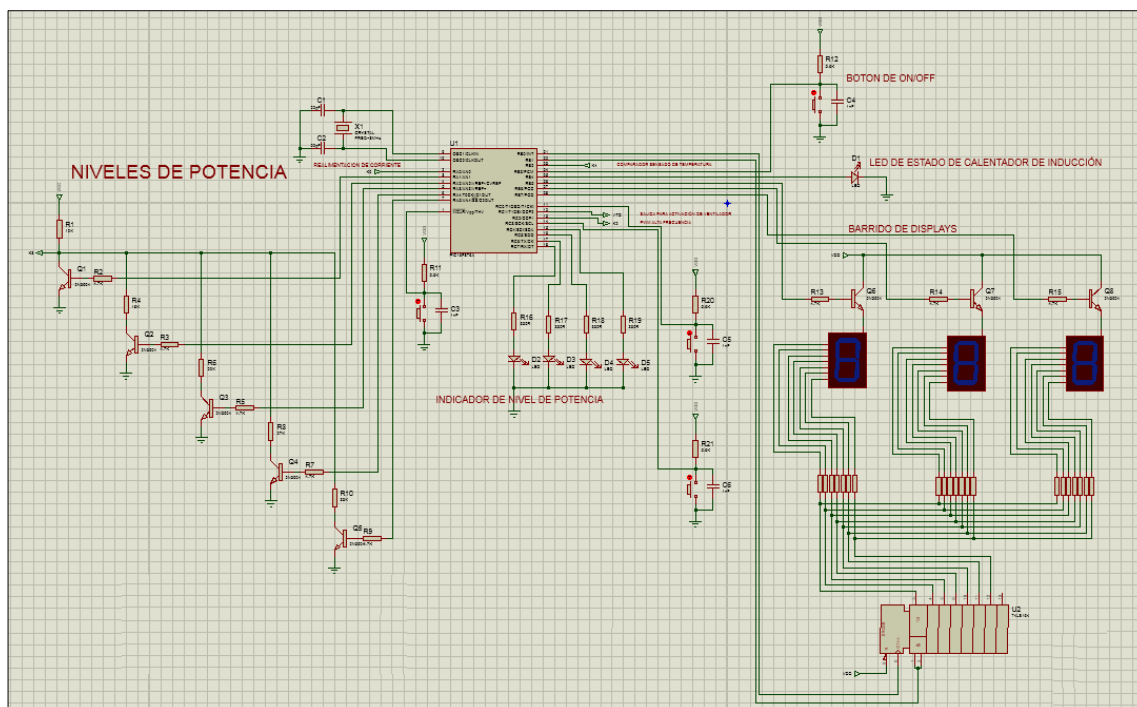


Figura 5147 Diseño de circuito de control realizado en software de diseño electrónico

Los elementos electrónicos que intervienen en el circuito de control, es un micro controlador PIC 16f631, encargado de realizar la variación del ancho de pulso para las diferentes posiciones de potencia programadas.

Cuenta con pulsadores que permiten el encendido y apagado del sistema electrónico, pulsadores que están programados mediante un contador para cambiar los niveles de potencia en sentido ascendente y descendente, se puede verificar en los leds indicadores.

Funciones de visualización mediante tres display los mismo que dan información al usuario sobre la potencia seleccionada para el caso desde la H1,H2,H3,H4,H5 y H6.

A parte realiza funciones de alarma, para el caso de error por sobre temperatura en el IGBT muestra E1 y E2 para el caso de sobre corriente.

También cuenta con un decodificador para los display usado en este caso es el elemento 74LS164.

En cuanto a los niveles de potencia que consisten en entradas transistorizadas, las mismas que tienen niveles de voltaje para que una vez procesadas permiten que los comparadores empiecen a trabajar en el circuito sincronizador de pulsos.

El programa realizado para el microcontrolador será detallado en los anexos.

2.5 Diseño de la bobina de inducción electromagnética.

Para el diseño de la bobina de inducción electromagnética, principalmente se la realiza de manera experimental, por un proceso constante de ensayo error, dentro de los parámetros sugeridos en la teoría, se define ciertos pasos que se deben seguir para la construcción siendo esta una manera práctica de crear un dispositivo que funcione para la aplicación y ante la desventaja de no existir elementos comerciales que se ajusten para aplicaciones de inducción electromagnética.

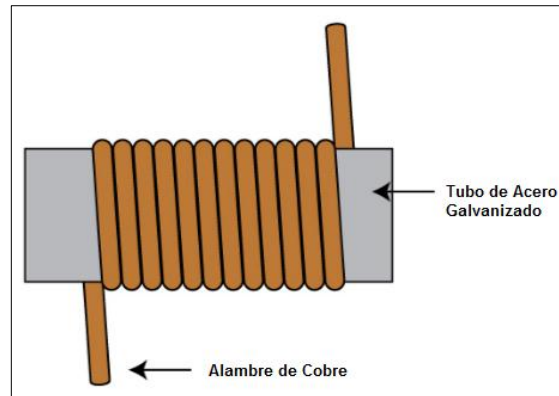


Figura 52 Esquemático de la bobina de inducción electromagnética.

Para el diseño de la bobina vamos a partir con los siguientes datos conocidos: diámetro del alambre, diámetro de la bobina y el valor de la bobina.

Con estos datos podemos utilizar la siguiente aproximación:

$$L = 0.0790 * \frac{a^3}{p^2} * F \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde:

a = Radio de la bobina.

P = Diámetro del cable de la bobina.

F = Factor de forma que es función de las dimensiones de la bobina.

Para el diseño de la bobina asumimos los siguientes valores:

$a = 3.25$ cm.

Para este diseño se va a utilizar un cable desnudo #12 AWG que soporta la cantidad de corriente requerida para el óptimo funcionamiento del calentador de inducción, entonces;

$P = 2.32$ mm = 0.232 cm

Entonces despejando la ecuación 1, tenemos:

$$F = 12.658 * \frac{P^2}{a^3} * L$$

Ecuación 29

$$F = 12.658 * \frac{(0.232\text{cm})^2}{(3.25\text{cm})^3} * 331.11\mu\text{F}$$

$$F = 6.57$$

Con el valor de F se va a la gráfica y se obtiene el valor $2a/l$, como muestra la (Figura 51) puesto que el diámetro es conocido, se obtiene fácilmente la longitud de la bobina.

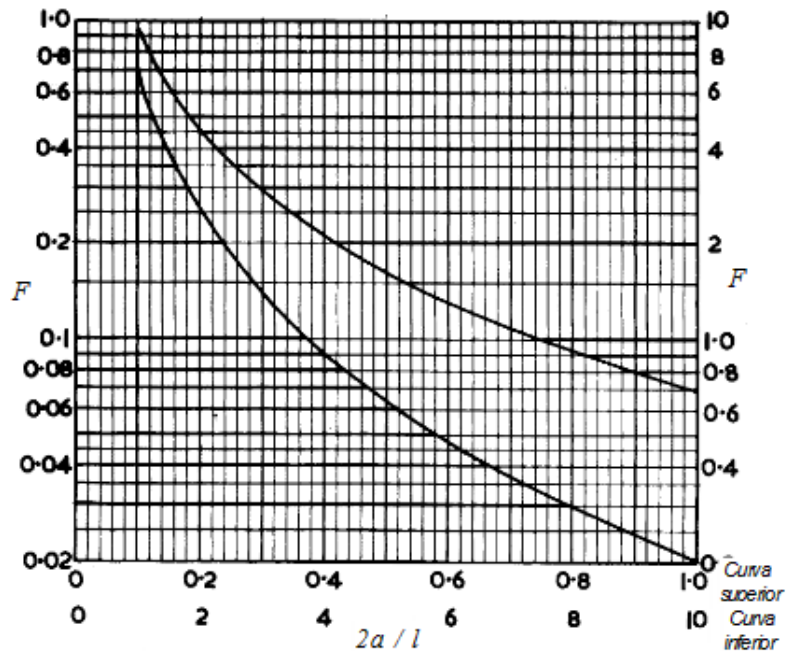


Figura 53 Gráfica para el diseño de bobinas según el diámetro

Fuente: (Pérez & Zamanillo), Diseño de Bobinas

De la gráfica se puede observar que $2a/l$ en la curva inferior es igual a 1.
Entonces, $l = 2a / 1 = 6.5 \text{ cm}$.
Número de vueltas = $N = l / P$
 $N = 6.5\text{cm} / 0.232\text{cm}$
 $N = 28.2$, entonces $N = 30$ vueltas.

Para la construcción de la bobina, se alambre de cobre esmaltado AWG de (#12) de diámetro, justificando la baja resistividad eléctrica del cobre y la posibilidad de ser refrigerada, su maleabilidad y bajo costo comercial.

Cabe destacar que se logró esta implementación en base al estudio realizado por Constatino Pérez Vega y José M Zamanilo Sáinz de la Maza, realizado en la Universidad de Cantabria en su investigación sobre DISEÑO DE BOBINAS, en donde los datos contribuyeron, a tener un importante aproximación, lo que permitió posible la manufactura y experimentación, con lo cual se obtuvieron excelentes resultados en el conjunto del sistema de calentamiento se trata de una bobina de una sola capa en donde con el diámetro de la bobina que son datos medibles se puede determinar su longitud, números de espiras e inductancia.

Tabla 6

Resistividad eléctrica en conductores

| SUSTANCIA | RESISTIVIDAD(OHM m) |
|------------------------|-----------------------|
| <i>Conductores</i> | |
| Plata | 1.47×10^{-8} |
| Cobre | 1.72×10^{-8} |
| Oro | 2.44×10^{-8} |
| Aluminio | 2.75×10^{-8} |
| Tungsteno | 5.25×10^{-8} |
| Platino | 10.6×10^{-8} |
| Acero | 20×10^{-8} |
| Plomo | 22×10^{-8} |
| Mercurio | 95×10^{-8} |
| Manganina | 44×10^{-8} |
| Constatán | 49×10^{-8} |
| Nicromo | 100×10^{-8} |
| <i>Semiconductores</i> | |
| Carbono puro(grafito) | 3.5×10^{-5} |
| Germanio puro | 0,6 |
| Silicio puro | 2300 |
| <i>Aislantes</i> | |
| Ámbar | 5×10^{14} |
| Vidrio | $10^{10} - 10^{14}$ |
| Lucita | $> 10^{13}$ |
| Mica | $10^{11} - 10^{15}$ |
| Cuarzo(fundido) | 75×10^{16} |
| Azufre | 10^{15} |
| Teflón | $> 10^{13}$ |
| Madera | $10^8 - 10^{11}$ |

Fuente: Serway. Physics for Scientists and Engineers

En la (Tabla 5) se muestra la resistividad eléctrica que presentan algunos materiales, razón por la que se escogió el cobre, es por su baja resistividad eléctrica y bajo costo, se entiende por resistividad eléctrica a la resistencia específica de cada material a oponerse al paso de la corriente, para la aplicación de inductores y específicamente en la aplicación de inducción electromagnética se debe tener el flujo de corriente para generar el magnetismo en el inductor.

2.5.1 Refrigeración.

Durante el proceso de calentamiento la bobina experimentara pérdidas eléctricas por efecto joule, debido a su resistencia eléctrica; para evitar que la bobina de cobre incremente su temperatura e influya sobre el sistema de calentamiento se puede considerar un flujo de agua alrededor de la bobina para la refrigeración, esta posibilidad se la puede incorporar en el sistema de la bobina en caso de ser necesario, con la condición de que las espiras de la bobina sea hueca; como una solución rápida al sistema de calentamiento se acopla un ventilador que ayude a disipar el calor que la bobina de inducción experimente, en las pruebas de funcionamiento se detallará la temperatura que presenta el calentador de inducción electromagnética tanto en la tubería que es carga, como en la bobina que es el inductor y la temperatura en el agua que cambia por contacto directo con la tubería; se puede considerar para el presente proyecto no tener refrigeración en la bobina ya que es conveniente que se conserve el calor dentro de la tubería con la finalidad de generar mayor eficiencia en el sistema de calentamiento.

2.6 Diseño Mecánico y selección de materiales que componen la carcasa.

El diseño de la carcasa se lo realizó en un software especializado de diseño, considerando las variables físicas a intervenir como por ejemplo el habitáculo que va a ocupar la bobina de inducción, su peso estimado y temperatura que alcanza, es importante tener en cuenta los materiales a utilizar ya que la bobina de inducción debe estar separada completamente del circuito electrónico.

En el siguiente subcapítulo se realiza el análisis estático de la carcasa que soporta a la bobina de inducción y el análisis térmico para las temperaturas de trabajo que presenta el sistema, con lo cual se justifica el diseño de la carcasa y la utilización de materiales en la misma.

2.7 Selección de materiales de la carcasa.

De la siguiente lista de materiales se ha analizado las propiedades mecánicas de algunos materiales en donde se debe seleccionar la más idónea para este tipo de aplicación, se requiere de un material que permita crear una carcasa que sea robusta y resistente, con características no ferromagnéticas ya que alterarían el campo magnética que la bobina genera, a parte que tenga una baja conductividad térmica con la finalidad de aislar hacia el exterior del calor que la bobina genera.

Tabla 7

Características Mecánicas de algunos materiales.

| ALUMINIO | | | | | | | |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS: | | | | Coeficiente de Poisson: 0.34 Módulo de Elasticidad: 6.900 Kg/mm ² Módulo de Torsión: 2.700 Kg/mm ² | | | |
| PROPIEDADES | ALUMINIO | ACERO | ACERO INOX. | COBRE | PLOMO | ZINC | NIQUEL |
| Densidad a 20 °C | 2.7 | 7.8 | 7.9 | 8.9 | 11.3 | 7.1 | 8.8 |
| Temperatura de fusión °C | 658 | 1.450 | 1.425 | 1.083 | 327 | 419 | 1.455 |
| Coefficiente de dilatación lineal entre 20 y 100 °C | 23 X 10 ⁻⁶ | 12 X 10 ⁻⁶ | 12 X 10 ⁻⁶ | 16 X 10 ⁻⁶ | 29 X 10 ⁻⁶ | 39 X 10 ⁻⁶ | 13 X 10 ⁻⁶ |
| Color específico Cal/g°C a 20°C | 0.28 | 0.10 | 0.12 | 0.09 | 0.03 | 0.09 | 0.11 |
| Conductividad térmica Cal cm/cm ² Seg °C a 20°C | 0.52 | 0.11 | 0.04 | 0.92 | 0.08 | 0.27 | 0.23 |
| Resistividad eléctrica ohm. Mm ² /m a 20°C | 0.03 | 0.11 | 0.70 | 0.02 | 0.21 | 0.06 | 0.07 |
| Módulo de elasticidad Kg/mm ² | 6.900 | 20.400 | 19.600 | 11.200 | 1.600 | 8.400 | 21.000 |

Fuente: (<http://es.slideshare.net/EduardoRuiz40/aluminio6063>, s.f.)

Como se puede observar en la (Tabla 6) el material que más se ajusta para la carcasa que contiene la bobina, el aluminio presenta una baja conductividad térmica con cual se aprovecha esta característica como disipador de calor

Cabe recalcar que la caja debe ofrecer características no ferromagnéticas y presentar una protección a perturbaciones en el campo magnético, en el

capítulo anterior se presentan los materiales usados por cada elemento que la integran.

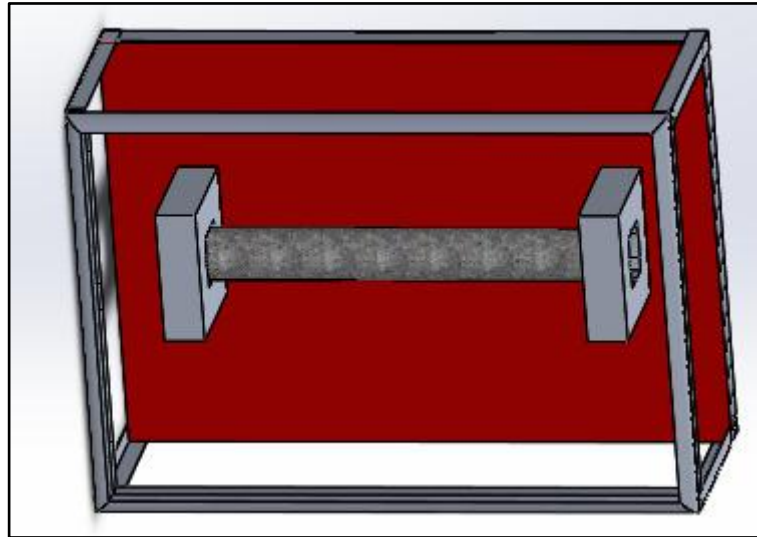


Figura 48 Carcasa de soporte para la bobina de inducción electromagnética

A continuación se van a presentar los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en un software de diseño especializado, donde se realiza un análisis estático y térmico.

A continuación se muestra los resultados obtenidos de un análisis estático realizado con la ayuda del programa Solid Works para obtener datos de la resistencia de la carcasa de la bobina.

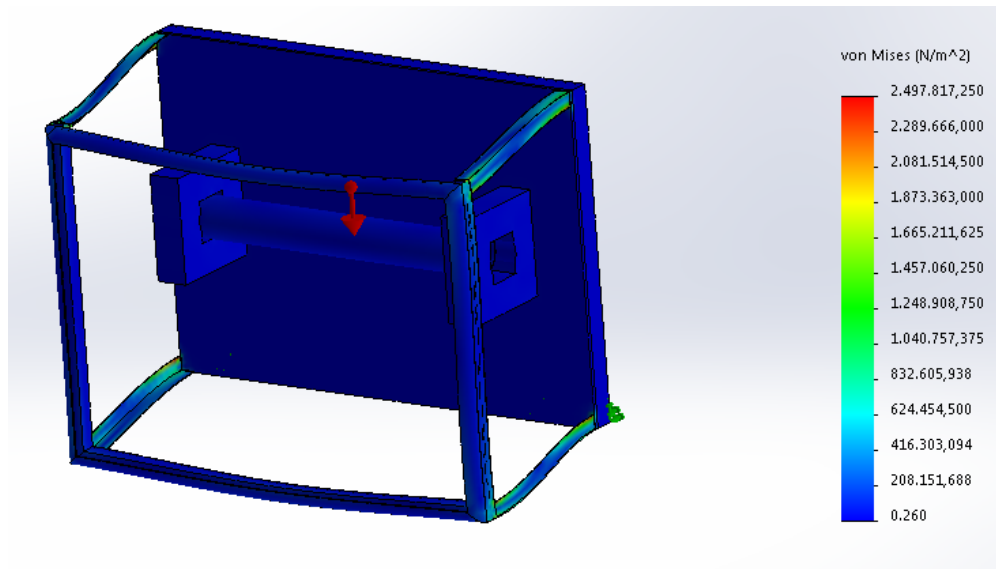


Figura 55 Tensiones Von Mises en carcasa

Para este análisis se obtiene un coeficiente de 0.26

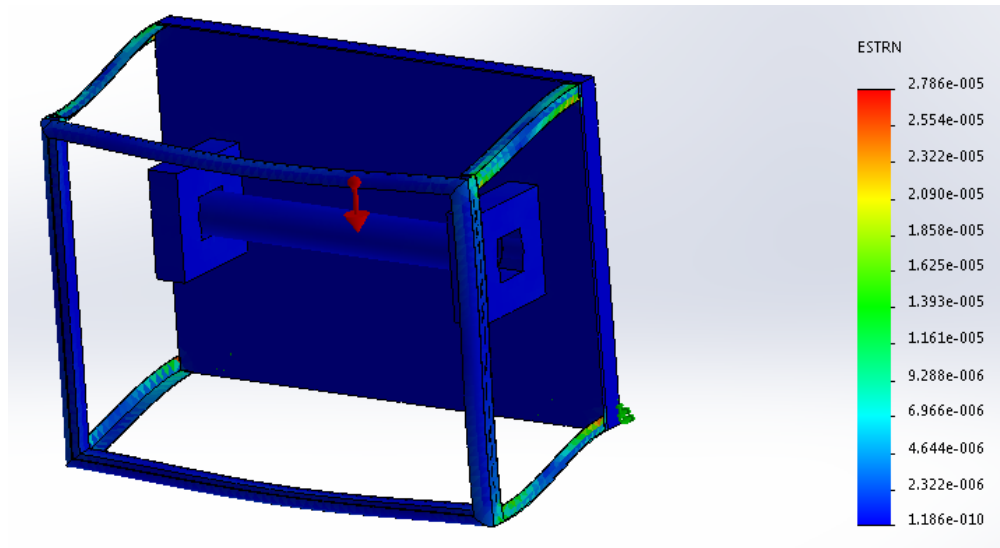


Figura 56 Deformaciones unitarias en carcasa.

Para este análisis la deformación unitaria es de 1.186 e -10

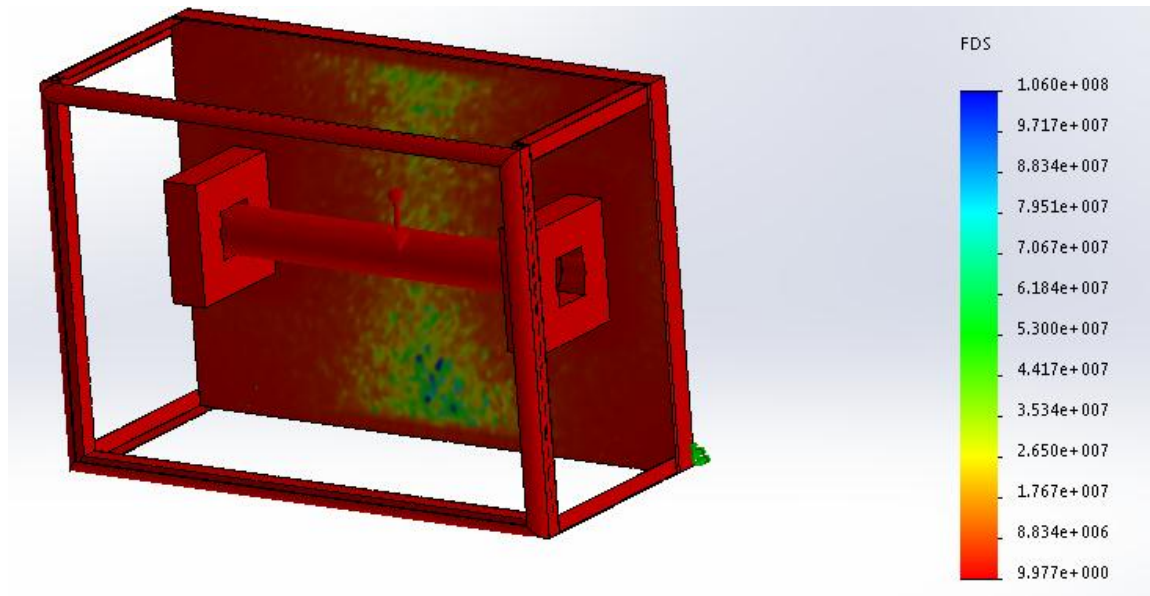


Figura 57 Factor de seguridad en carcasa

Para este análisis se obtiene un factor de seguridad de 9.9

Con los resultados obtenidos a base de la simulación se puede observar que el diseño queda validado ya que son admisibles valores mayores a 2.5 para el factor de seguridad.

Se realizó el estudio térmico de la carcasa determinando lo siguiente:

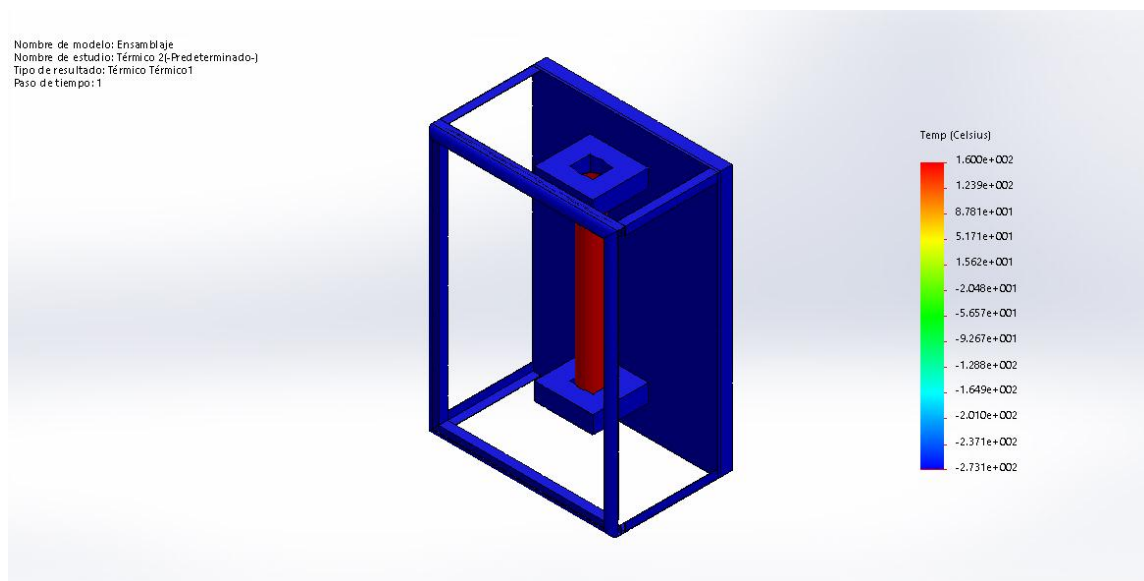


Figura 58 Análisis Térmico

A 160 ° C la bobina de inducción no es capaz transferir el calor a los materiales que lo contienen, ya que el aluminio actúa como disipador térmico siendo de esta manera bien seleccionado para la aplicación.

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

3.1. Construcción de la bobina de inducción electromagnética para el sistema de calentamiento.

3.2 Manufacturación de la bobina.

La manufacturación de la bobina se lo realizó de manera manual y después de haber probado con diferentes geometrías de manera experimental se pudo realizar la fabricación de una bobina que se adapte a la necesidades del prototipo, para mantener una separación entre las espiras de la bobina de inducción se usó una resina que permite la unión entre espiras y la separación de la tubería de acero galvanizado, material con el cual están hechas las tuberías de uso domésticas en instalaciones hidro-sanitarias principalmente y se usó en el prototipo.

3.3 Construcción del sistema de calentamiento.

El sistema de calentamiento se procedió a realizarlo mediante una tubería de acero galvanizado, usando este material ya que es el más común en instalaciones hidro-sanitarias en la mayoría de los hogares; gracias a sus características ferromagnéticas proporcionadas por el acero que lo compone y el recubrimiento de zinc el mismo que no permite que el acero se oxide ante el paso del agua; permite comportarse para la aplicación como un núcleo ferromagnético el mismo que permite generar la inducción electromagnética en conjunto con la bobina generar el sistema de calentamiento, de esta forma se

obtiene un calentamiento inmediato al paso del agua, de esta manera se procedió en la realización del prototipo en donde a continuación se muestran las fotografías de la construcción del sistema mencionado.



Figura 59 Bobina de inducción implementada.

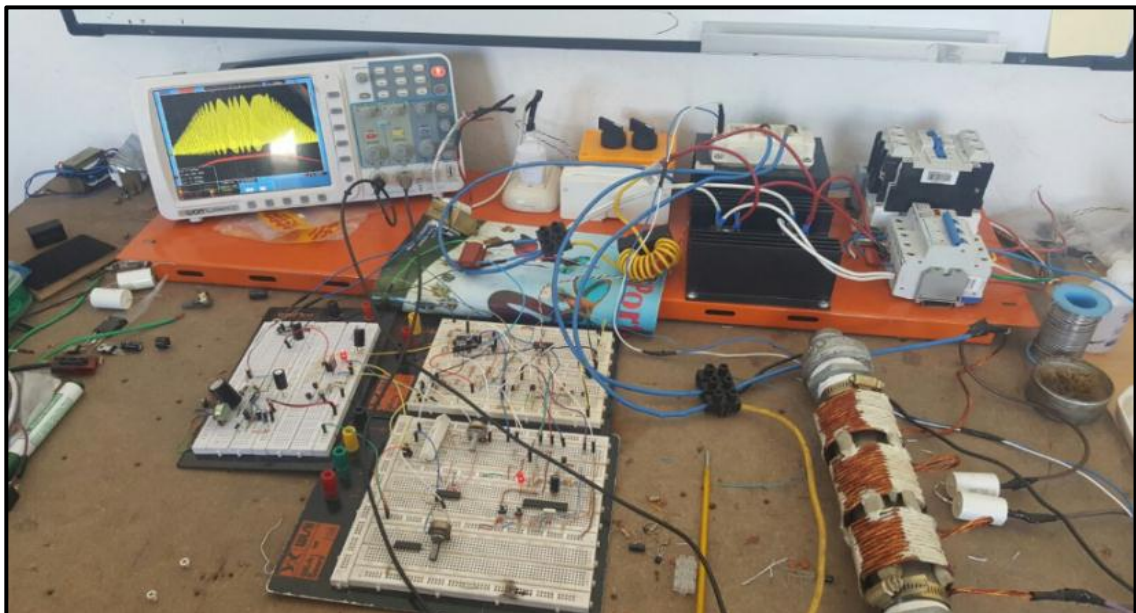


Figura 60 Implementación de la Bobina de inducción y circuito de potencia.

3.3 Implementación del circuito de potencia.

Para la implementación del circuito de potencia se usaron los valores obtenidos en la simulación, se realizaron cambios no relevantes con la finalidad de obtener mejores resultados en la implementación de dicho circuito.

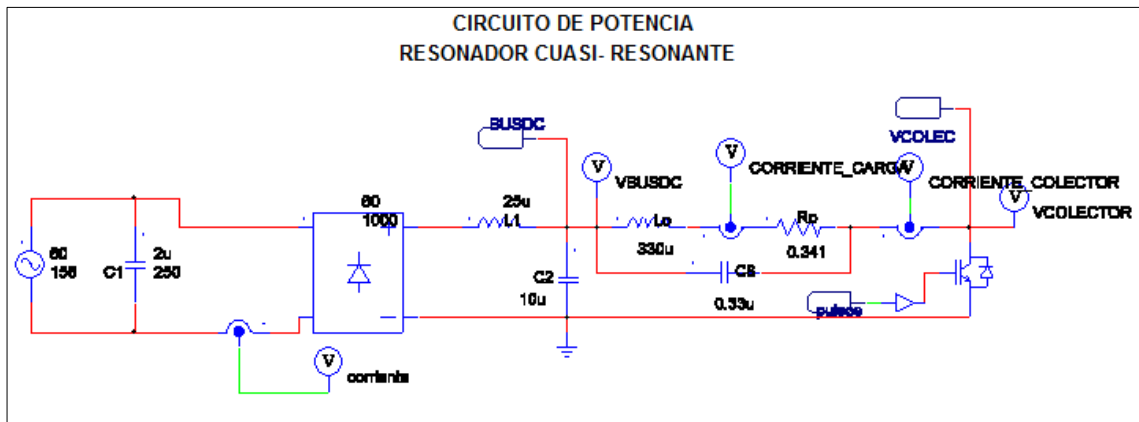


Figura 61 Simulación circuito de potencia, realizado el Power Sim.

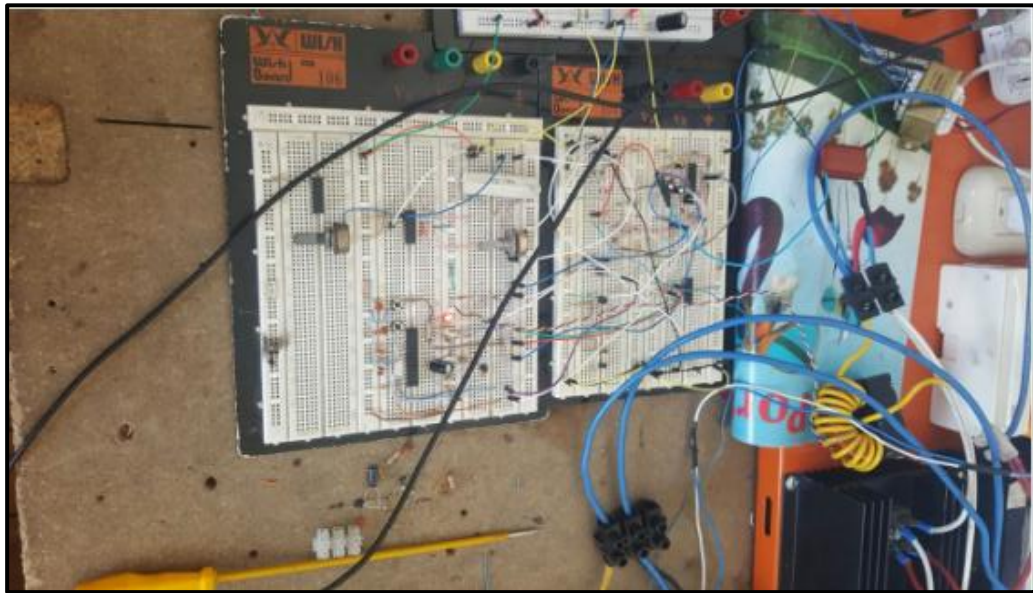


Figura 62 Implementación circuito de potencia, realizado en Protoboard.

En la implementación del circuito de potencia se procedió a armar el circuito de prueba con los valores que indica el diagrama, antes de esto se realizó la simulación en PSIM, software especializado en la simulación de circuitos de potencia ya que nos entrega valores aproximados a la realidad, una vez implementado se procede a analizar las gráficas que nos entrega en los puntos de prueba obteniendo las siguientes:

3.3.1 Voltaje en bus dc.

En el siguiente extracto se procede a comparar las formas de onda obtenidas en la simulación y las que se obtuvieron en la implementación del circuito de esta manera se va a presentar las gráficas de las formas de onda con la finalidad de tener un punto referencial y validar el diseño mediante la implementación.

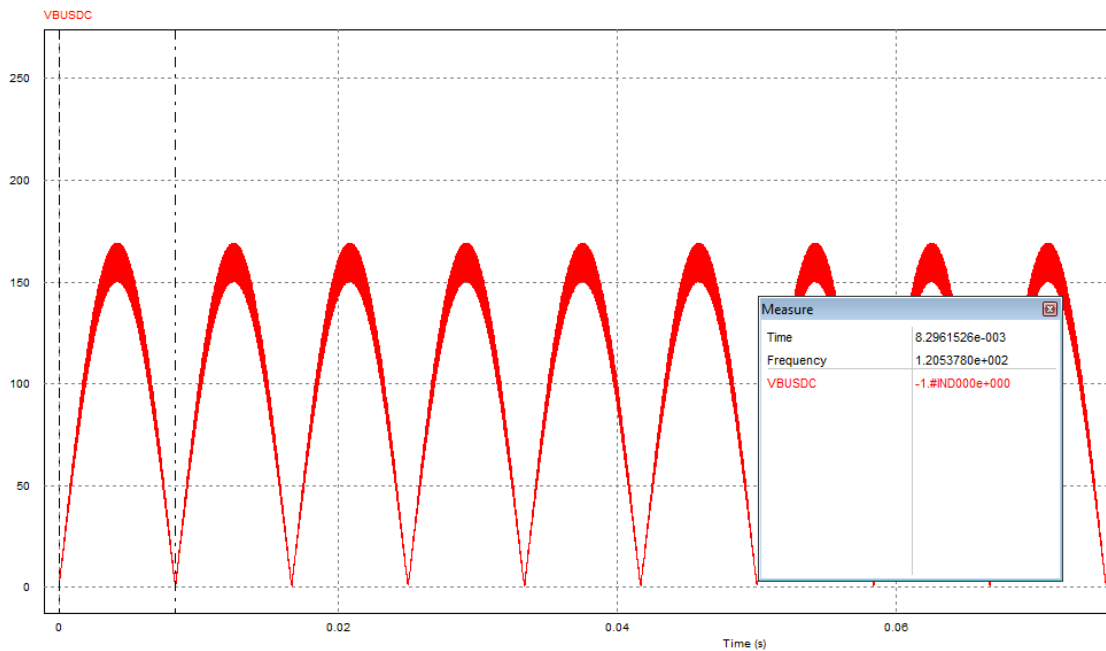


Figura 63 Voltaje Rectificado Bus DC

Voltaje 156 V

Frecuencia 120 Hz

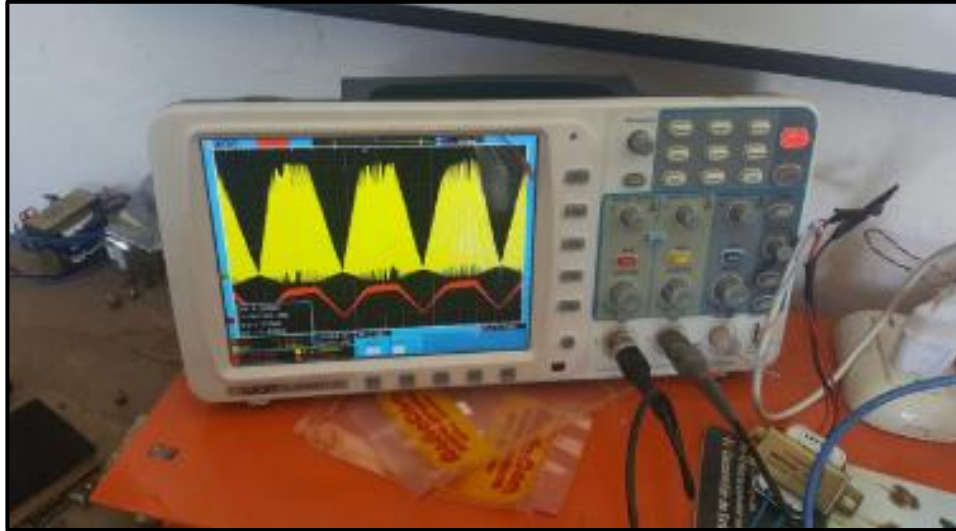


Figura 64 Forma de onda rectificada en Bus DC, osciloscopio.

Onda roja muestra el voltaje rectificado en el BUS DC

Como se observa en la forma de onda presenta un voltaje de 156 V y una frecuencia de 120 Hz con lo cual cumple con una fuente de corriente alterna de 110 V y 60 Hz

La corriente de carga cumple con los cálculos realizados en el diseño en el circuito presenta una corriente de 18 A

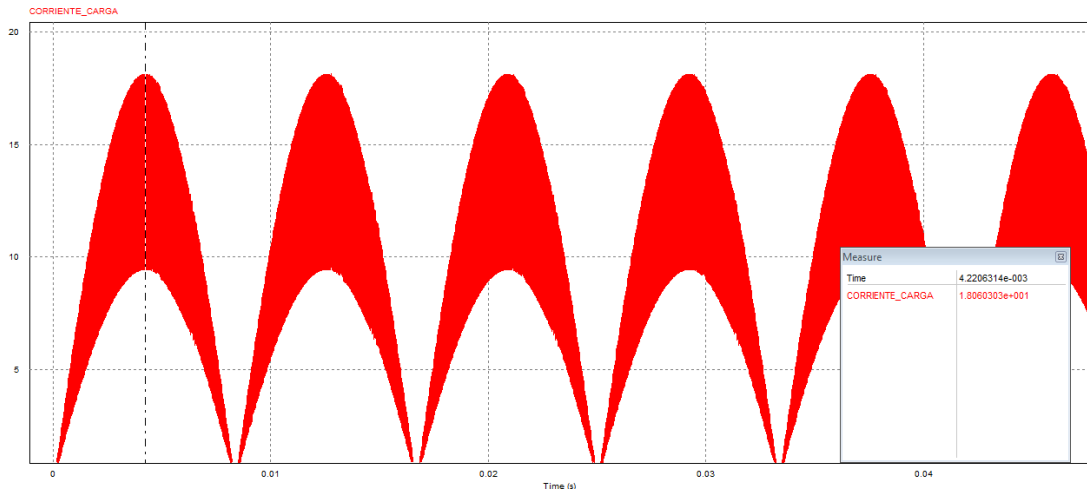


Figura 65 Forma de onda rectificada en Bus DC, realizado en Power Sim

3.4 Implementación del circuito de disparo.

En el siguiente circuito que muestra la (Figura 64) se muestra el circuito de disparo con el que se desarrolla el presente trabajo se usa la misma dinámica de los circuitos anteriores se presenta el circuito simulado; en la implementación se realizaron cambios menores en cuanto a valores de resistencias con la finalidad de obtener los mejores resultados.

3.4.1 Circuito de sincronización de pulsos realizado en software especializado de simulación.

En la (Figura 64) se muestra el circuito de sincronización de pulsos el cual es el responsable de mantener la potencia de salida estable mediante el control de sobre voltaje en el circuito resonante y el control de corriente en la entrada.

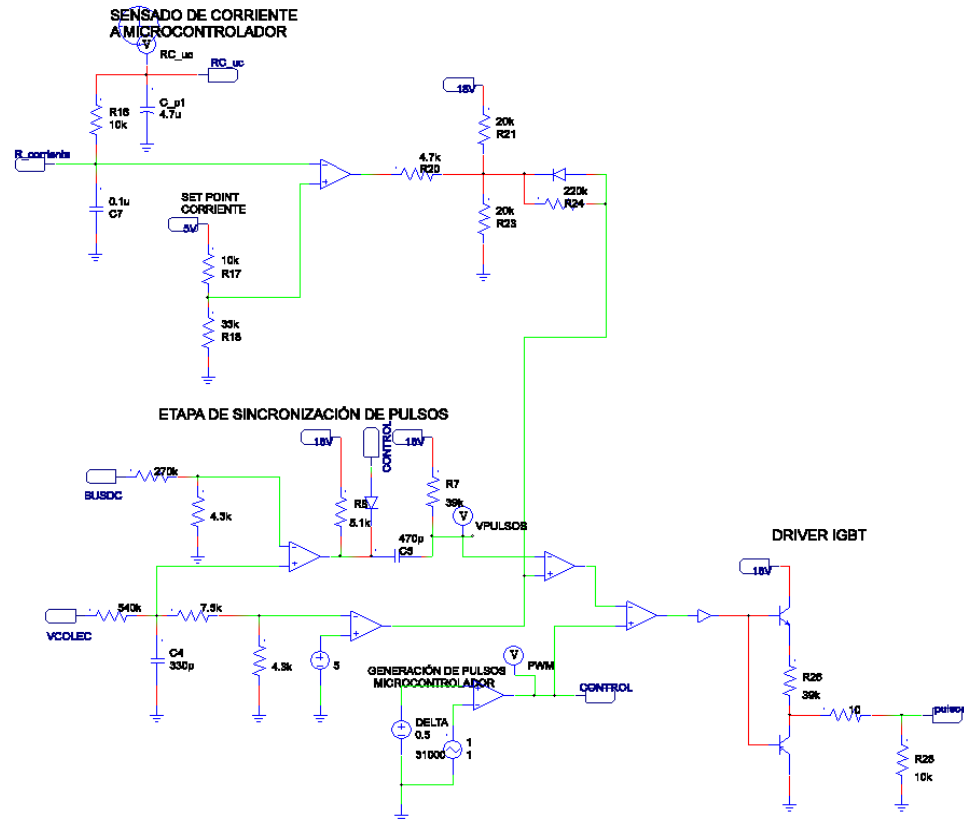


Figura 66 Circuito de disparo de pulsos, realizado en Power Sim.



Figura 67 Circuito de disparo, implementado protoboard.

Como se puede observar en la (Figura 65) se realizó la implementación del circuito de disparo, este circuito es constituido por el circuito de realimentación

de corriente, el circuito de sincronización de pulsos y el microcontrolador lo que permite tener un pulso estable, con protección sobre voltaje y sobre corriente dando una doble protección al elemento de conmutación IGBT por hardware y software.

3.5 Implementación de la tarjeta de control.

Para el diseño e implementación del circuito de control uno de los pasos importantes es considerar los acondicionamientos de los sensores, se debe contemplar los lazos de realimentación de la corriente y voltaje y la etapa de ingreso y visualización de datos; para el caso del calentador se contempla la temperatura como la variable de ingreso en un cierto rango establecido en el algoritmo de control de tal manera que no se tenga el riesgo de producir quemaduras al usuario final.

Asignación de los terminales del micro controlador en la tarjeta de control del calentador de inducción electromagnética.



Figura 68 Implementación circuito de control, protoboard

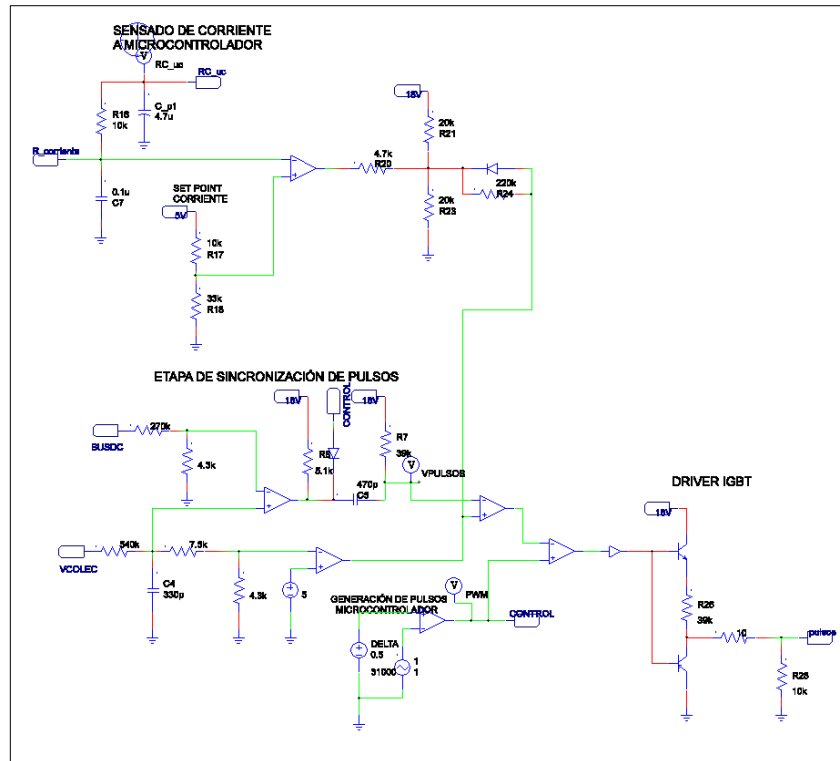


Figura 69 Circuito de disparo.

Para la simulación se colocó un generador de pulsos el cual simula los pulsos que mediante software el microcontrolador está entregando, un error claro de concepto es pensar que se puede generar directamente una señal PWM e ingresarla directamente en el gate del IGBT para generar la resonancia, mediante pruebas experimentales se logró demostrar que esa configuración carece de validez ya que requiere todo un sistema de realimentación y sincronización de pulsos para estabilizar la señal y poderla enviar al gate del IGBT.

En la simulación se obtienen las siguientes formas de onda, los cuales representan los pulsos de entrada al IGBT.

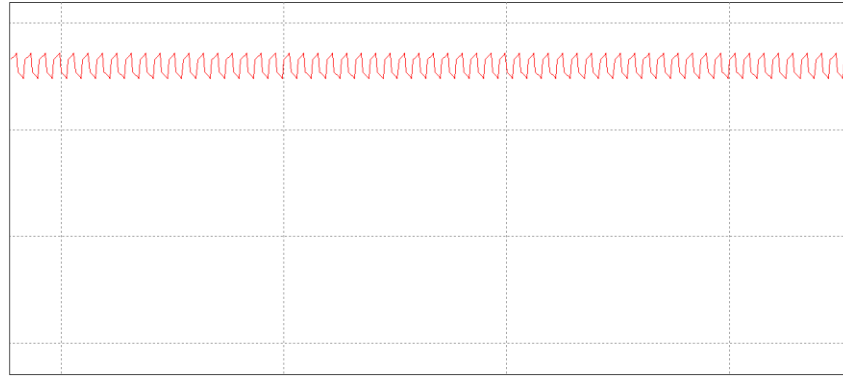


Figura 70 Ondas de pulsos generados, Power Sim

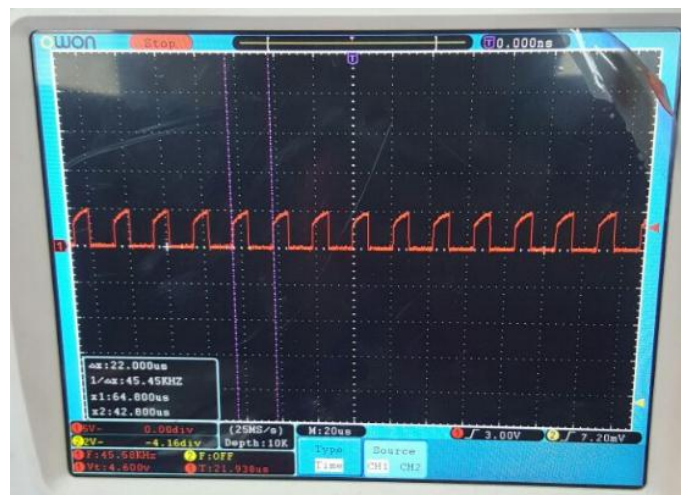


Figura 71 Pulsos a alta frecuencia del micro controlador, osciloscopio

La frecuencia que nos muestra el osciloscopio es de 31 KHz lo cual es propicio para aplicaciones de inducción electromagnética es una frecuencia de trabajo, que permite que la bobina de inducción entre en resonancia.

3.7 Montaje de la carcasa y de los elementos electrónicos.

La bobina de inducción electromagnética se coloca en una caja con diseño realizado en un software de diseño mecánico, analizando los materiales que se pueden usar para el proyecto se requiere que la caja que contenga a la bobina

ofrezca prestaciones no ferromagnéticas y disipadoras de calor ya que interesa que no se transmita el calor en la caja si no se concentre en la bobina, ya que es el elemento que se encuentra en contacto con el usuario.

Para la selección de materiales para la implementación de la caja que contiene la bobina de inducción se pensó en aluminio, en la implementación de placas electrónicas es uno de los elementos que mayormente se usa en la disipación de calor, de esta manera se realiza el siguiente diseño.

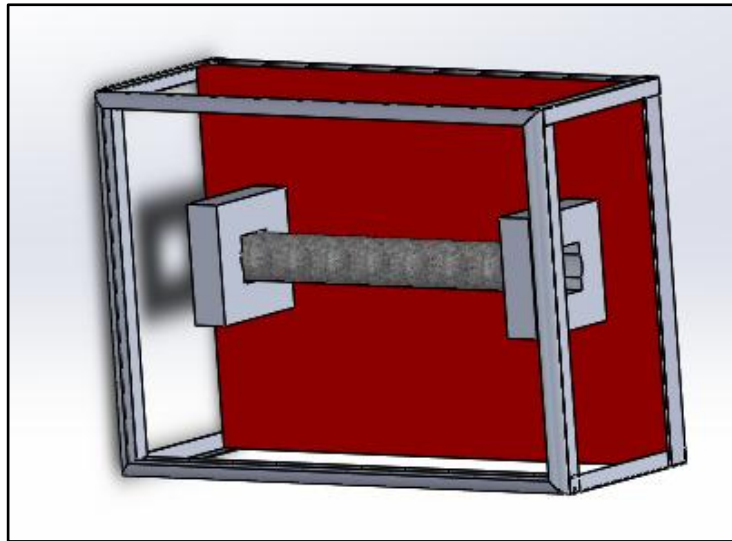


Figura 72 Diseño de Carcasa de Bobina de Inducción Electromagnética.

Como se muestra en la figura Obtenida del diseño realizado en software de diseño mecánico, se muestra el soporte de la bobina de inducción realizada con perfiles de aluminio y con base de compuesto de aluminio con la finalidad de que no perturbe el campo electromagnético generado por la bobina.

Se detalla la implementación física de las placas electrónicas de potencia y control en las cuales está conformado el prototipo de calentamiento de agua por inducción electromagnética, para lo cual se usaron los elementos que se muestran en la (Figura 71).



Figura 73 Implementación física placas de potencia

Para la parte electrónica se implementa en un gabinete metálico que cuenta con protección eléctrica y ofrece grandes prestaciones contra golpes y polvo lo cual preserva la integridad funcional del circuito, protege a los usuarios de riesgo eléctrico al ser solo intervenida por personas autorizadas.

3.8 Integración de sistemas.

Se muestran en la (Figura 72) la integración de todos los sistemas incluyendo un módulo de pruebas con la finalidad de comparar la eficiencia con una ducha eléctrica con lo cual está sustentado el diseño aplicado en el prototipo.



Figura 74 Sistemas Integrados, prototipo de calentamiento de agua por inducción electromagnética

Se puede apreciar la caja en donde se encuentran los componentes electrónicos del sistema de calentamiento por inducción electromagnética con su respectivo display, al lado izquierdo la bobina de inducción con la carcasa acoplada a casa uno de sus extremos tubería de agua caliente de $\frac{3}{4}$ de pulgada generalmente usada en este tipo de instalaciones.

En el siguiente capítulo de las pruebas de funcionamiento se va a mostrar los datos obtenidos en cuanto a temperatura y eficiencia en comparación con el calentador de agua eléctrico convencional.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de la implementación del prototipo de calentamiento de inducción electromagnética, se realizan diferentes pruebas sobre todo en el funcionamiento electrónico.

4.1 Pruebas de funcionamiento del sistema electrónico.

En el capítulo anterior se realizó una analogía entre las formas de onda de la simulación y las formas de onda obtenidas en el circuito implementado por lo cual no se hará hincapié en las formas de onda, presentando el funcionamiento general del sistema electrónico.

Una de las principales pruebas de funcionamiento para las que el prototipo está dirigido es demostrar el bajo consumo que presentan este tipo de calentadores de inducción electromagnética, por lo que se realiza la medición de corriente a la entrada y se realiza una comparación con un ducha eléctrica con estos dos elementos se va a realizar una tabla que muestre el calentamiento que se obtiene del agua a la salida y el consumo que presenta cada uno de estos sistemas electrónico y eléctrico respectivamente, determinando la capacidad del prototipo de calentador de inducción electromagnética.

Con la finalidad de calcular la potencia de consumo de cada uno de los sistemas de calentamiento tanto del prototipo de calentamiento de inducción electromagnética como de la ducha eléctrica se mide la corriente de entrada.

Para la medición de corriente se utilizó la pinza amperimétrica FLUKE 322, se muestra en la (Figura 66) y (Figura 67) los resultados obtenidos.



Figura 75 Medición de corriente de entrada prototipo de calentamiento de agua de inducción electromagnética

En la figura se muestra una medición de corriente a la entrada del prototipo de calentamiento de agua de inducción electromagnética de 7.1 amperios.



Figura 76 Medición de corriente de entrada ducha eléctrica.

En la figura se muestra una medición de corriente a la entrada del prototipo de calentamiento de agua de inducción electromagnética de 35.3 amperios.

4.1.1 Cálculo de consumo de potencia.

De lo establecido en la ecuación 17 se pueden calcular las potencia de consumo para cada uno de los elementos de calentamiento de agua.

Calentador de agua por inducción electromagnética, aplicando la (Ecuación 14).

$$P = V * I$$

$$P = 122.2 \times 7.8$$

$$P = 953.16W$$

Ducha eléctrica, aplicando la (Ecuación 14)

$$P = V * I$$

$$P = 122.2 \times 35.3$$

$$P = 4313.66 W$$

En los cálculos se puede observar un alto consumo de corriente eléctrica en la ducha eléctrica por lo que el calentador de agua de inducción electromagnética cumple con las expectativas planteadas de ser un dispositivo electrónico de bajo consumo.

La eficiencia energética del calentador de agua de inducción electromagnética se calcula mediante la relación de la potencia de salida sobre la potencia de entrada.

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}}$$

Ecuación 30

$$\eta = \frac{989.82W}{1000W} * 100$$

$$\eta = 95.31\%$$

Se realiza el mismo cálculo para la ducha eléctrica para tener una referencia, aplicando la (Ecuación 30).

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}}$$

$$\eta = \frac{4313.66W}{5200W} * 100$$

$$\eta = 82.95\%$$

4.1.2 Comparación de las características de calentamiento de agua en el prototipo de calentamiento de inducción electromagnética y la ducha eléctrica.

En la tabla 7,8 y 9 se muestran los resultados obtenidos respecto al calentamiento de agua en los dos sistemas de prueba.

Tabla 8

Caudal, temperatura bobina de inducción y temperatura de agua a la salida.

| CALENTADOR DE INDUCCION ELECTROMAGNÉTICA | | |
|--|---------------------------------|---------------------------------|
| CAUDAL | TEMPERATURA BOBINA DE INDUCCIÓN | TEMPERATURA DE AGUA A LA SALIDA |
| 0,5 LT/MIN | 95 | 35 |
| 1LT/MIN | 92 | 25 |
| 1,5LT/MIN | 90 | 22 |

Tabla 9

Caudal, temperatura bobina de niquelina y temperatura de agua a la salida.

| DUCHA ELÉCTRICA | | |
|-----------------|---------------------------|-------------------------------------|
| CAUDAL | TEMPERATURA NIQUELINA(°C) | TEMPERATURA DE AGUA A LA SALIDA(°C) |
| 0,5 LT/MIN | 120 | 40 |
| 1LT/MIN | 100 | 35 |
| 1,5LT/MIN | 80 | 32 |

Tabla 10

Temperatura de funcionamiento calentador de inducción electromagnética en vacío.

| TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO CALENTADOR DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA | | | | | | |
|--|-----|----|-----|-----|-----|-----|
| TIEMPO (min) | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 |
| BOBINA (°C) | 42 | 63 | 85 | 103 | 123 | 153 |

Las medidas de temperatura están en grados Celsius para todas las tablas.

4.2 Pruebas de funcionamiento de la placa de control.

Uno de los principales objetivos es realizar las pruebas sobre el HMI que presenta la placa de control la cual se traduce a un sistema muy sencillo de usar y presenta un display que muestra la potencia de trabajo para el prototipo de calentamiento de inducción electromagnética H6 y los de tipo de error en los cuales el sistema presenta las alarmas de fallo para el caso de sobre temperatura E1 y en el caso de sobre corriente E0.



Figura 77 Placa de control Sistema de calentamiento de inducción electromagnética.

En la (Figura 75) se muestra la implementación de la placa en la caja electrónica en donde se muestra la función de los pulsadores e indicadores.



Figura 78 Circuito de control Implementado en caja electrónica

En cuanto al funcionamiento de la tarjeta de control se pudo observar que funciona correctamente presentando las alarmas de error programadas en el caso de sobre corriente y sobre temperatura.

4.4 VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La hipótesis planteada al iniciar el proyecto fue la siguiente:

¿Es posible que el consumo energético de un calentador electrónico de inducción electromagnética sea menor que un calentador de agua eléctrico tipo ducha?

De la hipótesis se obtienen las siguientes variables.

Variable independiente.

- ✓ Calentador electrónico de inducción electromagnética.

Variable dependiente.

- ✓ Consumo energético.

Se va a analizar si los resultados de las pruebas realizadas y los datos obtenidos en las tablas 7 y 8 y los cálculos de potencia de consumo realizado en el subtema 4.1.1

En donde mediante pruebas experimentales se puede determinar si la hipótesis planteada en el proyecto queda probada.

4.5 Análisis de costos.

En la tabla 9 se presenta el costo de los materiales que integran los circuitos de control, potencia, disparo, bobina de inducción, caja electrónica, caja de soporte de bobina y diseño del prototipo.

Tabla 11

Costo de placa de potencia y circuito de disparo

| PLACA DE POTENCIA Y DISPARO | | | | |
|--------------------------------------|-------------|----------|-------------|--------------|
| DESCRIPCIÓN | CÓDIGO | CANTIDAD | P. UNITARIO | P. TOTAL |
| CIRCUITO INTEGRADO | LM339 | 1 | 0,65 | 0,65 |
| FUENTE VYPER 18 V | A2 | 1 | 3,8 | 3,8 |
| CIRCUITO INTEGRADO | LM7805 | 1 | 0,65 | 0,65 |
| TRANSISTOR | PNP | 1 | 0,25 | 0,25 |
| TRANSISTOR | NPN | 5 | 0,25 | 1,25 |
| TRANSFORMADOR DE CORRIENTE | 1:200 | 1 | 2,5 | 2,5 |
| PUENTE RECTIFICADOR | MB35 | 1 | 16 | 16 |
| DIODO RECTIFICADOR | 1N4007 | 6 | 0,15 | 0,9 |
| CAPACITOR CERÁMICO POTENCIA | 22UF | 1 | 4 | 4 |
| CAPACITOR CERÁMICO POTENCIA | 0,27UF | 1 | 4 | 4 |
| CAPACITOR CERÁMICO POTENCIA | 10UF | 5 | 5 | 25 |
| CAPACITORES ELECTROLITICOS | A16V | 1 | 0,4 | 0,4 |
| CAPACITORES ELECTROLITICOS | A25V | 1 | 0,4 | 0,4 |
| CAPACITORES ELECTROLITICOS | A50V | 1 | 0,4 | 0,4 |
| CAPACITORES CERÁMICOS SEÑAL | S/C | 12 | 0,2 | 2,4 |
| RESISTENCIA VARIABLE | 10KOMH | 1 | 0,5 | 0,5 |
| RESISTENCIAS | 1/4W | 24 | 0,1 | 2,4 |
| RESISTENCIAS | 1/2W | 12 | 0,1 | 1,2 |
| INDUCTANCIA FILTRO | S/C | 1 | 2 | 2 |
| BOBINA DE INDUCCION | S/C | 1 | 80 | 80 |
| TERMISTOR | S/C | 1 | 1,5 | 1,5 |
| IGBT | FF100R12RT4 | 1 | 149 | 149 |
| CIRCUITO IMPRESO EN PLACA | | 1 | 150 | 150 |
| TOTAL COSTO PLACA DE POTENCIA | | | | 449,2 |

Tabla 12**Costo placa de control**

| PLACA DE CONTROL | | | | |
|-------------------------------------|----------|----------|-------------|--------------|
| DESCRIPCIÓN | CÓDIGO | CANTIDAD | P. UNITARIO | P. TOTAL |
| TRANSISTOR | NPN | 3 | 0,25 | 0,75 |
| TRANSISTOR | PNP | 3 | 0,25 | 0,75 |
| RESISTENCIA | S/C | 35 | 0,10 | 3,50 |
| BUS DE COMUNICACIÓN | 10 PINES | 1 | 3,50 | 3,50 |
| PULSADORES | S/C | 3 | 0,50 | 1,50 |
| DIODOS LED | ROJO | 7 | 0,25 | 1,75 |
| CAPACITORES CERÁMICOS | 22 | 2 | 0,15 | 0,30 |
| CAPACITORES CERÁMICOS | 104 | 2 | 0,15 | 0,30 |
| CAPACITOR ELECTROLÍTICO | 470UF | 1 | 0,15 | 0,15 |
| CRISTAL OSCILADOR | 8MHZ | 1 | 2,00 | 2,00 |
| MICROCONTROLADOR | 28 PINES | 1 | 8,50 | 8,50 |
| CIRCUITO INTEGRADO | 746S164 | 1 | 0,80 | 0,80 |
| DISPLAY 1 DIGITO | S/C | 3 | 1,00 | 3,00 |
| CIRCUITO IMPRESO EN PLACA | S/C | 1 | 80,00 | 80,00 |
| TOTAL COSTO PLACA DE CONTROL | | | | 106,8 |

Tabla 13**Costo artículos varios**

| VARIOS | | | | |
|--------------------------------------|--------|----------|-------------|------------|
| DESCRIPCIÓN | CÓDIGO | CANTIDAD | P. UNITARIO | P. TOTAL |
| CAJA DE ALUMINIO BOBINA DE INDUCCION | S/C | 1 | 74 | 74 |
| DISIPADOR DE CALOR DE ALUMINIO | S/C | 2 | 15 | 30 |
| FUSIBLE | S/C | 1 | 1 | 1 |
| CAJA PARA COMPONENTES ELÉCTRONICOS | S/C | 1 | 45 | 45 |
| VARIOS | S/C | 1 | 50 | 50 |
| IMPREVISTOS | S/C | 1 | 50 | 50 |
| TOTAL COSTO VARIOS | | | | 250 |

Tabla 14**Costo de Ingeniería según perfil Ocupacional**

| COSTO DE INGENIERÍA SEGÚN PERFIL OCUPACIONAL | | | |
|--|-------|--------------|---------------|
| B2;INGENIERO ELECTRÓNICO ESPECIALISTA | | | |
| EJECUCIÓN | HORAS | COSTO/H | TOTAL |
| DISEÑO HARDWARE | 250 | 2,46 | 615 |
| DISEÑO SOFTWARE | 250 | 2,46 | 615 |
| PRUEBAS PROTOTIPO | 20 | 2,46 | 49,2 |
| | | TOTAL | 1279,2 |

El Costo total del prototipo de calentamiento de agua de inducción electromagnética tiene un costo total de 2085.20.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se muestran las conclusiones y recomendaciones que se llegaron a obtener de la implementación del prototipo desarrollado.

5.1 CONCLUSIONES

- Se logró diseñar y construir prototipo de calentamiento de agua por inducción electromagnética de bajo consumo y una vez realizadas las pruebas en el prototipo de calentamiento de agua por inducción electromagnética se puede decir que cumple con los parámetros de diseño presentados, tiene un calentamiento eficiente en la zona superficial de la tubería, mostrando en los resultados una temperatura de 153 grados centígrados en tres minutos con un consumo de 953.16 watts.
- Se diseñó el sistema de calentamiento, mediante una bobina de inducción electromagnética que rodea una tubería de acero galvanizado, de esta manera genera el calentamiento al paso del agua; para las aplicaciones de calentamiento por inducción electromagnética no da buenos resultados la implementación de controles convencionales, ya que trabaja a frecuencia en el caso del prototipo trabaja a en un rango de 31Khz a 45Khz y se requiere una respuesta cada 20 micro segundos, por lo cual se utilizó el circuito sincronizador de pulsos.

- Se diseñaron los circuitos electrónicos que en conjunto forman todo el sistema electrónico encontrando que es necesario el circuito sincronización de pulsos para evitar daños en el IGBT por sobre corriente, ya que en las pruebas realizadas en la implementación, respetando la configuración del tanque resonante el elemento de conmutación fallo por sobre corriente; debido a las conmutaciones a alta frecuencia el IGBT debe tener una buena disipación de calor; se implementó un disipador estático (placa de aluminio) y dinámico (ventilador) , respetando los datos técnicos del fabricante del conmutador en donde a mayor temperatura menor es la corriente que soporta; otra característica del IGBT es, a mayor frecuencia se tiene mayor conmutación y esto genera calor, por lo que se requiere protección sobre temperatura, por lo cual se implementó el circuito para proteger al elemento de conmutación, con la finalidad de asegurar su funcionamiento continuo; como una de las protecciones que el sistema dispone es la medición de corriente, fue necesario la implementación de un circuito adicional, los cuales inhiben la señal al detectar demasiada corriente, de esta manera se garantiza una óptima protección al IGBT.
- Para la selección de los sensores de corriente en la realimentación se probó el acondicionamiento de varios sensores como por ejemplo el de efecto Hall, resistencia shunt y transformador de corriente; con el sensor de efecto hall no brindo buenos resultados debido al ruido que ingresa al sensor; para el caso de la resistencia shunt, el nivel de voltaje que entrega a la salida es muy bajo y en el acondicionamiento ingresa mucho ruido al sistema, el transformador de corriente no ingresa mucho ruido siendo el más óptimo para la implementación en el prototipo.

- Se diseñó el algoritmo de control tomando en cuenta el funcionamiento esperado del prototipo de esta manera se procedió a la implementación del circuito de control y la programación del microcontrolador.
- Se realizó el diseño de la carcasa que contiene a la bobina de inducción electromagnética con la finalidad de que disipe calor hacia el exterior y se analizó los materiales más idóneo con la finalidad de que no perturben al campo electromagnético en la bobina formado.
- Se construyó el prototipo de calentamiento de inducción electromagnética, partiendo del sistema electrónico, del cual se fueron creando elementos como la bobina de inducción es uno de los más relevantes, permitió realizar el diseño de la carcasa que le contiene.
- Se realizaron pruebas de funcionamiento y de consumo energético de donde se obtuvo que al comparar la eficiencia energética del calentador de agua por inducción electromagnética y la ducha eléctrica convencional que se basa en el calentamiento resistivo, se puede determinar valores porcentuales de 95.31% y 82.95% respectivamente, se muestra una clara diferencia, entre los dos sistemas de calentamiento; al comparar el consumo energético se tiene 0.95 KW en el calentador de inducción electromagnética y 4.31 KW en la ducha eléctrica, se determina una amplia diferencia en cuanto al consumo.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar un mejor elemento para la disipación de calor que genera el IGBT, ya que puede durar hasta 3.5 minutos de funcionamiento continuo, antes de que se muestre el error por sobre temperatura en el display, este tiempo de funcionamiento a la máxima potencia permitió tomar los valores experimentales dando como resultado una buena aproximación para próximos estudios de calentamiento inductivo.
- El diseño presentado para la bobina de inducción para el calentamiento de agua, no ofrece un calentamiento rápido al paso del agua, por lo que se recomienda para futuros estudios se realice un análisis de las pérdidas de calor que se producen en la bobina y el diseño de un tanque de almacenamiento o recirculación de agua con la finalidad de obtener mejores resultados de calentamiento.
- Con el propósito de que pueda pensarse en la producción de este tipo de calentadores en el país se debe realizar un estudio que justifique la inversión, ya que los elementos electrónicos que lo componen son costosos y de difícil acceso comercial.

- Para mejorar el diseño del inversor resonante se puede aplicar un inversor de onda completa, con el inconveniente de que usa dos IGBT en paralelo lo mismo que se traduce a alto costo en la implementación.
- Con la finalidad de aumentar la eficiencia en el calentamiento una etapa inicial puede ser el precalentamiento del agua mediante otros sistemas de calentamiento entre uno de ellos de tipo solar, generando un calentador combinado que presente mejores prestaciones al calentar el agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Atigas, J., & Sanz, A. (s.f.). Introducción a las etapas de potencia. Zaragoza: Universidad de Zaragoza,.

Callebaut, J. (Febrero de 2007). *Power quality & Utilisation guide, Energy efficiency*. Obtenido de Leonardo Energy: http://www.leonardoenergy.org/webfm_send/181, recuperado el 25 de noviembre del 2015.

Chapman, S. (2012). *Maquinas eléctricas*. México, D. F.: MC GRAW HILL.

Cuenca Alba, M. (s.f.). *La ley de Ampere*. Obtenido de https://www.uam.es/personal_pas/mcuenca/mifiles/Desarrollo%20de%20un%20equipo%20de%20calentamiento%20por%20induccin.pdf, recuperado el 20 de noviembre del 2015.

Cushicóndor, E. (Noviembre de 2009). Diseño y construcción de un prototipo de una cocina de inducción electromagnética . Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.

Esteve, V. (Junio de 1991). Influencia de los componentes parásitos en el análisis y diseño de inversores resonantes paralelo para aplicaciones de calentamiento por inducción. Valencia, España: Universidad de Valencia.

Garcia, M. (2015). *Academia*. Obtenido de http://www.academia.edu/7728470/CIRCUITOS_DE_DISPARO_DE_TIRISTORES_PARA_RECTIFICADORES_CONTROLADOS, recuperado el 20 de diciembre del 2015.

- Gómez, E. (1991). *Influencia de los Componentes Parásitos en el Análisis y Diseño de Inversores Resonantes Paralelo para aplicaciones de calentamiento por inducción*. Valencia, España: Universidad de Valencia.
- Grisales Garcia, J. A. *STUDYLIB*. Obtenido de Principios de calentamiento de inducción: <http://studylib.es/doc/760770/principios-del-calentamiento-por-induccion>, recuperado el 26 de mayo de 2010
- Hart, D. (2001). *Electrónica de Potencia*. Madrid: Prentice Hall.
- Induction, E. (s.f.). Representación de corrientes de Foucault. *Aplicaciones de calentamiento por inducción*, 19.
- Ministerio de industria energía y minería, M. (2014). *eficienciaenergetica*. Obtenido de <http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/index.php/item/212>, recuperado el 15 de noviembre del 2015.
- Mohan, U. y. (1995). *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. Nueva york.
- Nachez, A. (s.f.). *Electronica de potencia de Tiristores en circuitos de apagado*. Obtenido de Academia: https://www.academia.edu/15702695/ELECTRONICA_DE_POTENCIA_TIRISTORES_Circuitos_de_Apagado, recupera el 6 de febrero del 2016,de academia.
- Pérez, C., & Zamanillo, J. (s.f.). *Diseño de Bobinas*. Universidad de Cantabria.
- Pomilio, J. (2013). *Electrónica de Potencia*. Campiña, Brasil: Universidade Estadual de Campinas.
- Ruiz, E. (s.f.). <http://es.slideshare.net/EduardoRuiz40/aluminio6063>, recuperado el 15 de julio del 2016, de slideshare.
- València., U. d. (s.f.). *Introducción a los sistemas de potencia*. Universitat de València..
- Wikipedia., *Espectro audible*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_audible, recuperado el 4 de enero del 2016



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores: **JACOBO JAVIER CÁCERES RODRÍGUEZ** y **BYRON VINICIO MONTERO LLUNDO**.

En la ciudad de Latacunga a los 19 días del mes de diciembre de 2016.



Ing. Wilson Trávez
DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:



Ing. Vicente Hallo
DIRECTOR DE CARRERA



Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO