

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.

Jacobo Cáceres, Byron Montero

Departamento de Energía y Mecánica
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga
Latacunga, Ecuador
jacobo.caceres89@hotmail.com, byron_montero@hotmail.com

Resumen.- El proyecto 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.

En 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 IGBT.

Palabras clave – *Inducción electromagnética, Inversor cuasi-resonante, bobina de inducción, IGBT.*

Abstract.- The titling project 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 induction, Quasi- resonant inverter, Induction coil, IGBT.*

I. 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 a la cual el dispositivo de calentamiento va a ser diseñado, para este proyecto se analizará los sistemas de calentamiento de agua de uso doméstico.

Para tener datos sobre el uso de agua caliente en los hogares ecuatorianos, nos basamos en datos otorgados por el INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos) se puede mencionar lo siguiente. 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 el de 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 INEC(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%). 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.

II. FUNDAMENTO TEÓRICO

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 podemos discernir que se trata de 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.

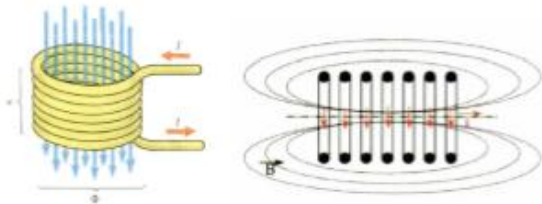


Figura 1 Campo magnético generado por un inductor

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.

2.1 Generación de calor mediante leyes de inducción electromagnética.

Según el autor Jhon Alejandro Grisales García (2010) indica que:

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:

$$N_i = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = Hl$$

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 desmagnetizaciones 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:

$$I = \frac{V}{2\pi \cdot F \cdot L_b}$$

Dónde:

F = frecuencia en Hz.

L_b = inductancia de la bobina en (H).

La corriente en la pieza que queremos calentar circulara en la corteza exterior calentándola según la ley de joule:

$$W = RI^2$$

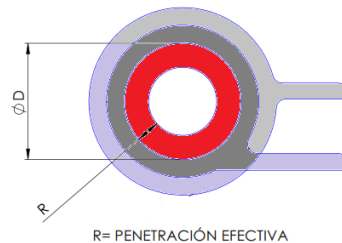


Figura 2 Pieza a calentar rodeada por la bobina

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

La porción de material que se calentara 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:

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

r = Resistividad en micro ohm.cm/cm².

F = Frecuencia.

M = 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 termina; 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 inoxidable hueca, por lo que se tiene una corteza muy fina para de esta manera aprovechar la mayor cantidad de calor que en la tubería se genere para calentar el agua que pasar 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:

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

$$K = \left(\frac{d}{D}\right)^3$$

Dónde:

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.

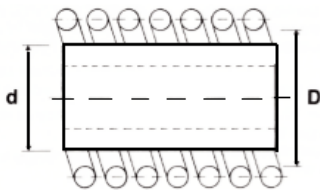


Figura 3 Representación del diámetro exterior de la pieza y diámetro interior de la bobina.

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

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 de 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, entre las siguientes se puede citar.

- 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 de 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.

III. DISEÑO Y SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS.

3.1 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:

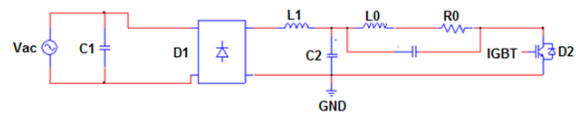


Figura 4 Representación gráfica del circuito de potencia

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:

3.2 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 (2μf) @ 250 V.

3.3 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:

$$P = V * I \quad I = \frac{1000W}{120V}$$

$$I = 8.33 A$$

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

$$V_{pico_{inv}} = 120 * \sqrt{2} \quad V_{pico_{inv}} = 169.70 V$$

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:

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

$$I_{dc} = \frac{P}{V_{dc} * n}$$

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

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

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

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

$$I_{rms} > 8.18A$$

$$V_{dc} > 108.03V$$

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

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.

3.4 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.

$$f_o = \frac{1}{\pi\sqrt{L_o C_o}} \quad L = \frac{1}{C(f_c * \pi)^2}$$

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:

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

$$L = 10.54\mu H$$

3.5 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:

$$P = V * I$$

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

$$I = 8.33A$$

Para esta aplicación se asume una frecuencia de resonancia de 31KHz, se aplica en la (Ecuación 10).

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

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 $0.68\mu f @ 850V$ bajo la ley serie

de capacitores, se logra tener un capacitor equivalente a $0.34\mu f @ 1700V$ solventando las necesidades del inversor.

Partiendo de la

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

Se despeja L_o :

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

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

$$L_o = 310.09Mh$$

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:

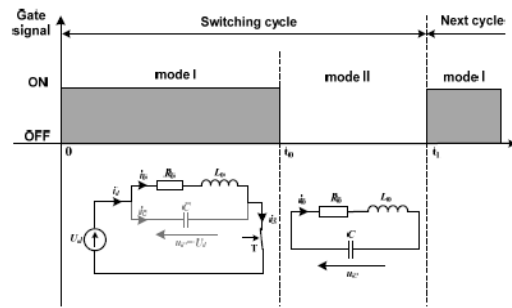


Figura 5 Ciclo de switcheo

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

$$U_d - L_o \frac{di_{L_o}}{dt} - R_o i_{L_o} = 0$$

$$i_{L_o(on)}(t) = \frac{U_d}{R_o} * \left(1 - e^{-\frac{R_o t}{L_o}}\right)$$

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

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

$$V_{dc} = \frac{2 * V_{max}}{\pi}$$

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{2}V_f}{\pi}$$

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

$$V_{dc} = 108.03V$$

$$\rightarrow U_d = 108.03V$$

Para el cálculo del circuito resonante asumimos los siguientes valores:

$$C = 0.33\mu F$$

Frecuencia de operación $f_s = 31\text{KHz}$.

Ro de la tubería de $0.341\ \Omega$.

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

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 * C_0}}$$

Despejamos el valor de L_0 , entonces:

$$L_0 = 310.09\ \mu\text{H}$$

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 tenemos:

$$i_{L_{\text{omax}}} = 39.83\text{A}$$

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_0 y C , este voltaje requiere un alto voltaje de ruptura del IGBT, generalmente de 100 y $1600\ \text{V}$ 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:

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

Entonces reemplazando valores se obtiene:

$$U_c = 108.03 - 1200$$

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

Por tal motivo, escogemos un capacitor de $0.33\ \mu\text{F}$ @ 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.

3.7 Selección del driver IGBT

El Driver modelo 1EDI05I12AF es apropiado para aplicaciones en Calentadores resonantes de inducción.

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

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.

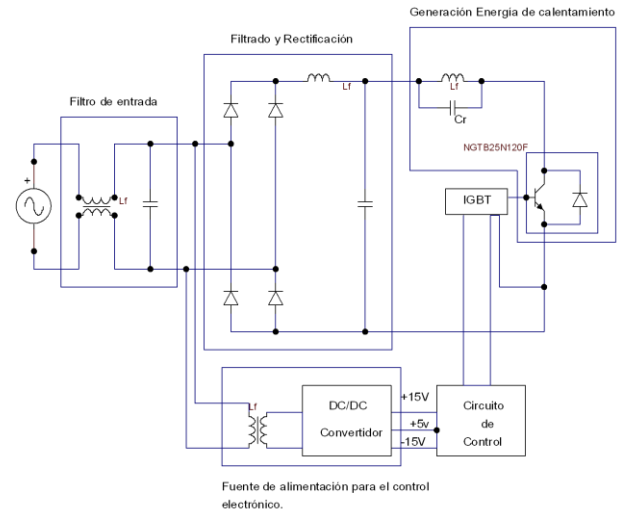


Figura 6 Diagrama de bloques de un Calentador de inducción

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.

3.9 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 conversor 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.

Permite además que la corriente a la entrada del conversor 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.

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.

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

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

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

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.

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

$$V_2 = 18 * \frac{20}{20 + 30}$$

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

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 microcontrolador.

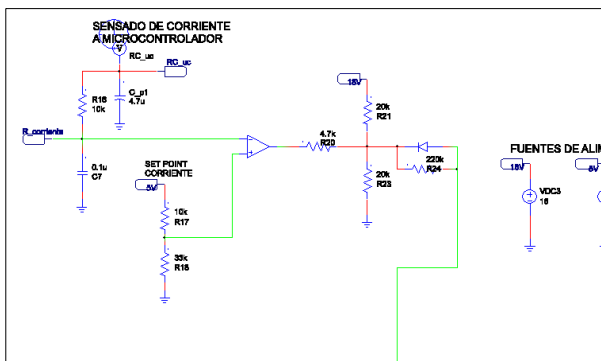


Figura 72 Circuito de realimentación de corriente.

Para la siguiente (Figura 7) 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.

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 7).

3.10 Circuito sincronización de pulsos para el control del IGBT.

El circuito que se muestra en la figura 8 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.

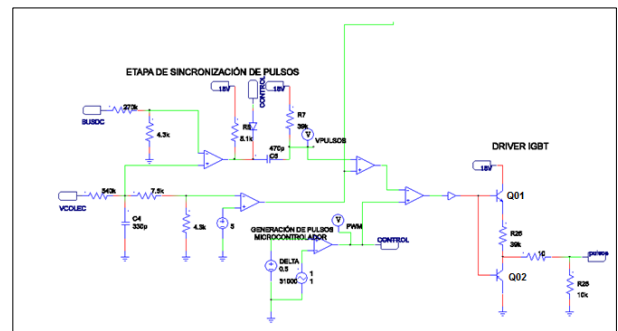


Figura 8 Circuito de sincronización de pulsos

3.11 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.

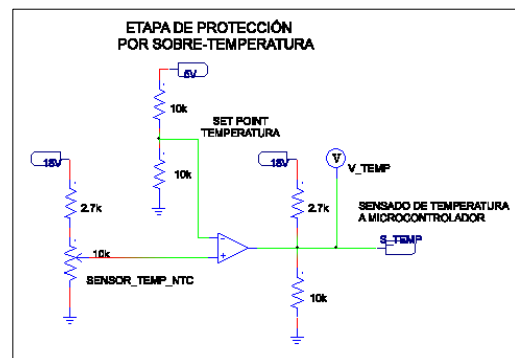
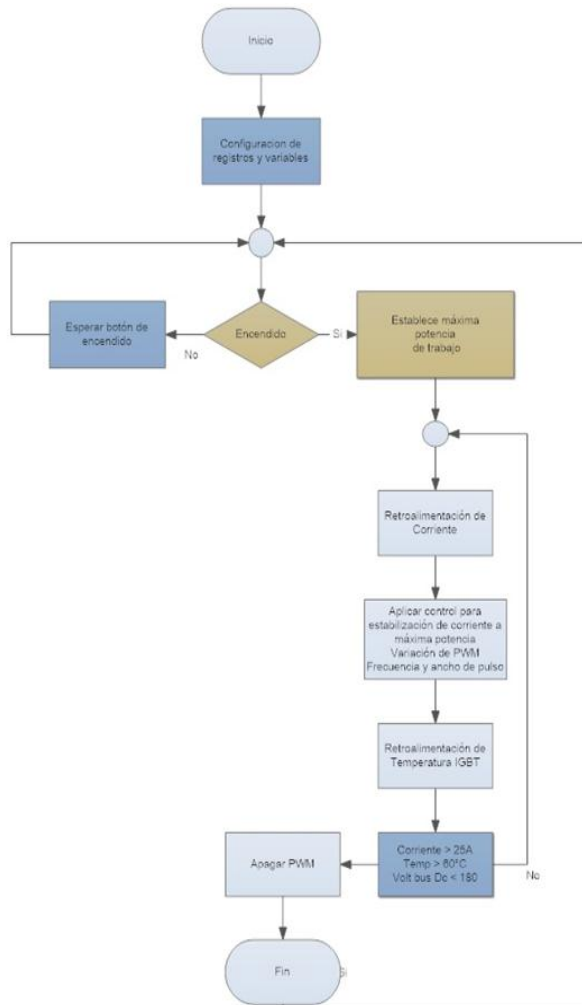


Figura 93 Circuito de etapa de protección por sobre-temperatura.

3.12 Algoritmo de control.

Establece el comportamiento general del sistema de control.



3.13 Diseño del circuito propuesto.

En la figura 10 se muestra el diseño realizado en un software de simulación, permitiendo comprobar el comportamiento del circuito antes de la implementación.

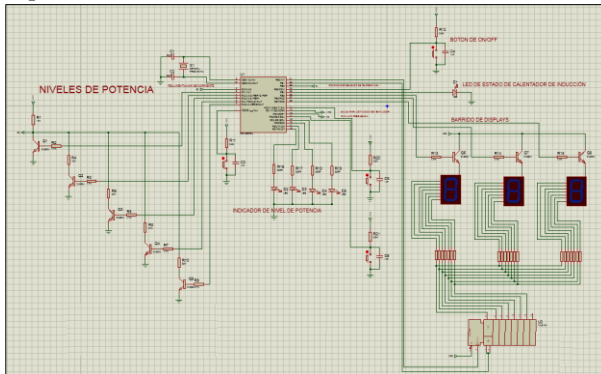


Figura 104 Diseño de circuito de control realizado en software de diseño electrónico

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 mismos 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.

3.14 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.

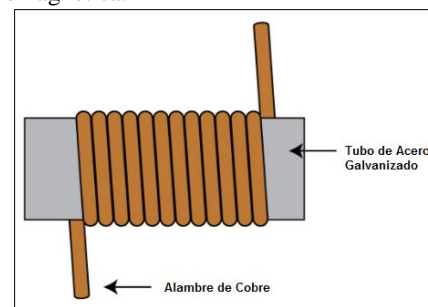


Figura 11 Esquemático de la bobina de inducción electromagnética.

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:

$$L = 0.0790 * \frac{a^3}{p^2} * F$$

Dónde:

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:

$$a = 3.25 \text{ cm.}$$

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;

$$P = 2.32 \text{ mm} = 0.232 \text{ cm}$$

Entonces despejando la ecuación 1, tenemos:

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

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

$$F = 6.57$$

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.

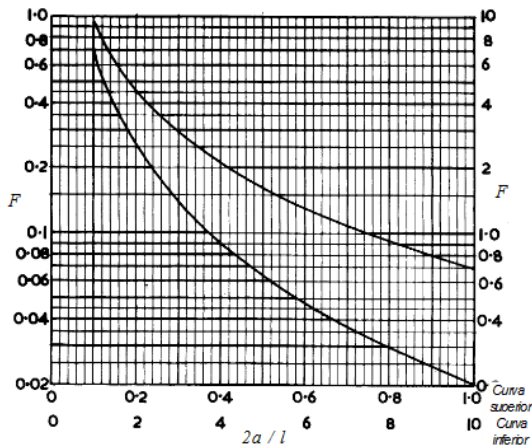


Figura 12 Gráfica para el diseño de bobinas según el diámetro

Fuente: (Pérez & Zamanillo), Diseño de Bobinas

De la gráfica se puede observar que 2a/l en la curva inferior es igual a 1.

$$\text{Entonces, } l = 2a / 1 = 6.5 \text{ cm.}$$

$$\text{Número de vueltas} = N = l / P$$

$$N = 6.5\text{cm} / 0.232\text{cm}$$

$$N = 28.2, \text{ entonces } N = 30 \text{ vueltas.}$$

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.

3.15 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.

3.16 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 magnético 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 1 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
Coeficiente 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/cm² 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>

Como se puede observar en la (Tabla 1) 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

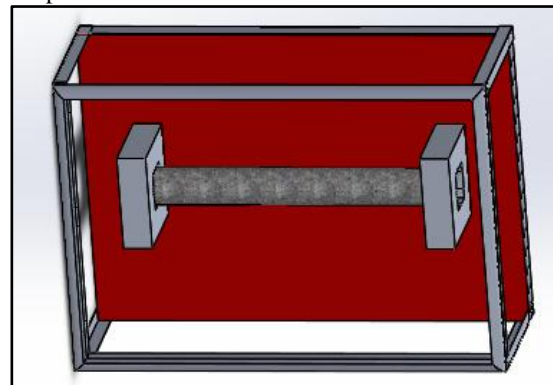


Figura 13 Carcasa de soporte para la bobina de inducción electromagnética

IV. IMPLEMENTACIÓN

4.1 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.

4.2 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 14 Bobina de inducción implementada.

4.3 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.

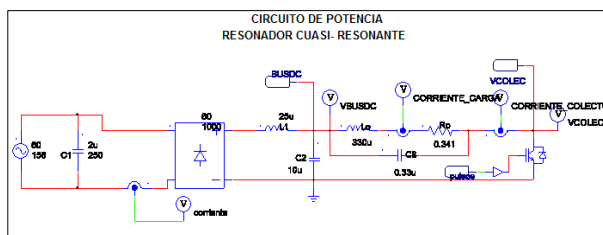


Figura 15 Simulación circuito de potencia, realizado el Power Sim.

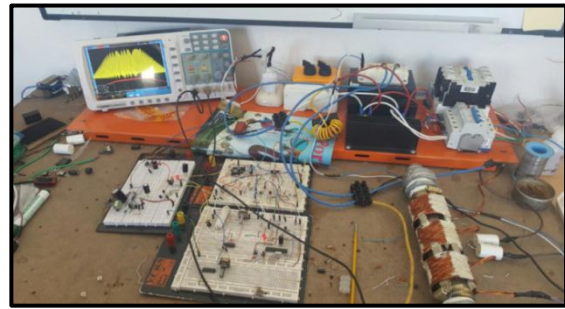


Figura 16 Implementación circuito de potencia, realizado en Protoboard.

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.

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

En la (Figura 17) 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.

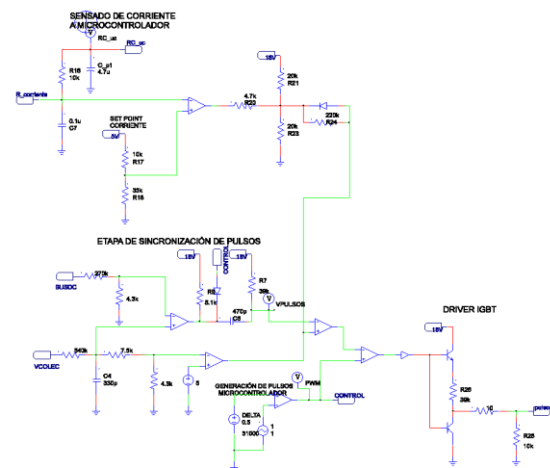


Figura 17 Simulación del circuito sincronizador de pulsos.

4.5 Integración de sistemas.

Se muestran en la (Figura 18) 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 185 Sistemas Integrados, prototipo de calentamiento de agua por inducción electromagnética

V. PRUEBAS Y RESULTADOS

Una de las principales pruebas de funcionamiento y a las cuales el prototipo está dirigida es demostrar el bajo consumo que presentan este tipo de calentadores de inducción electromagnética, por lo cual 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 19 y 20 los resultados obtenidos.



Figura 19 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 206 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.

5.1 Cálculos 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.

5.1.1 Calentador de agua de inducción electromagnética.

$$P = V * I$$

$$P = 122.2 \times 7.8$$

$$P = 953.16W$$

5.1.2 Ducha eléctrica

$$P = V * I$$

$$P = 122.2 \times 35.3$$

$$P = 4313.66 W$$

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.

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

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

$$\eta = 95.31\%$$

Se realiza el mismo cálculo para la ducha eléctrica para tener una referencia.

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

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

$$\eta = 82.95\%$$

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

En la tabla 2,3 y 4 se muestran los resultados obtenidos respecto al calentamiento de agua en los dos sistemas de prueba.

Tabla 2 Caudal, temperatura bobina de inducción y temperatura de agua a la salida.

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

Tabla 3 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 4 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

VI. CONCLUSIONES

- ✓ 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 presentado algunas cualidades, 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.
- ✓ Para las aplicaciones de calentamiento por inducción electromagnética no da buenos resultados la implementación de controles convencionales, ya que a la alta frecuencia en el caso del prototipo trabaja a 45Khz y se requiere una respuesta cada 20 micro segundos, por lo cual se utilizó el circuito sincronizador de pulsos.
- ✓ Como una de las protecciones que el sistema dispone es la medición de corriente, fue necesario la implementación de un circuito adicional, el cuales inhiben la señal al detectar demasiada corriente, de esta manera se garantiza una óptima protección al IGBT.
- ✓ Para la medición de corriente se probó el acondicionamiento de varios sensores como por ejemplo lo 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 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.
- ✓ 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.

VII. RECOMEDACIONES

- ✓ 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.

VIII. REFERENCIAS

- 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

ONICA_DE_POTENCIA_TIRISTORES_Circuitos_de_Apagado

Chapman, S. (2012). *Maquinas eléctricas*. Mexico: MC GRAW HILL.

Pérez, C., & Zamanillo, J. (s.f.). *Diseño de Bobinas*. Universidad de Cantabria.

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

Pomilio, J. (2013). *Electrónica de Potencia*. Campiña, Brasil: Universidade Estadual de Campinas.

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

València., U. d. (s.f.). Introducción a los sistemas de potencia. Universitat de València..

Wikipedia. (05 de Febrero de 2010). *Espectro audible*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_audible

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.

BIOGRAFÍAS:

Jacobo Javier Cáceres Rodríguez:

García, M. (2015). *Academia*. Obtenido de http://www.academia.edu/7728470/CIRCUITO_S_DE_DISPARO_DE_TIRISTORES_PARA_RECTIFICADORES_CONTROLADOS

Nació el 21 de Diciembre de 1989 en la ciudad de Ambato, cursó sus estudios de bachillerato en el Instituto Tecnológico “Bolívar” de la ciudad de Ambato, sus estudios superiores de Ingeniería Mecatrónica en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.



Su proyecto de titulación trata sobre el diseño y construcción de un calentador de agua en base al análisis de un sistema eficiente de

inducción electromagnética para hogares pertenecientes al sector socioeconómico medio.

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.

Byron Vinicio Montero Llundo

Grisales García, J. A. (26 de Mayo de 2010). *STUDYLIB*. Obtenido de Principios de calentamiento de inducción: <http://studylib.es/doc/760770/principios-del-calentamiento-por-induccion>

Nació el 11 de Agosto de 1989 en la ciudad de Ambato, cursó sus estudios de bachillerato en el Instituto Tecnológico Superior Docente “Guayaquil” de la ciudad de Ambato, sus estudios superiores de

Ingeniería Mecatrónica en la Universidad de las Fuerzas Armadas –ESPE.



Su proyecto de titulación trata sobre el diseño y construcción de un calentador de agua en base al análisis de un sistema eficiente de inducción electromagnética para

hogares pertenecientes al sector socioeconómico medio.

Grisales, j. (2010). Principios del calentamiento por inducción.

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). *eficiencia energetica*. Obtenido de <http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/index.php/item/212>

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/ELECTR>