



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAS**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
CALENTADOR DE AGUA POR INDUCCIÓN PARA LA
EMPRESA COMPUENGINE CÍA LTDA.**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECATRÓNICO**

RAFAEL ANTONIO ARIAS MENDOZA

DIRECTOR: ING. JUAN RIVERA, MG

Quito, Agosto, 2017

© Universidad Tecnológica Equinoccial 2017.
Reservados todos los derechos de reproducción

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1722922893
APELLIDO Y NOMBRES:	Arias Mendoza Rafael Antonio
DIRECCIÓN:	Av. Prensa N55-230 y CarlosV
EMAIL:	rafaelarias92@gmail.com
TELÉFONO FIJO:	022-592-603
TELÉFONO MOVIL:	0995051425

DATOS DE LA OBRA	
TITULO:	Diseño y construcción de un prototipo de calentador de agua por inducción para la empresa Compuengine
AUTOR O AUTORES:	RAFAEL ARIAS
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	29/08/2017
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	JUAN RIVERA, MG
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN MECATRÓNICA
RESUMEN: Mínimo 250 palabras	<p>El presente proyecto consistió en el diseño de un sistema de calentamiento de agua por medio de inducción y se validó con un prototipo. Para producir calor por inducción fue necesario generar una señal alterna de alta frecuencia la cual se obtuvo con un inversor tipo E por utilizar un solo transistor de potencia reduciendo el costo del circuito y facilitando el control con una sola señal PWM. Para la elaboración del inductor, de forma experimental se realizaron tres bobinas de cobre con el mismo diámetro y longitud. Utilizando cable sólido AWG 12, cañería de ¼ de pulgada y cable esmaltado multifilar (14 filas calibre 22) respectivamente. Donde se determinó el cable esmaltado multifilar como el material más adecuado para la construcción de esta al brindar mayor inductancia y resistencia eléctrica. Para el control de la potencia se</p>

estableció un rango de frecuencias entre 16KHz a 20KHz determinadas por medio de un análisis de elementos finitos en el con el software COMSOL, conjuntamente con la simulación del circuito en Proteus, la frecuencia más baja se limitó a 16KHz por el sobrecalentamiento en el IGBT empleado y la excesiva corriente (mayor a 30 amperios) presente a menores frecuencias. La frecuencia más alta se limitó a 20KHz debido a que con valores mayores, el calentamiento fue relativamente bajo (menor a 30°C). Con las pruebas del prototipo empleando un solo tubo centrado en la bobina, trabajando a potencia máxima con un caudal de 1l/min a la temperatura media de 17°, se obtuvo un incremento de 15°C. Reemplazando el tubo de media pulgada por un serpentín de cuatro tubos de ¾ de pulgada, en las mismas condiciones de trabajo se evidenció un mayor aumento de temperatura llegando a un incremento de 23.5°C de la temperatura de entrada.

PALABRAS CLAVES:

Inducción

ABSTRACT:

The present project consisted of design a water induction heating system, and it was validated with a prototype. To get heat by induction was necessary to generate an alternating high frequency signal which was obtained with a type E inverter and a single transistor that decreases the cost of the circuit and simplifies the control with a single PWM signal. For the preparation of the inductor, three copper coils with the same diameter and length were made. Employing AWG 12 solid wire, ¼ inch pipe and enameled multi-wire (14 wires gauge 22) respectively. The enameled multi-wire was determined as the most suitable material for construction by granting greater inductance and electrical resistance values. For power control, a frequency range between 16Khz to 20Khz determined by finite element analysis using COMSOL, together with the circuit using simulation in Proteus software. The lowest frequency was limited to 16KHz due to the overheating in the IGBT used and the excessive current (greater than 30 amps) present at lower frequencies. The highest frequency was limited to 20KHz because with

KEYWORDS

higher values, the heating is relatively low (less than 30 ° C). With prototype tests employing a single tube centered on the coil, working at maximum power with 1 l / min flow rate and an average inlet water temperature of 17°C, an increase of 15°C was obtained. By replacing the single central tube with four tubes of 3/4 inch, in the same working conditions, an inlet temperature increase of 23.5 °C was obtained.

Induction

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f: 

ARIAS MENDOZA RAFAEL ANTONIO

1722922289-3

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **ARIAS MENDOZA RAFAEL ANTONIO**, CI 1722922893 autor del proyecto titulado: **Diseño y construcción de un prototipo de calentador de agua por inducción para la empresa COMPUENGINE cía Ltda.** Previo a la obtención del título de **INGENIERO EN MECATRÓNICA** en la Universidad Tecnológica Equinoccial.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad Tecnológica Equinoccial a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, 29 Agosto 2017

f: 

ARIAS MENDOZA RAFAEL ANTONIO

1722922289-3

CARTA DE AUTORIZACIÓN

Yo, Marco Paredes Proaño.....con cédula de identidad N.-
1712442878..... en calidad de Gerente General de.....Compucengine..... autorizo a
RAFAEL ANTONIO ARIAS MENDOZA, realizar la investigación para la elaboración de su
proyecto de titulación "Diseño y construcción de un prototipo de calentador de agua por
inducción ", basada en la información proporcionada por la compañía.

f:


.....Marco Paredes P......

CI: 1712442878.....

DECLARACIÓN

Yo **RAFAEL ANTONIO ARIAS MENDOZA**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Tecnológica Equinoccial puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



ARIAS MENDOZA RAFAEL ANTONIO

1722922289-3

CARTA DE AVAL DE LA EMPRESA

Yo, Marcelo Paredes Proaño.....con cédula de identidad N.-
1712442878..... en calidad de Gerente General
de Compengine Cía Ltda certifico que el(la) Sr **RAFAEL ANTONIO**
ARAI MENDOZA, realizó su trabajo de titulación con el tema “ Diseño y
construcción de un prototipo de calentador de agua por inducción ”, por
requerimientos, y basada en la información proporcionada por la empresa.,
Los resultados del trabajo se entregaron el día 13 Junio 2017

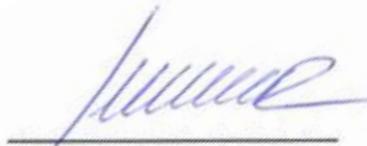
f:

Marcelo Paredes P.

CI: 1712442878.....

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título “Diseño y construcción de un prototipo de calentador de agua por inducción para la empresa COMPUENGINE cía Ltda.”, que, para aspirar al título de INGENIERO EN MECATRÓNICA fue desarrollado por RAFAEL ANTONIO ARIAS MENDOZA, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 19, 27 y 28.



ING. JUAN RIVERA, MG
DIRECTOR DEL TRABAJO
C.I.

DEDICATORIA

A mi madre por su incondicional apoyo en cada etapa de la vida, a mi padre que será siempre mi modelo a seguir y a mis hermanos por impulsarme a salir adelante.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Tecnológica Equinoccial por brindar una educación de élite, y a todos los maestros por compartir su sabiduría y conocimiento de la ciencia, así como sus experiencias y anécdotas que facilitan el aprendizaje.

A la empresa Compuengine por abrirme sus puertas y por brindar un apoyo permanente en el desarrollo de este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	PÁGINA
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. METODOLOGÍA Y DISEÑO	3
2.1 DISEÑO DEL SISTEMA	6
2.1.1 DISEÑO ELECTRÓNICO	7
2.1.2 DISEÑO DEL CONTROL	12
2.1.3 DISEÑO MECÁNICO	13
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
3.1 RESULTADOS PROTOTIPO	15
3.1.1 MODELO PLANTEADO	15
3.1.2 MODELO MODIFICADO	15
3.2 COMPRACIÓN CONSUMO ELECTRICO	16
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	16
BIBLIOGRAFÍA	19

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1. Sección corriente y potencia según calibre AWG	7
Tabla 2. Características bobinas experimentales	8
Tabla 3. Costo componentes circuito inversor	8
Tabla 4. Valores comerciales de capacitores.	11
Tabla 5. Características sensores temperatura	13
Tabla 6. Características pantallas táctiles.....	13
Tabla 7. Resultados del Prototipo inicial	15
Tabla 8. Resultados del prototipo modificado	16

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Esquema general del principio de calentamiento por inducción	4
Figura 2. Efecto piel en una pieza cilíndrica de acero	5
Figura 3. Esquema general del sistema.....	6
Figura 4. Análisis por Elementos Finitos.....	9
Figura 5. Simulación del circuito 20KHz, capacitor 1.05uF.....	10
Figura 6. Simulación del circuito 15KHz, capacitor 1.87uF.....	10
Figura 7. Simulación del circuito 15Khz, capacitor valor comercial	11
Figura 8. Circuito de potencia	12
Figura 9. Interfaz con el usuario.....	12
Figura 10. Análisis de elementos finitos de la carcasa	14
Figura 11. Ensamble CAD del sistema	14
Figura 12. Modelo de inicial de la tubería central.....	15
Figura 13. Modelo final de tubería central.....	16

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO 1. Datasheet IGBT G60N100	20
ANEXO 2. Modelo CAD.....	21

RESUMEN

El presente proyecto consistió en el diseño de un sistema de calentamiento de agua por medio de inducción y se validó con un prototipo. Para producir calor por inducción fue necesario generar una señal alterna de alta frecuencia la cual se obtuvo con un inversor tipo E por utilizar un solo transistor de potencia reduciendo el costo del circuito y facilitando el control con una sola señal PWM. Para la elaboración del inductor, de forma experimental se realizaron tres bobinas de cobre con el mismo diámetro y longitud. Utilizando cable sólido AWG 12, cañería de $\frac{1}{4}$ de pulgada y cable esmaltado multifilar (14 filas calibre 22) respectivamente. Donde se determinó el cable esmaltado multifilar como el material más adecuado para la construcción de esta al brindar mayor inductancia y resistencia eléctrica. Para el control de la potencia se estableció un rango de frecuencias entre 16KHz a 20KHz determinadas por medio de un análisis de elementos finitos en el con el software COMSOL, conjuntamente con la simulación del circuito en Proteus, la frecuencia más baja se limitó a 16KHz por el sobrecalentamiento en el IGBT empleado y la excesiva corriente (mayor a 30 amperios) presente a menores frecuencias. La frecuencia más alta se limitó a 20KHz debido a que con valores mayores, el calentamiento fue relativamente bajo (menor a 30°C). Con las pruebas del prototipo empleando un solo tubo centrado en la bobina, trabajando a potencia máxima con un caudal de 1l/min a la temperatura media de 17°, se obtuvo un incremento de 15°C. Reemplazando el tubo de media pulgada por un serpentín de cuatro tubos de $\frac{3}{4}$ de pulgada, en las mismas condiciones de trabajo se evidenció un mayor aumento de temperatura llegando a un incremento de 23.5°C de la temperatura de entrada.

Palabras clave: Inducción

ABSTRACT

The present project consisted of design a water induction heating system, and it was validated with a prototype. To get heat by induction was necessary to generate an alternating high frequency signal which was obtained with a type E inverter and a single transistor that decreases the cost of the circuit and simplifies the control with a single PWM signal. For the preparation of the inductor, three copper coils with the same diameter and length were made. Employing AWG 12 solid wire, ¼ inch pipe and enameled multi-wire (14 wires gauge 22) respectively. The enameled multi-wire was determined as the most suitable material for construction by granting greater inductance and electrical resistance values. For power control, a frequency range between 16Khz to 20Khz determined by finite element analysis using COMSOL, together with the circuit using simulation in Proteus software. The lowest frequency was limited to 16KHz due to the overheating in the IGBT used and the excessive current (greater than 30 amps) present at lower frequencies. The highest frequency was limited to 20KHz because with higher values, the heating is relatively low (less than 30 ° C). With prototype tests employing a single tube centered on the coil, working at maximum power with 1 l / min flow rate and an average inlet water temperature of 17°C, an increase of 15°C was obtained. By replacing the single central tube with four tubes of ¾ inch, in the same working conditions, an inlet temperature increase of 23.5 °C was obtained.

Key words: Induction

1. INTRODUCCIÓN

El planeta atraviesa una serie de cambios climáticos ocasionados en gran parte por la excesiva emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂ (dióxido de carbono) y el CH₄ metano (FLORES, Agosto 2009). El metano, combustible de uso doméstico tiene un efecto invernadero superior al CO₂ y se ha señalado como el principal responsable del calentamiento global en la antigüedad (MUERZA, 2012).

Con una tendencia a la eliminación del subsidio al gas licuado de petróleo presentada en los últimos gobiernos en Ecuador, se produciría un aumento considerable del precio del tanque de gas de consumo doméstico, esto limita el uso continuo de este combustible al sector industrial y genera la necesidad de electrodomésticos que suplanten el uso del gas por otras fuentes de energía (Pacheco, 2015).

Para cubrir la demanda de electrodomésticos que reemplacen el uso de gas licuado de petróleo y cuyo consumo energético no represente un alto costo es necesaria la aplicación de métodos alternativos para transformar la energía eléctrica en calor.

Utilizando la inducción electromagnética se genera calor en piezas sin contacto, este método se caracteriza por su eficiencia del uso de energía, a diferencia de dispositivos de calentamiento que utilizan únicamente el efecto de JOULE para generar calor, los dispositivos de inducción electromagnética aprovechan los campos magnéticos variables que por la resistividad de algunos materiales se produce fricción la cual genera calor adicional (Atmospheres, 2017). Este tipo de calentamiento aprovecha óptimamente la energía por lo que el aumento en el pago mensual de energía eléctrica no es significativo (Quevedo, Quizhpi, Morales, & S, 2016). En este proyecto se plantea el diseño de calentadores de inducción que reemplazan el consumo de combustibles fósiles por energía eléctrica, sustituyendo a los calefones a gas y reduciendo significativamente la emisión de gases a la atmosfera, contribuyendo así al cuidado del medio ambiente.

El objetivo general de este proyecto es el diseño de un calentador de agua cuyo principio de funcionamiento esté basado en la inducción electromagnética.

Entre objetivos específicos se planteó:

- Diseñar una bobina para generar calor por medio de inducción, que soporte la máxima potencia requerida en el sistema.
- Diseñar un circuito de potencia para la alimentación de la bobina de inducción.
- Diseñar un sistema capaz establecer la potencia de calentamiento mediante una interfaz con el usuario.
- Validar la funcionalidad del diseño con la construcción de un prototipo.

ESTADO DEL ARTE

Actualmente no se ha encontrado investigaciones concretas referentes a calentadores de agua por inducción para producción local en el país. Pero se ha presentado un proyecto de desarrollo de bobina de inducción para calentador de agua en la Sede de la Universidad Politécnica Salesiana en Cuenca (Quevedo & César, 2016). Así como un prototipo de cocina de inducción en la Escuela Politécnica Nacional (CUSHICONDOR, 2009).

En los proyectos encontrados se presenta el mismo principio para la generación de calor por inducción el cual se centra en la obtención de una corriente alterna de alta frecuencia (sobre los 5KHz) aplicada a una bobina. Esta onda se obtiene rectificando inicialmente la toma de energía alterna y mediante el uso de un inversor que emplea transistores Mosfet o IGBT, producen una onda equivalente a una señal senoidal de alta frecuencia (Yongxing Wang, 2012).

De las investigaciones encontradas referentes a inducción se destacan la corriente de Foucault, el Efecto piel y la Histéresis Magnética.

Calentamiento por inducción

En el calentamiento por inducción se genera calor sin contacto a un material conductor aplicando inducción electromagnética. Un campo electromagnético variable generado al aplicar corriente alterna produce lo que se denomina corrientes de Foucault o Eddy current en inglés (Valery Rudnev, 2017). Esta corriente genera calor debido a pérdidas óhmicas de potencia o Efecto Joule y esta es la principal fuente de calor en el calentamiento por inducción. Adicionalmente en los materiales ferromagnéticos se produce el efecto de histéresis que también contribuye a la generación del calor, pero en menor proporción (Fisk, 2008).

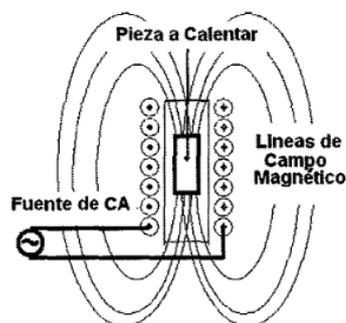


Figura 1. Esquema general del principio de calentamiento por inducción (PICON, 2013)

Corrientes Foucault

Las corrientes de Foucault también conocidas como corrientes parásitas circulan en el interior de materiales conductores producto de campos magnéticos variables. El movimiento relativo causa una circulación de

electrones (corriente inducida) que se oponen al campo magnético (Sánchez, 2010). Las corrientes parásitas generan pérdidas de energía, transformando energía cinética en calor por el efecto de Joule (Gonzalez, 2008).

Efecto piel

Una característica de las corrientes alternas es que se concentran en el exterior del conductor, esto se conoce como el efecto piel. También las corrientes parásitas inducidas en el material a ser calentado son más grandes en el exterior y se disminuyen conforme van al centro de la pieza. Producto de esto el material se calienta en mayor grado en los exteriores. El efecto piel se caracteriza por su profundidad de penetración la cual se obtiene con el espesor de la capa de efecto de la corriente medida desde el exterior de la pieza, en esta se desarrolla la mayor de la potencia (COMSOL, 2011). Como se muestra en la figura 2 para una pieza cilíndrica de acero, la profundidad de penetración de la corriente inducida se concentra en la parte exterior de la pieza a medida que la frecuencia se incrementa.

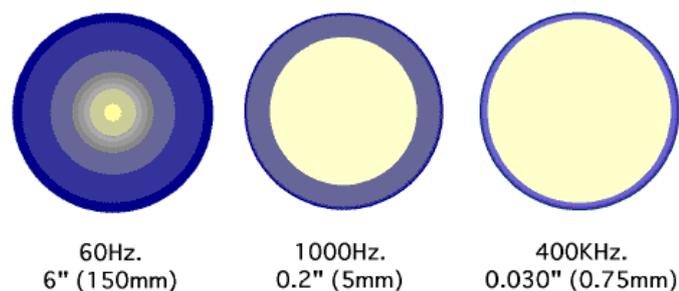


Figura 2. Efecto piel en una pieza cilíndrica de acero (MohammadHosseinTavakoli, 2011)

Histéresis magnética

En general los materiales magnéticos tienen cierta tendencia a conservar su magnetismo después de haber estado bajo el efecto de un campo magnético, entre estos materiales los denominados ferromagnéticos tienen mayor resistencia a cambiar su campo magnético (FLORES, Agosto 2009).

Cuando un material ferromagnético se expone a un campo magnético aplicado externamente, la relación entre el campo magnético y la densidad de flujo magnético puede no ser lineal debido a que inicialmente los dominios en el material no magnetizado están en diferentes direcciones, al aplicarse un campo magnético externo sobre este los dominios empiezan alinearse en la misma dirección del campo magnético aplicado. Cuando el campo magnético es reducido, este no seguirá el comportamiento de la curva inicial, sino que tiene un efecto retrasado y este campo se reduce a un campo magnético distinto. Este es llamado remanencia o densidad de flujo remanente donde el material permanece magnetizado en ausencia de un campo externo (Fisk, 2008). Debido a esta resistencia que ofrece el material se genera fricción y esta se dispersa en forma de calor adicional en piezas de este material.

2. METODOLOGÍA Y DISEÑO

Para el desarrollo de este proyecto se empleó el modelo en V, iniciando por determinar los requerimientos para el prototipo, así como las consideraciones técnicas, y proseguir con el diseño conceptual del sistema con la finalidad de plantear una posible solución. Una vez realizado el diseño conceptual se aprobó el alcance y se procedió al diseño específico donde se desarrolló la mayor parte de la investigación, para finalmente realizar las pruebas del diseño, modificaciones y optimización asegurando el cumplimiento de los objetivos planteados, y proceder con la integración final del sistema. En la figura 3 se muestra el esquema general del calentador de inducción.

Requerimientos

- Fuente de alimentación 110 VAC.
- Pantalla Táctil para interfaz con el usuario.
- Potencia 2000 W.
- Flujo de agua continuo.

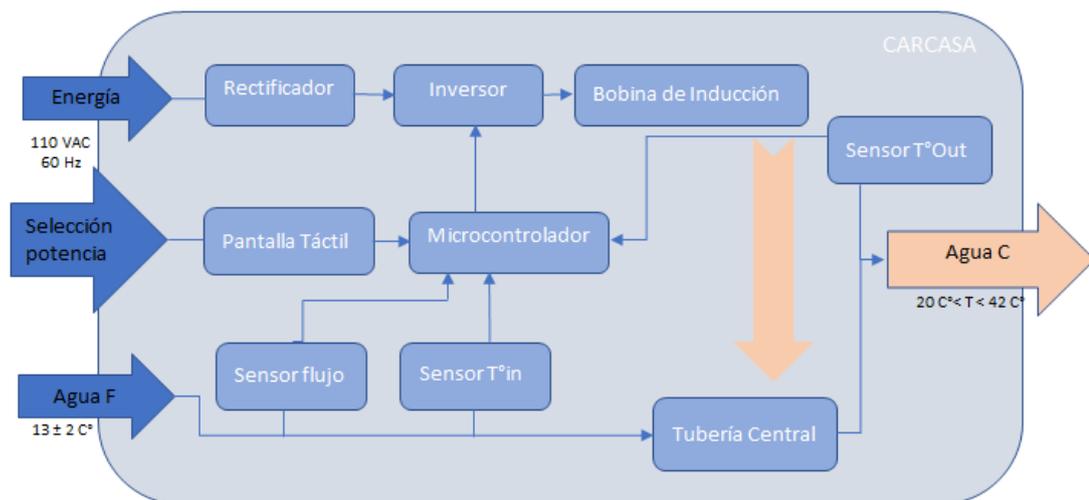


Figura 3. Esquema general del sistema

2.1 DISEÑO DEL SISTEMA

El diseño del sistema se divide en tres partes, diseño electrónico, diseño mecánico y diseño del control.

En la parte electrónica se diseñó el circuito de potencia el cual incluye la bobina de inducción y el IGBT, los cuales se determinaron en función de la potencia máxima requerida para el prototipo.

En la parte de control se definió el microcontrolador, el sensor de temperatura, el sensor de flujo, la pantalla táctil a emplearse, la interfaz con el usuario y el algoritmo de control.

En la parte mecánica se diseñó la estructura o carcasa de forma que todas las partes del sistema se ensamblen en un solo cuerpo. Tomando en cuenta las cargas de los componentes, así como la variación de temperatura.

2.1.1 DISEÑO ELECTRÓNICO

BOBINA DE INDUCCIÓN

La bobina es la pieza principal del sistema, tanto su geometría como su inductancia determinan la frecuencia óptima de trabajo. Al pasar el agua por un tubo cilíndrico la geometría ideal de la bobina es una espira circular. Se eligió el cobre como material para la bobina debido a su bajo costo, alta conductividad eléctrica y fácil maleabilidad.

De manera experimental se realizaron tres bobinas con cable sólido AWG 12, cañería de ¼ de pulgada y cable esmaltado multifilar respectivamente. Las tres bobinas se elaboraron con un diámetro de 8 cm (empleando un tubo PVC de 3 pulgadas) y una longitud de 13cm (longitud experimental). La justificación de estos materiales se detalla a continuación:

- El calibre del cable sólido se definió con la potencia máxima de este prototipo (2000 W) aunque el cable calibre 14 también soporta la potencia, por seguridad se empleó el calibre 12 (ver tabla 1).
- La cañería de cobre de ¼ de pulgada tiene un área transversal de 14.92 mm², la cual es mayor a la sección de calibre AWG 12 (3.31 mm²).
- Para el cable multifilar se tomó 7 hilos de calibre 22 los cuales al estar en paralelo soportan 3556 W.

Tabla 1. Sección corriente y potencia según calibre AWG

Calibre AWG	Sección mm ²	Corriente soportada	Watts soportados 127V
22	0,33	4	508
20	0,52	6	762
18	0,82	10	1270
16	1,16	13	1651
14	2,08	18	2286
12	3,31	25	3175
10	5,26	30	3810
8	8,37	40	5080

De los tres materiales empleados, el cable esmaltado multifilar ofreció los mejores resultados por tener mayor inductancia y resistencia eléctrica (tabla 2). Aunque su obtención es más difícil ya que en el mercado no se dispone directamente de cable multifilar esmaltado. Para el proyecto se elaboró de forma manual juntando 7 hilos de cable esmaltado calibre AW 22.

Tabla 2. Características bobinas experimentales

	Cañería 1/4"	Cable solido AWG 12	Cable multifilar esmaltado
Longitud Bobina	13 cm	13 cm	13 cm
Diámetro	54 mm	54 mm	54 mm
N.º espiras	5	31	50
Inductancia	Despreciable	0.02mH	0.06mH
Resistencia	0.25	0.7	1.6
Costo	Alto	Medio	Bajo

CIRCUITO DE POTENCIA

Para la generación de la onda alterna, se eligió un inversor tipo E por su alta eficiencia en conversión ya que reduce pérdidas por conmutación al emplear un solo transistor de potencia y el cual representa el mayor costo en los componentes de circuitos inversores (tabla 3).

Tabla 3. Costo componentes circuito inversor

Componente	Costo
Puente H	de 2 a 3\$
Bobina del filtro	de 1 a 2\$
Capacitor del Filtro	de 0,5 a 1,5\$
Transistor de Potencia	de 6 a 30\$
Driver Transistor	de 5 a 8\$

Etapas de rectificación

Para rectificar la onda alterna del tomacorriente se diseñó un puente H partiendo de la potencia requerida del prototipo (2000 W) y el voltaje de alimentación 110 VAC, así se despejó la corriente de trabajo $I = 18 \text{ A}$ y estableciendo un factor de seguridad de 2 se necesitaba puente H que soporte 36A. Por lo que se definió el puente KBPC5006 el cual soporta hasta 50A y 600V.

Para absorber las corrientes armónicas que se producen por las conmutaciones del inversor, se diseñó un filtro LC pasa bajos. Se asumió el valor del capacitor $C_1 = 6.8 \mu\text{F}$ partiendo de un filtro empleado en las cocinas de inducción y con una frecuencia de corte inicial de 8KHz igualmente tomada como referencia de la frecuencia de trabajo de las cocinas de inducción. Con estos valores, aplicando la ecuación 1 (fórmula para el diseño del filtro) se obtuvo un valor inicial del inductor $L_1 = 0.20 \text{ mH}$ con el cual se realizaron las simulaciones del circuito para posteriormente definirse valores finales.

$$L = \frac{1}{C(fc * \pi)^2} \quad [1]$$

Etapa de inversión

Basándose en circuitos de calentamiento por inducción, para el inversor se planteó un circuito resonante. Donde se tienen tres variables para el diseño; la frecuencia de trabajo, el valor del capacitor C2 y el valor de la bobina de inducción (L2) previamente obtenida (ver tabla 2).

Frecuencia de trabajo

Para establecer la frecuencia de trabajo inicialmente se realizó un análisis por elementos finitos del calentamiento por inducción. Los parámetros de entrada para el análisis se detallan a continuación:

- Geometría: bobina previamente definida (50 espiras, 54 cm diámetro y 13 cm largo). En el centro de esta se graficó un tubo de media pulgada
- Materiales: cobre (bobina), hierro galvanizado (tubo central) y aire (contorno)
- Potencia: 2000 W
- Temperatura inicial: 23.5°C
- Tiempo para respuesta: 0.5 segundos
- Frecuencias: (5, 10, 15, 20, 25 y 30) KHz

Las simulaciones a 5 y 10 KHz generaron errores por lo que no se obtuvo resultados, pero a partir de los 15 KHz las simulaciones se concretaron.

De los resultados obtenidos (figura 4), a 15 KHz y 20 KHz se obtuvo un mayor calentamiento del tubo central llegando a 40°C con una diferencia no mayor a 2°C de la respuesta a 25 KHz y a 30 KHz se apreció una diferencia de 5°C.

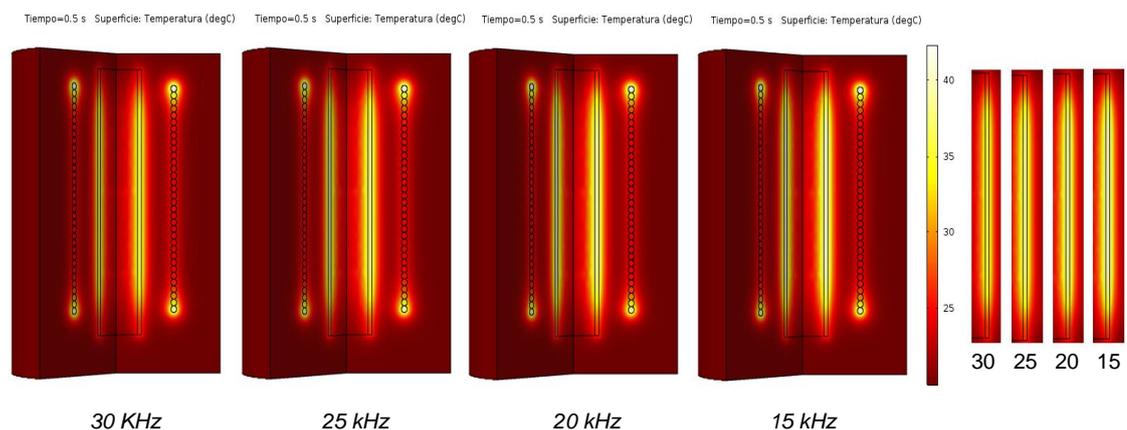


Figura 4. Análisis por Elementos Finitos

Capacitor C2

Para el diseño del capacitor se partió de un valor obtenido mediante la ecuación 2 (frecuencia de resonancia), con el valor obtenido de la bobina de inducción $L2 = 0.06$ mH y los dos valores de frecuencia 15KHz y 20 KHz en los cuales se obtuvo el mayor calentamiento de la pieza en el análisis por elementos finitos.

$$F = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{C * L}} \quad [2]$$

$$C2(f20kHz) = 1.05 \mu F \quad C2(f15kHz) = 1.87 \mu F$$

Teniendo los valores del circuito (incluyendo la bobina del filtro 0.20mH, el capacitor del filtro 6.8uF y alimentación del circuito 110 VAC), se realizó la simulación del mismo en el software Proteus. En la figura 5 se muestra la señal generada en la bobina con una frecuencia de trabajo de 20 KHz. A pesar de estar el capacitor (C2 = 1.05 uF) teóricamente en resonancia con la bobina, la variación de la onda es relativamente baja (29 V) con un voltaje pico de 121 V y en cuyo punto disminuye hasta 92 V.

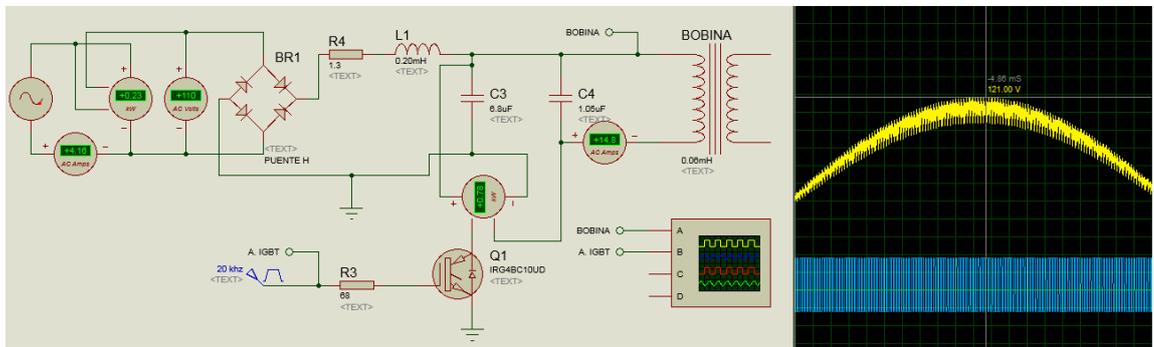


Figura 5. Simulación del circuito 20KHz, capacitor 1.05uF

En la figura 6 se muestra la señal resultante al cambiar la frecuencia a 15Khz y el valor del capacitor calculado para la resonancia a esa frecuencia (C2 = 1.87uF). Donde la variación de la onda aumenta considerablemente (51 V), con un voltaje pico de 128 V y en cuyo punto disminuye hasta 70 V.

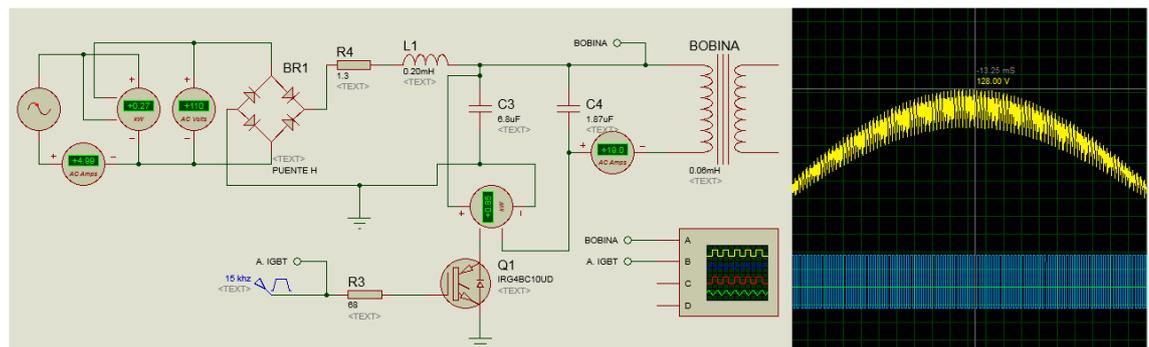


Figura 6. Simulación del circuito 15KHz, capacitor 1.87uF

Al tener una mejor respuesta con la frecuencia de 15Khz se cambió el valor del capacitor C2 a valores comerciales (tabla 4), Donde se obtuvo la mayor variación de la onda en la onda generada (114 V) disminuyendo el valor del capacitor hasta llegar al valor de 0.47 uF con el que se obtuvo el mejor resultado (voltaje pico de 145 V y en cuyo punto disminuye hasta 31 V) como se muestra en la figura 7.

Con valores menores a 0.47 μF , la variación de la onda se redujo (100 V) y se evidenció un mayor consumo de corriente (aumenta de 5 A a 14 A) por lo que se definió el valor de 0.47 μF como valor final. Al tratarse de un circuito inversor, tanto el capacitor del filtro como el capacitor en paralelo a la bobina debían ser capacitores no polarizados y debían tener un valor de voltaje superior a 200 VAC (mayor al voltaje pico).

Tabla 4. Valores comerciales de capacitores.

μF	μF	μF	μF	μF	μF
0,1	1	10	100	1000	10000
0,12	1,2	12	120	1200	12000
0,22	2,2	2,2	22	2200	22000
0,33	3,3	33	330	3300	33000
0,47	4,7	47	470	4700	47000
0,56	5,6	56	560	5600	56000
0,68	6,8	68	680	6800	68000
0,82	8,2	82	8200	8200	82000

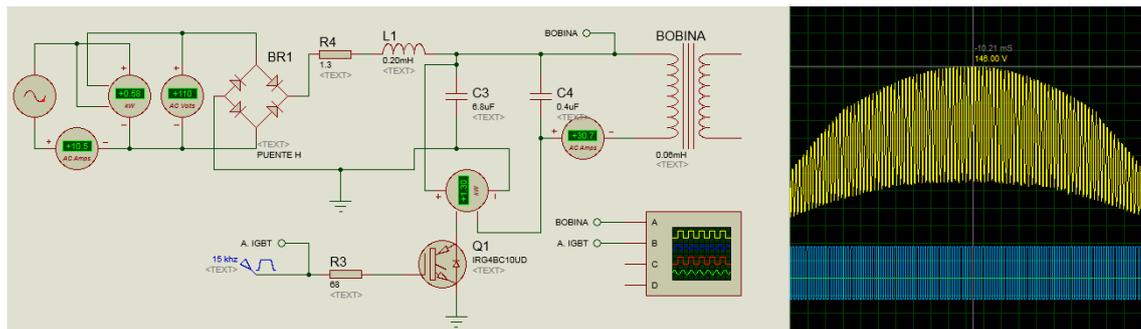


Figura 7. Simulación del circuito 15Khz, capacitor valor comercial 0.47 μF

Valores finales del circuito

Actualizando los valores de frecuencia de corte 15KHz y capacitor $C1 = 6.8 \mu\text{F}$ a la ecuación 1, se definió el valor final para la bobina del filtro $L1 = 0.05 \text{ mH}$; Con el valor la corriente (30.7 A) y el voltaje pico (148 V) obtenidos en la simulación (figura 9) y utilizando un factor de seguridad de dos, se definió el IGBT G60N100 (60A, 1000V). Para el correcto funcionamiento se utilizó el driver IR2110 recomendado para la excitación de estos transistores de potencia. En la figura 8 se muestra el circuito de potencia y a continuación, se detallan los valores finales de los componentes:

- $C1 = 6.8 \mu\text{F}$
- $L1 = 0.05 \text{ mH}$
- $C2 = 0.47 \mu\text{F}$
- $L2 = 0.06 \text{ mH}$
- IGBT, G60N100

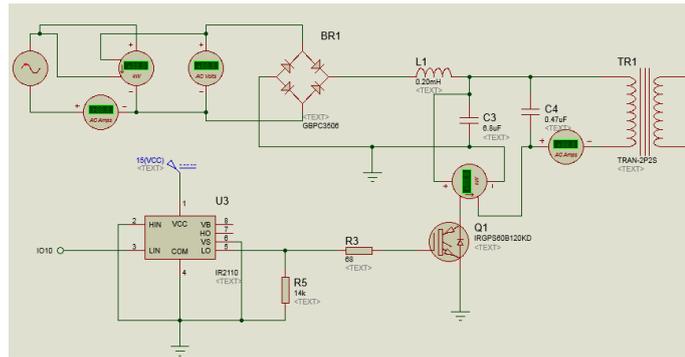


Figura 8. Circuito de potencia

2.1.2 DISEÑO DEL CONTROL

2.1.2.1 Interfaz y control

Para el control de la temperatura se establecieron 5 puntos de diferente potencia, estos puntos producen una frecuencia distinta siendo el más bajo 20 KHz y el más alto 16 KHz. La máxima potencia se limitó a 16 KHz como seguridad para el circuito debido el sobrecalentamiento presentado en el IGBT con la frecuencia de 15 KHz. La interfaz se diseñó de forma que el usuario seleccione a través de la pantalla táctil la potencia deseada, en la pantalla también se detalla el valor en grados centígrados de la temperatura del agua a la entrada y salida, así como el caudal en L/ hora (figura 9). Adicionalmente se incluyó un botón de encendido manual del sistema en el caso de desear calentar el agua a un flujo al cual el sensor de flujo no de respuesta (aprox. menor a 0.5 L/min). Puesto que el algoritmo diseñado solo activa el sistema al tener flujo de agua.



Figura 9. Interfaz con el usuario

2.1.2.2 Microcontrolador

Como requerimientos principales, el microcontrolador debía poseer salidas PWM capaces de trabajar a la frecuencia más alta requerida en el sistema (20KHz), realizar una lectura permanente de los sensores, y en paralelo procesar los datos de la pantalla táctil. Para este prototipo se empleó el Arduino UNO al cumplir con las características deseadas y al simplificar la programación por medio de librerías directas para el caso de los sensores y la pantalla táctil.

2.1.2.3 Sensor de temperatura

El sensor adecuado se determinó a partir del rango de temperatura del agua para uso doméstico (12°C hasta 60°C), el costo comercial y la adaptabilidad para tuberías. De los sensores más comunes empelados para medición de temperaturas menores a 100 °C disponibles en el mercado nacional se compararon las características (ver tabla 5) y se determinó el sensor DB215045 como el más indicado para esta aplicación al tener el costo más bajo, una señal digital e incluir el encapsulado para lectura bajo el agua.

Tabla 5. Características sensores temperatura

Sensor	Costo	Observaciones
LM 35	4-6 \$	lectura directa, no sumergible
DS18B20	4-7\$	Lectura directa Sumergible
PT 100	10-30\$	Acondicionamiento de señal necesario, sumergible

2.1.2.4 Sensor de caudal

El sensor de caudal se seleccionó con la presión máxima de la red pública de agua en Ecuador (0.44 MPa) y el rango de flujo de una ducha electrica convencional (1L/min). Se determino el sensor MJ-HZ43WA al cumplir con las características deseadas (rango de operación 1-60 L/min, presión 1.75 Mpa).

2.1.2.5 Display

Como requerimiento de la empresa auspiciante la interfaz debía realizarse por medio una pantalla táctil, para esto se determinó la pantalla más adecuada en cuanto a costo, tamaño y compatibilidad con el microcontrolador (tabla 6). Comparadas las características se determinó la pantalla nextion nx3224t024 como la más adecuada para esta aplicación.

Tabla 6. Características pantallas táctiles

Pantalla	Costo	# Cables	Memoria Interna	Programación
nextion nx3224t024	15-20\$	4	si	software especifico
nextion nx4024t032	25-30\$	4	si	software especifico
3.2 "TFT Genérica	15-20\$	10	no	Driver necesario
1,8 SPI TFT 128*160	10-\$15	10	no	Driver necesario

2.1.3 DISEÑO MECÁNICO

Como una solución para unir todos los componentes de forma compacta en caso de una futura producción en serie del producto, se diseñó una carcasa utilizando el software CAD SolidWorks. Esta carcasa del prototipo se diseño de forma que se pueda obtener por una impresión en 3D, cuyo material (plástico ABS) y forma cubren las necesidades del sistema; Al incrementarse el calor únicamente la tubería central y esta no estar en contacto con los otros elementos, el material de la carcasa solo debía soportar el peso de los componentes.

Midiendo los principales componentes (bobina, tubería central, pantalla Táctil), y asumiendo las dimensiones de la placa electrónica, se creó el modelo CAD de los estos. Con los modelos se diseñó la estructura de forma que se puedan ensamblar con facilidad.

Una vez realizada la estructura, usando Solid Simulation se analizó el efecto del peso de la bobina y la tubería tomados como un solo cuerpo de 780 g y a este análisis se incluyó el peso teórico de la placa electrónica (500 g). En la figura 10 se detallan los parámetros de entrada dispuestos para el análisis y los desplazamientos resultantes del mismo.



Figura 10. Análisis de elementos finitos de la carcasa

En los resultados del análisis realizado se obtuvo un valor de 30 como mínimo factor de seguridad, con lo cual se aseguró que la estructura diseñada soporte la carga generada por los componentes.

En la figura 11 se muestra el diseño CAD propuesto con todos los componentes ensamblados.

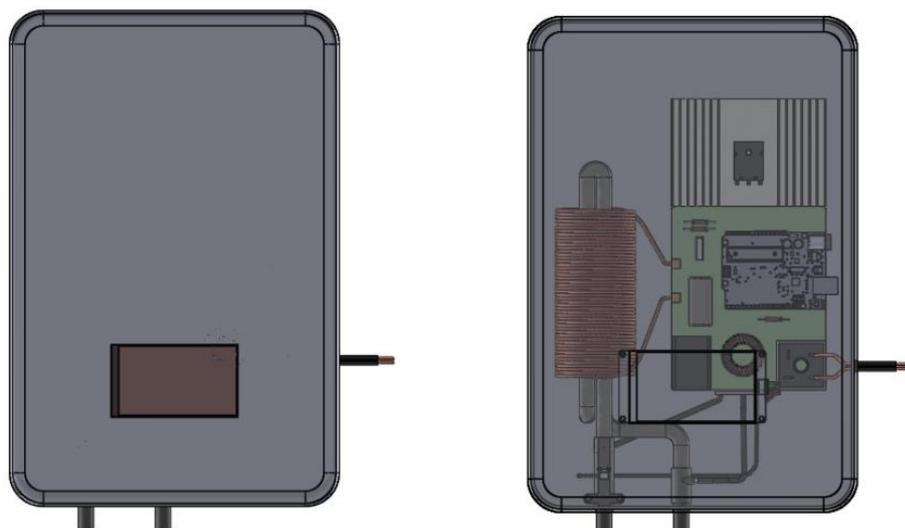


Figura 11. Ensamble CAD del sistema

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 RESULTADOS PROTOTIPO

3.1.1 MODELO PLANTEADO

Para validar el diseño se efectuaron las pruebas del sistema disminuyendo la frecuencia desde 20KHz hasta 16KHz, en pruebas con frecuencias menores a 15KHz se produjo cortocircuitos debido a la excesiva corriente y sobrecalentamiento del IGBT.

Inicialmente la pieza a ser calentada consistió en un solo tubo de hierro galvanizado de media pulgada (Figura 12). Donde se obtuvo los resultados mostrados en la tabla 7. El muestreo se realizó con un caudal de 1L/min al ser el punto en cual el microcontrolador recibía datos del sensor de flujo.

Tabla 7. Resultados del Prototipo inicial

Frecuencia	T Entrada	T Salida	Caudal
20KHz	17°C	26.0°C	1l/min
19KHz	17°C	27.0°C	1l/min
18KHz	17°C	28.5°C	1l/min
17KHz	17°C	30.0°C	1l/min
16KHz	17°C	32.0°C	1l/min



Figura 12. Modelo de inicial de la tubería central

Con el sistema funcionando en la menor potencia seleccionada, la temperatura del agua se incrementó en 9°C y a medida que la potencia se incrementó (frecuencias menores), se obtuvo un aumento en la temperatura del agua hasta llegar a 15°C sobre la temperatura a la entrada con la potencia máxima.

3.1.2 MODELO MODIFICADO

De forma experimental se reemplazó el tubo de media pulgada, por cuatro (4) tubos de un cuarto de pulgada conectados en serie (Figura 13). Basándose en el serpentín utilizado en los calefones a gas. Donde se obtuvo los resultados mostrados en la tabla 8.

Tabla 8. Resultados del prototipo modificado

Frecuencia	T Entrada	T Salida	Caudal
20KHz	17°C	32,0°C	1l/min
19KHz	17°C	34,5°C	1l/min
18KHz	17°C	36,0°C	1l/min
17KHz	17°C	37,5°C	1l/min
16KHz	17°C	40,5°C	1l/min



Figura 13. Modelo final de tubería central

En la prueba con el serpentín de cuatro tubos. A la menor potencia seleccionada, la temperatura del agua se incrementó en 15°C igualando la mayor temperatura alcanzada con el modelo de un solo tubo central.

Con la máxima potencia se obtuvo un incremento de 23.5 °C de la temperatura del agua a la entrada del sistema.

3.2 COMPRACIÓN CONSUMO ELECTRICO

Con una ducha eléctrica de 4400W a potencia máxima, con un caudal de 1l/min y con una temperatura de entrada de agua de 17°C se midió un aumento de temperatura de 18°C llegando a calentar el agua hasta 35°C; Comparando con el prototipo diseñado, a la frecuencia de 18KHz se obtuvo el mismo resultado. A esta frecuencia de trabajo incluyendo la energía para la alimentación del microcontrolador (menos de 1 W) y la fuente de alimentación para la excitación del IGBT (12 W aprox.), se trabaja con una potencia menor a 1000 W.

Asumiendo que una persona tome una ducha de 10 min todos los días del mes, representaría un consumo para el caso de la ducha eléctrica de 22 KWh/mes, mientras que con el calentador de inducción diseñado representaría un consumo de 5KWh/mes.

Con la tarifa eléctrica actual de 9,01 Centavos por KWh el usuario de la ducha eléctrica pagaría 1.98 \$, mientras si se usara el prototipo diseñado pagaría 0.45 \$.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- La bobina del sistema puede elaborarse con cable sólido o cable multifilar mientras soporten la potencia de trabajo, el cable multifilar esmaltado tiene una mayor resistividad eléctrica mientras el cable sólido facilita la construcción, con la medición de la bobina de cable sólido se obtuvo 0.02 mH y 0.7 Ohm mientras que con la bobina de cable esmaltado multifilar se obtuvo 0.06mh y 1.6 Ohm. Para el prototipo se determinó el cable multifilar esmaltado para la elaboración de la bobina al brindar un valor mayor de inductancia.
- El uso de un solo transistor de potencia disminuye considerablemente el costo del circuito inversor. Para el caso de los inversores tipo E se puede aumentar la variación de la onda generada disminuyendo levemente el valor del capacitor desde el valor obtenido en resonancia, en este proyecto se obtuvo un aumento en la variación de la onda de 51 V a 114 V al simular el circuito. Determinando en este prototipo 0.47uF como valor final del capacitor al obtener la mayor variación de voltaje comparado con los valores de capacitores comerciales más cercanos al mismo (0,33uF y 0,56uF).
- Para el control de potencia en el calentamiento por inducción se puede variar la frecuencia en un rango determinado mediante simulación o de forma experimental, estableciendo puntos de trabajo entre cambios significativos. Para este prototipo se estableció 20KHz para la potencia más baja por obtener con esta una temperatura a la salida de 26°C (temperatura ideal para un baño), hasta 16KHz para la potencia más alta al obtener con esta una temperatura a la salida de 40,5°C (39°C temperatura máxima recomendada para un baño) y por presentarse un sobrecalentamiento en el IGBT a menores frecuencias.
- El calentamiento de agua por inducción incrementa notablemente al recircular el fluido en la zona efectiva de generación del calor empleando una tubería en forma de serpentín. Con el cambio de la tubería por un serpentín en este prototipo se obtuvo una diferencia en la temperatura a la salida del agua de 8.5 °C superior a la obtenida con la tubería de un solo tubo central. Obteniendo a la máxima potencia una temperatura a la salida de 40,5°C.
- Al reemplazar la ducha eléctrica convencional por un calentador de agua por inducción, asumiendo un consumo diario de 10 minutos por 30 días. El consumo eléctrico disminuye de 22 KWh/mes a 5KWh/mes representando un ahorro de 77,27 % en luz.

RECOMENDACIONES

- Analizar el efecto del ruido producido en las frecuencias de trabajo, En el caso de este prototipo las frecuencias se encuentran dentro del rango de audición del oído humano.

- Se puede aprovechar el calor generado en el IGBT para aumentar la eficiencia del sistema, así como utilizar el agua para mantener el transistor en un óptimo rango de temperatura.
- Con frecuencias más bajas se puede obtener ondas con voltaje positivo y negativo, con el cual se podría generar más calor en las piezas ferromagnéticas debido a sus características.
- Para mayor seguridad y durabilidad del sistema se puede ventilar la bobina de inducción, debido a que el incremento de su temperatura disminuye la resistencia eléctrica en el caso del cobre.

BIBLIOGRAFÍA

- Atmospheres, I. (2017). *Induction atmospheres*. Obtenido de http://www.inductionatmospheres.com/induction_heating.
- COMSOL. (Agosto de 2011). *Induction Heating Process Design*.
- CUSHICONDOR, E. (Noviembre de 2009). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE COCINA DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA. Quito.
- Fisk, M. (2008). *Simulation of Induction Heating in Manufacturing*.
- FLORES, A. A. (Agosto 2009). *Sistema de calentamiento por inducción basado en un inversor medio puente de carga resonante*.
- Gonzalez, W. (Abril de 2008). *Diseño y Construcción de Bobina de calentamiento por inducción para fundición de titanio*. Venezuela.
- MohammadHosseinTavakoli, H. (2011). *Influence of workpiece height on the induction heating process*. ELSEVIER.
- MUERZA, A. F. (26 de Diciembre de 2012). *EROSKI CONSUMER*. Obtenido de http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2012/09/26/213420.php
- Pacheco, E. A. (Mayo de 2015). *Valoración del impacto socioeconómico por la eliminación del subsidio de gas licuado de petróleo en la zona quitumbe en el sur de Quito*. Quito, Ecuador.
- PICON, J. B. (JUNIO de 2013). *CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA: DISEÑO CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO*.
- Quevedo, L. F., Quizhpi, F. A., Morales, J. A., & S, R. J. (ABRIL de 2016). *Initial Results from a Prototype Corresponding to an Induction Water Heater*.
- Quevedo, L., & César, M. (ABRIL de 2016). *DISEÑO Y PRUEBAS DE UNA BOBINA PARA UN CALENTADOR DE AGUA POR INDUCCIÓN*. CUENCA.
- Rashid, M. H. (2017). *Electrónica de Potencia*. Pearson.
- Sánchez, I. R. (2010). *Corrientes Parásitas*.
- Yongxing Wang, Y. L. (2012). *Research and Design on IGBT Induction Heating Power*.

ANEXOS

ANEXO 1

DATASHEET IGBT G60N100

FGL60N100BNTD



IGBT

FGL60N100BNTD

NPT-Trench IGBT

General Description

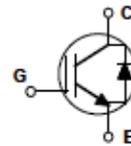
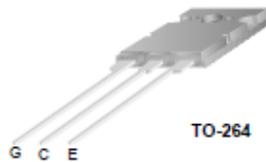
Trench insulated gate bipolar transistors (IGBTs) with NPT technology show outstanding performance in conduction and switching characteristics as well as enhanced avalanche ruggedness. These devices are well suited for Induction Heating (I-H) applications

Features

- High Speed Switching
- Low Saturation Voltage : $V_{CE(sat)} = 2.5\text{ V @ } I_C = 60\text{ A}$
- High Input Impedance
- Built-in Fast Recovery Diode

Application

Micro- Wave Oven, I-H Cooker, I-H Jar, Induction Heater, Home Appliance



Absolute Maximum Ratings T_C = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Description	FGL60N100BNTD	Units
V_{CEs}	Collector-Emitter Voltage	1000	V
V_{GEs}	Gate-Emitter Voltage	± 25	V
I_C	Collector Current @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	60	A
	Collector Current @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	42	A
$I_{CM(1)}$	Pulsed Collector Current	120	A
I_F	Diode Continuous Forward Current @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	15	A
P_D	Maximum Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	180	W
	Maximum Power Dissipation @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	72	W
T_J	Operating Junction Temperature	-55 to +150	$^\circ\text{C}$
T_{stg}	Storage Temperature Range	-55 to +150	$^\circ\text{C}$
T_L	Maximum Lead Temp. for soldering Purposes, 1/8" from case for 5 seconds	300	$^\circ\text{C}$

Notes :
 (1) Repetitive rating : Pulse width limited by max. junction temperature

Thermal Characteristics

Symbol	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}(\text{IGBT})$	Thermal Resistance, Junction-to-Case	--	0.69	$^\circ\text{C/W}$
$R_{\theta JC}(\text{DIODE})$	Thermal Resistance, Junction-to-Case	--	2.08	$^\circ\text{C/W}$
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	--	25	$^\circ\text{C/W}$

ANEXO 2 MODELO CAD

