

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS ELECTRÓNICOS**

**TEMA:
DESARROLLO DE UN CALENTADOR DE AGUA ORIENTADO AL USO
DOMÉSTICO UTILIZANDO UN CONVERTIDOR RESONANTE**

**AUTORES:
HENRY PAÚL LLUMIQUINGA GUALOTO
JOSÉ AGUSTÍN TIPÁN SALAZAR**

**TUTOR:
JAVIER ARTURO ROJAS URBANO**

Quito, marzo del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Henry Paúl Llumiquinga Gualoto, con documento de identificación N° 1721882999 y José Agustín Tipán Salazar, con documento de identificación N° 1726780669, respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: DESARROLLO DE UN CALENTADOR DE AGUA ORIENTADO AL USO DOMÉSTICO UTILIZANDO UN CONVERTIDOR RESONANTE, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO ELECTRÓNICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

.....
Henry Paúl Llumiquinga Gualoto
C.I. 1721882999

.....
José Agustín Tipán Salazar
C.I. 1726780669

Quito, marzo del 2021.

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico: DESARROLLO DE UN CALENTADOR DE AGUA ORIENTADO AL USO DOMÉSTICO UTILIZANDO UN CONVERTIDOR RESONANTE, realizado por Henry Paúl Llumiquinga Gualoto y José Agustín Tipán Salazar, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, marzo del 2021.



.....
Javier Arturo Rojas Urbano

C.I.: 020189802-0

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mi familia, mis padres Blanca y Oswaldo, por educarme desde el hogar y sobre todo brindarme su apoyo incondicional en todo momento, por su motivación, esfuerzo y constancia para superarme en los estudios y terminar mi carrera universitaria.

A mi hermana Alejandra, por estar siempre presente en cada momento de mi vida, por el cariño y los consejos que me impulsan a cumplir mis metas propuestas.

A mis abuelitos Elvia y José Miguel, quienes fueron las personas después de mis padres, que desde muy pequeño me cuidaron. Me enseñaron muchas cosas valiosas para mi vida y me encaminaron en la fe. A mi abuelito papi Miguel hace pocos meses de su partida que desde dónde se encuentre él me bendice.

Henry

Quiero dedicar de manera especial este trabajo a mi madre Carmen quien me ha dado su apoyo incondicional, guiándome a través de la vida para convertirme en una persona mejor cada día, ya que por medio de su trabajo y esfuerzo me brindó la oportunidad de estudiar la carrera que me gusta y ser un profesional.

José

AGRADECIMIENTO

Primeramente agradecer a Dios por la familia que tengo, a mis padres por sus consejos y ser un pilar fundamental en mi vida en cada decisión que tomo.

Al Ing. Javier Rojas por haberme transmitido su conocimiento científico, así como también por toda la paciencia y la predisposición para salir adelante con en el desarrollo del proyecto.

A mi compañero José, gracias al compañerismo y apoyo moral me permitió llegar a estas instancias, con su dedicación y capacidad de conocimiento para seguir paso a paso.

A oratorio María Auxiliadora – El Girón (OMA), desde el inicio de mis prácticas de vinculación conviví con grandiosas personas, así decidí formar parte del oratorio porque me sirvió para madurar como persona, no solo en el ámbito académico sino también en la formación humana con carisma salesiano de ayuda a favor de la niñez y la juventud.

Henry

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre y padre por el apoyo incondicional que me ha dado en toda mi vida.

Al Ing. Javier Rojas por compartir su conocimiento y guiarme en la realización del presente trabajo.

Al Ing. Roberto Pérez quien me enseñó que a pesar de no tener el conocimiento de cómo realizar algo, con esfuerzo y dedicación se puede lograr superar este muro y tener éxito.

A mi compañero Henry, quien a pesar de la situación que vive el mundo tuvo que viajar largas distancias para poder continuar con el avance del proyecto.

Al grupo T-ARA que con sus canciones siempre me levanta el ánimo en los momentos que más lo necesito.

José

ÍNDICE GENERAL

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
CAPÍTULO 1	1
ANTECEDENTES.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. METODOLOGÍA.....	3
CAPÍTULO 2.....	4
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. CALENTAMIENTO DE AGUA.....	4
2.2. CONFORT EN EL CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIA	4
2.2.1. Sensación térmica.....	5
2.2.2. Reacción del organismo a la temperatura del agua	5
2.3. SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIO.....	6
2.3.1. Calentador instantáneo.....	7
2.3.2. Calentador por acumulación	8
2.4. SISTEMA DE AGUA CALIENTE POR INDUCCIÓN	9
2.4.1. Principio de funcionamiento	10
2.4.1.1. <i>Corrientes de Foucault</i>	10
2.4.1.2. <i>Efecto Joule</i>	11
2.4.1.3. <i>Histéresis</i>	11

2.4.1.4.	<i>Profundidad de penetración (efecto piel)</i>	12
2.4.1.5.	<i>Frecuencia de trabajo</i>	13
2.5.	COMPONENTES DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN.....	13
2.5.1.	Fuentes de alimentación.....	14
2.5.2.	Etapa de rectificación.....	14
2.5.3.	Inversor de alta frecuencia	14
2.5.4.	Resistencia equivalente o carga	15
2.5.5.	Circuito de control.....	15
2.6.	SISTEMAS DE CALENTAMIENTO POR INDUCCION EXISTENTES	15
2.6.1.	Calefón eléctrico Ecosmart Eco 11	15
2.6.2.	Calefón de inducción Heizen	16
2.6.3.	Calentador de agua por inducción H-one.....	16
2.7.	PROYECTOS REALIZADOS PARA EL SISTEMA DE CALENTAMIENTO POR INDUCCION.....	17
CAPÍTULO 3		18
DISEÑO DEL CALENTADOR POR INDUCCIÓN		18
3.1.	PROPUESTA GENERAL.....	18
3.2.	DISEÑO DEL SUBSISTEMA DEL CIRCUITO DE POTENCIA	19
3.2.1.	Filtro capacitivo de entrada (EMI).....	20
3.2.2.	Puente rectificador	21
3.2.3.	Diseño del filtro LC	22
3.2.4.	Diseño del inversor Clase E.....	24
3.2.5.	Selección del interruptor IGBT	26
3.3.	DISEÑO DEL SUBSISTEMA DEL CIRCUITO DE DISPARO.....	28
3.4.	DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE SINCRONIZACIÓN	29
3.5.	DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO.....	31
3.5.1.	Circuito sensor de temperatura para el reservorio.....	31
3.5.2.	Circuito sensor de caudal	32
3.5.3.	Circuito de refrigeración	33
3.5.4.	Circuitos para temperatura de bobina e IGBT	35
3.6.	DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE CONTROL.....	36
3.6.1.	Programa principal microcontrolador PIC18F2550.....	38
3.6.2.	Programa principal microcontrolador PIC 16F1619	41
3.7.	DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE ALIMENTACION.....	44

3.8. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL CALENTADOR.....	46
3.8.1. Reservorio acumulador	46
3.8.2. Chasis	48
3.8.3. Esquema de las placas PCB	48
CAPÍTULO 4.....	51
SIMULACIÓN Y PRUEBAS.....	51
4.1. DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DEL CALENTADOR.....	51
4.2. SIMULACIÓN DEL SUBSISTEMA DEL CIRCUITO DE POTENCIA .	51
4.2.1. Prueba de voltaje a la salida del filtro LC (VDC) y voltaje resonante colector – emisor del IGBT (VCE)	51
4.2.2. Pulso de reconocimiento para la verificación del reservorio	52
4.3. SIMULACIÓN DEL SUBSISTEMA DEL CIRCUITO DE DISPARO	53
4.3.1. Prueba de voltaje de activación del IGBT y VCE.....	53
4.4. SIMULACIÓN DEL SUBSISTEMA DEL CIRCUITO DE SINCRONIZACIÓN	54
4.4.1. Pulsos de activación del IGBT y pulso de sincronización	54
4.5. PRUEBA DE POTENCIA DEMANDADA POR EL CALENTADOR	54
4.6. PRUEBAS DEL CONVERTIDOR RESONANTE EN LAZO CERRADO.....	56
4.6.1. Prueba de calentamiento con agua estática	56
4.6.2. Prueba de calentamiento con agua dinámica	58
4.6.3. Prueba de conservación de la temperatura en reposo del agua	65
CONCLUSIONES	67
RECOMENDACIONES	69
REFERENCIAS	70
ANEXO 1.....	74
ANEXO 2.....	75
ANEXO 3.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema en bloque de un calentador ACS.....	7
Figura 2.2. Calentador de agua instantáneo.	8
Figura 2.3. Calentador de agua por acumulación.....	9
Figura 2.4. Principio del calentamiento por inducción.	10
Figura 2.5. Corriente de Foucault en un metal sólido.	10
Figura 2.6. Efecto joule en un circuito eléctrico.	11
Figura 2.7. Efecto del campo magnético en un material ferromagnético.	11
Figura 2.8. Ciclo de histéresis.	12
Figura 2.9. Efecto pelicular en un conductor.	13
Figura 2.10. Representación en bloques del calentamiento por inducción.	13
Figura 2.11. Rectificador monofásico de onda completa.....	14
Figura 2.12. Inversor DC/AC.....	14
Figura 2.13. Calentador de agua Ecosmart	15
Figura 2.14. Calefón de agua Heizen	16
Figura 2.15. Calentador de agua H-one	16
Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema implementado.....	18
Figura 3.2. Diagrama del circuito de potencia	20
Figura 3.3. Ubicación del Capacitor de filtrado EMI.....	20
Figura 3.4. Capacitor de filtrado de armónicos MKP-X2	21
Figura 3.5. Puente rectificador de diodos.....	21
Figura 3.6. Puente de diodos DS25SB80	22
Figura 3.7. Filtro LC	22
Figura 3.8. Bobina y capacitor del filtro LC	23
Figura 3.9. Funcionamiento del inversor clase E.....	24
Figura 3.10. Bobina plana para inducción	26
Figura 3.11. Capacitor resonante MKPH SH.....	26
Figura 3.12. IGBT en el inversor resonante	27
Figura 3.13. IGBT H20R1203	28
Figura 3.14. Circuito de disparo del IGBT	28
Figura 3.15. Comparación de voltajes para sincronizar la activación del IGBT	30
Figura 3.16. Circuito de sincronización para la conmutación del IGBT	30
Figura 3.17. Circuito del sensor de temperatura	32

Figura 3.18. Sensor DS18B20.....	32
Figura 3.19. Circuito del sensor de caudal.....	32
Figura 3.20. Sensor YF-201	33
Figura 3.21. Circuito del ventilador	34
Figura 3.22. Ventilador de refrigeración.....	35
Figura 3.23. Circuito del sensor NTC en la bobina e IGBT	35
Figura 3.24. Software para el cálculo del termistor	36
Figura 3.25. Sensor NTC	36
Figura 3.26. Diagrama de flujo del programa principal microcontrolador 18F2550 .	40
Figura 3.27. Diagrama de flujo para detección de tanque y sobre temperatura.....	41
Figura 3.28. Diagrama de flujo del programa principal microcontrolador 16F1619 .	43
Figura 3.29. Diagrama de flujo para caso de sobre temperatura 16F1619	43
Figura 3.30. Circuito regulador de voltaje	45
Figura 3.31. Estructura del reservorio.....	47
Figura 3.32. Componentes ubicados en el reservorio	47
Figura 3.33. Chasis para los circuitos	48
Figura 3.34. Diseño e implantación de la PCB para el circuito de potencia.....	49
Figura 3.35. Diseño de la PCB para el circuito de control.....	49
Figura 3.36. Ubicación de los PCB en el chasis	50
Figura 4.1. Voltajes medidos entre VDC y VCE.....	51
Figura 4.2. Pulso de detección con carga.....	52
Figura 4.3. Pulso de detección sin carga.....	53
Figura 4.4. Voltaje de activación del IGBT y VCE	53
Figura 4.5. Pulso de sincronización y activación del IGBT.....	54
Figura 4.6. Cambio de temperatura y potencia vs. Tiempo dentro del reservorio	56
Figura 4.7. Cambio de temperatura y potencia variable con respecto al tiempo para un caudal de 0.5L/min.....	59
Figura 4.8. Cambio de temperatura a potencia máxima constante respecto al tiempo para un caudal de 0.5L/min.....	60
Figura 4.9. Cambio de temperatura y potencia variable con respecto al tiempo para un caudal de 1L/min.....	62
Figura 4.10. Cambio de temperatura a potencia máxima constante respecto al tiempo para un caudal de 1L/min.....	64
Figura 4.11. Conservación de la temperatura en reposo del agua.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Negocios que emplean agua caliente	4
Tabla 2.2. Factor térmico del agua.....	5
Tabla 2.3. Grado de reacción según la temperatura del agua.....	6
Tabla 2.4. Servicios de agua caliente y la regulación de la temperatura del agua.	6
Tabla 3.1. Señales de voltaje para activación del IGBT.	29
Tabla 3.2 Valores obtenidos al caracterizar el sensor NTC.....	35
Tabla 3.3. Comparación entre microcontroladores comerciales de alta velocidad....	37
Tabla 3.4. Comparación entre microcontroladores comerciales de baja y media velocidad	38
Tabla 3.5 Consumo de corriente de dispositivos a 18 V	44
Tabla 3.6 Consumo de corriente de dispositivos a 5 V	44
Tabla 3.7, Rizado de la fuente a diferentes valores de capacitor	46
Tabla 4.1. Valores obtenidos entre VDC y VCE	52
Tabla 4.2. Potencia resultante sin aislante térmico	55
Tabla 4.3. Potencia resultante con aislamiento térmico.....	55
Tabla 4.4. Tiempo requerido para calentar agua.....	58
Tabla 4.5. Tiempo que mantiene la temperatura con un caudal de 0.5L/min a potencia variable.....	60
Tabla 4.6. Tiempo que mantiene la temperatura con un caudal de 0.5L/min a máxima potencia	61
Tabla 4.7. Tiempo que mantiene la temperatura con un caudal de 1L/min a potencia variable.....	63
Tabla 4.8. Tiempo que mantiene la temperatura con un caudal de 1L/min a potencia máxima.....	65
Tabla 4.9. Pérdida de calor del reservorio al transcurrir 30 minutos	66

RESUMEN

Esta investigación detalla el estudio, diseño, simulación e implementación de un sistema para calentar agua sanitaria por medio de la inducción electromagnética, consta de seis subsistemas que en conjunto hacen funcionar el calentador. Primero el subsistema del circuito de potencia, se alimenta por la red eléctrica, encargado de generar un campo magnético variable y consta de un rectificador, un filtro y un inversor resonante clase E; segundo el subsistema del circuito de disparo, un arreglo de resistencias que permite elevar el voltaje obtenido en el subsistema de control para activar adecuadamente el conmutador que se encuentra en el primer subsistema; tercero el subsistema de sincronización, indica el momento de activación del conmutador del primer subsistema logrando la condición de ZVS; cuarto el subsistema de acondicionamiento, un conjunto de circuitos que permite una lectura precisa de valores de los sensores por medio del acondicionamiento de su señal y filtrado para ser utilizadas por el subsistema de control; quinto el subsistema de control, monitorea las variables del sistema del calentador y realiza acciones de control en la activación del conmutador del primer subsistema; sexto el subsistema de alimentación, convierte el voltaje obtenido de la red eléctrica en niveles de voltajes requeridos para el funcionamiento de los subsistemas de control y circuito de disparo. Este proyecto contiene ecuaciones que permiten dimensionar componentes electrónicos que conforman el calentador de agua sanitaria por inducción para su implementación, mediante los resultados obtenidos de la investigación realizada, permite un dimensionamiento de materiales para mayores niveles de potencia.

ABSTRACT

This investigation details the study, design, simulation and implementation of a system to heat sanitary water by electromagnetic induction, consisting of six subsystems that together run the heater. First the power circuit subsystem is powered by the electrical grid, which is responsible for generating a variable magnetic field and consists of a rectifier, filter and a class E resonant inverter; second the firing circuit subsystem, an array of resistors that allows to raise the voltage obtained in the control subsystem to properly activate the switch that is in the first subsystem; third, the synchronization subsystem indicates the time of activation of the switch of the first subsystem achieving the ZVS condition; fourth the conditioning subsystem, a set of circuits that allows accurate reading of sensor values by conditioning their signal and filtering to be used by the control subsystem; fifth the control subsystem, monitors the heater system variables and performs control actions on the activation of the switch of the first subsystem; sixth the supply subsystem, converts the voltage obtained from the electrical grid into voltage levels required for the operation of the control subsystems and firing circuit. This project contains equations that allow to size electronic components that make up the induction sanitary water heater for implementation, through the results obtained from the research carried out, allows a sizing of materials for higher power levels.

INTRODUCCIÓN

El capítulo 1 describe el planteamiento del problema, se establece los objetivos a cumplir y la metodología a utilizar para desarrollo del proyecto.

El capítulo 2 desarrolla la fundamentación teórica, conceptual y técnica, que sustentan la implementación del proyecto relacionado con el sistema de calentamiento de agua por inducción para uso doméstico.

El capítulo 3 esquematiza el diseño y construcción del calentador de agua por inducción, se dimensiona cada componente del circuito para la etapa de control y potencia.

El capítulo 4 evidencia las pruebas de simulación por etapas de los subsistemas que intervienen en el circuito, su funcionamiento y análisis de gráficos que se obtuvieron en el desarrollo del proyecto.

El capítulo 5 incluye las conclusiones y recomendaciones resultadas de la investigación e implementación relaciona con el calentar de agua por inducción

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Gobierno Nacional a través del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable a considerado prioritario la eliminación del subsidio al gas licuado de petróleo, debido que representa el 90% del valor real de un tanque de 15Kg y son distribuidos anualmente alrededor de 1.097,01 millones de kilogramos anuales, además que del 100% de su distribución el 20% es desviado al contrabando, de lo dicho anteriormente esto representa una importante contribución en el gasto público al estado, sin embargo los sectores residenciales e industriales deberán adoptar esta medidas, al asumir los costos del 90% que era subsidiado por el estado, lo cual representaría un aproximado de USD 16 (Pacheco, 2019).

Asimismo, existe la intención de regular y aplicar subsidios más focalizados en la electricidad que no afecten la calidad de vida de los hogares, ni a la producción de las empresas (Sánchez & Reyes, 2016). Pero a pesar de las acciones tomadas por el Ecuador, resulta más costoso la utilización de sistemas eléctricos en comparación al uso de cilindros de gas en los hogares, tal es el caso un calentador eléctrico tradicional de 12Kw representa un consumo mensual de entre USD 15 y 25, para una familia de cuatro integrantes (Pacheco, 2019).

De acuerdo a informes técnicos por bomberos en la ciudad de Quito, las emisiones en domicilios causadas por los calentadores de agua por gas licuado de petróleo generan dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, gases que según la Organización Mundial de la Salud (OMS) se encuentra bajo los límites de las normas vigentes actualmente, aun así la mala e inadecuada instalación, fugas, ventilación y falta de mantenimiento conlleva a la exposición directa de monóxido de carbono, el cual al ser inhalado contamina el torrente sanguíneo al reemplazarla por oxígeno, produciendo daños graves en el tejido e incluso la muerte. (Samaniego, Hernández, & Correa, 2016)

1.2. JUSTIFICACIÓN

Debido a la presión que sufre el estado por el gasto público obligado por los subsidios, las políticas ecuatorianas estudian la necesidad de promover procesos de transición en el sector residencial a través de la ejecución del “Programa de eficiencia energética para cocción por inducción y calentamiento de agua con electricidad en lugar de gas licuado de petróleo para el sector residencial”. (Echeverría Espinoza & Guayanlema, 2017). Según la Corporación Nacional de Electricidad (CNEL) afirma que el país al poseer riquezas hídricas, dentro de su plan maestro de electricidad 2016 – 2025 determina que la demanda proyectada de aquí a cinco años es de 5.579 MW con un exceso de capacidad entre el 10% y el 20% como reserva para garantizar el abastecimiento (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2018).

Según estudios comparativos realizados por Cáceres y Montero, aseguran que la potencia eléctrica en el calentamiento de agua debe utilizarse métodos eficientes que los tradicionales, tal es el caso, la potencia eléctrica consumida al calentar agua por resistencia eléctrica es de 4313,66W y con pérdidas por efecto Joule de 8%, así también al utilizar gas licuado de petróleo para calentar agua, las pérdidas generadas son de 15%, esto se debe a pérdidas por distribución de energía calorífica en el entorno, sin embargo al utilizar un sistema de calentamiento por inducción electromagnética se consume 953,16W con pérdidas en fugas de flujo magnético de 4%, además el tiempo que tarda en calentar el agua se reduce al utilizar inducción electromagnética, dejando en claro que los sistemas de calentamiento tradicionales son ineficientes (Cáceres & Montero, 2016).

Este tipo de calentamiento aprovecha óptimamente la energía por lo que el aumento en el pago mensual de energía eléctrica no es significativo, sustituyendo a los calefones a gas y reduciendo significativamente la emisión de gases a la atmósfera y cero emisiones de dióxido de carbono, contribuyendo así al cuidado del medio ambiente. (Quevedo, Quizhpi, Morales, Cabral, & Bretas, 2014)

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un convertidor resonante para el calentamiento de agua orientado al uso doméstico.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar la técnica de calentamiento por inducción para la determinación de sus variables y lógica de control.
- Diseñar un conversor resonante con control en lazo cerrado para la implementación del calentamiento por inducción.
- Implementar el sistema de calentamiento por inducción para el aumento de la temperatura del agua mediante un convertidor resonante.
- Evaluar la funcionalidad del calentador de agua para la verificación de su funcionamiento.

1.4. METODOLOGÍA

Mediante el método inductivo se realizará un estudio de: tipos de calentadores con sistema de control automático, tipos de calentadores que se utiliza residencialmente, etapas que conforma un inversor resonante puente completo, efectos del crecimiento poblacional respecto al uso de la energía, en papers, publicaciones, informes, entre otros.

Se aplicará el método analítico para determinar las variables y lógica de control del calentador de inducción electromagnética.

Finalmente, se empleará el método experimental para evaluar los resultados que se obtengan del sistema de calentamiento por inducción.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos necesarios para comprender el funcionamiento de un calentador de agua por inducción.

2.1. CALENTAMIENTO DE AGUA

Las personas utilizan el agua caliente según lo requieran en varias actividades de la vida cotidiana, su uso se lo hace diariamente en lavadoras de ropa, para quitar la suciedad, en lavamanos, duchas para la higiene del cuerpo humano y en lavaplatos, para retirar impurezas de los utensilios utilizados en la preparación de alimentos. En la Tabla 2.1 se muestran las aplicaciones industriales que se le da al agua caliente (Lizcano Castro, Uscátegui Ciendua, & Romero Rojas, 2019)

Tabla 2.1 Negocios que emplean agua caliente

Industria	Aplicación
Molinos de Nixtamal	Fabricación de tortillas de maíz
Embotelladoras	Elaboración de refrescos y alcohol
Industria textil	Productos textiles
Curtidurías	Curtido de cuero
Lavanderías	Tintorerías
Destilerías	Elaboración de bebidas destiladas

Uso del agua caliente en la industria. Fuente: (Deutsche Zusammenarbeit)

2.2. CONFORT EN EL CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIA

Describe las condiciones que debe tener el agua sanitaria para brindar comodidad al usuario para su uso y consumo, estas se pueden determinar con las siguientes variables (Trillo, González Arias, & Sánchez de León Linares, 2020):

- temperatura
- caudal
- disponibilidad
- seguridad

En general la temperatura es la variable que mayor influencia tiene en el confort.

2.2.1. Sensación térmica

Describe la captación de calor y frío, que tiene el ser humano, de los elementos que están en su entorno, pero esta no es fidedigna ya que puede verse alterada por distintas causas como son: (Pastor, Escobar, Mayoral, & Ruiz, 2020)

- **La temperatura corporal:** si la temperatura del elemento con el que se está en contacto es mayor que la temperatura corporal se tendrá la percepción de interactuar con un cuerpo caliente y si es menor se sentirá frío.
- **La experiencia previa:** la sensación depende de la temperatura del objeto con el que se tuvo interacción anteriormente.
- **Las características del elemento:** si el elemento tiene la propiedad de transferir fácilmente el calor o el frío, se puede apreciar una temperatura mayor o menor.
- **El medio ambiente:** las condiciones climáticas de los lugares afectan a la sensación térmica incrementando la sensación de frío o calor.

De acuerdo con la sensación térmica, el agua se clasifica como se indica en la Tabla 2.2, el agua se utiliza como transmisor y conductor de calor, por lo que siempre tendrá una temperatura distinta a la temperatura corporal (ADAMS, 2017)

Tabla 2.2. Factor térmico del agua.

Sensación térmica	Temperatura [°C]
Muy fría	10-15
Fría	16-23
Tibia	24-30
Indiferente	31-33
Caliente	34-38
Muy caliente	Más de 39

Las sensaciones térmicas son subjetivas y diferentes en cada individuo, sin embargo no son valores absolutos los límites de esta escala. Fuente: (ADAMS, 2017)

2.2.2. Reacción del organismo a la temperatura del agua

El agua causa diferentes tipos de reacciones en el organismo de una persona dependiendo de la temperatura a la que se encuentra, las reacciones se resumen en la

Tabla 2.3. Si un objeto externo está a la misma temperatura que la piel del cuerpo humano, el organismo no presenta ninguna reacción. (SESCAM, 2019)

Tabla 2.3. Grado de reacción según la temperatura del agua.

Temperatura	Grados [°C]	Reacción Nerviosa	Reacción Circulatoria	Reacción Térmica
Muy caliente	45	Fuerte	Fuerte	Fuerte
Caliente	34	Mediana	Mediana	Mediana
Tibia	28	Nula	Nula	Nula
Temperatura ambiente	25	Muy débil	Muy débil	Muy débil
Fría	10	Fuerte	Fuerte	Fuerte

La temperatura del agua produce un cierto grado de reacción térmica, más aún si se expone a temperatura muy caliente y fría la reacción es fuerte. Fuente: (Méndez Vallejos, 2019)

La norma publicada por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) 62395 recomienda que el agua sanitaria, de acuerdo con su uso, tenga la temperatura que se detalla en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Servicios de agua caliente y la regulación de la temperatura del agua.

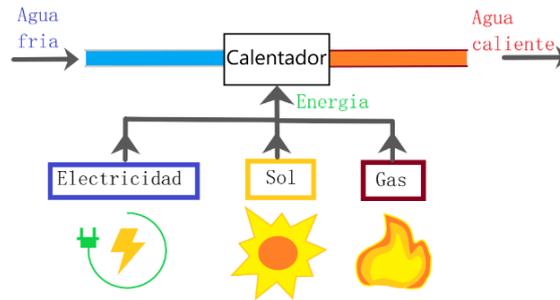
Aplicación	Temperatura [°C]
Ducha y lavado de ojos seguros	16 a 35
Servicio de agua caliente sin válvulas mezcladoras	40
Hogar de ancianos y hospitales	40 a 46
Servicio de lavandería	71
Limpieza de la cocina	82

Se detalla las recomendaciones para la regulación de la temperatura en los sistemas de calefacción industrial y comercial. Fuente: (Danfoss, 2016)

2.3. SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIO

El agua caliente se puede obtener mediante un calentador, como se muestra en la Figura 2.1, el cuál transfiere temperatura al agua utilizando electricidad, gas licuado de petróleo y energía solar, su construcción busca mayor eficiencia y actualmente se trata de evitar el uso de energías no renovables, aportando al cuidado del medio ambiente. (Cañero, 2018)

Figura 2.1. Esquema en bloque de un calentador ACS.



Funcionamiento general de un calentador de agua sanitaria. Autores: Henry Llumiyinga y José Tipán

Las instalaciones del agua caliente sanitaria se clasifican según la aplicación, el uso y la producción. De acuerdo con la producción se puede clasificar en calentador instantáneo y calentador por acumulación. (Trillo, González Arias, & Sánchez de León Linares, 2020)

2.3.1. Calentador instantáneo

Es un sistema en el que el calentamiento del agua se da de forma instantánea, con un suministro continuo y sin límite de tiempo. El agua circula por un serpentín, que se calienta por medio de un quemador cuando se abre la llave en cualquier punto de uso o servicio, entre los sistemas más tradicionales están los sistemas que calientan el serpentín por medio de gas, duchas eléctricas y calderas. (Danahé , 2018)

El calentador debe disponer de la capacidad de calentamiento suficiente para provocar el aumento de la temperatura según el caudal requerido, su implementación se recomienda para el uso en un solo punto de salida, si se usa en más, la temperatura es diferente en cada salida de agua. (Trillo, González Arias, & Sánchez de León Linares, 2020)

Figura 2.2. Calentador de agua instantáneo.



Utiliza un serpentín por el que viaja el agua, elevando su temperatura de forma inmediata. Fuente: (MN Del Golfo, 2020)

Ventajas:

- El calentamiento del agua se realiza rápidamente.
- Son de tamaño reducido, poco peso y poco volumen.
- Gasto de energía únicamente cuando usa agua caliente.
- Suministro continuo de agua caliente sin límite de tiempo.

Desventajas:

- La temperatura máxima y el caudal están limitados a uno o pocos puntos de trabajo.
- Es útil en el uso doméstico y moderado.
- El uso prolongado incrementa el requerimiento de energía.

2.3.2. Calentador por acumulación

Es un sistema en el que el calentamiento del agua se produce de manera gradual, el agua se almacena en uno o varios tanques, que se calienta por un quemador, el quemador se enciende y apaga de acuerdo a umbrales de temperatura máximo y mínimo. El tanque está construido con materiales resistentes a la corrosión y fugas, tiene un aislante térmico para mantener la temperatura en su interior por largos periodos de tiempo. (Fernández Membrive, Tolón Becerra, & Lastra Bravo, 2016)

Figura 2.3. Calentador de agua por acumulación.



El tanque acumula y calienta el agua simultáneamente en su interior, hasta el momento de uso. Fuente: (Iberia, 2019)

Ventajas:

- Menor consumo energético en comparación con el calentador instantáneo.
- Con un tanque acumulador más grande se puede abastecer a varios puntos de salida por lo que es útil en viviendas, edificios, hoteles, restaurantes, etc.
- Permite el almacenamiento del agua en situaciones de escasez.

Desventajas:

- Las dimensiones del tanque definen el tiempo necesario para calentar el agua y el consumo energético.
- Pérdida de calor en el acumulador debido a la interacción con el medio ambiente.
- Tiene mayor peso y volumen.
- Requiere de mayor tiempo de restablecimiento cuando el tanque se vacía por completo.
- El costo varía de acuerdo al tamaño del acumulador.

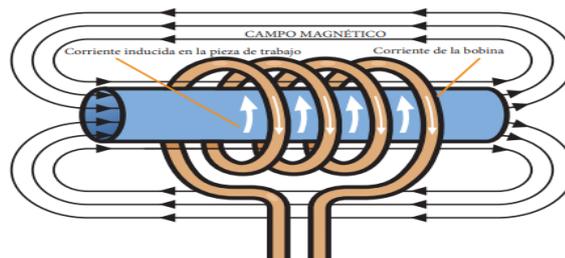
2.4. SISTEMA DE AGUA CALIENTE POR INDUCCIÓN

Es un sistema de calentamiento instantáneo que calienta directamente a un elemento sin emitir calor al ambiente, presenta una eficiencia del 95%, mientras que otras formas de calentamiento tienen una eficiencia del 55% al 65%. (Guamán Molina, Guevara Aulestia, García Carrillo, & Ríos Villacorta, 2016).

2.4.1. Principio de funcionamiento

Este sistema de calentamiento se basa en la Ley de Faraday y el efecto Joule ya que el calor se produce en un elemento conductor debido a la circulación de una corriente eléctrica inducida por un campo magnético alterno generado por un inductor, el calor generado es localizado y sin contacto directo. También se basa en la histéresis magnética por lo que se produce calor adicional por medio de la fricción interna en las partes magnéticas, en la Figura 2.4 se puede observar un esquema de lo explicado. (Atmospheres, 2016)

Figura 2.4. Principio del calentamiento por inducción.



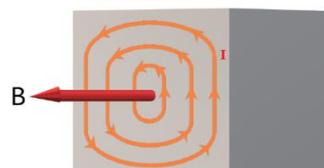
La bobina de trabajo transfiere energía a la pieza de trabajo mediante un campo electromagnético alterno. Fuente: (Ambrell Induction Heating Solutions, 2020)

2.4.1.1. Corrientes de Foucault

Son las corrientes inducidas que circulan en la superficie de un elemento conductor al estar en presencia de un campo magnético variable, estas corrientes se forman porque la superficie del elemento se comporta como un cortocircuito, por lo que circulan corrientes de forma semejante a un torbellino. (Serway & Jewett, 2018)

Este fenómeno depende de la resistividad del elemento como de la fuerza electromotriz inducida y consume energía para la generación de calor sobre el metal, causando pérdidas. (Fidalgo Sánchez, Fernández Pérez, & Fernández Fernández, 2016)

Figura 2.5. Corriente de Foucault en un metal sólido.

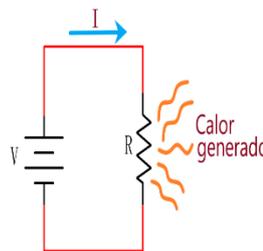


Corrientes en torbellino cerradas sobre si mismas al ser atravesado un metal por un campo magnético variable. Autores: Henry Llumiquire y José Tipán

2.4.1.2. Efecto Joule

Determina el incremento de la temperatura en un material conductor por el cuál fluye una corriente eléctrica, generando calor, esto se debe a las características propias de los materiales conductores al presentar una resistencia eléctrica, para conocer la magnitud del calor producido se debe tener en consideración también el tiempo que circula la corriente. (García Trasancos, 2016)

Figura 2.6. Efecto joule en un circuito eléctrico.

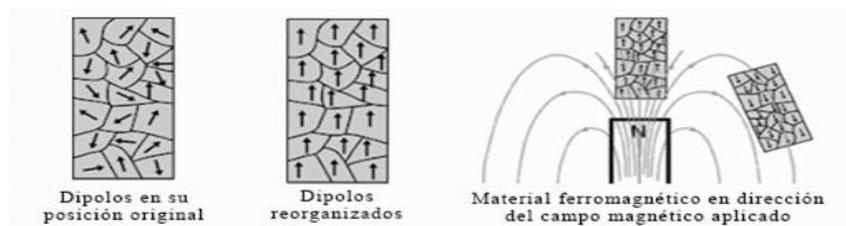


Generación de calor en una resistencia debido al paso de corriente. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

2.4.1.3. Histéresis

Un material ferromagnético está conformado por moléculas conocidas como dominios magnéticos que se encuentran situadas en una posición definida, cuando un material no magnetizado se encuentra bajo el efecto de un campo magnético externo, los dominios tienden a cambiar de posición causando su magnetización. (Valencia Giraldo & Aristizábal Sierra, 2020)

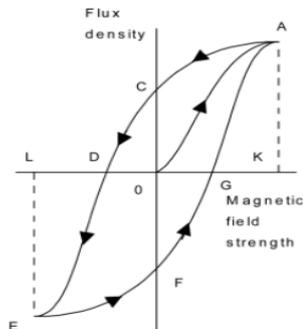
Figura 2.7. Efecto del campo magnético en un material ferromagnético.



Imantación de un material ferromagnético por un campo magnético debido a la reorganización de los dipolos. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Si el campo magnético empieza a disminuir hasta ser retirado completamente, se observa que el material queda aún imantado, al aplicar un campo en dirección contraria se logra su des magnetización y se puede crear una magnetización en dirección contraria. Si el campo magnético cambia con el tiempo causará el movimiento continuo de los dominios formando el ciclo de histéresis. (Bolton, 2020)

Figura 2.8. Ciclo de histéresis.



Curva de imantación según el campo magnético aplicado en un metal. Fuente: (Bolton, 2020)

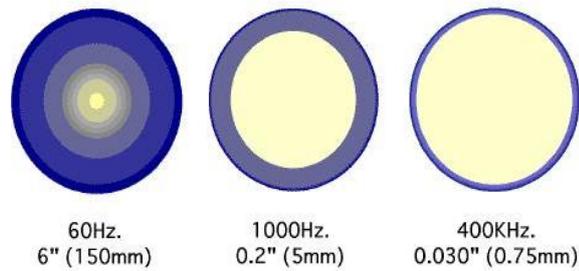
El área interna representa las pérdidas en forma de calor por cada ciclo, debido a este motivo al aumentar la frecuencia se da una mayor pérdida.

2.4.1.4. Profundidad de penetración (efecto piel)

Se produce por la interacción del campo magnético inducido por las corrientes de Foucault con el campo magnético al que está sometido el elemento, esta interacción causa que la repartición de corriente inducida dentro de un conductor no sea uniforme. (Bolívar Guerrero, 2016).

Este fenómeno causa la alteración de la inductancia interna haciendo que la corriente inducida recorra mayormente por la superficie y vaya disminuyendo hacia la parte central del conductor, este efecto se incrementa a medida que se aumenta la frecuencia de la corriente inducida, la Figura 2.9 muestra una representación de este efecto (Acosta Rivera, 2019).

Figura 2.9. Efecto pelicular en un conductor.



Aumento de la profundidad de penetración del calor a medida que disminuye la frecuencia en un conductor. Fuente: (Huamaní Infanzón, 2017)

2.4.1.5. Frecuencia de trabajo

La frecuencia de las corrientes de inducción establecen la intensidad el calentamiento del elemento, las frecuencias altas superiores a los 100khz se usan en aplicaciones con poca penetración del calor, en elementos de mayor grosor, requiere menores frecuencias para obtener una mayor penetración del calor. (Ambrell Induction Heating Solutions, 2020)

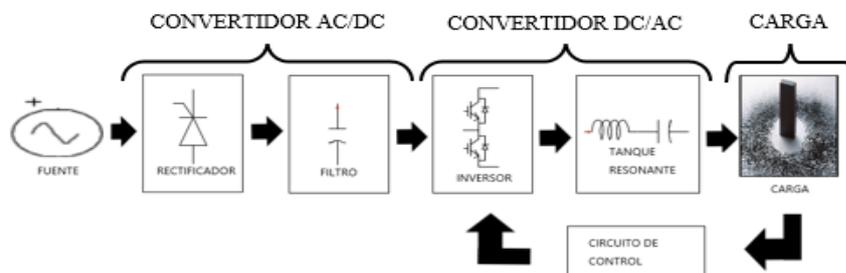
2.5. COMPONENTES DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN

Un sistema de calentamiento por inducción magnética está formado por:

- Fuente de alimentación.
- Convertidores de Potencia.
- Sistema de control.

Un esquema del sistema se representa en la Figura 2.10.

Figura 2.10. Representación en bloques del calentamiento por inducción.



Etapas principales de los componentes que conforman un calentador de inducción. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

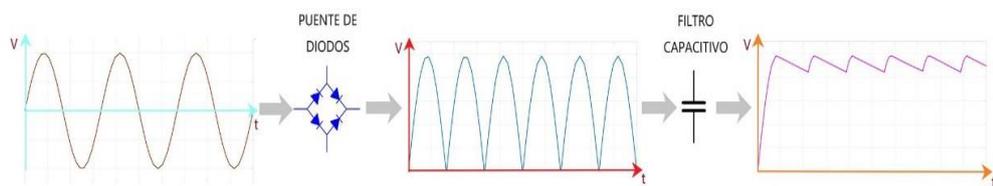
2.5.1. Fuentes de alimentación

Típicamente se energiza desde la red eléctrica para abastecer la potencia de trabajo, dependiendo del país se dispone de diferentes niveles de voltajes y frecuencia, en el continente Europeo se tiene un voltaje de 220V a 240V a 50Hz, mientras que en el continente Americano se dispone de un voltaje de 100V a 127V. (Cosme Vidal, 2017)

2.5.2. Etapa de rectificación

Comúnmente se utiliza un puente de diodos, se encarga de convertir la corriente alterna (AC) entregada por la fuente de alimentación en corriente continua (DC), mediante un filtro capacitivo se reduce el rizado. (Novas Castellano, Soler Ortiz, García Salvador, Fernández Ros, & Gázquez Parra, 2018)

Figura 2.11. Rectificador monofásico de onda completa.

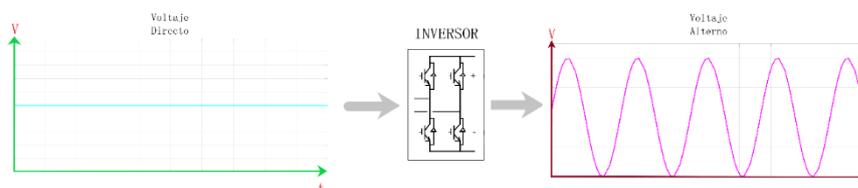


Voltaje rectificado por medio de un puente de diodos con capacitor de filtrado. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

2.5.3. Inversor de alta frecuencia

Se encarga de generar un voltaje alterno de frecuencia y amplitud controlada, a partir de un voltaje continuo, se realiza mediante un arreglo de interruptores de potencia con control de su conmutación. (Mascarós Mateo, 2016)

Figura 2.12. Inversor DC/AC



Voltaje senoidal generado por un inversor monofásico partiendo de un voltaje continuo. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Algunos de los inversores resonantes más utilizados son: inversores en paralelo, inversores en serie, inversores serie – paralelo y los inversores Clase E.

2.5.4. Resistencia equivalente o carga

El elemento a calentar es considerado parte del sistema ya que la resistencia equivalente depende de las propiedades del material, de la temperatura a la que se encuentra. Por esto el tiempo y la potencia necesarios para el calentamiento por inducción están relacionados con las características del material, entre los materiales más recomendados se encuentran los ferromagnéticos porque fortalecen el campo magnético debido a la imantación del material, induciendo corrientes más altas.

2.5.5. Circuito de control

Su función es producir la señal de activación de los dispositivos de conmutación durante un tiempo determinado en base al monitoreo de los valores de las diferentes variables adquiridas por medio de sensores, permitiendo controlar la potencia del calentador.

2.6. SISTEMAS DE CALENTAMIENTO POR INDUCCION EXISTENTES

2.6.1. Calefón eléctrico Ecosmart Eco 11

El funcionamiento es semejante a un termotanque convencional, posee un sistema de control para el ahorro de energía, es decir, consume energía dependiendo de la temperatura deseada que se ajusta entre 0°C hasta 51°C y se activa el flujo de agua saliente a los 0.25L/m, utiliza un voltaje de alimentación de 220VAC, con una potencia máxima de 11.8Kw, en la Figura 2.13 se muestra un esquema de este calefón y sus componentes principales. (Ecosmart, 2021)

Figura 2.13. Calentador de agua Ecosmart



Partes de un calentador eléctrico ECOSMART. Fuente: (Ecosmart, 2021)

2.6.2. Calefón de inducción Heizen

Es un calefón eléctrico con tecnología de inducción, trabaja a una potencia de 8.8 KW, es capaz de calentar el agua a una temperatura entre 30°C y 52°C sin necesidad de tanque de almacenamiento y con un flujo de agua máximo de 5L/m, soporta una presión de agua de 40 a 60 PSI y posee un sensor de sobre voltaje para evitar daños eléctricos en el calefón. (Heizen, 2021)

Figura 2.14. Calefón de agua Heizen



Partes internas del calefón Heizen. Fuente: (Heizen, 2021)

2.6.3. Calentador de agua por inducción H-one

Este calentador utiliza tecnología de inducción de calor y realiza la separación de agua y electricidad, lo cual mejora la seguridad durante su funcionamiento, la potencia de calentamiento se ajusta a tiempo con el flujo de agua debido al controlador PID, para ofrecer agua caliente a una temperatura constante de 3KW, con un flujo de agua mayor o igual a 0.8L/m, contiene un conductor de medio puente y la técnica ZCS, garantizando una temperatura del agua estable. (H-one, 2021)

Figura 2.15. Calentador de agua H-one



2.7. PROYECTOS REALIZADOS PARA EL SISTEMA DE CALENTAMIENTO POR INDUCCION

En el trabajo de titulación disponible en el repositorio de la UTA, se presenta el diseño de un sistema de inducción que trabaja a 110V de la red eléctrica para una potencia de 1000W, se utiliza un inversor serie de puente completo que trabaja a una frecuencia de resonancia de 28KHZ y su control es mediante PID para limitar la salida de corriente de la fuente de alta frecuencia, así controlar la conexión y desconexión del sistema. El monitoreo de temperatura se realiza utilizando un termostato para calentar 120 litros a 60°C en 5 horas aproximadamente.

El sistema de inducción implementado disminuye el tiempo de calentamiento y el consumo de energía en relación a otros dispositivos de calentamiento comerciales, debido a que la generación de calor es en forma directa a través de una fuente interna hacia el material. (Ríos Villacorta & Guamán Molina, 2015)

En el trabajo de titulación disponible en el repositorio de la UTC, se diseña un calentador de agua para uso doméstico diferente a los tradicionales en el mercado, empleando imanes de neodimio que generen el campo magnético para la transmisión de calor entre el recipiente contenedor y el líquido, se utiliza aluminio para el diseño de una rueda la cual aloja los imanes uno a continuación de otro y a su vez generen un alto campo magnético entre sus polos. El sistema de control se produce mediante la variación de frecuencia del motor, es decir, para tener un calentamiento del aluminio de manera instantánea, el motor deber operar a 5000 revoluciones por minuto para mantener la transferencia de calor constante al flujo del agua saliente. En los resultados se logra una eficiencia del 65.33% convirtiéndolo en un prototipo eficiente en términos de costos. (Maldonado Chávez & Nogales Gallo, 2017)

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL CALENTADOR POR INDUCCIÓN

En el presente capítulo se describe cada uno de los subsistemas que compone la estructura del calentador de agua por inducción, incluye el diseño del circuito electrónico, el dimensionamiento de cada uno de sus componentes, tanto para la etapa de potencia como para la etapa de control.

3.1. PROPUESTA GENERAL

El calentador de agua por inducción se desarrolla en base a un convertidor resonante conectado a la red eléctrica, en la Figura 3.1 se observa de manera esquemática los subsistemas que lo conforman, la interacción de cada uno de éstos permite mantener el agua a una temperatura constante mediante el control de potencia al flujo de agua saliente.

Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema implementado.



Etapas del diseño para el funcionamiento del calentador de agua sanitaria por inducción electromagnética. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

- **Subsistema del circuito de potencia**

Se encarga de generar un campo magnético que permite el calentamiento por inducción de un material conductor, a través de la conversión del voltaje AC que entrega la red eléctrica a un voltaje DC de alta frecuencia.

- **Subsistema del circuito de disparo**

Es una etapa intermedia entre el subsistema de control y el subsistema del circuito de potencia, encargado principalmente de elevar el nivel de voltaje de los pulsos de disparo generados por el subsistema de control para la activación del

conmutador de potencia, de igual manera permite que la corriente de entrada y el voltaje de la red se mantengan en fase a la entrada del circuito de potencia.

- **Subsistema de sincronización**

Este circuito es el encargado de generar una señal que indica al microcontrolador cuando debe realizarse la activación del conmutador de potencia para obtener la condición ZVS.

- **Subsistema de acondicionamiento**

Se basa en acondicionar y filtrar las señales que se obtienen por medio de los sensores, entregando señales precisas al subsistema de control.

- **Subsistema de control**

Monitorea las variables del sistema e interactúa con el usuario para generar los pulsos de activación del conmutador de potencia que forma parte del subsistema del circuito de potencia, además por medio de la adquisición de las señales de los diversos sensores, permite ejecutar una acción de control en el conmutador de potencia.

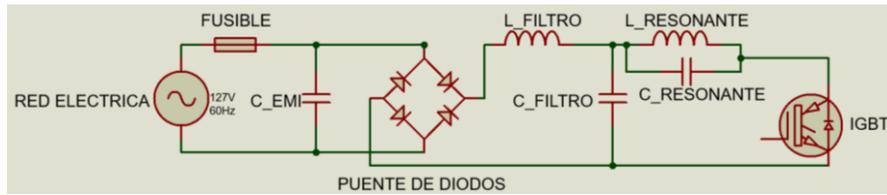
- **Subsistema de alimentación**

Convierte el voltaje alterno obtenido de la red eléctrica en diferentes niveles de voltaje continuo necesarios para el funcionamiento de los subsistemas de control y del circuito de disparo, además debe tener la capacidad de suministrar la potencia requerida por los subsistemas a ser alimentados.

3.2. DISEÑO DEL SUBSISTEMA DEL CIRCUITO DE POTENCIA

Se compone de un filtro de entrada, un rectificador de onda completa, un filtro LC, un inversor y el circuito resonante de alta frecuencia, en la Figura 3.2 se muestra el esquema del circuito electrónico implementado.

Figura 3.2. Diagrama del circuito de potencia

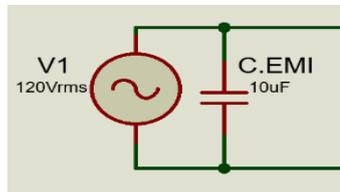


Elementos que conforman el subsistema del circuito de potencia. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

3.2.1. Filtro capacitivo de entrada (EMI)

El Capacitor absorbe los armónicos generados por el inversor, para que no alteren el funcionamiento del calentador y de los dispositivos sensibles cercanos o conectados a la red eléctrica. (Holtek, 2020)

Figura 3.3. Ubicación del Capacitor de filtrado EMI



Capacitor de filtrado de armónicos en la línea eléctrica. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

El valor del capacitor EMI utilizado comúnmente en los calentadores de inducción va en el rango de 5 μ F a 10 μ F, pero se debe tener en cuenta que a medida que el capacitor tiene un mayor valor presenta una menor reactancia a una misma frecuencia lo que permite que los armónicos circulen más fácilmente por él.

Por este motivo el capacitor a utilizar tiene un valor de 10 μ F, para determinar el voltaje del capacitor se utiliza la ecuación 3.1, con lo que se obtiene un voltaje de 240 VAC.

$$V_{C_{emi}} = 2 * V_{fuente} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Donde:

$V_{C_{emi}}$ = Voltaje RMS del capacitor

V_{fuente} = Voltaje RMS de la fuente

Se selecciona un capacitor MKP-X2, fabricado en polipropileno dieléctrico con tamaño reducido, soporta un voltaje máximo de 275 VAC, es comúnmente usado en sistemas de calentamiento por inducción. (Foshan Shunde CG Electronic Industry, 2020)

Figura 3.4. Capacitor de filtrado de armónicos MKP-X2

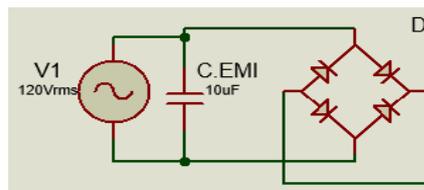


Capacitor MKP-X2 de la empresa BM. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

3.2.2. Puente rectificador

Está compuesto por un puente de diodos, con la capacidad de soportar el voltaje que proviene de la red eléctrica de 120V AC a una frecuencia de 60Hz y la corriente RMS que demanda la carga.

Figura 3.5. Puente rectificador de diodos



Ubicación del puente rectificador de diodos en el subsistema del circuito de potencia. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

$$I_{fuente} = \frac{P}{V_{fuente}} \quad \text{Ec. (3.2)}$$

$$VP_{pico} = 2 * \sqrt{2} * V_{fuente} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

$$I_{rectificación} = 1,5 * I_{fuente} \quad \text{Ec. (3.4)}$$

Donde:

I_{fuente} = Corriente RMS de la fuente

V_{fuente} = Voltaje RMS de la fuente

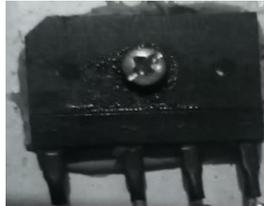
P = Potencia del calentador

$I_{rectificación}$ = Corriente rms en el puente de diodos con factor de seguridad\

VP_{pico} = Voltaje pico en el puente de diodos con factor de seguridad

Se selecciona el rectificador por puente de diodos S25SB80 que soporta un voltaje y corriente máxima de 800 V y 25 A respectivamente.

Figura 3.6. Puente de diodos DS25SB80

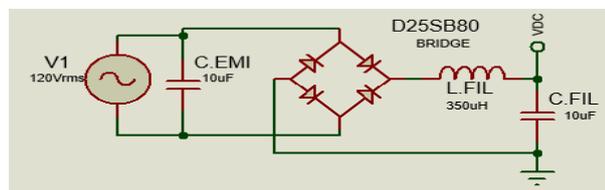


Puente de diodos que se implementa en el subsistema del circuito de potencia. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

3.2.3. Diseño del filtro LC

La conexión de un filtro LC pasa bajos, permite absorber las corrientes armónicas producidas por las conmutaciones del inversor resonante para mejorar el factor de potencia del sistema. (Quevedo, Quizhpi, Morales, Cabral, & Bretas, 2014). Se requiere de un filtro con una atenuación de 40dB por cada década sobre la frecuencia de corte.

Figura 3.7. Filtro LC



Ubicación del filtro LC en el subsistema del circuito de potencia. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Para la selección de la frecuencia de corte del filtro se debe asegurar que no exista atenuación del voltaje rectificado el cual tiene una frecuencia de 120 Hz y a su vez se produzca la mitigación de los armónicos a la frecuencia de trabajo de 26 KHz.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{Ec. (3.5)}$$

$$f_{DC_{rectificado}} \leq \frac{f_c}{10} \quad \text{Ec. (3.6)}$$

$$f_c \leq \frac{f_{res}}{10} \quad \text{Ec. (3.7)}$$

Donde:

f_c = Frecuencia de corte del filtro

L = Valor de la bobina

C = Valor del capacitor

$f_{DC_{rectificado}}$ = Frecuencia del voltaje rectificado

f_{res} = Frecuencia resonante del inversor

Para determinar la frecuencia de corte se utiliza las ecuaciones 3.6 y 3.7 cumpliendo ambos criterios, se selecciona una frecuencia de corte de 2.6 KHz, para la selección del valor de la bobina se utiliza la ecuación 3.5, el capacitor a utilizar es de 10 μF , con lo que se obtiene L de 350 μH

Se utiliza condensadores comerciales MKP de 5 μF , fabricado a base de polipropileno dieléctrico con tamaño reducido, este modelo es diseñado para el filtrado en los sistemas de calentamiento por inducción, soporta un voltaje máximo de 400VDC. (Foshan Shunde CG Electronic Industry, 2020). Además, existe en el mercado de la industria la bobina de 350 μH para la implementación del filtro pasa bajo.

Figura 3.8. Bobina y capacitor del filtro LC



a)

b)

a) Capacitor MKP que se implementa en el filtro LC. b) Bobina toroidal que se implementa en el filtro

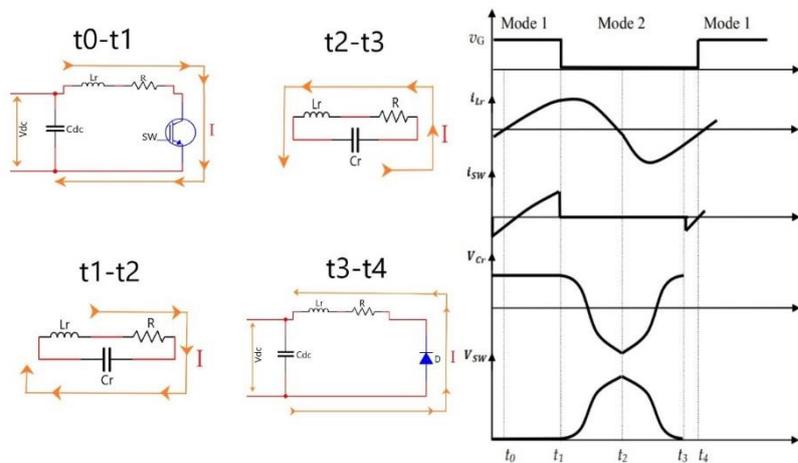
LC. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

3.2.4. Diseño del inversor Clase E

Es un tipo de inversor que consta solamente de un único dispositivo de conmutación, y se usa como fuente de alimentación alterna, brindando la posibilidad de variar el voltaje de salida al cambiar la frecuencia de activación, con una eficiencia superior al 95% debido a sus reducidas pérdidas. (Rashid, 2015)

El funcionamiento del inversor resonante clase E está conformado por dos etapas: la primera cuando se procede a cargar la bobina por medio de la activación del dispositivo de conmutación, en esta fase la corriente que circula por el inductor produce la transferencia de energía a la carga, la segunda se da cuando se produce la oscilación resonante, aquí la energía se disipa parcialmente en la carga. (Rashid, 2015)

Figura 3.9. Funcionamiento del inversor clase E.



Ondas de voltaje y corriente en régimen permanente de un inversor resonante clase E. Fuente:

(Adhikari, Nath Shrestha, & Shree, 2018)

La frecuencia de resonancia determina la penetración del calor en un material, a mayor frecuencia el calor tiende a concentrarse en su superficie, ya que no se requiere de una alta profundidad de penetración en la base del reservorio construido de acero inoxidable, se recomienda la utilización de una frecuencia lo más alta posible. Además, esta frecuencia debe estar por encima de los 20KHz para evitar la frecuencia de audio de las personas y por debajo de los 40 KHz que es la frecuencia máxima de trabajo del IGBT, y se debe tener en cuenta que existe pérdidas en forma de calor apreciables

debido a la conmutación del conmutador de potencia si la frecuencia es superior a los 30 KHz. (Parra Celi, 2020)

Debido a que la potencia varia con el aumento de la frecuencia se opta por una frecuencia de trabajo de 26 KHz obteniendo un intervalo de 4 KHz para su control evitando tener pérdidas apreciables (Parra Celi, 2020). Para el diseño del circuito resonante se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$L_{res} = \frac{1}{C_{res} * (f_{res} * 2\pi)^2} \quad \text{Ec. (3.8)}$$

$$I_{res} = \frac{2\pi * P}{\sqrt{2} * V_{fuente}} \quad \text{Ec. (3.9)}$$

$$VC_{res} = \frac{I_{res}}{2\pi * C_{res} * f_{res}} \quad \text{Ec. (3.10)}$$

Donde:

L_{res} = Valor de la bobina resonante

C_{res} = Valor del capacitor resonante

f_{res} = frecuencia de resonancia

I_{res} = Corriente resonante

P = Potencia del calentador

V_{fuente} = Voltaje RMS de la fuente

VC_{res} = Voltaje en el capacitor resonante

De acuerdo con la investigación de calentadores por inducción, se asume el valor de capacitancia para el circuito resonante, C_{res} en $0.48 \mu F$ y con capacidad de soportar altos voltajes, para obtener la capacitancia se usan dos capacitores de $0.24 \mu F$ en paralelo, Por medio de la ecuación 3.8, se determina el valor de L_{res} de $78.06 \mu H$, la bobina que forma la parte inductiva del circuito de resonancia, debe tener forma circular con un patrón espiral plano, además de utilizar cable conductor tipo LITZ, este (New England Wire Technologies, 2014). La bobina utilizada se puede observar en la Figura 3.10.

Figura 3.10. Bobina plana para inducción



Bobina de $78\mu\text{H}$ a 1500W . Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Para determinar la corriente resonante, se toma en cuenta que la corriente de entrada es un promedio de la corriente resonante y se calcula mediante la ecuación 3.9, con lo que se obtiene $51,83\text{ A}$, el voltaje que soporta el capacitor resonante por medio de la ecuación 3.10 es de $660,98\text{ V}$, con un factor de seguridad de $1,5$ el voltaje que debe tolerar el capacitor es de $991,47\text{ V}$. Comercialmente para los calentadores por inducción se utiliza capacitores MKPH-SH, diseñados para la resonancia con un voltaje máximo soportado de 1200 V . (Foshan Shunde CG Electronic Industry, 2020)

Figura 3.11. Capacitor resonante MKPH SH

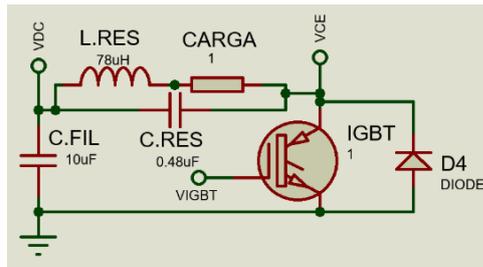


Capacitor que se emplea en el tanque resonante. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

3.2.5. Selección del interruptor IGBT

El IGBT tiene un diodo en anti paralelo en el mismo empaquetado y se encarga de suministrar energía a la bobina al momento de recibir un determinado voltaje en su base lo que produce su activación, este debe soportar una alta corriente en estado de conducción y un alto voltaje entre colector y emisor en el intervalo de tiempo que dura la resonancia.

Figura 3.12. IGBT en el inversor resonante



Ubicación del IGBT en el subsistema del circuito de potencia. Autores: Henry Llumiquina y José Tipán

El dimensionamiento del IGBT consiste en determinar la corriente rms que circula por él y el voltaje colector emisor que bloquea, mediante las ecuaciones 3.11 y 3.12 se obtiene que el IGBT debe soportar 16.5 A y 830.69 V

$$I_{pico} = \sqrt{2} * I_{fuente} \quad \text{Ec. (3.11)}$$

$$V_{cem\acute{a}x} = \sqrt{2} * V_{fuente} + VC_{res} \quad \text{Ec. (3.12)}$$

Donde:

I_{pico} = Corriente pico de la fuente

I_{fuente} = Corriente rms de la fuente

$V_{cem\acute{a}x}$ = Voltaje máximo entre colector-emisor en el IGBT

V_{fuente} = Voltaje rms de la fuente

VC_{res} = Voltaje en el capacitor resonante

Por seguridad en la operación se utiliza un factor de seguridad con lo que se requiere tolerancia a una corriente de 19,8 A y un voltaje de 996,83 V.

Se selecciona el IGBT H20R1203 que soporta una corriente de 20A con un voltaje máximo de 1200V entre colector y emisor, perteneciente a la serie para calentadores de inducción de la empresa Infineon e internamente tiene un diodo en anti paralelo en el mismo empaquetado.

Tabla 3.1. Señales de voltaje para activación del IGBT.

Señal del subsistema de control [V]	Q5	Q4	Q3	Q2	Voltaje de salida [V]
0	Apagado	Encendido	Encendido	Apagado	0
5	Encendido	Apagado	Apagado	Encendido	17

Switcheo de transistores para activación de compuerta del IGBT. Autores: Henry Llumiyinga y José Tipán

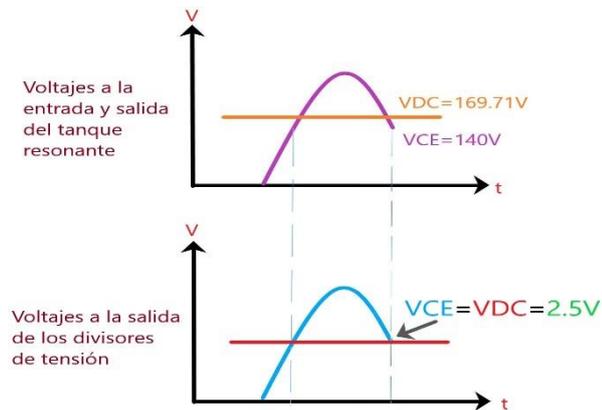
Se emplea una resistencia R11 de 10Ω en serie con la compuerta para limitar la corriente ya que al funcionar como un capacitor demanda una alta corriente al momento de aplicar un voltaje, además de una resistencia R10 de $10\text{ K}\Omega$ en paralelo a la compuerta para evitar estados flotantes al momento que se encienda o se reinicie el microcontrolador junto a un diodo Zener que limita el voltaje que ingresa a la compuerta.

3.4. DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE SINCRONIZACIÓN

La comparación entre el voltaje de alimentación del inversor (VDC) con el voltaje entre colector-emisor del IGBT(VCE) permite obtener una señal pulsante, un flanco de bajada se produce cuando VCE es menor que VDC, esto permite conocer que la resonancia del circuito de potencia está por terminar e indica el momento que el dispositivo de control debe activar el IGBT para asegurar el ZVS, debido a que los voltajes son demasiado elevados para ser comparados se los debe reducir por medio de la utilización de divisores de tensión.

Además, brinda un método de seguridad para el encendido del calentador por medio del conteo de los pulsos generados a la salida de este subsistema al enviar un único pulso de activación al IGBT. Si el tanque está presente, produce un número reducido de pulsos debido al consumo de energía, caso contrario el número de pulsos será elevado al no estar presente ninguna carga.

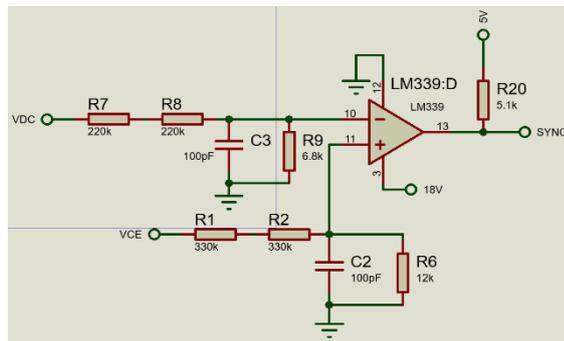
Figura 3.15. Comparación de voltajes para sincronizar la activación del IGBT



Comparación de los voltajes VDC Y VCE durante la fase de resonancia. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

De acuerdo con el circuito mostrado en la Figura 3.16, se asume un voltaje de 2.5 V a la salida del divisor de tensión para VDC cuando alcanza su pico máximo ($V_{DCm\acute{a}x}$), para asegurar que el flanco de bajada se produce cuando VCE es menor que VDC, el voltaje a la salida del divisor de tensión en VCE debe tener un voltaje igual a 2.5 V cuando VCE es menor a $V_{DCm\acute{a}x}$,

Figura 3.16. Circuito de sincronización para la conmutación del IGBT



Componentes que conforman el circuito de sincronización. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

$$R9 = \frac{V_{R9} * (2R7)}{V_{DCm\acute{a}x} - V_{R9}} \quad \text{Ec. (3.13)}$$

$$R6 = \frac{V_{R6} * (2R1)}{V_{CE} - V_{R6}} \quad \text{Ec. (3.14)}$$

$$I_{R9} \approx \frac{V_{DCm\acute{a}x}}{R7 + R8} \quad \text{Ec. (3.15)}$$

$$I_{R6} \approx \frac{V_{cem\acute{a}x}}{R1 + R2} \quad \text{Ec. (3.16)}$$

Donde:

V_{R9} = Voltaje máximo deseado en la resistencia R9

$V_{DCm\acute{a}x}$ = Voltaje pico de la alimentación del inversor resonante

V_{R6} = Voltaje deseado en R6 según VCE

V_{CE} = Voltaje VCE en el que se desea que se dé la activación del IGBT

$V_{cem\acute{a}x}$ = Voltaje máximo entre colector-emisor en el IGBT

I_{R9} = Corriente por resistencia R9

I_{R6} = Corriente por resistencia R6

El valor de la resistencia R9 en el divisor de tensión de VDC se determina con la ecuación 3.13 y 3.15, asumiendo R7 y R8 en 220 K Ω se tiene una corriente de 385.69 μ A, esta corriente circula por el divisor de tensión sin afectar al funcionamiento del subsistema del circuito de potencia obteniendo un valor R9 de 8 K Ω .

El valor de la resistencia R6 en el divisor de tensión de VCE se halla por medio de la ecuación 3.14 y 3.16 con un voltaje de entrada de 140 V para generar un voltaje de salida de 2.5 V, se asume que R1 y R2 son de 330 K Ω con lo que se tiene una corriente de 1.26 mA, siendo despreciable para el funcionamiento del subsistema del circuito de potencia con lo que R6 es de 12 K Ω

Se utiliza un comparador LM339 el cual tiene una salida en colector abierto, por lo que se conecta en su salida una resistencia de pull-up con un voltaje de 5 V, el fabricante recomienda una resistencia de 5.1 K Ω , de esta forma se genera un flanco de subida cuando el voltaje en R9 es mayor que R6 y un flanco de bajada cuando el voltaje de R9 es menor que R6.

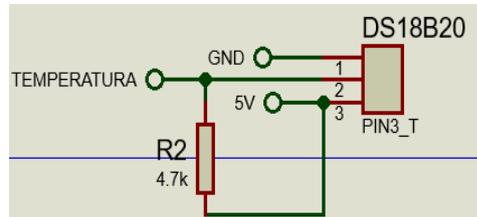
3.5. DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO

3.5.1. Circuito sensor de temperatura para el reservorio

Para determinar la temperatura del agua en el interior del tanque, se utiliza el sensor digital DS18B20, con una precisión de ± 0.5 °C en intervalos de 750 ms. Este sensor

recibe su alimentación por medio del pin de datos, además utiliza un único cable para la comunicación por medio del protocolo 1-wire.

Figura 3.17. Circuito del sensor de temperatura



Conexión del sensor DS18B20 para la lectura de temperatura. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

La conexión del sensor se puede apreciar en la Figura 3.17. Se utiliza una resistencia R2 de 4.7 K Ω entre la línea de alimentación y el pin de datos del sensor, este valor es recomendado por el fabricante.

Figura 3.18. Sensor DS18B20

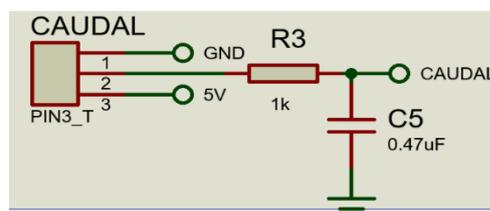


Sensor de temperatura en el interior del tanque Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

3.5.2. Circuito sensor de caudal

Para determinar el caudal del agua saliente, Se utiliza el sensor digital YF-S201, adquiriendo datos en intervalos de 1 segundo por medio del conteo de los pulsos donde 7 pulsos equivalen a 1litro por minuto.

Figura 3.19. Circuito del sensor de caudal



Conexión del sensor de caudal para la lectura del flujo de agua saliente. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Para una correcta medición se implementa un filtro paso bajo con una frecuencia de corte de 350 Hz, debido a que el ruido se encuentra a frecuencias superiores en el rango de los KHz

$$C5 = \frac{1}{2 * \pi * R * f} \quad \text{Ec. (3.17)}$$

Donde:

f = frecuencia de corte

R = resistencia del filtro

Para el cálculo del capacitor de filtrado se utiliza la ecuación 3.17, donde se asume que $R3$ es de $1K\Omega$, dando como resultado $C5$ de $0.45 \mu\text{F}$. Se selecciona el capacitor comercial más cercano que tiene un valor de $0.47 \mu\text{F}$.

Figura 3.20. Sensor YF-201



Sensor de caudal que se implementa en el calentador de inducción. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

3.5.3. Circuito de refrigeración

Está formado por un ventilador que permite el ingreso de aire para disminuir la temperatura interna del calentador, generada principalmente por el IGBT, la bobina, y el puente rectificador. Además, se emplea un disipador de calor para mejorar su refrigeración.

Figura 3.21. Circuito del ventilador

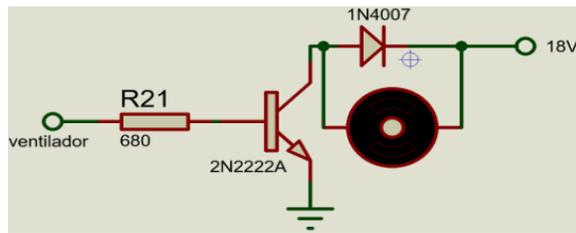


Diagrama de conexión del ventilador para la disipación de calor. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

El ventilador funciona con un voltaje de 18 V y una corriente de 0.24 A, se utiliza un transistor 2N2222A, el cual puede conducir una corriente de 0.6 A con un voltaje de 40 V entre colector emisor y presenta un β mínimo de 40.

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad \text{Ec. (3.18)}$$

$$R_{21} = \frac{4.3V}{I_B} \quad \text{Ec. (3.19)}$$

Donde:

I_B = Corriente en la base

I_C = Corriente en el colector

β = factor de amplificación

I_B = Corriente en la base

R_{21} = Resistencia de base

Para determinar la resistencia conectada a la base del transistor se utiliza la ecuación 3.18 y 3.19 dando como resultado R_{21} de 680 Ω , además, es necesario poner un diodo 1N4007 en anti paralelo al ventilador, su función es asegurar un camino para la corriente almacenada en la bobina del motor cuando se desactive el transistor.

Figura 3.22. Ventilador de refrigeración



Ventilador empleado en el circuito de refrigeración. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

3.5.4. Circuitos para temperatura de bobina e IGBT

Estos circuitos constan de sensores NTC los cuales permiten conocer si existe sobre temperatura ya sea en la bobina o el IGBT, causando el apagado del sistema y que se muestre un mensaje de advertencia al usuario hasta que regrese a una temperatura segura de funcionamiento. Para determinar la temperatura de un termistor NTC se aplica la ecuación de Steinhart-Hart la cual se puede apreciar en la ecuación 3.20 con la caracterización de la Tabla 3.2 y el software informático desarrollado por la empresa Stanford Reserch Systems Inc. (Narendra Kumar, 2017)

Figura 3.23. Circuito del sensor NTC en la bobina e IGBT

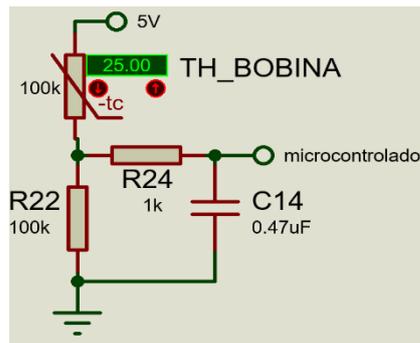


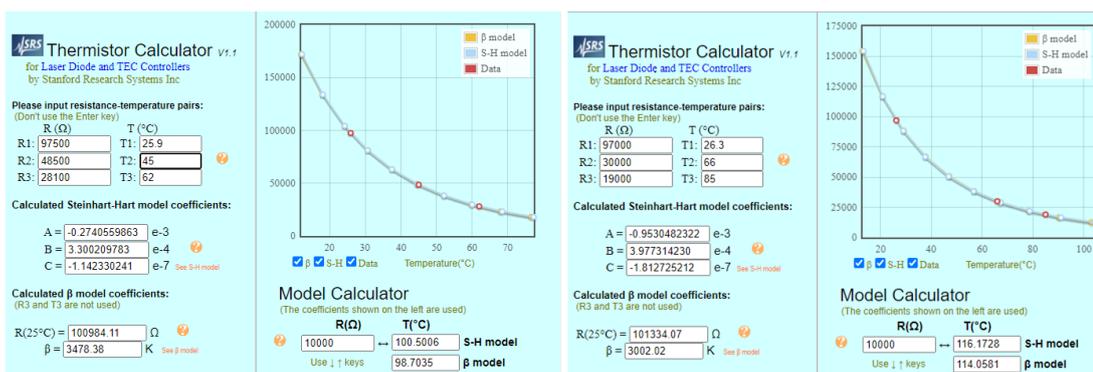
Diagrama de conexión del sensor NTC para el control de temperatura en la bobina e IGBT. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Tabla 3.2 Valores obtenidos al caracterizar el sensor NTC.

Resistencia NTC bobina [Ω]	Temperatura NTC bobina [$^{\circ}\text{C}$]	Resistencia NTC IGBT [Ω]	Temperatura NTC IGBT [$^{\circ}\text{C}$]
97500	25.9	97000	26.3
48500	45	30000	66
28100	62	19000	85

Medición del sensor NTC a diferentes temperaturas para obtener valores de resistencias. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Figura 3.24. Software para el cálculo del termistor



Curva característica del termistor calculado. Fuente: Stanford Reserch Systems Inc.

$$T = \frac{1}{A + B \ln(R) + C (\ln(R))^3} \quad \text{Ec. (3.20)}$$

Dónde:

A, B, C = Son constantes

R = Resistencia del termistor a cierta temperatura

Con los valores encontrados mediante el software se halla R por medio de la lectura del voltaje en el divisor de tensión entre el sensor NTC con una resistencia en serie de 100 KΩ, se añade un filtro con frecuencia de corte de 350 Hz para mitigar posibles armónicos.

Figura 3.25. Sensor NTC



Sensor que se implementa para determinar la temperatura de la bobina e IGBT. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

3.6. DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE CONTROL

Teniendo en cuenta todas las funciones descritas en los apartados anteriores se utiliza dos microcontroladores que interactúen entre sí y se dividen las tareas a ejecutar. El primer microcontrolador ejecuta tareas de alta velocidad como la Detección de la señal de sincronización, el encendido y conteo del tiempo de activación del IGBT, así como

tareas de baja velocidad que no requieren de un conteo de tiempo prolongado como el monitoreo de sobre temperatura y la activación del circuito de enfriamiento, en total se requiere de 2 pines digitales, 1 pin digital con interrupción, 2 pines analógicos, 1 módulo de comunicación, 1 timer y un oscilador de 32 MHz.

El segundo microcontrolador ejecuta tareas de baja velocidad como la interacción con el usuario, la lectura de los sensores de caudal y temperatura en el interior del tanque, en total se requiere 10 pines digitales, 1 pin digital con interrupción, 1 pin análogo, 1 módulo de comunicación, 1 timer y un oscilador no mayor a 4 MHz. Para la selección del primer microcontrolador se comparan 3 opciones que cumplen las condiciones solicitadas en la Tabla 3.3 mientras que para el segundo microcontrolador se utiliza la Tabla 3.4.

Tabla 3.3. Comparación entre microcontroladores comerciales de alta velocidad

	PIC 16F1619	Arduino ZERO	ATSAML10D14A
Voltaje de trabajo	5V	3.63V	3.63V
Módulo A/D	12	6	5
Timers	7	8	3
Interrupciones externas	12	Todos los pines excepto el pin 4	8
Costo	Bajo	Alto	Medio-bajo
Frecuencia	32Mhz	48Mhz	32Mhz
Módulo de comunicación	UART, I2C, SPI	USART, I2C, SPI	USART, I2C, SPI
Memoria de programa	14 Kbyte	256 Kbyte	16 Kbyte
Pines	20	32	24
Bits de resolución del módulo A/D	10	12	12
Software de programación	MPLAB X	ARDUINO IDE	MPLAB X
Tecnología PPS	SI	NO	NO

Tabla de comparación de las características más relevantes ente los microcontroladores PIC16f1619, Arduino Zero y ATSAML10D14A. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Se emplea el microcontrolador PIC16F1619 debido a su menor costo al compararlo con los otros tipos de microcontroladores y a su reducido número de pines lo que permite un ahorro de espacio, además de una mayor flexibilidad en el diseño debido a

la tecnología PPS que brinda la posibilidad de asignar los periféricos digitales a cualquier pin.

Tabla 3.4. Comparación entre microcontroladores comerciales de baja y media velocidad

	PIC 18F2550	Arduino Nano	ATmega328P
Voltaje de trabajo	5V	5V	5V
Modulo A/D	10	6	8
Timers	4	3	3
Interrupciones externas	3	2	2
Costo	Bajo	Medio-bajo	bajo
Frecuencia	8Mhz	16Mhz	16Mhz
Módulo de comunicación	UART, I2C, SPI	I2C, SPI	USART, I2C, SPI
Memoria de programa	32 Kbyte	32 Kbyte	32 Kbyte
Pines	28	30	28
Bits de resolución del módulo A/D	10	10	10
Software de programación	MPLAB X	ARDUINO IDE	MPLAB X

Tabla de comparación de las características más relevantes entre los microcontroladores PIC18f2550, Arduino Nano y ATmega328P. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Se emplea el microcontrolador PIC18F2550 debido a su bajo costo y a su reducido número de pines, además de facilitar la programación al utilizar un set de instrucciones similar al primer microcontrolador ya que pertenecen a la misma empresa.

Para brindar una mejor manipulación del calentador por parte del usuario se emplea una pantalla LCD 16x2 modelo 1602A que permite visualizar el estado actual de las variables del calentador junto con 2 leds indicadores de encendido y sobre temperatura.

3.6.1. Programa principal microcontrolador PIC18F2550

Al empezar el programa se debe definir el funcionamiento de los pines de cada puerto si será una entrada o salida junto a su estado lógico inicial, y la configuración de los registros necesarios para los diversos periféricos del microcontrolador como son interrupciones, conversor analógico-digital, módulo SPI como maestro y el módulo

timer 0 con base de tiempo de 1 segundo, además se envía las configuraciones necesarias al sensor de temperatura y la LCD

Desde este punto se crea un bucle que se ejecuta de manera continua, La primera acción a realizar es verificar si se encuentra presionado el botón ON/OFF, si está presionado se procede a revisar el valor de la variable ON_OFF que determina el estado actual del calentador si este encendido lo apaga y viceversa configurando las variables de acuerdo a su estado.

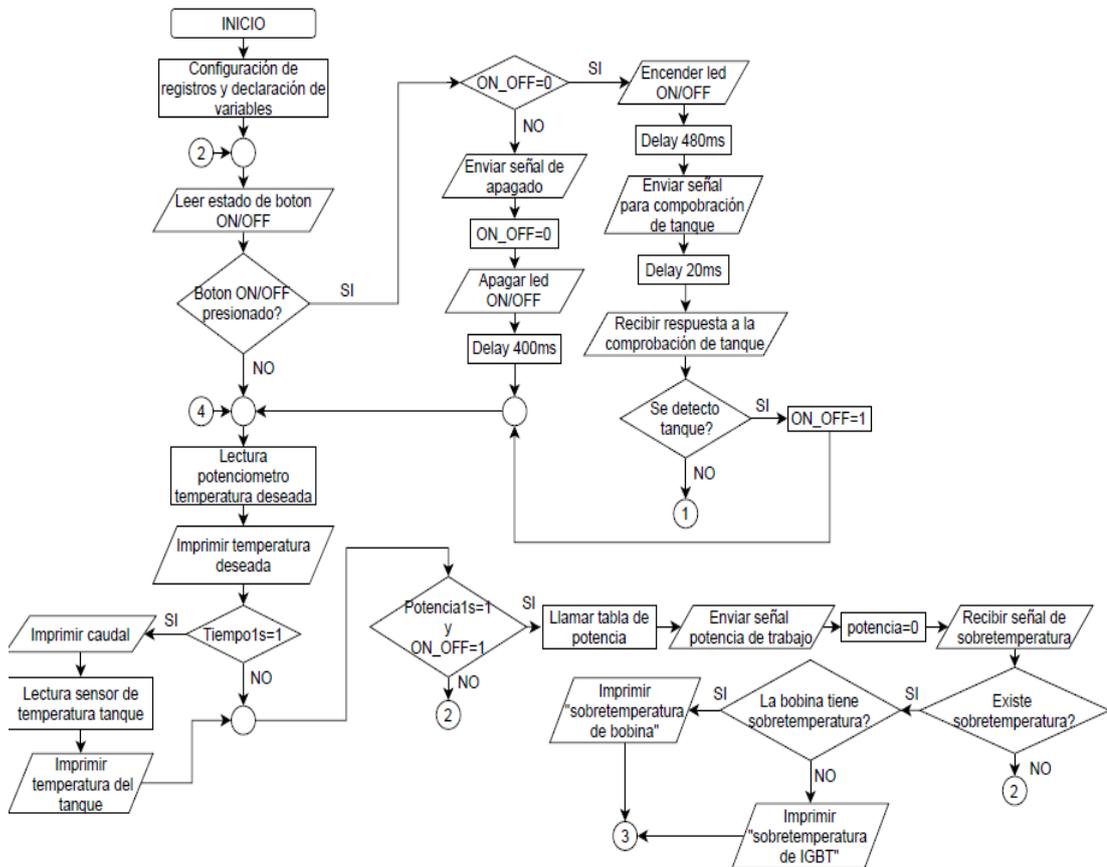
En el caso del encendido se envía una señal al microcontrolador de control para empezar a verificar la presencia del tanque, esperando una respuesta afirmativa, de no ser así continuara enviando señales de verificación cada 100ms y se indicara en la LCD que no se encuentra el tanque, esta condición que se repite se puede terminar al presionar el botón ON/OFF el cual apagara el calentador y regresara a condiciones iniciales o si se encuentra la presencia del tanque se procede a continuar con la activación del calentador.

A continuación, se procede a leer el voltaje por el conversor ADC del microcontrolador obtenido del potenciómetro que permite seleccionar la temperatura deseada por el usuario, este voltaje es transformado a temperatura e impreso en el LCD, continuando con el programa se verifica la variable tiempo1s que indica si está lista la obtención del valor de caudal y del sensor de temperatura para ser impresas en el LCD y almacenadas, antes de salir se resetea la variable tiempo1s en espera que vuelva a transcurrir otro segundo.

Si tiempo1s es 0 el programa continua al siguiente proceso que es la determinación de potencia donde se verifica que haya transcurrido 1 segundo por medio de la variable Potencia1s y que el calentador este encendido, de no ser así se regresa a la lectura del botón ON/OFF que se encuentra al inicio del programa, en cambio si la respuesta es afirmativa se procede a llamar a la tabla de potencia que define el valor de potencia que se debe enviar al microcontrolador de disparo, una vez se envía la señal de potencia se procede a esperar si existe una señal de sobre temperatura si es afirmativo se

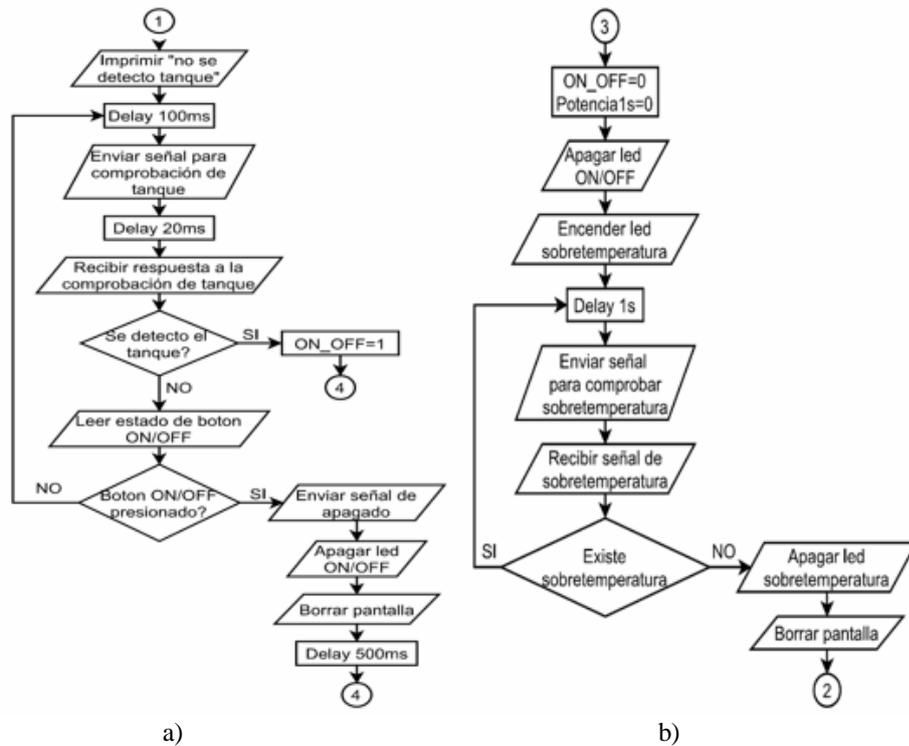
imprime en la LCD el mensaje de sobre temperatura y quien lo genero , en esta condición se envía una señal de apagado del calentador y se espera 1 segundo para mandar señales de comprobación de sobre temperatura hasta que se reciba una respuesta negativa regresando al inicio del programa.

Figura 3.26. Diagrama de flujo del programa principal microcontrolador 18F2550



Lógica del programa principal para la toma de decisiones según las señales de entrada en el microcontrolador 18F2550. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Figura 3.27. Diagrama de flujo para detección de tanque y sobre temperatura



a) Bucle de detección de tanque. b) Bucle a ejecutar en caso de sobre temperatura del IGBT o de la bobina. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

3.6.2. Programa principal microcontrolador PIC 16F1619

Al encender el microcontrolador se procede a realizar la configuración de los pines según sea necesario como entradas o salidas definiendo un estado lógico según las necesidades, los registros se configuran de tal forma que se tenga el funcionamiento de los periféricos requeridos con las características deseadas del microcontrolador como son interrupciones, conversor analógico-digital, módulo SPI como esclavo y módulo timer 4.

En este punto se crea un bucle que se repite constantemente, Lo primero que verifica el microcontrolador es si se recibió una señal de activación de ser así se envía un pulso de activación al IGBT para determinar si se encuentra presente el tanque por medio del conteo de los pulsos generados en el pin configurado con la interrupción externa, si la respuesta es afirmativa se configura las variables para su encendido, de no ser así las variables se configuran de modo que empieza otra verificación cada vez que se reciba una señal del microcontrolador de usuario, este estado de comprobación se

puede finalizar de dos maneras ya sea por presencia del tanque con lo que continua con la activación del calentador o si se recibe una señal de apagado con lo que se regresan a las condiciones iniciales , en cualquiera de estos casos antes de continuar con la ejecución del programa necesita recibir una señal del microcontrolador de usuario donde se envía la respuesta de la detección del tanque.

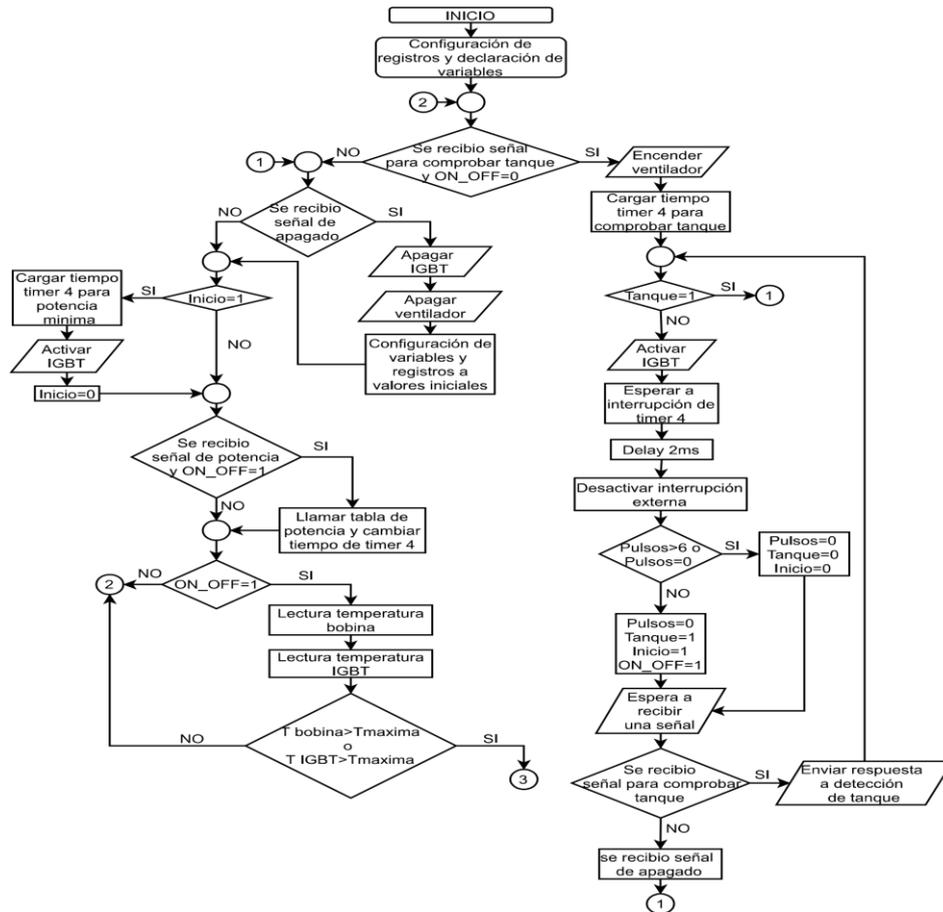
A continuación, se verifica si se recibió una señal de apagado de ser así se procede a desactivar el IGBT con el ventilador y se configura los registros y variables a condiciones iniciales, en caso contrario se omite este procedimiento y continua con la ejecución del programa

Lo próximo a realizar es verificar la variable Inicio, si su valor es 1, causa que el microcontrolador envíe un pulso de accionamiento del IGBT con la potencia mínima, al terminar el pulso se comienza a producir la primera resonancia del circuito de potencia, este código se ejecuta una sola vez después que se detectó el tanque. Si el valor de la variable de inicio es 0 se omite este código del programa.

Lo siguiente a verificar es si se recibió una señal para cambio de potencia y que el calentador este encendido, de ser así se procede a llamar una tabla de tiempos donde basado en el valor recibido se cambia el tiempo del timer 4 modificando de esta manera la potencia entregada al calentador. Si una de las dos condiciones no se cumplen esta sección se omite continuando con el programa

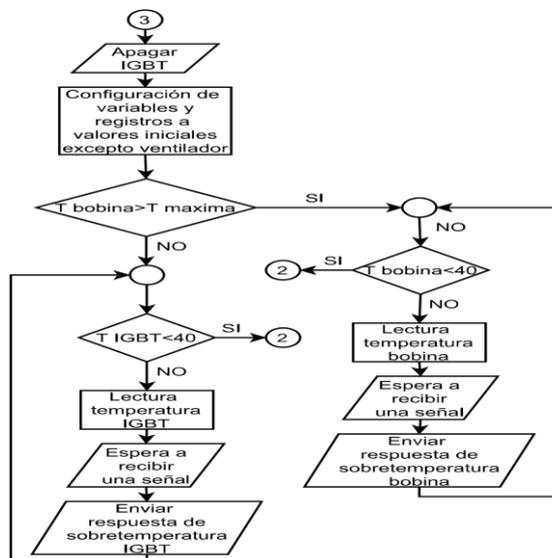
Posterior a este paso se verifica si el calentador se encuentra encendido, por medio de la variable ON_OFF, si se determina que esta pagado se regresa al inicio del bucle, en cambio si la respuesta es afirmativa se procede a leer las temperaturas actuales de la bobina y el IGBT ,comparándolas con un valor umbral para evitar que exista sobre temperatura, en caso de que ocurra se apaga el sistema dejando encendido el ventilador y se envía al microcontrolador de usuario la señal de sobre temperatura y quien lo genero, una vez regrese a la temperatura normal se apaga el ventilador y se envía la señal que ya no existe sobre temperatura, regresando al inicio del bucle.

Figura 3.28. Diagrama de flujo del programa principal microcontrolador 16F1619



Lógica del programa principal para la toma de decisiones según las señales de entrada en el microcontrolador 16F2550. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Figura 3.29. Diagrama de flujo para caso de sobre temperatura 16F1619



Bucle a ejecutar en caso de sobre temperatura del IGBT o de la bobina. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

3.7. DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE ALIMENTACION

El calentador de inducción necesita dos niveles de voltajes para el correcto funcionamiento de las diferentes etapas:

- El circuito de disparo junto con el ventilador de refrigeración funciona con 18V
- El circuito de control, visualización y sensores funcionan con 5V

Para determinar la potencia requerida se suma las corrientes necesarias por cada subsistema según su nivel de voltaje.

Tabla 3.5 Consumo de corriente de dispositivos a 18 V

Dispositivo	Corriente [mA]	Potencia [mW]
Alimentación LM339	0.8	14.4
Ventilador	240	4320
Corriente subsistema de disparo	9.31	167.58
Suma total	250.11	4547

Tabla detallada de los consumos de corriente y de potencia de los dispositivos que funcionan a 18V.

Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Tabla 3.6 Consumo de corriente de dispositivos a 5 V

Dispositivo	Corriente [mA]	Potencia [mW]
DS18B20	1.5	7.5
YF-S201	15	75
2N2222A	6	30
Sensores NTC	0.1	0.5
PIC16F1619	6	30
PIC18F2550	4.8	24
LCD 16x2	25	125
2 leds	22	110
1 pulsador	0.5	2.5
1 potenciómetro	0.5	2.5
Salida LM339	1	4
Suma total	82.4	412

Tabla detallada de los consumos de corriente y de potencia de los dispositivos que funcionan a 5V.

Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Para determinar la potencia necesaria de la fuente se suma la potencia total que se obtiene en la Tabla 3.5 y Tabla 3.6, con lo que se obtiene una potencia de 4959 mW con un corriente de 332.51 mA

Figura 3.30. Circuito regulador de voltaje

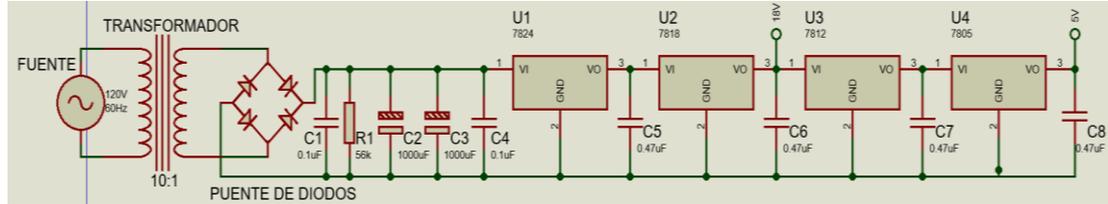


Diagrama de regulación de voltajes para la etapa de control y potencia para los microcontroladores.

Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Se emplea un transformador para reducir el voltaje de la línea eléctrica a 24 VAC con una corriente máxima de 500 mA, seguido de un puente de diodos para la conversión de corriente alterna en continua. Se ubica en paralelo un capacitor de 0.1 µF que ayuda a reducir armónicos y una resistencia de 56 KΩ, la cual descarga el capacitor de filtrado cuando se apaga el circuito.

Para la obtención de los diferentes niveles de voltaje se utiliza reguladores de tensión en el siguiente orden: LM7824, LM7818, LM7812 y LM7805, logrando que la caída de tensión sea menor en cada regulador, con lo que se disminuye la potencia disipada en cada uno de ellos. Debido a que el filtro capacitivo alimenta el LM7824 el voltaje mínimo debe ser de 26 V para el funcionamiento del regulador de voltaje.

$$V_{cd_carga} = (V_m - 2 * V_D) - \frac{4.17 * (I_{cd})}{C_f} \quad \text{Ec. (3.21)}$$

$$Vr_{(rms)} = \frac{2.4 * I_{cd}}{C_f} \quad \text{Ec. (3.22)}$$

$$r = \frac{Vr_{(rms)}}{V_{cd_carga}} * 100\% \quad \text{Ec. (3.23)}$$

Donde:

V_{cd_carga} = Voltaje continuo

V_m = Voltaje alterno pico

V_D = Voltaje para activación de diodo

I_{cd} = Corriente continua demandada a la fuente.

C_f = Valor del capacitor de filtrado

$Vr_{(rms)}$ = Voltaje de rizo

r = Rizo del capacitor

Para determinar el voltaje continuo según el valor del capacitor de filtrado al momento que se demanda la corriente máxima de la fuente, se utiliza las ecuaciones 3.21, 3.22 y 3.23, los resultados se pueden apreciar en la Tabla 3.7

Tabla 3.7, Rizado de la fuente a diferentes valores de capacitor

Capacitor [μ F]	Voltaje continuo [V]	Voltaje de rizo [V]	Rizo del capacitor [%]	Voltaje mínimo [V]
220	23.06	5.45	23.69	20.33
470	28.1	2.55	9.07	26.8
1000	30.46	1.2	3.94	29.86
2200	31.59	0.545	1.72	31.32

Voltaje continuo y rizado a diferentes valores del capacitor de filtrado. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Como se aprecia en la Tabla 3.7 El capacitor de 470 μ F cumple con la condición planteada, pero se encuentra muy cerca al valor mínimo por este motivo se decide seleccionar el capacitor de 1000 μ F a 50V.

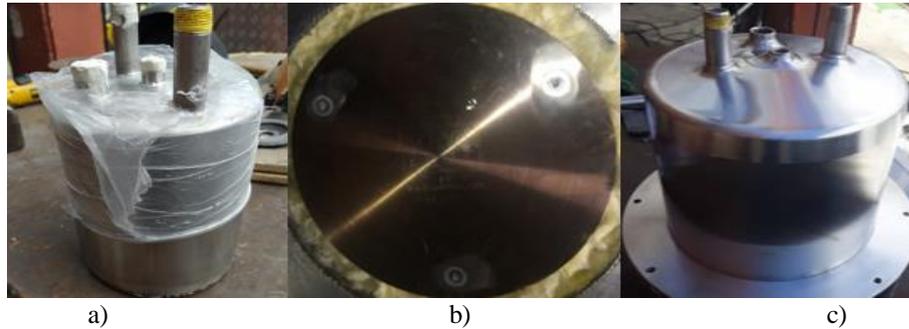
3.8. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL CALENTADOR

3.8.1. Reservorio acumulador

El recipiente es construido en acero inoxidable, por la durabilidad, densidad y resistencia al desgaste, buen conductor de calor y evita el desperdicio de agua; con un espesor de 3mm, 16cm de diámetro y una altura de 20cm para que pueda acumular el líquido, con la finalidad de tener un flujo semi constante de agua consta de 2 tuberías de ½ pulgada, para el ingreso y salida del agua respectivamente, además de 2 niples donde se ubica el manómetro y el sensor de temperatura dentro del recipiente.

La base del reservorio debe adquirir propiedades ferromagnéticas para que se produzca el calentamiento por inducción, por tal motivo se incrusta un disco difusor de calor, capaz de calentarse sobre su superficie en presencia de un campo magnético y transferir ese calor de manera uniforme dentro del reservorio, se representa en la Figura 3.31.

Figura 3.31. Estructura del reservorio

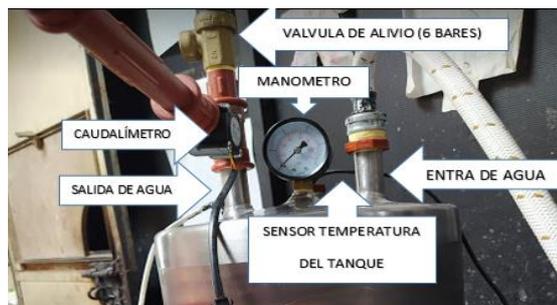


a) Diseño de la estructura del reservorio. b) Disco difusor de calor empotrado en la base del reservorio. c) Ensamblado final del reservorio con recubrimiento. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Para mantener y evitar fugas de calor dentro del reservorio, se lo rodea con lana de vidrio que es un aislante térmico y se refuerza la estructura con una lámina de acero en un espesor de 1mm, mostrado en la Figura 3.31c)

En la Figura 3.32. Componentes ubicados en el reservorio se muestra la ubicación de los componentes electrónicos y de visualización de presión que conforman la estructura del reservorio para el calentamiento de agua sanitaria.

Figura 3.32. Componentes ubicados en el reservorio



Localización de sensores y manómetro para el monitoreo y visualización del agua dentro del reservorio. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán.

3.8.2. Chasis

Para colorar de forma compacta los circuitos de las placas PCB de potencia y control del calentador por inducción, se utiliza una carcasa de polietileno de alta densidad fabricada en plástico reciclado, como se observa en la Figura 3.33, la estructura es adoptada para condiciones extremas de trabajo y soporta el peso de la estructura del reservorio. (Plásticos Tortuga, 2019)

Figura 3.33. Chasis para los circuitos



Carcasa para el montaje del circuito de control y potencia del reservorio. Autores: Henry Llumiyinga y José Tipán.

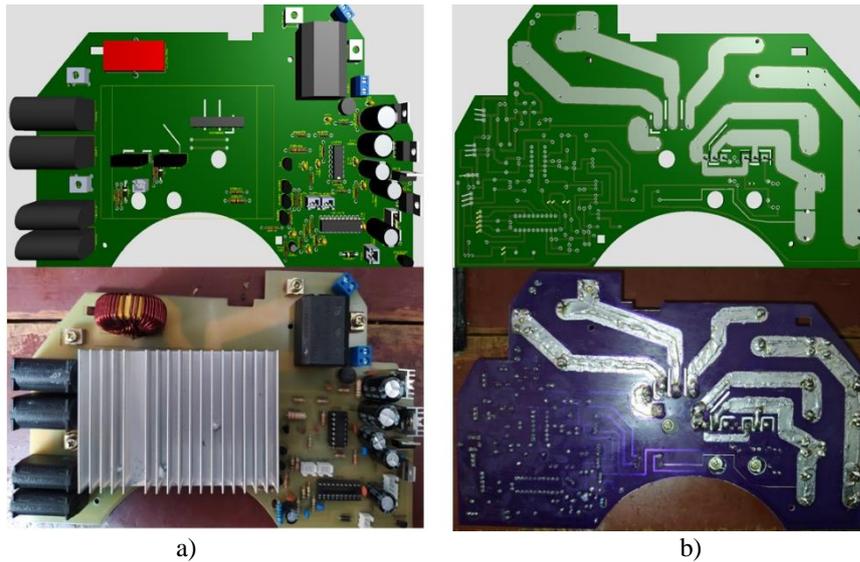
3.8.3. Esquema de las placas PCB

El circuito completo que conforma el calentador de inducción consta de dos PCB, para ello se utiliza la herramienta ARES (Advanced Routing and Editing Software) del software Proteus, debido a que algunos elementos electrónicos no se encuentran disponibles en las librerías del programa se debe diseñar tanto su empaquetado como su modelado 3D.

- **PCB para el circuito de potencia y control de disparo**

Los elementos del circuito de potencia como son: el circuito resonante, reguladores de voltaje, circuito de sensores para evitar el sobrecalentamiento de la bobina y el IGBT, microcontrolador PIC16F1619 y circuito de ventilador, se ubican en una misma placa como se observa en la Figura 3.34, para optimizar el espacio dentro de la estructura mostrada en la Figura 3.33.

Figura 3.34. Diseño e implantación de la PCB para el circuito de potencia

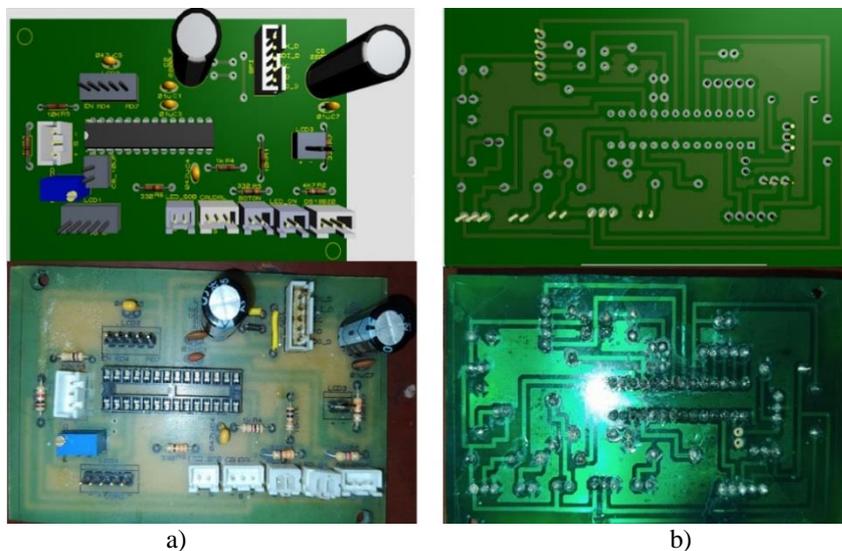


a) Vista superior de la ubicación de elementos en la PCB para el circuito de potencia. b) Vista inferior de las conexiones entre elementos mediante pistas. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán.

- **PCB para el circuito de control y monitoreo de sensores**

La placa de control se elabora de forma compacta y sencilla, para facilitar la interacción al usuario con el calentador por inducción, se realiza el diagrama esquemático de la PCB y posteriormente se implementa, como se muestra en la Figura 3.35

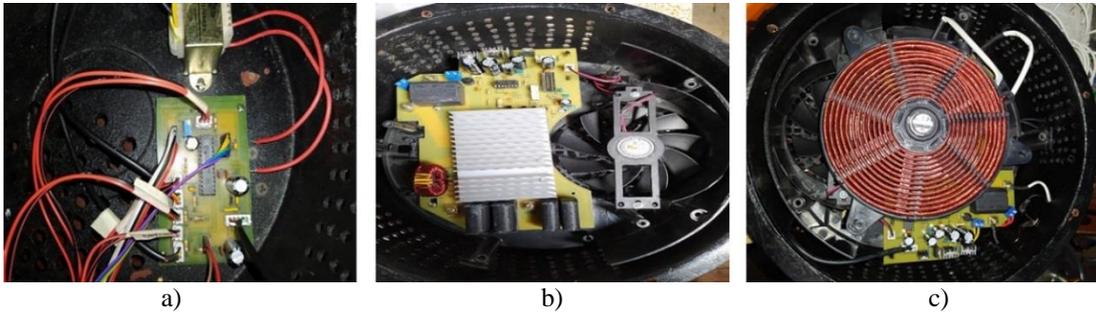
Figura 3.35. Diseño de la PCB para el circuito de control



a) Vista superior de la ubicación de elementos en la PCB para el circuito de control. b) Vista inferior de las conexiones entre elementos mediante pistas. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán.

La comunicación SPI y el voltaje de alimentación se implementan por medio de la conexión de un cable de 5 hilos entre las placas del circuito de potencia y el circuito de control, según el esquema presentado en la Figura 3.36.

Figura 3.36. Ubicación de los PCB en el chasis



a) Colocación de la placa de control. b) Colocación de la placa de potencia. c) Ensamblado completo de todos los circuitos. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán.

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN Y PRUEBAS

En este capítulo se muestran las pruebas y resultados obtenidos para el calentador por inducción para uso doméstico desarrollado en este proyecto.

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DEL CALENTADOR

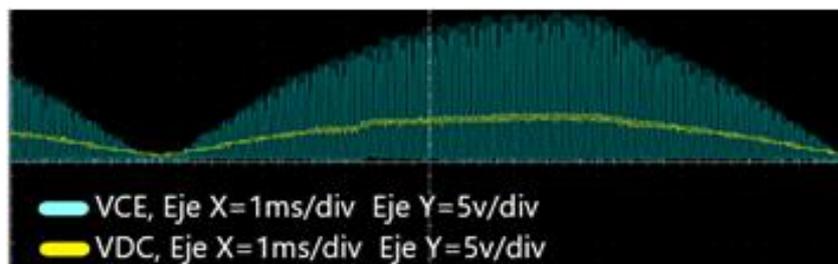
Para comprobar el funcionamiento de los subsistemas que componen el calentador de inducción, se utiliza el osciloscopio Hantek6104BD, el cual permite obtener mediciones en tiempo real en diferentes puntos de conexión del circuito con la carga resistiva representada con el reservorio. Se conoce que el tiempo de activación máxima del IGBT es aproximadamente la mitad del período de la frecuencia de resonancia, el tiempo de activación a usar es de 19.24 μ s.

4.2. SIMULACIÓN DEL SUBSISTEMA DEL CIRCUITO DE POTENCIA

4.2.1. Prueba de voltaje a la salida del filtro LC (VDC) y voltaje resonante colector – emisor del IGBT (VCE)

Se verifica el efecto que causa la conmutación sobre la tensión rectificada, en la Figura 4.1 se muestra el voltaje resonante presente en el colector del IGBT y el voltaje en el filtro LC durante un período constante de tiempo, debido a que el voltaje resonante es demasiado alto para la medición en el osciloscopio aun utilizando las puntas x10, se decide medir los voltajes VDC y VCE en la red divisora de tensión de la etapa de sincronización.

Figura 4.1. Voltajes medidos entre VDC y VCE



Medición de voltajes entre VDC y VCE en el circuito armado. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán.

Se puede apreciar que el voltaje de VCE es de 9.04 V y el voltaje VDC es de 2.5 V, además el voltaje VCE depende del voltaje actual que tenga VDC, los niveles de voltaje pico se indican en la Tabla 4.1

Tabla 4.1. Valores obtenidos entre VDC y VCE

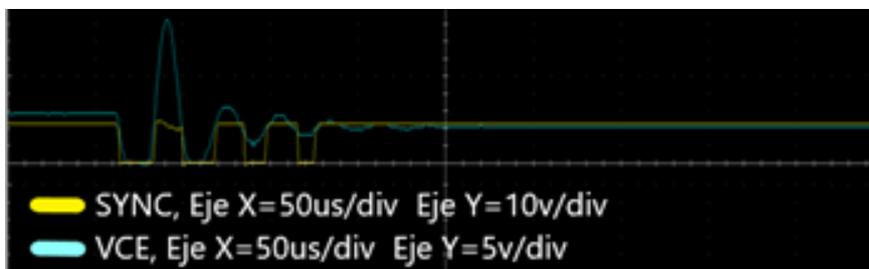
	Voltaje pico VCE [V]	Voltaje pico VDC [V]
Simulación	9.04	2.5
Circuito en protoboard	9	2.49

Valores de voltaje pico entre VDC y VCE, simulado y armado. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán.

4.2.2. Pulso de reconocimiento para la verificación del reservorio

El microcontrolador PIC16F1619 envía un pulso de activación al IGBT que produce que se cargue la bobina y se genere un pico de voltaje, si detecta la carga sobre la bobina, la energía se disipará como calor y el voltaje se estabilizará rápidamente, caso contrario la energía permanecerá almacenada y el voltaje seguirá oscilando por un período más largo de tiempo hasta que se descargue completamente. Esto sucede cuando se envía un pulso de activación hacia el IGBT al momento de encender el circuito.

Figura 4.2. Pulso de detección con carga

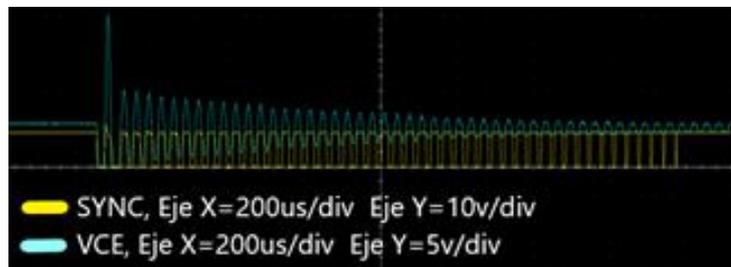


Pulso de activación enviado al IGBT en el circuito armado. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Se compara la señal de sincronización con un valor fijado de 5 V y VCE del IGBT, por lo que los picos mayores a este valor pasan como una señal cuadrada de pulsos y si son menores a 1 V no se envía la señal. Como se aprecia en la Figura 4.2, se genera 3 pulsos de detección en el caso del reservorio, esto significa que se detectó la carga y se procede al funcionamiento del calentador, caso contrario, si no se detecta una carga

se produce una cantidad de pulsos mayor como se visualiza en la Figura 4.3, entonces el sistema de control procede a apagar el circuito de potencia, lo que evita que la bobina almacene un exceso de energía y cause daño al circuito, de esta forma se asegura que el encendido del calentador se procuren en condiciones adecuadas.

Figura 4.3. Pulso de detección sin carga



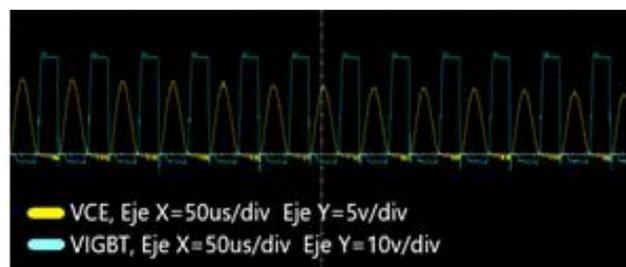
Pulsos generados por la etapa de sincronización enviados al IGBT sin el reservorio. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

4.3. SIMULACIÓN DEL SUBSISTEMA DEL CIRCUITO DE DISPARO

4.3.1. Prueba de voltaje de activación del IGBT y VCE

En la Figura 4.4, se observa que la activación del IGBT se da en el momento que VCE es 0 V, logrando la condición conmutación a voltaje ceo (ZVS) por el diodo en paralelo con el interruptor y teniendo pérdidas por conmutación reducidas, el voltaje presente en la compuerta del IGBT es de 16.5 V.

Figura 4.4. Voltaje de activación del IGBT y VCE



Medición de voltajes entre VIGBT y VCE en tiempo real. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán.

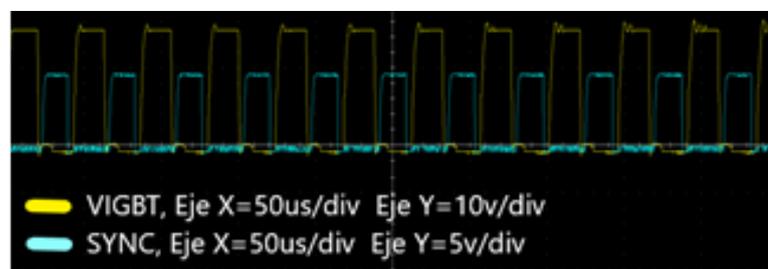
4.4. SIMULACIÓN DEL SUBSISTEMA DEL CIRCUITO DE SINCRONIZACIÓN

4.4.1. Pulsos de activación del IGBT y pulso de sincronización

Se verifica el funcionamiento de la etapa de sincronización para el IGBT como se muestra en la Figura 4.5, donde la comparación entre el voltaje VDC y el voltaje VCE producen pulsos, es decir, un flanco de subida cuando VCE es mayor que VDC y un flanco de bajada cuando VCE es menor que VDC.

Se aprecia un retardo en el pulso de activación del IGBT una vez que se produce un flanco de bajada en la etapa de sincronización, este retardo permite que se logre la condición de ZVS y es de aproximadamente 3.5us.

Figura 4.5. Pulso de sincronización y activación del IGBT



Señales de sincronización y activación del IGBT en tiempo real. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

4.5. PRUEBA DE POTENCIA DEMANDADA POR EL CALENTADOR

Con esta prueba se verifica la potencia total del calentador por inducción, mediante la medición de corriente que consume y se divide en dos pruebas.

- La primera se realiza ubicando el reservorio directamente en contacto con la bobina de inducción.
- La segunda se realiza colocando un aislante térmico entre el reservorio y la bobina de inducción.

En la primera prueba sin colocar aislante térmico entre el reservorio y la bobina, se mide la corriente de salida cuando el calentador empieza su funcionamiento conectada

a 120 V de la red eléctrica, el resultado es una corriente de 10.4 A, dando una potencia de 1248 W representado en la Tabla 4.2, y mediante el uso del termistor se comprueba que la bobina rápidamente alcanza la sobre temperatura, debido al contacto directo con la carga.

Tabla 4.2. Potencia resultante sin aislante térmico

Carga	Corriente [A]	Potencia [W]
Reservorio	10.4	1248

Corriente medida con pinza amperimétrica. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán.

La segunda prueba se realiza con el uso de un aislante térmico (vitrocerámica) entre el reservorio y la bobina, se mide la corriente de salida cuando el calentador empieza su funcionamiento conectada a 120 V de la red eléctrica, el resultado es una corriente de 8 A, dando una potencia de 960 W representado en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Potencia resultante con aislamiento térmico

Carga	Corriente [A]	Potencia [W]
Reservorio	8	960

Corriente medida con pinza amperimétrica. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán.

Comparando la potencia de las dos pruebas realizadas y expresadas en las tablas 4.2 y 4.3, se obtiene una reducción de 288 W, debido al aumento de espacio entre la bobina y el reservorio al ubicar el aislante térmico, pero este material permite un funcionamiento continuo del calentador, evita el sobrecalentamiento, disminuye las pérdidas por la conducción hacia el chasis, protege la parte interna de la bobina y los circuitos integrados del calentador.

Mediante la prueba de potencia se observa que después de aproximadamente 10 minutos de uso continuo, el IGBT se calienta a una temperatura de 110°C, a pesar que puede soportar en esta temperatura, está cerca de su rango de operación de temperatura máxima, por lo tanto, se implementa otro IGBT en paralelo y se obtiene una temperatura de trabajo de 78°C de manera continua. Se limita la temperatura

máxima a 90°C antes que se produzca la condición de sobre temperatura, se debe tener en cuenta que la activación de los dos IGBT se realiza con una sola etapa de disparo.

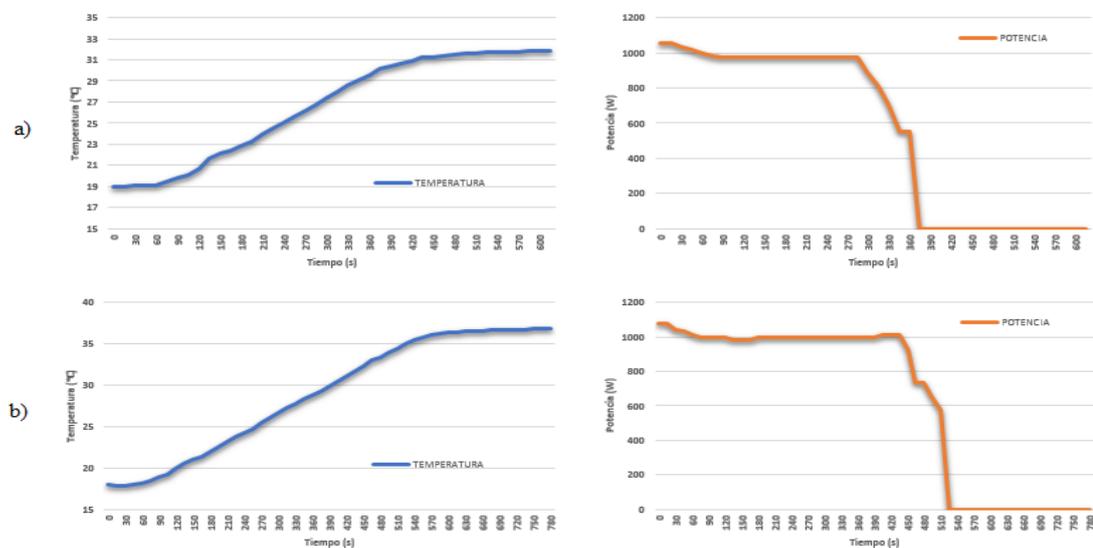
4.6. PRUEBAS DEL CONVERTIDOR RESONANTE EN LAZO CERRADO

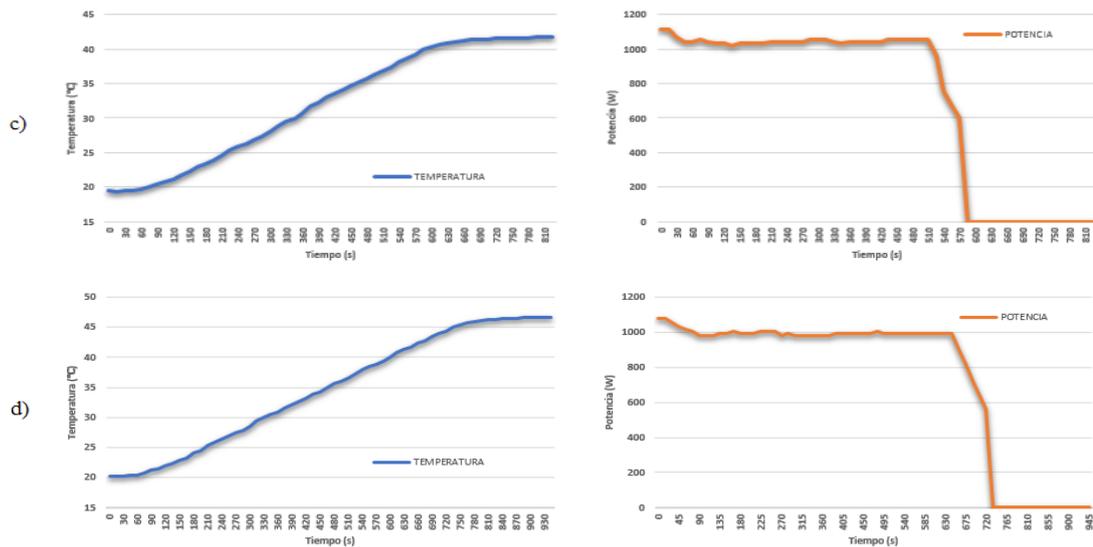
Se realizan dos pruebas para comprobar el funcionamiento del control en lazo cerrado, una estática que consiste en probar diferentes setpoints variando el nivel de potencia y verificando el tiempo que tarda en estabilizarse la temperatura en dichos valores dentro del reservorio y otra dinámica, en la cual el tiempo que demora en estabilizarse la temperatura al flujo de agua saliente. Durante la ejecución de los pruebas, se efectuaron tres mediciones repetitivas para cada temperatura con un tiempo máximo de funcionamiento de 10 minutos.

4.6.1. Prueba de calentamiento con agua estática

Para la prueba se utilizan valores de referencia cada 5°C, iniciando con un setpoint mínimo de 30°C y se finaliza con un setpoint máximo de 45°C tomando como referencia el factor térmico del agua mostrado en la Tabla 2.2, cuya variación de potencia para el control durante el funcionamiento del calentador, se determina mediante el cambio de la temperatura del agua a través del tiempo en el interior del reservorio al momento que la llave se encuentra cerrada.

Figura 4.6. Cambio de temperatura y potencia vs. Tiempo dentro del reservorio





a) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 30°C. b) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 35°C. c) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 40°C. d) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 45°C. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Se aprecia en la gráfica de la Figura 4.6a), para un setpoint de 30°C cuando se enciende el calentador, la temperatura inicial dentro del reservorio es de 19°C e inicia el calentamiento a potencia máxima de 1056 W, a medida que la temperatura aumenta la potencia ligeramente va descendiendo y se mantiene en 972 W por 5 minutos con 15 segundos, cuando la temperatura llega hasta 29°C, la potencia disminuye a 552 W y en un tiempo de 6 minutos con 15 segundos alcanza el valor deseado de 30°C lo que ocasiona que el circuito automáticamente se apague, entonces la temperatura se mantiene constante a 31.8°C por un lapso de tiempo de 9 minutos con 30 segundos.

Para los valores de 35°C, 40°C y 45°C, se aplicó el procedimiento anterior, obteniendo similares resultados que se resumen en la Tabla 4.4 en donde se puede notar que siempre se inicia con la máxima potencia que puede entregar el circuito. La diferencia en los tiempos de las temperaturas se debe a los valores iniciales del setpoint.

Tabla 4.4. Tiempo requerido para calentar agua

Temperatura Inicial [°C]	Setpoint [°C]	Tiempo de calentamiento hasta setpoint	Temperatura de estabilización [°C]	Tiempo hasta Estabilización
19	30	6min 15s	31.8	9 min 30s
18	35	8min 45s	36.8	12min 30s
19.3	40	9min 45s	41.7	13min 15s
20.2	45	12min 15s	46.6	14min 45s

Valores obtenidos a diferentes temperaturas con un setpoint ingresado por el usuario. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Como se aprecia en los valores presentados en la Tabla 4.4, para alcanzar la máxima temperatura posible en un setpoint de 45°C, el tiempo precalentamiento del agua es de 12min con 15 segundos en relación a la primera prueba, además se observa que al mantener el agua estática existe una elevación adicional de temperatura en el rango de 1.6°C – 1.8°C, debido al calor almacenado en el interior del reservorio, lo que evita que el calentador se encienda en periodos muy cortos de tiempo al momento que se necesite volver a calentar el agua cuando no se produzca flujo de agua saliente y la temperatura disminuya de un cierto valor umbral determinado por el setpoint.

4.6.2. Prueba de calentamiento con agua dinámica

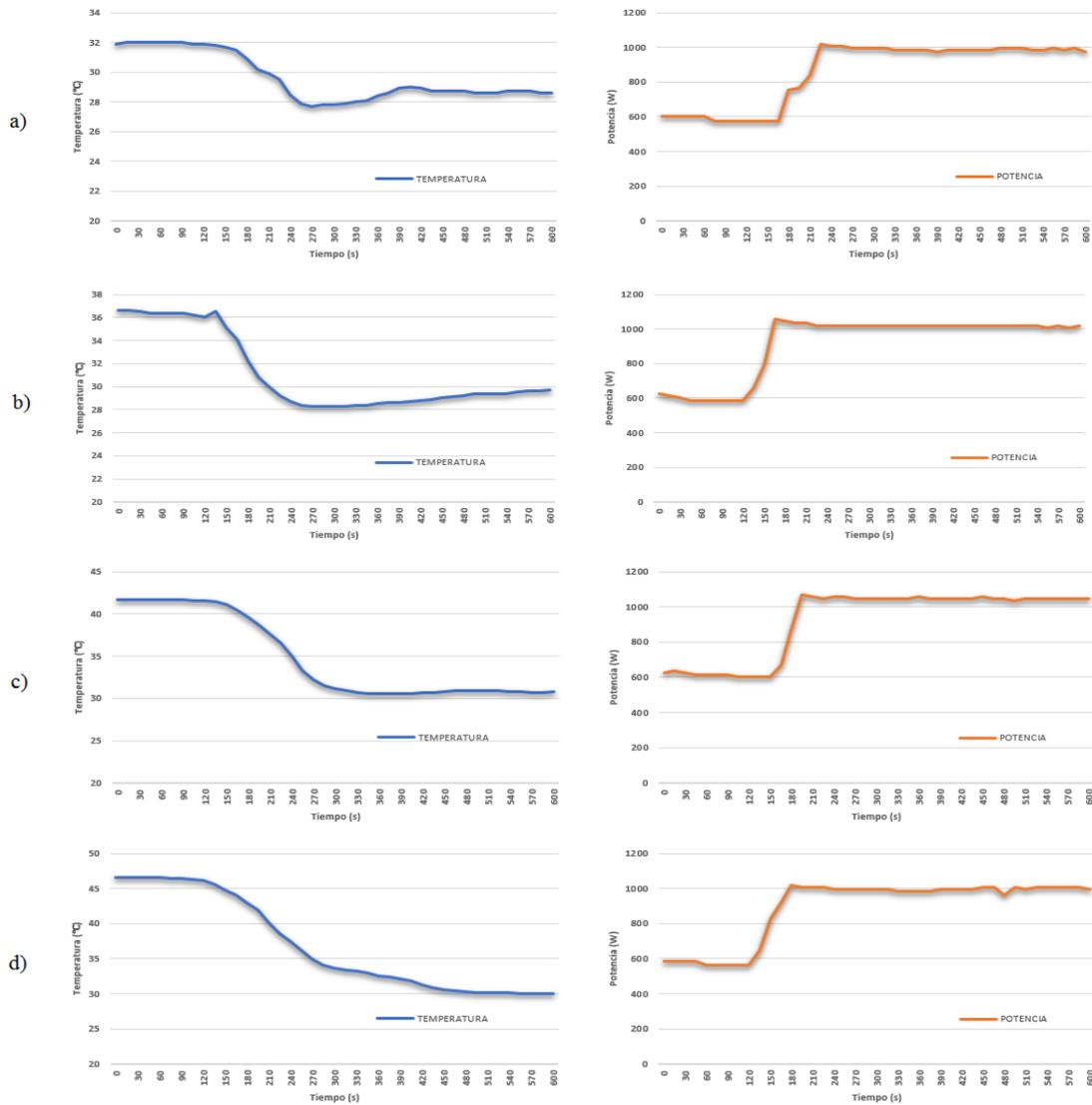
Esta prueba se realiza cuando el agua dentro del reservorio está precalentada, para un caudal de 0.5 L/min y 1 L/min por un tiempo de funcionamiento de 10 minutos inicialmente con potencia variable y posteriormente a máxima potencia, para determinar cuál caudal brinda un mejor resultado de estabilización de temperatura al flujo de agua saliente a un determinado setpoint

- **Prueba con potencia variable con caudal de 0.5 L/min**

Cuando empieza a salir el agua caliente, la temperatura inicial dentro del reservorio es de 31.9°C y la potencia saliente es de 600 W, por 3 minutos con 30 segundos la temperatura se mantiene en el setpoint de 30°C, como se muestra en la Figura 4.7a), a medida que sigue disminuyendo la temperatura, la potencia progresivamente va aumentando, y en un tiempo de 4 minutos con 50 segundos

se estabiliza a 27.7°C con una potencia máxima que entrega el circuito de 984 W por un lapso de tiempo de 10 minutos.

Figura 4.7. Cambio de temperatura y potencia variable con respecto al tiempo para un caudal de 0.5L/min



a) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 30°C . b) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 35°C . c) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 40°C . d) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 45°C . Autores: Henry Llumiquinga y

José Tipán

Para los valores de 35°C , 40°C y 45°C , se aplicó el procedimiento anterior, obteniendo similares resultados que se resumen en la Tabla 4.5 en donde se puede

notar el tiempo que el reservorio mantiene la temperatura del agua internamente, mientras empieza a desfogar líquido al abrir el grifo.

Tabla 4.5. Tiempo que mantiene la temperatura con un caudal de 0.5L/min a potencia variable

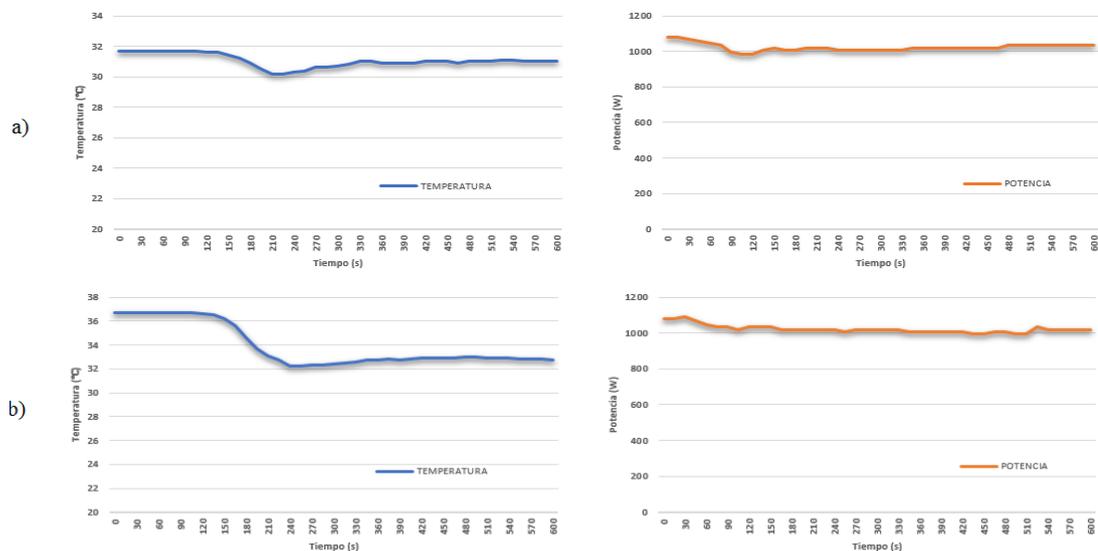
Temperatura Inicial [°C]	Temperatura de interés [°C]	Tiempo hasta temperatura deseada	Temperatura Mínima [°C]
31.9	30	3min 30s	27.7
36.7	35	2min 30s	28.3
41.7	40.4	2min 45s	30.6
46.6	44.8	2min 30s	30

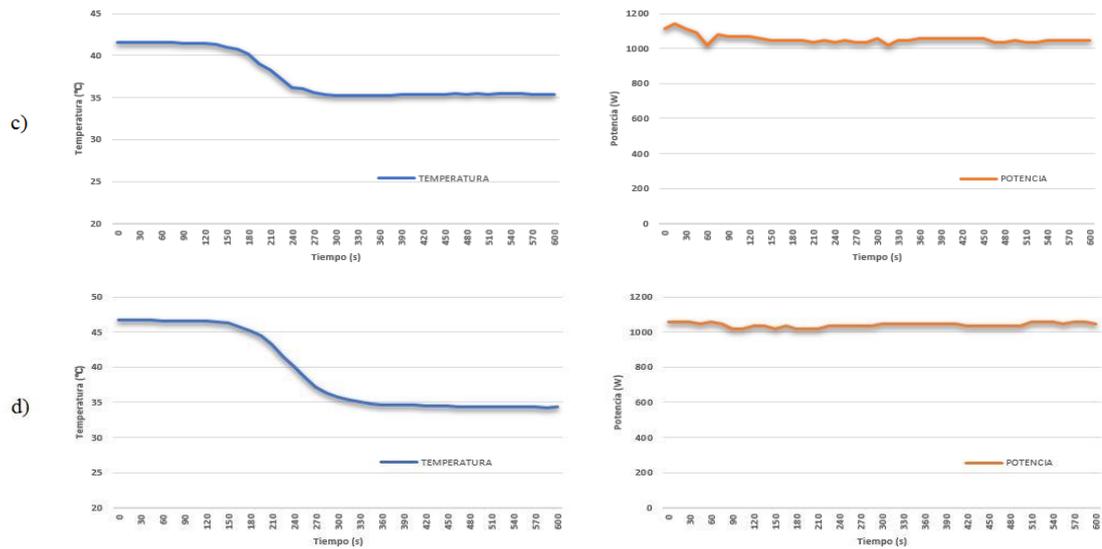
Resultados obtenidos al implementar el control en lazo cerrado con potencia variable. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

- **Prueba con potencia máxima con caudal de 0.5L/min**

Al igual que la prueba anterior, se realiza cuando empieza a salir el agua caliente, la temperatura inicial dentro del reservorio es de 31.7°C y ahora se cambia a potencia máxima la cual es de 1080 W, como se muestra en la Figura 4.8a), por 3 minutos con 50 segundos la temperatura se mantiene con un valor de 3.2°C y se estabiliza en dicho valor mientras sigue fluyendo el agua caliente.

Figura 4.8. Cambio de temperatura a potencia máxima constante respecto al tiempo para un caudal de 0.5L/min





a) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 30°C. b) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 35°C. c) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 40°C. d) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 45°C. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

La prueba se repite para los valores de 35°C, 40°C y 45°C, obteniendo diferentes resultados que se resumen en la Tabla 4.6, en donde se puede apreciar que el tiempo de estabilización para los diferentes setpoints es de 3 minutos cuando se suministra la máxima potencia y a medida que ingresa agua para ser precalentar nuevamente, se observa que lentamente decae la temperatura hasta un valor mínimo.

Tabla 4.6. Tiempo que mantiene la temperatura con un caudal de 0.5L/min a máxima potencia

Temperatura inicial [°C]	Temperatura de interés [°C]	Tiempo hasta temperatura deseada	Temperatura Mínima [°C]
31.7	30.2	3min 50s	30.2
36.7	35	2min 52s	32.2
41.5	40.1	3min	35.1
46.7	45.2	3 min	34.3

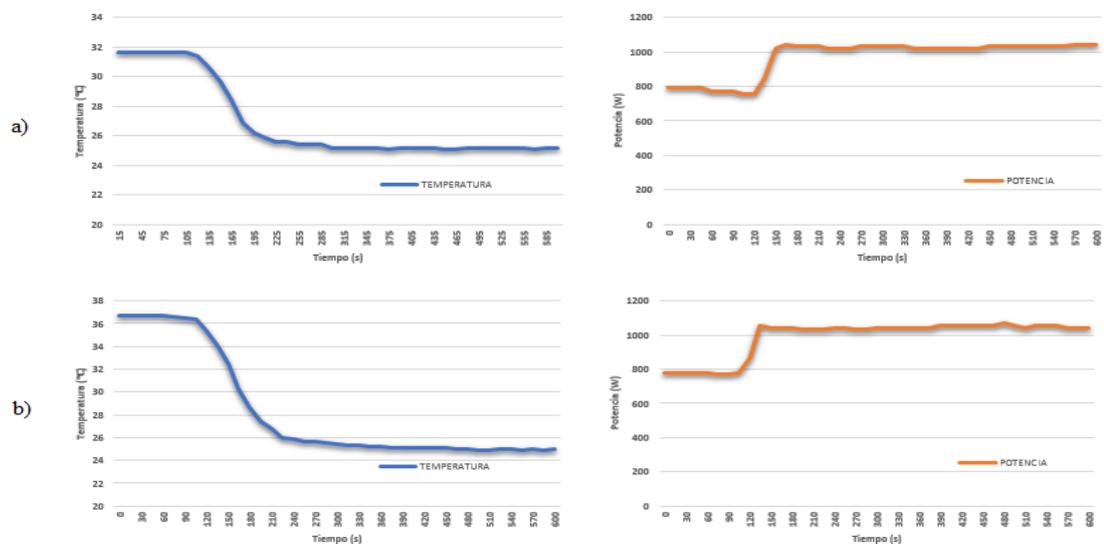
Resultados obtenidos al implementar el control en lazo cerrado con potencia máxima. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

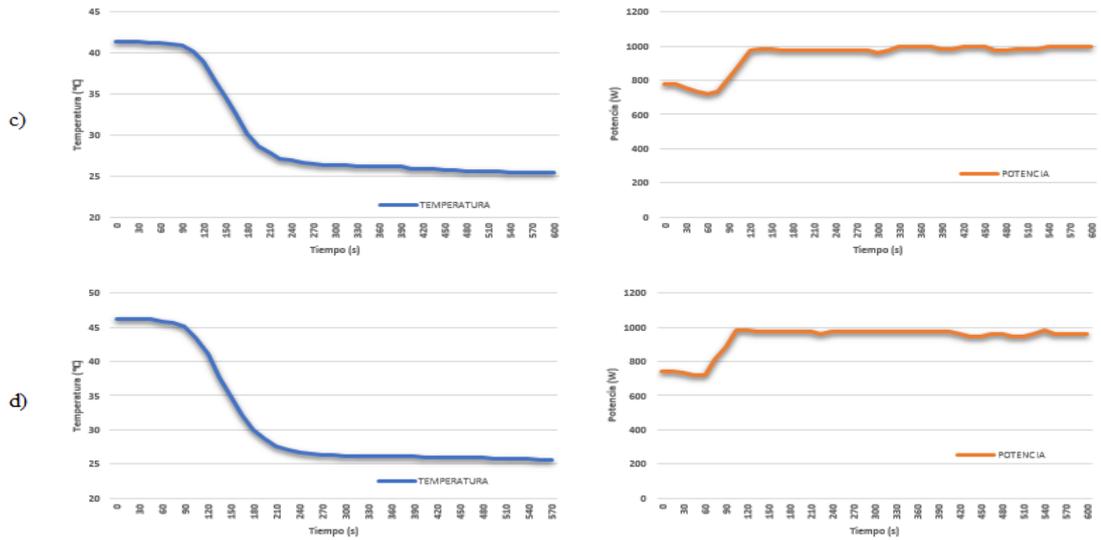
Al comparar los datos de la Tabla 4.5 con la Tabla 4.6 se verifica que la temperatura dentro del reservorio varía según la potencia aplicada al existir una demanda de caudal de 0.5L/min, se mantiene una temperatura mayor del agua durante un intervalo de tiempo más largo, además la temperatura mínima alcanzada es superior en un promedio de 3.8°C

- **Prueba con potencia variable con caudal de 1L/min**

Esta prueba se realiza para observar los cambios de temperatura que se produce dentro del reservorio al aumento del flujo de agua saliente y el tiempo que tarda en estabilizarse la temperatura. El resultado se muestra en la Figura 4.9a), para un setpoint de 30°C, la temperatura dentro del reservorio es 31.6°C y la potencia inicial es 792 W, por 2 minutos con 25 segundos el agua se mantiene a dicha temperatura dentro del reservorio, a medida que sigue disminuyendo la temperatura, la potencia progresivamente va aumentando, y en un tiempo de 4 minutos con 15 segundos se estabiliza a 25.1°C con potencia máxima de funcionamiento de 1020 W.

Figura 4.9. Cambio de temperatura y potencia variable con respecto al tiempo para un caudal de 1L/min





a) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 30°C. b) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 35°C. c) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 40°C. d) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 45°C. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Para los valores de 35°C, 40°C y 45°C, se aplicó el procedimiento anterior, obteniendo similares resultados que se resumen en la Tabla 4.7 en donde se puede evaluar el tiempo que el reservorio mantiene la temperatura del agua internamente, mientras empieza a desfogar líquido al abrir el grifo.

Tabla 4.7. Tiempo que mantiene la temperatura con un caudal de 1L/min a potencia variable

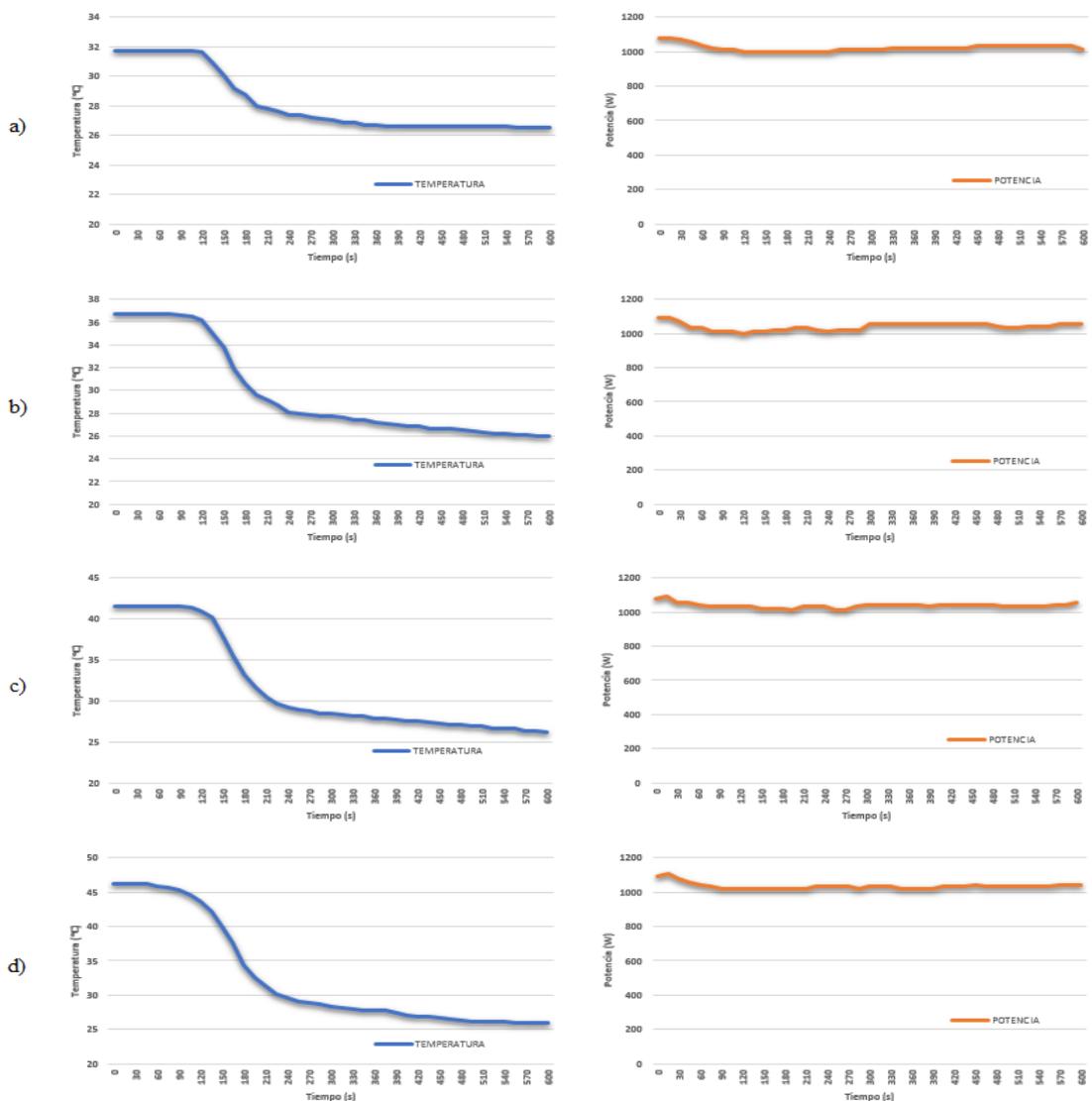
Temperatura Inicial [°C]	Temperatura de interés [°C]	Tiempo hasta Temperatura de interés	Temperatura mínima [°C]
31.6	30	2min 25s	25.1
36.7	35.4	2min	25
41.4	40	1min 45s	25.4
46.2	45.2	1min 30s	25.5

Resultados obtenidos al implementar el control en lazo cerrado con potencia variable. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

- **Prueba con potencia máxima con caudal de 1L/min**

Para esta prueba el calentador trabaja a potencia máxima, para verificar el tiempo que se mantiene el agua caliente dentro del reservorio y el tiempo de estabilización cuando ingresa agua para ser precalentada. El resultado se muestra en la Figura 4.10a), cuando empieza a salir el agua caliente, la temperatura inicial dentro del reservorio es de 31.7°C y trabaja con potencia de 1080 W, por 2 minutos con 30 segundos la temperatura se mantiene dentro del reservorio y se estabiliza en 26.5°C al flujo de agua que ingresa para ser precalentado.

Figura 4.10. Cambio de temperatura a potencia máxima constante respecto al tiempo para un caudal de 1L/min



a) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 30°C. b) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 35°C. c) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 40°C.

d) Temperatura y potencia del calentador con setpoint de 45°C. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Para los setpoints de 35°C, 40°C y 45°C la prueba se repite, obteniendo diferentes resultados que se resumen en la Tabla 4.8, en donde se puede apreciar que el tiempo de estabilización para los diferentes setpoints es de 2 minutos con 30 segundos cuando se suministra la máxima potencia y a medida que ingresa agua para ser precalentar nuevamente, se observa que lentamente decae la temperatura hasta un valor mínimo.

Tabla 4.8. Tiempo que mantiene la temperatura con un caudal de 1L/min a potencia máxima

Temperatura Inicial [°C]	Temperatura de interés [°C]	Tiempo hasta Temperatura de interés	Temperatura mínima [°C]
31.7	30	2min 30s	26.5
36.7	35	2min 15s	26
41.5	40	2 min 15s	26.2
46.2	45.2	1 min 30s	25.9

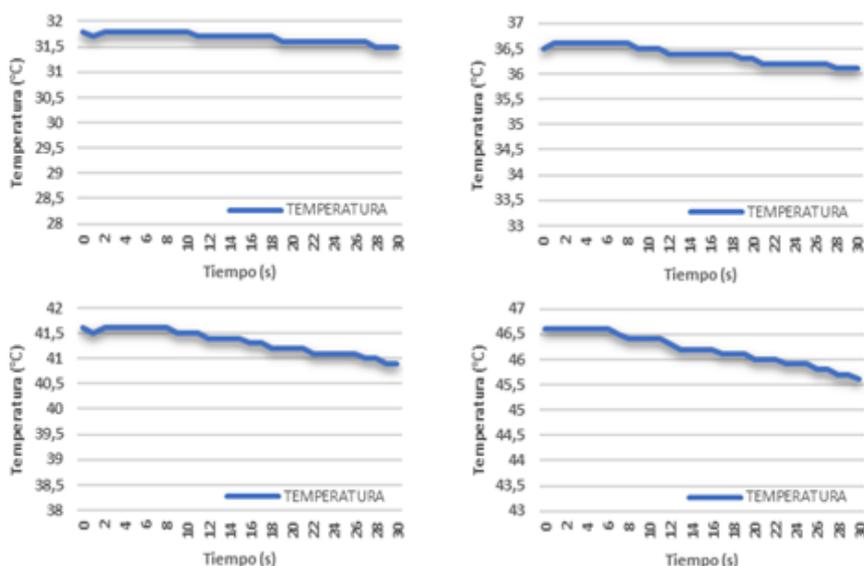
Resultados obtenidos al implementar el control en lazo cerrado con potencia máxima. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Al comparar los datos de la Tabla 4.7 con la Tabla 4.8 se aprecia que al proporcionar la potencia máxima en el momento de abrir la llave con un caudal de 1L/min, la temperatura se mantiene con un largo período de tiempo, es decir, mientras la potencia sea mayor, permite mantener la temperatura del agua dentro del reservorio por más tiempo, además la temperatura mínima promedio es 0.9°C

4.6.3. Prueba de conservación de la temperatura en reposo del agua

Debido a la interacción que existe entre la temperatura en el interior del reservorio y el medio ambiente, se estima la pérdida de calor en el interior del mismo, esta prueba nos permite determinar el comportamiento del calentador al mantener agua caliente en reposo por un lapso de 30 minutos, los resultados se muestran en la Figura 4.11

Figura 4.11. Conservación de la temperatura en reposo del agua.



- a) Variación de la temperatura con agua en reposo a 31.8°C. b) Variación de la temperatura con agua en reposo a 36.5°C. c) Variación de la temperatura con agua en reposo a 41.6°C. d) Variación de la temperatura con agua en reposo a 46.6°C. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

Tabla 4.9. Pérdida de calor del reservorio al transcurrir 30 minutos

Temperatura Inicial [°C]	Temperatura Final [°C]	Diferencia de Temperatura [°C]
31.8	31.5	0.3
36.5	36.1	0.4
41.6	40.9	0.7
46.6	45.6	1

Variación del calor en el interior del reservorio a diferentes temperaturas. Autores: Henry Llumiquinga y José Tipán

En la Tabla 4.9 se observa que a medida el agua posee una mayor temperatura, el reservorio presenta una mayor transferencia de calor con el medio ambiente en el mismo intervalo de tiempo, al analizar los últimos valores, cuando la temperatura inicial sea de 46.6°C se obtiene una variación de 1°C en 30 minutos, esto sucede por el recubrimiento con el aislante térmico (lana de vidrio) y el refuerzo de acero en el armazón del reservorio.

CONCLUSIONES

Se desarrolla un calentador de agua por inducción electromagnética, el cual cumple los objetivos propuestos en el proyecto, donde se investiga las variables que intervienen en este proceso y los subsistemas que lo conforman entre los cuales se destacan, un circuito de potencia, disparo, sincronización, acondicionamiento, control y alimentación. Estos subsistemas trabajan en conjunto y permite un calentamiento con mayor eficiencia debido a que el calor se produce únicamente en el material conductor lo que no ocurre con otros tipos de calentadores.

El inversor resonante clase E se caracteriza por poseer una alta eficiencia al utilizar un número reducido de componentes, disminuyendo su costo de producción y su tamaño haciéndolo atractivo para su implementación. Su estrategia de control se ve limitada debido a que al trabajar a frecuencias superiores a 30 KHz se tiene pérdidas considerables, esto se traduce en que no es posible disminuir la potencia de un cierto valor, motivo por el cual se decide implementar una tabla de potencias para el control del calentador verificando que la temperatura se estabiliza en el rango de 1.6 a 1.8 °C al momento de calentar el agua y al no existir demanda por parte del usuario a diferentes valores de setpoint.

La potencia demandada por el inversor depende del tiempo de carga del convertidor resonante, cuando la frecuencia de trabajo del calentador es igual a la frecuencia de resonancia se obtiene la máxima potencia, si se aumenta la frecuencia de trabajo se produce la disminución de potencia, ya que se reduce el tiempo de carga de la bobina esto nos permite controlar la potencia del calentador dentro de un determinado rango.

El diseño del reservorio acumulador es un factor clave en la eficiencia del calentador, ya que se fabrica en acero inoxidable por su durabilidad y resistencia al desgaste, además es un buen conductor de calor por sus propiedades ferromagnéticas, para mantener la temperatura dentro del reservorio se lo cubre con lana de vidrio que es un aislamiento térmico, de esta manera se define el tiempo necesario para calentar el agua a una misma potencia y el consumo de energía.

El IGBT debe operar en modo ZVS, es decir se debe activar cuando el voltaje resonante sea igual a 0 V para que no se generen picos de corriente al momento de la conmutación, ya que tienen la capacidad de dañar el IGBT, además de provocar el incremento de los armónicos en la red eléctrica

Entre las protecciones se implementa un método de detección de carga sin la necesidad de añadir ningún componente adicional, lo cual garantiza el funcionamiento del calentador solo cuando las condiciones de carga sean las adecuadas y para finalizar se añade una protección contra sobrecalentamiento en la bobina o el IGBT, se reduce el riesgo de que los componentes electrónicos sufran daños mejorando la confiabilidad y la seguridad.

Si se expone la bobina a elevadas temperaturas aumenta las pérdidas en el calentador, debido a un aumento en la resistencia del cobre con el cual se genera mayor calor debido al efecto joule, esto puede ocasionar la ruptura del aislamiento que recubre al cable y provocar un cortocircuito entre los devanados. En el IGBT se da un aumento de temperatura a medida que la frecuencia de conmutación se incrementa, ya que el apagado se da en una condición forzada, esto ocasiona que disminuya la corriente que puede circular por el conmutador y aumenta las pérdidas del calentador.

Para asegurar un correcto funcionamiento del calentador, se debe emplear diversos métodos de refrigeración para la bobina, el IGBT, y el puente de diodos, lo que aumenta la eficiencia y alarga la vida útil de estos dispositivos, en esta investigación se implementa un ventilador junto a un disipador que contiene pasta térmica evitando la generación de las señales de sobre temperatura durante la duración de las pruebas realizadas.

RECOMENDACIONES

Para mejorar la eficiencia del calentador se recomienda diseñar un sistema que permita aprovechar la alta temperatura que se genera en el IGBT y el puente de diodos obteniendo la refrigeración de estos dispositivos y la vez el calentamiento del agua con lo que se logra reducir el consumo de energía por parte del calentador para una misma cantidad de agua.

El ruido producido por la bobina y la cercanía que tienen los dispositivos de control y comparación con este elemento pueden causar el reseteo de estos, en caso que se produzca esta situación se debe utilizar capacitores de desacoplo siendo ubicados lo más cercano posible a la alimentación de los dispositivos

Debido a la limitada potencia a la que se tiene acceso en la red eléctrica de los hogares no se pudo mantener el caudal del agua a una temperatura superior a 30 grados a caudal de 1l/min de manera constante por lo cual se podría implementar una etapa de precalentamiento para obtener temperaturas superiores sin cambiar la potencia del calentador.

Evitar el uso del software mikroC para programar los microcontroladores utilizados en el proyecto debido a problemas con la configuración de la velocidad del reloj al verse dividida para 4 esto se puede comprobar por medio de una simulación básica, en este proyecto se prefirió la utilización del software MPLAB con lo que se obtuvo el resultado esperado.

Para verificar la operación del conversor de potencia con seguridad para los usuarios es recomendable utilizar un bajo voltaje de alimentación mayor a 36V que son suficientes para energizar el sistema y que funcione pudiendo observar formas de onda y realizar mediciones sin riesgo.

REFERENCIAS

- Acosta Rivera, G. F. (7 de Enero de 2019). Inversor resonante para ahorro de energía en un calentador de agua mediante inducción magnética. *UISrael Revista Científica*, VI(1), 23-40. Obtenido de <https://revista.uisrael.edu.ec/index.php/rcui/issue/view/13/13>
- ADAMS. (2017). Técnicas de aplicación de Termoterapia, Crioterapia e Hidroterapia. En *Auxiliar de Enfermería. Servicio Extremeño de Salud* (Vol. II, pág. 74). Madrid, España: cep.
- Adhikari, B., Nath Shrestha, J., & Shree, R. S. (Noviembre de 2018). A New Approach to the design of DC Powered Induction Cooker. *Kathford Journal of Engineering and Management*, 1, 35-42. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/329670370>
- Ambrell Induction Heating Solutions. (12 de 07 de 2020). *Acerca de Inducción Calentamiento*. Obtenido de https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0169-06.pdf
- Atmospheres, G. I. (2016). Innovative Induction Heating. 2-12. Obtenido de http://www.gh-ia.com/induction_heating.html
- Bolivar Guerrero, C. F. (12 de Febrero de 2016). *Repositorio Institucional Universidad Distrital - RIUD*. Obtenido de Diseño e Implementación de un Calentador por Inducción Electromagnética para el Montaje de Rodamientos: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/2839/BolivarGuerreroCesarFabian2016.pdf>
- Bolton, W. (2020). Magnetic flux. En *Engineering Science* (Seventh ed., págs. 265-269). New York: Routledge.
- Cáceres, J., & Montero, B. (2016). *Diseño y construcción de un calentador de agua en base al análisis de un sistema eficiente de inducción electromagnética para hogares pertenecientes al sector socio económico medio*.
- Cañero, J. L. (2018). Instalaciones de calefacción y ACS. En J. L. Cañero, *Curso de fontanería paso a paso* (págs. 179-207). España: Paraninfo.
- Cosme Vidal, J. C. (2017). *Electricidad para Viviendas* (Primera ed.). Madrid, España: ICB.
- Danahé , S. (17 de Enero de 2018). *ANDIRA*. Obtenido de Cómo funciona un calentador instantáneo de agua: <https://www.andira.org.mx/2018/01/17/como-funciona-un-calentador-instantaneo-de-agua/>
- Danfoss. (2016). *Domestic Hot Water*. Obtenido de DEVI: <https://devi.danfoss.com/en/applications/dhw/>

- Datasheetgo. (19 de Enero de 2017). *H2OR1203 PDF - IGBT de 1200 V - Infineon*.
Obtenido de Hoja de datosGO: <http://www.datasheetgo.com/h20r1203-pdf/>
- Deutsche Zusammenarbeit. (s.f.). Estudio sobre el potencial y la rentabilidad del uso de calentadores solares de agua (CSA) en pequeñas y medianas empresas (PyMES). *GIZ*, 1-60. Obtenido de https://energypedia.info/images/6/6b/Potencial_CSA_en_PyMES.pdf
- Echeverría Espinoza, S., & Guayanlema, V. (2017). Balance y proyecciones del sistema de subsidios energéticos en Ecuador. *Friedrich Ebert Stiftung*, 28.
- Ecosmart. (26 de Enero de 2021). *H2O TEK*. Obtenido de http://h2otek.com/tienda/pdf/aguacaliente/Manual_Instalacion_ECOSMART_ECO_11.pdf
- Fernández Membrive, V. J., Tolón Becerra, A., & Lastra Bravo, X. B. (2016). Sistemas de agua caliente sanitaria. En *Sostenibilidad Energética en el Sector de la Edificación en España y en la Unión Europea* (págs. 78-81). Almería: Universidad de Almería.
- Fidalgo Sánchez, J. A., Fernández Pérez, M. R., & Fernández Fernández, N. (2016). Máquinas eléctricas. Principios generales. En *Tecnología Industrial II* (págs. 178-179). Madrid: Paraninfo.
- Foshan Shunde CG Electronic Industry. (2020). *CG - Elec*. Obtenido de Induction cooker capacitors: <http://www.cgegd.com/en/application.html?url=wap&proTypeID=212816&url=wap&proTypeName=Induction+cooker+capacitors>
- García Trasancos, J. (2016). *Electrotecnia (350 conceptos teóricos y 800 problemas)* (11va ed.). Madrid, España: Paraninfo.
- Gh Induction Group. (2020). *Gh Induction Group*. Obtenido de <http://www.ghinduction.com/sobre-calentamiento-por-induccion/?lang=es>
- Guamán Molina, J., Guevara Aulestia, D., García Carrillo, M., & Ríos Villacorta, A. (Enero de 2016). Evaluación del Impacto Económico en Diferentes Escenarios de Implementación de Tecnologías Eficientes de Calentamiento de Agua en el Ecuador. *energía*(12), 270-283.
- Heizen. (26 de Enero de 2021). *Heizen water heater*. Obtenido de <https://www.calefonagas.com/calefones-de-induccion-2/>
- Holtek. (30 de Septiembre de 2020). *HT45F0058 Frequency Jittering Applications*. Obtenido de <https://www.holtek.com/documents/10179/116745/an0563en.pdf>
- H-one. (26 de Enero de 2021). *Calentador de agua por inducción*. Obtenido de H-one: <http://heating-appliance.es/4-induction-water-heater-es/124439/>
- Huamaní Infanzón, M. (20 de Enero de 2017). Efecto skin en Conductores. *CITE energía*. Obtenido de CITE energía: <http://www.citeenergia.com.pe/wp-content/uploads/2016/09/efecto-skin-conductores.pdf>

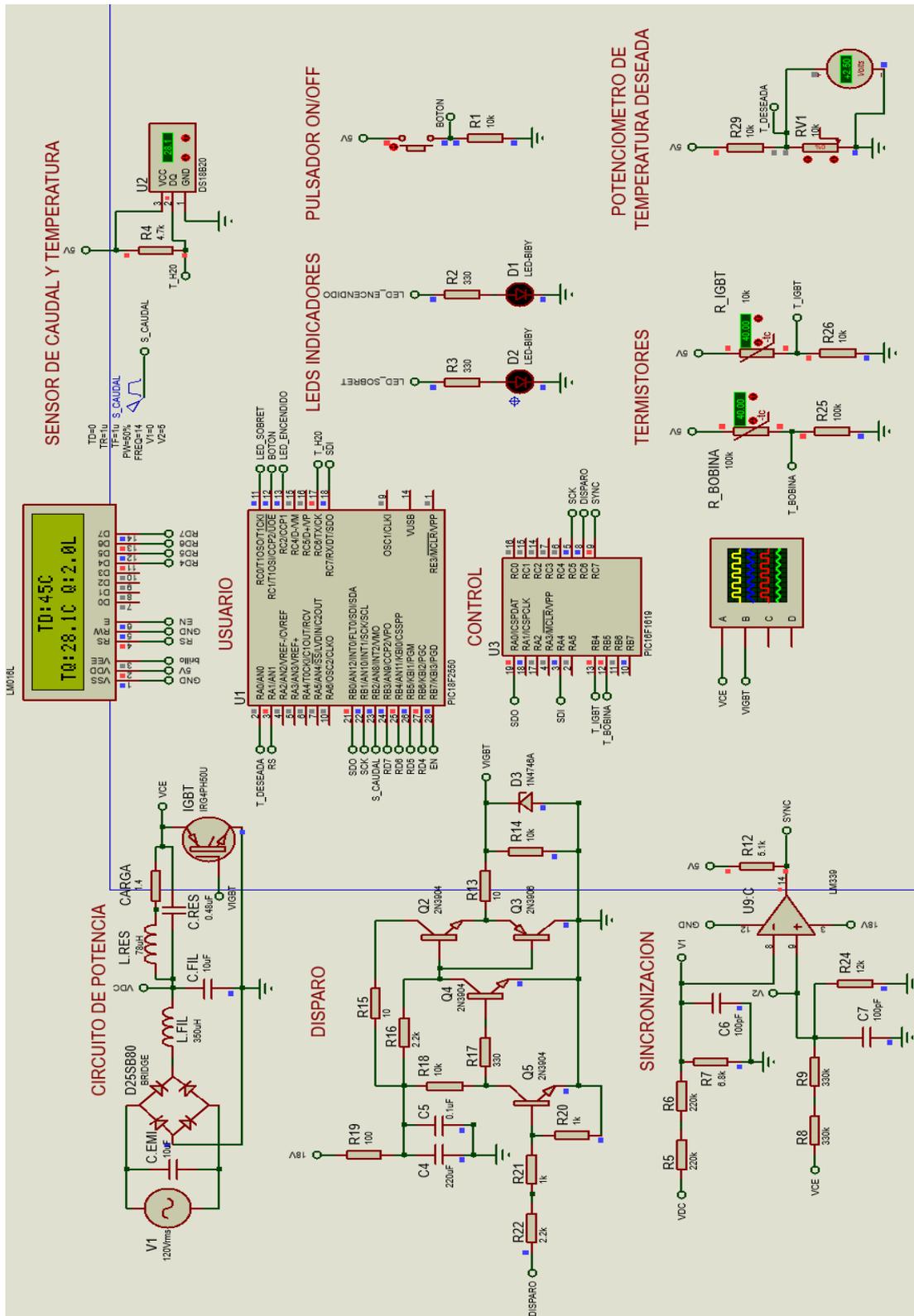
- Lizcano Castro, G. A., Uscátegui Ciendua, W. N., & Romero Rojas, J. A. (2019). Evaluación de pérdidas de agua en la ducha por el uso de agua caliente. *Escuela Colombiana de Ingeniería*(144), 39-43. Obtenido de <https://revistas.escuelaing.edu.co/reci/article/view/90/77>
- Maldonado Chávez, C. R., & Nogales Gallo, N. A. (Agosto de 2017). *Diseño de un sistema de transferencia de energía para el calentamiento de agua por medio de inducción*. Obtenido de Universidad Técnica de Cotopaxi: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4371/1/PI-000573.pdf>
- Mascarós Mateo, V. (2016). El inversor. En *Gestión del montaje de instalaciones solares fotovoltaicas* (págs. 114-118). Madrid, España: Paraninfo.
- Méndez Vallejos, E. (16 de Enero de 2019). *Hidroterapia*. Obtenido de Saludterapia: <https://www.saludterapia.com/glosario/d/40-hidroterapia.html>
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (05 de julio de 2018). *Portafolio de proyectos bajo modalidad de asociación público – privada*. Obtenido de <http://historico.energia.gob.ec/portafolio-de-proyectos-bajo-modalidad-de-asociacion-publico-privada/>
- MN Del Golfo. (12 de Noviembre de 2020). *mndelgolfo*. Obtenido de <https://www.mndelgolfo.com/reportaje/como-funciona-un-calentador-instantaneo/>
- Narendra Kumar, K. (2017). *Handbook of Research on Wireless Sensor Network Trends, Technologies and Applications*. United States: IGI Global.
- New England Wire Technologies. (2014). *Product selection guide*. Obtenido de <https://www.yumpu.com/en/document/read/15647952/catalog-new-england-electric-wire-corporation/121>
- Novas Castellano, N., Soler Ortiz, M. J., García Salvador, R. M., Fernández Ros, M., & Gázquez Parra, J. A. (2018). Rectificación monofásica y trifásica. En *Electrónica de Potencia. Análisis-Simulación* (págs. 55-58). Almería, España: Universidad de Almería.
- Pacheco, M. (28 de Abril de 2019). Los calefones a gas todavía compiten con los eléctricos. *El Comercio*.
- Parra Celi, E. G. (12 de Mayo de 2020). *Diseño de un sistema de inducción electromagnética para el calentamiento de agua residencial con sensado de temperatura*. Obtenido de Universidad Nacional de Loja: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/23229>
- Pastor, A., Escobar, D., Mayoral, E., & Ruiz, F. (2020). Calor y temperatura. En *Ciencias aplicadas I* (Segunda ed., pág. 221). Madrid, España: Paraninfo.
- Plásticos Tortuga. (2019). *Reciclados de Calidad*. Obtenido de <http://plasticostortuga.com/home/>
- Quevedo, L., Quizhpi, F., Morales, J., Cabral, R., & Bretas, A. (2014). Initial Results from a Prototype Corresponding to an Induction Water Heater. *IEEE*

International Autumn Meeting sobre Energía, Electrónica y Computación (ROPEC), 1-6.

- Rashid, M. H. (2015). *Electrónica de Potencia*. México: Pearson Educación.
- Ríos Villacorta, A., & Guamán Molina, J. I. (Julio de 2015). *Sistema de calefacción de agua por inducción electromagnética para el uso doméstico*. Obtenido de Universidad Técnica de Ambato:
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/13071>
- Samaniego, C., Hernández, O. Á., & Correa, J. M. (2016). Emisiones provocadas por combustión de GLP a partir de calefones en la ciudad de Loja y su posible relación con enfermedad respiratorias agudas (ERAS). *Cedamaz*, 6(1), 60-67.
- Sánchez, L., & Reyes, O. (2016). *La demanda de gasolinas, gas licuado de petróleo y electricidad en el Ecuador (CEPAL)*. Santiago.
- Serway, R., & Jewett, J. (2018). *Física para ciencias e ingeniería* (Décima ed., Vol. II). México: CENGAGE.
- SESCAM. (2019). Técnicas de aplicación de Termoterapia, Crioterapia e Hidroterapia. En *Técnico/a en Cuidados Auxiliares de Enfermería* (Vol. II, págs. 394-398). Madrid, España: cep.
- Tesy Iberia. (13 de Marzo de 2019). *Tesy Eficiencia Energética*. Obtenido de ¿Cómo funciona un termo eléctrico? Diferencias por tipos: <https://tesy.es/blog/como-funciona-un-termo/>
- Trillo, F. G., González Arias, D., & Sánchez de León Linares, L. J. (2020). Instalaciones de agua caliente sanitaria. En *Configuración de instalaciones de frío y climatización* (págs. 247-252). España: Paraninfo.
- Valencia Giraldo, A., & Aristizábal Sierra, R. (2020). *Ciencia de los metales*. Medellín: Universidad de Antioquia.

ANEXO 1

ESQUEMA DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN EL CALENTADOR POR INDUCCIÓN



ANEXO 2

HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL IGNT H20R1203



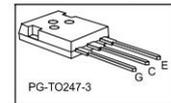
IH-series

IHW20N120R3

Reverse conducting IGBT with monolithic body diode

Features:

- Powerful monolithic body diode with low forward voltage designed for soft commutation only
- TrenchStop® technology applications offers:
 - very tight parameter distribution
 - high ruggedness, temperature stable behavior
 - low V_{CEsat}
 - easy parallel switching capability due to positive temperature coefficient in V_{CEsat}
- Low EMI
- Qualified according to JEDEC J-STD-020 and JESD-022 for target applications
- Pb-free lead plating; RoHS compliant
- Complete product spectrum and PSpice Models: <http://www.infineon.com/igbt/>



Applications:

- Inductive cooking

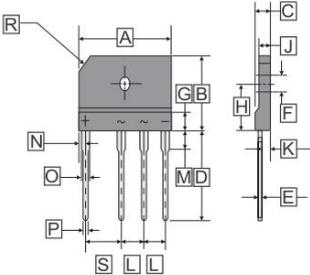
Type	V_{CE}	I_C	$V_{CEsat}, T_{vj}=25^\circ\text{C}$	T_{vjmax}	Marking	Package
IHW20N120R3	1200V	20A	1.48V	175°C	H20R1203	PG-TO247-3

Maximum ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Collector-emitter voltage	V_{CE}	1200	V
DC collector current, limited by T_{vjmax} $T_C = 25^\circ\text{C}$ $T_C = 100^\circ\text{C}$	I_C	40.0 20.0	A
Pulsed collector current, t_p limited by T_{vjmax}	I_{Cpuls}	60.0	A
Turn off safe operating area $V_{CE} = 1200\text{V}, T_{vj} = 175^\circ\text{C}$	-	60.0	A
Diode forward current, limited by T_{vjmax} $T_C = 25^\circ\text{C}$ $T_C = 100^\circ\text{C}$	I_F	40.0 20.0	A
Diode pulsed current, t_p limited by T_{vjmax}	I_{Fpuls}	60.0	A
Gate-emitter voltage Transient Gate-emitter voltage ($t_p = 10\mu\text{s}, D < 0.010$)	V_{GE}	± 20 ± 25	V
Power dissipation $T_C = 25^\circ\text{C}$ Power dissipation $T_C = 100^\circ\text{C}$	R_{tot}	310.0 155.0	W
Operating junction temperature	T_{vj}	-40...+175	°C
Storage temperature	T_{stg}	-55...+175	°C
Soldering temperature, wavesoldering 1.6 mm (0.063 in.) from case for 10s		260	°C
Mounting torque, M3 screw Maximum of mounting processes: 3	M	0.6	Nm

ANEXO 3

HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL PUENTE RECTIFICADOR D25SBA80

 <p>SECOs Elektronische Bauelemente</p>	<p>D25SB10 ~ D25SB100 100 V ~ 1000 V 25.0 Amp High Current Glass Passivated Molding Single-Phase Bridge Rectifier</p>																																																										
<p>RoHS Compliant Product A suffix of ".C" specifies halogen-free and RoHS Compliant</p>																																																											
<p>FEATURES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plastic Package has Underwriters Laboratory Flammability Classification 94V-0 • This Series is UL listed under the Recognized Component index, file number E231047 • Single-in-line package • High current capacity with small package • Superior thermal conductivity • High temperature soldering guaranteed : 260°C / 10 seconds • High IFSM 	<p style="text-align: right;">D5-25SB</p>   <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">REF.</th> <th colspan="2">Millimeter</th> <th rowspan="2">REF.</th> <th colspan="2">Millimeter</th> </tr> <tr> <th>Min.</th> <th>Max.</th> <th>Min.</th> <th>Max.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>29.7</td> <td>30.3</td> <td>K</td> <td>2.6</td> <td>2.8</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>19.7</td> <td>20.3</td> <td>L</td> <td>7.3</td> <td>7.7</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>4.4</td> <td>4.8</td> <td>N</td> <td>2.3</td> <td>2.7</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>17.0</td> <td>18.0</td> <td>P</td> <td>0.9</td> <td>1.1</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>0.6</td> <td>0.8</td> <td>O</td> <td>2.0</td> <td>2.4</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td colspan="2">5 REF.</td> <td>R</td> <td colspan="2">3X45°</td> </tr> <tr> <td>J</td> <td>3.4</td> <td>3.8</td> <td>S</td> <td>9.8</td> <td>10.2</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>3.3</td> <td>3.7</td> <td>H</td> <td>10.8</td> <td>11.2</td> </tr> </tbody> </table>	REF.	Millimeter		REF.	Millimeter		Min.	Max.	Min.	Max.	A	29.7	30.3	K	2.6	2.8	B	19.7	20.3	L	7.3	7.7	C	4.4	4.8	N	2.3	2.7	D	17.0	18.0	P	0.9	1.1	E	0.6	0.8	O	2.0	2.4	G	5 REF.		R	3X45°		J	3.4	3.8	S	9.8	10.2	F	3.3	3.7	H	10.8	11.2
REF.	Millimeter		REF.	Millimeter																																																							
	Min.	Max.		Min.	Max.																																																						
A	29.7	30.3	K	2.6	2.8																																																						
B	19.7	20.3	L	7.3	7.7																																																						
C	4.4	4.8	N	2.3	2.7																																																						
D	17.0	18.0	P	0.9	1.1																																																						
E	0.6	0.8	O	2.0	2.4																																																						
G	5 REF.		R	3X45°																																																							
J	3.4	3.8	S	9.8	10.2																																																						
F	3.3	3.7	H	10.8	11.2																																																						
<p>MAXIMUM RATINGS (T_A=25°C unless otherwise noted)</p>																																																											
PARAMETERS	SYMBOL	PART NUMBERS						UNITS																																																			
		D25SB 10	D25SB 20	D25SB 40	D25SB 60	D25SB 80	D25SB 100																																																				
		RBV 2502S	RBV 2503S	RBV 2504S	RBV 2505S	RBV 2506S	RBV 2507S																																																				
Maximum repetitive voltage	V _{RM}	100	200	400	600	800	1000	V																																																			
Maximum DC reverse current at @T _A =25°C rated DC blocking voltage @T _A =125°C	I _R	10 500						μA																																																			
Average rectified forward current 60Hz Sine wave Resistance load @T _A =25°C	I _O	25 ⁽¹⁾ 3.5 ⁽²⁾						A																																																			
Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave superimposed on rated load	I _{FSM}	350						A																																																			
Maximum Instantaneous Forward Voltage @ 12.5A	V _F	1.1						V																																																			
Dielectric strength terminals to case, AC 1 minute Current 1mA	V _{dia}	2.5						KV																																																			
Maximum thermal Resistance per leg	R _{θJA} on P.C.B without heat-sink R _{θJC} on Al plate heat-sink	22 ⁽²⁾ 1.0 ⁽¹⁾						°C / W																																																			
Operating and Storage Temperature Range	T _J , T _{STG}	150, -40 ~ 150						°C																																																			
Mounting torque	Tor	Rating Torque : 0.8N.m						N.m																																																			
<p>Notes :</p> <p>(1) Unit case mounted on Al plate heat-sink (2) Unites mounted on P.C.B. without heat-sink (3) Recommended mounting position is to bolt down on heatsink with silicone thermal compound for maximum heat transfer with #6 screw {heat-sink size : 12.4 * 15.2 * 12.8cm}</p>																																																											

<http://www.SeCoSGmbH.com/>

Any changes of specification will not be informed individually.

06-Aug-2010 Rev. A

Page 1 of 2