



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL

TRABAJO DE TITULACIÓN EN OPCIÓN AL GRADO DE:

INGENIERO/A EN ELECTRÓNICA DIGITAL Y TELECOMUNICACIONES

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CALEFACCIÓN
PARA PILETAS DE AGUA MEDIANTE INDUCCIÓN MAGNÉTICA**

AUTOR/ A: ACOSTA RIVERA GALO FABIAN

TUTOR/ A: Mg PARRA BALZA FIDEL DAVID

QUITO- ECUADOR

AÑO: 2019

DECLARACIÓN

Yo, Acosta Rivera Galo Fabian, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mi derecho de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Acosta Rivera Galo Fabian

CERTIFICACIÓN

En calidad de TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACION “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CALEFACCIÓN PARA PILETAS DE AGUA MEDIANTE INDUCCIÓN MAGNETICA” Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Acosta Rivera Galo Fabian bajo mi supervisión y revisión de su contenido.

Ing. Fidel Parra, MSc.

TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

AGRADECIMIENTO

Al finalizar este trabajo quiero utilizar este espacio para agradecer a Dios por todas sus bendiciones, a mis Padres que han sabido darme su ejemplo de trabajo y honradez y a mi novia Melania por su apoyo y paciencia en este proyecto de estudio.

Mi profundo agradecimiento al Ing. Mario Egas (MSc) pilar fundamental para la realización de este proyecto investigativo y a la empresa IMETRILEC, por confiar en mí, abrirme las puertas y permitirme realizar todo el proceso investigativo dentro de sus instalaciones.

De igual manera mis agradecimientos a la Universidad Tecnológica Israel, a toda la Facultad de Electrónica y Telecomunicaciones, a mis profesores, Ing. Wilmer Albarracín (Msc), Ing. Millar Escalona (MSc), Ing. David Cando, Ing. Tania Mayorga, quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Ing. Fidel Parra (MSc), tutor y principal colaborador durante todo este proceso investigativo, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a:

A mis padres Santos Acosta y Custodia Rivera quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y de valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A mis amigos Diego Cepeda y Antonio Contreras por su apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas propuestas.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a mi novia Melania Heredia, por apoyarme cuando más lo necesite, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias amor, siempre te llevo en mi corazón.

RESUMEN

La tecnología del calentamiento por inducción magnética se ha implantado con satisfacción para procesos tales como: el recocido de piezas cerámicas, endurecimiento superficial, fusión, forjado en caliente, perforado, soldadura, entre otras, demostrando así su versatilidad y efectividad. Este Artículo detalla el diseño y la construcción de un prototipo de calefacción para piletas de agua mediante inducción magnética, su funcionamiento está basado en un inversor cuasi resonante el que está encargado de generar ondas electromagnéticas de alta frecuencia, las cuales inducen corrientes parasitas de alto valor que producen el calentamiento, cuando un material está cerca de la bobina de inducción en este caso un recipiente que contenga elementos ferromagnéticos. El aporte con esta investigación es el estudio de la energía consumida y el tiempo empleado a diferentes niveles de potencia.

Palabras Claves:

Inducción magnética

Inversor

Corrientes parasitas

Ferromagnéticos

Ondas electromagnéticas

ABSTRACT

The technology of magnetic induction heating has been implanted with satisfaction for processes such as annealing of ceramic parts, surface hardening, melting, hot forging, perforating, welding, among others, proving its versatility and effectiveness. This article details the design and construction of a prototype heating for water pools by magnetic induction, its operation is based on a quasi-resonant inverter that is responsible for generating high-frequency electromagnetic waves, which induce high-value parasitic currents that produce heating, when a material is near the induction coil, in this case, is a container containing ferromagnetic elements. The contribution with this research is the study of the energy consumed and the time employed at different levels of power.

Keywords:

Magnetic induction

Inverter

Parasitic currents

Ferromagnetic

Electromagnetic waves

INDICE

DECLARACIÓN	iii
CERTIFICACIÓN	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUCCIÓN	2
Antecedentes de la situación objeto de estudio.....	2
Planteamiento del problema.....	4
Formulación del problema	5
Justificación	5
Objetivo general:	6
Objetivos específicos:.....	6
Alcance	6
Descripción de los capítulos	7
CAPÍTULO I	8
1 Fundamentación Teórica	8
1.1 Tipos de pérdidas de energía.....	9
1.1.1 Pérdidas por histéresis magnética	10
1.1.2 Pérdidas por corrientes de Foucault	10
1.2 Resistencia eléctrica de la pieza a calentar	11
1.3 Inductancia	13
1.4 Efecto pelicular.....	13
1.5 Frecuencia de Trabajo Resonante.....	14
1.6 La profundidad de penetración.....	14
1.7 Energía Transferida En Forma De Calor	16

1.8 Potencia.....	17
1.9 Eficiencia Térmica.....	17
1.10 Eficiencia Eléctrica.....	18
1.11 Circuito equivalente del calentador por inducción.....	19
1.12 Magnetización.....	19
1.13 Microcontrolador Arduino Uno.....	21
1.13.1 Características técnicas.....	22
1.14 Sensor de Temperatura DS18B20.....	22
1.14.1 Características del sensor DS18B20.....	23
1.15 Display LCD.....	23
1.15.1 Las características generales de un módulo LCD 16 x 2:.....	23
CAPITULO II.....	24
2 Marco Metodológico.....	24
2.1 Tipos y Diseño de Investigación.....	24
2.2 Diseño de la Investigación.....	25
2.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de la Información.....	25
2.4 Metodología Seleccionada.....	26
2.4.1 Definir el problema.....	26
2.4.2 Subdividir el problema.....	26
2.4.3 Definir conceptos básicos.....	27
2.4.4 Recolección de información.....	27
2.4.5 Fase constructiva.....	27
2.4.6 Finalizar el diseño.....	27
CAPITULO III.....	28
3 Propuesta.....	28
3.1 Diseño y construcción del prototipo.....	29
3.2 Circuito de Potencia.....	30

3.3 Cálculos del Circuito de Potencia.....	31
3.3.1 Alimentación requerida DC para el prototipo	31
3.3.2 Alimentación requerida AC para el prototipo	31
3.3.3 Diseño del rectificador	31
3.3.4 Diseño de la red LC.....	32
3.3.5 Estimación de la potencia necesaria para el calentador de agua.....	32
3.4 Profundidad de penetración.....	33
3.5 Resistencia equivalente	33
3.6 Bobina de trabajo.....	34
3.6.1 Calculo del número de espiras	34
3.7 Inversor	35
3.8 Topología de los inversores	35
3.8.1 Inversor de medio puente	35
3.8.2 Secuencia de conmutación.....	36
3.8.3 Control de inversor de medio puente	36
3.8.4 Inversor en H o puente completo	37
3.9 Circuito inversor utilizado	38
CAPÍTULO IV	39
4 Desarrollo	39
4.1 Fabricación del circuito de alimentación	39
4.2 Construcción del sistema de control digital	39
4.3 Construcción del control de temperatura	40
4.4 Programación del microcontrolador Arduino Uno	41
4.4.1 Características y funcionamiento del Display LCD.....	42
4.5 Diagrama de flujo para el control de temperatura	43
4.5.1 Descripción del diagrama de bloques:	44
4.6 Construcción del circuito de potencia.....	45

4.7 Implementación	45
4.8 Funcionamiento	45
4.9 Pruebas de funcionamiento	46
5 CONCLUSIONES	51
6 RECOMENDACIONES	53
7 Bibliografía	54
8 Anexo 1	57
9 Anexo 2	59
9.1 Programación del microcontrolador Arduino Uno	59
10 Anexo 3	63
11 Anexo 4	65

TABLA DE FIGURAS

Figura 1.1 Principio de calentamiento por inducción magnética. (Gonzalez W, 2008) se pueden apreciar las líneas de corriente eléctrica y de flujo magnético.....	8
Figura 1.2 Región de transición.....	13
Figura 1.3 Distribución de la corriente en función de la profundidad.....	15
Figura 1.4 Curva de la profundidad de penetración de corrientes inducidas en función de la frecuencia.....	16
Figura 1.5 Modelo eléctrico del conjunto bobina-pieza equivalente a un transformador	19
Figura 1.6 Curvas de magnetización de nueve materiales ferromagnéticos diferentes, mostrando el efecto de saturación. 1.Hoja de acero, 2. Acero al silicio, 3. Acero de crisol, 4. Acero al tungsteno, 5. Acero magnético, 6. Hierro de crisol, 7. Níquel, 8. Cobalto, 9. Magnetita.....	20
Figura 1.7 Placa Arduino Uno que incluye un microcontrolador de la marca Atmel ATmega328P, toda la circuitería de soporte, un reguladores de voltaje y un puerto USB que permite programar a la placa desde cualquier PC.....	21
Figura 1.8 Pines de la placa de Arduino Uno de acuerdo al fabricante ATMEL de Italia	21
Figura 1.9 Sensor One Wire DS18B20	22
Figura 1.10 Conexión de varios sensores de temperatura.....	23
Figura 1.11 Display 16 x 2	23
Figura 3.1 Circuito básico de una cocina de inducción magnética (Moragrega, 2010)..	28
Figura 3.2 Diagrama de bloques del calentador de agua por inducción magnética.	29
Figura 3.3 Circuito de potencia del calentador de inducción	30
Figura 3.4 Inversor de medio puente.....	36
Figura 3.5 Voltaje de salida del inversor de medio puente.	37
Figura 3.6 Inversor de onda completa.....	37
Figura 4.1 Microcontrolador Arduino Uno	40
Figura 4.2 Sensor One Wire DS18B20	40

Figura 4.3 Pines del sensor de temperatura.....	41
Figura 4.4 Conexión de un LCD 16x2.....	42
Figura 4.5 Diseño del diagrama de bloques del circuito de control	44
Figura 4.6 Circuito resonante	46
Figura 4.7 Bobina de trabajo con núcleo ferromagnético	47
Figura 4.8 Circuito oscilador de alta frecuencia.....	47
Figura 4.9 Condensadores que conforman el circuito tanque	47
Figura 4.10 Diseño de la baquelita	48
Figura 4.11 Placa electrónica para el control	48
Figura 4.12 sistema implementado del calentador de agua por inducción	49
Figura 4.13 Osciloscopio SKMI (SK0404).....	49
Figura 4.14 Onda rectificada y filtrada	49

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de calentamiento por inducción magnética, son desarrollados bajo el principio de Faraday (1831), en la actualidad tienen aplicación tanto en el ámbito doméstico como el industrial. Bajo este principio se han confeccionado motores eléctricos, transformadores, generadores, aunque su aplicación no es perfecta ya que por su propia naturaleza se producen pérdidas de energía durante el proceso de inducción electromagnética. Estas pérdidas afectan negativamente la funcionalidad y el rendimiento en un sistema eléctrico así lo menciona López (López, 2016). Para la realización de este proyecto se propone aprovechar las pérdidas generadas por el fenómeno de inducción antes expuesto al convertirla en energía térmica para el proceso de calentamiento por inducción.

En ese sentido, el procedimiento consiste en construir una bobina y al interior de la bobina introducir un material ferromagnético como núcleo, este material ferroso se calentará al conducir una corriente alterna a través de la bobina. Esta corriente se puede modelar a través de una inductancia en serie o en paralelo con una resistencia. Para lograr la circulación de corriente adecuada se utiliza una fuente de potencia eléctrica como también un generador de frecuencia controlado que junto con las propiedades del material que se encuentra como núcleo determinan la temperatura y su evolución en el tiempo.

Este método de calefacción de agua también se conoce como convertidor resonante; el cual es básicamente consta de un puente inversor, alimentado por una fuente de tensión continua, que pasa por un generador de alta frecuencia y esto se conecta a una carga RLC, el control de la potencia de trabajo entregada depende del voltaje suministrado a la entrada del sistema o por medio de la variación de la frecuencia de resonancia.

Antecedentes de la situación objeto de estudio

La tecnología del calentamiento por inducción magnética se ha implantado con satisfacción para procesos tales como: el recocido de piezas cerámicas, endurecimiento superficial, fusión, forjado en caliente, perforado, soldadura, entre otras, demostrando así su versatilidad y efectividad.

No obstante, para el calentamiento de agua doméstico tradicionalmente se utilizan dos métodos convencionales: a) por resistencia eléctrica y b) por combustión de gas, de los cuales el sistema de combustión de gas ha resultado más eficiente que el de resistencia eléctrica. Sin embargo, estudios realizados por Picón (Picón A, 2007) en su trabajo de

investigación titulado “Calentamiento por inducción electromagnética” su objetivo fue aplicación para la fundición de metales a través de un diseño de carga resonante a partir de un solenoide.

El artículo presenta los conceptos básicos que describen el proceso de calentamiento por inducción electromagnética, así como también los sistemas eléctricos y electrónicos necesarios para lograrlo. Se describen los resultados, alcanzados con un primer prototipo desde el punto de vista eléctrico y concluye que el sistema de control propuesto puede funcionar en equipos de mayor potencia. (Picón A, 2007)

El aporte para la actual investigación es que permite contrastar las formas de onda que se obtiene de la carga RLC con las ondas que se generan a diferentes frecuencias del actual proyecto.

Por otra parte Collaguazo (Collaguazo A, 2009) en su proyecto titulado “Diseño y construcción de un prototipo de una cocina de inducción electromagnética” enfoca su trabajo en la cocción más eficiente de los alimentos realizando una comparativa entre las cocinas de resistencia eléctrica, las cocinas a gas y las cocinas de inducción.

El proyecto detalla el diseño y la construcción de un prototipo de una cocina de inducción magnética, su funcionamiento está basado en un inversor cuasi resonante el que está encargado de generar ondas electromagnéticas de alta frecuencia, las cuales inducen corrientes parasitas de alto valor que producen el calentamiento, cuando un material está cerca de la bobina de inducción en este caso es un recipiente que contenga elementos ferromagnéticos. El aporte con esta investigación es el estudio de la energía consumida y el tiempo empleado a diferentes niveles de potencia.

Así también Martínez (Martínez J, 2013) desarrolló un trabajo titulado “Desarrollo de un inversor resonante por inducción electromagnética” se fundamenta en la generación de una señal de corriente alterna con forma sinusoidal a una frecuencia de 65KHz y una potencia en la carga de 1592W con el propósito de generar un campo magnético alterno cerca de la pieza de trabajo y así calentar dicho material ferroso.

En su proyecto propone un convertidor de carga resonante implementado con tecnología de estado sólido en el cual se utilice la técnica de conmutación suave con el fin de reducir las pérdidas de energía en conmutación, así como el contenido armónico, obteniendo de esta manera, la máxima eficiencia del circuito y del sistema en general, además tiene la posibilidad de manejar altos niveles tanto de potencia, como de

frecuencia. (Martínez J, 2013), de manera tal que el aporte para el proyecto actual es cimentar un enfoque para el diseño y la implementación de convertidores de carga resonante.

Con relación a la eficiencia que se consigue con la cocina de inducción, el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América realizó, en diversos estudios con las cocinas domésticas, llegando a las siguientes conclusiones: una cocina de GLP presenta una eficiencia del 40% frente a un 76% de las cocinas eléctricas con resistencia y 86% la de inducción, respectivamente. (Turmero P, 2018). En la Figura 1.1 se muestra una comparación de energía y del tiempo empleado para el calentamiento de agua con diferentes tecnologías.

Como se puede notar en la *Figura ii.1* para calentar dos litros de agua de 20°C a 75°C el calentamiento por inducción magnética es el más rápido y económico en consumo de energía.

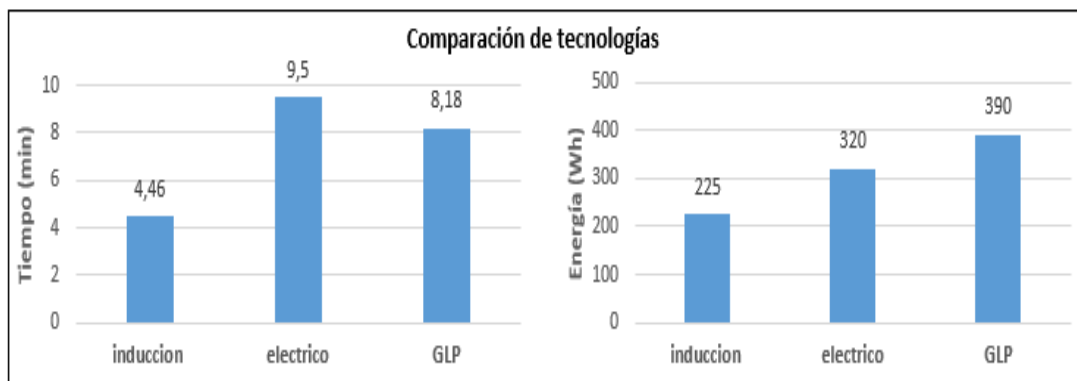


Figura ii.1 Comparación de tecnologías para el calentamiento de agua. (Turmero P, 2018)

Planteamiento del problema

En el pasado la producción de calor para el calentamiento de agua por el método de inducción fue considerado una transformación de energía muy costosa, sin embargo, esta visión ha cambiado gracias a los avances científicos y los estudios realizados sobre las corrientes parasitas o corrientes de Foucault. Es decir, el uso de la corriente alterna en altas frecuencia de trabajo.

En ese momento se desarrollan dispositivos semiconductores y técnicas de conmutación suave que permiten utilizar convertidores estáticos, basados en el aprovechamiento de este fenómeno, el propósito es utilizar las pérdidas de energía y transformarlas en energía térmica, este fenómeno también ocurre en los motores y transformadores eléctricos, y se traducen básicamente en pérdidas de energía.

Explícitamente el problema o el caso de estudio que se intenta solucionar, es encontrar los dispositivos y la tecnología necesaria para calentar agua mediante energía eléctrica, sin tener contacto galvánico o eléctrico con este líquido. Evitando así que los usuarios tengan el riesgo de descargas eléctricas por el efecto de ionización del agua que causa problemas graves en su salud, como lo dice la revista D Salud con su artículo el efecto de los iones. (El efecto de los iones, 1999)

En la actualidad existen dos métodos comunes de calefacción de agua los cuales son: por resistencia eléctrica y Gas Licuado de Petróleo (GLP) lo que implica altos costos por el consumo frecuente de energía; el problema se presenta por que este método de calentamiento de inducción para piletas es poco explotado en el país. Con este proyecto lo que se intenta es mejorar la eficiencia con respecto a los sistemas de calentamiento convencional, dar seguridad al usuario por que no habría contacto físico directo del agua conductiva con los bañistas y así generar una mejor calidad de vida para los usuarios a nivel doméstico.

Formulación del problema

Por lo antes expuesto surge la siguiente interrogante. ¿Cómo diseñar y construir un prototipo de calentamiento de agua por el método de inducción magnética?

Justificación

El desarrollo de este proyecto tiene un impacto considerable en Ecuador debido a su innovación, ya que esta técnica no ha sido empleada en el País y representa un aporte para futuros desarrollos basados en este principio. También tendrá un impacto de tipo ambiental pues con este método de calentamiento no se queman combustibles fósiles, y se evitan de esta forma las emisiones tóxicas propias de los métodos de calentamiento tradicionales.

Este nuevo sistema de calentamiento ofrecerá múltiples beneficios pues es una técnica limpia que no emite sustancias nocivas que contaminen el ambiente. Es segura debido a que el calentamiento es dirigido a una sección específica. Además de que se conseguirá un sistema eficiente por el apreciable ahorro energético obtenido. En la actualidad es necesario el uso de sistemas que permitan obtener la mayor eficiencia, rendimiento y fiabilidad, tanto en el manejo del sistema de calentamiento como en su operación.

El método de calentamiento por inducción magnética presenta ventajas con respecto a otros sistemas de calentamiento, una de ellas es que el calentamiento se genera dentro del mismo cuerpo sin transferencia calórica de un elemento a otro y se calienta así solo una sección del material. Además de que se puede controlar la temperatura final y la velocidad con la que se calentará el agua.

Una de las principales razones para realizar esta investigación es beneficiar a la población que hace uso de calefacción de agua a través de Gas Licuado de Petróleo (GLP) y resistencia eléctrica, ya que la tecnología de calentamiento por inducción magnética, (CPI), brinda una mayor eficiencia y un menor costo de mantenimiento. Esta solución vendría a ser de mucha utilidad para los usuarios que se han visto en la necesidad de sustituir su antiguo sistema de calefacción por uno moderno, económico y de alta eficiencia energética.

Por otra parte, se justifica el presente trabajo desde el punto de vista ambiental por ser más eficiente que los métodos convencionales, y es amigable con el ambiente al no generar contaminación y no aporta de manera negativa a la destrucción de la capa de ozono.

Objetivo general:

Crear un sistema de calefacción indirecta de agua mediante inducción electromagnética

Objetivos específicos:

- Analizar los distintos métodos de calefacción indirecta de agua a partir de inducción magnética.
- Establecer los parámetros de funcionamiento y control del sistema de calefacción indirecta de agua mediante inducción magnética.
- Diseñar el circuito electrónico de control del sistema de calefacción.
- Desarrollar un prototipo de calefacción por inducción magnética.
- Realizar pruebas de funcionamiento.

Alcance

La investigación se va a desarrollar siguiendo los lineamientos teóricos de los físicos Faraday y Ampere citado por Kosow y David H (Kosow I, 1990), (David H, 1999) los cuales investigaron a profundidad la teoría del electromagnetismo, esto aportara considerablemente para el diseño y construcción de un prototipo de calefacción para

piletas de agua mediante inducción magnética. Se desarrolló un prototipo de baja potencia donde se espera llegar a una potencia de 180 kW, con una frecuencia sobre los 20 kHz, a una temperatura de 60°C mismas que están basadas en las normas IEC 60335-2-35 y en el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 247 (ver anexo 1). También se tomará en cuenta un sistema de protección de voltaje, corriente y temperatura.

Descripción de los capítulos

Capítulo 1.- Fundamentación teórica, en este capítulo se presentan los conceptos básicos de electromagnetismo, mecanismos de disipación de energía para producir calentamiento enfocándose principalmente en los sistemas alimentados por voltaje

Capítulo 2.-Diseño del prototipo: En este capítulo se describe la etapa de potencia con su respectiva etapa de alimentación, circuito de oscilación, así como el diseño de la etapa de control.

Capítulo 3.-Resultados Experimentales: En este capítulo se presentan resultados de los ensayos experimentales y evaluación de las ventajas al utilizar el método de inducción magnética

Capítulo 4.-Conclusiones: En este capítulo se presentan las conclusiones generales y particulares de la presente Tesis y las recomendaciones para futuros trabajos.

Finalmente se anexan las referencias que se utilizaron para la recopilación de la información para el desarrollo de este proyecto.

CAPÍTULO I

1 Fundamentación Teórica

El fenómeno de calentamiento por inducción magnética consiste en la generación de un campo magnético, que induce corrientes parásitas llamadas también corrientes de Eddy ó corrientes de Foucault sobre un material ferromagnético. Se provoca de esta manera un calentamiento al interior del material que hasta puede llegar a fundirlo. Para la presente investigación del calentamiento de agua por inducción magnética es necesario tener en cuenta el principio teórico de este fenómeno, el cual se basa en la aplicación de varias ecuaciones de Maxwell, las leyes de Ampere, Faraday, y el efecto Joule. El efecto joule cumple un papel fundamental, porque permite aprovechar las corrientes parásitas para generar calor. En la Figura 1.1 se muestra el principio de calentamiento por inducción magnética realizado por González. (Gonzalez W, 2008)

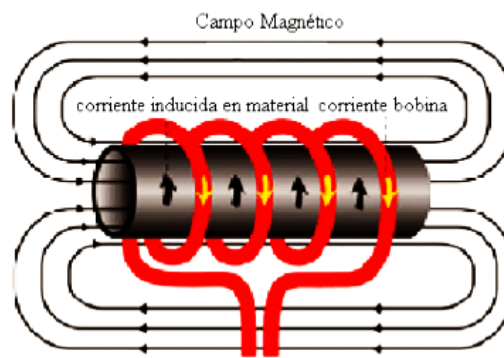


Figura 1.1 Principio de calentamiento por inducción magnética. (Gonzalez W, 2008) se pueden apreciar las líneas de corriente eléctrica y de flujo magnético.

Como se puede apreciar en la Figura 1.1 al aplicar una corriente variable en el tiempo a una bobina se genera un campo magnético; y si dentro de ella se encuentra un material ferromagnético este se calentará por inducción electromagnética. La corriente que circula por un material conductor genera un campo magnético cuya amplitud y distribución se representa matemáticamente con la ayuda de la ecuación de la ley de Ampere como se indica en la Ecuación 1.1 donde: N es el número de espiras del inductor; i es la corriente que lo atraviesa; H es la intensidad de campo magnético y L es la longitud del circuito magnético.

$$Ni = \oint H \cdot dl = H \cdot L \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Si se aplica una voltaje variable en el tiempo, de acuerdo a la ecuación de Faraday se induce un flujo magnético variable en el tiempo que se describe por la Ecuación 1.2

en donde V ; es el voltaje inducido; N es el número de espiras; Φ es el flujo del campo magnético

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \text{ (Volt)} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

El signo negativo de la Ecuación 1.2 indica que el voltaje inducido genera una corriente cuya dirección se opone al cambio del flujo magnético asociado, esta corriente inducida genera las corrientes de Foucault, que son responsables del calentamiento por el efecto Joule y que disipan la potencia en forma de calor. (Magnetismo, 2005)

Con la Ecuación 1.3 se puede calcular la potencia requerida para calentar el material ferromagnético. En dónde: P es la potencia disipada; i_f^2 es la corriente inducida a alta frecuencia; R es la resistencia equivalente de la pieza a calentar, (por donde circula la corriente inducida, debido al campo magnético variable).

$$P = i_f^2 \cdot R_{eq} \text{ (watt)} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

El funcionamiento de un calefactor por inducción electromagnética es similar al de un transformador. La bobina de inducción representa al devanado primario mientras que el material metálico ferromagnético representa el bobinado secundario. La carga en el devanado secundario se representa por una sola espira cerrada, que simula el comportamiento de un transformador en cortocircuito. Se considera que la resistencia equivalente del secundario tiene un valor pequeño, el nivel y rapidez del calentamiento dependerá de la frecuencia de la corriente inducida y de la permeabilidad magnética del material. El calentamiento por inducción magnética se realiza sin contacto físico entre el generador del campo magnético y el material metálico. Se proporciona de esta manera una conversión de energía limpia y eléctricamente segura que transforma la energía eléctrica en energía térmica.

De acuerdo a la ecuación 1.3 para generar pérdidas por el efecto Joule $i^2 \cdot R$ son necesarias grandes corrientes inducidas, debido a que la resistencia del material es muy pequeña. La potencia entregada por el campo magnético al material inducido es proporcional al cuadrado de la corriente, que al disiparse en el material que genera calor (Ver ecuación 1.3)

1.1 Tipos de pérdidas de energía

Existen dos principales tipos de pérdidas de energía en un medio ferromagnético las cuales son: pérdidas por histéresis magnética y pérdidas por corrientes de Foucault.

1.1.1 Pérdidas por histéresis magnética

Existe un mecanismo mediante el cual se producen pérdidas dentro de un material sometido a un campo magnético variable, este fenómeno es llamado histéresis magnética (Ver figura 1.1.1). Las pérdidas por este efecto son causadas por el proceso de reorientación de los dominios y dipolos magnéticos en el material sometido. El fenómeno de histéresis se manifiesta como un retraso entre la respuesta magnética B del material con relación al campo H externo aplicado y explica la falta de reversibilidad en la curva de magnetización en los materiales ferromagnéticos. En la Figura 1.1.1 se muestran las curvas de magnetización denominadas de histéresis de dos materiales ferromagnéticos distintos. De los dos materiales, aquel con la curva de histéresis con mayor área interior presenta mayores pérdidas por magnetización. Debido a que la contribución de las pérdidas por histéresis para el calentamiento de materiales es menor que las del efecto joule de las corrientes de Foucault se pueden considerar de magnitud despreciable en este proyecto.

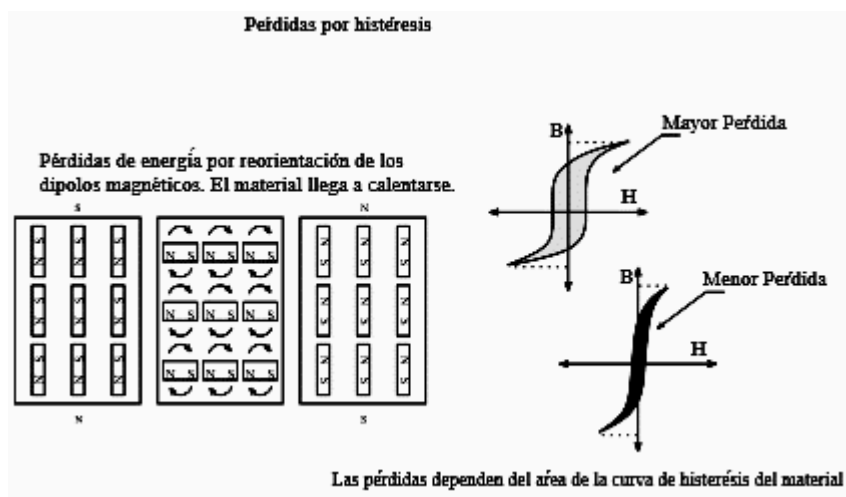


Figura 1.1.1 Pérdidas por histéresis. (Gonzalez, 2008)

1.1.2 Pérdidas por corrientes de Foucault

Las pérdidas de energía debido al calentamiento Joule asociadas a la inducción electromagnética que origina las corrientes parásitas de Foucault son las más importantes en materiales ferromagnéticos. Las pérdidas por histéresis también se presentan en materiales ferromagnéticos, pero su efecto no es de mayor importancia comparado con el producido por las corrientes parásitas. (Turmero P, 2018). La principal ventaja de los sistemas de calentamiento por inducción (CPI) consiste en que el calentamiento del material no se obtiene mediante la radiación del calor, sino que este se produce directamente en el interior del material, por esta razón, se piensa que el proceso de

calentamiento por inducción es más eficiente que el calentamiento por resistencia. Al circular una corriente eléctrica por una bobina, el campo magnético generado permite la creación de corrientes en materiales conductores cercanos. La magnitud de las corrientes está directamente relacionada con el número de vueltas de la bobina y del material inducido.

El calor generado por el circuito de inducción es transmitido directamente al objeto a calentar por conducción térmica. El material inducido por las corrientes se llama susceptor¹ y puede adoptar distintas formas geométricas según su aplicación. Los fundamentos del fenómeno de calentamiento por inducción se definen por las leyes de Maxwell, que determinan la distribución de corriente y la energía disipada. Las ecuaciones de Maxwell como ahora se las conoce, son las cuatro citadas y a manera de resumen se muestran en la Tabla 1.1. En este cuadro E es el campo eléctrico; B la inducción magnética; H el campo magnético; J es la densidad de corriente; ρ la densidad de carga; ϵ_0 la constante dieléctrica del vacío y μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío

Tabla 1.1 Ecuaciones de Maxwell.

Nombre	Forma diferencial	Forma integral
Ley de Gauss para el campo eléctrico	$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oint_s E \cdot ds = \frac{q}{\epsilon_0}$
Ley de Gauss para el campo magnético	$\nabla \cdot B = 0$	$\oint_s B \cdot ds = 0$
Ley de Faraday	$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint_c E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int_s B \cdot ds$
Ley de Ampere generalizada	$\nabla \times B = \mu_0 J + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E}{\partial t}$	$\oint H \cdot dl = \int J \cdot ds + \epsilon_0 \cdot \frac{\partial}{\partial t} \int E \cdot ds$

1.2 Resistencia eléctrica de la pieza a calentar

El valor de la resistencia eléctrica de un tubo de radio R que conduce la corriente en forma circular sería equivalente a $R = \rho \frac{l}{A}$ en donde rho es la resistividad del tubo de acero, l es el diámetro del tubo y A es la sección que conduce la corriente de Foucault dada por el espesor de la profundidad de penetración delta y la longitud del tramo de tubo

¹ Material usado para absorber energía electromagnética

L. De esta manera se obtiene la Ecuación 1.4 para la resistencia eléctrica del anillo conductor superficial:

$$R = \rho \frac{2\pi R}{\delta L} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Sin embargo, dado que la resistencia obtenida está referida al secundario del transformador la resistencia equivalente deberá estar en función de la relación de vueltas entre el primario que es la bobina y el secundario de una sola espira que corresponde a la pieza de trabajo. La resistencia de la pieza de trabajo cambia ligeramente con la temperatura y su efecto se refleja directamente en la resistencia del modelo bobina-pieza. (Martínez J, 2013). Se puede demostrar que la resistencia equivalente puede expresarse con la Ecuación 1.5 que permite el cálculo de la resistencia superficial de la pieza, ρ es la resistividad eléctrica del material a calentar, N_c es el número de espiras de la bobina inductora², δ_ω es la profundidad de penetración, K_R es un factor adimensional de valor $K_R = 1 - e^{\frac{-2r}{\delta_\omega}}$ que toma en cuenta la variación de la trayectoria eléctrica entre el diámetro de la pieza y la profundidad de penetración. Por lo tanto, la resistencia equivalente vista desde el lado primario será la que se muestra en la Ecuación 1.5

$$R_{eq} = K_R N_c^2 \rho_\omega \frac{2\pi R_\omega}{\delta_\omega l_\omega} (\Omega) \quad \text{Ecuación 1.5}$$

La resistividad eléctrica superficial del material a calentar es por lo general de muy bajo valor; esto se debe a que la resistividad del hierro es $9.71 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ valor denotado en la revista Unicrom (Unicrom, 2016). Por lo tanto, para producir un valor significativo por efecto joule es necesario inducir grandes corrientes en la pieza de muestra. Previo al desarrollo del circuito equivalente que forma el conjunto bobina-pieza, es necesario definir algunos conceptos.

Región de transición: Se llama así a la zona de la pieza en la cual se inducen campos electromagnéticos (ver figura.1.2)

² La relación de espiras entre primario y secundario es N_c^2 dado que hay una sola espira en el secundario

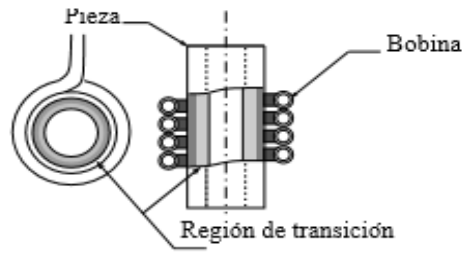


Figura 1.2 Región de transición.

1.3 Inductancia

La inductancia es una medida de la oposición a un cambio de un inductor o bobina que almacena energía en presencia de un campo magnético y se define como la intensidad de corriente eléctrica que circula por la bobina y el número de vueltas del devanado como se presenta en la Ecuación 1.6

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 S}{l} \text{ (henrios)} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

1.4 Efecto pelicular

El fenómeno de calentamiento por inducción magnética produce una distribución no uniforme de las corrientes inducidas en el material. La disminución de la densidad de la corriente desde la periferia hacia el centro del material se conoce como efecto Skin o efecto pelicular. El efecto pelicular se presenta cuando la frecuencia del campo magnético es elevada, y se presenta como una disminución de las corrientes inducidas conforme se penetra en el material. Las corrientes de altas frecuencias tienden a concentrarse en la superficie del material conductor, y esta concentración es más pronunciada conforme aumenta la frecuencia del campo. El aumento de la frecuencia de las corrientes inducidas en el conductor permite una concentración más compacta en su superficie, el efecto piel depende en gran medida de la frecuencia de funcionamiento y de las propiedades de la pieza a calentar como la permeabilidad magnética y la resistividad eléctrica.

La medida del efecto piel es la profundidad de penetración δ . El efecto de difusión del campo magnético es la condición que rige al calentamiento por inducción. En una primera aproximación para un cilindro se puede asumir que la distribución del campo magnético se puede representar por la Ecuación 1.7 donde: $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ representa la coordenada radial del cilindro; x es la distancia; \mathbf{H}_0 es la intensidad del campo en la superficie; δ es la profundidad de penetración. Se debe notar que en suma el exponente es adimensional.

$$H(x) = H_0 * e^{-x/\delta} \quad \text{Ecuación 1.7}$$

1.5 Frecuencia de Trabajo Resonante

La frecuencia de trabajo de un sistema de calentamiento por inducción depende de la pieza de trabajo que se desea calentar y el material del que está hecha. Es importante utilizar un sistema de inducción que aplique la energía a lo largo de todo el intervalo de frecuencias adecuado para la aplicación. Para comprender mejor los motivos de estas frecuencias de trabajo diferentes, se examinará una característica conocida como «efecto piel». Cuando el campo electromagnético induce una corriente en la pieza, la corriente fluye principalmente por la superficie de la pieza. Cuanto mayor es la frecuencia de trabajo, menor es la profundidad de la piel; cuanto menor es la frecuencia de trabajo, mayor es la profundidad de la piel y la penetración del efecto de calentamiento.

La profundidad de penetración depende de la frecuencia de trabajo, las propiedades del material y la temperatura de la pieza. Por regla general, el calentamiento de piezas más pequeñas por inducción requiere frecuencias de trabajo mayores (muchas veces por encima de los 50 kHz), y las piezas más grandes se calientan más eficientemente con frecuencias de trabajo menores. Con las fuentes de potencia de inducción de estado sólido moderno dotado de sistemas de control con microprocesadores integrados, es posible conseguir fácilmente unos procesos de calentamiento repetibles y eficientes, siempre y cuando todas las piezas se sitúen en una posición uniforme dentro de la bobina. (Kolocsar, 2017)

1.6 La profundidad de penetración

La medida cuantitativa del efecto piel es la profundidad de penetración del calentamiento δ y se define como aquella distancia de la superficie en la cual el valor de la corriente se ha reducido a $1/e$ o 37% del valor que se tiene en la superficie del cilindro esto se lo puede ver en la Figura 1.3. La densidad de potencia en este punto es $1/e^2$ o del 14% del valor de la superficie; por lo tanto el 86% del calentamiento ocurre en el volumen comprendido entre la superficie

Dado un material con resistividad ρ , permeabilidad relativa μ_r , la permeabilidad magnética del vacío ($4. \pi. 10^{-7}$) es μ_0 , sobre el cual se aplica una onda sinusoidal con frecuencia f , la profundidad de penetración de la onda sería δ que está dado por la Ecuación 1.8

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu_r}} \text{ (\mu m)} \text{ Ecuación 1.8}$$

Se define δ como la distancia donde el campo magnético se atenúa y es la zona donde se concentra el 63% de la corriente porque es el lugar en donde la intensidad del campo disminuye a $\frac{1}{e}$ y el 87% de la potencia que se disipa. En la Figura.1.3 se muestra la distribución de la densidad de corriente y la densidad de potencia desde la superficie hasta el interior del material.

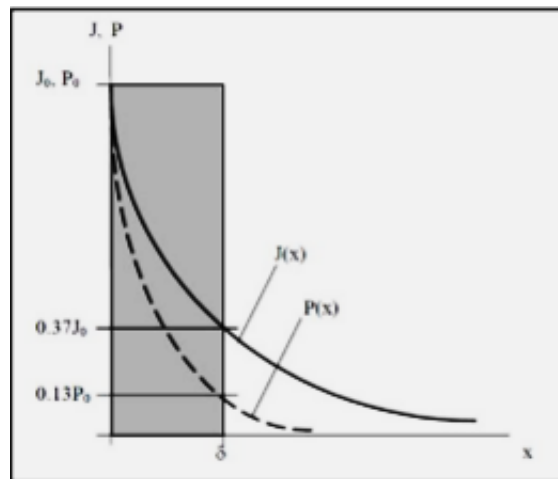


Figura 1.3 Distribución de la corriente en función de la profundidad

La profundidad de penetración estándar de las corrientes inducidas es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda de alimentación. Cuando la frecuencia aumenta, la profundidad de penetración disminuye así lo cito Bermudez (Bermudez L, 2003). Por ejemplo, un acero aleado común a 20 kHz tiene una profundidad de penetración de 0,12mm. La profundidad de penetración estándar depende de la permeabilidad magnética relativa. Cuando dicha permeabilidad aumenta, la profundidad de penetración decrece. La profundidad de penetración también es inversamente proporcional a la conductividad del material. A mayor conductividad, menor profundidad de penetración

En la figura.1.4 se muestra la curva de profundidad de penetración de algunos elementos en función de la frecuencia de la onda de la fuente de alimentación.

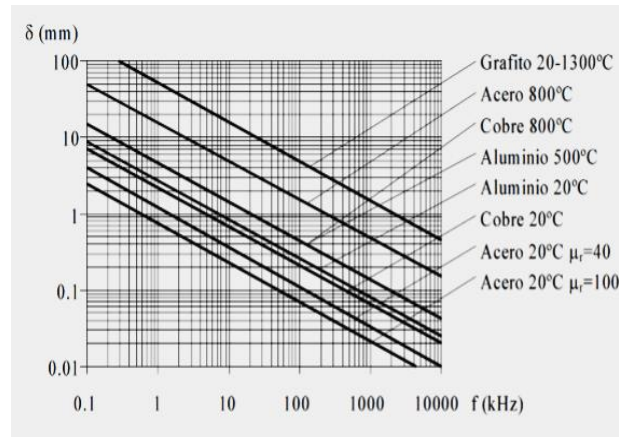


Figura 1.4 Curva de la profundidad de penetración de corrientes inducidas en función de la frecuencia.

1.7 Energía Transferida En Forma De Calor

Para obtener la potencia requerida por el sistema es necesario realizar el cálculo de la energía transferida en forma de calor hacia el objeto a calentar, para de esta forma realizar el correcto dimensionamiento de la fuente de alimentación. El calor es una forma de energía, la cual es transmitida entre dos cuerpos o sistemas, causado por un cambio de temperatura. La diferencia de temperatura de cada sistema dependerá entre otras, del calor específico del elemento que forma el cuerpo.

“El calor específico se define como la cantidad de calor dQ necesaria para que una unidad de m masa de sustancia incremente su temperatura en un grado” y se lo representa con la Ecuación 1.9 (Formula de calor específico).

$$C = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (cal) \quad \text{Ecuación 1.9}$$

Para variaciones no muy grandes en la temperatura del cuerpo, el valor de c es considerado como constante, entonces el valor de la energía transferida en forma de calor se expresa con la siguiente Ecuación 1.10 (Energía transferida en forma de calor).

$$Q = m c \Delta T \quad (kcal) \quad \text{Ecuación 1.10}$$

Dónde: Q ; es la cantidad de energía calorífica [kcal], m ; masa del objeto a calentar [kg], c ; calor específico del objeto a calentar [kCal/kg°C], ΔT ; Diferencial de temperatura del objeto [°C].

En la tabla 1.2 se puede ver la densidad de los materiales como también su calor específico

Material	Densidad (Kg/m ³)	Calor específico (Kcal/Kg°C)
Hierro	7.860	0.107
Acero inoxidable	8238	0.11
Polipropileno	946	0.48
Tungsteno	19250	0.037

Tabla 1. 1 Densidad y calor específico de materiales de interés.

Al aumentar la temperatura, se incrementa la resistividad por encima de la temperatura de Curie (750 °C en los aceros) en tal caso el material deja de ser ferromagnético y pasa a ser paramagnético (Egas M, 2016). Debido a este principio se puede decir que el inductor 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.

1.8 Potencia

La potencia necesaria para calentar la pieza de trabajo a una temperatura adecuada se la puede calcular con la Ecuación 1.11: Donde M es la masa total de agua a calentar en kg; c es el calor específico en J/(kg °C); T_{in} y T_f son la temperatura inicial y final en °C; y t es el tiempo total requerido en segundos para calentar toda la masa de agua. La ecuación 1.11 resulta de la aplicación de la primera Ley de la Termodinámica y la evaluación de potencias y energías.

$$P_w = Mc \frac{T_f - T_{in}}{t} \quad \text{Ecuación 1.11}$$

Considerando que P_w representa la potencia necesaria para calentar la pieza, la potencia de la fuente tiene que ser más grande debido a las pérdidas de energía, de esta manera la potencia efectiva que la fuente debe ser capaz de suministrar así se obtiene la Ecuación 1.12 donde $\eta_T = \eta_{termica} * \eta_{Electrica}$

$$P_c = \frac{P_w}{\eta_T} \quad \text{Ecuación 1.12}$$

1.9 Eficiencia Térmica

En el proceso de calentamiento influyen tres formas de transferencia de calor las cuales son: conducción. convección. radiación. En el presente caso sólo se considerará la

transferencia de calor por conducción, desde el tubo cilíndrico de acero galvanizado hacia el agua que circula por su interior. En un análisis inicial las otras formas de transferir calor se pueden despreciar por ser mínimas. En todo caso estas pérdidas caloríficas se pueden evaluar para determinar la eficiencia térmica.

En un cuerpo existe un flujo de calor cuando en distintas zonas hay un gradiente de temperatura, desde la zona más caliente a la más fría. Cuando ocurre aquello se habla de una transferencia de calor por conducción, cuyo calor depende de ese gradiente de temperatura. Este fenómeno se aprecia en equipos de calentamiento por inducción de fusión de metales, donde el susceptor magnético es el propio cuerpo sólido a calentar. La convección puede ser considerada como una condición de borde del problema de conducción, relacionándolo con el medio externo, que en este caso lo conforma el fluido. Este tipo de transferencia por convección no se utiliza en este proyecto (Alvarez, 2009)

Las pérdidas térmicas involucran las perdidas en la superficie provocadas por convección, así como las pérdidas producidas por la conducción en los extremos de la bobina. Estas pérdidas pueden ser disminuidas gracias al aislamiento proporcionado por un refractario, pero tiene que ser cuidadosamente diseñado para evitar el deterioro de acoplamiento electromagnético que puede causar el aumento de las perdidas eléctricas para bobinas cilíndricas con concreto como refractario la eficiencia térmica y las perdidas térmicas pueden obtenerse mediante las Ecuaciones 1.13 y 1.14

$$\eta_{Termica} = \frac{P_w}{P_w + P_{perdidas\ termicas}} \quad \text{Ecuación 1.13}$$

$$P_{perdidas\ termicas} = 3.74 * 10^{-4} \frac{l_c}{\log_{10}(\frac{d_c}{d_w})} \quad \text{Ecuación 1.14}$$

Donde $P_{perdidas\ termicas}$ son las perdidas térmicas a través de la superficie; d_c y d_w son el diámetro interior de la bobina y el diámetro de la pieza, respectivamente; l_c es la longitud de la bobina.

1.10 Eficiencia Eléctrica

La eficiencia eléctrica representa las pérdidas en las espiras de la bobina de trabajo y a su alrededor, Cuando es utilizada una bobina con forma de solenoide para calentar una espira solida cilíndrica, el valor de estas pérdidas puede aproximarse con la Ecuación 1.15

$$\eta_{electrica} = \frac{1}{1 + \frac{d_c + \delta_c}{d_w - \delta_w} \sqrt{\frac{\rho_c}{\mu_r \rho_w}}} \quad \text{Ecuación 1.15}$$

Donde d_c y δ_c son la profundidad de penetración de la bobina y de la pieza de trabajo respectivamente; ρ_c y ρ_w son la resistividad de la bobina y de la pieza; μ_r es la permeabilidad magnética relativa de la pieza de trabajo.

1.11 Circuito equivalente del calentador por inducción

Si se parte del circuito equivalente básico de un transformador y se considera que el acoplamiento magnético es eficiente, se puede idealizar el circuito equivalente del calentador por inducción mediante dos inductancias acopladas, con una resistencia en paralelo al circuito secundario del transformador. En la Figura 1.5 se muestra el esquema eléctrico general del sistema de inducción. Este circuito equivalente es similar al de un motor de inducción asincrónico. En la Figura 1.5 L_p es la inductancia del circuito primario; L_s es la inductancia del circuito secundario; R_s es la resistencia de dispersión que forma la espira que aparece en la carga por efecto piel y M que representa la inductancia mutua entre ambas bobinas. L_t , R_p y C corresponden a la línea de transmisión de la energía hacia la bobina de inducción (Gonzalez W, 2008).

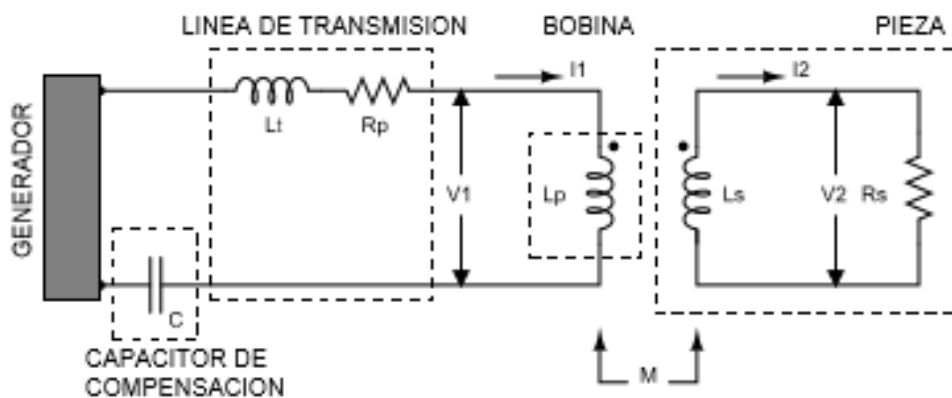


Figura 1.5 Modelo eléctrico del conjunto bobina-pieza equivalente a un transformador

En el equipo de prueba de la presente investigación el circuito electrónico tiene un condensador en paralelo con la bobina primaria. Este condensador configura un circuito resonante en paralelo que se lo ha utilizado para garantizar la máxima transferencia de potencia entre la fuente de poder y el conjunto bobina-pieza. Para el efecto, es necesario que el sistema LC trabaje permanentemente en régimen de resonancia.

1.12 Magnetización

La magnetización es un fenómeno físico que se manifiesta en ciertos materiales ante la presencia de un campo magnético, a estos materiales se los denominan ferromagnéticos. Es así que todos los materiales ferromagnéticos tales como el hierro

muestran un codo de saturación magnética, dichos materiales están compuestos de regiones microscópicas llamadas dominios magnéticos que actúan como pequeños imanes permanentes. Antes de que un campo magnético externo sea aplicado al material, los dominios se encuentran orientados al azar. Sus pequeños campos magnéticos apuntan en direcciones aleatorias y se cancelan entre sí, de modo que el material no produce un campo magnético global neto. Cuando se aplica un campo de magnetización H externo al material, lo penetra y causa la alineación de los dominios, provocando que sus pequeños campos magnéticos roten y se alineen paralelamente al campo externo, estos momentos magnéticos se suman para crear un gran campo magnético que se extiende hacia fuera del material. Este fenómeno es llamado magnetización. Cuando más fuerte sea el campo magnético externo, mayor será la alineación de los dominios. El efecto de saturación ocurre cuando ya prácticamente todos los dominios se encuentran alineados, por lo que cualquier incremento posterior en el campo aplicado no puede causar una mayor alineación. (Valbuena, 2003), en la Figura 1.6 se muestra la curva de saturación magnética de varios materiales.

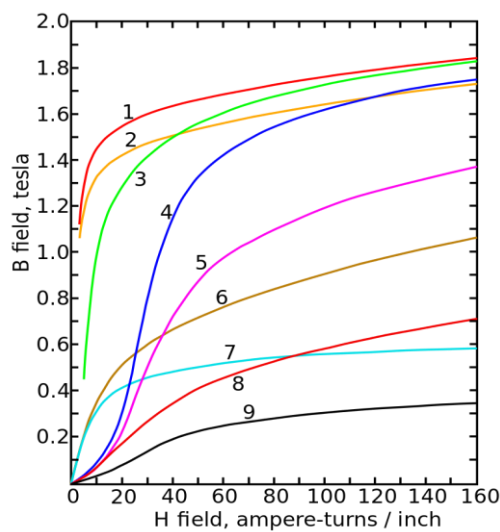


Figura 1.6 Curvas de magnetización de nueve materiales ferromagnéticos diferentes, mostrando el efecto de saturación. 1. Hoja de acero, 2. Acero al silicio, 3. Acero de crisol, 4. Acero al tungsteno, 5. Acero magnético, 6. Hierro de crisol, 7. Níquel, 8. Cobalto, 9. Magnetita.

1.13 Microcontrolador Arduino Uno



Figura 1.7 Placa Arduino Uno que incluye un microcontrolador de la marca Atmel ATmega328P, toda la circuitería de soporte, un reguladores de voltaje y un puerto USB que permite programar a la placa desde cualquier PC..

El Arduino Uno posee 14 pines que pueden ser configurables como entradas o como salidas y a los que puede conectarse cualquier dispositivo que sea capaz de transmitir o recibir señales de 0 y 5 V con una corriente máxima de 40 mA. También dispone de 6 entradas analógicas, las mismas que permiten obtener datos de sensores en forma de variaciones de voltaje. La tarjeta electrónica posee adicionalmente pines PWM los mismos que permiten variar la potencia de dispositivos o controlar servomotores como lo indica la Figura 1.8

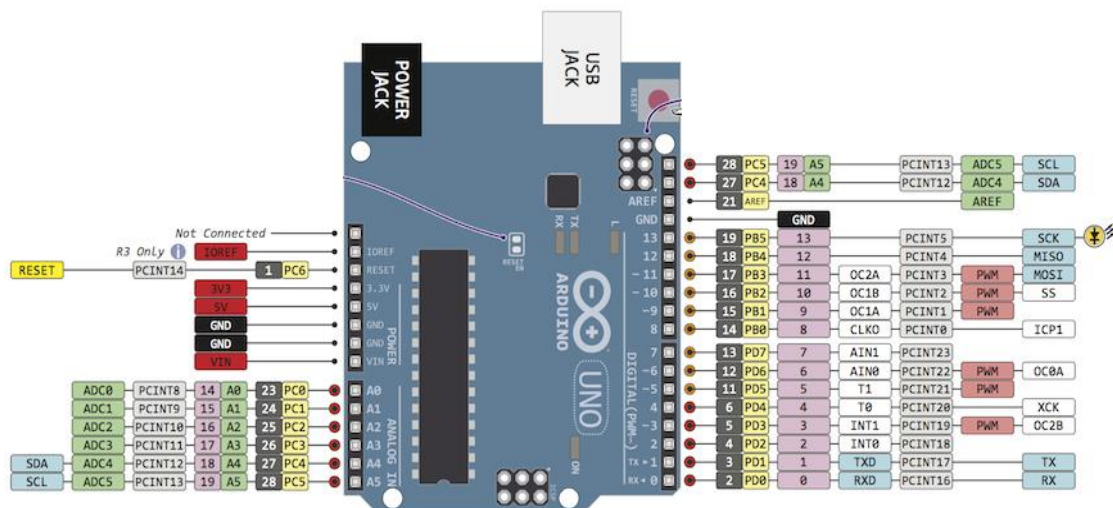


Figura 1.8 Pines de la placa de Arduino Uno de acuerdo al fabricante ATMEL de Italia

1.13.1 Características técnicas

Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de entrada	7-12V
Voltaje de Operación	5 V
Pines digitales de I/O	14 pines (6 salidas PWM).
Entradas Análogas	6
Memoria Flash.	32 K
Frecuencia de reloj	16 Mhz
Corriente continua por pin	40 mA

Tabla 1.2 Arduino Uno - Características Técnicas

1.14 Sensor de Temperatura DS18B20



Figura 1.9 Sensor One Wire DS18B20

El sensor DS18B20 como se muestra en la Figura 1.9 dispone de tres pines: VCC de (5V), GND y un pin de Datos (DQ). Además, es posible conectar varios sensores a una sola línea de conexión con sólo añadir entre el pin de comunicación y VCC una resistencia de Pull Up de 4,7K. como se lo indica en la Figura 1.10

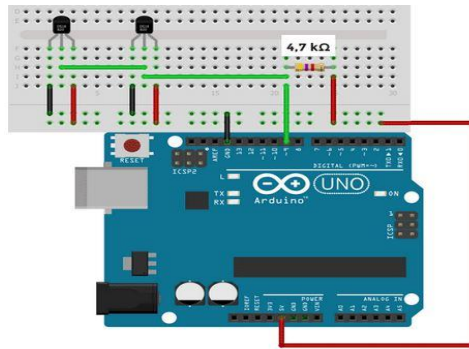


Figura 1.10 Conexión de varios sensores de temperatura

1.14.1 Características del sensor DS18B20

- **Rango de temperatura:** de -55 a 125 °C
- **Resolución:** de 9 a 12 bits en comunicación serial
- **Precisión:** ±0.5 °C (de -10 °C a +85 °C)
- **Tiempo de captura:** inferior a 75Ω
- **Alimentación:** 3 V a 5,5 V

1.15 Display LCD

En la Figura 1.11 se puede observar un **LCD** (Liquid Crystal Display) o pantalla de cristal líquido que es un dispositivo empleado para la visualización de contenidos o información de una forma gráfica, mediante caracteres, símbolos o pequeños dibujos dependiendo del modelo. Está gobernado por un microcontrolador el cual dirige todo su funcionamiento.



Figura 1.11 Display 16 x 2

1.15.1 Las características generales de un módulo LCD 16 x 2:

- Consumo muy reducido, del orden de 7.5mW
- Pantalla de caracteres ASCII, además de los caracteres japoneses, caracteres griegos y símbolos matemáticos.
- Desplazamiento de los caracteres hacia la izquierda o a la derecha
- Memoria de 40 caracteres por línea de pantalla, visualizándose 16 caracteres por línea

CAPITULO II

2 Marco Metodológico

En este capítulo se plantean los aspectos metodológicos y prácticos que se utilizaron para el diseño y construcción de un prototipo de calefacción para piletas de agua mediante inducción magnética.

2.1 Tipos y Diseño de Investigación

El primer aspecto que se considera como marco metodológico para la presente tesis, es que se trata de una investigación aplicada, ya que se realizó con el estudio de diferentes teoremas y ecuaciones que permitieron tener un mejor enfoque inicial para la investigación para posteriormente proponer la construcción de un prototipo de calentamiento de agua por inducción magnética. En ese sentido (Arias, 2006) asegura que la investigación aplicada es un proceso metódico y sistemático dirigido a la solución de problemas o preguntas científicas, mediante la producción de nuevos conocimientos, los cuales constituyen la solución o respuesta a tales interrogantes.

Esta investigación es en cierta manera de tipo experimental, porque se tuvo que conocer nuevas fuentes para el calentamiento de agua y así elaborar este proyecto innovador. El proyecto en concreto intenta reemplazar a la tecnología de los calentadores que utilizan métodos convencionales como son los calentadores eléctricos y por Gas Licuado de Petróleo (GLP) con esta nueva tecnología.

Por otra parte Galarreta (Galarreta, 1994) afirma que la investigación bibliográfica es la primera etapa del proceso investigativo que proporciona el conocimiento de las investigaciones ya existentes, de un modo sistemático, a través de una amplia búsqueda de: información, conocimientos y técnicas sobre una cuestión determinada. Es así que se tomó información de varios artículos, libros, y publicaciones realizados por diversos autores. Esta metodología permitió reforzar las bases y conceptos para el desarrollo de este proyecto.

De acuerdo con los criterios expuestos por Hurtado (Hurtado 2006) la presente investigación fue Proyectiva por cuanto intenta “plantear soluciones a una situación determinada a partir de un proceso previo de indagación. Esto implica explorar, describir, explicar y proponer alternativas de cambio, más no necesariamente ejecutar la propuesta”

Así también Palella y Martins, (Palella y Martins 2006) definen dicha investigación como aquella que “conlleva a diseño o creaciones dirigidas a cubrir una necesidad y

basadas en conocimientos anteriores”. De allí que el término proyectivo se refiere a un proyecto en cuanto aproximación o modelo teórico

2.2 Diseño de la Investigación

Considerando que el diseño de un prototipo funcional es la base de cualquier proyecto de investigación técnica y es una estrategia para responder a la problemática planteada, es entonces necesario que el presente proyecto se lleve a cabo a través de una exhaustiva investigación aplicada, bibliográfica, experimental y de campo. Según (Arias, 2006)

El estudio tiene una investigación de campo, debido a que se realizará en el lugar donde se presenta el problema o se desea reemplazar la tecnología anterior (Arias, 2006). La investigación documental es un proceso basado en la búsqueda, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios; es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. Como en todas las investigaciones similares, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimientos.

No obstante el diseño de la investigación es de tipo experimental de acuerdo con el criterio de Sampieri (Sampieri, 2008); es decir, que los diseños experimentales se utilizarán cuando el investigador pretenda establecer el posible efecto de una causa que se manipula. Sin embargo, para establecer influencias (por ejemplo, la manipulación de la frecuencia de oscilación para elevar la temperatura de un cuerpo ferromagnético) el diseño del mismo se debe regir a varios requerimientos previos. Estos requerimientos o especificaciones conllevan a una situación de control en la cual se manipulan de manera intencional una o más variables independientes (causas) con el propósito de analizar las consecuencias de tal manipulación sobre una o más variables dependientes (efectos) como lo menciona Sampieri (Sampieri, 2008).

2.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de la Información

Una vez analizadas las variables, fue necesario hacer una recolección de datos pertinentes para responder la interrogante formulada. Todo esto en correspondencia con el problema, los objetivos y el diseño de investigación. Por otra parte, la aplicación de una técnica conduce a la obtención de información, la cual debe ser guardada en un medio material (entregables), de tal manera que los datos puedan ser recuperados, procesados, e interpretados. A este soporte según (Arias, 2006) se lo llama instrumento. Un instrumento

de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información.

Así también (Sampieri, 2008) anuncia que la recolección de los datos se fundamenta en la medición (se miden las variables o conceptos contenidos en las hipótesis). Esta recolección se lleva a cabo al utilizar procedimientos estandarizados y aceptados por una comunidad científica. Para que una investigación sea creíble y aceptada por otros investigadores, debe demostrarse que se siguieron tales procedimientos. Como en este enfoque se pretende medir, los fenómenos estudiados deben poder observarse o referirse en el “mundo real”. Es por esta razón que se recolectó la información de varios libros, revistas especializadas, artículos y otros documentos que permitieron el desarrollo de este proyecto. También para la construcción del prototipo se utilizó información basada en las normas IEC 60335-2-35 e IEC 60335-1, del Reglamento técnico ecuatoriano RTE INEN 247 y NTE INEN 1912:92.

2.4 Metodología Seleccionada

Las actividades planificadas para el desarrollo de la investigación están basadas en la metodología planteada por Savant (Savant, 2004) debido a la concordancia de los objetivos con las fases propuestas por el autor. De este modo, la metodología utilizada es la más acorde a esta investigación en sus 5 fases para su desarrollo. Las fases se detallan a continuación:

2.4.1 Definir el problema

El problema es que actualmente la eficiencia de los calentadores de agua tanto eléctricos como por consumo de GLP es muy baja comparada con la eficiencia que puede dar un calentador por inducción (Turmero P, 2018). Por esta razón se decidió realizar el diseño y la construcción de un prototipo basados en normas aplicadas en el País, como es el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE 247, y el Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN 1912:92 que son estándares que nos permiten cumplir con los requerimientos necesarios con el objetivo fundamental de entregar un equipo de fácil uso y alto rendimiento energético.

2.4.2 Subdividir el problema

Para simplificar y acelerar el proceso de diseño se lo subdivide en diferentes etapas, las cuales son diseñadas independientemente para luego unir las en un solo sistema. La etapa de potencia queda de la siguiente manera:

Alimentación requerida por el equipo

Diseño del rectificador

Diseño del filtro LC

Diseño de un inversor de alta frecuencia

Confección de la Bobina de trabajo

2.4.3 Definir conceptos básicos

Definir los conceptos básicos del sistema propuesto para formar una imagen global de la investigación, para dar cumplimiento a esta fase es necesario el análisis y la adaptación de las tecnologías de acceso al medio estándar y la elaboración de una lista de requerimientos, así se puede realizar una comparativa con los métodos convencionales de calentamiento

2.4.4 Recolección de información

Para el desarrollo del proyecto fue necesario realizar: recolección de información acerca de teoría electromagnética en libros, revistas, artículos entre otros documentos científicos. Determinación de los requerimientos del sistema de calefacción por inducción electromagnética a partir de las necesidades de los usuarios tomando en cuenta las normas de construcción. Análisis de las diferentes aplicaciones de calentamiento por inducción que existen con la finalidad de seleccionar el sistema más adecuado para la construcción del prototipo. Cálculo y dimensionamiento de los diferentes elementos de los circuitos que constituyen el prototipo.

2.4.5 Fase constructiva

Construcción de las diferentes partes del prototipo, programación del dispositivo Arduino UNO central (encargado de las oscilaciones, sensores y control de la temperatura del prototipo). Evaluación individual de las diferentes etapas del prototipo de un sistema de calefacción de agua por inducción electromagnética. Por último, el desarrollo práctico y recopilación de resultados del prototipo.

2.4.6 Finalizar el diseño

Una vez terminada la fase constructiva del prototipo se prueba al equipo en las condiciones para las que fue diseñado, y se realiza la compilación de las conclusiones y recomendaciones de la investigación realizada, las mismas que permitirán dar respuesta a la problemática planteada en un inicio

CAPITULO III

3 Propuesta

El presente proyecto de titulación consiste en el diseño y construcción de un prototipo de calentador de agua para subir la temperatura del agua de una pileta mediante un sistema de inducción electromagnética. Para el desarrollo del presente proyecto se tomaron en cuenta las normas relacionadas con las especificaciones técnicas comerciales para el calentamiento de agua sin acumulación del líquido. También se analizó la circuitería de una cocina de inducción (Figura 3.1), equipo que es similar al desarrollado, con la finalidad de aprovechar las aproximaciones de funcionamiento desarrolladas en estos equipos de fácil acceso comercial.

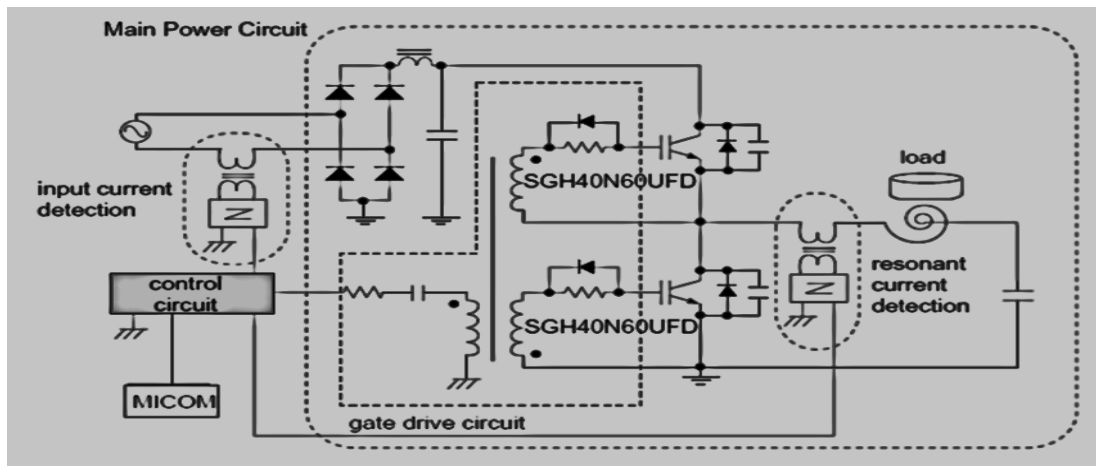


Figura 3.1 Circuito básico de una cocina de inducción magnética (Moragrega, 2010)

En el diseño electrónico propuesto se contemplan varias etapas que se describen de la siguiente manera: una etapa de potencia, una etapa de control realimentado, una etapa de sincronización de pulsos y una etapa de protección del elemento de conmutación para una condición de sobre-temperatura. En la etapa de potencia se utiliza un inversor cuasi-resonante el cual permite la conmutación en alta frecuencia y genera la potencia 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 (que se diferencia de los métodos convencionales) se diseñó una bobina con un material ferromagnético en su interior para captar la inducción magnética. El calentador empieza su etapa de resonancia inmediatamente. En el control del calentador de agua por inducción electromagnética se implementó una tarjeta electrónica programable

(Arduino)³ que permite modificar el ancho de pulso para producir el disparo en el conmutador electrónico, posee una pantalla digital que muestra las temperaturas en distintos puntos del prototipo que han sido considerados para el buen funcionamiento y alargar la vida útil de los MOSFET⁴ que se utilizaron.

La temperatura adecuada para una pileta climatizada cubierta será aquella que esté entre 23°C-28°C, y de 32°C-34°C para una que se encuentre en el exterior, debido que en ésta gran parte del calor se perderá por evaporación. Por lo tanto, el calentador deberá proveer unos grados más. (Colombotto, 2017). El cuerpo humano tiene normalmente una temperatura aproximada de 36°C, y es por esto que las normas de climatización han establecido los rangos antes mencionados para mantener las condiciones de salubridad de los bañistas. Es cierto que, ante una misma temperatura del agua, no todos la perciben de igual manera. Mientras que para algunos será más agradable, para otros no lo será tanto, y esto se debe a que no todas las personas poseen el mismo umbral sensitivo de calor y frío. Es por eso que se establecen rangos y desde allí cada usuario la adaptará a sus necesidades según crea más o menos adecuado. Una vez justificada la temperatura nominal o recomendada se realizó el diseño para que el prototipo del mencionado calentador de agua por inducción alcance una temperatura máxima de 60°C de acuerdo a la norma INEN 1912; es decir, unos 40 grados más sobre la temperatura ambiente.

3.1 Diseño y construcción del prototipo

En la Figura 3.2 se observa de manera general las etapas a desarrollar del prototipo del calentador de agua por inducción.

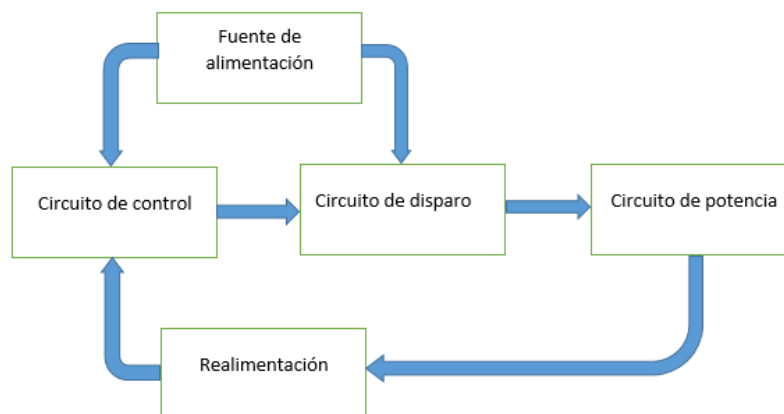


Figura 3.2 Diagrama de bloques del calentador de agua por inducción magnética.

³ Micro Controlador electrónico programable fabricado por la empresa Adafruit Industries, NY

⁴ Acrónimo de: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

De manera general se tiene una fuente de alimentación, para suministrar potencial a dos circuitos principales para el funcionamiento del prototipo, estos circuitos son el lazo de control que es el encargado de generar los pulsos de disparo del conmutador electrónico, la visualización de la temperatura en una pantalla LCD⁵, alarmas en caso de un mal funcionamiento del prototipo, y un circuito de acondicionamiento para sensores de temperatura, realimentación de voltaje y corriente, y el circuito de disparo el cual se encarga de elevar el nivel de voltaje de los pulsos para que los Mosfet que serán empleados pueda saturarse correctamente y permita mejorar el factor de potencia, haciendo que la corriente siga la misma forma de onda que el voltaje en la entrada del circuito de potencia. El circuito de potencia consta de un rectificador y un inversor resonante de alta frecuencia.

3.2 Circuito de Potencia

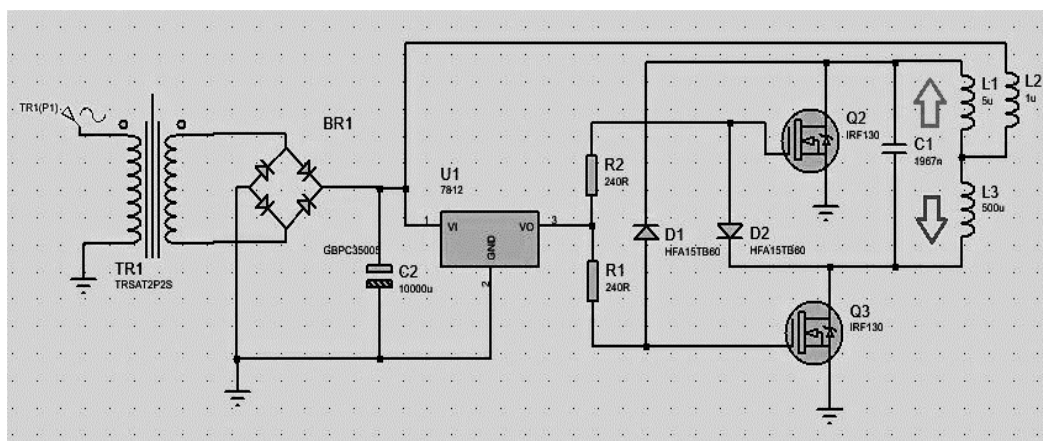


Figura 3.3 Circuito de potencia del calentador de inducción

En la figura 3.3 se puede observar la etapa de potencia del prototipo que está conformada por; Un rectificador no controlado de onda completa debido a que se requiere de un voltaje DC a la entrada del inversor cuasi resonante, que incluye un filtro capacitivo que ayuda a disminuir el rizado en la alimentación de corriente continua

A continuación, se tiene un inversor con 2 MOSFET por fase. En anti-paralelo se encuentran diodos de recuperación rápida, esto se debe a que los diodos con los que cuentan estos transistores tienen características limitadas en tiempos de recuperación inversa, por lo tanto, para mejorar su función es necesario incorporar diodos en serie con los transistores MOSFET.

⁵ Acrónimo de: Liquid Cristal Display

Circuito resonante en serie compuesto por el capacitor de compensación de la carga, la bobina encargada de generar el campo magnético en las proximidades de la pieza de trabajo y por último la pieza de trabajo, el objetivo del tanque resonante es filtrar la forma de onda del voltaje generado por el circuito inversor para crear un voltaje y una corriente sinusoidal a altas frecuencias

3.3 Cálculos del Circuito de Potencia.

3.3.1 Alimentación requerida DC para el prototipo

Para el diseño del rectificador se considera la potencia máxima de trabajo y el voltaje de salida después del transformador y la energía rectificada. El calentador se diseñó para una potencia de 180 W y un voltaje de 12V dc, con estos parámetros se determinó la corriente nominal de trabajo del calentador de agua, utilizando la ecuación general se obtiene:

$$P = V * I$$

$$I_{in} = \frac{180}{12}$$

$$I_{in} = 15A$$

3.3.2 Alimentación requerida AC para el prototipo

Para el diseño del rectificador se considera la potencia máxima de trabajo y el voltaje de entrada de la red eléctrica. El calentador se diseñó para una potencia de 180 W y un voltaje de 12V dc, con estos parámetros se determinó la corriente nominal de trabajo del calentador de agua, utilizando la ecuación general se obtiene:

$$P = V * I$$

$$I_{in} = \frac{180}{120}$$

$$I_{in} = 1,5A$$

3.3.3 Diseño del rectificador

Se dimensiona el rectificador en base al voltaje pico sobre el puente rectificador y la corriente que circula por el mismo.

$$V_{pico\ inver} = 2 * 12 * \sqrt{2}$$

$$V_{pico\ inver} = 33,9 V$$

Se seleccionó un puente rectificador comercial de valor estándar de 400 voltios y 35 Amperios.

3.3.4 Diseño de la red LC

El propósito del filtro es absorber las corrientes armónicas generadas por las conmutaciones en el inversor cuasi resonante, y evitar el cortocircuito. También ayuda a mejorar el factor de potencia del circuito, debido a que este capacitor sirve como filtro en el tanque de resonancia previniendo que circulen corrientes de alta frecuencia del inversor hacia la red eléctrica. En la referencia (Martínez J, 2013) se tiene un cálculo detallado del circuito resonante RLC. En este caso la R representa la resistencia equivalente obtenida anteriormente.

Nuestro diseño se orienta a la construcción de un calentador de agua por inducción magnética a una frecuencia resonante de 300 kHz (Ver anexo 3) así se garantiza eliminar ruidos que pueden ser perturbadores para los usuarios mientras este encendido el calentador de agua.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L * C}}$$

Se asume el valor del capacitor $C_{002} = 0.68\mu\text{F}$

Despejando L de la ecuación se obtiene

$$L = \frac{1}{C(f_c * 2\pi)^2}$$

$$L = \frac{1}{0.68 * 10^{-6}(300 * 10^3 * 2\pi)^2}$$

$$L_{001} = 0.4\mu\text{H}$$

3.3.5 Estimación de la potencia necesaria para el calentador de agua

La potencia necesaria para calentar la pieza de trabajo a una temperatura adecuada está definida por la Ecuación 1.11: Donde M es la masa de la pieza en kg; c es el calor específico en J/(kg °C); T_{in} y T_f es la temperatura inicial y final en °C; y t es el tiempo requerido en segundos.

$$P_w = Mc \frac{T_f - T_{in}}{t}$$

La masa se puede determinar a través de las tablas de estandarización de tubos conforme a las normas DIN 2448 y DIN 2458 (ver anexo 4) como también la norma

Europea EN 10255 de medidas y masas lineales para tubos en base a la ISO 4200 (SIKLA, 2013)

$$P_w = 20kg * \frac{239J}{kg^{\circ}C} * \frac{55 - 15}{1200 s}^{\circ}C$$

$$P_w = 160 W$$

El conjunto formado por el tubo por el cual circula el agua, se convierte en un altamente eficiente *intercambiador de calor*. Considerando que P_w representa la potencia necesaria para calentar el agua, la potencia de la fuente tiene que ser un poco mayor debido a las pérdidas de energía en los diferentes subsistemas, de esta manera la potencia efectiva que la fuente debe ser capaz de suministrar, así se obtiene la Ecuación 1.12 donde $\eta_T = \eta_{termica} * \eta_{Electrica}$

$$P_e = \frac{P_w}{\eta_T}$$

$$P_e = \frac{160W}{0.86}$$

$$P_e = 186W$$

3.4 Profundidad de penetración

Calculo de la profundidad de penetración que es la resultante del efecto piel. Este dato es muy importante ya que es la medida que penetra en la pieza de trabajo para obtener el calentamiento en el material ferromagnético, para modificar la profundidad de penetración es posible únicamente variando la frecuencia de operación así se obtiene;

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu_r}}$$

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{8.9 * 10^{-8}}{(3 * 10^5) * (109)}}$$

$$\delta = 26\mu m$$

3.5 Resistencia equivalente

El valor de la resistencia equivalente está en función de la resistencia de la bobina y principalmente de la resistencia de la pieza de trabajo. Si se realiza el cálculo con las ecuaciones anteriormente detalladas de la resistencia equivalente del prototipo, se tiene lo siguiente.

$$R_{eq} = K_R N_c^2 \rho_\omega \frac{2\pi r_\omega}{\delta_\omega l_\omega}$$

$$R_{eq} \approx \frac{1 * 15^2 * (8,9 * 10^{-8}) * (2\pi * 8 * 10^{-3})}{(26 * 10^{-6}) * (15 * 10^{-2})}$$

$$R_{eq} = 0,25\Omega$$

En muchos casos la resistencia de la bobina se considera constante, por otra parte, la resistencia de la pieza de trabajo cambia con la temperatura y su efecto se refleja directamente en la resistencia del modelo bobina pieza.

3.6 Bobina de trabajo

La confección de la bobina viene en función de la frecuencia de trabajo recomendada donde nos indica que para este tipo de aplicación se lo debe realizar en el rango de 20khz hasta 100 MHz, por otra parte, se obtiene la densidad de campo magnético de la curva de saturación magnética medido en teslas de este material por lo que se toma como referencia el B_{max} para el siguiente calculo.

3.6.1 Calculo del número de espiras

Para el cálculo de la bobina se debe primero considerar el flujo magnético que recorre la superficie del Fe, así como también el flujo magnético que se encuentra en el aire dentro de la bobina, así se obtiene la Ecuación 3.1

$$\Phi_{Total} = \Phi_{Fe} + \Phi_{aire} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde: $\Phi_{Fe} = B_{Fe} S_{Fe} ; \Phi_{aire} = B_{aire} S_{aire}$

$$\Phi_{Total} = B_{Fe} S_{Fe} + B_{aire} S_{aire}$$

Además : $B_{Fe} = \mu_r \mu_0 H ; B_{aire} = \mu_0 H$

$$S_{Fe} = 2\pi R \delta ; S_{aire} = \pi R^2$$

Flujo magnético: $\Phi_{Total} = \mu_r \mu_0 H S_{Fe} + \mu_0 H S_{aire}$

Si se toma el factor común, se obtiene el flujo total al interior de la bobina, que está en función de la superficie transversal interior de la bobina (S_{Total})

$$\Phi_{Total} = \mu_0 H (\mu_r S_{Fe} + S_{aire}) = \mu_0 H S_{Total}$$

Se obtiene entonces la superficie equivalente total que permite el flujo magnético. Se ha hecho este procedimiento dado que el camino magnético del flujo no atraviesa únicamente el hierro sino en mucha menor proporción también el aire.

$$S_{Total} = S_{Fe} + \frac{S_{aire}}{\mu_r} = 2\pi R\delta + \frac{\pi R^2}{\mu_r}$$

$$V_s = 4.44N * F * B_{max} * S$$

Reemplazando:
$$V_s = 4.44N * F * B_{max} * \left[2\pi R\delta + \frac{\pi R^2}{\mu_r}\right]$$

Despejando:
$$N = \frac{V_s}{4.44F * \delta * B_{max} \left[2\pi R\delta + \frac{\pi R^2}{\mu_r}\right]}$$

$$N = \frac{15}{4.44 * (3 * 10^5) * 0.1 \left[2\pi * (15 * 10^{-3}) * (26 * 10^{-6}) + \pi \frac{(15 * 10^{-3})^2}{109}\right]}$$

$$N = 13 \text{ espiras}$$

3.7 Inversor

Un inversor de voltaje es un dispositivo electrónico que convierte un determinado voltaje de entrada, de Corriente Continua (CC) en otro voltaje de salida de Corriente Alterna (CA). Es decir, recibe corriente continua de un determinado voltaje y proporciona corriente alterna, generalmente de un voltaje diferente al de entrada. Para el presente proyecto es necesario la implementación de una fuente de alimentación de alta frecuencia encargada de suministrar energía a la carga resonante.

3.8 Topología de los inversores

Las topologías están principalmente determinadas por el circuito resonante RLC y por los interruptores de potencia dependiendo de su número y su distribución. Y se clasifican en dos tipos que son; Inversor de medio puente e inversor de puente completo.

3.8.1 Inversor de medio puente

En la Figura 3.4 muestra el inversor de medio puente que consta de dos interruptores, donde la tensión aplicada a la carga se divide a la mitad mediante un divisor capacitivo, este inversor puede generar una salida con forma de onda cuadrada o una salida bipolar con modulación por ancho de pulsos.

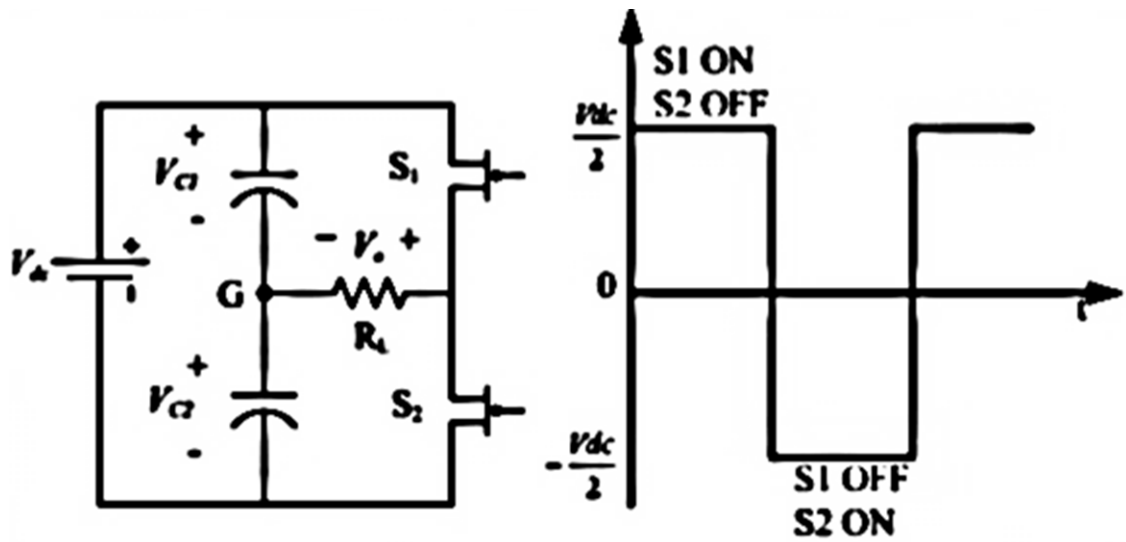


Figura 3.4 inversor de medio puente

3.8.2 Secuencia de conmutación

Sw1 cerrado, Sw2 abierto y el voltaje del capacitor C1 se ve reflejado en la carga; mientras que al estar Sw2 cerrado, Sw1 abierto y el voltaje de entrada $V_s/2$ aparece a través de la carga. El voltaje de salida en la carga corresponderá a una señal cuadrada.

Considerando que los capacitores C1 y C2 están cargados a la mitad del voltaje V_s tal como se observa en los capacitores flotantes de la Figura 3.4 anterior. Para la forma de onda del inversor de medio puente en la primera mitad del periodo $T/2$ se obtendrá un voltaje con forma de onda cuadrada $V_s/2$, para la segunda parte del periodo $T/2$ a T se polariza de forma inversa y el voltaje de salida será $-V/2$ tal como se describe en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Posición de los Mosfet

Interruptores cerrados	Voltaje
(S1)	$+V_s/2$
Todos abiertos	0 Tiempos muertos
(S2)	$-V_s/2$

3.8.3 Control de inversor de medio puente

Existe un tiempo muerto intermedio denominado banda muerta T_d , el cual ayuda a prevenir un cortocircuito al cambiar de estado de los interruptores.

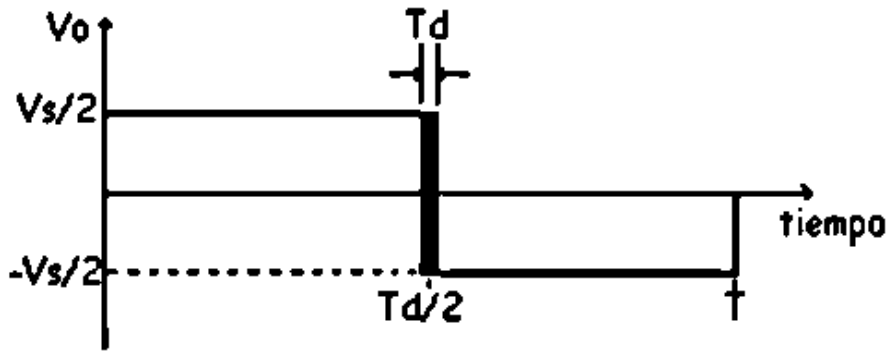


Figura 3.5 Voltaje de salida del inversor de medio puente.

3.8.4 Inversor en H o puente completo

Un Puente en H es un circuito que se utiliza para convertir corriente continua en alterna. Existe la variante para media onda, pero en nuestro caso no se utilizará la de onda completa como se muestra en la Figura 3.6. La salida será $+V_{cc}$ o $-V_{cc}$ dependiendo de que interruptores estén cerrados y para ello se obtiene cuatro posibilidades.

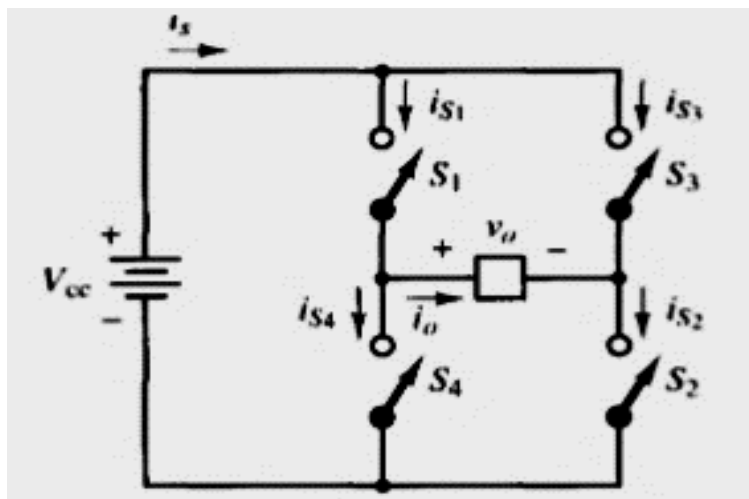


Figura 3.6 Inversor de onda completa

Que S1 y S2 estén cerrados, lo que genera que en la salida haya un valor de $+V_{cc}$. Que S3 y S4 están cerrados, dando lugar a que la corriente entre por el polo negativo generando un valor de $-V_{cc}$ en la carga

Los casos en que S1 y S3, y S2 y S4 están encendidos simultáneamente se generará un voltaje de salida igual a 0. Nunca deben encenderse S1 y S4 o S3 y S2 a la vez ya que se produciría un cortocircuito en la fuente.

En la elección de los interruptores reales habrá que tener en cuenta su tiempo de apertura y cierre, para evitar que ocurran los estados no deseados incluso provocando que

exista un tiempo muerto entre los interruptores S1- S2 y los S3-S4 para asegurarse de esto.

Se debe colocar un diodo de circulación libre en paralelo polarizado en inversa en cada interruptor para reducir los picos de corriente en conmutación debido a cargas inductivas, ya que permite el flujo de corriente durante los periodos de desconexión de los interruptores.

3.9 Circuito inversor utilizado

El circuito inversor que se utilizó para el prototipo funciona en forma similar al inversor de medio puente ya explicado, con la diferencia de que la conmutación de los transistores Mosfet se la realiza con el mismo condensador que entra en resonancia. El condensador en este caso se carga con voltaje negativo que ingresa en la compuerta del Mosfet y lo apaga momentáneamente mientras que el otro Mosfet del medio puente queda encendido. El proceso de encendido y apagado dependerá justamente de la resonancia RLC, de esta manera la frecuencia de conmutación también dependerá de la frecuencia de resonancia

CAPÍTULO IV

4 Desarrollo

La construcción del prototipo se desarrolló por etapas de acuerdo al trabajo realizado que en orden temporal fueron las siguientes:

- Etapa de fabricación del circuito de alimentación
- Etapa de construcción del control de temperatura
- Etapa de programación del microcontrolador Arduino Uno
- Etapa de construcción del inversor para inducción

4.1 Fabricación del circuito de alimentación

El circuito de alimentación está constituido por una fuente de voltaje con transformador que convierte la corriente alterna de 120 V 60Hz, de la red eléctrica en corriente continua 12 V que se encarga de proveer el voltaje para el inversor y el circuito de control. En el mercado de Quito se consiguió un transformador de 300 VA con voltaje primario 120 V y secundario de 15V con derivación central; es decir 15 CT 15 V. Este voltaje se rectificó con un puente rectificador de 30 A 250 V cuadrado y el voltaje de salida se filtró con un condensador de 10.000 μ F para 25 V dc máximo. El voltaje obtenido sirvió para alimentar tanto al inversor cuanto al circuito de control.

4.2 Construcción del sistema de control digital

El control digital de temperatura se construyó con una placa Arduino Uno que se adquirió en el mercado local. En la Tabla 4.1 se muestran las especificaciones técnicas particulares de este microcontrolador, que es el componente principal del sistema de control. El Arduino Uno estuvo encargado de verificar los datos de los sensores, desplegar la información en el LCD (Liquid Cristal Display) y por último de activar y desactivar el relé que controla al circuito LC. En la Figura 4.1 se muestra el microcontrolador utilizado. Esta tarjeta incluye un microcontrolador de la marca Atmel ATmega328P e incluye toda la circuitería de soporte, además posee, reguladores de tensión, un puerto USB que permite programar a la placa desde cualquier PC.

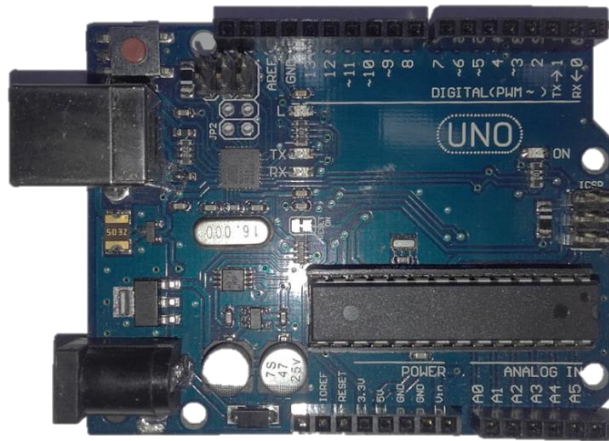


Figura 4.1 Microcontrolador Arduino Uno

4.3 Construcción del control de temperatura

El control de temperatura se construyó con cuatro sensores DS18B20 como lo indica la Figura 4.2, que se encargan de medir la temperatura en los siguientes puntos: 2 para determinar la temperatura del tubo ferromagnético, 1 sensor se encarga de verificar la temperatura de los condensadores del circuito LC y finalmente el último sensor se encarga de verificar la temperatura del agua.



Figura 4.2 Sensor One Wire DS18B20

El sensor DS18B20 utilizado es idóneo para medir la temperatura en ambientes húmedos e incluso dentro del agua, esto es debido a que tiene una capa impermeable. Los datos generados en el sensor DS18B20 se leen utilizando el protocolo One Wire, que permite enviar y recibir datos utilizando un solo cable, pero a nivel de Arduino no es necesario conocer el funcionamiento de este protocolo, ya que Arduino posee las librerías que automáticamente nos indican la temperatura del mismo con solo revelar en las

librerías el pin que se utilizará para leer los sensores. En la Figura 4.3 muestra los pines de conexión del termómetro.

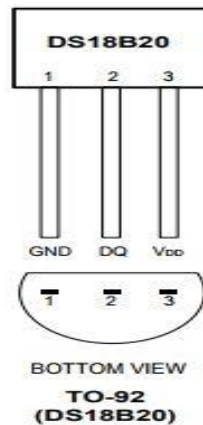


Figura 4.3 Pines del sensor de temperatura

4.4 Programación del microcontrolador Arduino Uno

Programar Arduino consiste en traducir a líneas de código las tareas automatizadas que se requiere hacer a través de los sensores y en función de las condiciones del entorno programar la interacción con el mundo exterior mediante unos actuadores.

Arduino proporciona un entorno de programación sencillo y potente para programar, pero además incluye las herramientas necesarias para compilar el programa y “quemar” el programa ya compilado en la memoria flash del microcontrolador

Un programa de Arduino se denomina **sketch** o proyecto y tiene la extensión (.ino), a continuación, se detalla las librerías a ser usadas en el código de programa.

```
#include <LiquidCrystal.h>
```

```
#include <OneWire.h>
```

```
#include <DallasTemperature.h>
```

```
// Pin donde se conecta el bus 1-Wire
```

```
const byte pinDatosDQ = 2;
```

```
const byte PinRele = 13;
```

```
const byte TempTubo = 80; //Temperatura maxima que tendrá el tubo
```

```
const byte TempCond = 40; //Temperatura maxima que soporta el Condensador
```

```
const byte TempPiscina = 35; //Temperatura de la piscina
```

```
const byte Tiempo_On = 5; // Tiempo de activado del circuito
```

```

const byte TiempoOff = 0; // Tiempo desactivado del circuito

float Temperatura01 = 0;

float Temperatura02 = 0;

float Temperatura03 = 0;

float Temperatura04 = 0;

LiquidCrystal lcd(7, 8, 9, 10, 11, 12);

byte ContTiempo = 0;

void IniciarTimer_1(void);

ISR(TIMER1_COMPA_vect);

```

El código de programa usado en el microcontrolador Arduino Uno se lo puede observar detalladamente en el Anexo 2.

4.4.1 Características y funcionamiento del Display LCD

Este dispositivo se encarga de presentar la temperatura de los sensores Ds18B20 en el LCD para que el usuario tenga conocimiento del valor de cada sensor. El display LCD es una pantalla delgada y plana colocada delante de una fuente de luz. Se utilizó una pantalla compuesta por 2 líneas de 16 caracteres. El funcionamiento del LCD se basa en el envío de la información desde el microcontrolador de la placa de Arduino, durante un lapso de tiempo determinado por el fabricante.

En la Figura 4.4 se puede ver la conexión en un LCD 16x2 con un bus de 4 hilos seguida de la descripción de sus pines como se detalla en la Tabla 4.1.

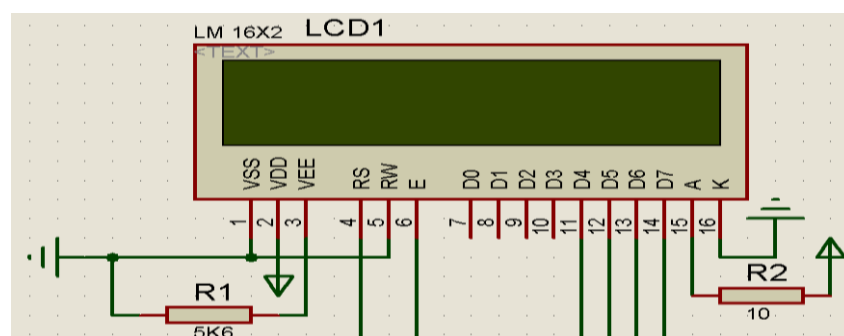


Figura 4.4 Conexión de un LCD 16x2

En la tabla 4.1 se puntualiza la funcionalidad de cada pin del LCD

PIN	SIMBOLO	DESCRIPCION
1	VSS	Patilla de tierra de alimentación
2	VDD	Patilla de alimentación de 5 V
3	VEE	Patilla de contraste del cristal líquido. Normalmente se conecta a un potenciómetro a través del cual se aplica una tensión variable entre 0 y +5V que permite regular el contraste del cristal líquido.
4	RS	Selección del registro de control/registro de datos:
5	R/W	Señal de lectura/escritura con R/W=0, el módulo LCD es escrito
6	E	Señal de activación del módulo LCD: E=1 Módulo conectado
7-14	D0-D7	Bus de datos bi-direccional.
15	A	Patilla de alimentación del backlight (5 V)
16	K	Patilla de tierra del backlight

Tabla 4.1 Pines del LCD

4.5 Diagrama de flujo para el control de temperatura

El diagrama flujo que se muestra en la Figura 4.5 indica la secuencia lógica de la programación establecida para este control. El algoritmo inicial tiene que ver únicamente con el encendido y apagado del inversor del calentador por inducción. Si cualquiera de las temperaturas ha superado los límites preestablecidos el inversor se apaga, si la temperatura final deseada todavía no se ha alcanzado, el inversor seguirá encendido para calentar el agua.

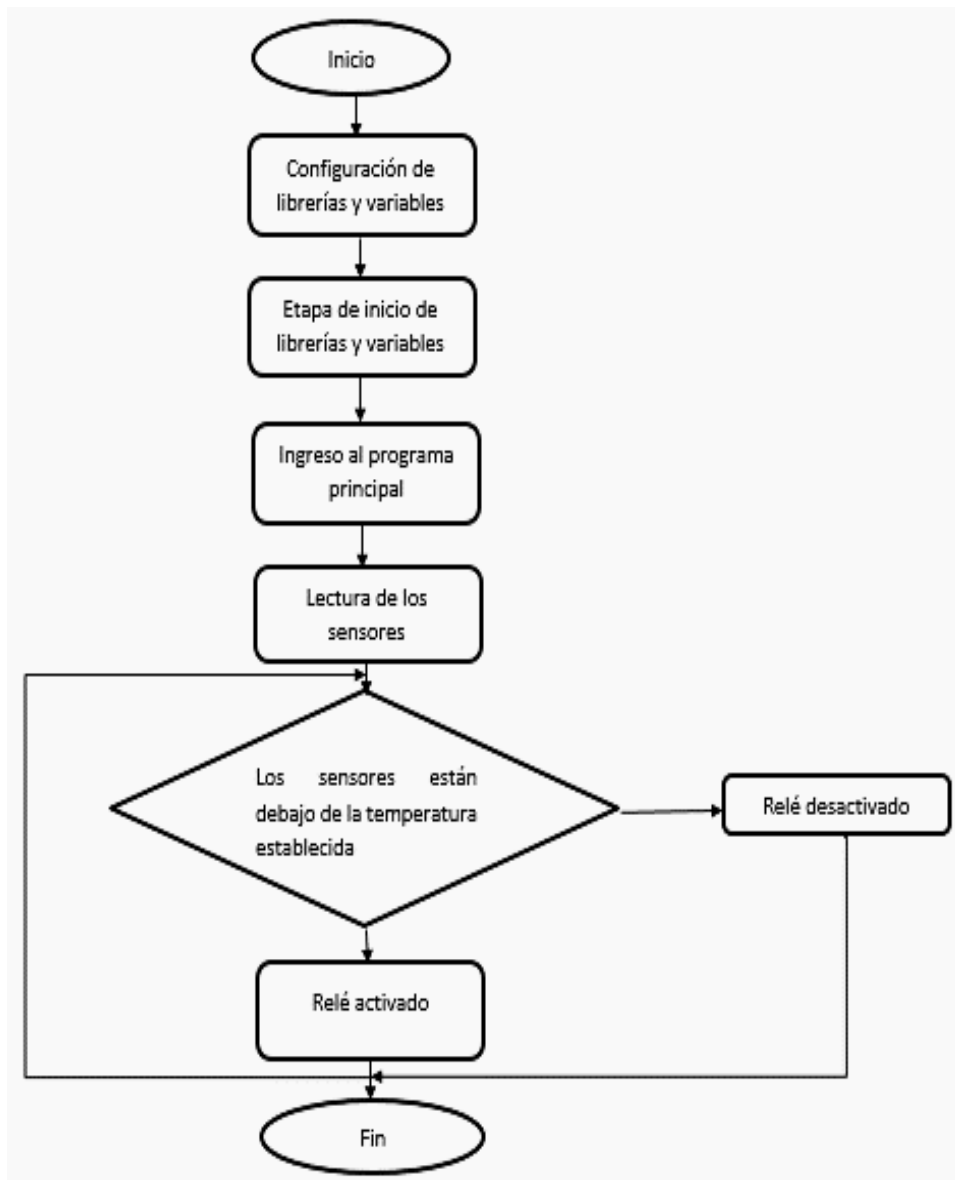


Figura 4.5 Diseño del diagrama de bloques del circuito de control

4.5.1 Descripción del diagrama de bloques:

Al inicio se declaran la librería y las variables, que se utilizaran en este control indicando cuales son los pines que controlaran al LCD, cual pin verificara la temperatura de los sensores etc. En donde para cada sensor se ha establecido un rango de temperatura máximo a ser medido. Posteriormente se inicializan los pines y las librerías que se utilizaron en el control para proceder a ingresar al lazo de control.

En el lazo de control se verifica la temperatura de cada sensor, si los mismos no superan los rangos de temperatura establecidos al inicio, permite que el relé que activa al circuito RC se mantenga cerrado, caso contrario si un sensor supera el límite de

temperatura configurado se procederá a abrir al relé. Dependiendo del estado del relé el circuito LC es activado y desactivado

En este caso para simular el calentamiento de la piscina se utilizó una pecera, el agua de la misma es llevado a través de un tubo de plástico hasta el tubo metálico, que se calienta por las corrientes de Foucault de esta manera se transfiere la temperatura del tubo hacia el agua, para que llegue hasta una temperatura establecida como ideal para la pileta.

4.6 Construcción del circuito de potencia

El circuito de potencia es alimentado directamente con 110V AC y el activado de esta etapa se realiza a través de un relé, el mismo que dependiendo del valor medido por los sensores de temperatura tanto a nivel del tubo, los condensadores y la pecera que en este caso simula la piscina, será activado o desactivado por la placa Arduino Uno.

Para confeccionar la bobina resonante se utilizaron 15 espiras de conductor sólido número 12 AWG que es adecuado para conducir los 15 amperios que resultaron como corriente de carga del calentador de agua por inducción. El circuito de potencia consistía adicionalmente en los dos Mosfet en medio puente monofásico, el condensador para la resonancia, los disipadores para los Mosfet y el circuito de disparo.

4.7 Implementación

Por tratarse de un prototipo se utilizó un tablero de madera de 30*30 cm sobre el cual se montaron las tarjetas de control con el microcontrolador Arduino, la tarjeta de control principal del inversor LC, los dispositivos eléctricos de potencia necesarios para que funcione el calentador de agua por inducción.

La pileta se simuló con una pecera de vidrio y se añadieron una bomba para doce voltios de corriente continua que se utilizan en las peceras.

Para construir la pieza de trabajo se utilizó un retazo de tubo galvanizado de 20cm de longitud, de ½ pulgada de diámetro y de 3mm de espesor.

4.8 Funcionamiento

El prototipo de calentamiento de agua por inducción se construyó con la finalidad de calentar piletas y tinas de baño, con la diferencia que su instalación no fue realizada en la tubería principal de llenado de la pileta o tina, sino que fue instalada en una tubería adicional, la cual fue conectada a una bomba que hizo recircular el agua dentro de la pileta. A la vez que se recirculaba el agua ya sea para brindar un masaje a los bañistas

también se calentaba hasta la temperatura programada, es allí en donde se implementó el prototipo de calefacción por inducción magnética.

4.9 Pruebas de funcionamiento

Gracias al suministro de la empresa eléctrica local se conecta a 110 V, al denominado circuito LC que tiene incorporado una bobina y un condensador para el control y dependiendo del sentido de la corriente que circula por la bobina, genera un campo magnético que induce una corriente en un material ferromagnético, el mismo que ante dicha corriente comienza a calentarse.

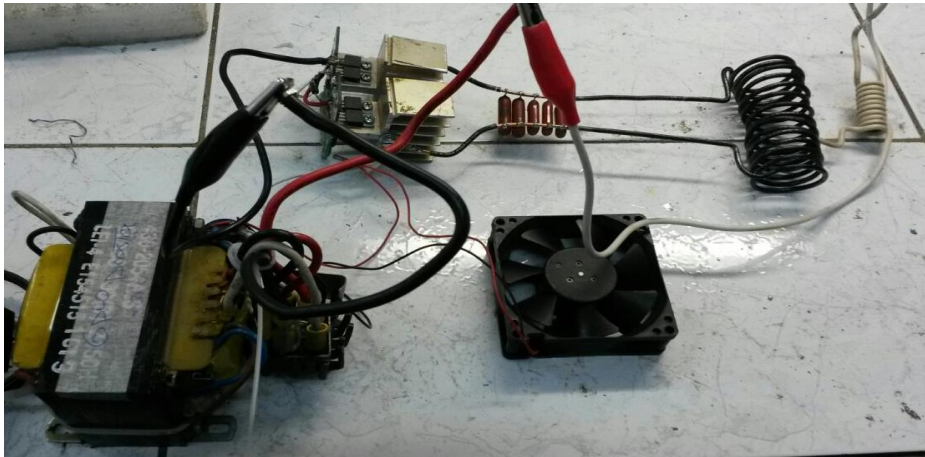


Figura 4.6 Circuito resonante

El sistema de calentamiento se construyó con una tubería de acero galvanizado, se usó este material ya que es el más común en instalaciones hidrosanitarias de los hogares; así también 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 general del sistema de calentamiento Figura 4.7.



Figura 4.7 Bobina de trabajo con núcleo ferromagnético

A continuación, se presenta un inversor de medio puente construido con MOSFET, en anti-paralelo a ellos se encuentran diodos de recuperación rápida, esto se debe a que los diodos internos con los que cuentan estos transistores tienen características limitadas en tiempos de recuperación inversa, por lo tanto, para anular su funcionamiento es necesario incorporar diodos en serie con los MOSFET, luego son montados en unas placas de aluminio como se muestra en la Figura 4.8 que ayudan a disipar el calor generado por su funcionamiento a plena carga.

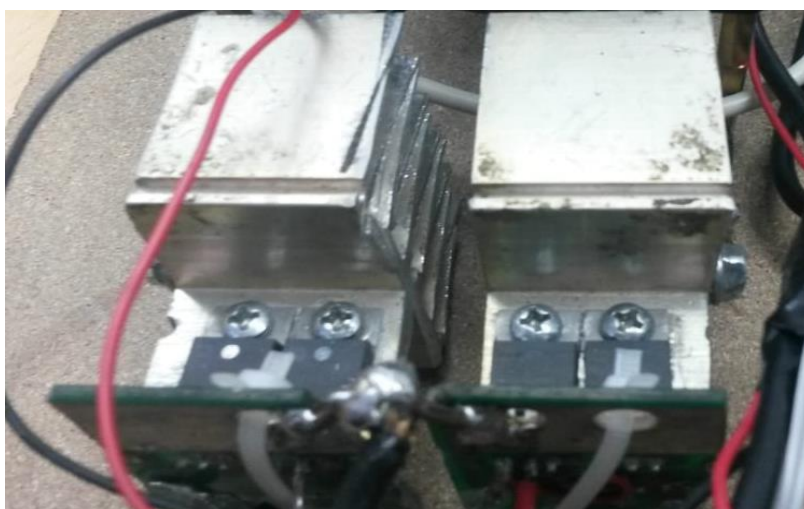


Figura 4.8 Circuito oscilador de alta frecuencia

En la Figura 4.9 se puede observar los condensadores para construir un circuito resonante, auto-oscilante y auto-bloqueante en conjunción con la bobina. La frecuencia de resonancia se midió en aproximadamente 280 kHz.

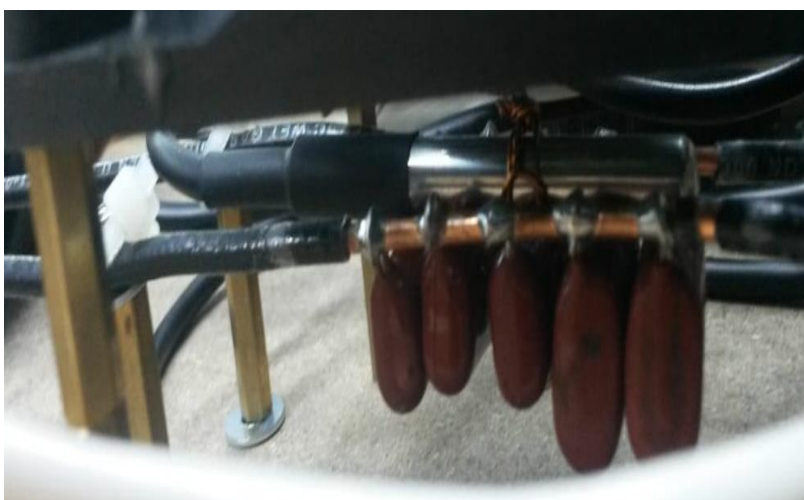


Figura 4.9 Condensadores que conforman el circuito tanque

En la Figura 4.10 se muestra la construcción de la baquelita previo al montaje de los elementos electrónicos.

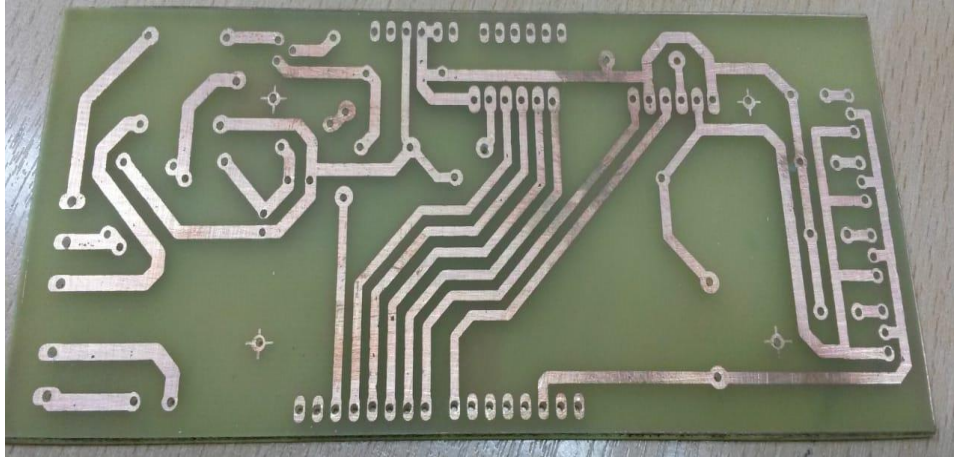


Figura 4.10 Diseño de la baquelita



Figura 4.11 Placa electrónica para el control

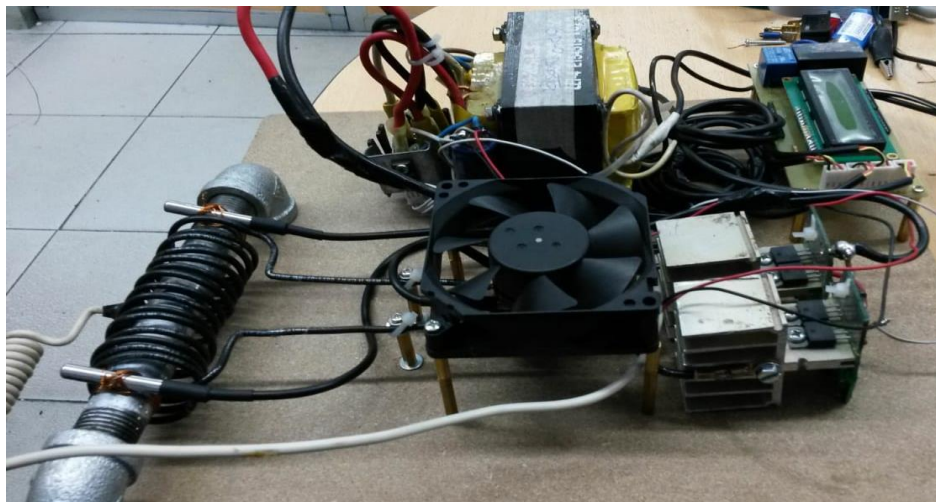


Figura 4.12 sistema implementado del calentador de agua por inducción

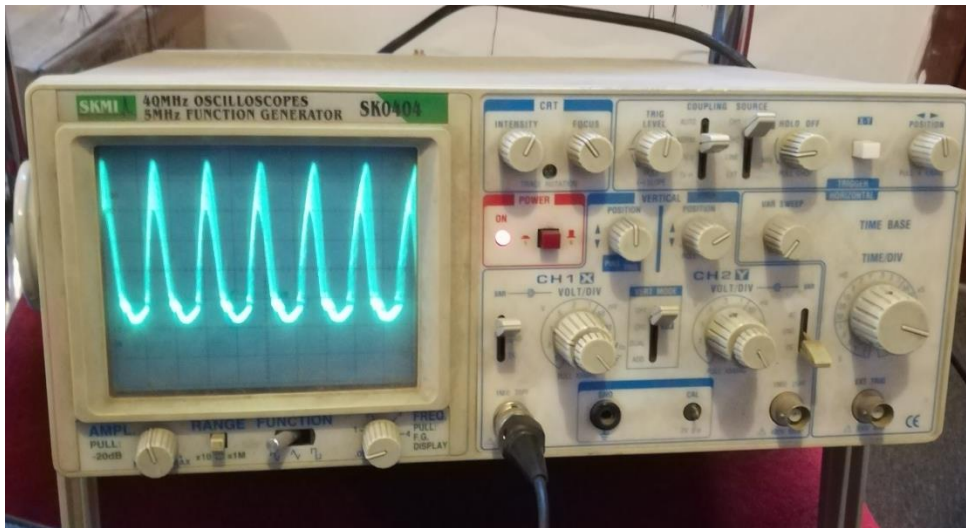


Figura 4.13 Osciloscopio SKMI (SK0404)

En el oscilograma de la Figura 4.13 se puede apreciar que la onda producida en el inversor es aproximadamente sinusoidal, aunque el pico positivo es más agudo que el pico negativo. El período de cada onda medida fue de 1,7 cuadros con base de tiempos en $2\mu\text{s}$ por división; esto es $3,4\mu\text{s}$. De esta manera, la frecuencia de la oscilación se calculó en 288 kHz. De la misma manera, se midió la altura total del pico de la onda con una punta de prueba por 10 con un total de 5,2 cuadros en la escala de 1 Voltio por división. Esto daría un voltaje de 52 voltios pico-pico. Luego de realizar los cálculos correspondientes esto daría un voltaje de 18 Voltios rms.

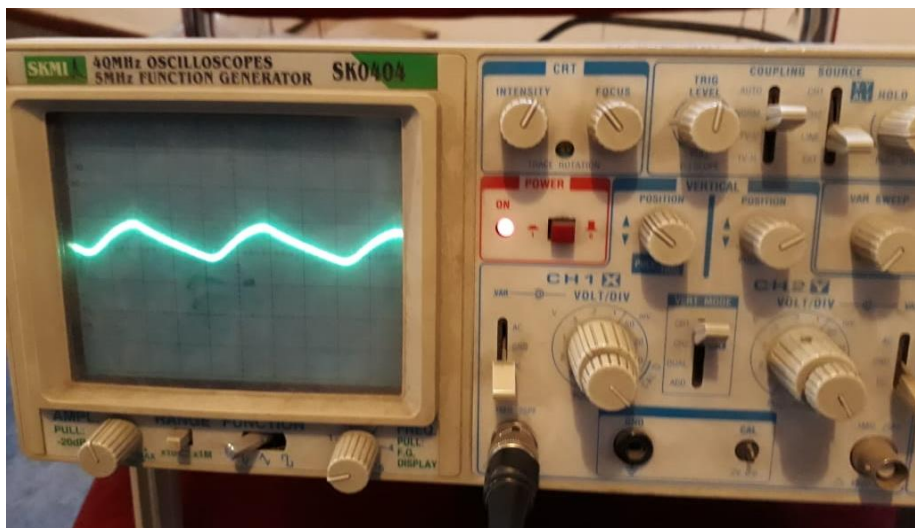


Figura 4.14 Onda rectificada y filtrada

En el oscilograma de la Figura 4.14 se puede observar la onda rectificada y filtrada que alimenta al inversor auto-oscilante. La oscilación tiene un período de 8,3 ms; es decir,

tiene una frecuencia de 120 Hz, tal como podía esperarse de un circuito rectificador de media onda. Se ha medido esta oscilación en el modo AC para intensificar la escala. El voltaje pico de rizado medido es de 5 Voltios pico a pico. Si se requiere mayor potencia de salida del inversor, sería necesario añadir un condensador de mayor valor para el filtrado de la señal. El Voltaje DC obtenido fue de 20 V pico con un valle que llegaba hasta los 15 Voltios DC.

5 CONCLUSIONES

Luego de finalizada la investigación, realizar pruebas de funcionamiento y el análisis y discusión de los resultados, a continuación, se presentan las conclusiones del presente estudio, las cuales permiten plasmar principales hallazgos referidos a el diseño y construcción de un prototipo de calefacción para piletas de agua mediante inducción magnética.

Las mismas se detallan con base en los objetivos específicos que se formularon para la investigación.

- Con respecto al primer objetivo específico, que consistió en analizar las distintas técnicas de calefacción indirecta partiendo de la inducción magnética, se encontró que existen diferentes métodos convencionales para el calentamiento de agua, como son calentamiento por resistencia eléctrica y por GLP, sin embargo, para la actual investigación el mas conveniente es el calentamiento por inducción magnética, ya que facilita el ahorro de agua convirtiéndose en un equipo confiable y competente.
- En relación con el segundo objetivo específico relativo a establecer los parámetros de funcionamiento y control del sistema de calefacción indirecta de agua mediante inducción magnética, se encontró que los resultados son satisfactorios al tener una frecuencia de resonancia optima, un voltaje controlado y un caudal de agua constante.
- Ahora bien, con relación al diseño del circuito electrónico de control del sistema de calefacción se pudo evidenciar que existen una gran variedad de inversores resonantes para construir sistemas de calentamiento por inducción magnética, estos resultados revelan una problemática en cuanto a la potencia del equipo ya que no todos los elementos electrónicos son robustos para soportar la potencia de trabajo en un tiempo prolongado, sin embargo mediante los transistores Mosfet se pudo diseñar satisfactoriamente nuestro prototipo.
- De la misma manera, con respecto al desarrollo del prototipo de calefacción por inducción magnética, se encontró que este tipo de sistema son más versátiles, de menor tamaño y de mayor eficiencia para altas potencias. En ese sentido, se evidencia la factibilidad para el desarrollo del prototipo ya que esta técnica de calentamiento por inducción es muy poco empleada en el País.

- Finalmente, en relación con las pruebas de funcionamiento demuestran la eficiencia del equipo, estos resultados evidencian el funcionamiento óptimo del prototipo de calefacción de agua por el método de inducción magnética
- Este proyecto queda de base para cualquier cambio o mejora que se desee hacer del mismo en la parte de control o para aplicaciones que requieran mayores temperaturas o calentamiento con otro tipo de cargas.

6 RECOMENDACIONES

En función de las conclusiones, a continuación, se esbozan una serie de recomendaciones pertinentes para futuras investigaciones en los que mediante la inducción magnética se puedan elaborar calentadores de agua para uso industrial o doméstica, lo cual redundaría en beneficios referidos al ahorro energético.

- Se recomienda la implementación de un circuito de puente completo, con lo cual se puede aumentar la potencia del sistema, además con esta configuración facilidad la implementación de nuevos algoritmos de control.
- En tal sentido, se recomienda, en primer lugar, diseñar sistemas de calefacción por inducción basados en módulos de fácil remoción en caso de eventuales daños del mismo.
- Implementar circuitos de protección de sobre-voltaje y sobre-corriente en la carga como también en el circuito en general para sistemas de mayor potencia, el prototipo realizado tiene una potencia de 180 W por esta razón no se consideró las protecciones anteriormente mencionadas.
- Realizar un estudio más profundo para la construcción de duchas como también calefones a inducción magnética, y así poder llegar al sector doméstico con un costo beneficio aceptable.

7 Bibliografía

- Alvarez, M. S. (Abril de 2009). *MODELACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA PILOTO DE CALENTAMIENTO DE FLUIDOS POR INDUCCIÓN MAGNÉTICA*. Obtenido de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/102050/sanchez_ma.pdf?sequence=3
- Arias, F. G. (2006). *El proyecto de investigación*. Caracas: Episleme.
- Bermudez L, M. (2003). *Estudio y diseño de un calentador por inducción magnetica* . Obtenido de <http://lep.eie.pucv.cl/TesisLeoFinal.pdf>
- Collaguazo A, E. A. (2009). *Diseño y Construcción de un Prototipo de una Cocina de Inducción Electromagnetica*. Quito.
- Colombotto, I. (2017). ¿Cuál es la temperatura ideal para una piscina climatizada (verano e invierno)? *Infotopo*.
- David H, H. (1999). *Fisica Vol. 2*. Mexico: continental, S.A.
- Egas M, E. (2016). *Introducción a la Teoría Electromagnetica*.
- El efecto de los iones. (9 de Octubre de 1999). *Salud y Medicina*. Obtenido de <https://www.dsalud.com/reportaje/el-efecto-de-los-iones/>
- Galarreta, R. (1994). *La investigación bibliográfica y los textos académicos*. Trujillo: Orrego.
- Gonzalez W, W. (2008). *Diseño de una bobina de inducción para fundición de titanio*.
- González, S. (2000). *Convertidores Resonantes*. Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1352/2/_-_Convertidores_resonantes.pdf?sequence=6
- Gonzalez, W. (Abril de 2008). *Diseño y construcción de bobina de calentamiento por inducción para fundición de titanio*.
- Kolocsar. (30 de Noviembre de 2017). *Calentamiento Por Inducción Magnética*. Obtenido de <https://kolocsar.com/calentamiento-por-induccion-magnetica/>
- Kosow I, I. L. (1990). *Máquinas Eléctricas y Transformadores*. Mexico: Prentice Hall.

- López, C. T. (14 de Junio de 2016). *electromagnetismo*. Obtenido de <https://culturacientifica.com/2016/06/14/descubrimiento-la-induccion-electromagnetica-1/>
- Magnetismo. (20 de Abril de 2005). *lecciones de electrónica* . Obtenido de <http://www.ifent.org/lecciones/cap07/cap07-08.asp>
- Martínez J, J. A. (2013). *Desarrollo de un Inversor para Calentamiento por Inducción Electromagnética*. Mexico D.F.
- Moragrega, S. (2010). *Ciencias Aplicadas y Experimentación*. Obtenido de <http://cienciaexperimental.foroactivo.com/t2081-horno-de-induccion-calentamiento-y-levitacion-electromagnetica>
- Picón A, A. A. (2007). Calentamiento por induccion Electromagnetica. *Revista de la Facultad de Ingenieria Fisicomecánicas*, 8.
- Rodriguez, D. I. (29 de Noviembre de 2016). *Ella Hoy*. Obtenido de www.ellahoy.es/salud/articulo/duchase-con-agua-caliente-riesgos-y-temperatura-ideal/266001/
- Sampieri, R. H. (2008). *Metodología de la investigación*. Mexico: MC GRAW HILL.
- Savant, F. G. (2004). *El proyecto de investigación científica*. Caracas.
- SIKLA. (10 de 2013). *Tubos (medidas y pesos)*. Obtenido de https://www.sikla.es/fast/600/17%20Tubos%20_medicadas%20y%20pesos_.pdf
- Telégrafo, E. (8 de Diciembre de 2018). El 97% de energía que consume el sector comercial es eléctrico. *El 97% de energía que consume el sector comercial es eléctrico*.
- Turmero P, P. (08 de Enero de 2018). *Programa de eficiencia energética para cocción por inducción*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos102/cocinas-induccion-y-calentamiento-agua/cocinas-induccion-y-calentamiento>
- Unicrom, E. (2016). *Resistividad, resistencia específica*. Obtenido de <https://unicrom.com/resistividad-resistencia-especifica/>
- Valbuena, M. (Abril de 2003). *Propiedades magnética de los materiales*. Obtenido de http://www.quieroapuntes.com/propiedades-magneticas-de-los-materiales_1.html

Vega, C. P. (2011). Audicion Humana. *Audicion Humana*, 12. Obtenido de
<http://personales.unican.es/perezvr/pdf/La%20Audicion%20Humana.pdf>

Wiederick H, G. (Junio de 1986). *Campos dependientes del tiempo*. Obtenido de
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/elecmagnet/faraday/foucault/foucault_1.htm

1

8 Anexo 1

Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 247 "seguridad y eficiencia energética para calentadores de agua eléctricos instantáneos sin acumulación de agua"

Para efectos de la aplicación de este proyecto se uso el reglamento técnico que adoptan las definiciones contempladas en las normas IEC 60335-2-35 e IEC 60335-1, EN 50193-1 vigentes.

Los métodos de ensayo utilizados para verificar el cumplimiento de los requisitos de seguridad para los calentadores de agua eléctricos instantáneos sin acumulación de agua se establecen en las normas IEC 60335-2-35 e IEC 60335-1 conjuntamente, vigentes o sus adopciones equivalentes.

Por otra parte, la NTE INEN 1992 nos indica que esta norma se aplica a los calentadores eléctricos de agua para uso doméstico, que funcionan con corriente alterna, un voltaje de 110/220 voltios (V), y una potencia nominal de 1000 hasta 7000 voltios(W). Esta norma se aplica a calentadores de agua cuya máxima presión de trabajo admisible y temperatura se limitan a 1.10 MPa y 60° respectivamente

Se citan los reglamentos investigados para este proyecto con respecto a la presión y temperatura necesarios para su construcción.

Instalación hidráulica

La instalación debe tener una capacidad para suministrar agua con flujo forzado, régimen permanente, flujo máximo de 30 l/min y presión máxima de 1000 kPa. La presión debe presentarse estable, permitiendo el funcionamiento adecuado de los instrumentos utilizados en el ensayo. Para garantizar estabilidad, se recomienda el empleo de un depósito elevado con nivel de agua constante, el uso de válvula reguladora de presión o cuba de amortiguamiento en sistemas de presurización del agua con bombas hidráulicas.

Temperatura de acuerdo a la norma IEC 60335-2-35

Para la medición de la temperatura del agua a la entrada del artefacto debe ser usado un instrumento con rango de medición entre 0 grados C y 50 grados C y con precisión de 0,1 grados C. El punto de medición debe estar localizado a 20 cm de la entrada del artefacto aprueba, en un tramo de tubo con diámetro nominal DN 15. Para la medición de la temperatura del agua a la salida del artefacto debe ser usado un instrumento con rango de medición entre 0 grados C y 90 grados C y con precisión de 0,1 grados C. Para calentadores instantáneos de agua, el punto de medición debe estar

localizado a 20 cm al lado de la probeta en un tramo de tubo con diámetro nominal DN 15.

NTC 5106:17-03-2010

Calentadores de agua residenciales: artefacto diseñado para producir agua caliente para aplicaciones domésticas que requieran agua caliente a menos de 82,2 °C

La Norma NTC 888:1997-04-16 del ICONTEC que regula la instalación correcta de calentadores acumuladores de agua, el ingeniero hidráulico, el plomero, el instalador y el usuario, deben tener muy presente que esta norma los obliga a usar una válvula de presión y de temperatura combinadas, graduada a una presión de 1034 kPa (150 PSI) y a una temperatura máxima de 99 °C. Teniendo en cuenta que la presión máxima de agua para la que el calentador ha sido diseñado es de 6,2 bar (90 PSI), este valor incluye el efecto de la dilatación del agua.

Instalando correctamente un calentador y cumpliendo con la Norma Técnica Colombiana, es necesario que los demás materiales de la instalación deban también resistir por lo menos 150 PSI a una temperatura de 99 °C.

9 Anexo 2

9.1 Programación del microcontrolador Arduino Uno

```
#include <LiquidCrystal.h>
```

```
#include <OneWire.h>
```

```
#include <DallasTemperature.h>
```

```
// Pin donde se conecta el bus 1-Wire
```

```
const byte pinDatosDQ = 2;
```

```
const byte PinRele = 13;
```

```
const byte TempTubo = 80; //Temperatura maxima que tendrá el tubo
```

```
const byte TempCond = 40; //Temperatura maxima que soporta el Condensador
```

```
const byte TempPiscina = 35; //Temperatura de la piscina
```

Cuando el tiempo (Tiempo Off) es igual a cero el circuito esta siempre funcionando, pero así el valor Tiempo Off sea igual a cero es necesario que el tiempo (Tiempo On) sea mayor que cero.

```
const byte Tiempo_On = 5; // Tiempo de activado del circuito
```

```
const byte TiempoOff = 0; // Tiempo desactivado del circuito
```

```
float Temperatura01 = 0;
```

```
float Temperatura02 = 0;
```

```
float Temperatura03 = 0;
```

```
float Temperatura04 = 0;
```

```
LiquidCrystal lcd(7, 8, 9, 10, 11, 12);
```

```
byte ContTiempo = 0;
```

```
void IniciarTimer_1(void);
```

```
ISR(TIMER1_COMPA_vect);
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
cli();//stop interrupts
```

```

pinMode(PinRele, OUTPUT);

digitalWrite(PinRele, LOW);

sensorDS18B20.begin();

lcd.begin(16, 2); //Inicio el LCD

lcd.clear();

lcd.print("CTR. TEMPERATURA");

delay (1000);

IniciarTimer_1();

sei();//allow interrupts
}

void loop()

{

//Comandos para toma de temperatura a los sensores
sensorDS18B20.requestTemperatures();
Temperatura01 = sensorDS18B20.getTempCByIndex(3); // Tubo
Temperatura02 = sensorDS18B20.getTempCByIndex(1); // Tubo
Temperatura03 = sensorDS18B20.getTempCByIndex(0); // Condensador
Temperatura04 = sensorDS18B20.getTempCByIndex(2); // Pecera
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("1"); lcd.setCursor(2, 0);lcd.print(Temperatura01);
lcd.setCursor(9, 0); lcd.print("2");lcd.setCursor(11, 0);lcd.print(Temperatura02);
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("3"); lcd.setCursor(2, 1);lcd.print(Temperatura03);
lcd.setCursor(9, 1); lcd.print("4");lcd.setCursor(11, 1);lcd.print(Temperatura04);
delay(300);

if ((Temperatura01 <= TempTubo) && (Temperatura02 <= TempTubo) &&
(Temperatura04 <= TempPiscina))
{
if(Temperatura03 < TempCond)
{
if(TiempoOff == 0)

```



```

    {
        digitalWrite(PinRele, HIGH);
    }
    else
    {
        if (ContTiempo <= Tiempo_On){ digitalWrite(PinRele, HIGH);}
        if (ContTiempo > Tiempo_On){ digitalWrite(PinRele, LOW);}
        if (ContTiempo > (Tiempo_On+TiempoOff)){ ContTiempo = 0;}
    }
}
else{
    digitalWrite(PinRele, LOW);
    ContTiempo = 0;
}
}
else{
    digitalWrite(PinRele, LOW);
    ContTiempo = 0;
}
}
ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
    ContTiempo ++;
}
void IniciarTimer_1(void)
{
    //set timer1 interrupt at 1Hz
    TCCR1A = 0;// set entire TCCR1A register to 0
    TCCR1B = 0;// same for TCCR1B
    TCNT1 = 0;//initialize counter value to 0
    // set compare match register for 1hz increments
    OCR1A = 15624;// = (16*10^6) / (1*1024) - 1 (must be <65536)

```

```
// turn on CTC mode  
TCCR1B |= (1 << WGM12);  
// Set CS12 and CS10 bits for 1024 prescaler  
TCCR1B |= (1 << CS12) | (1 << CS10);  
// enable timer compare interrupt  
TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);  
}
```

10 Anexo 3

A que temperatura es recomendable bañarse.

La temperatura del agua (ya sea fría, templada o caliente) ejerce un efecto diferente sobre el cuerpo a la hora de darnos una ducha.

Temperatura a 24°C

Para despertarse, nada como ponerse bajo la ducha a esta temperatura. Apenas un minuto será suficiente para sentir el efecto tonificante del agua fresca, a la que se le atribuye un efecto vasoconstrictor.

Temperatura a 30°C

Para conseguir un efecto relajante, y en especial al tener cierta fatiga al final del día, nada como darse una ducha de agua templada para relajar los músculos y liberar tensiones.

Temperatura a 40°C

No es la opción más recomendable por todos los motivos que se ha reseñado anteriormente, y porque, además, si puede padecer algún tipo de problema circulatorio, puede influir sobre el retorno venoso. Lo que sí es cierto es que al salir de la ducha el efecto será refrescante, porque el agua caliente favorece que el cuerpo libere calor.

Temperatura ideal

Lo más recomendable, según los expertos en dermatología, es optar por una ducha de agua templada, en torno a una temperatura de 30 °C, Por debajo de los 25 grados se consideraría una ducha fresca, y por encima de los 38 grados caliente. (Rodriguez, 2016)

Sonidos audibles por las personas

El oído humano puede responder a diminutas variaciones de presión en el aire, si están en el rango de frecuencia audible, aproximadamente entre 20 Hz - 16 kHz, los niños pueden escuchar hasta 20KHz pero con poco de dificultad, no todos logran escuchar sonidos en esa frecuencia cabe resaltar que con el pasar los años las personas van perdiendo la audición dejando poco a poco de escuchar ruidos a ciertas frecuencia menores a los 16KHz.

La voz humana ocupa un espectro de unos 300 Hz a unos 3400 Hz, el espectro de la música (clásica) abarca de unos 50-60 Hz a unos 12 a 14 kHz, los niños y jóvenes son capaces de percibir frecuencias más altas que los adultos. (Vega, 2011)

Las frecuencias inferiores a 20 Hz (infrasonidos) y superiores a 20 kHz (ultrasonidos)

Por esta razón nuestro diseño se orienta a la construcción de un calentador de agua por inducción magnética a una frecuencia resonante de 300 KHz así se garantiza eliminar ruidos que pueden ser perturbadores para los usuarios mientras este encendido el calentador de agua.

11 Anexo 4



Tubos (medidas y pesos)

Tubo roscado DIN EN 10255 [sustitución de DIN 2440]

Diámetro nominal [pulgadas]	Diámetro exterior [mm]	Grosor de pared e [mm]	Peso del tubo [kg/m]	Contenido agua [l/m]	Tubo + agua [kg/m]
1/4	13,5	2,35	0,65	0,06	0,71
3/8	17,2	2,35	0,86	0,12	0,98
1/2	21,3	2,65	1,22	0,20	1,42
3/4	26,9	2,65	1,58	0,37	1,95
1	33,7	3,25	2,44	0,58	3,02
1 1/4	42,4	3,25	3,14	1,01	4,15
1 1/2	48,3	3,25	3,61	1,37	4,98
2	60,3	3,65	5,10	2,21	7,31
2 1/2	76,1	3,65	6,52	3,72	10,24
3	88,9	4,05	8,47	5,13	13,60
4	114,3	4,50	12,19	8,71	20,89
5	139,7	4,85	16,13	13,27	29,40
6	165,1	4,85	19,17	18,97	38,13