



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
COMUNICACIONES

TEMA:

“SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE AGUA POR INDUCCIÓN
ELECTROMAGNÉTICA PARA EL USO DOMÉSTICO”

Trabajo de Graduación. Modalidad: Proyecto de Investigación, presentado previo la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones.

SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Electrónica de Potencia

AUTOR: Jesús Israel Guamán Molina

TUTOR: PhD. Alberto Ríos Villacorta.

Ambato - Ecuador

Julio, 2015

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el Tema:

“SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE AGUA POR INDUCCIÓN ELECTRO-MAGNÉTICA PARA EL USO DOMÉSTICO”, del señor: Guamán Molina Jesús Israel estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, considero que el informe investigativo reúne los requisitos suficientes para que continúe con los trámites y consiguiente aprobación de conformidad con el numeral 7.2 de los Lineamientos Generales para la aplicación de Instructivos de las Modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, julio de 2015

EL TUTOR

Dr. Alberto Ríos Villacorta

AUTORÍA

El presente trabajo de investigación titulado: SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE AGUA POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA EL USO DOMÉSTICO, es absolutamente original, auténtico y personal, en tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, julio de 2015

Jesús Israel Guamán Molina

CC: 0503620585

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Trabajo de Titulación como un documento disponible para la lectura, consulta y procesos de investigación. Cedo los derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además autorizo su reproducción dentro de las regulaciones de la Universidad

Jesús Israel Guamán Molina

CC: 0503620585

APROBACIÓN COMISIÓN CALIFICADORES

La Comisión Calificadora del presente trabajo conformada por los señores docentes Ing. Julio Cuji e Ing, Marco Jurado, revisó y aprobó el Informe Final del Proyecto de Investigación titulado SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE AGUA POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA EL USO DOMÉSTICO, presentado por el señor Guamán Molina Jesús Israel de acuerdo al numeral 9.1 de los Lineamientos Generales para la aplicación de Instructivos de las Modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Vicente Morales Msc.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Julio Cuji Msc.
DOCENTE CALIFICADOR

Ing. Marco Jurado Msc.
DOCENTE CALIFICADOR

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis padres Efrain Guamán, Fabiola Molina y mis hermanos, que han confiado en mi y en mis capacidades para alcanzar las metas que me he propuesto.

.

Jesús Guamán Molina

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la vida para hacer realidad mis sueños, a mis padres Efrain Guamán y Fabiola Molina al igual que a mis hermanos Jeremias y Nataly que me han dado todo el apoyo moral para seguir adelante. A mi novia Carla Chávez la que ha estado conmigo en todo momento.

De la misma manera quiero agradecer a todos los profesores de la facultad quienes me han brindado los conocimientos que me permitirán escalar en la vida profesional. De manera muy especial al PhD. Alberto Ríos Villacorta, quien con paciencia y sabiduría me inculcaba en mí un espíritu de investigación.

Jesús Guamán Molina

ÍNDICE

APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA	iii
APROBACIÓN COMISIÓN CALIFICADORA	v
Dedicatoria	vi
Agradecimiento	vii
Introducción	xx
CAPÍTULO 1 El Problema	1
1.1 Tema de Investigación	1
1.2 Planteamiento del problema	1
1.3 Delimitación	6
1.4 Justificación	6
1.5 Objetivos	7
1.5.1 General	7
1.5.2 Específicos	8
CAPÍTULO 2 Marco Teórico	9
2.1 Antecedentes Investigativos	9
2.2 Fundamentación Teórica	20
2.2.1 Sistemas de agua caliente sanitaria	20
2.2.2 Sistemas solares térmicos de ACS	22
2.2.2.1 Descripción del sistema solar térmico	23
2.2.2.2 Situación actual de los sistemas solares térmicos	27
2.2.2.3 Instalaciones solares térmicas en el Ecuador	29
2.2.2.4 Ventajas y desventajas de los sistemas solares térmicos	30
2.2.3 Teoría del calentamiento por inducción	30
2.2.3.1 Principios físicos del calentamiento por inducción.	32

2.2.4	Modelo simplificado de inducción magnética	33
2.2.4.1	Pérdidas por histéresis	35
2.2.4.2	Descripción del efecto pelicular	36
2.2.4.3	Aplicaciones de los sistemas CPI	38
2.2.4.4	Electrodomésticos de inducción	38
2.2.5	Elementos un sistema CPI	39
2.2.5.1	Fuente de alimentación	40
2.2.5.2	Fuente de alimentación de la carga	41
2.2.5.3	Convertidor	42
2.2.5.4	Inversor	43
2.2.5.5	Clasificación de los circuitos electrónicos de calenta- miento por inducción.	43
2.3	Normativas de ACS en el Ecuador	49
2.4	Aspectos económicos de los sistemas ACS.	54
CAPÍTULO 3 Metodología		55
3.1	Modalidad de investigación	55
3.1.1	Investigación aplicada	55
3.1.2	Investigación bibliográfica	55
3.1.3	Investigación experimental	55
3.1.4	Investigación de campo	55
3.2	Recolección de la información	56
3.3	Procesamiento y análisis de datos	56
3.4	Desarrollo del proyecto	56
CAPÍTULO 4 Desarrollo de la propuesta		58
4.1	Factibilidad	58
4.1.1	Técnica	58
4.1.2	Económica	59
4.1.3	Bibliográfica	59
4.2	Criterios de diseño y dimensionado de los sistemas de CPI	59
4.3	Diseño y dimensionado del prototipo de CPI	62
4.3.1	Dimensionado de la resistencia equivalente	62
4.3.2	Dimensionado del circuito de potencia	64
4.3.2.1	Selección del filtro de entrada	65
4.3.2.2	Dimensionado del rectificador de entrada	65
4.3.2.3	Dimensionado del filtro del inversor	67
4.3.2.4	Dimensionado del circuito resonante	68

4.3.2.5	Dimensionado de los dispositivos de conmutación . . .	70
4.3.3	Diseño de la forma del inductor	71
4.3.4	Diseño del control por temperatura	74
4.4	Respuesta dinámica del circuito de inducción	75
4.4.1	Análisis de la respuesta dinámica del rectificador	76
4.4.2	Análisis de la respuesta dinámica del circuito resonante	79
4.4.2.1	<i>Inversor resonante serie puente completo.</i>	80
4.4.2.2	<i>Inversor resonante serie de medio puente completo</i>	82
4.4.3	Visualización de la curva de histéresis del material conductor	85
4.5	Construcción y comprobación del funcionamiento del prototipo	85
4.5.1	Parámetros del prototipo	85
4.5.2	Descripción de la construcción del prototipo	86
4.5.3	Comprobación del funcionamiento del prototipo	89
4.5.4	Descripción del comportamiento energético del prototipo	91
4.6	Presupuesto	93
4.7	Análisis comparativo del consumo energético de los sistemas ACS	95
4.7.1	Análisis del transitorio del sistema de inducción magnética de calentamiento de agua	99
CAPÍTULO 5 Conclusiones y Recomendaciones		102
Bibliografía		104
ANEXOS		111

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Precio de ventas del GLP a nivel mundial [8].	1
1.2	Comparación de combustibles para la cocción de alimentos [8].	4
2.1	Resultados de las pruebas de vacío y cortocircuito	19
2.2	Diferentes tipos de tecnologías para el calentamiento de agua.[Fuente el investigador basado en [23]].	21
2.3	Comparación por dispositivos de utilizados en topología de puente completo [52].	45
2.4	Comparación de dispositivos utilizados en topología ac-ac [52].	47
2.5	Tabla de temperaturas y consumos de agua en aparatos sanitarios [22].	51
2.6	Datos de temperatura media, máxima y mínima para sitios seleccionados. Datos proporcionados por el INHAMI [26].	52
2.7	Rangos de temperatura de acuerdo a las zonas climáticas, según el mapa del INHAMI[26]	53
2.8	Altura de referencia (m) y temperatura ambiente diaria media mensual (°C) para las capitales de provincia [26].	53
4.1	Resistencia equivalente de distintos materiales.	64
4.2	Resultados del diseño y dimensionado del circuito de potencia [Fuente investigador].	70
4.3	Tipos de Inductores [32].	71
4.4	Parámetros del circuito de potencia del prototipo de 250 W [Fuente investigador].	86
4.5	Presupuesto del prototipo de CPI de agua para el uso doméstico [Investigador basado en[67]].	94
4.6	Clasificación de los sistemas de calentamiento de agua en función de la potencia[Investigador basado en [16,25]]	95
4.7	Costo económico de las diferentes tecnologías [Investigador basado en [16,25,42,56]].	97

4.8	Costo y mantenimiento de los sistemas de calentamiento de agua [Investigador basado en [16,25,42,56]].	97
4.9	Tabla de consumo energético y costo de energía [Investigador basado en [8,12,13,15]].	98
4.10	Valoración de costos de implementación y energía consumida en 25 años [Investigador basado en [8,12,62,55]].	98
4.11	Valor del transitorio de entrada en los 20 μ segundos iniciales [Fuente investigador]	100

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Sistema de calentamiento de agua por combustión a gas [21].	3
1.2	a) Sistema solar térmico. b) Sistema de calentamiento por resistencia eléctrica [Investigador basado en [21]].	3
1.3	Consumo del gas por sectores en el Ecuador [Investigador basado en [11]].	5
1.4	Comparación de eficiencia de los sistemas de calentamiento [Investigador basado en [14]].	7
2.1	Interrelación de los sistemas de inducción magnética con otros sistemas [16].	10
2.2	Diagrama de bloques del sistema de calentamiento propuesto en [17].	11
2.3	Diagrama de flujo para el algoritmo de lógica difusa [16].	12
2.4	Diagrama general del sistema piloto implementado [6].	13
2.5	Caldera de calentamiento por inducción «Unver» [18].	14
2.6	Valores de potencia y armónicos del dispositivo de inducción [18]. . .	15
2.7	Dispositivo del sistema de inducción de calentamiento de herradoras [19].	17
2.8	Diagrama a Bloques del Prototipo de Inducción [19].	18
2.9	Sistemas solares ACS instalados en casas y en edificios [22].	22
2.10	Sistemas de termosifón y circulación forzada [28].	23
2.11	Esquema de un sistema de circulación forzada [28].	24
2.12	Tipo de colectores solares: tubos de vacío y planos [25].	24
2.13	Tipos de acumuladores en función del intercambiador de calor [24]. .	25
2.14	Sistemas térmicos de ASC con sistema auxiliar de gas y eléctrico [Investigador basado en [22]].	26
2.15	Potencias mundiales en sistemas solares hasta el 2012 [27].	27
2.16	Presente y futuro de las instalaciones de sistemas solares térmicos [27].	28
2.17	Principio del calentamiento por inducción [32].	30
2.18	Modelo equivalente del funcionamiento de un sistema CPI [Investigador basado en [12]].	34
2.19	Pérdidas por histéresis en materiales magnéticos [3].	35

2.20	Distribución de la corriente en función de la profundidad [35].	37
2.21	Curva de la profundidad de penetración en función de la frecuencia [45].	37
2.22	Circuito esquemático de una cocina por inducción [14].	40
2.23	Diagrama esquemático del Inversor resonante de Terminación Única [53].	44
2.24	Puente completo con rectificador Vienna en el extremo frontal [53]. . .	45
2.25	Resonador de medio puente para calentamiento por inducción [3]. . .	46
2.26	Propuesta de convertidor ac-ac [44].	47
2.27	Esquema del MOSFET's [54].	48
2.28	Esquema del IGBT's [54].	49
2.29	Mapa de temperatura media multianual serie 1965-1999 [26].	52
4.1	Diagrama de bloques del sistema CPI de agua [Investigador basado en [17]].	61
4.2	Componentes del sistema de calentamiento por inducción propuesto [Fuente investigador].	62
4.3	Esquema del circuito de entrada circuito ac/dc [Fuente investigador].	68
4.4	Circuito inversor serie resonante de puente completo [Fuente investi- gador].	69
4.5	Calculadora de bobinas de aire [65].	74
4.6	Diagrama de proceso del sistema de CPI para agua [Fuente investigador].	75
4.7	Circuito de inducción del prototipo de agua CPI para el uso doméstico [Fuente investigador].	76
4.8	Circuito rectificador de onda completa [Fuente investigador].	76
4.9	Onda de tensión de la entrada y salida del rectificador [Fuente investigador].	77
4.10	Tensión de entrada ac y salida del rectificador dc [Fuente investigador].	78
4.11	Tensión e intensidad de entrada y salida del convertidor ac-dc [Fuente investigador].	78
4.12	Configuración del parámetro de tiempo discreto [Fuente investigador].	79
4.13	Inversor de puente completo Simulink [Fuente investigador].	80
4.14	Tensión e intensidad a la entrada del inversor de puente completo [Fuente investigador].	81
4.15	Señal de conmutación de los 4 IGBT's [Fuente investigador].	81
4.16	Salida del inversor resonante serie de puente completo [Fuente investigador].	82

4.17	Inversor serie resonante RLC de medio puente [Fuente investigador]. . .	83
4.18	Señal de intensidad y tensión de la entrada del inversor de medio puente [Fuente investigador].	83
4.19	Señal de salida de tensión e intensidad del inversor de medio puente [Fuente investigador].	84
4.20	Cambio de frecuencia de la entrada sobre la salida [Fuente investigador].	84
4.21	Curva de histéresis de la carga RLC del circuito inversor de puente completo [Fuente investigador].	85
4.22	Circuito del prototipo implementado [Fuente investigador basado en [53,3, 32]].	86
4.23	Entrada y salida de tensión del rectificador [Fuente investigador]. . .	87
4.24	Salida del PWM con Arduino [Fuente investigador].	88
4.25	Cambio de frecuencia [Fuente investigador].	88
4.26	Circuito tanque con carga RLC [Fuente investigador].	89
4.27	a) Circuito de potencia b) Termostato [Fuente investigador].	89
4.28	a) Tensión de la fuente de entrada b) Tensión de entrada del rectificador c) Tensión de salida del inversor d) Tensión del circuito tanque [Fuente investigador].	90
4.29	Tensión de entrada de la red y salida del circuito tanque [Fuente investigador].	91
4.30	Diversas fases del sistema de CPI de agua para uso doméstico	91
4.31	Evolución de potencia durante el proceso de calentamiento. [Fuente investigador]	92
4.32	Transitorio en el arranque del prototipo [Fuente investigador]	99
A.1	Esquema de prototipo diseñado en software LiveWire.	112
A.2	Placa de elemento y placa impresa	112
A.3	Conexión del Arduino con la pantalla LCD y PWM.	113

RESUMEN

El avance de la electrónica de potencia ha permitido el desarrollo de los sistemas de inducción magnética. Los sistemas de inducción magnética a lo largo de la historia, se han aplicado en sistemas industriales tales como la industria de fundición, fusión, metalurgia y construcción de piezas mecánicas. El calentamiento de fluidos es una de las aplicaciones de la tecnología de inducción que más acogida tienen en la industria, ya que esta tecnología proporciona un mejor rendimiento. En los últimos años, la industria de inducción ha propuesto una innovadora línea de investigación dedicada a la línea blanca o electrodomésticos.

La presente investigación tiene como propósito el desarrollo de un prototipo de sistema de calefacción de agua por inducción magnética para el uso doméstico, el prototipo desarrollado utiliza los fenómenos de inducción magnética. Basado en los principios del efecto Joule y la ley de Maxwell se produce el calentamiento de un material metálico bajo la acción de un campo magnético variable, generando corrientes parásitas en el material. Estas corrientes se disipan en forma de calor permitiendo el calentamiento de los fluidos que contenga el mencionado material.

Actualmente, el gobierno del Ecuador apuesta decididamente por la transformación del modelo energético. En este sentido, la sustitución de sistemas de calentamiento de agua sanitaria, que consumen importantes cantidades de recursos fósiles, por innovadores dispositivos de inducción magnética es una de las propuestas más importantes dentro de la estrategia de transformación de la matriz energética y coincide con los lineamientos generales del plan del buen vivir.

El prototipo diseñado tiene un gran aporte tecnológico, económico y medio ambiental. Para la implementación del prototipo se ha realizado una ardua investigación de los diferentes circuitos de inducción que se utilizan en la actualidad para la fabricación de sistemas de inducción, entre estos sistemas destacan las cocinas de inducción. El estudio realizado permite la selección del circuito más adecuado para la implementación del dispositivo y mejor el aprovechamiento de energía.

A futuro se espera que el uso de nuevos e innovadores dispositivos reduzca el consumo de recursos fósiles e impulse el uso de recursos renovables. El uso de recursos renovables para la generación de la electricidad y las energías limpias permitirán contar con un elevado ahorro económico al país como se puede concluir del análisis del costo económico realizado en el presente trabajo. El aporte económico que genera este ahorro permitirá que el país disponga de altos ingresos económicos los cuales pueden ser redirigidos a los sectores más vulnerables del país.

ABSTRACT

The advancement of power electronics has permitted advancement of power electronics has enabled the development of systems for magnetic induction. Magnetic induction systems throughout history, have been applied in industrial systems such as foundry, melting, metallurgy and construction of mechanical parts. The heating fluid is one of the applications of induction technology have more acceptance in the industry, since this technology provides better performance. In recent years, the industry has proposed a Induction innovative line of research dedicated to the appliances or appliances.

This research aims to develop a prototype system for water heating by magnetic induction for domestic use, the prototype developed using the phenomena of magnetic induction. Based on the principles of the Joule effect and the laws of Maxwell heating a metallic material it occurs under the action of a variable magnetic field, generating eddy currents in the material. These currents are dissipated as heat allowing the heating fluid containing said material.

Currently, the government of Ecuador is firmly committed to transforming the energy model. In this sense, the replacement of heating systems hot water, which consume large amounts of fossil fuels, innovative devices for magnetic induction is one of the most important proposals in the strategy of transformation of the energy mix and match guidelines General plan of good living.

The prototype design is a technological, economic and environmental contribution. To implement the prototype was performed painstaking research of various induction loops are used today for the manufacture of induction systems, between these systems include induction cookers. The study allows the selection of the correct circuit for implementing the device and better use of energy.

A future is expected to use innovative new devices reduce the consumption of fossil resources and boost the use of renewable resources. The use of renewable resources for the generation of electricity and clean energy will allow to have a high economic saving the country as can be concluded from the analysis of the economic cost made in the present work. The economic contribution generated by these savings will allow the country to have higher incomes which can be directed to the most vulnerable sectors of país. itido developing magnetic induction systems. Magnetic induction systems throughout history, have been applied in industrial systems such as foundry, melting, metallurgy and construction of mechanical parts. The heating fluid is one of the applications of induction technology have more acceptance in the industry, since this technology provides better performance. In recent years, the industry has proposed a Induction innovative line of research dedicated to the

appliances or appliances.

This research aims to develop a prototype system for water heating by magnetic induction for domestic use, the prototype developed using the phenomena of magnetic induction. Based on the principles of the Joule effect and the laws of Maxwell heating a metallic material it occurs under the action of a variable magnetic field, generating eddy currents in the material. These currents are dissipated as heat allowing the heating fluid containing said material.

Currently, the government of Ecuador is firmly committed to transforming the energy model. In this sense, the replacement of heating systems hot water, which consume large amounts of fossil fuels, innovative devices for magnetic induction is one of the most important proposals in the strategy of transformation of the energy mix and match guidelines General plan of good living.

The prototype design is a technological, economic and environmental contribution. To implement the prototype was performed painstaking research of various induction loops are used today for the manufacture of induction systems, between these systems include induction cookers. The study allows the selection of the correct circuit for implementing the device and better use of energy.

A future is expected to use innovative new devices reduce the consumption of fossil resources and boost the use of renewable resources. The use of renewable resources for the generation of electricity and clean energy will allow to have a high economic saving the country as can be concluded from the analysis of the economic cost made in the present work. The economic contribution generated by these savings will allow the country to have higher incomes which can be directed to the most vulnerable sectors.

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS

Inducción electromagnética: Es la producción de una fuerza electromotriz a través de un conductor cuando se expone a un campo magnético variable.

Corrientes parásitas: Son corrientes que se generan en un material conductor cuando se le aplica un campo magnético variable.

Efecto Joule: Al circular una corriente por un conductor, parte de la energía cinética de los electrones se convierte en energía calorífica. Este efecto es conocido como efecto Joule

Frecuencia de resonancia: Es la frecuencia a la cual un sistema alcanza el grado máximo de oscilación.

Frecuencia de corte: Es la frecuencia límite donde la intensidad de corriente es 0,7 veces más que la intensidad de corriente de la frecuencia de resonancia

Circuito resonante: Es un circuito compuesto por un inductor y un condensador donde $X_C=X_L$.

Inversor: Es un convertidor de dc a ac que permite subir la frecuencia de la señal y la magnitud de la tensión

Arduino: Es una plataforma electrónica de software y hardware, basada en una placa con uno o varios micro controladores que poseen salidas y entradas, analógicas y digitales

Oscilador: Un oscilador es un dispositivo capaz de convertir la energía de corriente continua en corriente alterna a una determinada frecuencia.

Mosfet's: Dispositivo de conmutación de señal utilizado en sistemas de electrónica de potencia

Reactancia capacitiva: Es la oposición a la corriente propia del condensador y se mide en ohmios

Reactancia inductiva: Es la oposición a la corriente propia del inductor y se mide en ohmios

Termostato: Es un sistema el cual permite medir la temperatura de un ambiente o dispositivo.

INEC Instituto Nacional de Estadísticas y Censos

NEC Norma Ecuatoriana de Construcción

HE Documento Básico de Ahorro de Energía

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de calentamiento por inducción magnética se basan en el fenómeno de inducción electromagnética y el efecto Joule.

Uno de los aportes más importantes de Maxwell fue trabajar sobre los teoremas de Michael Faraday quien descubrió la inducción magnética en 1830. Sus diferentes teoremas fueron la base teórica para el desarrollo de transformadores y otros diseños magnéticos. Los diferentes teoremas planteados por Faraday fueron:

- Una corriente eléctrica puede producir un campo magnético variable de igual forma que un campo magnético variable puede generar una corriente eléctrica.
- Una corriente variable en un circuito puede provocar la aparición de otra corriente en un circuito adyacente [1].

Las leyes del electromagnetismo de Maxwell así como la ley de Faraday y de Ampere son variantes en el tiempo, lo que permite generar campos magnéticos o eléctricos.

El efecto Joule demuestra el fenómeno de generación de calor cuando una corriente atraviesa una resistencia. Así mismo, explica el calentamiento debido a la generación de corrientes parásitas que se crean en el interior de un material conductor cuando este se introduce en un campo magnético. El efecto Joule es muy utilizado para la generación de calor.

El calentamiento por inducción es un fenómeno que permite la generación de calor, gracias a la aparición de corrientes parásitas, inducidas por un campo magnético variable en un material conductor. [2].

Inicialmente, se observó el fenómeno de calentamiento como un efecto indeseable en equipos tales como motores, generadores y transformadores. Mediante el estudio de este fenómeno y sus propiedades, se verificó que las características peculiares presentadas en la generación de calor utilizando este principio, convirtió al calentamiento por inducción en un importante método, esencial en muchos procesos productivos de la industria. El desarrollo en las últimas décadas de la electrónica de potencia y de los semiconductores ha permitido un importante avance en los

sistemas de calentamiento por inducción. El calentamiento por inducción presenta una tecnología altamente competitiva frente a otros métodos convencionales de calentamiento. Una de las principales ventajas de los sistemas de inducción es un mejor rendimiento en comparación con los sistemas convencionales. El uso de energía limpia y renovable en el suministro eléctrico de los sistemas de calentamiento por inducción permitiría minimizar el impacto local sobre el calentamiento global.

El presente proyecto se compone de cinco capítulos, que se describen a continuación:

En el primer capítulo se describen los problemas económicos y ambientales que representa el uso de combustible fósiles, se incluyen los objetivos que se desean cumplir al finalizar el proyecto y se establece la duración y el lugar para el desarrollo del proyecto.

En el segundo capítulo se resume los conceptos básicos necesarios para el desarrollo del proyecto. Abordando varios temas como: Actuales sistemas de calentamiento de agua sanitaria, fundamentos teóricos de calentamiento mediante inducción electromagnética y las principales normativas para la construcción de sistemas de calentamiento de agua.

En el tercer capítulo se hace referencia a la modalidad de investigación, tipos de investigación realizadas para el desarrollo del proyecto, como fue diseñado y dimensionado el sistema de calefacción de agua por inducción electromagnética. También se enumeran las actividades realizadas para el desarrollo del proyecto.

En el cuarto capítulo se describe el desarrollo de la propuesta del sistema de calefacción de agua por inducción magnética para el uso doméstico se realiza las simulaciones y pruebas del funcionamiento del prototipo. El mencionado sistema consta con una fuente de entrada monofásica, un circuito rectificador, un inversor y una carga. El control del modulador PWM se realiza a través de una tarjeta arduino la cual controla un termostato y un circuito de conmutación para el encendido y apagado del sistema mediante la temperatura. Por ultimo se muestra un estudio económico de los diferentes sistemas de calentamiento de agua sanitaria en un horizonte de 20 años.

Por último en el quinto capítulo se presenta las conclusiones y recomendaciones del proyecto realizado.

CAPÍTULO 1

El Problema

1.1. Tema de Investigación

Sistema de agua caliente sanitaria por inducción electromagnética para uso doméstico

1.2. Planteamiento del problema

Actualmente, el calentamiento de fluidos se emplea tanto para el calentamiento de agua con fines domésticos, así como en fundiciones industriales de metales y otras aplicaciones prácticas. Para el calentamiento de agua se utilizan principalmente dos métodos: por resistencia eléctrica y por combustión de gas [3]. Los sistemas de calentamiento por combustión de GLP, dependen de la fluctuación de los precios del mencionado combustible existentes en cada país, como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Precio de ventas del GLP a nivel mundial [8].

Volumen de ventas de GLP (miles de toneladas)	2010	2009
España	1.503	1.489
Latinoamérica	1.428	1.316
Argentina	332	303
Bolivia	10	10
Chile	199	200
Perú	497	411
Ecuador	368	372
Otros (1)	22	20
Resto del mundo	177	187
Total	3.108	2.993
Volumen de ventas de GLP		
Ervasado	1.761	1.770
A granel, canalizado y otros (2)	1.347	1.222
Total	3.108	2.993

En caso de países importadores, los precios del combustible están estrechamente relacionados con las variaciones internacionales de cotización del crudo en el mercado. En muchos gobiernos de Latinoamérica se implementan políticas internas de subvención del precio de combustible importado para satisfacer las demandas de los estratos sociales más desfavorecidos de la sociedad. El Estado asume las diferencias entre los precios subvencionados y los precios reales. Por otro lado, algunos países exportadores como Ecuador disponen de sistemas subvencionados de precios del combustible fósil. En este caso, el Estado asume la diferencia entre precios reales y precios subvencionados, reduciendo su ingreso neto por exportaciones del petróleo crudo.

En ambos casos, los Estados invierten grandes recursos económicos en subvencionar un recurso escaso y altamente contaminante, reduciendo su capacidad de inversión en otros sectores de la economía nacional.

El calentamiento eléctrico por resistencia es relativamente más limpio y eficiente, dependiendo de la estructura de generación eléctrica propia de cada país. Además, el costo económico dependerá del precio de la electricidad generada por el sistema eléctrico de cada Estado [4].

En muchos países de Latinoamérica, los sistemas de calentamiento para cocción y agua caliente sanitaria emplean combustibles fósiles, principalmente el Gas Licuado de Petróleo, GLP. En el caso de Ecuador, el GLP es importado en un elevado porcentaje, aproximadamente el 80 % del GLP es importado de países como México, Venezuela, Panamá y Estados Unidos. Se encadena al país a una absurda y peligrosa dependencia de un recurso fósil caro y altamente contaminante. Ante esta situación, es impostergable iniciar un proceso de innovación tecnológica de los sistemas de calentamiento de agua doméstica y su reemplazo por innovadores sistemas menos dependientes de los derivados de petróleo y menos agresivos con el medio ambiente.

La Organización Latinoamericana de Energía, OLADE, publicó en el año 2013 el informe sobre “Políticas de Subsidio a los Combustibles en América Latina”. En ese documento, se indica que el precio del GLP en Latinoamérica tiene un costo promedio residencial o doméstico de aproximadamente 18,61 dólares por bombona de 15 kilogramos [5].

En Estados Unidos, Europa y Japón, los sistemas de cocción emplean principalmente energía eléctrica (cocinas de vitro cerámica o inducción) y también sistemas de combustión a gas natural, como se observa en la figura 1.1.



Figura 1.1: Sistema de calentamiento de agua por combustión a gas [21].

En tanto que los sistemas de calentamiento de agua para calefacción y agua caliente sanitaria, ACS, emplean calderas de gas natural. Debido a los elevados precios del gas natural y a la alta dependencia de Europa y Japón este combustible, en dichos países se incentivan, el uso de nuevos sistemas de calentamiento de fluidos, a través de políticas nacionales. Entre los sistemas de calentamiento destacan los sistemas solares térmicos y sistemas eléctricos, como observa en la figura 1.2a y figura 1.2b, respectivamente. Los sistemas de inducción para aplicaciones domésticas también destacan entre los sistemas de calentamiento [6].

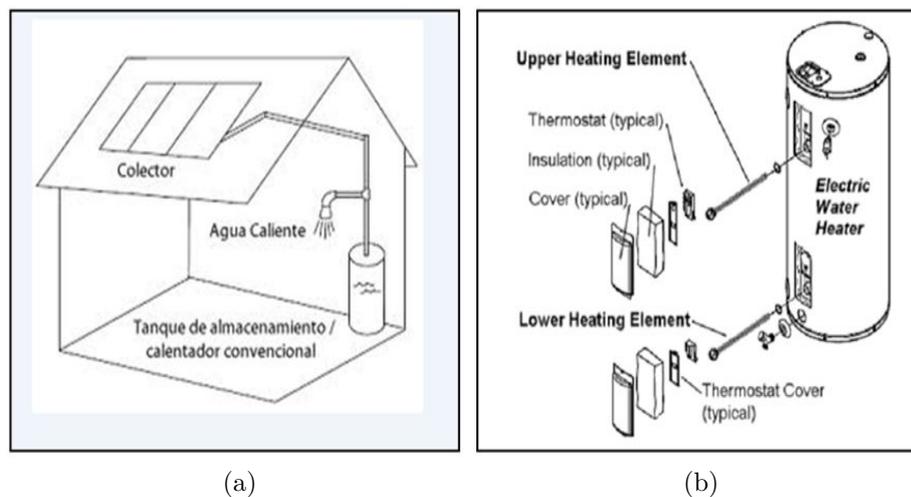


Figura 1.2: a) Sistema solar térmico. b) Sistema de calentamiento por resistencia eléctrica [Investigador basado en [21]].

En Ecuador, el Gobierno subvenciona el precio del GLP, empleado de forma masificada en aplicaciones domésticas como cocción y agua caliente sanitaria. Las familias que utilizan GLP para la cocción de alimentos en Latinoamérica bordean el 86 % del total. Por otro lado, el porcentaje de los pobladores que usan otros tipos de energía es poco significativo, como se muestra en la Tabla 1.2 [5].

Tabla 1.2: Comparación de combustibles para la cocción de alimentos [8].

Energético	GLP	Energía Eléctrica	Kerosene	Leña	Gas Natural	Carbón	Otros
GLP	108	0	1	69	-	3	39
Energía Eléctrica	0	0	-	0	-	-	0
Kerosene	1	-	2	0	-	-	1
Leña	69	0	0	201	-	1	113
Gas Natural	-	-	-	-	-	-	-
Carbón	3	-	-	1	-	5	1
Otros	39	0	1	113	-	1	146

Existe una gran preocupación por parte del Gobierno en iniciar un proceso de transformación del modelo energético actual. La implementación de innovadoras políticas de sustitución del consumo de GLP doméstico por energía eléctrica permite un significativo ahorro de energía. La reducción de consumo de GLP evitará la importación de millones de barriles de derivados de petróleo y el ahorro económico de la reducción de los subsidios al GLP permitirá abordar importantes proyectos en infraestructuras – salud, educación, vivienda, vialidad y seguridad –. Cada dólar de GLP subsidiado implica decenas de dólares que se dejan de invertir en el proceso de transformación de la matriz productiva del país.

El proceso de sustitución de los sistemas de calentamiento por combustión, GLP, exige el empleo de innovaciones tecnológicas tanto en los sistemas de cocción como en los calefones domésticos en futuro no muy lejano. El Ecuador es uno de los países de América del Sur que más subsidia los combustibles fósiles y en un contexto de crecientes precios internacionales del petróleo y sus derivados, el porcentaje de los subsidios a los combustibles se ha incrementado de manera dramática en los últimos años [7, 8]. En el Ecuador el 88 % del consumo de GLP es suministrado por productos importados. Según PetroEcuador, en el año 2013, el Gobierno ecuatoriano subsidió el consumo de GLP por un monto de 700 millones de dólares . El consumo de GLP es muy elevado en el sector residencial. Actualmente el 92 % del GLP es consumido por el sector residencial, por tanto, prácticamente en 9 de cada 10 hogares del país se cocina con GLP. El 8 % restante se divide: 1 % en transporte, 2 % en agro y pesca, y un 5 % en la industria [9].

En la figura 3, se observa el porcentaje de participación de GLP en diferentes sectores de la economía nacional.

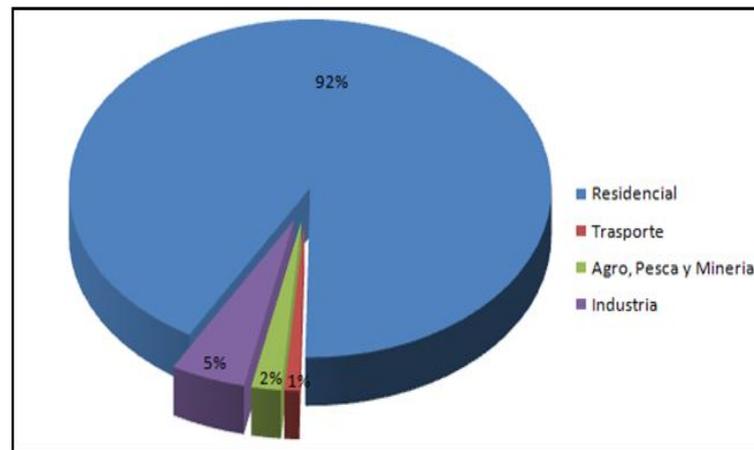


Figura 1.3: Consumó del gas por sectores en el Ecuador [Investigador basado en [11]].

El GLP es un producto derivado del petróleo, una energía no renovable que genera una alta dependencia externa y que a largo plazo será escasa, provocando un sustancial incremento en el precio del combustible fósil. Una política energética sostenible e inteligente exige la necesidad de migrar de un sistema de calentamiento por GLP a un sistema de calentamiento de fluidos por inducción magnética. En el Ecuador, en los próximos años se conectará al sistema eléctrico un gran volumen de energía eléctrica de origen renovable procedente de varias centrales hidroeléctricas en construcción. Por tanto, los sistemas de calentamiento de agua por inducción podría funcionar en base a electricidad proveniente de energía renovable y limpia. El ahorro económico debido a la sustitución de sistemas de calentamiento basados en GLP por modernos sistemas de inducción magnética permitirá al país disponer de importantes recursos económicos para abordar la construcción de modernas infraestructuras de transporte, educación, salud y vivienda, tan necesarias para la gran mayoría del pueblo ecuatoriano.

El actual gobierno del Ecuador tiene como uno de sus ejes principales de desarrollo la transformación de la matriz energética. En el Plan del Buen Vivir, en el numeral 7.7, dentro de las políticas y lineamientos estratégicos, asociados a la promoción de la eficiencia y una mayor participación de energías renovables sostenibles como medida de prevención de la contaminación ambiental, se establecen las siguientes acciones:

a. Implementar tecnologías, infraestructuras y esquemas tarifarios, para promover el ahorro y la eficiencia energética en los diferentes sectores de la economía.

b. Promover investigaciones para el uso y la generación de energías alternativas renovables, bajo parámetros de sustentabilidad en su aprovechamiento.

La presente propuesta de investigación se ajusta a las políticas y lineamientos estratégicos especificados en el Plan del Buen Vivir 2013-2017 [10].

1.3. Delimitación

Delimitación de contenidos:

- **Área Académica:** Física y Electrónica.
- **Línea de investigación:** Sistemas Electrónicos.
- **Sublínea de investigación:** Electrónica de potencia.

Delimitación espacial:

La investigación se llevó a cabo en la ciudad de Ambato.

Delimitación temporal:

La duración de la investigación se llevo a cabo en un tiempo de 12 meses a partir de la aprobación del proyecto por parte del Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería Sistemas Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato.

1.4. Justificación

El principal motivo para el desarrollo del proyecto, es la creciente demanda del GLP y los altos costos de la energía eléctrica. Los factores descritos hacen necesario la búsqueda de nuevas tecnologías más eficientes y económicas para el uso doméstico como cocinas, calefones, etc. Por lo que se propone la implementación de un método de calentamiento muy utilizado a nivel industrial; el calentamiento por inducción y adaptarlo para uso doméstico. Uno de los principales puntos para realizar la investigación es beneficiar a toda la población que hacen uso de calefacción de agua a través de GLP y resistencia eléctrica, ya que la tecnología de calentamiento por inducción electromagnética, CPI, brinda una mayor eficiencia y un menor costo de mantenimiento, siendo de mucha utilidad para todos los pobladores del Ecuador que se ven en la necesidad de sustituir su antiguo sistema de calefacción por uno moderno, económico y de alta eficiencia energética. La matriz energética del país experimenta un gran cambio y es necesario innovar con tecnologías que coadyuven el cambio del modelo energético actual.

Los modernos sistemas de inducción generan calor aprovechable, continuo, rápido y no contribuyen al calentamiento global, ya que no producen gases de efecto invernadero, en países con sistemas eléctricos con alto porcentaje de sistemas renovables de generación eléctrica. Los sistemas de CPI, son uno de los sistemas más utilizados en países Europeos y de Medio Oriente [11]. Además, son dispositivos de elevado rendimiento a diferencia de los métodos de calentamiento tradicional.

Los sistemas basados en GLP y resistencias eléctricas presentan un rendimiento 45% y 65%, respectivamente, a diferencia los innovadores sistemas de CPI que alcanzan un 90% de eficiencia. Además, los sistemas convencionales basados en resistencias eléctricas y vitro cerámicas presentan tiempos de calentamiento significativamente elevados en comparación con los innovadores sistemas de CPI. Para una potencia dada, el tiempo de calentamiento para los sistemas de resistencias eléctricas es de 587 segundos, vitro cerámicas igual a 537 segundos y GLP 480 segundos. Para la misma potencia dada, los sistemas de CPI no superan 278 segundos [3, 11]. En la figura 1.4 se observa la eficiencia de distintos sistemas de calentamiento de agua.

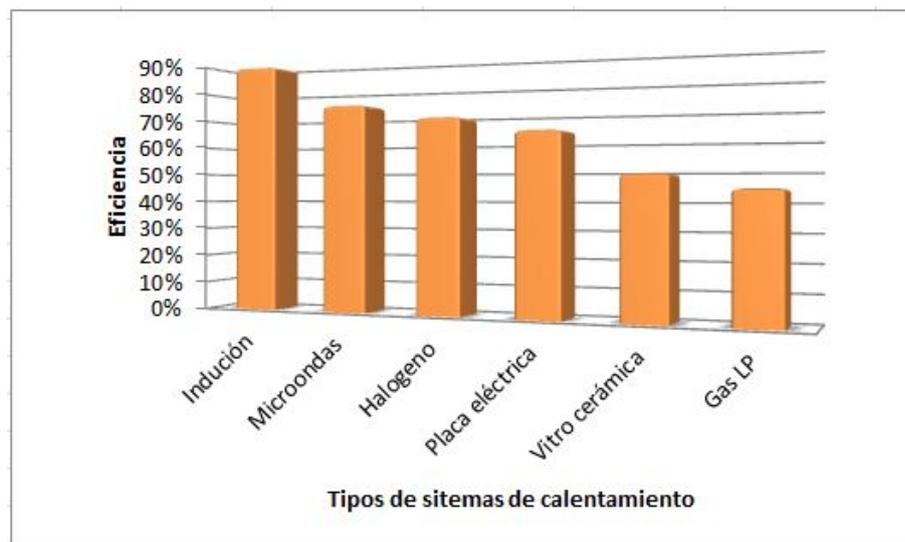


Figura 1.4: Comparación de eficiencia de los sistemas de calentamiento [Investigador basado en [14].

1.5. Objetivos

1.5.1. General

- Diseñar e implementar un prototipo de un sistema de Agua Caliente Sanitaria por inducción magnética para uso doméstico.

1.5.2. Específicos

- Analizar las diferentes formas para la generación de ondas electromagnéticas.
- Realizar un estudio acerca del uso de inducción electromagnética enfocado a sistemas de calefacción de agua.
- Implementar el prototipo del sistema de calefacción de agua por inducción electromagnética para uso doméstico.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

2.1. Antecedentes Investigativos

Los sistemas de inducción magnética, hoy en día, tienen una gran aplicación en el ámbito doméstico. En la última década, los sistemas de inducción para aplicaciones domésticas han evolucionado gracias a importantes avances científicos. Actualmente, se dispone de sistemas comerciales de cocción de alimentos, calefacción de ambientes y de calentamiento de agua, basados en el fenómeno de inducción magnética.

El Departamento de Energía de los Estados Unidos de América estimó, en diversos estudios, las eficiencias de las cocinas domésticas [12]. Una cocina de GLP presenta una eficiencia del 40% frente a un 74% y 84% de las cocinas eléctricas y de inducción, respectivamente. Así, el consumo mensual de una cocina de inducción de 100 kWh es comparable al consumo de un cilindro de 15 kg de GLP, equivalente a 209 kWh/mes. Los sistemas de inducción hoy en día tienen una eficiencia aproximada del 95% con respecto a los sistemas tradicionales.

Una de las principales ventajas de los sistemas de inducción es la alta eficiencia energética que estos presentan. Por ejemplo, calentar 1 litro de agua de 20°C a 95°C implica un tiempo de 4 minutos y 46 segundos y un consumo energético de 225 Wh para un sistema de inducción. En tanto que para un calentador eléctrico y un calentador a gas son necesarios 9 minutos con 50 segundos y 8 minutos con 18 segundos, respectivamente. Calentar el agua con electricidad o con GLP exige no sólo un tiempo elevado de calentamiento sino también un mayor consumo energético. Así, para calentar 1 litro de agua, en las condiciones anteriormente indicadas, representa un consumo energético de 320 Wh para el calentador eléctrico y 390 Wh para el calentador de gas. Se deduce, por tanto, que los sistemas de inducción para calentamiento de agua son más rápidos, más eficientes y, por tanto, reducen significativamente el consumo de energía eléctrica [12].

Otro de los beneficios de los sistemas de inducción es la reducción de las emisiones de CO_2 al medioambiente, reduciendo el nocivo impacto sobre el calentamiento global. Una de las principales propuestas en investigaciones a nivel mundial, en cuanto a calentadores de agua, indica que se deberían comercializar más calentadores de agua que no empleen GLP y ahorren energía eléctrica, evitando los subsidios en el consumo de GLP y electricidad [13].

La implementación de nuevos sistemas de calentamiento de agua por inducción magnética prometen no solo solucionar problemas energéticos y económicos sino también influir en un desarrollo más sostenible, como se observa en la figura 2.1.

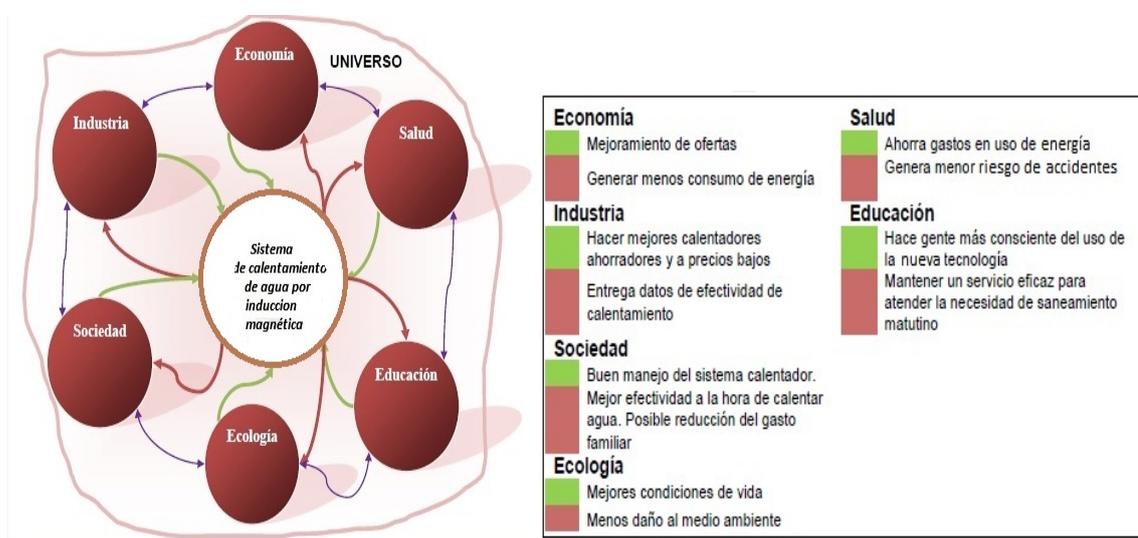


Figura 2.1: Interrelación de los sistemas de inducción magnética con otros sistemas [16].

El presente proyecto de investigación se justifica por el interés existente en el desarrollo de dispositivos domésticos de inducción magnética, reflejado en proyectos de investigación realizados en varios países del mundo, aplicables tanto a dispositivos industriales como domésticos.

La implementación de sistemas de calentamiento de agua por inducción no ha alcanzado un importante nivel de penetración comercial en aplicaciones domésticas. No obstante, gracias a las innovaciones tecnológicas de los sistemas de calentamiento de fluidos, empleados a nivel industrial, y su aplicación en sistemas domésticos de inducción - planchas, cocinas, calefactores, etc. - empiezan a ser comercializados en algunos países industrializados en los últimos años. En los siguientes párrafos, se presenta la evolución tecnológica de diferentes proyectos de investigación, relacionados con los sistemas de inducción magnética para calentamiento de agua caliente en usos domésticos.

Uno de los primeros artículos que presentó un esquema de calentamiento por inducción magnética para calentamiento de agua fue realizado por la Universidad Tecnológica de Bellville en Sudáfrica [14], en el año 2008. El diseño de un calentador doméstico por inducción propuesto incluyó un sistema de control inteligente basado en un algoritmo de lógica difusa. El algoritmo de lógica difusa modifica el ancho de pulso del modulador PWM y realiza el control de la temperatura del agua. El diagrama de bloques del sistema de calentamiento de agua por inducción propuesto consta de tres partes principales: la fuente de alimentación, un circuito de potencia - rectificador, inversor, circuito tanque, material inducido e intercambiador de calor - y un circuito de control - sensores de temperatura y un microprocesador, que incluye el algoritmo de lógica difusa -, como se visualiza en la figura 2.2.

El sistema de calentamiento de agua propuesto podría reemplazar a los sistemas de calefacción convencionales que utilizan elementos eléctricos resistivos.

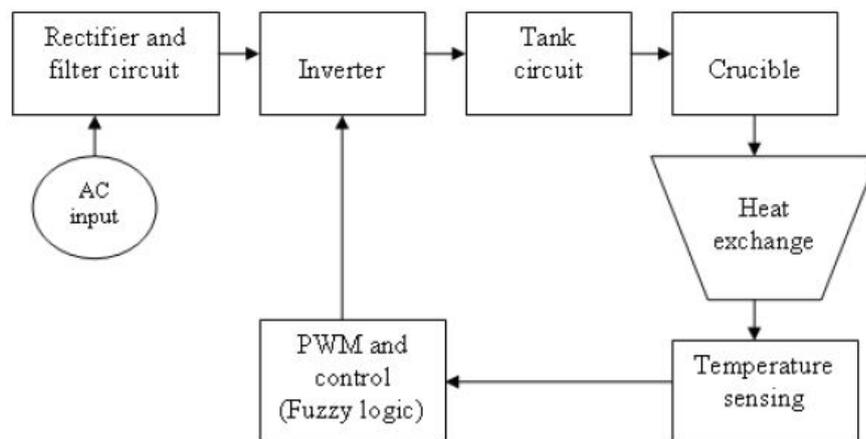


Figura 2.2: Diagrama de bloques del sistema de calentamiento propuesto en [17].

El sistema de control inteligente se basa en un microcontrolador 18F452 que permite implementar un algoritmo de lógica difusa de control y modificar el ancho de pulso del circuito inversor en función de la información obtenida desde sensores de temperatura. Los sensores gracias a los amplificadores permiten disponer de una lectura con un error porcentual mínimo. El algoritmo de control difuso garantiza una alta eficiencia del proceso de calentamiento en la frecuencia de resonancia, comparando el desfase entre tensión e intensidad. La diferencia detectada entre esas dos magnitudes es el error que se introduce en el microprocesador para controlar el ancho de pulso del modulador PWM y mantener la eficiencia del sistema en la frecuencia de operación. El diagrama de flujo que permite mantener un elevado nivel de eficiencia del sistema de calentamiento se representa en la figura 2.3.

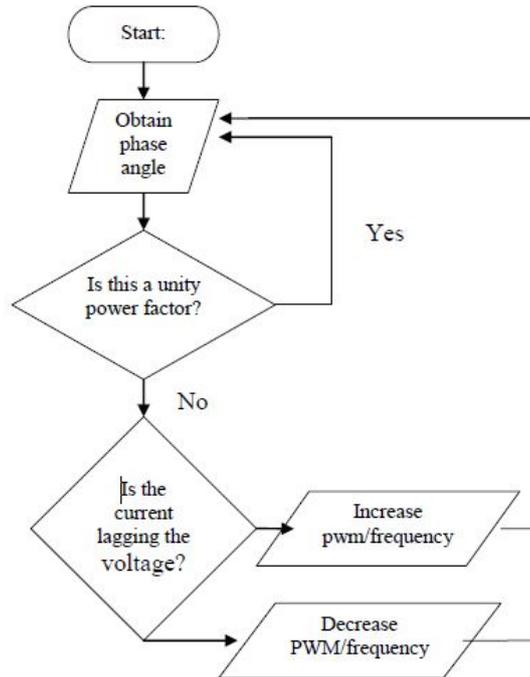


Figura 2.3: Diagrama de flujo para el algoritmo de lógica difusa [16].

En el trabajo descrito [14], se realizó un análisis comparativo de dos diferentes sistemas de calentamiento. El análisis comparativo permitió evaluar el comportamiento entre un sistema convencional resistivo, controlado por un termostato, y un sistema de calentamiento por inducción, controlado por algoritmo de lógica difusa, durante un periodo de 24 horas. En el periodo indicado, se monitorizó la potencia consumida y la temperatura, permitiendo observar que el sistema de calentamiento de agua por inducción es energéticamente más eficiente que el sistema resistivo. Las pruebas iniciales del sistema de calentamiento por inducción magnética permitieron comprobar que el calentamiento del hierro se realizó a una frecuencia baja de 110 Hz correspondiente una temperatura medida de calentamiento igual a 210°C.

Uno de los principales problemas que se presentaron en el proyecto fue que los diseños existentes no atienden a un calentamiento uniforme, es necesario realizar nuevas medidas de diseño y numerosas pruebas para cumplir los objetivos planteados.

En [3], en el año 2009, la Universidad de Chile en colaboración con la Universidad Técnica Federico Santa María de Chile construyó un sistema piloto de calentamiento de fluidos por inducción magnética de 15 kW, en la empresa Ingeniería y Desarrollo Tecnológico, IDT S.A.

La implementación de un sistema piloto para el calentamiento de fluidos por inducción magnética permitió el desarrollo de un modelo matemático y la evaluación de su comportamiento con ayuda de simulaciones. El esquema general del sistema de calentamiento de fluidos propuesto incluía los siguientes componentes: fuente de alimentación, circuito rectificador, circuito inversor, material conductivo y un sistema de control, como se observa en la figura 2.4.

- El circuito de alimentación consistía de una fuente de 380 voltios a una frecuencia 50Hz.
- Las altas tensiones exigidas implican que los dispositivos de conmutación del circuito inversor sean transistores biestables IGBT's. El uso de IGBT's en el inversor permite obtener una fuente de alta frecuencia con una tensión de 250 V y una intensidad de 250 A.
- El control de la temperatura se realizó a través de un sistema de comunicación serial con ayuda de un microcontrolador PIC ELO-PL15. El microcontrolador realiza el control de la frecuencia de resonancia desde un ordenador gracias a una interfaz amigable.

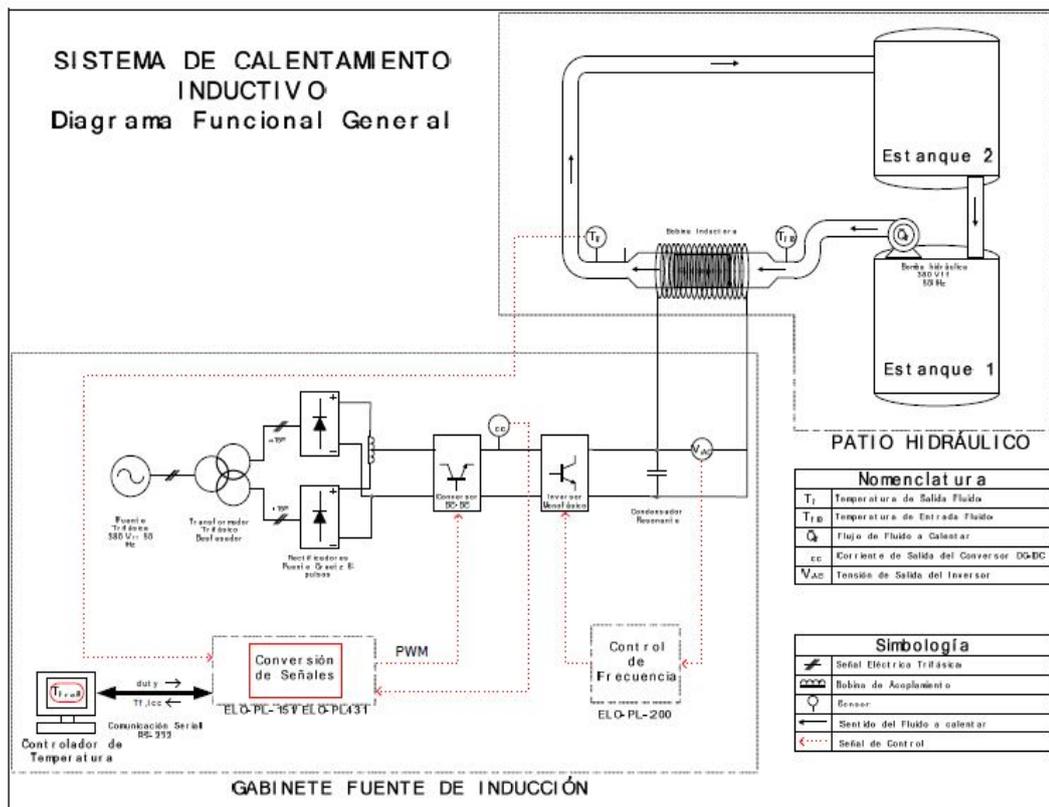


Figura 2.4: Diagrama general del sistema piloto implementado [6].

El sistema piloto permitió la implementación de cinco estrategias de control de temperatura en función de la frecuencia de resonancia:

- Control Adaptable Directo.
- Control Adaptable indirecto con enfoque Dinámico.
- Control Adaptable Indirecto con enfoque Algebraico.
- Control Adaptable Combinado.
- Control clásico Proporcional-Integral (PI).

La puesta en marcha del sistema piloto real de calentamiento de fluidos demostró que es posible la implementación de diferentes estrategias de control adaptativo. Los resultados obtenidos permitieron corroborar de forma experimental y mediante simulaciones el comportamiento del sistema piloto de calentamiento de fluidos por inducción magnética.

En el año 2012, en la Universidad Kirikkale, Turquía, se presentó un análisis de la factibilidad técnica del reemplazo de elementos resistivos en calderas de sistemas de agua caliente por dispositivos de inducción magnética [15]. La incapacidad de las resistencias a operar en intervalos cortos de tiempo y el elevado consumo de energía durante el proceso de calentamiento estimulan la necesidad de emplear dispositivos más eficientes. En este estudio, se examinó los principios de inducción y componentes de un sistema de calentamiento de agua. Asimismo, se diseñó e implementó una caldera de calentamiento por inducción con la denominación "Unver", presentado en la figura 2.5.

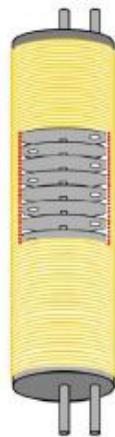
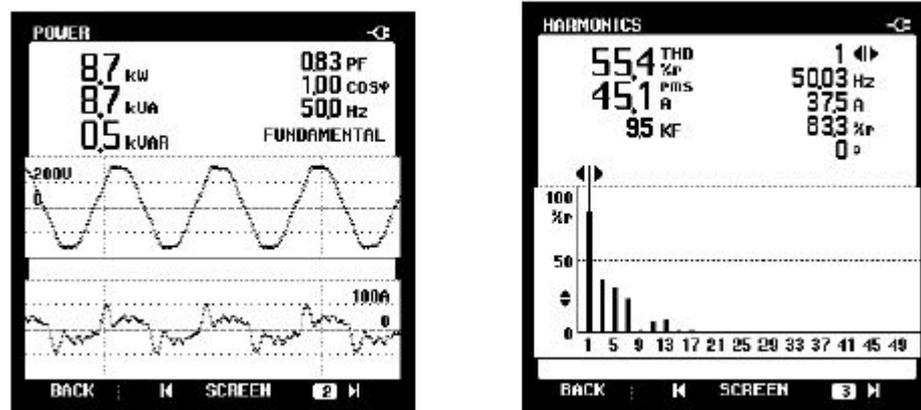


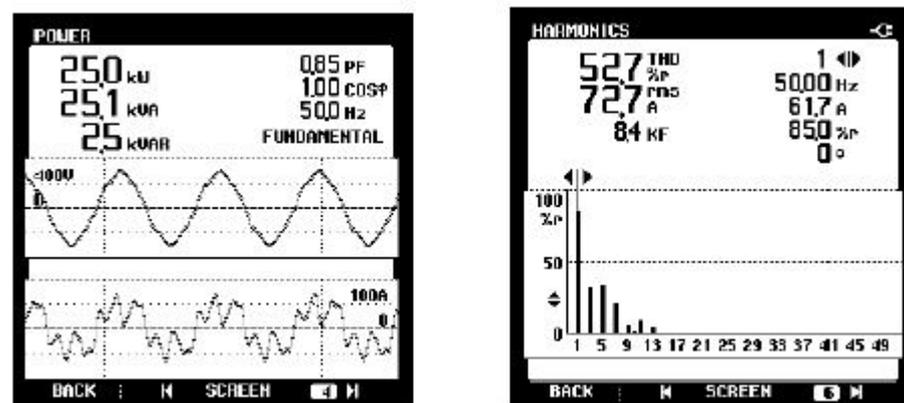
Figura 2.5: Caldera de calentamiento por inducción «Unver» [18].

El cuerpo exterior del calentador «Unver» es de acero con un diámetro de 0,160 mm. En la parte interior, a lo largo de la caldera se insertan 32 piezas de una aleación de cromo y níquel, CrNi, en forma de discos perforados. El material conductivo está formado por una tubería de 0,21 mm que se encuentra dentro de la bobina de inducción y que atraviesa la caldera. El agua circula por la tubería anteriormente descrita, capturando el calor de los discos perforados. La estructura de la caldera se diseñó especialmente para aprovechar el máximo calor inducido en el casco de acero y en los discos perforados, distribuidos a lo largo de la tubería.

La comprobación del funcionamiento de la caldera se realizó mediante la evaluación individual del dispositivo a dos diferentes niveles de tensión: 250 y 350V. En la figura 2.6, se presentan los valores de potencia y armónicos para los diferentes niveles de tensión evaluados.



(a) Valores de potencia y armónico a un nivel de tensión de 250V.



(b) Valores de potencia y armónico a un nivel de tensión de 350V.

Figura 2.6: Valores de potencia y armónicos del dispositivo de inducción [18].

Los niveles de armónicos inducidos en los flujos de corriente se reducen significativamente si los devanados de las bobinas se fijan firmemente al cuerpo de la caldera. El calor producido en el conductor de cobre hace posible la transferencia de calor del dispositivo de inducción al agua. El sistema de inducción puede aumentar su eficiencia incluyendo un aislamiento más robusto.

En la República Checa, en el año 2013, en la Universidad Tecnológica de Brno se presentó un dispositivo de calentamiento de pequeños elementos de hierro por inducción de 2,5 kW. En [16], se presenta una metodología de los diferentes componentes de dispositivo de inducción. En particular se analiza los siguiente aspectos.

- **Corrección del factor de potencia con métodos activos y pasivos de corrección:** El uso de un circuito resonante permite modificar la potencia reactiva mediante el uso del control de las magnitudes del inversor.
- **Selección y análisis de la topología del empleo de un sistema resonante LLC en serie y paralelo:** En una conexión en serie la tensión de la bobina de inducción es baja y la intensidad es elevado, exigiendo un control de la alimentación de la intensidad. En una conexión en paralelo, la tensión de la bobina inducida es elevada y la intensidad pequeña, exigiendo una elevado nivel de aislamiento del condensador.
- **Diseño del circuito tanque:** Propone la utilización de hilos de Litz que atenúan los problemas presentados por el efecto piel y proporcionando un mejor aislamiento. Se presenta el cálculo del diseño de los parámetros del circuito tanque y se concluye que el condensador resonante debe ser capaz de trabajar por largos periodos de tiempo a tensiones e intensidades altas con altas frecuencias.
- **Circuito de control:** El prototipo de sistemas de control de los dispositivo de calentamiento por inducción magnética es proporcional a la señal de conmutación de los transistores. El empleo de un circuito resonante en serie exige el seguimiento de la frecuencia de resonancia y la limitación de corriente.

Los aspectos de diseño descritos en párrafos anteriores se emplearon en el diseño y construcción de un dispositivo de calentamiento por inducción de herraduras, como se observa en la figura 2.7. La simplicidad y solidez del dispositivo excluyó el uso de un sistema de enfriamiento con agua para la bobina de inducción.

El prototipo implementado empleó una solución técnica poco convencional: la conexión de un condensador de baja capacidad a la salida del rectificador de entrada. Los experimentos realizados con el prototipo desvelaron un problema de estabilidad, debido a la pequeña capacitancia del condensador en el circuito intermedio. El inconveniente se solucionó conectando un condensador con un elevado valor de capacitancia, 60 mF.

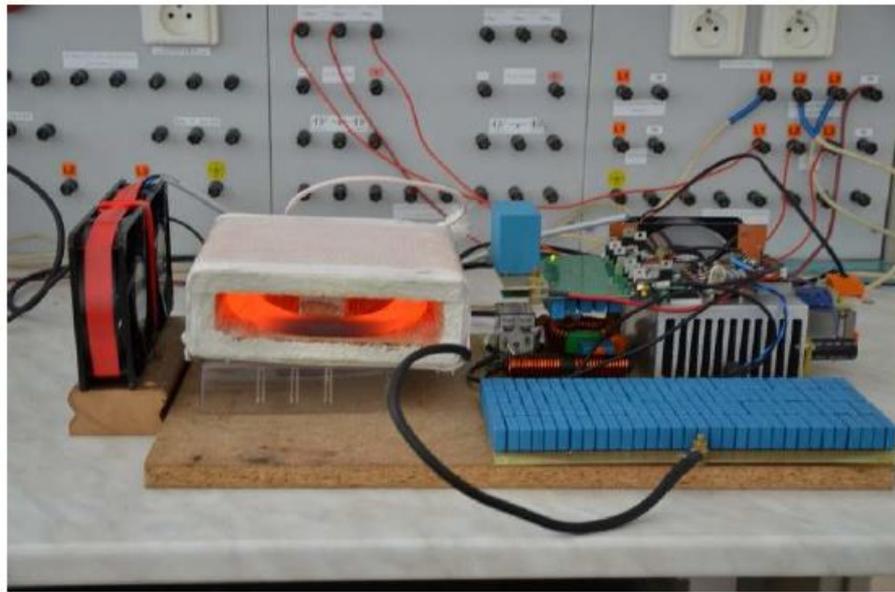


Figura 2.7: Dispositivo del sistema de inducción de calentamiento de herradoras [19].

La transformación de la matriz energética en el Ecuador ha motivado que los estudiantes y profesores de distintas universidades del país, en colaboración con universidades del exterior, aborden el tema de calentamiento de agua por inducción magnética. En este sentido, en el año 2014, en [17], se presenta un trabajo realizado por la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca, en colaboración con la Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Brasil, que describe una innovadora propuesta de un prototipo de calefón de agua, más conocido como calentador de agua por inducción magnética. En el mencionado trabajo, se presenta una metodología detallada del diseño y dimensionado de las principales características técnicas del dispositivo de inducción magnética y se propone la construcción de un prototipo de inducción. Se implementa un dispositivo que permite evaluar el comportamiento de la relación de transformación entre las bobinas primarias y secundarias, donde la bobina primaria trabaja como un circuito tanque y la bobina secundaria representa el material conductivo.

En el prototipo propuesto, pero sin implementación práctica, la etapa de rectificación consta de las siguientes partes: fuente de entrada, rectificador ac/dc no controlado, filtro pasa bajo. Por otro lado, la etapa de conversión en alterna esta conformada por un inversor monofásico de puente completo dc/dc, el circuito tipo tanque y la carga. El circuito de control regula la temperatura del agua modificando la respuesta del modulador PWM del inversor, como se visualiza en la figura 2.8.

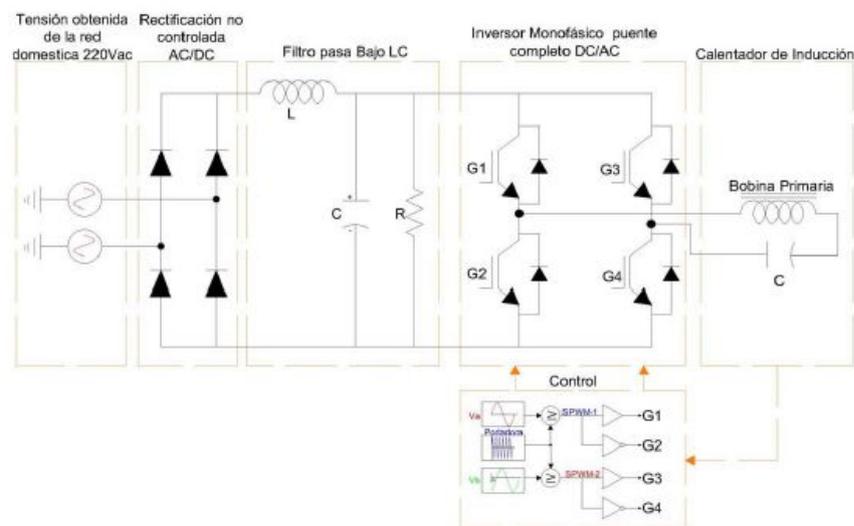


Figura 2.8: Diagrama a Bloques del Prototipo de Inducción [19].

A pesar de que en el trabajo analizado se presenta un esquema de calentamiento por inducción clásico, compuesto de las etapas de rectificación, conversión en alterna y control del sistema, el prototipo propuesto no a sido implementado ni validado. No obstante, se han realizado algunas pruebas experimentales que permiten tener una mejor visión del funcionamiento de las características funcionales del prototipo a construir.

Una de las pruebas experimentales realizadas consiste en comprobar el valor de la relación de transformación del transformador. Las pruebas del transformador se realizaron en vacío y en corto circuito, conectando las bobinas con núcleo ferromagnético a una fuente de corriente alterna de 60Hz. Los resultados de los diferentes parámetros medidos se pueden ver en las tablas 2.1a y 2.1b. En el ensayo en vacío, se observa un incremento proporcional de la intensidad en el devanado primario con el aumento de la tensión aplicada al primario. En el ensayo en corto circuito, reducidos valores de la tensión aplicada en el primario permiten obtener valores significativamente elevados de tensión en el devanado secundario.

Tabla 2.1: Resultados de las pruebas de vacío y cortocircuito

(a) Resultados obtenidos en la prueba en vacío [18]

V. Primario (V_p)	C. Primaria (I_p)	V. Secundario (V_s)
4.9 V	0.26 A	0.68 V
29.52 V	0.4 A	1.10 V
200.7 V	17.52 A	7.53 V
209.7 V	24.5 A	7.94 V

(b) Resultados obtenidos en la prueba de corto circuito [18]

V. Primario (V_p)	C. Primaria (I_p)	V. Secundario (V_s)
4.9 V	1.6 A	41 V
15 V	8.6 A	200 V
20 V	14 A	310 V
25 V	27 A	700 V

La segunda prueba experimental consistió en conectar el calentador de agua a fuente de alta frecuencia, aproximadamente 2,2 kHz. La alta frecuencia permite obtener un calentamiento en la superficie del material, debido a las corrientes inducidas que genera la bobina secundario. Las pruebas realizadas a altas frecuencias permitieron comprobar las pérdidas existentes al utilizar un núcleo ferromagnético. En caso de que el dispositivo trabaje a bajas frecuencias, con una frecuencia de entrada 60 Hz, provocaría que el agua que circula por el material conductivo (tubo de cobre) tienda a enfriarse, puesto que el sistema es de paso continuo y gran parte de la energía se perdería al mantener energizado el núcleo ferromagnético.

El sistema de calentamiento por inducción trabaja dentro de los límites de frecuencia establecidos, haciendo posible definir un intervalo de trabajo para la generación de una onda senoidal perfecta, gracias a la variación de la frecuencia de la onda portadora entre 33 kHz y 44 kHz. En trabajos futuros se propone implementar un transformador con muchas más vueltas en la bobina primaria, para obtener una mayor intensidad de corriente en la bobina secundaria al igual que el aumento de la frecuencia, permitiendo así un comportamiento más eficiente del calentador de agua por inducción.

Los resultados obtenidos en los experimentos realizados no permiten corroborar el correcto comportamiento del prototipo que se pretende implementar. Es importante indicar, que la evaluación y análisis de las distintas etapas del prototipo en forma individual no garantizan que el comportamiento esperado se asemeje al funcionamiento real en forma conjunta.

La revisión bibliográfica de los sistemas de calentamiento por inducción magnética permite concluir que no se ha encontrado una descripción detallada de la construcción, realización de ensayos y simulaciones de calentadores de agua por inducción. Existen diversos artículos que abordan de forma separada los diferentes aspectos de diseño, dimensionado, construcción y simulaciones, pero que no evalúan en conjunto un sistema de calentamiento por inducción aplicado a sistemas de calentamiento de agua para usos domésticos.

2.2. Fundamentación Teórica

En este apartado, se presenta una descripción detallada de los sistemas de agua caliente sanitaria, puesto que es el sector de consumo donde se implementará los dispositivos de inducción. Así mismo, se describen los sistemas de calentamiento solar térmico, ya que en el presente trabajo, se pretende evaluar el comportamiento de los dispositivos de inducción como complemento de los sistemas solares.

Finalmente, se realiza una descripción de la teoría de calentamiento por inducción, puesto que se desarrolla e implementa un dispositivo de inducción magnética para el calentamiento de agua en usos domésticos.

2.2.1. Sistemas de agua caliente sanitaria

Los sistemas de agua caliente sanitaria, ACS, son dispositivos que permiten la transformación de cualquier tipo de energía en energía calorífica, satisfaciendo así una necesidad, en este caso, el suministrar agua caliente a una temperatura definida para los servicios domésticos [18]. Habitualmente, se emplea calor térmico o energía eléctrica para elevar la temperatura de un fluido, en el caso de los servicios domésticos se emplea el agua como fluido. La temperatura del agua se eleva desde una temperatura de entrada hasta una temperatura nominal de funcionamiento, por ejemplo, desde 25°C a 60°C [19].

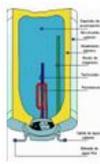
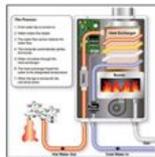
Los sistemas de agua caliente sanitaria en función de la energía empleada se clasifican:

- Resistencia eléctrica/ Inducción magnética
- Gas Natural (GN) o Gas licuado de petróleo (GLP)
- Energía solar

Estos calentadores a su vez se dividen en calentadores de paso continuo y acumulación. El calentador de paso continuo se encarga de calentar el fluido que circula por su interior y lo hace en el mismo instante en que el fluido circula por él [19]. El calentador de acumulación almacena el fluido a calentar en un caldera aislada y eleva la temperatura de una determinada cantidad de agua, para posteriormente distribuir el fluido caliente por la tubería de la vivienda.

No todas las tecnologías pueden tener estos tipos de calentadores, en especial el calentador de energía solar, ya que una de las, principales desventajas del sistema solar es el elevado tiempo de calentamiento [20].

Tabla 2.2: Diferentes tipos de tecnologías para el calentamiento de agua.[Fuente el investigador basado en [23]].

Tipos de Calentadores de agua por su tecnología				
Tipo de Calentador	Tipo de energía que utiliza	Tipo de calentamiento	Eficacia	Grafica
Resistencia Eléctrica	Eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> • Paso continuo • Acumulador 	65%	
GN o GLP	Combustión	<ul style="list-style-type: none"> • Paso continuo • Acumulador 	55%	
Solar	Energía solar	<ul style="list-style-type: none"> • Acumulador 	50%	
Inducción	Eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> • Paso continuo • Acumulador 	90%	

En la tabla 2.2, se presenta una clasificación de los sistemas de calentamiento de agua en función del tipo de energía empleado, las características constructivas del calentador y de su eficiencia. De la tabla 2.2, se deduce que la eficiencia de los sistemas de inducción es muy superior a los sistemas solares, eléctricos y convencionales basados en gas o combustibles fósiles. La eficiencia de los sistemas de inducción es del 90 %, mientras que los restantes sistemas de calentamiento existentes no superan el 65 % de eficiencia.

Los calentadores de inducción permiten un mejor aprovechamiento de la energía empleada. Los sistemas solares de calentamiento, con menor eficiencia que las de inducción, aprovechan una energía renovable, limpia e inagotable. En [6], se presenta un análisis del consumo energético del sector residencial en España. Según los datos del trabajo anteriormente mencionado, en España, apenas el 1 % de los sistemas de calentamiento de agua, individuales y colectivos, en viviendas residenciales, emplean sistemas solares térmicos. Los combustibles fósiles, gas natural y butano, son las fuentes energéticas más empleadas, juntas suman un 66 % del total de la energía empleada. La energía eléctrica apenas cubre el 22 % del consumo energético en los sistemas de calentamiento de agua. El ahorro esperado en energía por la introducción de nuevos sistemas de calentamiento por inducción magnética sería muy considerable en el sector residencial español y en el resto de los países del mundo, garantizando así la creación de un sistema sostenible y altamente eficiente.

2.2.2. Sistemas solares térmicos de ACS

Los sistemas solares térmicos de ACS, son dispositivos que transforman la irradiación solar proporcionada por el a energía térmica. El sol, ubicado a 150 millones de kilómetros, es la principal fuente de energía térmica del planeta. En el núcleo del sol se producen reacciones atómicas continuas convirtiendo el hidrógeno en helio. Cálculos avanzados han demostrado que en el interior del sol se producen una liberación de energía extremadamente grande, que es visible y escapa en forma de rayos de luz al espacio exterior. La cantidad de energía que llega desde el sol representa un equivalente a 170 millones de reactores nucleares de 1000 MW de potencia eléctrica. Diez mil veces el consumo mundial de energía en un año [21]. Alrededor del mundo, hoy en día, 10 millones de familias hacen uso de energía solar para disponer de agua caliente, como se observa en la figura 2.9. El uso de energía solar evita la emisión de 6,3 toneladas de carbón y la emanación total de 16 toneladas de CO_2 al año.



Figura 2.9: Sistemas solares ACS instalados en casas y en edificios [22].

Los dispositivos que utilizan energía solar aprovechan al máximo una energía limpia y menos contaminante en relación a la energía eléctrica. En el Ecuador, el consumo mensual de energía de una familia promedio, que hace uso de calentadores eléctricos o calefones de GLP, representa un consumo equivalente a 55,6 kWh y de 209 kWh, respectivamente [20].

2.2.2.1. Descripción del sistema solar térmico

Un sistema solar térmico, SST, es un conjunto de dispositivos que transforman la irradiación solar en energía térmica. Los sistemas térmicos constan de un conjunto de equipos y componentes que permiten aprovechar la energía solar para la producción de ACS en aplicaciones domésticas [20, 22]. Hay dos tipos de sistemas solares térmicos: los sistemas solares térmicos de termosifón y circulación forzada, como se visualiza en la figura 2.10. Los sistemas de termosifón se caracterizan por ser sistemas sencillos y económicos, puesto que estos no utilizan bombas ni sistemas de control. Mientras que los sistemas de circulación forzada son sistemas complejos, que se caracterizan fundamentalmente por disponer de sistemas de control avanzados.

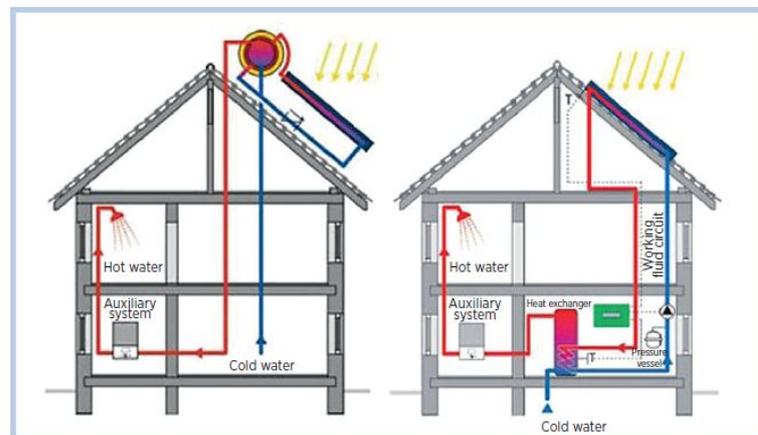


Figura 2.10: Sistemas de termosifón y circulación forzada [28].

En la figura 2.11, se presenta un sistema solar térmico de circulación forzada, constituido por cinco partes fundamentales [20, 22, 23]:

- El colector solar
- Acumulador
- Sistema de circulación
- Sistema de control
- Sistema de auxiliar

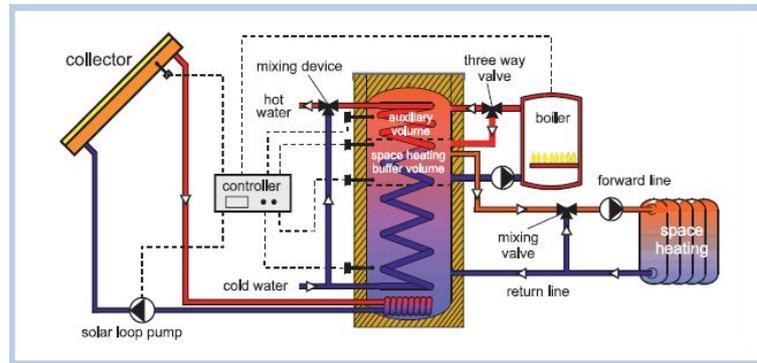


Figura 2.11: Esquema de un sistema de circulación forzada [28].

Colector. El colector es un dispositivo que permite captar la radiación solar incidente, transformarla en energía térmica y transmitirla al fluido que circula por su interior. Los colectores solares se clasifican por su tecnología de fabricación. Entre los principales se destacan: los colectores solares planos y de tubos de vacío. En la figura 2.12 se muestra los dos tipos de colectores más empleados [22].



Figura 2.12: Tipo de colectores solares: tubos de vacío y planos [25].

En los colectores solares planos, la radiación del sol incide directamente en la cubierta y transfiere la energía térmica al agua.

Por otro lado, los colectores de tubo de vacío, basados en el principio de concentración, están conformados por tubos de vidrio, en cuyo interior se produce el efecto de vacío. En los colectores de tubos de vacío, el fluido caloportador es un fluido, que al evaporarse sube al extremo superior del tubo y éste al estar frío hace que el vapor se condense transfiriendo su energía y regresando a su estado líquido para iniciar de nuevo el ciclo de calentamiento.

El colector se encarga de captar la energía irradiada por el sol y aprovecharla al máximo. En el aprovechamiento de la energía solar se deben considerar los siguientes factores:

- La latitud geográfica
- Desviación de la orientación (azimut de la superficie)

- Tipo de vivienda

Para la instalación de un sistema solar térmico es muy importantes tener en cuenta los factores anteriormente mencionados, ya que de ellos depende la eficiencia del sistema.

Acumulador. El acumulador es un dispositivo donde se acumula el agua caliente producida por el colector solar. El acumulador permite cubrir la demanda de agua caliente cuando hay poca o nula radiación solar. Los acumuladores solares están totalmente aislados con el fin de reducir las pérdidas de calor en su interior. Todo acumulador de un sistema de circulación forzada consta de un intercambiador de calor, que puede ser interno o externo, según su uso. El intercambiador de calor es el medio por el que se transfiere el agua del acumulador al sistema de circulación. Los acumuladores de agua se clasifican de acuerdo al intercambiador de calor que cada uno de estos utilice. En la figura 2.13, se presentan diferentes tipos de acumuladores en función al tipo de intercambiador que utilizan: haz tubular, serpiente, tipo camisa.

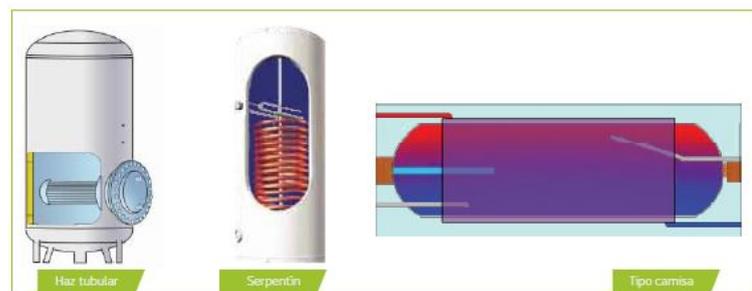


Figura 2.13: Tipos de acumuladores en función del intercambiador de calor [24].

La construcción del acumulador de agua de un SST para instalaciones solares en el Ecuador deben cumplir con las normas NTE INEN 2187:99 y 2124:98 [19].

Sistema de circulación. El sistema de circulación es un conjunto de tuberías aisladas y bombas, que mediante el controlador de temperatura permite el flujo del agua fría hacia el colector. El agua que circula por el interior del colector se calienta y luego se transfiere desde el colector hacia el acumulador para su uso posterior.

Sistema de control. El sistema de control esta compuesto por un determinado número de sensores, bombas y válvulas, que permiten que el agua circule con el propósito de calentarla, hasta alcanzar un determinado nivel de temperatura. Mediante la señal recibida desde los sensores del acumulador, realiza una comparación de la diferencia de temperatura del colector.

Cuando la diferencia de temperatura del agua entre el colector y el acumulador es mayor a 6°C , el sistema de control activa la válvula que permite que el agua circule por el colector, hasta que las temperaturas controladas se iguale. Otra función que desempeña el sistema de control de la temperatura es censar la temperatura del agua que sale del acumulador y en caso de ser necesario acciona el sistema auxiliar para compensar el déficit de temperatura para su posterior distribución a los puntos de consumo de la vivienda.

Sistema Auxiliar: El sistema auxiliar o también llamado de apoyo, es el complemento del aporte solar suministrado por el SST. El sistema auxiliar suministra la energía necesaria para cubrir el nivel de temperatura previsto para el consumo. Gran parte de calentadores solares térmicos de ACS incluyen un sistema auxiliar, sin embargo, no todos los calentadores disponen de este sistema. Los sistemas de apoyo pueden ser eléctrico y a gas, como se observa en la figura 2.14, respectivamente.

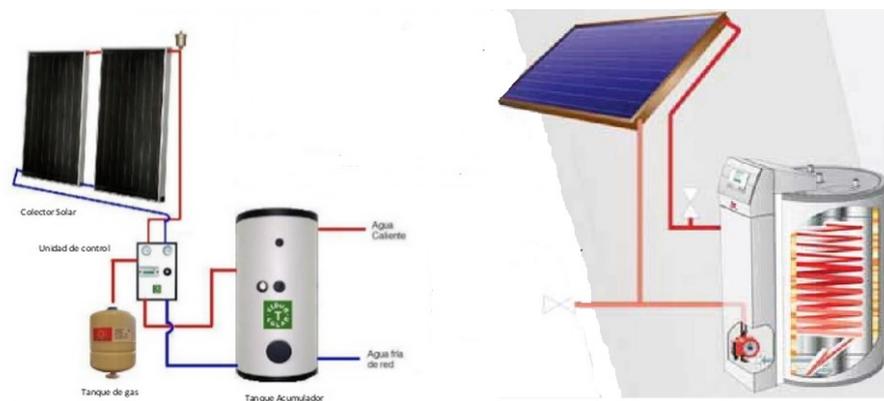


Figura 2.14: Sistemas térmicos de ACS con sistema auxiliar de gas y eléctrico [Investigador basado en [22]].

El funcionamiento de un sistema solar para el calentamiento de agua es sencillo. El colector solar se encarga de captar la radiación solar y transformarla en energía térmica, posteriormente se trasfiere al agua. El acumulador almacena el agua caliente para su uso en momentos que no coinciden con la existencia de radiación solar. Un conjunto de sensores realizan el control de temperatura para activar las bombas del circuito de circulación y el sistema de apoyo auxiliar.

2.2.2.2. Situación actual de los sistemas solares térmicos

En la actualidad, el consumo de la energía solar térmica tiene una gran aceptación a nivel mundial. Muchos países del mundo han implementado leyes ambientales y reformas energéticas que incentivan el uso de sistemas solares térmicos. Según datos de la organización internacional Solar Heat Worldwide hasta el año 2012, 58 países trabajan con sistemas solares térmicos, representando el 95 % de colectores instalados a nivel mundial, representando una población aproximada de 4,4 mil millones de habitantes, que es el 63 % de la población mundial [21].

Los sistemas de energía solar térmica han alcanzado una gran popularidad en tan solo unos años. La mayor parte de los captadores solares se utilizan con fines de calentamiento de agua para el uso doméstico en los hogares. La alta sustentabilidad de los sistemas solares térmicos de ACS han generado una fuerte demanda en el mercado internacional. Los sistemas de calefacción solar son utilizados en países con bajas temperaturas en determinadas estaciones del año. Los SST tienen una gran acogida en países como China, Australia y Nueva Zelanda y en un importante número de países del hemisferio norte del planeta [6, 21, 24].

Según datos presentados en [25], los principales países en el aprovechamiento de la tecnología solar térmica son China con un 75 %, seguidos por Turquía y Alemania con un 4 %, India y Brasil con un 2 % y Japón, Israel, Australia y Grecia con apenas el 1 % del total de los sistemas solares térmicos instalados a nivel mundial. Estos países presentan un índice de crecimiento del 85 % anual en los últimos años, como se visualiza en la figura 2,15.

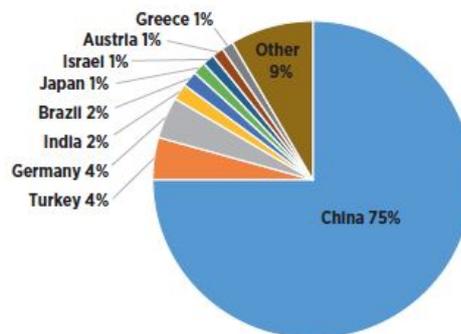


Figura 2.15: Potencias mundiales en sistemas solares hasta el 2012 [27].

Las políticas ambientales han sido el eje principal para permitir el desarrollo de esta tecnología, limpia y que usa recursos renovables. Países como China y Japón han reducido los costos de los sistemas solares incentivando el uso de esta tecnología [24, 21].

Gracias a las políticas implementadas y a los bajos costes de los sistemas térmicos de ACS, se espera tener una demanda total de energía térmica superior a 240 GW térmicos en el años 2020, a escala mundial. En la figura 2.16, se puede observar la curva de crecimiento de los sistemas solares térmicos entre el año de 2000 y 2020. Las nuevas instalaciones de sistemas solares térmicos presentan un crecimiento aproximado del 5% anual.

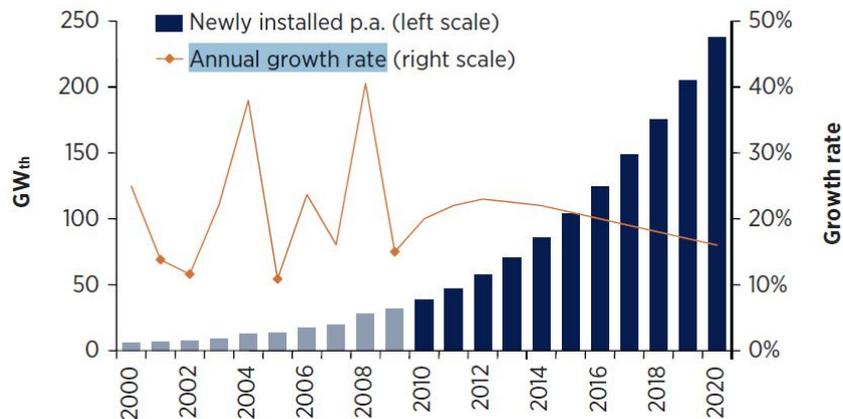


Figura 2.16: Presente y futuro de las instalaciones de sistemas solares térmicos [27].

Por otro lado, la Dirección Europea de Energía Renovable tiene como objetivo alcanzar una demanda total del 20% hasta el 2020, actualmente Europa representa el 9% del mercado mundial de la energía solar térmica. La potencia instalada hasta el año 2004 es de 10000 MW térmicos con un total de 14 millones de m^2 de captadores solares en funcionamiento. En España, durante el 2008 se instalaron alrededor de 46600 m^2 de captadores solares, que representan la mitad de captadores del Plan de Energía Renovable fijada hasta esa fecha [22, 23, 24]. En los últimos años, la reducción de los costes fabricación de estos sistemas a nivel industrial a permitido una mayor penetración en el mercado. Se espera en un futuro no muy lejano tener cerca de 100 millones de m^2 de colectores instalados hasta el 2015.[26, 27].

Sin embargo, la realidad de América Latina es distinta, la principal fuente de energía térmica que utilizan las grandes ciudades está basada en energía no renovable y que contribuye al calentamiento global.

Las principales fuentes de energía para la producción de agua caliente en los países de América Latina es la energía generada por la combustión de GLP y electricidad. Los países latinoamericanos aportan con tan solo el 2,7 % de la energía solar térmica a nivel mundial [21, 22, 24].

2.2.2.3. Instalaciones solares térmicas en el Ecuador

En el Ecuador, en los últimos años, la idea de sustituir los recursos fósiles por recursos renovable ha sido eje principal para la realización de grandes proyectos en el país. Una de las líneas principales de actuación de la Secretaria de Energía Renovable y Eficiencia Energética del Ecuador es el aprovechamiento de la energía solar térmica para el calentamiento de agua. El aprovechar la energía del sol permite disminuir el consumo de recursos fósiles ahorrando millones de dólares al Estado ecuatoriano [23].

Uno de los proyectos más emblemáticos del país, dirigido por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), consiste en la promoción de políticas que permitan elevar la demanda de calentadores solares en el país. Asimismo, se promueve el establecimiento y aplicación de nuevas normativas de construcción que faciliten la instalación de calentadores solares en las viviendas de nuevas construcciones, al igual que el remplazar más de 20 mil calentadores a gas cada año [27, 28]. El MEER, en convenio con el MIDUVI, en el año 2011 emprendió un proyecto de dotación de 10.905 sistemas de energía solar térmica de ACS para viviendas con financiamiento a través del bono de vivienda.

El objetivo de la Corporación para el Desarrollo Sostenible (CODESO) es poner en consideración las ventajas del uso de sistemas de calentamiento de agua a través de energía solar en su pagina web. De esta manera, se incentiva a la población a emplear esta tecnología y ser beneficiarios de la misma.

Muchas de las ciudades del Ecuador participan en el proceso de transformación de la matriz energética con uso instalaciones solares. En Esmeraldas, en el cantón Monpiche, se encuentra la Hostería Iruñi, que ya trabaja con sistemas solares para proveer de agua caliente a las cabañas de la hostería [27].

Varias ciudades de la región sierra apuestan por la implementación de sistemas solares térmicos. Por su ubicación geográfica, la mayor parte de las ciudades de la sierra tienen un clima templado, permitiendo el uso de sistemas solares térmicos de agua para el saneamiento diario.

2.2.2.4. Ventajas y desventajas de los sistemas solares térmicos

Los sistemas solares térmicos de ACS presentan diferentes ventajas y desventajas.

Ventajas

- La energía solar es de acceso universal.
- Mejora el entorno del ambiente ya que este tipo de sistema no utiliza energías contaminantes.
- La energía solar es inagotable.

Desventajas

- Los altos costos asociados a la compra e instalación del equipo.
- El elevado tiempo de calentamiento. El tiempo que tarda un calentador solar varía entre 30 a 60 minutos para un acumulador de 200 litros en el Ecuador.
- La baja aceptación que tienen este tipo de equipos en la sociedad por el desconocimiento de sus beneficios [18, 20, 23].

2.2.3. Teoría del calentamiento por inducción

El fenómeno de calentamiento por inducción magnética consiste en la generación de un campo magnético, que al entrar en contacto con un material metálico provoca la aparición de corrientes parásitas, llamadas también corrientes de Eddy (corrientes de Foucault), causando el calentamiento del material. Para el estudio del calentamiento por inducción magnética es necesario tener en cuenta el principio teórico de este fenómeno, el que se basa en la aplicación de las ecuaciones de Maxwell, las leyes de Amper y Faraday y el efecto Joule. El efecto Joule cumple un papel fundamental, permitiendo aprovechar las corrientes parásitas para generar calor, como se observa en la figura 2.17 [29, 4, 11, 30, 31, 32, 33, 34, 35].

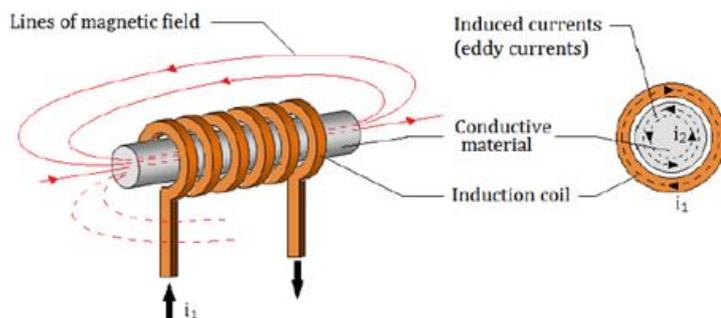


Figura 2.17: Principio del calentamiento por inducción [32].

La corriente que circula por un material conductor generan un campo magnético cuya amplitud y distribución se representa matemáticamente con la ayuda de la ley de Amper 2.1.

$$Ni = \oint H \cdot dl = H \cdot l \quad (2.1)$$

Donde i es la corriente que circula por el conductor; N es el número de espiras; l es la longitud del circuito y H es el Campo magnético

Si se aplica una corriente variable en el tiempo, el campo magnético también será variable. La ley de Faraday aplicada a un conductor, sometido a un flujo magnético variable, dará como resultado una fuerza electromotriz variable representada por la siguiente expresión matemática (2.2):

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

Donde ε es la fuerza magnetomotriz inducida; N es el número de espiras y ϕ es el flujo del campo magnético. El signo negativo de la fórmula anterior indica que la fuerza magnetomotriz inducida genera una corriente cuya dirección se opone al cambio del flujo magnético asociado.

La corriente inducida en el material metálico genera la denominada corriente de Foucault, responsable del calentamiento por el efecto Joule, disipando la potencia en forma de calor, expresada con ayuda de la siguiente fórmula (2.3).

$$P = i_f^2 \cdot R_{eq} \quad (2.3)$$

Donde P es la potencia disipada; R_{eq} es la resistencia equivalente de la pieza a calentar, por donde circula la corriente inducida, debido al campo magnético variable y i_f^2 es la corriente inducida a alta frecuencia [7, 4].

La resistencia equivalente suele presentar un valor pequeño, el nivel y rapidez del calentamiento depende de la frecuencia de la corriente inducida y de la permeabilidad magnética del material inducido.

Para generar pérdidas apreciables por el efecto Joule ($i_f^2 \cdot R$) 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 genera calor.

El calentamiento por inducción es un método de calentamiento en el que se transfiere calor desde una fuente interna sin pérdidas de energía térmica [33]. Es decir, desde el inductor se transfiere energía "electromagnética" creada por un campo variable, que al inducir una intensidad, en el material conductor, ésta se convierte en energía "calorífica" de forma directa.

El calentamiento por inducción se realiza sin contacto físico del generador del campo eléctrico y el material, proporcionando una conversión de energía limpia, al transformar energía eléctrica en energía térmica [7].

2.2.3.1. Principios físicos del calentamiento por inducción.

El calentamiento por inducción, CPI, se basa en dos mecanismos de disipación térmica. Las pérdidas de energía debido al calentamiento Joule (asociando la inducción magnética que origina las corrientes parásitas de Foucault) y las pérdidas de energía por histéresis magnética. Las corrientes parásitas son las únicas responsables de la generación de calor en materiales no magnéticos y las más importantes en materiales ferromagnéticos. Las pérdidas por histéresis se presentan en materiales ferromagnéticos, pero este efecto no es de mayor trascendencia comparada con la producida por las corrientes parásitas [36, 30, 37]. Estos dos fenómenos serán abordados con más detalle en el transcurso del trabajo.

La ventaja de los sistemas de CPI consisten en que el calentamiento del material no se obtiene mediante la radiación del calor, sino se produce directamente en el material. 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 al objeto a calentar por convección o conducción térmica. El material inducido por las corrientes se llama susceptor, que puede adoptar distintas formas geométricas según su aplicación [3, 37].

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. La descripción a nivel macroscópico de los campos electromagnéticos está dada por las siguientes ecuaciones [38, 2, 33]:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{D} = \rho \quad (2.4)$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{B} = 0 \quad (2.5)$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2.7)$$

Donde \vec{E} es el campo eléctrico; \vec{B} la inducción magnética; \vec{H} el campo magnético; \vec{J} la densidad de corriente, ρ la densidad de carga; ε_0 la constante dieléctrica del medio. Adicionalmente se cumplen las siguientes relaciones:

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E} \quad (2.8)$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \quad (2.9)$$

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (2.10)$$

Donde ε y ε_0 son la permitividad eléctrica relativa y del vacío, respectivamente, y μ y μ_0 son la permeabilidad magnéticas relativa y del vacío, respectivamente,. Reemplazando (2.8) en (2.7) se puede escribir:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial(\varepsilon\varepsilon_0\vec{E})}{\partial t} \quad (2.11)$$

En las aplicaciones de calentamiento inductivo menores a 10 MHz, las corrientes por conducción resultan muy superiores a las corrientes de desplazamiento, una buena aproximación consiste en eliminar este término, considerando solamente la ecuación.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.12)$$

Dado que $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$, se puede replantear la ecuación (2.11) introduciendo el vector de potencial magnético \vec{A} y se obtiene la ecuación (2.13) .

Al ordenar la ecuación se obtiene una relación entre el potencial magnético y el potencial eléctrico de alimentación

Es posible encontrar soluciones analíticas haciendo aproximaciones, pero en ocasiones es mejor obtener soluciones numéricas. En este caso, la fuente está dada por el potencial eléctrico de alimentación o bien por la densidad de corriente, en caso que se disponga de ese valor.

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (2.13)$$

2.2.4. Modelo simplificado de inducción magnética

El proceso de transferencia de energía entre el inductor y el material a calentar es similar al principio de un transformador, donde el devanado primario es representado por el inductor y la superficie de la pieza representa el devanado secundario de una sola espira [36]. La carga en el devanado secundario se representa por una sola espira, que simula el comportamiento un transformador en corto circuito.

El funcionamiento de un sistema de inducción magnética consiste en someter una pieza de material conductor a la acción de un campo magnético creado por una bobina, en la que circula una corriente alterna, i . Este efecto es similar al fenómeno que sucede en un transformador, como se visualiza en la figura 2.18. La corriente I_p que circula en el primario del transformador induce un flujo magnético en el material magnético $\phi = BI$. El campo magnético generado, a su vez, inducirá una corriente en el secundario, I_s . El secundario se modela como un inductor de una espira y una resistencia de carga, R_c , de valor menor a 1 ohm, que corresponde a la pieza a calentar. En el interior de la pieza se generan unas intensidades parásitas, también conocidas como corrientes “Eddy” o de Foucault, asociadas con la resistencia del material, responsable del calentamiento del material por el efecto joule [30, 36, 37].

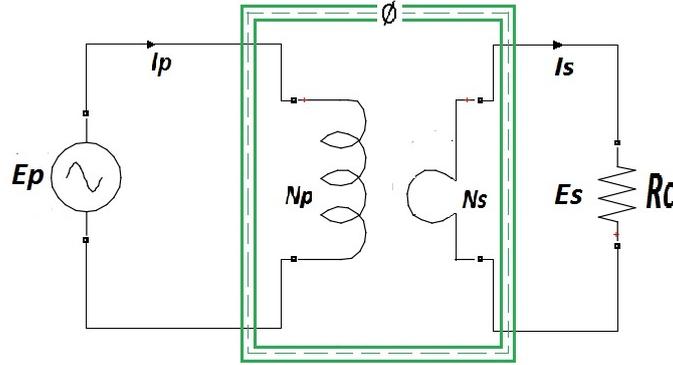


Figura 2.18: Modelo equivalente del funcionamiento de un sistema CPI [Investigador basado en [12]].

La relación de transformación del transformador, r_t , presentado en la figura 2.18, es la relación entre la fuerza magnetomotriz inductora y la inducida, y a su vez, directamente proporcional al número de espiras del primario N_p y secundario N_s , respectivamente, e inversamente proporcional a las intensidades del primario I_p y del secundario I_s :

$$r_t = \frac{E_s}{E_p} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{I_s}{I_p} \quad (2.14)$$

Por otro lado, la carga efectiva vista desde la fuente que alimenta el devanado primario será [39].

$$R_{1efec} = \frac{E_P}{I_p} = \frac{\left(\frac{N_s}{N_p}\right) I_p}{\left(\frac{N_s}{N_p}\right) I_s} = \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2 R_c \quad (2.15)$$

2.2.4.1. Pérdidas por histéresis

A las pérdidas por corrientes parásitas se añaden las pérdidas por histéresis. El fenómeno de histéresis sólo se hace presente cuando se utiliza materiales ferromagnéticos. Estas pérdidas son producto de la fricción entre las moléculas del material a calentar, cuando éste es magnetizado primero en una dirección y luego en otra, es decir, de forma alterna. Las moléculas pueden ser consideradas como pequeños magnetos que giran con cada inversión de la dirección del campo magnético [36, 38, 37, 30]. La energía necesaria para girar los magnetos de materiales ferromagnéticos se convierte en calor produciendo el calentamiento del conductor. Esta energía se incrementa a medida que aumenta la frecuencia del campo magnético y es proporcional al área encerrada por la curva de histéresis B-H del material. Las pérdidas por histéresis tienen un efecto pronunciado hasta que el material alcance la temperatura de Curie (temperatura en la que los materiales metálicos pierden sus propiedades ferromagnéticas), ya que cambia su estructura molecular.

Estas pérdidas se definen por la ley de Steinmetz [7, 37, 40, 36]:

$$W = K \cdot B^{1.6} f \quad (2.16)$$

Donde W representa las pérdidas por histéresis; B es la densidad de flujo magnético; 1,6 es la constante de proporcionalidad y f es la frecuencia de operación.

La ecuación (2.16) permite obtener una curva de pérdidas por histéresis. Los materiales magnéticos conductores cuya curva de histéresis encierra una gran área poseen altas pérdidas mientras que los materiales cuyas curvas $B - H$ encierran una pequeña área tienen pequeñas pérdidas de histéresis. En la figura 2.19, se presenta la curva de pérdidas por histéresis para diferentes materiales ferromagnéticos.

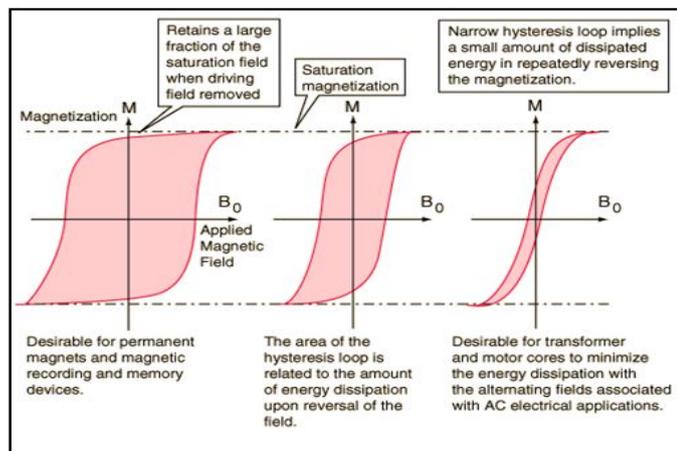


Figura 2.19: Pérdidas por histéresis en materiales magnéticos [3].

El calor generado por las pérdidas por histéresis incrementa la temperatura del material magnético. Esta contribución se puede variar modificando la frecuencia de oscilación de la corriente de la bobina. Al calentar un material bajo el punto de Curie, la contribución de las pérdidas por histéresis es muy pequeña con respecto a las pérdidas por corrientes parásitas, debido a que las pérdidas por histéresis son demasiado pequeñas y pueden ser ignoradas. En procesos prácticos, las pérdidas por corrientes parásitas es el mecanismo principal en que la energía eléctrica puede producir calentamiento térmico por inducción [36, 40, 37].

2.2.4.2. Descripción del efecto pelicular

El fenómeno de calentamiento por inducción magnética tiene una característica principal que consiste en la 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. Cuando la frecuencia del campo magnético es elevada, se presenta el efecto pelicular, que consiste en una disminución de las corrientes inducidas conforme se penetra en el material [36, 30]. Las corrientes de altas frecuencias tienden a concentrarse en la superficie del material conductor, siendo esta concentración más intensa conforme aumenta la frecuencia del campo. El aumento de la frecuencia de la corriente inducidas en el conductor permite una concentración más compacta en su superficie [41, 42].

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 magnética.

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 de campo magnético se puede representar por [2, 38, 31]:

$$\bar{H}(x) = H_0 + e^{\frac{(1+j)x}{\delta}} \quad (2.17)$$

Donde x representa la coordenada radial del cilindro; H_0 es la intensidad del campo magnético y δ es la densidad de penetración. δ tiene su origen en un cambio de variable y que permite determinar la potencia del conductor cilíndrico, definida con la ayuda de la siguiente ecuación [2, 38, 31, 43, 44, 33]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (2.18)$$

Donde f es la frecuencia de conmutación en Hz; σ es la conductividad eléctrica en Ω ho-m y μ es la permeabilidad magnética relativa del material. Sin embargo, el nivel de temperatura depende de la naturaleza, resistividad y de las propiedades magnéticas del material.

La profundidad de penetración se define como la profundidad donde el campo magnético se atenúa $1/e$ y es la zona en la que se concentra el 63% de la corriente y el 87% de la potencia que se disipa. En la figura 2.20, se representa la distribución de la densidad de corriente y la densidad de potencia desde la superficie hasta el interior del material [30, 33].

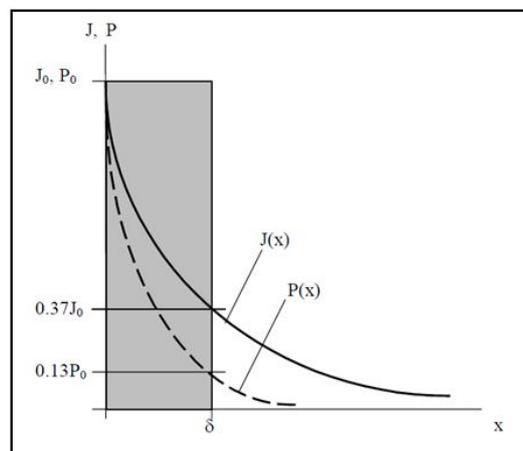


Figura 2.20: Distribución de la corriente en función de la profundidad [35].

La profundidad de penetración disminuye cuando la frecuencia aumenta o cuando la permeabilidad magnética del material es mayor. Cuando la resistividad del cuerpo conductor a calentar aumenta, la profundidad de penetración también se incrementa. En la figura 2.21, se muestra la curva de las profundidades de penetración de algunos elementos [32, 45].

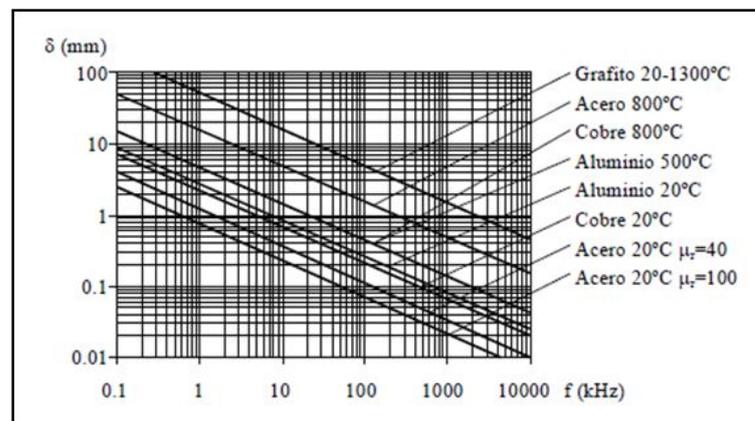


Figura 2.21: Curva de la profundidad de penetración en función de la frecuencia [45].

Por lo tanto, se puede concluir que la elección de la frecuencia de resonancia está directamente relacionada con las propiedades del material a utilizar .

2.2.4.3. Aplicaciones de los sistemas CPI

Hoy en día, las aplicaciones del calentamiento por inducción magnética son varias, especialmente se utilizan en la industria metalúrgica y en los equipos electrodomésticos. Entre las diferentes aplicaciones del fenómeno de inducción magnética destacan [3, 41, 37, 46, 47]:

- **Fusión:** Los materiales metálicos se calientan a altas temperaturas hasta su fusión en el interior de hornos de crisol.
- **Forja:** Se calienta el material de forma homogénea para posteriormente utilizarlo en un proceso mecánico.
- **Tratamiento térmico:** La pieza metálica es sometida a un calentamiento rápido, posteriormente a un enfriamiento, consiguiendo una transformación de estructura y composición del material y así aumentar su dureza.
- **Soldadura:** Debido a las altas temperaturas de inducción magnética es posible realizar soldaduras de alta calidad.
- **Sellado de envases:** Es posible sellar la embocadura de algunos envases plásticos, añadiendo una fina cubierta metálica que se calienta por inducción. Se obtiene un sellado debido a la fusión del envase que está en contacto con la base metálica.

2.2.4.4. Electrodomésticos de inducción

Los sistemas de inducción también se aplican a electrodomésticos, así tenemos:

- **Cocinas:** Las cocinas inducción magnética aprovechan el fenómeno de inducción para determinados utensilios metálicos con gran rapidez permitiendo realizar la cocción de alimentos.
- **Planchas:** Las planchas de inducción poseen una base metálica que al entrar en contacto con un campo magnético generado en el interior de la misma plancha hace que este proceso sea optimizado.

- ***Sistemas de calefacción:*** Los sistemas de calefacción son una de las aplicaciones del fenómeno de inducción magnética, ya que mencionados sistemas requieren un alto consumo de potencia para calentar el aire. Al utilizar la tecnología de inducción se reduce significativamente el consumo de electricidad.
- ***Sistemas de agua caliente sanitaria:*** Los sistemas de agua caliente sanitaria buscan la ayuda de nuevas tecnologías para sustituir los sistemas basados en energía fósil por sistemas de renovables provenientes de energía limpia, esto ha sido principal motivo para la realización de investigaciones en cuanto al fenómeno de inducción para el calentamiento al agua.

Los hornos de inducción tienen un funcionamiento similar a un transformador en régimen de corto circuito donde la carga se representa por el devanado secundario del transformador. La desventaja de los circuitos de inducción es que poseen bobinas, reduciendo la eficiencia energética y el factor de potencia del proceso de inducción magnética. Los diodos de potencia al igual que los dispositivos electrónicos de potencia juegan un factor importante en la conversión de la energía [1].

En los últimos años, el gran desarrollo de materiales semiconductores de potencia ha permitido aumentar la eficacia y sencillez de estos circuitos, haciendo posible la fabricación de los circuitos de inducción de pequeñas dimensiones e introducirlos en equipos para el hogar [36].

El método de calentamiento por inducción se ha convertido en uno de los métodos más eficientes e innovadores. El calentamiento obtenido es directo al objeto de interés, temperaturas muy elevadas, permitiendo su introducción en los equipos electrodomésticos [11].

Las cocinas de inducción representan un ejemplo indiscutible del aprovechamiento del fenómeno de calentamiento por inducción magnética en aplicaciones domésticas comunes. En estos electrodomésticos, el sistema de inducción consiste en un embobinado de generación de un campo magnético variable, que tiene una incidencia directa en el recipiente metálico sobre una placa cerámica, induciendo la cocción de los alimentos en el interior del recipiente [29].

2.2.5. Elementos un sistema CPI

Un sistema de calentamiento por inducción magnética está constituido básicamente por las siguientes partes: una fuente de alimentación, un convertidor, un inversor, la carga y un circuito de control. Un ejemplo práctico de sistema inducción es la cocina de inducción, que se detalla a continuación, como se observa en la figura 2.22 [11, 43, 33].

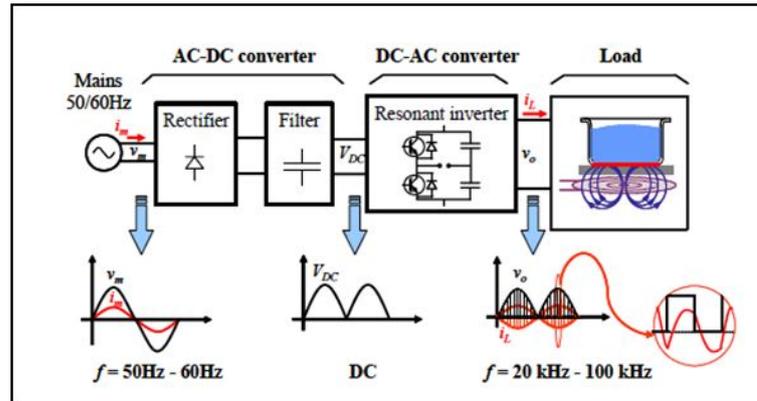


Figura 2.22: Circuito esquemático de una cocina por inducción [14].

En la figura 2.22, se observa un esquema estándar, configurado por una fuente de corriente alterna de baja frecuencia de 50 Hz - 60 Hz común en las redes domésticas. Un convertidor ac/dc, instalado en su interior, consta de un rectificador y un filtro.

El convertidor de dc/ac, permite tener a su salida una fuente de corriente alterna de alta frecuencia en el rango de kHz. Los convertidores transfieren la energía desde la fuente al material a través de un acople magnético. En la figura 2.22, la carga es representada por una olla metálica. Por último, el sistema de control digital permite realizar disparos controlados de corriente para así tener un mejor manejo de la potencia.

2.2.5.1. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación es la encargada de suministrar la energía necesaria a todo el sistema. La fuente puede ser, de corriente alterna con diferentes niveles de tensión, monofásico o trifásico dependiendo de la potencia, del tipo de convertidor y la aplicación propuesta. La frecuencia puede ser 50 o 60 Hz, en función del lugar geográfico en la red de distribución domestica, Europa y América, respectivamente [36, 41].

Existen varios sistemas de alimentación usados para el calentamiento por inducción entre los que destacan:

- Fuente conectada directamente a la red
- Fuente de media frecuencia
- Fuente de radio frecuencia

Fuente conectada directamente a la red (50Hz/60Hz) En estos tipos de fuentes no existe una conversión de frecuencia. Se utilizan transformadores y condensadores para realizar el control de potencia, puesto que la potencia puede llegar a centenas de MW.

En un transformador la potencia que se trasfiere es proporcional a la frecuencia de operación. Al utilizar frecuencias bajas como la de 60 y 50 Hz, ésta fuente presenta una baja densidad de potencia. Estas fuentes son utilizadas en calentamiento de materiales a gran escala donde se busca que el efecto pelicular sea poco pronunciado.

Fuente de media frecuencia (500Hz-10KHz) Las fuentes de media frecuencia están compuestas por un grupo de motores y generadores, encargados de suministrar la tensión alterna para el bobinado de inducción. Este tipo de sistema operan con frecuencias fijas, baja eficiencia y baja densidad de potencia.

La utilización de convertidores estáticos como tiristores es necesaria en estas fuentes, para mejorar las desventajas presentadas por los motores y generadores, asegurando así un mejor control del proceso de calentamiento. Es necesario contar con un circuito de control para optimizar el proceso, ya que los materiales al calentar varían sus características físicas.

Fuente de radio frecuencia(100kHz-10MHz) Este tipo de fuentes trabajan con un espectro de frecuencia alto, se emplean en aplicaciones que requieren una profundidad de penetración pequeña y una elevada densidad de potencia. Estas fuentes operan con osciladores de potencia o válvulas de vacío. En la actualidad, el gran desarrollo de los dispositivos semiconductores y las técnicas de conmutación suave permiten utilizar convertidores estáticos. Hoy en día, estos convertidores presentan una alta potencia y frecuencia de trabajo con una elevada eficiencia.

2.2.5.2. Fuente de alimentación de la carga

Para aumentar la temperatura del material que se encuentra en la carga es necesario generar corrientes de magnitud apreciable a alta frecuencia, 20 kHz-100 kHz.

Las corrientes que circulan por la bobina generan campos magnéticos alternos que inducen en corrientes parásitas en material ferromagnético, responsables del calentamiento por pérdidas por histéresis. La frecuencia de operación de las corrientes tienen una estrecha relación con la profundidad de penetración del material.

Las corrientes inducidas que se generan en el material son de mayor intensidad en la superficie y decrecen en el interior del material, por lo que cuando mayor es la frecuencia de operación menor es la profundidad de penetración [4, 48].

La manera más eficiente de conseguir este tipo de corrientes parásitas es construir una carga resonante RLC serie o paralelo. Este circuito será excitado por medio de una fuente de corriente o tensión. Al utilizar carga resonante tipo serie es necesario utilizar una fuente de tensión para excitar el circuito, mientras que al utilizar un circuito paralelo se debe utilizar una fuente de corriente. Debido a que la representación de la impedancia de un circuito serie y paralelo fuera de resonancia, es un circuito abierto y corto circuito respectivamente [29, 33].

2.2.5.3. Convertidor

El convertidor es el encargado de convertir la corriente alterna, ac, de la fuente de alimentación en corriente continua, dc, mediante un arreglo de diodos rectificadores. En la actualidad, se tiene una gran cantidad de configuraciones que permiten la rectificación de la señal. Las configuraciones difieren por la cantidad de elementos y la exactitud de la potencia a suministrar. La etapa de conversión o rectificación puede ser de tres tipos [3, 41, 48].

- **Rectificador no controlado:** El rectificador no controlado es un rectificador, que no permite tener un control sobre la tensión de salida y se construye a través de un arreglo de diodos rectificadores
- **Semiconvertidor:** El semiconvertidor, es un tipo de rectificador que permite tener un cierto control sobre la tensión de salida, debido a que además de diodos rectificadores emplea también dispositivos electrónicos controlables como son los SCR's.
- **Convertidor completo:** El convertidor completo, permite tener un total dominio sobre la tensión de salida, variando desde cero hasta un valor máximo de entrega. Este convertidor utiliza un arreglo de SCR's.

Al realizar un control de potencia, el circuito se encarga de suministrar una intensidad de corriente de magnitud apreciable que circula por la bobina y prorrogar la aparición de corrientes parásitas.

Los dispositivos semiconductores de potencia funcionan de modo conmutado por varios tipos de modulación. Una de las modulaciones más aplicadas en estos sistemas es por ancho de pulso, PWM, y que utiliza convertidores ac-dc y dc-ac para poder aumentar la frecuencia de la señal de alimentación la carga.

La mayoría de convertidores ac/dc utilizan filtros LC para mejorar la señal de entrada del rectificador y conseguir un mayor control sobre la tensión [14, 49].

2.2.5.4. Inversor

El inversor modifica la tensión de entrada de corriente continua a una tensión simétrica de salida de corriente alterna o senoidal con una magnitud y frecuencia distinta a la entrada, cuantificada en la alimentación de la bobina de inducción [4, 35, 41, 49]. El fenómeno de calentamiento por inducción magnética se consigue al alimentar la carga resonante con una fuente de alta frecuencia. La construcción de la fuente de alta frecuencia exige el empleo de un inversor. La función de un inversor es convertir la tensión continua a tensión alterna. En el esquema más simple, la frecuencia de las corrientes generada por el inversor es aproximadamente la frecuencia de resonancia. Los inversores se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación para computadoras, hasta aplicaciones industriales para el control de altas potencia. Uno de los factores primordiales a analizar en los circuitos inversores es el factor de calidad [11, 33, 37, 50, 51].

Factor de calidad Q El factor de calidad, Q , cuantifica, la relación de la potencia reactiva sobre la potencia activa y en muchas aplicaciones la carga se expresa en función de este factor [36, 42]. este factor de calidad se define con la ayuda de la fórmula 2.19:

$$Q_l = \frac{\omega L i}{R_{eq}} \quad (2.19)$$

Donde ω es la frecuencia de conmutación, dicha frecuencia se asume de acuerdo a la frecuencia de resonancia del circuito ω_0 . Por tanto, el factor Q se igual:

$$Q = \frac{(\omega_0 L i)}{R_{eq}} = \frac{\omega_0}{\omega Q_l} \quad (2.20)$$

La ecuación 2.20 se aplica normalmente para definir al factor Q . Los valores típicos de Q para un material magnético se encuentra 3 y 10, mientras que para un material no magnético se encuentran entre 10 y 15.

2.2.5.5. Clasificación de los circuitos electrónicos de calentamiento por inducción.

En esta sección, se presenta una clasificación y descripción de los circuitos electrónicos, empleados en los sistemas de calentamiento por inducción magnética, en los últimos 20 años.

La clasificación propuesta se basa en la topología de los inversores más utilizados comercialmente en la fabricación de equipos de inducción magnética. La propuesta de clasificación permite definir las siguientes topologías [52]:

- Inversor de terminación única
- Inversor resonante en serie de puente completo
- Inversor resonante en serie de medio puente
- Conversor AC/AC

Inversor de terminación única (SE). El sistema de inducción con una topología de inversor resonante directo tiene una mayor utilidad en circuitos de cocción, debido a su estructura de costos más baja y a una eficiencia relativamente alta [53]. El diagrama de circuito básico del inversor resonante se ilustra en la figura 2.23.

El rectificador, bobina de choque y el condensador de entrada (C_{in}), como se visualiza en la figura 2.23, conforma la etapa de filtro pasa bajo (LPF). En tanto que, la bobina de trabajo puede ser representada como una combinación en serie de la inductancia (L_r) y la resistencia (R_{eq}), que se agrupan con el condensador C_r para formar un circuito resonante tipo tanque. De esta forma actúa directamente sobre el recipiente.

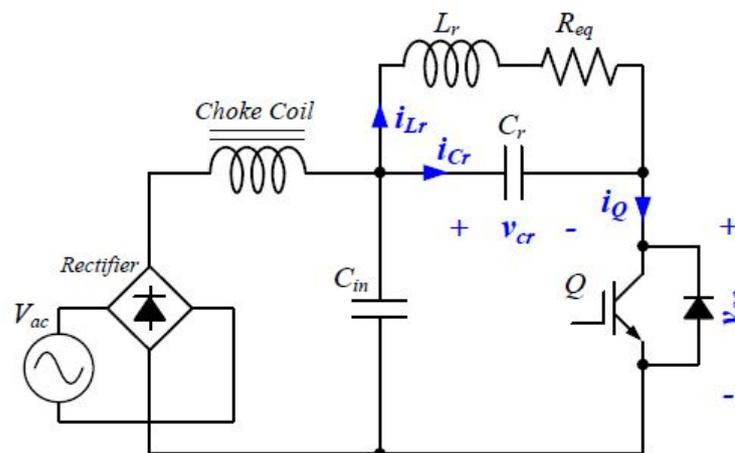


Figura 2.23: Diagrama esquemático del Inversor resonante de Terminación Única [53].

En los últimos años, en este tipo de inversor se emplean nuevos dispositivos semiconductores como los field-stop IGBT (FS). Los IGBT son dispositivos que utilizan una tecnología denominada de ánodo cortocircuitado para su funcionamiento. Esta tecnología se caracteriza por combinar las ventajas de PT (punch-through) y NPT (non-punch-through) en el dispositivo de conmutación. Estos dispositivos funcionan de mejor manera en una topología de inversor de terminación única [53].

Inversor resonante serie de puente completo El inversor resonante de puente completo es una de las topologías que se usan en aplicaciones de calentamiento por inducción. Esta topología permite reducir las pérdidas de potencia en los conmutadores, para conseguir así una frecuencia de operación por encima de la frecuencia de resonancia.

La utilización de un inversor resonante en serie de puente completo presenta una variación esquemática cuando utiliza un rectificador tipo Vienna, en lugar de rectificadores de diodos convencionales, para proporcionar así una entrada de corriente sinusoidal con un factor de potencia unitario y una baja distorsión respecto a la fuente [54]. El mencionado esquema se puede observar en la figura 2.24.

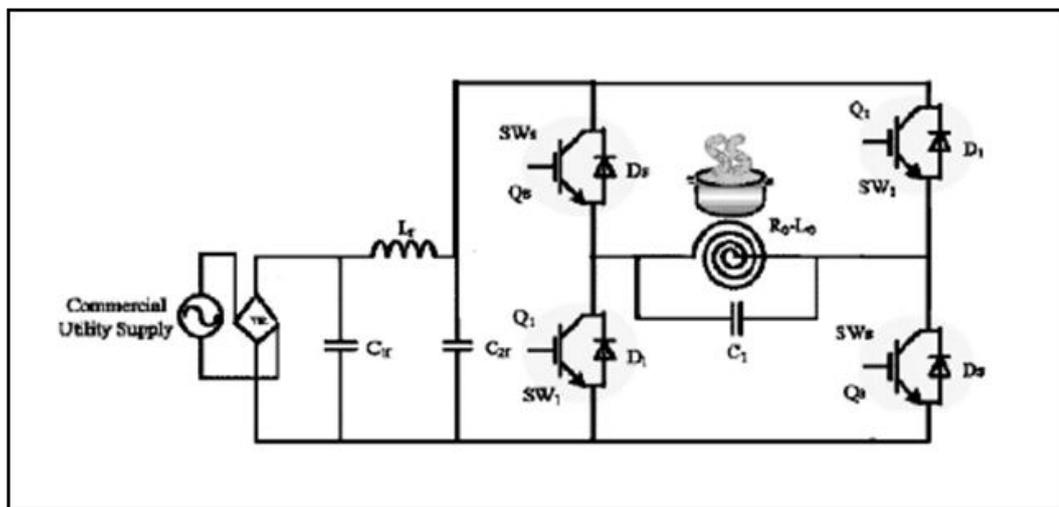


Figura 2.24: Puente completo con rectificador Vienna en el extremo frontal [53].

La topología de inversor resonante de puente completo tiene un amplio campo de aplicaciones, pero suele emplearse especialmente en cocinas de inducción. Los diferentes dispositivos de conmutación hacen que exista una variación en la frecuencia trabajo y tipo de modulación a aplicar en cada uno de los circuitos, como se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Comparación por dispositivos de utilizados en topología de puente completo [52].

Inversor Puente Completo		
Dispositivos de conmutación	Modulación	Frecuencia de Resonancia
IGBT	PDM/AVC	41KHz
Rectificador Tipo Vienna	PWM	20KHz
MOSFET	PFM	100KHz

Inversor resonante serie de medio puente Los convertidores resonantes de medio puente, también conocidos como de tensión conmutada, es una topología aplicada en sistemas de electrodomésticos. Una de las ventajas de esta topología, en comparación de la topología de inversor resonante de puente completo, es que este utiliza una menor cantidad de componentes. Al utilizar una menor cantidad de componentes, se reduce el costo de fabricación. A diferencia de los puentes sencillos, que presentan una eficiencia relativamente baja, la creación de una mayor cantidad de corrientes parásitas se debe al número de dispositivos que utilizan.

La utilización de una topología de medio puente con diodos de carburo de silicio, SiC, proporciona una gran sencillez en su construcción, como se observa en la figura 2.25.

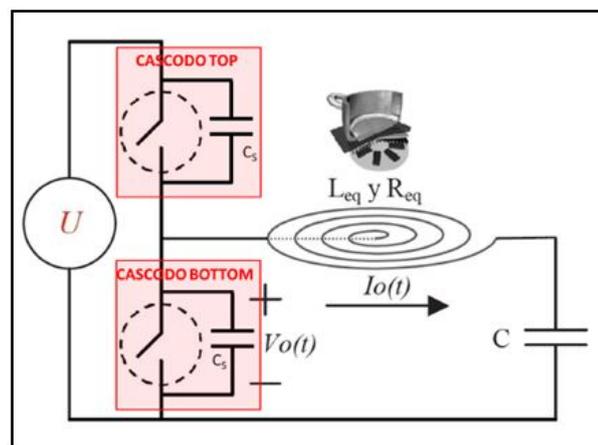


Figura 2.25: Resonador de medio puente para calentamiento por inducción [3].

El convertidor resonante de medio puente presenta una tendencia al calentamiento a bajas frecuencias. Al ser un circuito con dos dispositivos de conmutación induce un menor número de corrientes parásitas. Al emplear dispositivos de conmutación en carga, permite aprovechar el rendimiento del circuito sobre un 50% [38]. Esta topología trabaja cada medio periodo de conmutación permitiendo mejorar el factor de potencia.

Convertidor AC/AC Un convertidor es básicamente un dispositivo electrónico que permite transformar una tensión o corriente continua en otra con una mayor amplitud. El convertidor ac/ac tiene como finalidad suministrar tensión y corriente variable a partir de fuentes alternas. El convertidor está conformado por 2 semiconductores de potencia colocados en anti paralelo, que controlan la desconexión de la fuente en cada semiciclo [29, 11]. Una de las propuestas más innovadoras en los circuitos electrónicos de inducción magnética es la topología ac/ac.

Esta topología permite simplificar el convertidor y mejorar la eficiencia del mismo, se basa en la simplificación de la etapa de rectificación conocida como medio-puente rectificador de impulso. La topología de resonador serie resonante de medio puente duplica la salida de tensión de la fuente, gracias al uso de dos diodos rectificadores, como se visualiza en la figura 2.26 [7, 30].

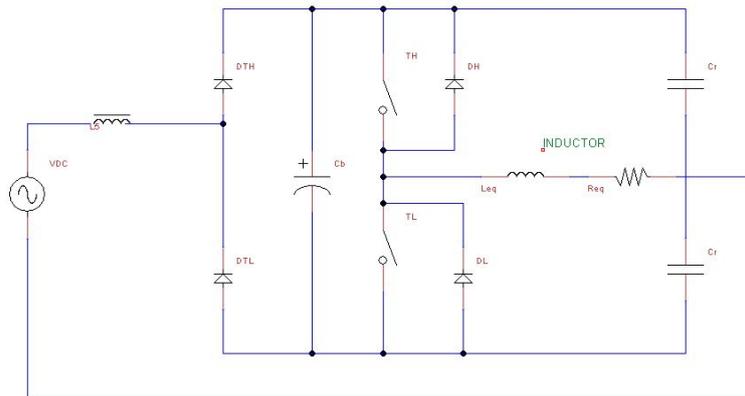


Figura 2.26: Propuesta de convertidor ac-ac [44].

Las características de los diferentes dispositivos de conmutación ac/ac permiten realizar una tabla comparativa, como se presenta en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Comparación de dispositivos utilizados en topología ac-ac [52].

Convertor ac/ac		
Dispositivos de Conmutación	Frecuencias de Trabajo	Rango de Potencia de salida
MOSFET	10KHz-100KHz	3,6kW
IGBT's	20KHz-100KHz	2,5kW

Dispositivos MOSFET El MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) de potencia es un transistor de efecto de campo de tipo MOS, base de los circuitos digitales de señal, que han sido modificados para su uso como un conmutador en electrónica de potencia. El MOSFET puede soportar altas tensiones y altas corrientes [50]. Es un dispositivo de alta velocidad debido a que su paso entre conducción y corte depende de la carga, en el orden de los nF .

La velocidad depende entonces de la capacidad de corriente de la fuente de tensión, que es un aspecto de diseño del circuito de disparo y no del dispositivo de conmutación. La conducción se basa en el movimiento de portadores mayoritarios. El MOSFET en conducción se comporta como una resistencia, las pérdidas en conducción dependen entonces de su valor, el que se intenta reducir modificando las características constructivas de éste dispositivo de conmutación.

El MOSFET de potencia es un dispositivo, que mantiene el principio de funcionamiento del MOSFET de señal, pero se modifica para manejar corrientes y bloquear tensiones utilizadas en conversión de electrónica de potencia. Su aplicación está limitada a niveles de tensión correspondientes a redes de baja tensión, 230 o 400 Vac o sus valores rectificadas. Es el dispositivo más empleado en fuentes de alimentación de hasta decenas de kW, para sistemas electrónicos conectados a servicios de baja tensión. Su velocidad y manejo más simple del MOSFET, comparado con los distintos tipos de conmutadores, permite la reducción de tamaño y costo de equipos, al reducirse los componentes pasivos que los integran. El figura 2.27 se muestra el esquema de un MOSFET.

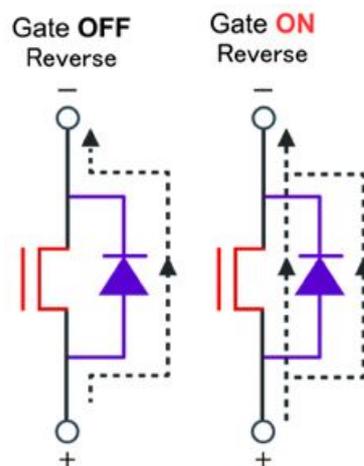


Figura 2.27: Esquema del MOSFET's [54].

Dispositivos IGBT's El IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, Transistor Bipolar de Compuerta Aislada) es un dispositivo de conmutación de potencia que combina las ventajas del BJT y del MOSFET. Los BJT poseen un bajo nivel de pérdidas, al ser utilizados para bloquear altas tensiones. Por otro lado, tiene tiempos de conmutación largos, especialmente en el apagado.

El MOSFET posee tiempos de conmutación muy cortos pero cuando es utilizado para bloquear altas tensiones sus pérdidas en conducción resultan excesivamente altas.

Para el desarrollo del IGBT se conjugan las características de ambos dispositivos de tal forma que se obtiene un componente adecuado para trabajar en circuitos con altas tensiones, que ostenta tiempos de conmutación mucho más cortos que los de un BJT y bajas pérdidas en conducción. Actualmente, los tiempos de conmutación de los IGBT's están en el orden de $100\mu\text{s}$, sustituyendo al MOSFET en aplicaciones de alta frecuencia [50, 55]. En la figura 2.28 se muestra el circuito esquemático de un IGBT.

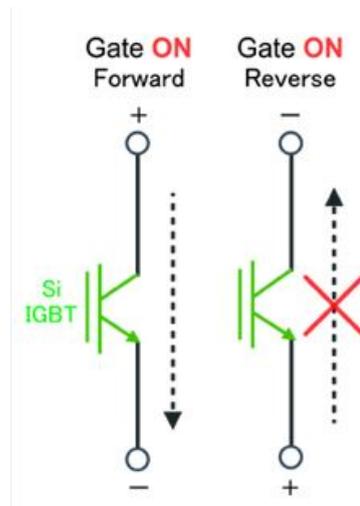


Figura 2.28: Esquema del IGBT's [54].

2.3. Normativas de ACS en el Ecuador

Los sistemas alternativos para producción de agua caliente en una red de suministro predial en el Ecuador se dividen en [56]:

Instalaciones puntuales de servicio instantáneo.- se deberán utilizar dispositivos, normalmente eléctricos, para calentar el agua inmediatamente antes de la salida del aparato sanitario, en el mismo momento del suministro. El dispositivo puntual solo se utiliza para calentar el agua (entre 35°C y 45°C), mediante una mini cámara de calentamiento con niquelina o resistencia eléctrica sumergida, con acople de 16 mm, hasta 0.10 L/s y con presiones entre 2.0 m c.a. y 10.0 m c.a. En cualquier caso, la inclusión de calentadores de agua eléctricos de uso doméstico, en la red de suministro en la vivienda, se deberá acoger a lo que indica la NTE INEN 1912:92 [56].

Instalaciones autónomas.- Se deberá instalar sistemas autónomos para el calentamiento de agua cuando se requiera individualizarlos, uno para cada vivienda o departamento del edificio; de tal modo que, en un mismo edificio podrán existir varios sistemas autónomos.

Cada uno para producir el agua caliente que una vivienda o departamento necesite. Los calentadores de agua pueden ser del tipo “eléctrico” o “a gas”. En los párrafos siguientes se presentan las normas técnicas para la construcción y uso de los calentador de agua a gas y eléctricos [19].

a) El calentador de agua mediante resistencia eléctrica o niquelinas sumergidas, deben utilizarse según la NTE INEN 1912:92. Para condiciones particulares de los termos eléctricos también se podrá referir a la norma UNE EN 60 335-2-21.

b) El calentador a gas, debe ser del tipo quemador de encendido automático, para suministrar agua caliente a varios aparatos de una misma vivienda. Debe ser ubicado en un sitio de fácil acceso, bien ventilado y deberá contar con un ducto de ventilación (respiradero) de 100 mm en su parte superior, con el fin de expulsar de forma segura los gases. En cualquier caso, la inclusión de calentadores de agua a gas de uso domestico, en la red de suministro en la edificación por cada vivienda, se deberá acoger a la NTE INEN 2187:99 y 2124:98.

(c)Dependiendo de cada caso, y previa autorización de la autoridad competente, se podrá optar por sistemas de calentamiento alternativo, siempre que su impacto ambiental no sea peor que los sistemas de calentamiento anteriormente descritos. Se pueden aprovechar otras fuentes de energía, bien con calentadores solares, bien con calentadores geotérmicos, u otros [19, 56].

Instalaciones centralizadas con acumulación.- Se deberá instalar un sistema de calentamiento de agua centralizado, cuando se requiere calentar grandes cantidades de agua para múltiples viviendas y varias plantas del mismo edificio

Para determinar el mínimo volumen de agua V_w necesario para satisfacer un volumen demandado V_d a una determinada temperatura de uso T_s , se deberá utilizar la ecuación 2.21.

$$V_w = \frac{T_s - T_{in}}{T_{out} - T_{in}} V_d \quad (2.21)$$

Donde V_w es igual al volumen de agua acumulado, capacidad del termo (L), V_d es el volumen de agua demandada para el consumo, T_s es la temperatura del agua en el mueble sanitario en (°C), T_{in} es la temperatura de agua fría que ingresa al calentador en (°C) y T_{out} es la temperatura que se espera a la salida del calentador en (°C) [24, 56].

Tanto el consumo como la temperatura del agua en los suministros, debe regirse a la siguiente Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Tabla de temperaturas y consumos de agua en aparatos sanitarios [22].

Tipo de edificación	Aparato	Temperatura (°C)	Consumo por llenado (L)	Tiempo de llenado (minutos)
Vivienda	Bañera	38	150	15
	Bidet	35	5	2
	Ducha	40	45	6
	Lavamanos	35	2	2
Casas de salud y hospitales	Bañera	38	250	4
	Baño de asiento	38	60	2
	Baño medicinal	36	200	3
	Ducha	38	100	5
	Hidromasaje	36	600	5
	Lava brazos	40	30	25
	Lavapiés	40	35	20
	Para esterilizar	85 a 90	---	---
	Hoteles y restaurantes	Bañera	38	200
Ducha	38	60	6	
Lavamanos	35	6	1	

El consumo de las viviendas se obtiene multiplicando el consumo unitario, de la Tabla 2.5, por el número de personas totales que ocupan la vivienda. En caso de que el número de usuarios no esté definido, se considerará 1,5 personas por cada dormitorio que se indique en el proyecto de vivienda. Para la presente investigación se tendrá como referencia una familia promedio de 4 personas. El diseño del acumulador de agua se calcula para una capacidad de 120 litros [56].

El cálculo de la temperatura diaria media mensual de agua fría se calcula para los valores máximos y mínimos del medio ambiente según la siguiente fórmula.

$$T_{AF} = \frac{T_{AmbMax} + T_{AmbMin}}{2} - \frac{T_{AmbMax} - T_{AmbMin}}{2} \cdot h \cdot \cos\left(2\pi \frac{n-2}{12}\right) \quad (2.22)$$

Donde T_{AF} es la temperatura del agua fría que ingresa al equipo, T_{AmbMax} es la temperatura diaria mensual máxima registrada, T_{AmbMin} es la temperatura diaria mensual mínima registrada, h es un valor variante 1 para el hemisferio norte y -1 en el hemisferio sur, n es el mes del año siendo enero el mes 1.

Los valores de las temperaturas mínimas, medias y máximas de las regiones se presentan en la tabla 2.6, basada en datos estadísticos del INHAMI.

Tabla 2.6: Datos de temperatura media, máxima y mínima para sitios seleccionados. Datos proporcionados por el INHAMI [26].

ESTACION		VALOR ANUAL			
		Temperaturas Extremas °C			Humedad Relativa
COD / NOMBRE	PROVINCIA	Mínima	Media	Máxima	Media %
M002 La Tola	PICHINCHA	9,41	15,57	22,82	76,58
M003 Izobamba	PICHINCHA	6,33	11,99	18,37	78,75
M004 Rumipamba	COTOPAXI	8,74	14,03	19,85	75,44
M005 Portoviejo	MANABI	21,13	25,11	30,75	76,98
M006 Pichilingue	LOS RIOS	21,53	24,95	29,49	82,96
M007 Rocafuerte	NAPO	22,07	25,72	31,25	86,58
M008 Puyo	PASTAZA	17,12	20,77	26,09	87,13
M024 Quito-Iñaquito	PICHINCHA	9,62	14,94	21,18	68,12
M026 Puerto Ila	PICHINCHA	21,30	24,38	28,32	87,96
M031 Cañar	CAÑAR	7,46	11,93	16,84	76,35
M033 La Argelia Loja	LOJA	12,16	16,17	21,61	74,35
M037 Milagro	GUAYAS	21,86	25,39	29,44	79,24
M051 Babahoyo	LOS RIOS	33,15	25,04	29,05	76,46
M103 San Gabriel	CARCHI	6,73	12,47	17,55	78,81
M105 Otavalo	IMBABURA	8,39	14,71	21,89	80,44
M133 Guaslan	CHIMBORAZO	8,34	13,97	15,04	63,52
M138 Paute	AZUAY	11,04	17,41	24,49	78,99
M153 Muisne	ESMERALDAS	21,37	25,06	27,40	85,61
M221 Galapagos	GALAPAGOS	21,54	24,25	27,92	81,84
M258 Quero Chico-Ambato	TUNGURAHUA	7,78	12,70	18,77	76,02
MA2V Guayaquil	GUAYAS	22,38	26,10	30,63	73,86

El INHAMI ha desarrollado un mapa de isotermas del país que se recoge en esta normativa. El mapa del INAMHI divide al país en 12 zonas térmicas de acuerdo a la temperatura media anual registrada, como se observa en la figura 2.29 [57].

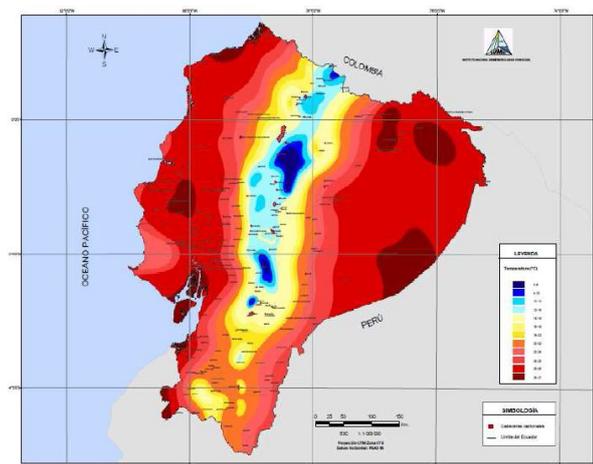


Figura 2.29: Mapa de temperatura media multianual serie 1965-1999 [26].

En base al mapa térmico proporcionado por el INAMI mencionado anteriormente, se ha agrupado al país en seis zonas térmicas, con la finalidad de presentar los datos de forma sencilla. Los rangos de temperatura para estas zonas térmicas se observa en la Tabla 2.7. Además, en la Tabla 2.8 se observa algunos datos de ciudades determinadas [58, 57].

Tabla 2.7: Rangos de temperatura de acuerdo a las zonas climáticas, según el mapa del INHAMI[26]

Zona Climática	Rango de temperatura. Según datos del INHAMI
ZT1	6 - 10 [°C]
ZT2	10 - 14 [°C]
ZT3	14 - 18 [°C]
ZT4	18 - 22 [°C]
ZT5	22 - 25 [°C]
ZT6	25 - 27 [°C]

El clima puede variar localmente dependiendo de algunos factores creando microclimas. Los aspectos que se deben considerar son: la altitud relativa del terreno y vientos formados por vegetación o edificios aledaños, emplazamiento dentro de la ciudad y proximidad a fuentes de agua [57]. La temperatura ambiente diaria media mensual de las capitales de las provincias, se presentan en la Tabla 2.28. Estos valores corresponden a temperaturas promedio del día central de cada mes, para su cuantificación se sigue un procedimiento estadístico. Los valores mostrados en la siguiente tabla fueron obtenidos de una base de datos mundiales [57, 58].

Tabla 2.8: Altura de referencia (m) y temperatura ambiente diaria media mensual (°C) para las capitales de provincia [26].

	Altura referencial	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ambato	2600	15	15	15	14	14	13	13	13	13	15	15	15
Azogues	3076	10	10	10	12	11	10	10	9	11	10	9	10
Babahoyo	5	25	26	26	26	25	24	23	23	24	24	24	26
Cuenca	2527	15	15	15	15	14	13	13	12	14	15	14	15
Esmeraldas	7	26	26	26	26	26	26	25	25	25	26	26	26
Guaranda	2668	14	14	14	14	14	13	13	13	13	14	15	14
Guayaquil	9	27	27	27	27	27	25	25	25	25	25	26	27
Ibarra	2228	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Latacunga	2785	13	13	13	13	13	12	12	12	12	13	13	13
Loja	2040	15	15	16	16	16	15	14	15	15	16	16	16
Macas	1050	20	19	20	21	21	20	19	20	20	20	20	20
Machala	4	27	27	27	27	27	25	25	25	25	25	26	27
Nueva Loja	299	28	27	28	24	24	23	22	23	23	28	28	28
Portoviejo	36	26	26	26	26	25	25	24	24	24	24	24	25
Francisco de Orellana	527	25	24	25	23	23	22	21	22	22	25	25	25
Vaquerizo Moreno	6	25	25	25	25	25	23	22	21	21	22	22	23
Puyo	950	21	20	21	21	21	20	19	20	20	21	21	21
Quito	2811	14	14	14	15	14	14	14	14	14	14	14	14
Riobamba	2796	13	13	13	13	13	12	12	12	12	13	14	13
Santa Elena	10	25	25	25	25	23	22	21	20	20	21	21	23
Santo	2178	22	22	23	23	22	22	21	21	21	21	21	21
Tena	527	25	24	25	23	23	22	21	22	22	25	25	25
Tulcán	2960	10	11	11	11	10	10	9	9	10	10	11	11
Zamora	8	25	25	26	25	23	22	21	20	20	21	22	23

De la tabla 2.6 y 2.8 se puede deducir que la temperatura promedio en las ciudades de la sierra es de 14°C. Al aplicar la ecuación 2.22, se obtiene una temperatura agua fría de aproximadamente 12°C en el transcurso del año con ± 2 grados centígrados.

2.4. Aspectos económicos de los sistemas ACS.

El estudio económico del sistema de inducción se realizó de acuerdo a la realidad del Ecuador en la actualidad. Los diferentes sistemas de calefacción que existen en el Ecuador, permiten el desarrollo de un estudio económico, para posteriormente determinar que sistema es el más económico.

Los sistemas de calefacción de agua se clasifican según el tipo de energía que utilizan para producir calor. Es así que el costo de la energía sea esta electricidad, por combustión o solar es el parámetro más importante en el desarrollo de un estudio económico.

Por otra parte se estima que en el Ecuador existen alrededor de un millón de duchas que según la Empresa Eléctrica de Quito consumen alrededor de 55,6 kWh por mes es decir que 1,8 kWh por día. Mientras que los calefones que utilizan GLP en el Ecuador llegan a 180 000, con un consumo promedio de 1,5 a 2 cilindros de GLP de 15 kilogramos al mes.

El precio del GLP tanto como el de la energía eléctrica tiene un costo de 3,00\$ y 0,04\$ respectivamente. El reducido costo de estos productos de primera necesidad se debe a que el gobierno nacional realiza un subsidio a estos. La tarifa de electricidad presenta un subsidio llamado “Tarifa de Dignidad” a los usuarios que no sobrepasen los 110 kWh al mes en el consumo eléctrico a nivel residencial. De igual manera el GLP presenta un subsidio de alrededor de 16 dólares por cilindro de gas de 15 Kg.

El costo de la electricidad en el país es de 9,66 centavos de dólar por kWh. A las personas que sobrepasen la tarifa de dignidad. Mientras que el costo del GLP sin contar con el subsidio del estado tendría un valor aproximado de 18 dólares (Costo a nivel Internacional) [5]. Estos datos revelan que el país realiza un subsidio de 500 millones de dólares anuales en luz eléctrica y un estimado de 800 millones de dólares en GLP con un subsidio total de productos de primera necesidad de más de 1300 millones de dólares anuales [9]. A esto se debe sumar las importaciones de gas y electricidad que realiza el estado para satisfacer la demanda de la población ecuatoriana.

CAPÍTULO 3

Metodología

3.1. Modalidad de investigación

El presente proyecto se llevó a cabo a través de una investigación aplicada, bibliográfica, experimental y de campo.

3.1.1. Investigación aplicada

La Investigación aplicada fue necesaria ya que se realizó un estudio sistemático de diferentes teoremas y ecuaciones que analizadas en forma detallada permitieron tener una mejor visión de la investigación para proponer la construcción de un prototipo de sistema de calefacción a través de inducción magnética.

3.1.2. Investigación bibliográfica

Una parte importante de la investigación se basa en conceptos tomados de diferentes libros y publicaciones realizadas por diversos autores, que permitieron encontrar y reforzar las bases y conceptos para el desarrollo del proyecto.

3.1.3. Investigación experimental

La investigación experimental en el proyecto fue esencial para comprobar el funcionamiento del sistema y poder realizar la implementación del prototipo del sistema de calefacción por inducción electromagnética.

3.1.4. Investigación de campo

La investigación de campo fue necesaria ya que en base a datos estadísticos de los habitantes del país que usan combustibles fósiles para el calentamiento de agua, se pudo concluir las personas beneficiadas con el desarrollo de la investigación.

3.2. Recolección de la información

Para la realización del proyecto “SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE AGUA POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA EL USO DOMÉSTICO” la información necesaria como teoremas y ecuaciones que analizados en forma detallada permitieron el desarrollar la investigación fueron recolectadas a través de libros, revistas, papers y otros documentos. La información sobre precios de combustibles y nuevos proyectos hidroeléctricos fueron tomados de la pagina web oficial del Ministerio de Energía Renovable. Mientras que la información necesaria para la construcción de sistemas de agua caliente fue basado en el documento NTE INEN 1912:92.

3.3. Procesamiento y análisis de datos

Para la puesta en marcha de proyecto, el procesamiento y análisis de los datos se llevó a cabo los siguientes parámetros.

Revisión crítica de la información bibliográfica obtenida de acuerdo a los parámetros requeridos.

Lectura, clasificación y análisis de artículos relacionados para ampliar la investigación.

Una vez que se realizó la revisión y el análisis de la información acerca de teoremas y demás ecuaciones se procedió al desarrollo practico del sistema de calefacción de agua por inducción electromagnética para el uso doméstico a través de un prototipo.

3.4. Desarrollo del proyecto

Para el desarrollo del proyecto fue necesario realizar:

Recolección de información acerca de ondas electromagnéticas en libros, revistas, papers y demás documentos.

Determinación de los requerimientos del sistema de calefacción por inducción electromagnética a partir de las necesidades de los usuarios.

Análisis de los diferentes circuitos de inducción que existen en la fabricación de sistemas de inducción con la finalidad de seleccionar el sistema más adecuado para la implementación del prototipo de inducción magnética.

Cálculo y dimensionamiento de los diferentes elementos de los circuitos que constituyen el prototipo.

Simulación del inversor a utilizar a través de software MATLAB/SIMULINK para la recolección de datos de tiempos y niveles de potencia de trabajo del sistema de calefacción de agua por inducción electromagnética para el uso doméstico.

Desarrollo de las diferentes placas para la implementación del prototipo.

Programación del dispositivo 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 para el uso doméstico.

Implementación práctica y recolección de resultados de prototipo de un sistema de calefacción de agua por inducción electromagnética para el uso doméstico.

CAPÍTULO 4

Desarrollo de la propuesta

En el presente apartado se describe la propuesta de desarrollo e implementación práctica de un prototipo de calentamiento de agua basado en el fenómeno de inducción magnética. Inicialmente, se enumeran los criterios de diseño y dimensionado del dispositivo de inducción magnética. Posteriormente, se procede a la realización de los cálculos justificativos de los diferentes elementos de los circuitos electrónicos, que componen el sistema de calentamiento por inducción magnética, y de las simulaciones con ayuda de la herramienta informática MATLAB/SIMULINK. En el tercer subapartado, se presenta una descripción detallada de la implementación experimental del prototipo diseñado. Finalmente, se presenta una evaluación del comportamiento energético de diferentes sistemas de calentamiento de agua.

4.1. Factibilidad

4.1.1. Técnica

El desarrollo del proyecto es técnicamente factible, debido a que los elementos electrónicos utilizados para la elaboración del prototipo planteado son comerciales o existe los materiales adecuados para su construcción y se los puede adquirir dentro del país.

Matlab es uno de los software más utilizados a nivel de ingeniería para la simulación de señales tanto eléctricas como electrónicas, de este existen diversos tutoriales para su uso tanto en libros como en la web.

Arduino es dispositivo de hardware libre, del cual existen muchos proyectos desarrollados en la web con su código y conexiones respectivas.

4.1.2. Económica

El desarrollo del proyecto no representa grandes gastos y se encuentran al alcance del investigador. Los elementos electrónicos y recursos bibliográficos a utilizar son fácilmente accesibles en el país y no ha sido necesaria ninguna exportación, sin incurrir en gastos adicionales.

4.1.3. Bibliográfica

La información necesaria para el desarrollo del presente proyecto se encuentra tanto en libros, revistas científicas, tesis de postgrado, investigaciones y publicaciones técnicas relacionadas al tema. La base de datos a la cual tiene acceso la Universidad hace fácil la recolección de información para el desarrollo de el proyecto.

4.2. Criterios de diseño y dimensionado de los sistemas de CPI

Un sistema de calentamiento por inducción, utiliza el principio de electromagnetismo para transformar la energía eléctrica en energía térmica. Cuando circula una corriente eléctrica por una bobina, enrollada en un material conductor, éste tiende a calentarse, debido a la aparición de corrientes parásitas inducidas. La intensidad del campo magnético variable depende de la intensidad de la corriente que circule por la bobina y del número de vueltas. Por otra parte, la potencia entregada por el campo magnético al material inducido es proporcional al cuadrado de la intensidad de las corrientes parásitas y se manifiesta en forma de calor. El suministro de energía se conforma por diferentes configuraciones y topologías dependiendo de la frecuencia de operación, como se describe en el capítulo 2. Si la frecuencia de carga esta debajo de los 200 Hz, el dispositivo de inducción magnética se alimenta directamente desde la fuente de tensión y si la frecuencia es mayor a 500 Hz, es necesario construir e introducir circuitos RLC .

La frecuencia de operación será definida en función de la bobina inductora. La obtención de altas frecuencias exige la utilización de un sistema de inversor que conmute a altas velocidades. La frecuencia de resonancia coincide con el valor de máxima transferencia de potencia [32].

El diseño y dimensionado de los diferentes componentes del sistema de calentamiento por inducción magnética se ha realizado para un consumo de 120 litros diarios, correspondiente al consumo habitual de una familia tipo en el Ecuador.

Según datos del INEC, Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, la familia promedio del hogar ecuatoriano es de 3,9 personas. A efectos del cálculo se ha considerado 4 personas por familia. La norma ecuatoriana de construcción del año 2008, NEC-11-16.6.2, especifica que el consumo promedio diario de agua caliente sanitaria de una persona en el Ecuador es igual a 30 litros. Un sistema de calentamiento de agua para un acumulador de 120 litros necesitaría una energía de aproximadamente de 5 kWh, para pasar de una temperatura ambiente de 26°C a una temperatura de consumo de 60°C. Por lo tanto, el diseño y dimensionado de los diferentes parámetros que componen el circuitos de potencia del sistema CPI sera de un 1kW, debido a que la intensidad máxima que entrega una entrada monofásica varia entre 8A-12A, el prototipo se conecta a una tensión nominal de 110 V, valor de tensión en los domicilios del Ecuador.

El sistema de calentamiento por inducción magnética de agua caliente tiene una potencia de 1 kW y consta de los siguientes elementos:

- Una fuente de alimentación monofásica
- Un convertidor ac/dc, que trasforma la señal alterna de fuente de alimentación en una señal continua.
- Un inversor serie de puente completo, que proporciona una fuente alterna de alta frecuencia.
- Un circuito resonante o circuito tanque RLC serie, que permite subir el nivel de tensión e intensidad del inversor.
- Una carga o inductor, genera los campos magnéticos variables para inducir al material a calentar.
- Un circuito de desconexión, depende de las variables a controlar, en este caso el control de la frecuencia del inversor resonante y la temperatura del agua, [49].

El control de temperatura se encarga de limitar la temperatura del agua, evitando así que el agua se caliente demasiado para el uso doméstico.

Se considera que el nivel máximo de temperatura oscilará entre 50-60 grados centígrados. En el presente proyecto, se realizará un control de frecuencia que, en base a la temperatura desconectará la fuente de alimentación para evitar que el circuito de inducción entre en resonancia y se produzca un sobrecalentamiento.

El esquema del prototipo de sistema de calentamiento por inducción de agua sanitaria se presenta en la figura 4.1 [59, 60, 48].

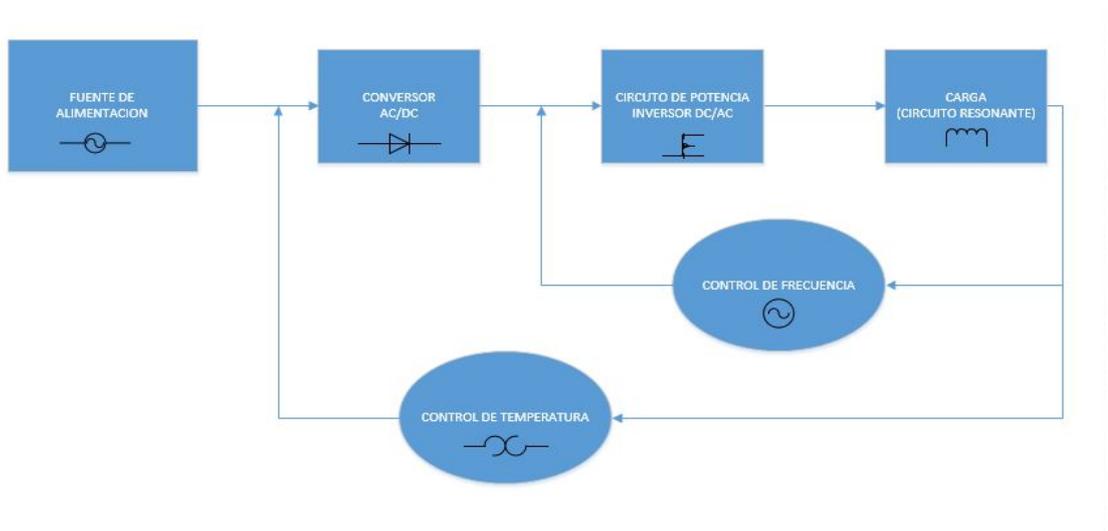


Figura 4.1: Diagrama de bloques del sistema CPI de agua [Investigador basado en [17]].

Las diferentes etapas que constituyen el prototipo del sistema calentamiento por inducción magnética de agua caliente sanitaria establecen la necesidad de realizar las siguientes fases de diseño y dimensionado:

- Selección de la resistencia equivalente .
- Dimensionado del circuito de potencia.
 - Selección del filtro de entrada
 - Dimensionado del rectificador de entrada
 - Dimensionado del filtro del inversor
 - Dimensionado del circuito resonante
 - Dimensionado de los dispositivos de conmutación
- Diseño de la forma del inductor.
- Diseño de control por temperatura.

4.3. Diseño y dimensionado del prototipo de CPI

Los componentes del prototipo propuesto del sistema de calentamiento por inducción de agua caliente para el uso doméstico se detalla en la figura 4.2.

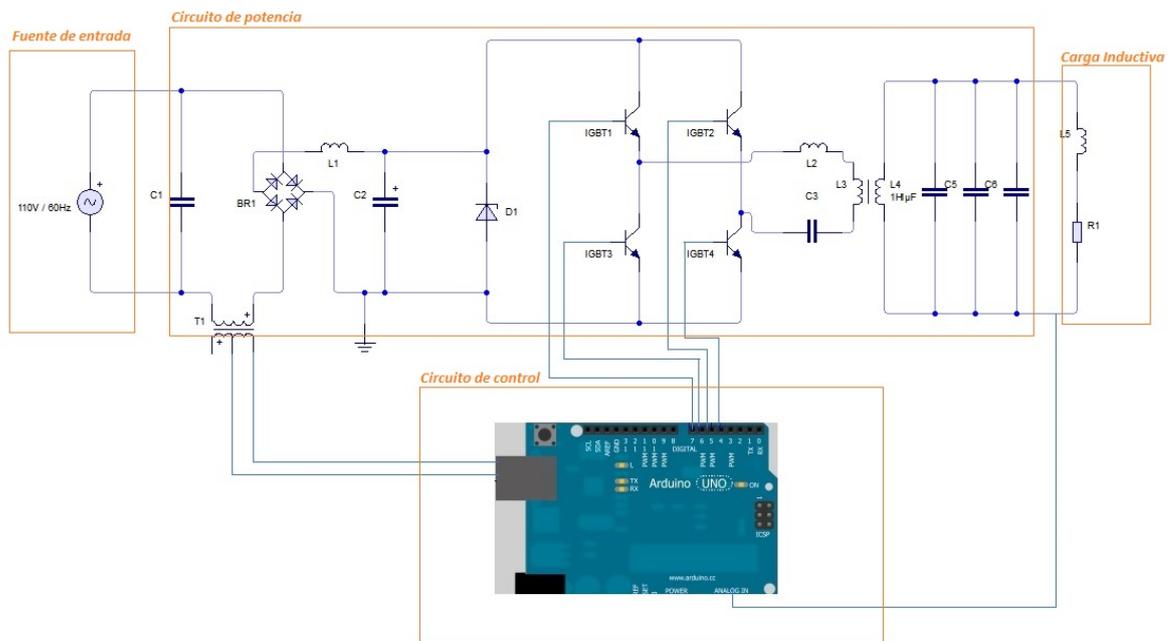


Figura 4.2: Componentes del sistema de calentamiento por inducción propuesto [Fuente investigador].

En la figura 4.2, se presenta el circuito de calentamiento por inducción implementado. Se observan las diferentes etapas que constituyen el prototipo. Cada una de las etapas del circuito consta de varios componentes que serán dimensionados en los siguientes apartados.

Es importante indicar que la fuente de alimentación será un enchufe doméstico de 110 V y 60 Hz, correspondiente a los valores nominales de tensión y frecuencia en el país. En caso de necesitar mayores niveles de tensión, se podría emplear la tensión de 220 V. La tensión de 220V es muy empleada en diferentes países del mundo y caracteriza a las nuevas instalaciones para las cocinas de inducción en el Ecuador.

4.3.1. Dimensionado de la resistencia equivalente

Uno de los aspectos fundamentales en el diseño del sistema de inducción es el cálculo de la resistencia equivalente. El cálculo de la resistencia equivalente está asociado al efecto pelicular, descrito en el capítulo 2. El flujo neto de corriente solo se concentra en la superficie del conductor.

Para piezas con geometría cilíndrica, la expresión se puede escribir de la siguiente manera [38]:

$$K_R = 1 - e^{-\frac{2r}{\delta}} \quad (4.1)$$

$$R_{eq} = K_R N^2 \rho \frac{2\pi r}{\delta l} \quad (4.2)$$

Donde

N es el número de vueltas del inductor de calentamiento.

l es la longitud de la bobina.

ρ la resistividad del material.

r es el radio de la pieza cilíndrica.

δ es la profundidad de penetración del flujo magnético.

Es importante indicar que la potencia disipada para un valor de corriente i de un inductor con una longitud l determinada será directamente proporcional a R_{eq} . En este sentido, se pueden extraer las siguientes consideraciones:

- Las bobinas con mayor número de espiras transfieren más energía.
- La energía disipada, aumentará cuando mayor sea la resistividad del material. Así se explica que en materiales como el acero se disipe mayor energía a medida que aumente su temperatura (dentro de un rango limitado por la temperatura de Curie), puesto que también aumenta la resistividad.
- La disminución de la profundidad de penetración hace aumentar la energía disipada, por eso para calentar materiales con una elevada conductividad, es necesario elevar la frecuencia, con el objetivo de disminuir la profundidad de penetración.

La resistencia equivalente que presenta el material conductor es muy importante para el cálculo de las diferentes etapas del circuito, puesto que es donde se disipará la potencia. Se aumenta la potencia disipada cuando se alcanza la temperatura de Curie, puesto que se reduce la permeabilidad magnética y, por tanto, aumenta la profundidad de penetración, esto sucede ya que se trabajo con altas frecuencia superior a los 100Khz. En la Tabla 4.1, se presenta los diferentes valores de resistencias para diferentes materiales conductores, semiconductores y aislantes a una temperatura ambiente entre 17°C a 20°C [61]. La energía disipada aumenta cuando se alcanza la temperatura de Curie, ya que al trabajar a altas frecuencia la disminución de la permeabilidad magnética de un material se reduce aumentando la resistividad del material por lo tanto se obtiene una profundidad de penetración más fuerte en la superficie del material.

Tabla 4.1: Resistencia equivalente de distintos materiales.

Material	Resistividad ($\Omega\cdot m$)	Material	Resistividad ($\Omega\cdot m$)
Conductores		Semiconductores	
Aluminio (Al)	2.82×10^{-8}	Carbono (C)	3.5×10^{-5}
Cobre (Cu)	1.72×10^{-8}	Germanio (Ge)	0.5^a
Oro (Au)	2.44×10^{-8}	Silicio (Si)	$20-2300^a$
Hierro (Fe)	9.7×10^{-8}	Aislantes	
Mercurio (Hg)	95.8×10^{-8}	Mica	$10^{11} - 10^{15}$
Plomo (Pb)	22×10^{-8}	Vidrio	$10^{10} - 10^{14}$
Nicromo (aleación)	100×10^{-8}	Goma	$10^{13} - 10^{16}$
Plata (Ag)	1.59×10^{-8}	Teflón	10^{16}
Tungsteno (W)	5.6×10^{-8}	Madera	3×10^{10}

El material conductor empleado en la resistencia del circuito de la figura 4.2 es de hierro, con una resistividad, de $9,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ según la tabla 4.1, y 24 centímetros de longitud, colocado dentro de una bobina de 12 vueltas con una longitud de 65 cm, lo cual da como resultando una resistencia de 1 Ohmio al aplicar la ecuación 4.2.

4.3.2. Dimensionado del circuito de potencia

El circuito de potencia se compone de diferentes elementos y circuitos, especificados a continuación:

- Un filtro de entrada, encargado disminuir la interferencia electromagnética originada por la red de alimentación.
- Un transformador, que permite tener una tensión óptima de alimentación para el circuito de control y el circuito de disparo.
- El rectificador de onda completa, funciona como un convertidor ac/dc, ya que la entrada del inversor requiere un tensión continua.
- El inversor, permite tener una mayor eficiencia del circuito y mejora el factor de potencia. El inversor resonante está conformado por un puente completo de IGBT's. Estos conmutadores de electrónica de potencia son los encargados de modificar la amplitud y frecuencia de la señal de corriente y tensión a la salida del inversor.
- El circuito tipo tanque, un condensador y una bobina, permiten, que el circuito entre en resonancia y se de la máxima función de transferencia a la bobina de inducción, que se encarga de generar los campos magnéticos.

A continuación, se describe el diseño de cada una de las etapas que conforman el circuito de potencia del prototipo propuesto.

4.3.2.1. Selección del filtro de entrada

En la figura 4.3, se muestra el circuito de entrada del sistema, el filtro capacitivo es seleccionado de acuerdo a las características del circuito de potencia y de la aplicación del inversor resonante. El filtro se encarga de disminuir la interferencia electromagnética. En este caso, por la forma del circuito de potencia y el inversor resonante, el valor que se toma como referencia es de un condensador, C_1 , de $2,5\mu F$, valor del condensador habitualmente usado en sistemas de CPI, ya que en la entrada se tiene una baja frecuencia, condicionando el condensador ha actuar como un circuito abierto [62]. Para el el calculo de este capacitor se toma el criterio de la reactancia capacitiva del circuito en un sistema de baja frecuencia donde el valor del capacitor es:

$$C = \frac{1}{2\pi F \cdot X_c} \quad (4.3)$$

Debido a que el valor de la reactancia capacitiva es alta lo cual se estimo en un valor de los $1K\Omega$, dando como resultado un capacitor en el rango de los μF .

4.3.2.2. Dimensionado del rectificador de entrada

El diseño del rectificador se basa en la tensión de entrada de la red y en la potencia de trabajo correspondiente a su máximo valor nominal. La energía necesaria para el calentamiento del agua se calcula mediante la formula [14]:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (4.4)$$

Q = Energía.

m = masa en kilogramos de agua.

c =Calor específico del agua $1Kcaloria/1Kgramo^* \text{ } ^\circ C$.

ΔT =Variación de temperatura.

La masa de agua, m , para el diseño se justifica en función del consumo diario de agua caliente por persona de la norma NTE INEN 1912:92, que establece un consumo de 30 litros diarios por personal. El número de habitantes promedio en una vivienda en el Ecuador es de 4 personas, resultando un total de 120 litros de promedio para cada familia del Ecuador. El valor de la variación de temperatura, ΔT , es de 40° , ésta se basa en la norma NEC-11-16.6.2, que especifica el valor de la temperatura de agua caliente del acumulador, no debe superar los $60^\circ C$, pasando de una temperatura ambiente 20° a una temperatura de consumo de 60° . Los valores especificados anteriormente se aplican en la formula 4.3, obteniéndose

un consumo de 20096,64 kJ, equivalente a 5,5824 Wh de energía, necesarios para el calentamiento de 120 litros de agua hasta alcanzar una temperatura de 60°C. Un sistema de calentamiento eléctrico de agua para el uso doméstico con una potencia de 1 kW suministraría la energía necesaria para calentar 120 litros a 60°C en 5 horas aproximadamente. La tensión nominal es de 110V, por tanto, la intensidad que deberá suministrar la fuente de tensión se calcula con la siguiente fórmula:

$$I_{in} = \frac{P}{V_{nom}} = \frac{1000W}{110V} = 9,09A \quad (4.5)$$

Para el diseño del puente rectificador, el cálculo de la tensión pico inverso se realiza con la siguiente fórmula [3].

$$V_{pico-inv} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{nom} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 110V \cdot \sqrt{2} = 311V \quad (4.6)$$

La intensidad del rectificador se calcula en función de la intensidad nominal [41]:

$$I_{rec} = 1,5 \cdot I_{in} = 1,5 \cdot 9,09A = 13,63A \quad (4.7)$$

En la ecuación 4.7, el valor de 1,5 corresponde a un factor de seguridad, el cual esta relacionado directamente con la tolerancia resistiva del material. El resistividad del hierro posee una tolerancia de 30 % a 60 % dependiendo de la temperatura. Por lo que se ha elegido una tolerancia aproximada al 50 %, correspondiente a un coeficiente de seguridad de 1.5.

La intensidad del rectificador es igual a 13,63 A. Se ha seleccionado un puente de diodos comercial de 15 A, como se observa en la figura 4.3.

4.3.2.3. Dimensionado del filtro del inversor

Cuando se realizan las conmutaciones del inversor se generan corrientes armónicas, que hacen necesaria la conexión de un filtro LC para absorber estas corrientes y mejorar el factor de potencia del sistema. El mencionado filtro también se encarga de evitar que las altas frecuencias generadas por el inversor retornen a la red. Las corrientes armónicas generadas por el conmutador del inversor se encuentra en un rango de 20KHz a 50KHz, haciendo necesario la introducción de un filtro pasa bajo. [63] La frecuencia de corte seleccionada para el diseño del presente prototipo será de 20KHz. Las frecuencias de corte también se conoce como frecuencias limite. Se caracterizan por proporcionar una intensidad de corriente 7 veces el valor de la corriente a la frecuencia de resonancia; y una potencia reducida a la mitad de la de resonancia, puntos de media potencia [64]. El valor del filtro se calcula con ayuda de la formula 4.7.

$$f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (4.8)$$

Para el cálculo de la inductancia de la bobina se fija un valor de referencia de la capacitancia del condensador, igual a $10\mu F$, valor de referencia de cálculos para una frecuencia de corte de 20kHz. Al despejar L de la ecuación 4.8 se obtiene [41]:

$$L = \frac{1}{C \cdot (f_c \cdot \pi)^2} = \frac{1}{10\mu F \cdot (20KHz \cdot \pi)^2} = 25,33\mu H \quad (4.9)$$

En la figura 4.3, se presente un esquema detallado de la fuente de alimentación, el rectificador y el filtro del inversor. El diodo zener que se coloca en paralelo al condensador C2 tiene como objetivo regular la tensión de entrada del circuito inversor, con un tensión máxima de 12 V, voltaje de activación de los integrados de conmutación como IGBT'S y MOSFET

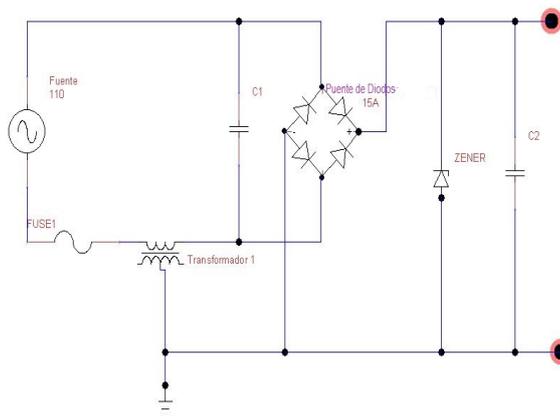


Figura 4.3: Esquema del circuito de entrada circuito ac/dc [Fuente investigador].

4.3.2.4. Dimensionado del circuito resonante

El diseño del inversor serie de onda completa depende de la potencia en régimen permanente del sistema de calentamiento de agua, 1000W, y de la frecuencia de resonancia. La frecuencia de resonancia depende del tipo de material, la potencia y la aplicación. La frecuencia de resonancia es variable debido a la profundidad de penetración, que a su vez depende del tipo de material. En la figura 4.4, se presenta un esquema detallado del diseño del circuito tanque y de los dispositivos de conmutación.

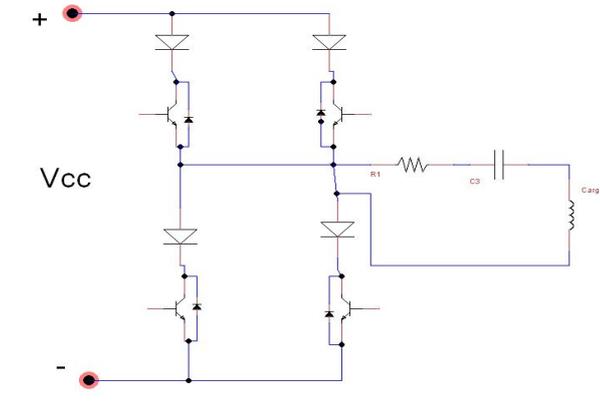


Figura 4.4: Circuito inversor serie resonante de puente completo [Fuente investigador].

Para evitar la aparición de armónicos, la frecuencia de resonancia debe ser superior a la frecuencia de audio 20 kHz. En el prototipo propuesto, la frecuencia de resonancia es de 28 kHz [41].

Un valor de frecuencia de resonancia más cercano a la frecuencia del corte permite que el dispositivo entre en resonancia en un tiempo más corto. El valor seleccionado de la frecuencia de resonancia está limitado por la capacidad de la tarjeta Arduino de generar los pulsos de conmutación [41].

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (4.10)$$

En la ecuación 4.10 f_o es la frecuencia de resonancia.

Para calcular la inductancia respectiva se asume un valor de capacitancia de 0,50 uF, valor de referencia en el cálculo, si se despeja L de la ecuación (4.10) se obtiene [41]:

$$L = \frac{1}{C(2f_o \cdot \pi)^2} = \frac{1}{0,50\mu F(2 \cdot 28KHz \cdot \pi)^2} = 97,91\mu H \quad (4.11)$$

Para determinar la tensión del condensador, primero se calcula la intensidad del circuito resonante con ayuda de la ecuación 4.12.

$$I_{res} = \frac{2\pi P}{V_{nom}} = \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 1000W}{110V \cdot \sqrt{2}} = 40,31A \quad (4.12)$$

Asimismo, con ayuda de la siguiente formula se procederá al cálculo de la tensión del condensador.

$$C = \frac{I_{res}}{V_c \cdot 2\pi f_o} \quad (4.13)$$

Despejando de 4.13 , se calcula el valor de V_c , tensión del condensador del circuito tanque

$$V_c = \frac{I_{reson}}{C \cdot 2\pi f_o} = \frac{40,31A}{0,50 \cdot \mu F \cdot 2\pi \cdot 28000 \cdot Hz} = 695,697V \quad (4.14)$$

La tensión V_c es multiplicado por un factor de seguridad igual a 1,5. El condensador de 0,50 μF deberá tener una tensión nominal de 1000 Vac.

4.3.2.5. Dimensionado de los dispositivos de conmutación

Para el dimensionamiento de los dispositivos de conmutación se considera la intensidad de corriente máxima y la tensión entre el colector emisor, ya que este será el encargado que el dispositivo se sature y efectué las conmutaciones previstas.

$$I_{max} = I_{rec} \cdot \sqrt{2} = 13,63A \cdot \sqrt{2} = 19,28A \quad (4.15)$$

El cálculo de la tensión de los circuitos de conmutación se realiza en circuito abierto, se suma una tensión de salida del convertidor ac/dc más la tensión del condensador tipo tanque.

$$V_{ce_{max}} = V_{retif} + V_c = 110V \cdot \sqrt{2} + 695,697V = 851,26V \quad (4.16)$$

Los dispositivos de conmutación seleccionados responden parámetros de diseño descritos anteriormente con ayuda de las ecuaciones (4.14 y 4.15), de lo que puede elegir los dispositivos de conmutación que responden a éstas características como son: IGBT FGL40A120ND o MOSFET IRF-840, que pueden trabajar a altas frecuencias de conmutación y manejar altas potencias.

Los resultados de los valores obtenidos del diseño y dimensionado del filtro rectificador, puente rectificador, filtro del inversor, circuito tipo tanque y de los dispositivos de conmutación se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Resultados del diseño y dimensionado del circuito de potencia [Fuente investigador].

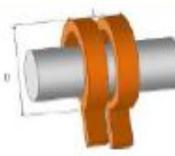
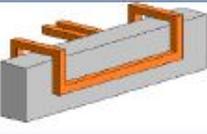
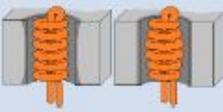
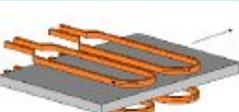
<i>Componentes</i>	<i>Valor de los Componentes</i>
C_1	2,5 μF
<i>Punte rectificador</i>	15A a 110V
C_2	10 μF
L_1	25,33 μH
C_{Tanq}	0,5 μF a 1000V
<i>IGBT</i>	20A 900V
L_{Equi}	13,5 μH

4.3.3. Diseño de la forma del inductor

Los inductores se diseñan en función de la potencia entregada por el inversor. El diseño y dimensionado del inductor es clave para conseguir un calentamiento óptimo. La bobina de trabajo o inductor es la responsable directa de la generación de los campos magnéticos en las proximidades del material a calentar. La correcta distribución del campo magnético hace posible realizar numerosos tratamientos térmicos. En general, los inductores tienen forma sencilla con sección cuadrada o redonda, pero al trabajar con formas de piezas complejas, se obtiene una mejor distribución del campo magnético. Tanto en el caso de formas complejas o simples de la bobina inductora, es necesaria la realización de un pre-análisis de la distribución del campo magnético. No obstante, durante la implementación y evaluación práctica de la bobina inductora, la distribución del campo magnético no necesariamente coincide con los resultados obtenidos en el pre-análisis.

Los distintos tipos de inductores se detallan en la siguiente Tabla 4.3. [4, 30] :

Tabla 4.3: Tipos de Inductores [32].

Nombre	Figura	Aplicación
Inductor senoidal cilíndrico de varias vueltas ($L \gg D$)		Calefacción continua de vares y crisol. Sección cuadrada o redonda del tubo. Carga Homogénea de la temperatura.
Inductor cilíndrico corto ($L < D$)		Utilizado para alta densidad de potencia, con calentamiento localizado. Sección redonda o cuadrada de tubo.
Inductor solenoide de Piso		Calefacción continua de tiras o palanquillas. El campo no es uniforme por lo que es más intenso en los bordes. Alta eficiencia en pequeños espacios.
Inductor tipo Horquilla		Endurecimiento de láminas en los bordes.
Inductor interno		Su calentamiento es no homogéneo. Tratamiento de huecos y agujeros.
Inductor de flujo transversal		Calentamiento continuo de tiras Flujo transversal calefacción muy eficiente

Recientemente, un nuevo tipo de inductor fue desarrollado por la compañía Cinco Celes, basado en un alto flujo calentamiento por inducción. El inductor CELINE, conformado de un material multicapa y devanado compuesto, genera un campo magnético de alta intensidad, con baja pérdida de conducción, permitiendo una amplia gama de piezas de trabajo: redondos o tochos cuadrados, tubos, planchas delgadas. Esta nueva tecnología presenta varias ventajas, por ejemplo, una alta densidad de potencia - entre 4-6 MW/m²-, una alta eficiencia (aproximadamente de 85 % por encima del punto de Curie) un limitado espacio requerido y amplias aplicaciones.

En la fabricación de la bobina hay que tener en cuenta que la potencia que se disipa en ella es bastante elevada. En un circuito típico, trabajando a frecuencia de red, una potencia de 5 kW exige que la fuente sea capaz de suministrar aproximadamente 16 Amperios.

Sin embargo, la intensidad que circula por la bobina deberá ser multiplicada por el factor de calidad del circuito, Q , que en los materiales magnéticos es de 10 aproximadamente como se indica en el capítulo 2 apartado 2.2.5.5, dando un resultado de aproximadamente 160 Amperios. El significativo incremento de la intensidad induciría a aumentar el diámetro del tubo, sin embargo, los valores proporcionados por cálculos matemáticos difieren con los cálculos los experimentales por lo que sería conveniente considerar otros factores que se ejemplifican a continuación. Para una intensidad de 160 Amperios, es necesario utilizar una bobina típica de 5 espiras con un tubo de cobre 6 mm de diámetro. La configuración habitual de la bobina típica es de 60 mm de diámetro, 60 mm de altura y una profundidad de penetración de 0.4 mm, que correspondería a una resistencia de la bobina de 5 m Ω . La bobina anteriormente descrita, con los datos anteriormente indicados, proporcionaría sólo una potencia máxima de 128 vatios, debido a la alta frecuencia de la intensidad y reducido valor de la resistencia. Esta potencia, nada despreciable, es necesario disipar, puesto que además la resistividad del cobre aumenta con la temperatura y, por tanto, incrementa la potencia. Se recomienda utilizar las bobinas de tubo de cobre de gran diámetro, el grueso de la pared importa poco, puesto que como se a visto que la profundidad de penetración suele ser muy baja [30, 36, 65]. Para el diseño de bobinas de calentamiento se suelen utilizar datos empíricos, de esta manera, se puede construir bobinas de geometría simple. Los parámetros mas importantes en tomar en cuenta para la construcción de una bobina son:

- El acople magnético, debido a que el funcionamiento es igual al primario de un transformador la eficiencia de acople es inversamente proporcional la distancia. Por lo que, la distancia entre el material y la bobina debe ser mínima para garantizar la máxima transferencia de energía
- La geometría del material a calentar define el tipo de bobina que se utiliza para conseguir un calentamiento extremadamente rápido.
- El material de construcción de la bobina, una resistencia baja evita pérdidas de potencia por el efecto Joule en el inductor, reduciendo la necesidad de utilizar sistemas de refrigeración en la bobina.

La inductancia de la bobina con núcleo de aire se calcula con la fórmula clásica de Wheeler [66]:

$$L = \frac{0.001 \cdot N \cdot 2D}{\frac{228d}{2} + 254l} \quad (4.17)$$

Donde:

L es la inductancia de Henry

D es el diámetro de la bobina en metros

l es la longitud de la bobina en metros

N es el número de vueltas.

Con ayuda de la formula 4.16 anteriormente mencionada, es posible calcular la longitud de la bobina, l , y el número de vueltas, N , conociendo los valores de la inductancia de la bobina, L , el diámetro de la bobina, D , y el diámetro del cable conductor, d . La inductancia predeterminada de la bobina es igual a 13,5 μH , mientras que la longitud del cable y el diámetro del cable conductor son de 140 cm y 4 mm , respectivamente. El cálculo se ha realizado con ayuda de una calculadora específica, la interfaz de la calculadora se presenta en la figura 4.5. La bobina diseñada para un calentador de 120 litros, tiene una longitud de 170 cm , y 45 vueltas, para una potencia 5 Kw .

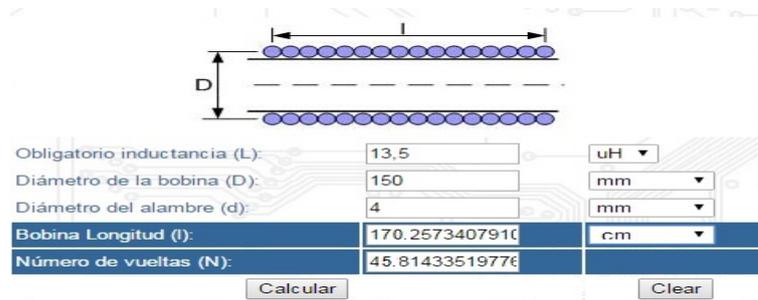


Figura 4.5: Calculadora de bobinas de aire [65].

4.3.4. Diseño del control por temperatura

Mediante el control de todos los parámetros eléctricos, propiedades del material a calentar y parámetros del equipo, es posible realizar un control de la temperatura del agua caliente. Sin embargo, un gran número de parámetros implican que se desarrolle el calentamiento inductivo, tales como:

- Material y geometría del inductor
- Los parámetros eléctricos de salida (potencia, frecuencia)
- Posición relativa del inductor contra la pieza a calentar.

Para el control de la temperatura existen muchos métodos aplicables. En este caso, se aplica un control proporcional integral derivativo, PID, de la temperatura para limitar la salida de corriente de la fuente de alta frecuencia y, de esta manera, controlar la conexión y desconexión del sistema. La temperatura es una señal variable externa análoga que al ingresar en el dispositivo, Arduino, es digitalizada.

Una vez conseguida una señal digital proveniente de la temperatura esta puede ser procesada mediante código, controlando el ancho de pulso de modulador PWM y permitir situarlo fuera de la zona de resonancia para así desconectar el sistema. En la figura 4.6, se presenta el diagrama flujo del proceso de desconexión del sistema mediante la temperatura.

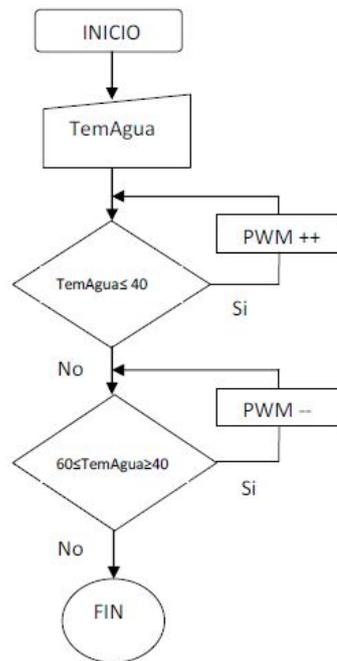


Figura 4.6: Diagrama de proceso del sistema de CPI para agua [Fuente investigador].

4.4. Respuesta dinámica del circuito de inducción

En este apartado, se presenta un estudio del comportamiento dinámico de los diferentes elementos que componen el circuito de potencia del prototipo propuesto. El sistema de calefacción de agua por inducción magnética para el uso doméstico, antes de su implementación, fue previamente simulado con el objeto de comprobar el correcto funcionamiento de las distintas etapas del sistema. La simulación del circuito se realizó en la plataforma informática MATLAB/SIMULINK.

El estudio del comportamiento dinámico consistió en la realización de las siguientes comprobaciones en base a simulaciones:

- Análisis de la respuesta dinámica del rectificador de entrada
- Análisis de la respuesta dinámica del circuito resonante
- Visualización de la curva de histéresis del material conductor

El diseño y dimensionado de los principales elementos del sistema CPI se realizó para un acumulador de 120 litros, correspondiente a una potencia eléctrica de 1000 vatios. El sistema de CPI modelado e implementado en la plataforma MATLAB/SIMULINK se presenta en el esquema simplificado de la figura 4.7.

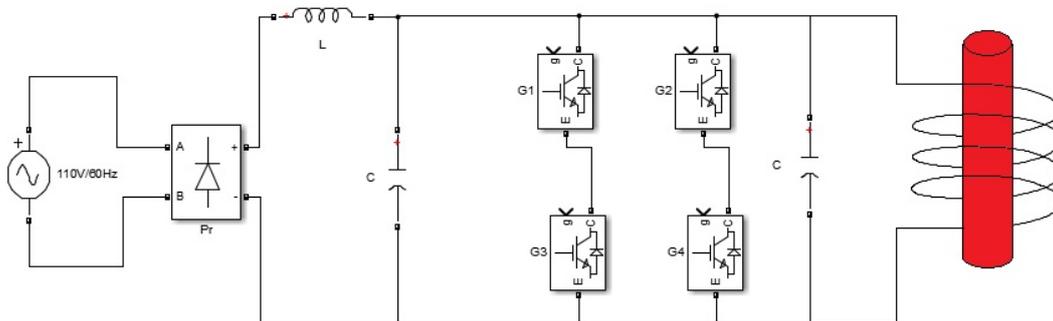


Figura 4.7: Circuito de inducción del prototipo de agua CPI para el uso doméstico [Fuente investigador].

4.4.1. Análisis de la respuesta dinámica del rectificador

El rectificador de entrada se compone de un puente rectificador de onda completa y un filtro tipo π que permite alisar el rizado de la onda senoidal rectificada, como se visualiza en la figura 4.8. Las características técnicas empleadas en la simulación del rectificador de entrada son:

- tensión nominal de entrada de 110 V ac
- frecuencia de 60 Hz
- intensidad máxima del puente rectificador de 15A.
- capacitancia de 4700 μF
- fitro LC 25,33 mH , 10 μF

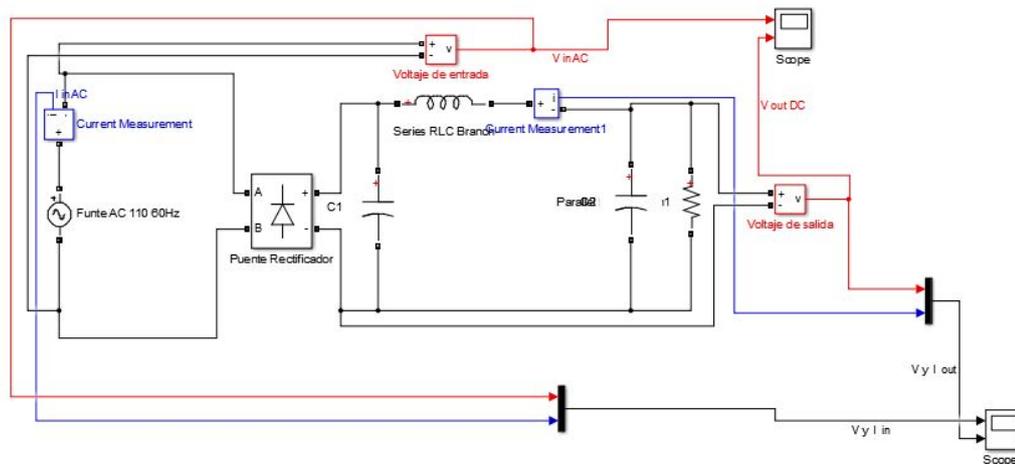
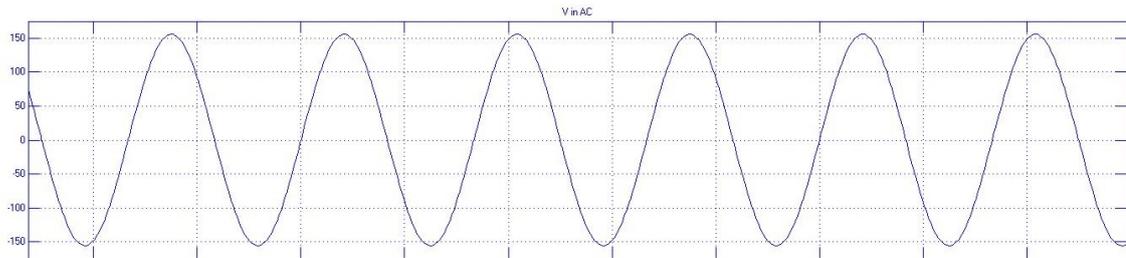
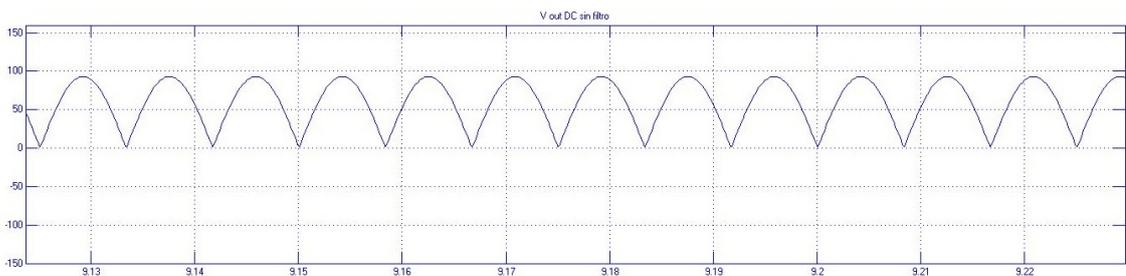


Figura 4.8: Circuito rectificador de onda completa [Fuente investigador].

En la figura 4.9, se presenta la onda de tensión de la fuente alterna de entrada, con una magnitud de 110 V y la onda semirectificada de salida igual a 87 Vdc. Se comprueba que el rectificador de entrada implementado se comporta de forma adecuada, ya que rectifica la onda de tensión alterna a una onda de tensión semirectificada en los valores de diseño establecidos.



(a) Tensión de entrada ac

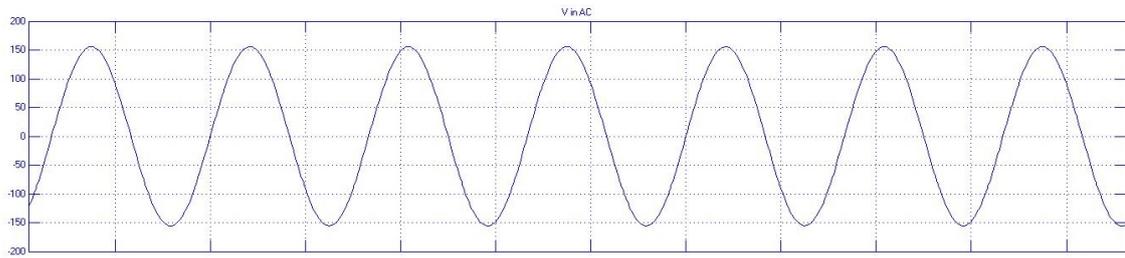


(b) Tensión de salida semirectificada

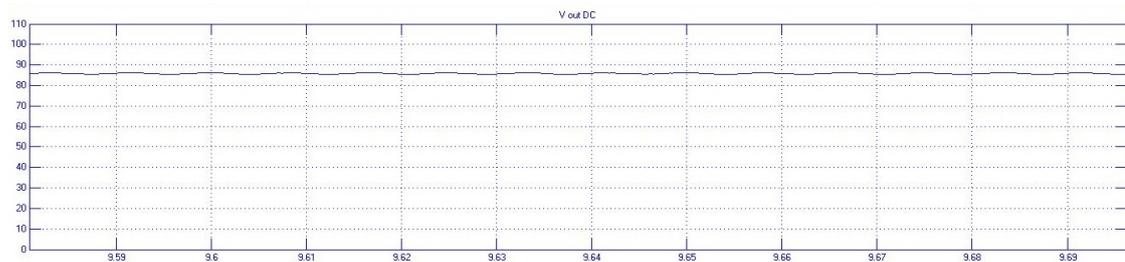
Figura 4.9: Onda de tensión de la entrada y salida del rectificador [Fuente investigador].

El condensador representa a un filtro capacitivo mientras que el inductor y el condensador se comportan con un filtro pasa banda. La combinación del filtro capacitivo y el filtro LC forman un filtro tipo π que alisa la señal de entrada, obteniendo una onda de tensión completamente continua.

La onda de tensión totalmente rectificada se obtiene gracias a la conexión de un condensador en paralelo con una capacitancia de 4700 nF y una bobina en serie con una inductancia de $25,33 \text{ uH}$. La adecuada combinación de los valores de inductancia y capacitancia permiten obtener una onda de intensidad prácticamente en fase con la onda de tensión de referencia. Así, se proporciona una onda completamente continua a la entrada del inversor. La onda de tensión continua presenta un valor eficaz de 87 V dc, como se muestra en la figura 4.10.



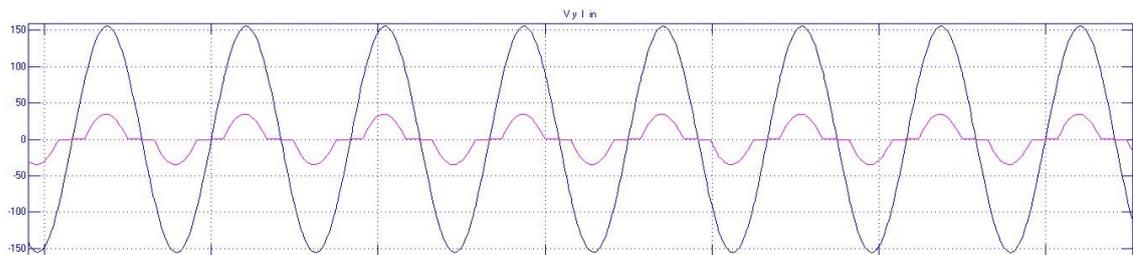
(a) Tensión de entrada ac



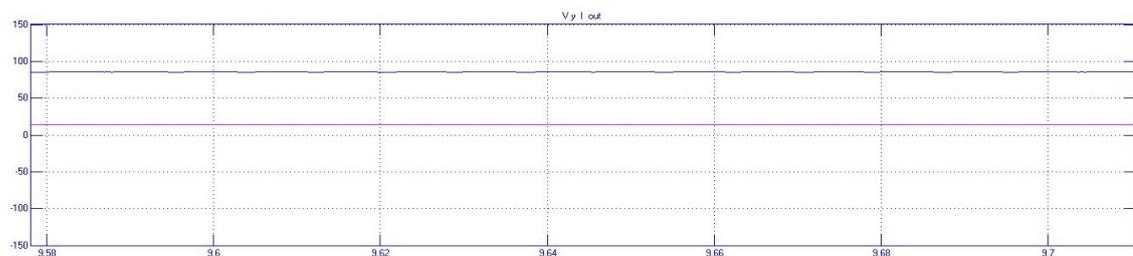
(b) Tensión de salida dc

Figura 4.10: Tensión de entrada ac y salida del rectificador dc [Fuente investigador].

En la figura 4.11, se observan las ondas de tensión e intensidad a la entrada y salida del rectificador. La intensidad de corriente alcanza un valor de 4,8 amperios para una tensión de 150 V en la entrada valor pico, mientras a la salida del rectificador se presenta una onda de tensión completamente rectificadas con una magnitud de 87 V dc y una intensidad de corriente de 4,8 amperios para una carga de carga 1Ω .



(a) Tensión e intensidad de entrada en ac.



(b) Tensión e intensidad de entrada en dc.

Figura 4.11: Tensión e intensidad de entrada y salida del convertidor ac-dc [Fuente investigador].

4.4.2. Análisis de la respuesta dinámica del circuito resonante

La onda rectificada se introduce a un inversor, encargado de variar la frecuencia y amplitud de las señales con la finalidad de crear una fuente alterna de alta frecuencia a la salida del inversor. La tensión de alta frecuencia que alimenta a la bobina de inducción, y generar un campo magnético variable de alta intensidad.

El análisis del circuito resonante fue simulado de dos formas, utilizando dos topologías de inversor. La topología de inversor resonante serie de puente completo y el inversor resonante de medio puente

Para efectos de simulación, el circuito resonante se simula a paso continuo con un tiempo discreto, configurado a través de toolbox «powergui». La configuración del tiempo de muestreo se realizó mediante la librería «powergui», como se muestra en la figura 4.12.

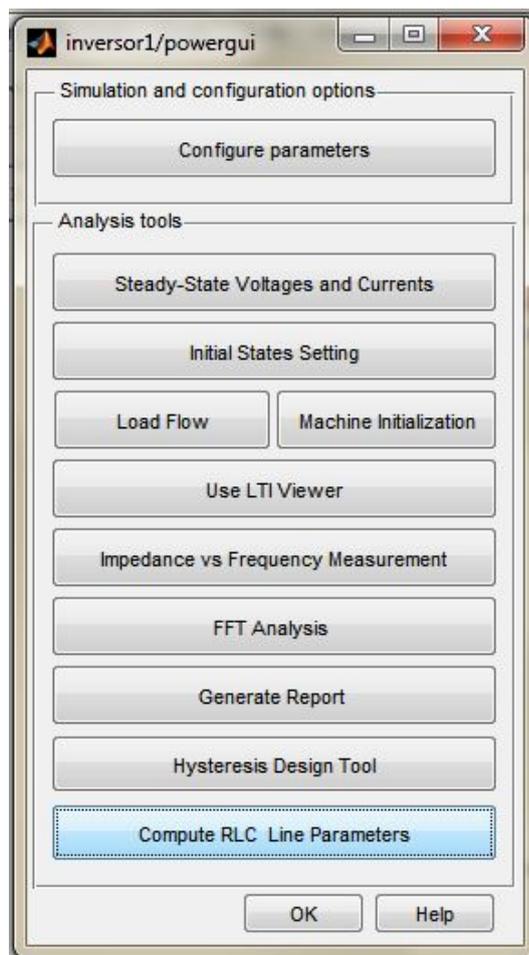


Figura 4.12: Configuración del parámetro de tiempo discreto [Fuente investigador].

4.4.2.1. *Inversor resonante serie puente completo.*

El circuito resonante con un inversor resonante de puente completo esta conformado de la siguiente manera.

- tensión nominal de entrada 80 Vdc, valor obtenido a la salida del rectificador.
- circuito inversor de puente completo con 4 IGBT's
- un generador de pulsos PWM, con tiempo de $4,4554e-6$ s
- una carga resonante RLC, 1Ω , $97,91\mu H$ y $0,5\mu F$, respectivamente.

Elementos calculados en el diseño del inductor en el apartado anterior.

En la figura 4.13, se presenta el esquema simulado del circuito resonante con un inversor resonante serie de onda completa.

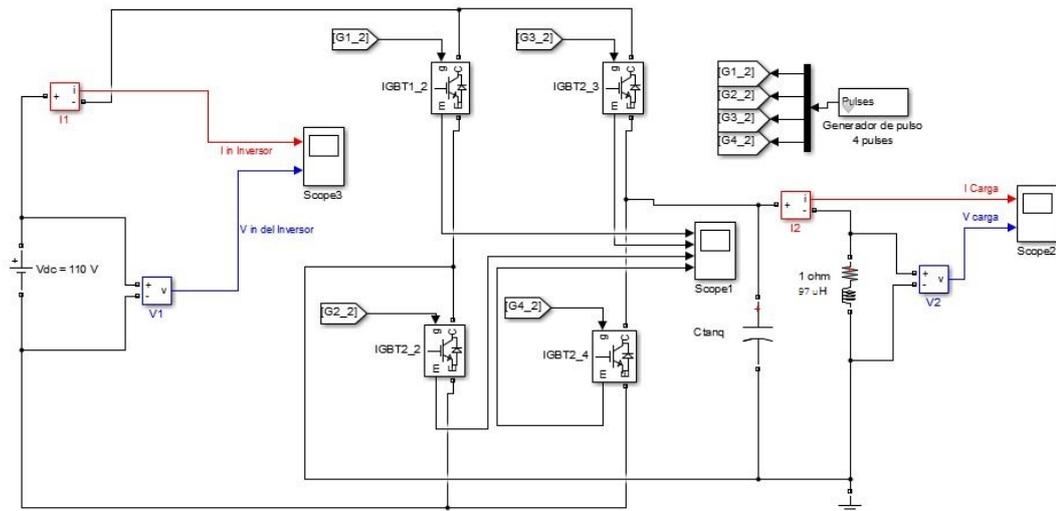
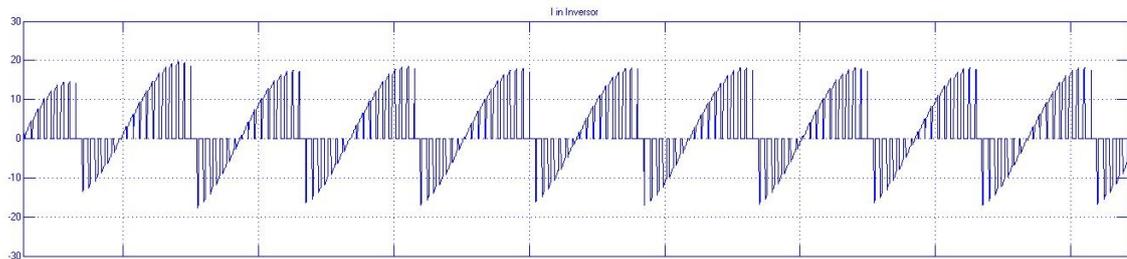


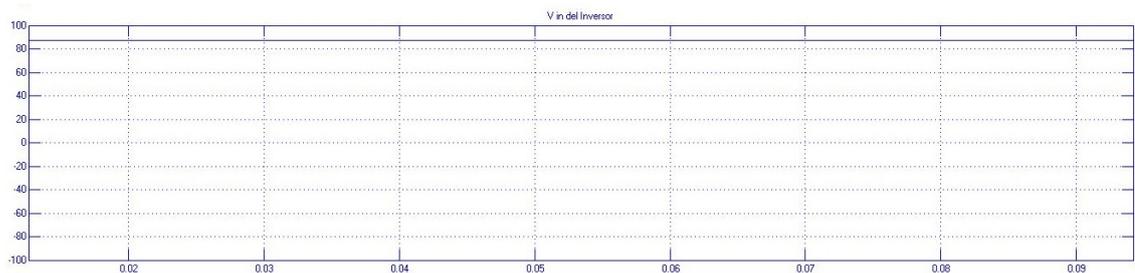
Figura 4.13: Inversor de puente completo Simulink [Fuente investigador].

El generador de pulso PWM trabaja con una frecuencia de 28 kHz en un tiempo de muestreo de $4,5454e-06$ segundos.

A la entrada del inversor serie de puente completo con una carga RLC se tiene una señal de tensión con una amplitud de 87 V y una intensidad con carga de 19 A en continua, presentada en la figura 4.14.



(a) Intensidad de entrada al inversor de puente completo



(b) Tensión de entrada al inversor de puente

Figura 4.14: Tensión e intensidad a la entrada del inversor de puente completo [Fuente investigador].

La señal continua de entrada de intensidad y tensión mediante el uso de IGBT's se trasforma en una señal alterna de alta frecuencia. El PWM que se aplica a los IGBT's tienen un ancho de pulso de $t = 4,5454e-06$ segundos en alto, para modificar la ondas de entrada. La señal de conmutación de los IGBT's se presenta en, como se observa en la figura 4.15.

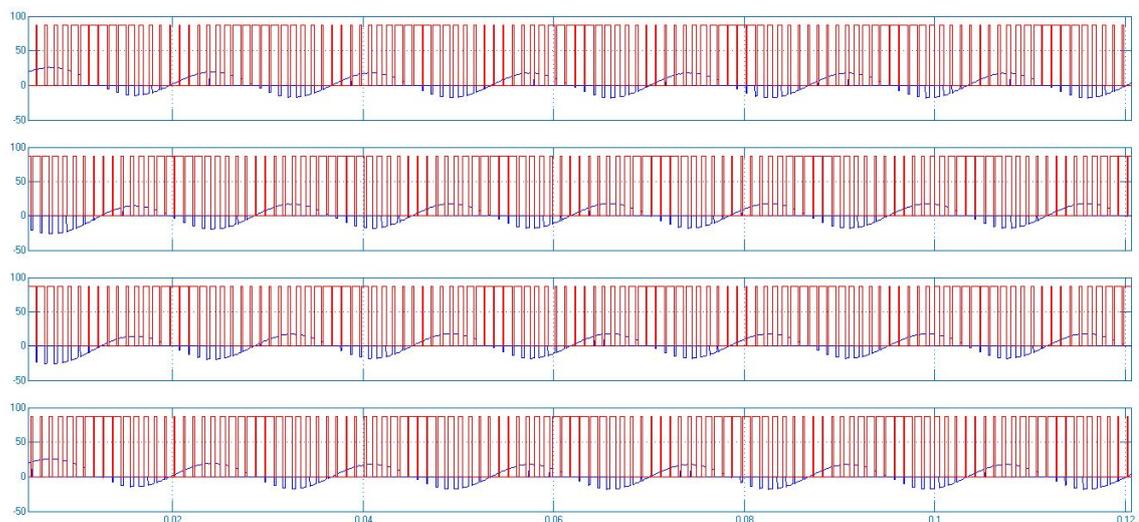
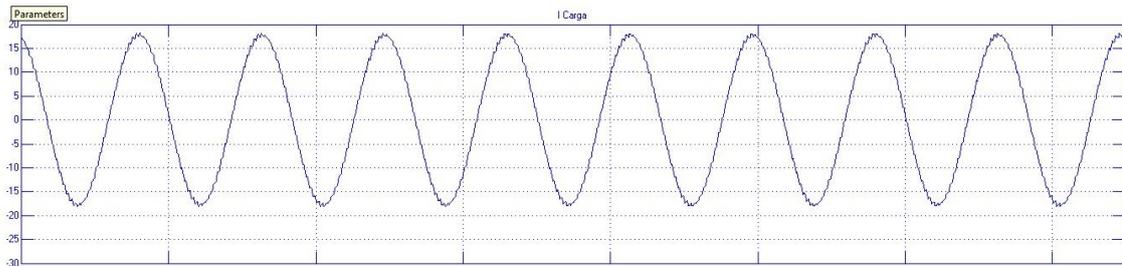
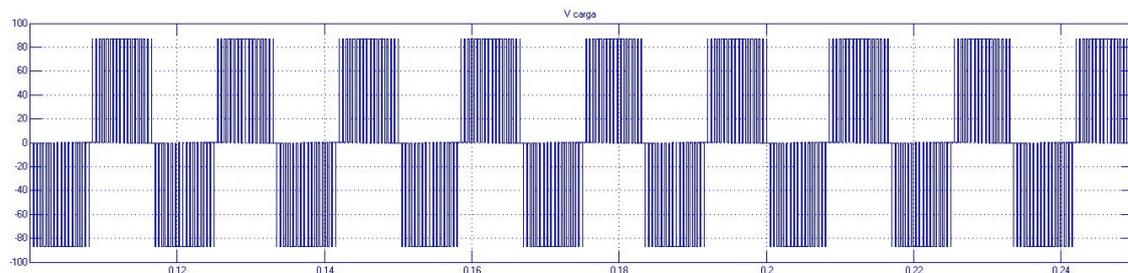


Figura 4.15: Señal de conmutación de los 4 IGBT's [Fuente investigador].

La conmutación de los IGBT's en el tiempo mencionado anteriormente, permite tener una frecuencia en la señal de salida cercana a los 225 kHz. En la figura 4.16., se observa la salida de la señal del inversor de medio puente, con una intensidad de 22 A y una tensión de 87 V en ac,



(a) Intensidad de salida del inversor



(b) Tensión de salida del inversor

Figura 4.16: Salida del inversor resonante serie de puente completo [Fuente investigador].

4.4.2.2. *Inversor resonante serie de medio puente completo*

El circuito resonante esta conformado por los siguiente elementos.

- tensión nominal de entrada 80 Vdc, valor obtenido a la salida del rectificador.
- circuito inversor de puente completo con 2 IGBT's.
- un generador de pulsos PWM con un tiempo de 4,4554e-6 s.
- una carga resonante RLC con un valor de 1Ω , $97,991\mu H$ y $0,5\mu F$, respectivamente.

Elementos calculados en el diseño del inductor en el apartado anterior.

La figura 4.17, contiene el esquema del circuito resonante construido mediante, un inversor resonante de medio puente.

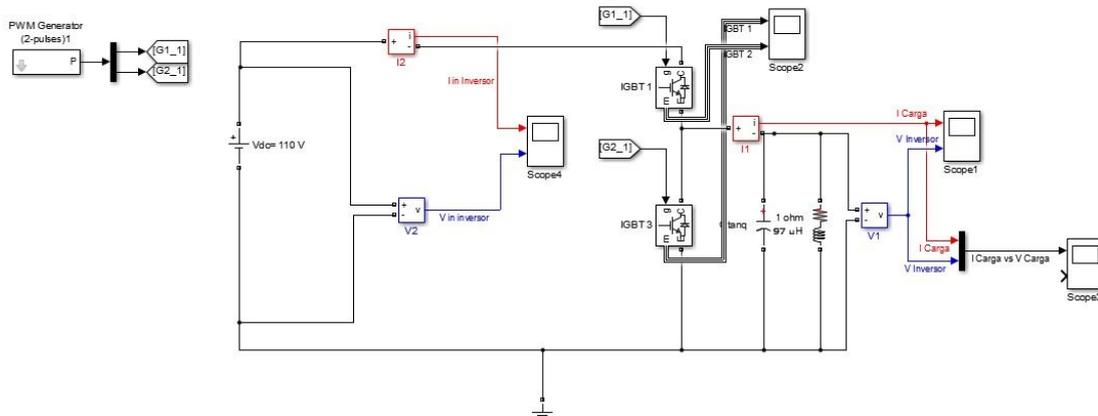
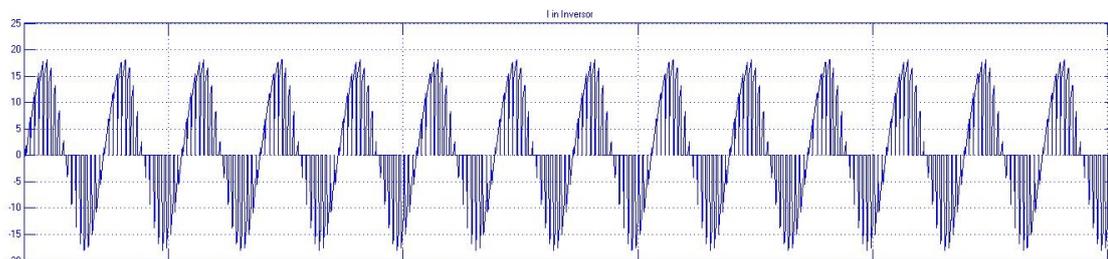
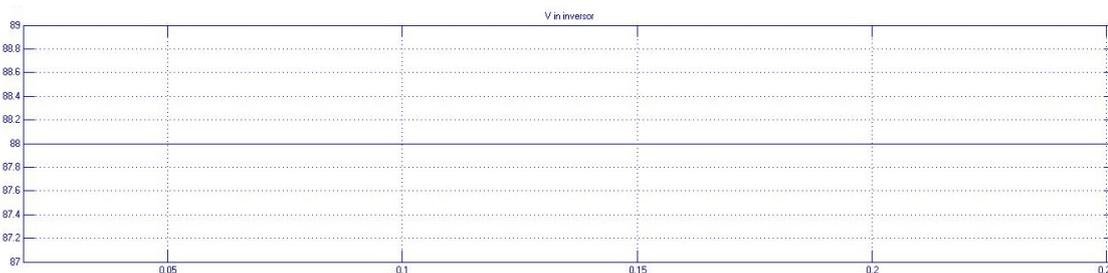


Figura 4.17: Inversor serie resonante RLC de medio puente [Fuente investigador].

En la entrada del inversor serie de medio puente para una carga RLC se tiene una señal de tensión de 87 V dc y una intensidad con carga de 17 A, como se observa en la figura 4.18.



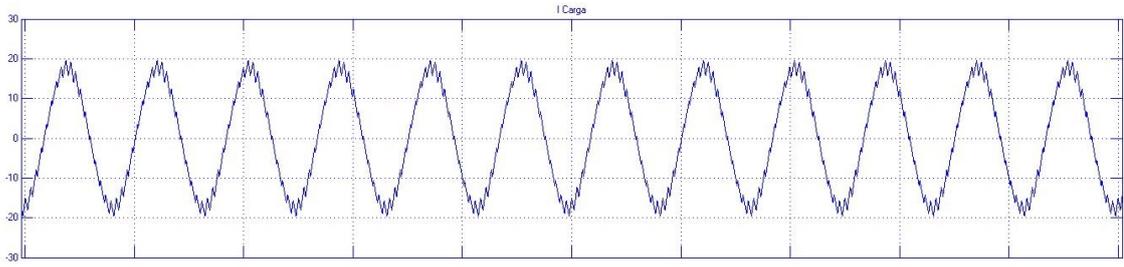
(a) Intensidad de entrada del inversor de medio puente



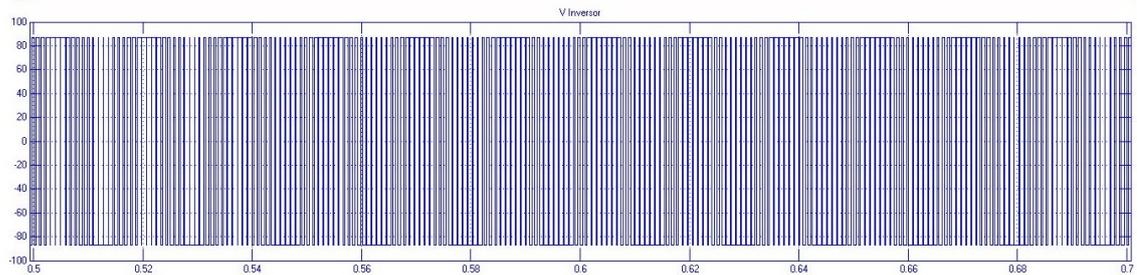
(b) Tensión de entrada del inversor de medio puente

Figura 4.18: Señal de intensidad y tensión de la entrada del inversor de medio puente [Fuente investigador].

De manera similar a la simulación del inversor serie resonante de puente completo, el PWM que se aplica a los IGBT's tiene un ancho de pulso de $t = 4,5454e-5$ s en alto. Los valores de tensión e intensidad que se obtiene a la salida son: 87 V y 17 A, con una frecuencia aproximada de 28 kHz, en figura 4.19 se observan mencionados valores.



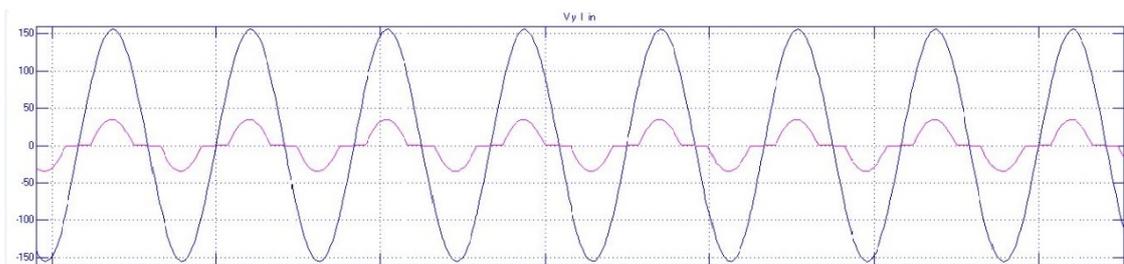
(a) Intensidad de la salida del inversor



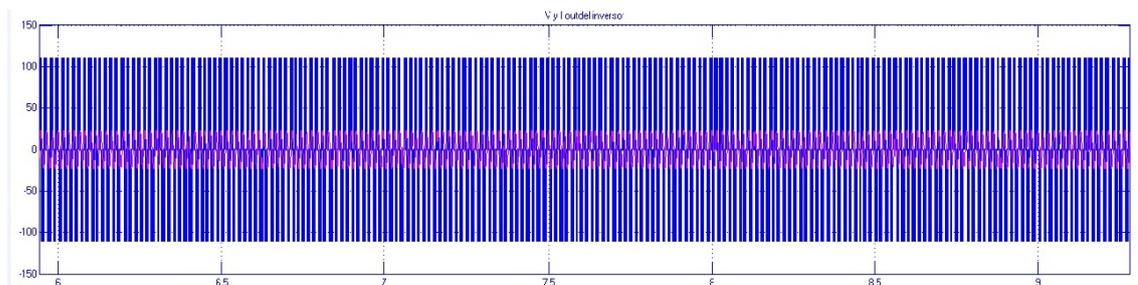
(b) Tensión de la salida del inversor

Figura 4.19: Señal de salida de tensión e intensidad del inversor de medio puente [Fuente investigador].

En la figura 4.20, se presenta la señal de entrada y de salida del circuito de potencia constituido por el rectificador, inversor y el circuito tanque. En la figura anteriormente mencionada, se puede observar la variación de de frecuencia de la señal de entrada, que pasa de 60 Hz y la señal de salida de 220 kHz.



(a) Tensión e intensidad de entrada a 60 Hz



(b) Tensión e intensidad de salida a 220 kHz

Figura 4.20: Cambio de frecuencia de la entrada sobre la salida [Fuente investigador].

4.4.3. Visualización de la curva de histéresis del material conductor

El software MATLAB permite visualizar la curva de histéresis a través de el Tool Hysteresis Desing, permitiendo tener una mejor visión de la resonancia magnética para la selección del material a calentar. En la figura 4.21 se puede observar la curva de histéresis obtenida para el circuito resonante anteriormente simulado. En esta curva se puede observar que la saturación magnética del material es la adecuada segun el capítulo 2 en el apartado 2.2.4.1, por lo que la disipación de energía es alta [1].

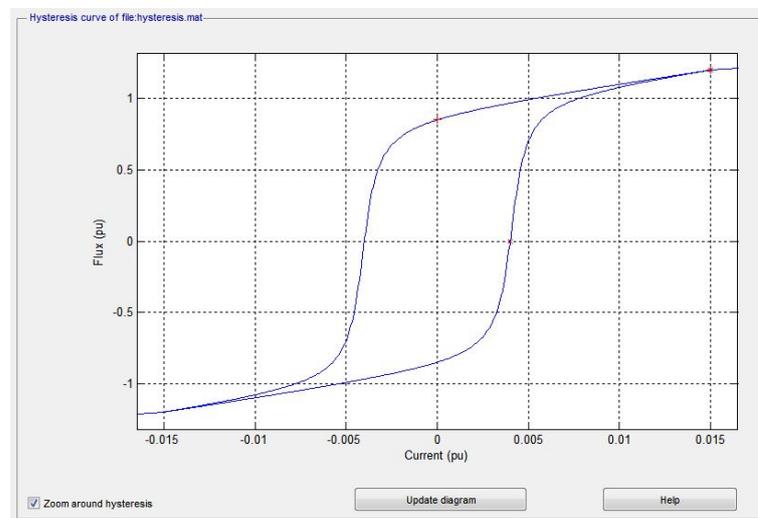


Figura 4.21: Curva de histéresis de la carga RLC del circuito inversor de puente completo [Fuente investigador].

4.5. Construcción y comprobación del funcionamiento del prototipo

En el presente apartado, se describe la construcción del prototipo propuesto de un sistema de calefacción de agua por inducción electromagnética para el uso doméstico. Por motivos de implementación práctica, se propone la construcción de un prototipo de menor escala al sistema anteriormente dimensionado y simulado en apartados anteriores.

4.5.1. Parámetros del prototipo

Los parámetros técnicos del prototipo construido se han calculado siguiendo los criterios de diseño especificados en el apartado 4.2 del capítulo 4.

En la Tabla 4.4, se presentan los datos del dimensionado de un prototipo de 250 W de potencia nominal.

Tabla 4.4: Parámetros del circuito de potencia del prototipo de 250 W [Fuente investigador].

<i>Componentes</i>	<i>Valor de los Componentes</i>
C_1	$4700\mu F$
<i>Punte rectificador</i>	$5A$ a $110V$
C_2	$10\mu F$
L_1	$1.1\mu H$
C_{Tanq}	$1,6\mu F$ a $570V$
<i>IGBT</i>	$20A$ $800V$
L_{Equi}	$4mH$

4.5.2. Descripción de la construcción del prototipo

El esquema de construcción del prototipo propuesto se presenta en la figura 4.22.

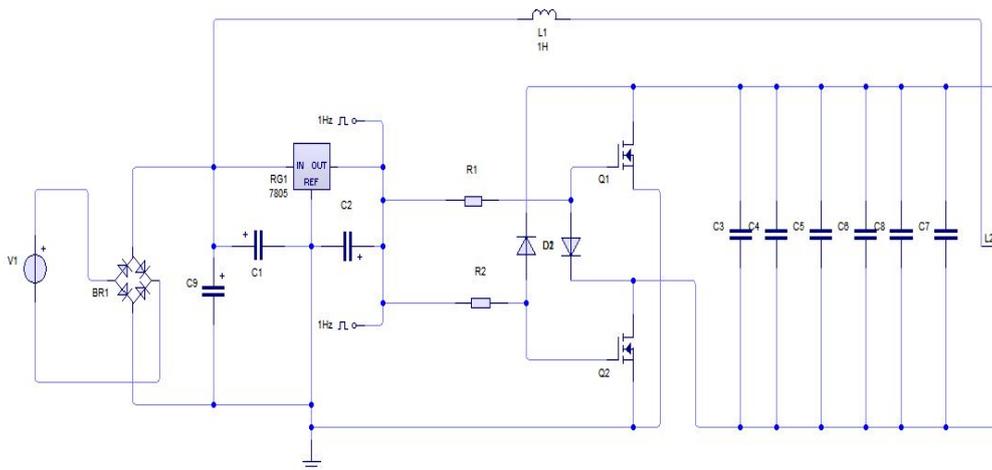


Figura 4.22: Circuito del prototipo implementado [Fuente investigador basado en [53,3, 32]].

El prototipo propuesto está conformado por:

- Una entrada monofásica a tensión nominal de 110 V y a una frecuencia de 60 Hz.
- Un transformador de 110 V a 12 V con toma central.
- Un rectificador no controlado conformado por un puente rectificador con una intensidad máxima de corriente de 8 A y un condensador de $4700 \mu F$ que soporta un tensión máxima de 50 V.

- Un inversor serie resonante de medio puente con carga RLC paralelo, que se construyó con ayuda de 2 MOSFET's IRFZ44N a una intensidad de corriente máxima de 49A y una tensión de ruptura de 100 V. Un regulador de tensión 7812 a una tensión de salida de 12V dc.
- Una carga resonante RLC que forma el circuito tanque, conformado por un arreglo de 6 condensadores de $0,33\text{ nF}$ a 680 V cada uno. Los condensadores se conectan en paralelo dado como resultado un capacitancia total de $1,98\text{ nF}$. La bobina tiene forma de solenoide y una inductancia de 44 mH , construida con un alambre de cobre de 2 mm de diámetro, una longitud de 30 cm y nueve vueltas, formando un diámetro de la bobina de 2,5 cm.

En el prototipo construido se puede identificar claramente a los cuatro elementos que componen el sistema de calentamiento de agua por inducción magnética. Para la implementación del prototipo se procedió a armarlo en la protoboard y verificar el correcto funcionamiento de las diferentes etapas del circuito de potencia. La verificación del rectificador se presenta en la figura 4.23. Se comprobó que para una tensión de entrada de 116 V, la tensión continua a la salida del rectificador es igual a 31,7 V.



Figura 4.23: Entrada y salida de tensión del rectificador [Fuente investigador].

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del rectificador, se procedió a la programación del PWM en el Arduino en el anexo A. En la figura 4.24, se presenta la conexión del Arduino a los MOSFET's del inversor. El Arduino se conecta a la salida del rectificador y permite controlar la frecuencia de la onda de tensión a la salida del inversor.



Figura 4.26: Circuito tanque con carga RLC [Fuente investigador].

4.5.3. Comprobación del funcionamiento del prototipo

El correcto funcionamiento del prototipo se realizó al proceder al calentamiento de un recipiente que contiene 350 ml de agua. El control de temperatura se realiza con ayuda de un termostato, que adquiere los datos mediante un sensor de temperatura LM35. Este sensor controla la conexión y desconexión del sistema mediante el dispositivo Arduino. En la figura 4.27a, se muestra el circuito de potencia - rectificador, inversor y circuito tanque - implementado en un protoboard. En la 4.27b se observa el termostato, que realiza el control de conexión y desconexión del sistema de CPI de agua para el uso doméstico, fijado en un temperatura de 60 °C - dato proporcionado por la norma NTE-INEN1912:92 y la Documento Básico de HE 4.



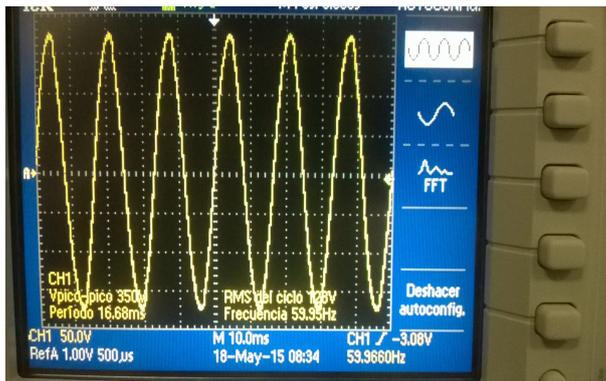
(a)



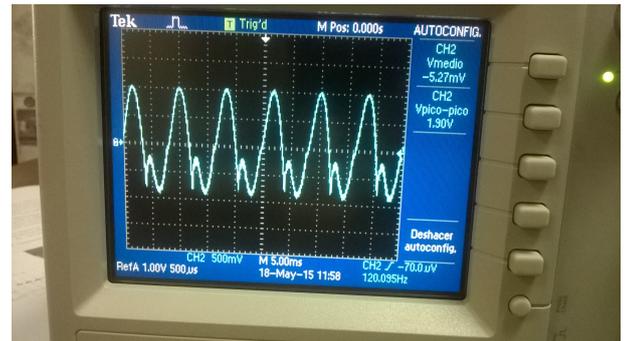
(b)

Figura 4.27: a) Circuito de potencia b) Termostato [Fuente investigador].

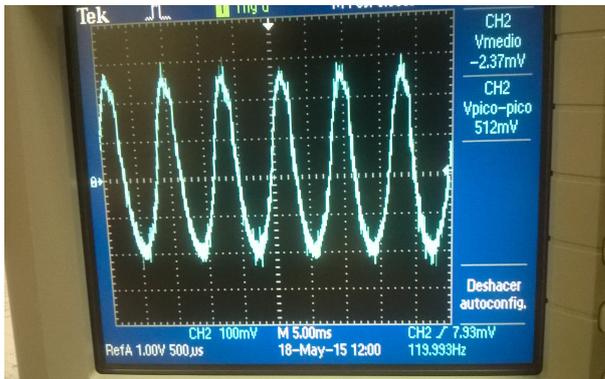
En la figura 4.28, se presentan los resultados de la comprobación del funcionamiento del prototipo en su conjunto. Se muestran los valores de tensión en el dominio del tiempo, obtenidos para las condiciones anteriormente indicadas, en la entrada del prototipo figura 4.28a, en la salida del rectificador 4.28b, en la salida de los MOSFET's figura 4.28c y en la bobina de inducción, como se observa en la figura 4.28d, respectivamente.



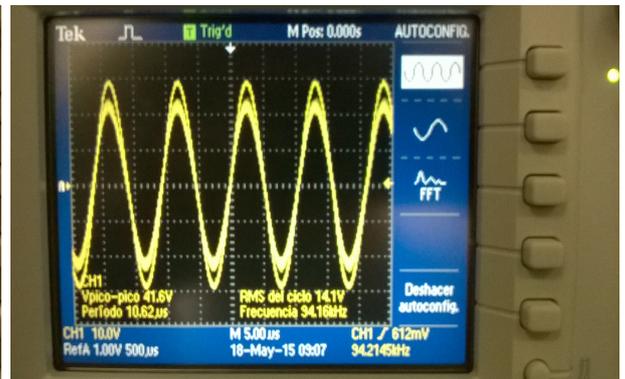
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.28: a) Tensión de la fuente de entrada b) Tensión de entrada del rectificador c) Tensión de salida del inversor d) Tensión del circuito tanque [Fuente investigador].

En la figura 4.29, se presenta la tensión de la entrada de la red y de la salida del circuito tanque, encargado de generar el campo magnético variable. Se puede observar la carga y descarga de los condensadores, conectados en paralelo en el circuito tanque, durante el proceso de calentamiento por inducción.

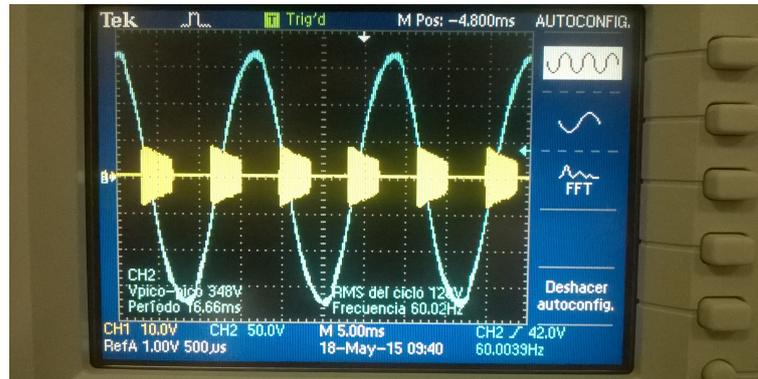


Figura 4.29: Tensión de entrada de la red y salida del circuito tanque [Fuente investigador].

En la figura 4.30, se muestra la implementación completa del sistema de inducción magnética. Se puede observar, todos los elementos que conforman el prototipo propuesto: rectificador, inversor, circuito tanque, circuito de control y la carga inductiva.

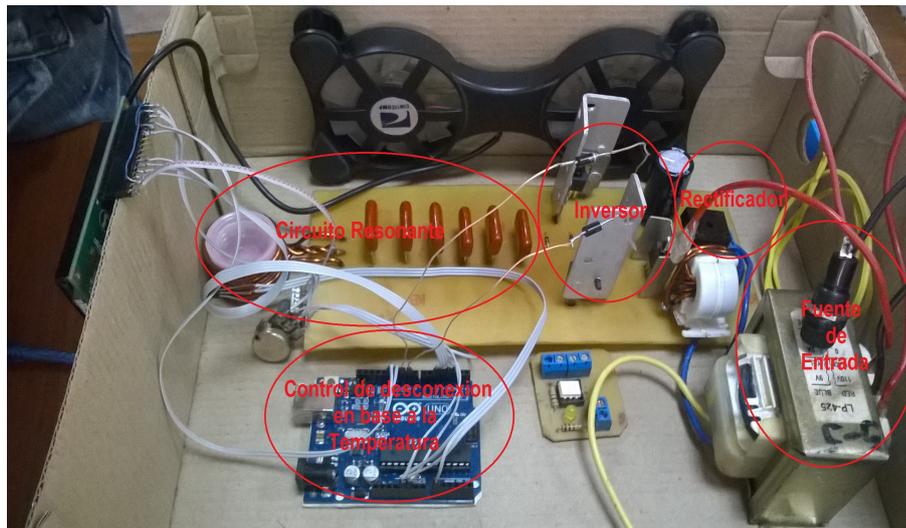


Figura 4.30: Diversas fases del sistema de CPI de agua para uso doméstico

4.5.4. Descripción del comportamiento energético del prototipo

En este apartado, se describe el comportamiento energético del prototipo propuesto. El estudio se ha realizado considerando las siguientes consideraciones:

- La potencia nominal del prototipo es 250 W.
- La masa a calentar en un pequeño recipiente es equivalente a 50 ml.
- El prototipo dispone de un sistema de control de temperatura que desconecta la fuente de alimentación al alcanzar el agua una temperatura de 70°C.

- La temperatura del agua al inicio del proceso de calentamiento es igual a 21°C.
- La temperatura final del agua es de 60°C.

En la figura 4.31, se observa la evolución de la potencia en el tiempo durante el proceso de calentamiento del agua con ayuda del sistema de inducción. El comportamiento energético del prototipo permite definir tres fases durante el proceso de calentamiento.

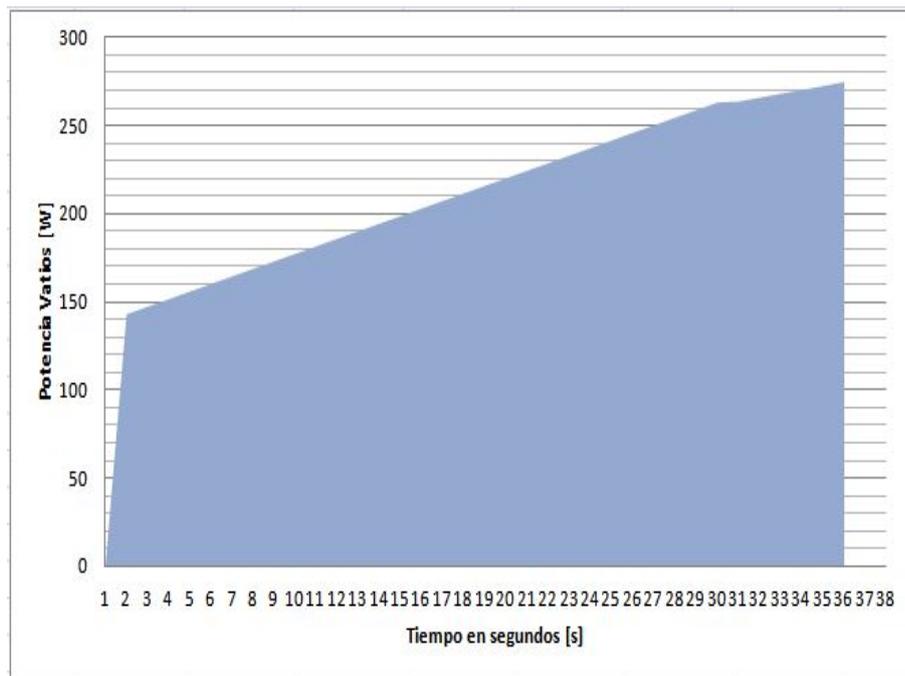


Figura 4.31: Evolución de potencia durante el proceso de calentamiento.
[Fuente investigador]

En la primera fase, en el momento de encenderse el prototipo sin carga, se detecta una intensidad de 250 mA correspondiente a una potencia de 27,5 W. Es la potencia de establecimiento del campo magnético en el transformador.

En la segunda fase, al segundo de encenderse el prototipo se produce un importante incremento de la intensidad. La intensidad pasa instantáneamente de 250 mA a 1,3A, que corresponde a una potencia de 143 W. En ese instante aún no se alcanza el valor de la frecuencia de resonancia.

En la tercera fase, la intensidad de la red se incrementa lentamente desde el segundo 1 al segundo 30, momento en el que se alcanza una intensidad de 2,4 A y una potencia de 250 W. Es importante indicar que en ese instante la temperatura del agua es de 60°. En el segundo 36, la intensidad que suministra la red es de 2,5A y la temperatura del agua es de 70°C. El sistema de control de temperatura desconecta el prototipo.

El cálculo del área de la figura 4.31 permite calcular la energía suministrada por la fuentes de alimentación que se destina al calentamiento del agua y a las pérdidas del sistemas de inducción. La energía necesaria para calentar para calentar 50 *ml* de agua de 21°C a 60°C es de 1,68 *Wh* . Extrapolando el comportamiento del prototipo para el calentamiento diario de agua para el consumo familiar de 120 litros, el tiempo de calentamiento sería de aproximadamente 21 horas. Un dispositivo de inducción de 1 kW de potencia nominal permitiría reducir el tiempo a tan sólo 10 horas y 30 minutos, mientras que para un dispositivo de 2 kW. el tiempo de calentamiento sería de 5 horas y 15 minutos. La única limitación existente sería la intensidad máxima admisible de la fuente de alimentación. Es importante indicar que los enchufes convencionales de 110 V pueden soportar intensidades de 15, 20 y hasta 25 A.

4.6. Presupuesto

El la Tablas 4.5, se presenta el presupuesto, de las diferentes elementos de los circuitos que componen el prototipo de un sistema de CPI para agua de uso doméstico así como el coste económico del diseño, en referencia a la remuneración básica de un ingeniero electrónico de clase 1, la cual es de 1200\$ al mes según el acuerdo de escalafones y sueldos de ingenieros y doctores del país acatado por IESS en el informe financiero de remuneraciones mensuales en diciembre del 2014 [67], de acuerdo a las 8 horas laborables al día en un mes se tiene un total de 160 horas dividido para el sueldo mensual, da como resultado 7,5 dolares por hora de trabajo. Este valor a sido tomado en cuenta para generar el coste del diseño del sistema de agua CPI magnética.

Tabla 4.5: Presupuesto del prototipo de CPI de agua para el uso doméstico [Investigador basado en[67]].

(a) Presupuesto de la placa de control.

Placa de control				
Descripcion	Valor o Numeracion	Cantidad	Valor Unitario(USD)	Valor(USD)
Arduino	Uno	1	28	28,00
Circuito Integrado	LM35	1	2,15	2,15
Display		1	12	12,00
Capacitor	104	2	0,05	0,10
Capacitor	22	2	0,08	0,16
Transistor	NPN	1	0,15	0,15
Transistor	PNP	3	0,15	0,45
Resistencia		30	0,1	3,00
Bus de datos		1	0,8	0,80
Zocola		40	0,13	5,20
Circuito Impreso en la Placa	15cm*20cm	1	50	50,00
TOTAL				102,01

(b) Presupuesto de la placa de potencia.

Placa de Potencia				
Descripcion	Valor o Numeracion	Cantidad	Valor Unitario(USD)	Valor(USD)
Transformador	110v, 18	1	12,5	12,50
Diodos	1N4007	4	0,15	0,60
Capacitor Propileno	3,3nF/650V	6	2	12,00
Capacitor Propileno	2uF/2000V	2	3	6,00
Capacitor Propileno	4,97uF/1000V	1	3	3,00
Capacitores Electroliticos	4700uF	1	0,6	0,60
Capacitores Electroliticos	16V	5	0,3	1,50
Capacitores Electroliticos	25V	2	0,3	0,60
Capacitores Electroliticos	50V	2	0,4	0,80
Mosfet	IRFZ4445	4	11	44,00
Potenciometro	10KΩ	2	0,3	0,60
Cable de cobre	12	1 libra	16	16,00
TOTAL				98,20

(c) Costos de extras.

Material extra				
Descripcion	Valor o Numeracion	Cantidad	Valor Unitario(USD)	Valor(USD)
Carcasa		1	12.5	12.50
Cable de poder	110V/4a	1	1.25	1.25
Porta Fusibles	3A	4	0.35	1.40
Cable multipar		1 metro	1.5	1.50
Costo de diseño		70 h	7.5	525.00
TOTAL				541.65

TOTAL DEL GASTO DEL SISTEMA				741.86
-----------------------------	--	--	--	--------

4.7. Análisis comparativo del consumo energético de los sistemas ACS

En este apartado, se presenta un estudio de valoración económica de los diferentes dispositivos de agua caliente para uso doméstico. La evaluación económica del prototipo hace referencia a los distintos sistemas de calentamiento de agua que existen en el Ecuador y los dos sistemas de calentamiento de agua que se pretende implantar en el Ecuador a futuro [56]. Los sistemas de calentamiento que se analizarán en éste apartado responden a las siguientes características.

- Consumo de agua caliente sanitaria para una familia tipo ecuatoriana de 4 personas, con un consumo total de 120 litros diarios
- La energía necesaria para transferir el calor a esta masa de agua de una temperatura nominal de 18° a 60° es de aproximadamente 5 Kwh.

El consumo total de energía permite clasificar a los equipos de calentamiento de agua en tres grupos.

Tabla 4.6: Clasificación de los sistemas de calentamiento de agua en función de la potencia [Investigador basado en [16,25]]

Potencia	Capacidad (litros)
Baja(50w-2Kw)	>50
Media(2Kw- 20Kw)	50>150
Alta(<20Kw)	<300

Para la evaluación de los equipos de calentamiento de agua se tomara una nivel de potencia media puesto que la masa de agua a calentar se encuentra entre los 120 litro.

Los sistemas de calentamiento de agua de media potencia pueden ser eléctricos y a gas. Los sistemas anteriormente mencionados son adaptables para el consumo residencial de agua caliente ya que estos poseen una entrada de agua fría con un tubería de 1/2”.

Un kilo de GLP proporciona una energía de 13,13 Kwh teóricamente, los sistemas de calentamiento de agua que usan GLP tiene una eficiencia de 50 % aproximadamente. Es decir que un cilindro de gas de 15 kilos proporciona una energía neta de 98 Kwh por cilindro.

Los sistemas eléctricos tienen una potencia nominal de 11Kw. Para calentar una masa de agua de 100 litros, se emplea una energía total de 16,6 Kwh, en un tiempo de una hora y media de con una eficiencia de 75 % con los dispositivos de nueva

tecnología, proporcionando una total de energía aprovechable de 12,45Kwh para el calentamiento del agua.

Los sistemas solares por lo contrario se dimensionan de acuerdo a los requerimientos de energía que se necesita diariamente es decir que si la demanda de energía es de 5Kwh para el calentamiento del agua se necesita, tomando en cuenta los sistemas solar de tubo de vacío que son los sistemas con mayor tecnología presentan una eficiencia de 80 % al 85 % dependiendo de los materiales de fabricación. El dimensionado de los sistemas solares para una familia de 4 personas se lo realiza tomando en cuenta que el colector solar proporciona una potencia de calorífica de 5Kw por metro cuadrado, es decir que tomando en cuenta la eficiencia de los colectores solares para proporcionar la energía necesaria para calentar los 120 litro agua, hace falta un total de 1,30 metros cuadrados de colector para tener la energía necesaria.

Mientras que los sistemas de inducción

El estudio se ha realizado considerando las siguientes suposiciones:

- Consumo de agua caliente sanitaria para una familia tipo ecuatoriana de 4 personas
- Un calefón convencional que emplea cilindros de 15 kilogramos
- Un termo eléctrico de 2 kW con un acumulador de agua de 150 litros
- Un termo de inducción con una potencia eléctrica de 4 kW con un acumulador de 80 litros

En la Tabla 4.5, se presenta el costo económico de las diferentes tecnologías de calentamiento de agua sanitaria para uso doméstico. Se observa que la instalación solar de ACS presenta una inversión inicial elevada que se compensa con el uso gratuito y renovable del recurso solar. La instalación de calentamiento por GLP tiene una inversión inicial superior a los sistemas de calefacción eléctricos, por resistencias o por inducción magnética.

Tabla 4.7: Costo económico de las diferentes tecnologías [Investigador basado en [16,25,42,56]].

<i>Calentadores de Agua</i>			
<i>Tipo de Calentador</i>	<i>Tipo de Energía</i>	<i>Costo del Equipo, \$</i>	<i>Costo de Instalación, \$</i>
Calentador de Gas	Combustión/GLP	175	75
Calentador Eléctrico	Eléctrica/Energía	500	40
Calentador solar	Solar/Térmica	750	80
Calentador Inducción	Eléctrica/Energía	100	40

Las diferentes tecnologías de calentamiento tienen un costo de mantenimiento. El tiempo y el costo del mantenimiento que requiere cada dispositivo de calentamiento de agua se muestra en la Tabla 4.6.

Tabla 4.8: Costo y mantenimiento de los sistemas de calentamiento de agua [Investigador basado en [16,25,42,56]].

<i>Tiempo y Costo Mantenimiento</i>		
<i>Tiempo de calentamiento</i>	<i>Costo de Mantenimiento, \$</i>	<i>Tiempo de Mantenimiento, Años</i>
Calentador de Gas	30	3
Calentador Eléctrico	30	2
Calentador solar	50	10
Calentador Inducción	20	3

En la Tabla 4.7, se presenta el consumo de energía mensual de cada una de las tecnologías y su costo económico, con y sin subsidio. Se emplean los valores de costos económicos mencionados en el capítulo dos.

Tabla 4.9: Tabla de consumo energético y costo de energía [Investigador basado en [8,12,13,15]].

<i>Consumo Energético y Costo Económico de los distintos Calentadores</i>					
<i>Tipo de calentadores</i>	<i>Consumo de Energía/Mensual</i>	<i>Costo con Subsidio</i>		<i>Costo sin Subsidio</i>	
		<i>Costo de Energía, \$</i>	<i>Costo Mensual, \$</i>	<i>Costo de Energía, \$</i>	<i>Costo Mensual, \$</i>
Calentador de Gas	2 Cilindros	3	6	18	36
Calentador Eléctrico	55,6 kWh	0,04	2,22	0,096	5,37
Calentador solar	12 kWh	0,04	0,48	0,096	1,16
Calentador Inducción	45,7 kWh	0,04	1,82	0,096	4,41

En la tabla anterior, se puede observar que el costo de la energía sin subsidio tiene un valor de 7 veces más para el GLP con subsidio. Una familia ecuatoriana paga 5 dólares por 3 cilindros de gas cuando su precio real es de 36 dólares. Asimismo, una familia del Ecuador que emplea una ducha eléctrica consumo en promedio 55,6 kWh y paga por electricidad aproximadamente 2,22 dólares, cuando el precio real por este servicio sería 5,37 si la electricidad no estuviese subsidiada.

Se realizó un estudio de factibilidad económica en el que se considero un tiempo de 25, años puesto que es el tiempo promedio de vida útil de un equipo. En la Tabla 4.8, se presenta una análisis de los costos económicos para diferentes dispositivos de calentamiento de agua en un horizonte de 25 años.

Tabla 4.10: Valoración de costos de implementación y energía consumida en 25 años [Investigador basado en [8,12,62,55]].

<i>Valoración de costos en 25 años</i>						
<i>Tipo de calentadores</i>	<i>Costo de Implementación(\$)</i>	<i>Costo de Mantenimiento en 25 años(\$)</i>	<i>Costo con Subsidio (\$)</i>		<i>Costo sin Subsidio (\$)</i>	
			<i>Costo Anual de Energía</i>	<i>Costo del Sistema en 25 años</i>	<i>Costo Anual de Energía</i>	<i>Costo del Sistema en 25 años</i>
Calentador de Gas	250	240	72	2290	360	9490
Calentador Eléctrico	80	360	26,688	1567,2	64,45	2511,28
Calentador solar	830	100	5,76	1074	13,9104	1277,76
Calentador Inducción	140	160	21,93	848,4	52,97	1624,38

Del la Tabla 4.8, se puede deducir que los sistemas de calentamiento de agua más sostenibles son el sistema solar, eléctrico e inducción. Los sistemas de calentamiento

de agua anteriormente mencionados presentan un costo económico total a un tiempo de 25 años de 1277,76, 2511,28 y 1624,38 dolares, respectivamente.

4.7.1. Análisis del transitorio del sistema de inducción magnética de calentamiento de agua

El consumo energético que presenta cada un de los dispositivos electrónicos de cargas inductivas y capacitivas varia mucho de acuerdo a los transitorios que presenten cada uno de ellos. Para el caso del prototipo del sistema de inducción se a visto necesario complementar el trabajo con un análisis del transitorio que proporciona este sistema, ya que al estar compuesto por cargas inductivas y capacitivas a alta frecuencia, el comportamiento del sistema es diferente al comportamiento de los equipos que poseen cargas puras, cargas resistivas. Los transitorios se producen por variaciones atmosféricas o al trabajar con cargas inductivas y tienen una duración de decenas de milisegundos, en el caso del prototipo de inducción se produce, ya que la carga del sistema es una carga inductiva.

En el siguiente apartado se presenta un análisis del transitorio en un intervalo de 100μ segundos, tiempo de arranque del prototipo de un sistema de calefacción de agua por inducción magnética para el uso doméstico. En la figura 4.32, se observa la señal de intensidad de corriente del sistema resultante de la aplicación de un sensor de efecto hall, puesto que ésta señal tiene una salida de voltaje en tecnología TTL su respuesta de voltaje, en función de la intensidad de corriente oscila entre los 0 y 5 voltios.

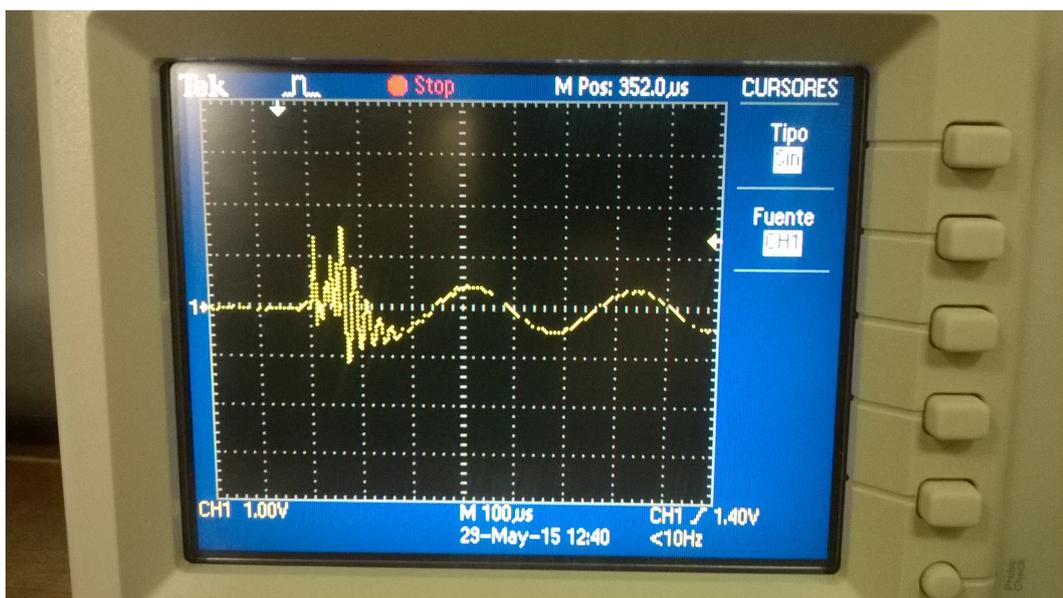


Figura 4.32: Transitorio en el arranque del prototipo [Fuente investigador]

En la figura 4.32, se puede visualizar la variación de corriente en función del voltaje expresada en la Tabla 4.11

Polaridad del pico de corriente	Voltaje de la sonda (V)	Intensidad de Corriente (A)
+	1,44V	1,10A
-	-360mV	277mA
+	200mV	150mA
-	-240mV	184mA
+	560mV	431mA
-	-120mV	92mA
+	1,04V	800A
-	-125mV	96mA
+	980mV	754A
-	-110mV	84mA
+	750mV	557mA
-	-120mV	92mA
+	1,69V	1,3A
-	-1,17V	900mA
+	900mV	693mA
-	-830mV	639mA
+	500mV	385mA
-	-700mV	539mA
+	-200mV	154mA
-	535mV	411mA
+	-135mV	103mA
-	425mV	320mA

Tabla 4.11: Valor del transitorio de entrada en los 20 μ segundos iniciales [Fuente investigador]

Los valores de corriente obtenidos en la Tabla 4.41, corresponde al voltaje del sensor multiplicado por el factor de conversión proporcionado por el sensor de corriente, el sensor permite realizar mediciones desde 100mA hasta 10A con un factor de tolerancia de 5%. El factor de conversión proporcionado por el sensor es de 1V a 0,77A. Los valores obtenidos de la intensidad de corriente del transitorio de arranque permiten obtener un potencia aproximada de 0,05W, debido que se trabaja con una entrada monofásica de 110V. Este valor de potencia se a calculado mediante un análisis gráfico tomando a los picos del transitorio como triángulos. Este análisis permite tener una idea del valor de potencia consumido en el arranque del prototipo pero no se puede tomar a este valor como un valor real al 100%. El análisis del transitorio se lo realizo debido que al ser un sistema de carga inductiva y de alta frecuencia puede presentar grandes variaciones de intensidad de corriente en

el arranque del dispositivo debido a interferencias de radiofrecuencia. El sistema de calefacción de agua por inducción magnética no presenta una variación significativa, puesto que su frecuencia de trabajo se encuentra entre las ondas de audiofrecuencia y radiofrecuencia.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

El diseño, dimensionado, simulación y construcción del prototipo de un sistema de calefacción de agua caliente para el uso doméstico ha permitido realizar las siguientes conclusiones.

- El convertor ac/ac es el más óptimo y eficiente en cuanto a circuitos de inducción para sistemas de calentamiento se refiere, puesto que este convertor no utiliza un circuito rectificador y trabaja con la señal alterna pasándola a alta frecuencia. Al reducir el circuito rectificador emplea menor cantidad de elementos lo que reduciría costos de fabricación de sistemas de inducción. Una de las desventajas de este convertor es que en el momento se encuentra en etapa de investigación y no ha pasado a la parte experimental.
- Se ha realizado un estudio comparativo técnico - económico de diferentes sistemas de calentamiento de agua. El sistema de inducción construido es más eficiente por lo que reduce el tiempo de calentamiento y el consumo de energía en relación a los otros dispositivos, debido que la generación de calor es en forma directa a través de una fuente interna así el material.
- Se ha diseñado e implementado con éxito un prototipo de un sistema de calefacción de agua por inducción electromagnética para el uso doméstico. El prototipo presenta un esperado rendimiento en comparación con las simulaciones realizadas de acuerdo al dimensionado de los diferentes elementos.
- Se analizó el costo económico de cada uno de las fuentes de energía utilizadas en el calentamiento de agua sanitaria para el uso doméstico. Se observó que la energía más cara y poco eficiente es la energía de combustión basada en GLP.

Recomendaciones

- Implementar el sistema de calentamiento de agua sanitaria por inducción magnética utilizando el convertor ac/ac para reducir los costos de fabricación de los sistemas y abrir un nuevo campo de investigación, en cuanto al control que requiere este convertor.
- Utilizar el fenómeno de inducción para la generación de calor en sistemas domésticos que utilizan considerables cantidades de energía para el calentamiento del agua, el ambiente etc.
- El uso de la topología del inversor esta directamente relacionada a la fuente de entrada, puesto que el uso de un inversor mal seleccionado puede provocar una elevada intensidad de corriente en el circuito, que al circular por los elementos los puede deteriorar rápidamente, en cuanto al dimensionado de bobinas y condensadores los valores de cálculo difieren con los valores experimentales.
- El uso de modernos e innovadores sistemas de inducción para el calentamiento de agua y cocción de alimentos en las nuevas viviendas que se construye en el Ecuador. Por otro lado se prevee en un futuro realizar investigación en cuanto a que el sistema de inducción sirva como en sistema auxiliar en una instalación termo solar.

Bibliografía

- [1] T. N. Goya and M. M. Garza, “Calentamiento por inducción,” *Congreso Estudiantil de Investigación*, 2013.
- [2] R. Y. Zhang, “A generalized approach to planar induction heating magnetics,” Master’s thesis, University of Canterbury, New Zealand, 2009.
- [3] M. S. S. ÁLVAREZ, “Modelación y control de un sistema piloto de calentamiento de fluidos por inducción magnética,” Master’s thesis, UNIVERSIDAD DE CHILE, ABRIL 2009.
- [4] A. A. Picon, “Calentamiento por inducción electromagnética diseño y construcción de un prototipo,” *UIS Ingeniería*, vol. Volumen 6, pp. 71–75, 2007.
- [5] M. M. Monrroy, “Políticas de subsidio a los combustibles en América latina: El precio del glp,” *Consultoria Diseño Grafico*, vol. Volumen 1, 2012.
- [6] “Idae secretaría general departamento de planificación y estudios ; análisis del consumo energético del sector residencial en españa,” *Proyecto SECH-SPAHOUSEC*, pp. Pp. 9,10,11, 2011.
- [7] A. C. Landázuri, “Diseño y construcción de un horno de crisol para fusión de metales por inducción,” Master’s thesis, UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO, Julio 2007.
- [8] I. A. Tama, “Cocina de inducción versus cocina a gas(glp),” *CRIEEL*, Octubre 2013.
- [9] “Estado financiero diciembre del 2014, empresa publica de hidrocarburos,” vol. Ecuador, p. pág. 33.
- [10] “Secretaria nacional de planificación y desarrollo- semplades, plan nacional del buen vivir,” vol. Primera Edición, Junio 2013.

- [11] J. n. Hincapié and A. Trejos, “Electrónica de potencia para el calentamiento por inducción doméstico revisión del estado del arte,” *IISSN: 1794-9165*, vol. Volumen 9, pp. pp. 239, 241,242,243,244,245, 253, 2013.
- [12] M. Sweeney, J. Dols, B. Fortenbery, and F. Sharp, “Induction cooking technology design and assessment,” *Electric Power Research Institute (EPRI) ACEEE*, pp. 371–372, 2014.
- [13] V. Santini, “Sistema alternativo de energía solar y gas,” Master’s thesis, Instituto Superior Nacional, Mexico D. F., Junio 2010.
- [14] G. Manuel and M. Khan, “Design of an induction heating domestic water heater system,” 2008.
- [15] H. M. Unver, “A new induction water heating system design for domestic heating,” *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, vol. Volumen 29, pp. pgg 1133–1138, Noviembre 2012.
- [16] J. Martis and P. Vorel, “Apparatus for induction heating 2.5 kw using a series resonant circuit,” *Brno University of Technology*, 2013.
- [17] L. F. Quevedo and F. A. Quizhpi, “Initial results from a prototype corresponding to an induction water heater,” 2014.
- [18] V. S. Barrera, “Sistema alternativo de energía solar y de gas para calentar agua en una vivienda tipo departamento,” Master’s thesis, Instituto Politécnico Nacional, Mexico D.F., Junio 2010.
- [19] INEN, “Norma técnica ecuatoriana nte inen 2 124:98,” vol. Volumen 1, Diciembre 2008.
- [20] J. C. M. Escribano, *Manual Técnico de Energía Solar Térmica*. Dirección Nacional de Energía, volumen 2 ed., Marzo 2013.
- [21] J. M. L. Cózar, *Manual de Energía Renovable*. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, Madrid, cuarta edición ed., Octubre 2008.
- [22] C. L. Giralt, *Manual Sistemas Solar Térmicos*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Santiago de Chile, primera edición ed., 2014.
- [23] “Propuesta para la implementación de una industria fabricante de calentadores de agua de uso doméstico a base de energía solar en la ciudad de riobamba,” Master’s thesis, CRISTIAN RAMIRO TENEMASA SAYAY, 2012.

- [24] FAGOR, “Energía solar térmica,” *Expertos*, vol. Volumen 1, Octubre 2009.
- [25] IRENA, “Solar heating and cooling for residential applications,” *ETSAP*, pp. pp. 10–44, Enero 2015.
- [26] ASIT, *GUÍA ASIT DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA*. ASIT, Mayo 2010.
- [27] F. Sánchez, “Análisis y diseño de un sistema de calefacción solar para agua caliente sanitaria,” Master’s thesis, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Ecuador, 2010.
- [28] J. Calle, J. Fajardo, and L. Sánchez, “Agua caliente sanitaria de uso doméstico con energía solar, una alternativa para la ciudad de cuenca,” *Ingenius*, pp. Pp. 57–64, 2010.
- [29] M. C. Alba, “Preestudio para el desarrollo de un equipo de calentamiento por inducción,” *Segainvex*, 2010.
- [30] E. Haye, “Industrial solutions for inductive heating of steels,” Master’s thesis, Luleå University of Technology, 2013.
- [31] Fairchild, “Induction heating system topology review,” *IEEE Power Electronics Specialists*, 2000.
- [32] M. M. H. Shhan, *DESIGN, SIMULATION & IMPLEMENTACION OF EMBEDDED CONTROLLER FOR INDUCTION MELTING MACHINE EMPLOYING OPTIMAL RESONANT CONVERTER*. PhD thesis, THE MAHARAJA SAYAJIRAO UNIVERSITY OF BARBADO, December 2012.
- [33] V. E. Gómez, *Influencia de los Componentes Parásitos en el Análisis y Diseño de Inversores Resonantes Paralelo para Aplicaciones de Calentamiento por Inducción*. PhD thesis, UNIVERSITAT DE VALÈNCIA, Junio 1999.
- [34] Hindawi, “Single-side electromagnetic induction heating based on igbt,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. Volume 2014, no. Article ID 503849, p. 18 pages, 2014.
- [35] R. A. Muñoz and L. F. Idarraga, “Calentamiento por inducción, diseño y construcción del sistema de control de puente inversor resonante,” Master’s thesis, Universidad Industrial de Santander, Noviembre 2006.
- [36] L. B. Ponce, “Estudio y diseño de un calentador por inducción magnética en alta frecuencia para el montaje de rodamientos,” Master’s thesis, Pontificia Universidad Católica De Valparaíso, 2003.

- [37] I. R. O. FLORES, “Aspectos tecnológicos en el diseño de inversores resonantes aplicados al calentamiento por inducción,” Master’s thesis, CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACION Y DESARROLLO TECNOLÓGICO CENIDET, Noviembre 1998.
- [38] G. M. Segura, *Induction heating converter’s desing, control and modeling applied to continuous wire heating*. PhD thesis, Universidad Polit’ecnica de Catalunya, 2012.
- [39] S. J. Caharman, *Maquinas Eléctricas*. tercera edición ed.
- [40] I. M. E. LEON, “Diseño de un concentrador de energía magnética utilizado en temples superficiales por inducción,” Master’s thesis, UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO, 2011.
- [41] E. A. C. COLLAGUAZO, “Diseño y construcción de un prototipo de una cocina de inducción electromagnética,” Master’s thesis, ESCUELA POLÍTECNICA NACIONAL, Noviembre 2009.
- [42] A. M. H. Ordoñez, “Selección de equipos y diseño del sistema para calentamiento de agua en un hotel cinco estrellas,” *Revista Tecnológica ESPOL*, vol. Vlm 22, pp. Pp 1–8, 2010.
- [43] F. Li, T. Burke, and J. Jalali, “Developing an induction heating system laboratory with dsp microprocessors and power electronic devices,” *American Society for Engineering Education*, no. AC 2008-1753, ,2008.
- [44] H. Sarnago, O. Lucia, A. Mediano, and J. Burdio, “Direct ac ac resonant boost converter for efficient domestic induction heating applications,” *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 1128–1139, March 2014.
- [45] J. Walter and G. Ceglia, “Using numerical methods to desing and control heating induction system,” *INTECH*, vol. Volumen 1, Febrero 2001.
- [46] X. Duran-Reus, F. J. Quiros, and D. Montesinos-Miracle, “Design of a high-frequency transformer for an induction heating system,” *ETS d’Enginyeria Industrial de Barcelona*, no. 978-1-4799-3866-7/14, pp. pp. 3–10, 2012.
- [47] “Solutrions dedicated to the world of induction heating.”
- [48] N. Sanajit and A. Jangwanitlert, “A series-resonant half-bridge inverter for induction-iron appliances,” *IEEE PEDS*, pp. pp. 46–51, December 2011.

- [49] H. Sarnago, H. Lucia, O. Mediano, and A. Burdio, “High-efficiency power converters for domestic induction heating applications,” in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 3268–3273, Oct 2012.
- [50] M. S. ISLAM, F. NUZHAT, and M. N. H. NADIM, “Ac sine wave generation by using spwm inverter,” Master’s thesis, UNIVERSITY BRAC, APRIL 2012.
- [51] U. Kulkarni, S. Jadhav, and M. Magadum, “Design and control of medium frequency induction furnace for silicon melting,” vol. Volumen 3, July 2014.
- [52] J. Guamán, D. Guevara, and A. Ríos, “Evolución histórica de los circuitos de inducción magnética,” *IEE-Congreso de ingeniería Electrónica y Eléctrica.*, vol. Volumen 5, no. 75-87, pp. Pp. 75–87, 2014. Revista Maskana+I+D+Ingeniería.
- [53] J.-E. Yeon, M.-Y. Park, K.-M. Cho, and H.-J. Kim, “A new high voltage shorted-anode igbt with intrinsic body diode improves performance of single-ended induction cooker,” *Farchild Korea Semiconductor*, 2003.
- [54] J. Avellaned, C. Bernal, A. Otin, P. Molina, and J. M. Burdio, “Half-bridge resonant inverter with sic cascode applied to domestic induction heating,” *Group of Power Electronics and Microelectronics GEPM*, 2012.
- [55] T. Kimmer, “Reverse conducting igbt for induction cooking and resonant applications,” *Infineon Technologies Austria AG*, vol. Vol 2, pp. pp. 4–15, January 2014.
- [56] “Norma ecuatoria de la construcción,” in *MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA*, no. Decreto Ejecutivo N° 705, MIDUVI, Abril 2011.
- [57] I. O. Martínez, “Diseño e instalación de un sistema de calentamiento solar de agua, para el sector rural,” Master’s thesis, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, 2011.
- [58] N. O. A. Correa, “Diseño y construcción de un sistema de calentamiento de agua para la curtidura de cueros,” Master’s thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2012.
- [59] J. Acero, J. Burdio, L. Barragán, D. Navarro, R. Alonso, J. García, F. Monterde, P. Hernández, S. Llorente, and I. Garde, “The domestic induction heating appliance: an overview of recent research,” *IEEE ASSP Magazine*, 2008.

- [60] D.V.Bhaskarl, N.Yagnyaseni, and T.Mait, “Comparison of control methods for high frequency ih cooking applications,” *Power and Energy Systems*, no. 978-1-4799-3421-8, pp. pp. 34–40, 2014.
- [61] J. L. Trueba, *Electromagnetismo, cicircuit y semiconductores*. Universidad Rey Juan Carlos, 2027.
- [62] J. Rajesh, S.V.Deepak, S. andM.Sai kiran, and T. Prasad., “High-frequency resonant matrix converter using igbt-based bidirectional switches for induction heating,” *ISSN*, vol. Vol 4, pp. pp.451–457, February 2014.
- [63] E. Imaz, R. Alonso, C. Heras, I. Salinas, E. Carretero, and C. Carretero, “Infrared thermometry system for temperature measurement in induction heating appliances,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. Vol 61, pp. pp. 2622–2632, Mayo 2014.
- [64] C. S. Norato, “Circuit rlc, la resonancia y los filtros pasivos,” vol. Volumen5, pp. Pgg. 16,24, 2012.
- [65] A. BANDYOPADHYAY, *SOME STUDIES ON HIGH FREQUENCY RESONANT INVERTER BASED INDUCTION HEATER AND THE CORRESPONDING CHOICE OF SECONDARYMETALLIC OBJECTS*. PhD thesis, INDIAN SCHOOL OF MINES, DHANBAD, October 2012.
- [66] CIRCUITIs, “Calculadora inductor con núcleo de aire,” Octubre 2013.
- [67] *Parámetro aplicables a la inforación fnaciera*. IEES, 31 de Diciembre 2014.

Anexos y Apéndices

Anexo A

Esquema y placas del prototipo

En la figura A.1 se presenta el esquema del prototipo diseñado en Liwre.

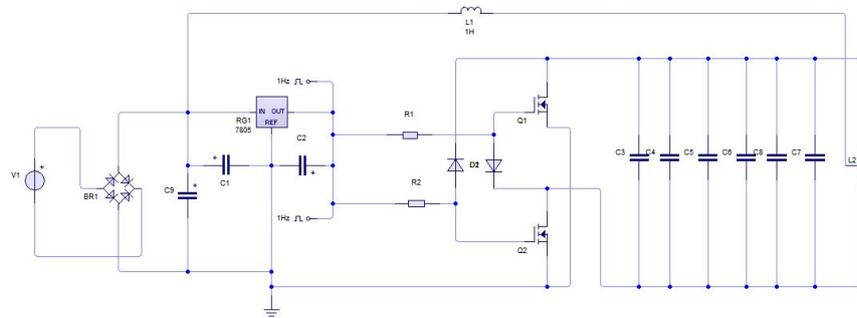
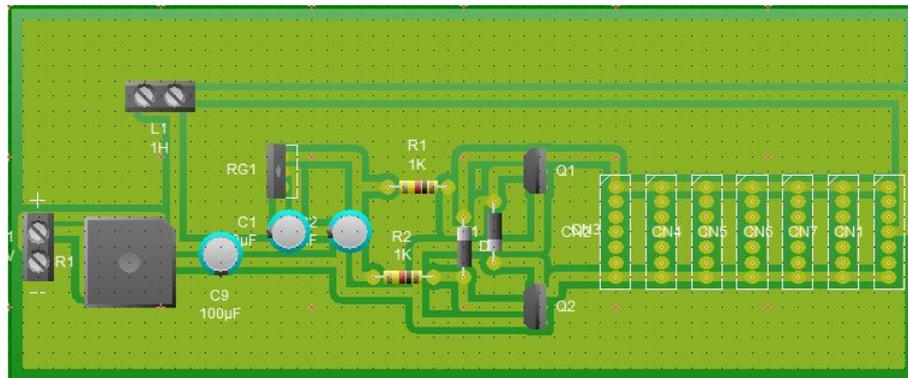
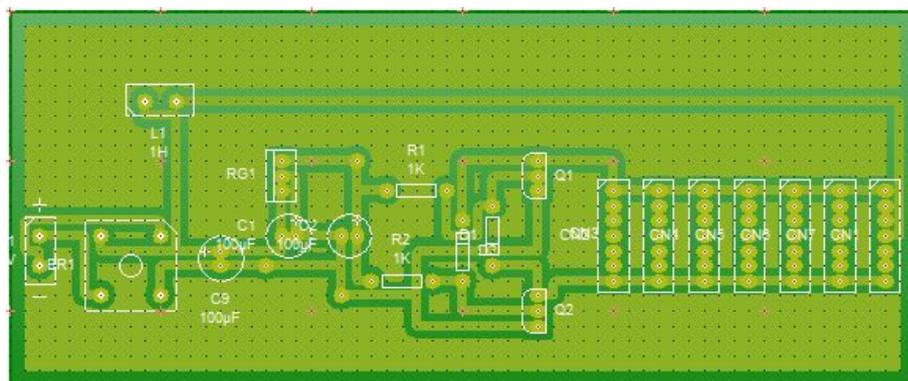


Figura A.1: Esquema de prototipo diseñado en software LiveWire.

En la figura A.2.1 se muestra es esquema del circuito de la placa del sistema de inducción, y la placa impresa del sistema de inducción se presenta en la figura A.2.2.



(a)



(b)

Figura A.2: Placa de elemento y placa impresa

A.1. Datos técnicos de Arduino y su programación

Datos técnicos de el dispositivo arduino

Microcontroladores ATmega328

Tensión de funcionamiento 5V

Voltaje de entrada (recomendado) 7-12V

Voltaje de entrada (límites) 6-20V

Digital pines I / O 14 (de las cuales 6 proporcionan salida PWM)

Botones de entrada analógica 6

Corriente DC por E / S Pin 40 mA

Corriente DC de 3.3V Pin 50 mA

Memoria Flash 32 KB (ATmega328) de los cuales 0,5 KB utilizado por el gestor de arranque

SRAM 2 KB (ATmega328)

EEPROM 1 KB (ATmega328)

Velocidad del reloj 16 MHz

Longitud 68,6 mm

Anchura 53,4 mm

Peso 25 g.

La conexión de dispositivo arduino con las salidas PWM y la pantalla LCD se observa en la figura.

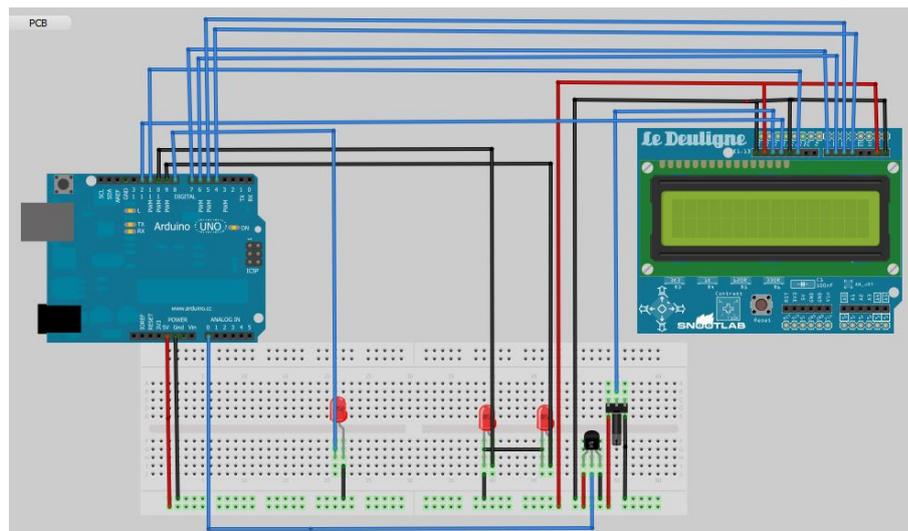


Figura A.3: Conexión del Arduino con la pantalla LCD y PWM.

A continuación se presenta la programación del PWM en el Arduino junto a la programación del termostato el cual controla la conexión y desconexión del sistema de CPI de agua para el uso doméstico.

```

*****

/* OSILADOR (INVERSOR PWM) Y CONTROL DE DESCONEXION DEL
SISTEMA EN BASE A LA TEMPERATURA*/
//Declaro variables que no se pueden modificar
//mientras el programa esté en funcionamiento.
//Libreria del LCD #include <LiquidCrystal.h>
//Pines de la LCD configuracion //2 3 4 5 bus de datos de la LCD
//11 enable, 12 seleccion de registro
LiquidCrystal lcd (12, 11, 5, 4, 3, 2);
//Caracter personalizado de °
byte personaje1[8] = {
0b11100,
0b10100,
0b11100,
0b00000,
0b00000,
0b00000,
0b00000,
0b00000
};
float centi() {
int dato;
float c; dato= analogRead(A0);
c= (5.00*dato*100.00)/1023.00;
delay (500);
return (c); }
#define PIN8 8
#define PIN9 9
#define PIN10 10
#define POT A0
//Variables que pueden cambiar durante ejecución de código.
int TiempoEspera = 0;
//Inicia la configuración de los pines del Microcontrolador.
void setup() {
//Setea el Pin 9, 8 y 10 como pines de Salida,
pinMode(PIN8,OUTPUT);
pinMode(PIN9, OUTPUT);

```

```

pinMode(PIN10, OUTPUT);
//Configura los pines 9 y 10 en estado bajo (0 Volts), Apagado.
digitalWrite(PIN9, LOW);
digitalWrite(PIN10, LOW);
digitalWrite(PIN8, LOW);
//Configura el Pin Análogo A0 como entrada.
pinMode(POT, INPUT); }
lcd.createChar(2, personaje1);
//Caracteristicas del LCD lcd.begin(16, 2);
// lcd.print ("Temp Agua");
lcd.setCursor(0,1); lcd.print ("C= ");
lcd.setCursor(4,1); lcd.write(2);
}
//Programa
void loop() {
// Posicionar el cursor en la pantalla
int Centigrados = centi();
lcd.setCursor(2,1);
lcd.print(Centigrados);
//Lee el valor de la dato
Lectura_cent = analogRead(c);
//Tiempo de Espera
TiempoEspera = map(Lectura_c,0,1023, 1, 10000);
//Enciende el Led conectado al PIN9 y Apaga el PIN10
digitalWrite(PIN9, HIGH);
digitalWrite(PIN10, LOW);
//Espera el tiempo según dato.
delay(TiempoEspera);
//Apaga el Led del PIN9 y Enciende el Led del PIN10.
digitalWrite(PIN9, LOW);
digitalWrite(PIN10, HIGH);
//Espera el tiempo según potenciómetro. delay(TiempoEspera);
if (temperatura < 60){//cambiar numero en funcion de lo que se desee
digitalWrite(8, LOW);
}
}
}
*****

```

Anexo B
Datasheet