# DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ESTUFA DE INDUCCIÓN CON DOBLE FUENTE DE ENERGÍA PARA USO EN VIVIENDAS RURALES: UN ESTUDIO EXPERIMENTAL EN LABORATORIO

**WILLIAM FERNANDO CUJAR ESCOBAR**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA**
**FACULTAD DE INGENIERÍAS**
**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**
**POPAYÁN**
**2023**

# DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ESTUFA DE INDUCCIÓN CON DOBLE FUENTE DE ENERGÍA PARA USO EN VIVIENDAS RURALES: UN ESTUDIO EXPERIMENTAL EN LABORATORIO

**WILLIAM FERNANDO CUJAR ESCOBAR**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**Director: Mag. ANDRÉS FELIPE SOLIS PINO**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA**
**FACULTAD DE INGENIERÍAS**
**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**
**POPAYÁN**
**2023**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

**Firma del presidente de Jurado**

**Firma del Jurado**

**Firma de Jurado**

**Popaýan-Cauca, 18 de mayo de 2023**

## DEDICATORIA

“Dedico este trabajo a mi familia, cuyo amor, apoyo y sacrificio han sido fundamentales en mi formación académica y personal. A mi mamá María Lourdes Escobar Campo, quien ha sido mi inspiración y guía en cada paso de mi vida; a mi papá William Andrés Cujar Fernández, por ser mi modelo a seguir y por inculcarme el valor del estudio; a mi hermano José Miguel Cujar Escobar, por su compañía, comprensión y paciencia durante este proceso. Sin ustedes, este logro no sería posible.”

## AGRADECIMIENTOS

“Quiero expresar mi profunda gratitud a mi director de tesis, quien ha sido una guía fundamental en todo este proceso, brindándome su valiosa orientación y experiencia. Su dedicación y compromiso con mi proyecto han sido esenciales para alcanzar este logro.

También quisiera agradecer a mis compañeros, quien, con su constante motivación y colaboración, han sido una fuente de inspiración y aprendizaje en cada etapa de este proyecto. Su interés y atención en esta investigación me han impulsado a dar lo mejor de mí en cada momento. Finalmente, no puedo dejar de agradecer a todas las personas que de una u otra manera han contribuido a la realización de este trabajo. Su generosidad, paciencia y aliento han sido de gran ayuda para mí en todo momento."

## TABLA DE CONTENIDO

Pág.
LISTA DE FIGURAS ..... 10
LISTA DE TABLAS ..... 14
RESUMEN ..... 15
1 CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN ..... 17
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA ..... 17
1.2 JUSTIFICACIÓN ..... 19
1.3 OBJETIVOS ..... 22
1.3.1 OBJETIVO GENERAL ..... 22
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 22
1.4 MARCO TEÓRICO ..... 23
1.4.1 Estufa ..... 23
1.4.2 Estufa eléctrica ..... 23
1.4.3 Cocina a gas ..... 23
1.4.4 Estufa de inducción ..... 23
1.4.5 Cocina tradicional ..... 23
1.4.6 Inducción electromagnética ..... 24
1.4.7 Calentamiento por inducción electromagnética ..... 24
1.4.8 Efecto piel ..... 24
1.4.9 Energía solar ..... 24
1.4.10 Paneles solares ..... 25
1.4.11 Inversor ..... 25
1.4.12 Regulador de carga ..... 25
1.4.13 Batería o acumulador ..... 26
1.5 ESTADO DEL ARTE ..... 26
1.6 METODOLOGÍA ..... 29
1.6.1 Fase 1: Planteamiento del problema ..... 29
1.6.2 Fase 2: Construcción del modelo teórico ..... 29
1.6.3 Fase 3: Validación del dispositivo propuesto ..... 30
1.6.4 Fase 4: Introducción a las conclusiones en la teoría ..... 30
1.6.5 Fase 5: Documentación ..... 30

2 CAPÍTULO 2 - REVISIÓN DE LITERATURA: MAPEO SISTEMÁTICO DE LITERATURA....31
2.1 INTRODUCCIÓN....31
2.2 PLANIFICACIÓN DEL MAPEO SISTEMÁTICO DE LITERATURA....31
2.2.1 Definición de las preguntas de investigación....32
2.2.2 Estrategia de búsqueda....33
2.2.3 Criterios de selección de estudios primarios....34
2.3 ESTRATEGIA DE EXTRACCIÓN DE DATOS....35
2.4 ETAPA DE EJECUCIÓN....36
2.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS....36
2.5.1 Respuestas a las preguntas de investigación....37
2.5.1.1 ¿Cuál es la frecuencia de publicación de investigaciones que realizan desarrollos tecnológicos de inducción relativos al proceso de cocción de alimentos y a las energías renovables?....37
2.5.1.2 ¿Las metodologías de validación de las estufas de inducción se están aplicando de manera ad-hoc o siguiendo un estándar o metodología ya probada?....39
2.5.1.3 ¿Con qué frecuencia se relacionan las herramientas y los enfoques de materiales y energías renovables en el dominio de las estufas de inducción con suministro energético dual en los estudios analizados?....41
2.5.1.4 ¿Cuáles son los principales problemas, riesgos y retos en el dominio de las estufas de inducción con suministro energético dual?....42
2.5.1.5 ¿En qué contexto se están haciendo los principales aportes al dominio de los métodos alternativos para la preparación de alimentos con estufas de inducción?....44
2.5.1.6 ¿Cuál es la eficiencia de los sistemas de inducción propuestos y cómo contribuyen al dominio?....45
2.5.1.7 ¿Qué tendencias futuras respecto a algoritmos, materiales para la inducción, energías novedosas, entre otros, se están aplicando en el dominio?....47
2.5.1.8 ¿Qué tecnologías, enfoques o técnicas relacionan las energías renovables con la cocina de inducción de alimentos?....48
2.6 CONCLUSIONES PARCIALES....48
3 CAPÍTULO 3 - MODELADO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE ESTUFA DE INDUCCIÓN CON SUMINISTRO ENERGÉTICO DUAL....50
3.1 DISEÑO ELECTRÓNICO....51

3.1.1 Etapa de regulación ..... 51
3.1.2 Etapa de control ..... 52
3.1.2.1 Topología de puente completo ..... 52
3.1.2.2 Selección la frecuencia de operación ..... 54
3.1.2.3 Arduino Nano: acondicionamiento de la señal de control del prototipo de inducción ..... 54
3.1.2.4 Optoacoplamiento de la señal de control ..... 56
3.1.2.5 Drivers y semiconductores de potencia ..... 56
3.1.2.6 Circuito capacitor bootstrap ..... 58
3.1.2.7 Circuito etapa de control ..... 63
3.1.3 Etapa driver/mosfet ..... 67
3.1.4 Etapa de potencia y filtrados ..... 67
3.1.4.1 Rectificación y filtrado ..... 67
3.1.4.2 Implementación filtro LC ..... 68
3.1.4.3 Filtro EMI ..... 69
3.1.4.4 Circuito de la etapa de potencia ..... 70
3.1.4.5 Circuito tanque resonante ..... 73
3.2 DISEÑO CAD E IMPLEMENTACIÓN ..... 75
3.2.1 Desarrollo y modelado 3D de circuitos electrónicos en Proteus ..... 76
3.2.1.1 Modelado 3D e implementación del circuito regulador ..... 76
3.2.1.2 Modelado 3D e implementación del circuito de control ..... 77
3.2.1.3 Modelado 3D e implementación del circuito de driver/mosfet ..... 79
3.2.1.4 Modelado 3D e implementación del circuito de potencia y filtrado ..... 80
3.2.2 Desarrollo y modelado 3D del chasis empleando SolidWorks ..... 82
4 CAPÍTULO 4 - VALIDACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO ..... 85
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA DE CONCEPTO ..... 86
4.2 EQUIPOS Y/O ELEMENTOS A USAR ..... 87
4.3 PRUEBA DE CALENTAMIENTO CON LA ALIMENTACIÓN DC ..... 91
4.4 PRUEBA DE CALENTAMIENTO CON ALIMENTACIÓN AC ..... 93
4.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS ..... 94
4.6 RECONOCIMIENTOS Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN ..... 96
5 CONCLUSIONES ..... 97

6 TRABAJOS Y RECOMENDACIONES A FUTURO.....99
BIBLIOGRAFÍA.....100

## LISTA DE FIGURAS

**Pág.**

FIGURA 1. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA REVISIÓN DE LITERATURA CONSIDERANDO LA PROPUESTA DE PETERSEN. .....32

FIGURA 2. CONTRIBUCIONES DE CADA UNA DE LAS BASES DE DATOS CIENTÍFICAS.....36

FIGURA 3. ARTÍCULOS APORTADOS POR CADA UNA DE LAS BASES DE DATOS Y MOTORES DE BÚSQUEDA ACADÉMICOS ANTES Y POSTERIOR A SER EVALUADOS.....37

FIGURA 4. DISTRIBUCIÓN DE PUBLICACIONES ANUALES DE PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LAS ESTUFAS DE INDUCCIÓN.....38

FIGURA 5. MÉTODOS DE VALIDACIÓN PARA LAS PROPUESTAS REALIZADAS DESDE EL ÁMBITO ACADÉMICO Y SUS RESPECTIVOS PROTOTIPOS. .....39

FIGURA 6. ALTERNATIVAS DE SIMULACIÓN SOFTWARE UTILIZADAS PARA PLANIFICAR Y VALIDAR LAS PROPUESTAS. .....40

FIGURA 7. CONTEXTO DE LAS PROPUESTAS REALIZADAS EN EL DOMINIO DE LAS ESTUFAS DE INDUCCIÓN EN DISPOSITIVOS DE COCCIÓN. .....45

FIGURA 8. GRÁFICO DE BURBUJAS QUE RELACIONA LAS TOPOLOGÍAS UTILIZADAS EN LAS ESTUFAS DE INDUCCIÓN EN RELACIÓN CON LA FRECUENCIA DE FUNCIONAMIENTO. .....46

FIGURA 9. FASES DE DISEÑO DEL PROTOTIPO DE ESTUFA DE INDUCCIÓN CON SUMINISTRO ENERGÉTICO DUAL. .....50

FIGURA 10. ESQUEMA DEL CIRCUITO DE LA ETAPA DE REGULACIÓN. ....51

FIGURA 11. FUENTE DE ALIMENTACIÓN CONMUTADA. .....52

FIGURA 12. ESQUEMA GENERAL DE LA TOPOLOGÍA PUENTE COMPLETO EN PARALELO A LA CARGA.....53

FIGURA 13. ONDA DE ACTIVACIÓN EN CADA RAMA DE LOS FETS, INVERSAMENTE CON RESPECTO A LA OTRA. .....53

FIGURA 14. ARDUINO NANO COMO MICROCONTROLADOR DEL SISTEMA... .....54

FIGURA 15. DISEÑO DEL CÓDIGO DE CONTROL PARA EL PROTOTIPO DE ESTUFA DE INDUCCIÓN. .....55

FIGURA 16. ESQUEMA DEL OPTOACOPLADOR 6N137. .....56

FIGURA 17. DRIVER IR2113 EN SUS DOS TIPOS COMERCIALES, DE IZQUIERDA A DERECHA SE TIENE EL TIPO ENCAPSULADO Y EL DE SUPERFICIE. .....57

FIGURA 18. TÍPICA CONEXIÓN DEL CONTROLADOR IR2113. .....57
FIGURA 19. ESQUEMA DEL MOSFET IRFP250N E INFORMACIÓN GENERAL. .....58
FIGURA 20. ESQUEMA BÁSICO DEL CIRCUITO BOOTSTRAP PARA UNA SOLA RAMA DEL FET. .....59
FIGURA 21. ESQUEMA DEL CIRCUITO DE LA ETAPA DE CONTROL. .....63
FIGURA 21.1. CONTINUACIÓN DEL ESQUEMA DEL CIRCUITO DE LA ETAPA DE CONTROL. .....64
FIGURA 22. SEÑALES PWM GENERADAS DESDE EL ARDUINO NANO. .....64
FIGURA 23. SEÑAL OPTOACOPLADA CON EL ANCHO DE PULSO EN SU LÍMITE MÍNIMO. .....65
FIGURA 24. SEÑAL OPTOACOPLADA CON EL ANCHO DE PULSO EN SU LÍMITE MÁXIMO. .....65
FIGURA 25. SEÑAL A TRAVÉS DEL DRIVER CON EL ANCHO DEL PULSO EN SU LÍMITE MÍNIMO, CON TIEMPO MUERTO DE 19 µS APROXIMADAMENTE. .....66
FIGURA 26. SEÑAL A TRAVÉS DEL DRIVER CON EL ANCHO DEL PULSO EN SU LÍMITE MÁXIMO, CON TIEMPO MUERTO DE 4 µS APROXIMADAMENTE. .....66
FIGURA 27. ESQUEMA DEL CIRCUITO DE LA ETAPA DRIVER/MOSFET. ....67
FIGURA 28. ESQUEMA GENERAL DE UN RECTIFICADOR EN PUENTE Y FILTRADO. .....68
FIGURA 29. ONDA IDEAL CON LA ELIMINACIÓN DE RIZADOS PASANDO A SER UNA FUNCIÓN LINEAL EN TÉRMINOS DE CORRIENTE CONTINUA. .....68
FIGURA 30. BOBINA TOROIDAL. .....69
FIGURA 31. EMI FILTRO PURIFICADOR DE RUIDO DE RED PÚBLICA. .....70
FIGURA 32. ESQUEMA DEL CIRCUITO DE POTENCIA Y FILTRADOS. .....70
FIGURA 33. SEÑAL PROVENIENTE DEL TRANSFORMADOR REDUCTOR DE 110 V AC A 46.5 V AC. .....71
FIGURA 34. SEÑAL PROVENIENTE DEL FILTRO EMI. .....71
FIGURA 35. SEÑAL RECTIFICADA A DC Y PRIMER FILTRADO. .....72
FIGURA 36. SEÑAL FINAL PROVENIENTE DEL FILTRO LC. .....72
FIGURA 37. ESQUEMA BÁSICO DEL CIRCUITO TANQUE RESONANTE BASADO EN UN MODELO LC. .....73
FIGURA 38. BOBINA COMERCIAL PLANA Y PROBADOR MULTICOMPONENTES. .....74

FIGURA 39. ESQUEMA DEL CIRCUITO TANQUE CON EL ARREGLO DE LOS CAPACITORES EN PARALELO PROPUESTO PARA EL CIRCUITO TANQUE RESONANTE. .....75

FIGURA 40. CIRCUITO DE LA ETAPA DE REGULACIÓN EN 3D SIN COMPONENTES. .....76

FIGURA 41. CIRCUITO DE LA ETAPA DE REGULACIÓN CON ALGUNOS COMPONENTES. .....76

FIGURA 42. ESQUEMA PARA IMPRESIÓN DEL CIRCUITO DE LA ETAPA DE REGULACIÓN. .....77

FIGURA 43. IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO DE REGULACIÓN. .....77

FIGURA 44. CIRCUITO DE LA ETAPA DE CONTROL EN 3D SIN COMPONENTES. .....78

FIGURA 45. CIRCUITO DE LA ETAPA DE CONTROL EN 3D CON ALGUNOS COMPONENTES. .....78

FIGURA 46. ESQUEMA PARA IMPRESIÓN DEL CIRCUITO DE LA ETAPA DE CONTROL. .....78

FIGURA 47. IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL. .....79

FIGURA 48. IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO LA ETAPA DE DRIVER/MOSFET SIN COMPONENTES. .....79

FIGURA 49. IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO LA ETAPA DE DRIVER/MOSFET CON COMPONENTES.....79

FIGURA 50. ESQUEMA PARA IMPRESIÓN DEL CIRCUITO DE LA ETAPA DE DRIVER/MOSFET. .....80

FIGURA 51. IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO DE LA ETAPA DE DRIVER/MOSFET. .....80

FIGURA 52. CIRCUITO DE LA ETAPA POTENCIA Y FILTRADOS EN 3D SIN COMPONENTES. .....81

FIGURA 53. CIRCUITO DE LA ETAPA POTENCIA Y FILTRADOS EN 3D CON COMPONENTES. .....81

FIGURA 54. IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO DE LA ETAPA DE POTENCIA Y FILTRADOS. .....82

FIGURA 55. ENSAMBLAJE 3D DEL CHASIS DEL PROTOTIPO DE ESTUFA DE INDUCCIÓN.....82

FIGURA 56. PIEZAS EN PREPARACIÓN PARA SER CORTADAS. .....83

FIGURA 57. IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PROTOTIPO. ....83

FIGURA 58. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO FINAL.....84

FIGURA 59. COLLAGE DE FOTOS DEL PROTOTIPO DE ESTUFA DE INDUCCIÓN CON DOBLE SUMINISTRO ENERGÉTICO, EN LABORATORIO…85

FIGURA 60. FUENTE PARA PRUEBAS DEL SUMINISTRO DC A 12 V DC, 24 V DC Y 32 V DC. .....88

FIGURA 61. SISTEMA PARA PRUEBAS DEL SUMINISTRO AC A 46.5 V AC EN SU INTERIOR EL TRANSFORMADOR REDUCTOR. .....88

FIGURA 62. CÁMARA TERMOGRÁFICA DE BOLSILLO FLUKE PTI120.....89

FIGURA 63. PIRÓMETRO Y/O CONTROLADOR DE TEMPERATURA. .....89

FIGURA 64. MULTÍMETRO. .....90

FIGURA 65. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CONEXIÓN DE EQUIPOS PARA DETECTAR EL CONSUMO DE AMPERAJE DEL SISTEMA, ASÍ COMO PARA ENTENDER LA CONEXIÓN DE UNA FUENTE AC O DE LA DE DC. .....90

FIGURA 66. MUESTRA DE ALGUNAS CAPTURAS TOMADAS CON LA CÁMARA FLUKE DE LAS TRES PIEZAS A 12 V DC, 24 V DC Y 32 V DC. .....92

FIGURA 67. MUESTRA DE ALGUNAS CAPTURAS TOMADAS CON LA CÁMARA FLUKE DE LAS TRES PIEZAS A 46.5 V AC. .....94

FIGURA 68. RECONOCIMIENTOS Y PARTICIPACIÓN EN EVENTOS. .....96

## LISTA DE TABLAS

**Pág.**

TABLA 1. PLANTEAMIENTO DE PREGUNTAS DEL ÁREA INVESTIGACIÓN. ... .....32
TABLA 2. CADENA DE BÚSQUEDA .....34
TABLA 3. CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN. .....35
TABLA 4. CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN. .....52
TABLA 5. CARACTERÍSTICAS DEL DRIVER IR2113.....57
TABLA 6. DATOS EXTRAÍDOS DE LOS COMPONENTES. .....60
TABLA 7. DATOS COMPLEMENTARIOS.....61
TABLA 8. DATOS EXTRAÍDOS DE LA BOBINA PLANA.....74
TABLA 9. ELEMENTOS UTILIZADOS PARA LAS PRUEBAS DE CONCEPTO DE CALOR POR INDUCCIÓN.....86
TABLA 10. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA PRIMERA PIEZA (ZINC), UTILIZANDO LA ALIMENTACIÓN DC. .....91
TABLA 11. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA SEGUNDA PIEZA (ACERO INOXIDABLE), UTILIZANDO LA ALIMENTACIÓN DC.....91
TABLA 12. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA TERCERA PIEZA (PEROL-OLLA ESPECIAL), UTILIZANDO LA ALIMENTACIÓN DC. .....92
TABLA 13. RESULTADOS OBTENIDOS PARA CADA MATERIAL UTILIZAN LA ALIMENTACIÓN AC. .....93
TABLA 14. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DIFERENCIADORAS ENTRE LOS PROTOTIPOS. .....95

## RESUMEN

En este trabajo se desarrolla un prototipo de estufa de inducción con doble fuente de alimentación, la cual puede operar ya sea con corriente alterna o corriente directa de manera controlada, está investigación es dirigida a hogares ubicados en zonas rurales, para ofrecer una alternativa más saludable, económica y eficiente energéticamente para la cocción de alimentos. Actualmente, en estas zonas existen diversos problemas generados por el uso de estufas convencionales, lo cual afecta la salud, el medio ambiente, y la economía, además, no todas las personas cuentan con los recursos suficientes para adquirir en este caso cilindros de gas propano que es una de las fuentes más utilizadas en estas zonas para la preparación de alimentos. Esta investigación surge de estas necesidades, por lo que se propone seguir algunas directrices de la metodología de Mario Bunge para la elaboración del documento y algunos alineamientos de la metodología de diseño mecatrónico para la construcción y elaboración del sistema.

Para la validación se realiza a escala de laboratorio, utilizando una fuente de corriente directa para ver que esta entrada de energía funcione correctamente, en el caso de la entrada de corriente alterna se utiliza un transformador reductor, pasando la tensión de la red de 110 V AC a 46.5 V AC, asegurando así que el sistema propuesto esté optimizado para funcionar de manera independiente con cualquiera de estos dos tipos de energía que se desee utilizar. Asimismo, se utilizan tres materiales correspondientes a un disco de zinc, un disco de acero inoxidable y una olla especial, los cuales son sometidos durante 5 minutos, para analizar las temperaturas alcanzadas por las piezas y el consumo generado por el sistema aplicando diferentes voltajes. En este sentido, se logran resultados favorables en este caso hablando particularmente del voltaje más alto el cual es de 46.5 V AC que al ser rectificado toma un valor de 65.76 V DC aproximadamente, donde la temperatura de los materiales se alcanzan valores entre 76 °C y 125 °C en general, estas varían de acuerdo a la pieza que se utilice, sin embargo, la temperatura aumenta rápidamente, por el contrario, al aplicar un voltaje bajo, los materiales se demoran en calentarse o en algunos casos llegan a un punto y luego aumenta muy lentamente.

En este proyecto, lograron resultados favorables donde se puede utilizar cualquiera de las dos alimentaciones, además, este proyecto puede ser un aporte innovador y eficiente, que podría hacer frente a las limitaciones de las estufas tradicionales sentando las bases para la comunidad de investigación en esta área.



**Palabras claves:** Cocción por inducción, Calentamiento por inducción electromagnética, Aparatos de cocción de alimentos, suministros energético dual, Mapeo sistemático de literatura.

## ABSTRACT

This work develops a prototype of an induction stove with a dual power supply, which can operate either with alternating current or direct current in a controlled manner, this research is aimed at homes located in rural areas, to offer a healthier, more economical, and energy-efficient alternative for cooking food. Currently, in these areas there are several problems generated by the use of conventional stoves, which affects health, the environment, and the economy. In addition, not all people have sufficient resources to acquire in this case propane gas cylinders which is one of the most used sources in these areas for food preparation. This research arises from these needs, so it is proposed to follow some guidelines of Mario Bunge's methodology for the elaboration of the document and some alignments of the mechatronic design methodology for the construction and elaboration of the system.

For the validation it is performed at a laboratory scale, using a direct current source to see that this energy input works correctly, in the case of the alternating current input a step-down transformer is used, passing the mains voltage from 110 V AC to 46.5 V AC, thus ensuring that the proposed system is optimized to operate independently with any of these two types of energy that is desired to use. Likewise, three materials corresponding to a zinc disk, a stainless-steel disk, and a special pot are used, which are subjected for 5 minutes, to analyze the temperatures reached by the pieces and the consumption generated by the system applying different voltages. In this sense, favorable results are achieved in this case speaking particularly of the highest voltage which is 46.5 V AC that when rectified takes a value of 65.76 V DC approximately, where the temperature of the materials reaches values between 76 °C and 125 °C in general, these vary according to the piece that is used, however, the temperature increases rapidly, on the contrary, when applying a low voltage, the materials are delayed in heating or some cases reach a point and then increases very slowly.

In this project, they achieved favorable results where either of the two feeds can be used, in addition, this project can be considered an innovative and efficient breakthrough, which could address the limitations of traditional stoves laying the groundwork for the research community in this area.



Keywords: Induction cooking, Electromagnetic induction heating, Food cooking appliances, Dual energy supplies, Systematic literature mapping.

# 1 CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

## 1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El ser humano no sólo busca satisfacer su necesidad de alimentos, sino también hacerlos más atractivos a la vista, al olfato y al gusto [1]. Con la irrupción del fuego, los hábitos alimenticios de la población cambiaron, permitiéndoles aprovechar mejor los nutrientes y pasar de comer productos crudos e insípidos a consumir alimentos cocidos [2]. Esto permitió mejorar el sabor, las necesidades energéticas y la dieta diaria; además, se lograron alimentos mejor preparados, menos duros y libres de elementos nocivos (Escherichia Coli, Campylobacter, Salmonella, Shigella, entre otros) para la salud humana [3].

En la actualidad, el proceso de cocción de los alimentos es una actividad muy frecuente para las personas, tanto a escala doméstica como social. Es por ello que se utilizan múltiples opciones de dispositivos que ayudan a realizar esta actividad, entre los principales se encuentran las cocinas eléctricas, de biomasa, de leña, de propano, de metano, de hidrógeno verde, de hidrógeno azul, de alcohol, de petróleo, de parafina, de inducción, entre otros. Esto ha hecho que estos equipos sean esenciales para la sociedad actual y juegan un papel importante en la disminución de enfermedades que aquejan al ser humano [4].

En el territorio colombiano, los dispositivos más utilizados para cocinar son los que funcionan con leña, energía eléctrica, o con gases como el propano y el metano [5]. Los tipos de cocinas que se emplean en Colombia están asociados a la zona donde se utilizan. Específicamente, en las zonas rurales, la mayor parte de la población utiliza estufas de leña o carbón, debido al bajo valor económico requerido y al tipo de energía utilizada para su funcionamiento.

La energía eléctrica ha jugado un papel muy importante en el diario vivir de las personas, ya sea para conectar electrodomésticos como la nevera, la lavadora, el microondas entre otros, sin embargo, existe una limitación en la cobertura de la red energética en Colombia, principalmente en las zonas rurales o Zonas No Interconectadas (ZNI), debido al difícil acceso y a las largas distancias, que son imprescindibles para el transporte e instalación de torres de transmisión eléctrica y cableado, por lo que se ha recurrido a diferentes fuentes para solucionar esta necesidad como implementación de generadores diésel-eléctricos y fuentes no convencionales. Actualmente, en el Cauca, se estima que el 13,18% de los sectores sufren de necesidades energéticas [6].

En el Cauca, se considera que su mayor población está localizada en el sector rural; según cifras del DANE, la población ubicada en esta zona representa el 62,72% [7]. Las estufas presentes en este territorio son las de leña y las de carbón que producen

gran cantidad de humo, que si bien es cierto se logra la cocción de alimentos, pero a largo plazo es perjudicial para la salud humana, causando problemas pulmonares [8]. Por otro lado, las cocinas eléctricas tradicionales son utilizadas en algunos hogares; sin embargo, el alto consumo de energía incrementa el costo de vida de la población rural, los dispositivos de gas también están presentes en esta población, pero el costo de adquisición del gas propano tiene sus desventajas en la economía de los hogares rurales del Cauca [9].

Actualmente, las energías renovables han tomado gran relevancia en nuestro entorno, ya que es bien sabido que los recursos no renovables son limitados, donde la explotación de estos han causado contaminación y escasez de recursos, esta razón lleva a explorar y aprovechar las energías limpias, entre estas se encuentran la energía solar, la eólica, la hidráulica y otras [10]. Estas son alternativas eficientes tanto para la economía como para el medio ambiente.

Por esta razón, es pertinente experimentar con nuevas e innovadoras estufas, aplicando el principio de calentamiento por inducción electromagnética, con suministró energético dual, ya sea que funcione con corriente alterna (AC) [11], y que en caso de no contar esta, entonces que el prototipo pueda ser operada con corriente continua (DC) [12], el beneficio para la población rural del departamento del Cauca será, por un lado, reducir los problemas causados por el uso de la leña y el carbón; además, la salud en disminución en los costos de vida de los territorios rurales.

A partir de los problemas de salud generados por la cocción incorrecta de los alimentos, la falta de combustibles limpios para cocinar y el suministro eficiente energético en el contexto del Cauca, este proyecto de grado propone la siguiente pregunta de investigación: **¿Cómo contribuir en la reducción del consumo de energía convencional del proceso de cocción de alimentos en un contexto rural?**

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

Esta investigación se centrará en el diseño de un prototipo de estufa de inducción eficiente con una doble alimentación energética, el cual pueda funcionar con corriente alterna o con corriente continua, que podría transformarse en una alternativa viable para un proceso tan importante para la sociedad como es la cocción de alimentos, aportando directamente a la economía de los usuarios y al medio ambiente. Es importante indicar que el proceso de preparación de víveres es una actividad vital para el ser humano, en la que las fuentes de combustión juegan un rol fundamental, ya que permiten la eliminación de las bacterias que se encuentran en los comestibles crudos, ya sean carnes o verduras. Por esta razón, el control del tiempo y la temperatura interna de los alimentos consumidos es de vital importancia. Por lo general, la temperatura interna adecuada para este proceso debe ser superior a los 62.2 °C (145 °F), dependiendo del tipo de comida [13].

Al presente, los medios utilizados para la cocción de alimentos en las zonas rurales del Cauca son sumamente básicos; se trata de estufas tradicionales y/o convencionales que utilizan leña y carbón como fuente de combustión. Sin embargo, las estufas tradicionales han venido generando problemas de salud debido a que el humo producido por la quema de estos elementos es perjudicial para las personas, ya que al ser inhalado genera enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (EPOC) como enfisema o bronquitis crónica, además de aumentar la probabilidad de padecer neumonía e incluso cáncer de pulmón, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) está en el ranking de los diez riesgos más letales para la salud [14]. Por otro lado, existen cocinas eléctricas que utilizan una resistencia para calentar las ollas y sartenes, entre otros. Sin embargo, este tipo de dispositivos son ineficientes, debido a su alto consumo de energía es alto, siendo desfavorable para la economía de la población que vive en estos sectores, por lo que es necesario encontrar alternativas para solucionar esta necesidad.

En la actualidad existen soluciones específicas aplicadas para resolver esta necesidad, generalmente se comercializan estufas que utilizan el gas propano como fuente de combustión, sin embargo, el alto incremento que ha tenido el Gas Licuado de Petróleo (GLP) en los últimos años, dificulta a la comunidad la adquisición de este suministro energético, se registra un alza del 32% durante el año 2020 y a principios del 2021 se observa un incremento adicional del 44%, por lo que es sumamente complicado para las personas de escasos recursos adquirir este servicio. Hay que recordar que el precio de este producto se rige por dos factores externos como son el índice internacional de propano y butano de Mont Belvieu y la tasa de cambio, por lo tanto, son valores sumamente fluctuantes. Además, es necesario ser consecuente con el hecho de que el gas propano es una fuente de energía no renovable, este elemento se obtiene del petróleo y del gas natural, por lo que el país depende de las reservas de este suministro [15]. Por lo tanto, es necesario utilizar fuentes limpias e ilimitadas para la cocción de alimentos que sean amigables con el medio ambiente y la sociedad.

El prototipo propuesto para las zonas rurales del Cauca es una alternativa para aumentar la sostenibilidad de la población en la preparación de alimentos. Se espera que sea un dispositivo seguro y asequible al público, que se constituya en una propuesta diferente para los dispositivos de leña y carbón utilizados hoy en día, de esta manera, poder contribuir a una disminución considerable de las enfermedades pulmonares causadas por el humo de este combustible [14]. Además, se espera una disminución significativa en los costos del consumo de electricidad para aquellas residencias rurales donde se utilizan estufas eléctricas normales [16].

En esta línea, a nivel social brindará un aporte a la población ubicada en zonas rurales y zonas no interconectadas, siendo beneficioso para la salud humana y el medio ambiente, impulsando a llevar a cabo diferentes proyectos de sustitución progresiva, donde se incentive a las personas a sustituir las cocinas convencionales que utilizan leña y carbón como combustión en la preparación de sus alimentos.

Empresarialmente pueden surgir varios negocios a partir de esta investigación, emprendimientos en los que se ofrezca un servicio a nivel nacional e internacional, para la implementación de estas innovadoras y eficientes estufas, ya sea en zonas rurales o urbanas, convirtiéndose en una importante alternativa a los dispositivos convencionales, incluso con mejoras posteriores se podría pensar en no utilizar la red de gas natural domiciliaria.

De esta manera, es importante explorar alternativas de combustión y energía para la preparación de alimentos, para reducir los problemas de salud generados por la quema de estas fuentes de combustión (leña y carbón), y que la economía no se vea afectada por el consumo de electricidad, por lo que se propone el uso del calentamiento por inducción electromagnética, que es un proceso utilizado para aumentar significativamente las temperaturas de un material. Este principio consiste en transferir el calor a un material comúnmente ferromagnético, que al entrar en contacto con las líneas del campo magnético provocará que el recipiente se caliente de manera rápida y uniforme, evitando pérdidas de energía térmica, en comparación con las estufas antes mencionadas que sólo aplican calor en una sola zona generando más tiempo en la cocción de los víveres aumentando el consumo de fuentes energéticas [17].

Por último, la estufa de inducción se construirá con materiales resistentes al calor y para la estructura, una alternativa podrían ser polímeros o elementos que no alteren el campo electromagnético. Por otro lado, la estufa dispondrá de un doble suministro de alimentación, que funcionará con tensión de corriente alterna o de corriente continua. En el caso de la tensión alterna, ésta se controlará a través de un transformador reductor que convierte los 110 V AC de la red a 46.5 V AC. En el caso de la corriente continua lo ideal sería a través de un sistema fotovoltaico, estos constan de paneles solares, banco de baterías, inversor de corriente, controlador

de carga y cableado del circuito derivado, pero debido a los altos costos que estos sistemas pueden representar se toma la alternativa de validar este suministro de energía, a través de fuente de voltaje que suministra corriente continua, también de manera controlada estás a 12 V DC, 24 V DC y 32 V DC.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo de estufa de inducción con un sistema de energía dual para la cocción de alimentos que permita establecerse como una alternativa viable para su utilización en un contexto rural.

### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las diferentes propuestas de dispositivos que apoyen el proceso de cocción de alimentos a través de una revisión de la literatura.

- Implementar un prototipo de estufa para la cocción de alimentos utilizando como principio el calentamiento por inducción y para su alimentación un sistema energético dual.

- Validar el prototipo de estufa de inducción para la cocción de alimentos mediante una prueba de concepto en un ambiente controlado de laboratorio.

## 1.4 MARCO TEÓRICO

### 1.4.1 Estufa

Una estufa es un artefacto que se utiliza para producir calor, por lo general tienen una estructura cerrada, siendo construidas con materiales metálicos o cerámicos, para soportar el calor, ya que en ocasiones son muy elevados, estos dispositivos pueden funcionar a partir de diferentes tipos de combustión como la leña, el carbón, el queroseno, el gas propano, el gas natural, la electricidad, entre otros. Estos aparatos son comúnmente utilizados para la cocción de alimentos ya sea a escala doméstica o social [18].

### 1.4.2 Estufa eléctrica

Las estufas eléctricas son aparatos de calefacción que utilizan la electricidad como fuente de energía para generar calor, donde la resistencia eléctrica calienta. Este tipo de estufas suelen ser baratas y fáciles de construir, sin embargo, no son muy eficientes porque consumen mucha energía, además de ser inseguras porque el calentador suele alcanzar temperaturas muy altas de forma excesiva, lo que puede suponer un riesgo, ya que puede provocar quemaduras o incendios debido a una mala manipulación [19].

### 1.4.3 Cocina a gas

Las estufas de gas son aquellas que utilizan GLP (Gas Licuado de Petróleo) como combustible, donde una chispa enciende el quemador liberando una llama abierta que calienta directamente el recipiente. Este tipo de estufas son muy utilizadas porque son fáciles de manejar pero suelen tener algunos inconvenientes como la disipación de energía al calentarse, similar a la eléctrica, hay que tener en cuenta que este tipo de aparatos pueden provocar accidentes ya que el gas que utilizan es muy inflamable y perjudicial para el medio ambiente [20].

### 1.4.4 Estufa de inducción

Las estufas de inducción son una nueva tendencia tecnológica, que utiliza el campo magnético para inducir un material ferromagnético, generando calor en este elemento de manera rápida y uniforme, este tipo de estufas ha representado una reducción de costos en comparación con el uso de GLP y un menor consumo de energía, además de ser un electrodoméstico que evita accidentes y quemaduras [20].

### 1.4.5 Cocina tradicional

Las cocinas tradicionales son aquellas que son fabricadas por las propias personas, donde generalmente utilizan leña o carbón vegetal como combustible para generar

calor. Este tipo de cocción es muy utilizado por diferentes comunidades para preparar los alimentos, sin embargo, es un método perjudicial tanto para las personas, ya que existe una constante exposición al monóxido de carbono emitido por la combustión de dicha biomasa sólida, además de ser dañino para el medio ambiente [21].

### 1.4.6 Inducción electromagnética

La inducción electromagnética es un fenómeno en el que existe un medio o cuerpo expuesto a un campo magnético variable, ya sea en posición estática o en movimiento, esto se debe a la producción de fuerza electromotriz o tensión. Este descubrimiento se le atribuye a grandes personajes, entre los principales pioneros se encuentran: Michael Faraday, Léon Foucault, Heinrich Lenz, J.P. Joule, entre otros [22].

### 1.4.7 Calentamiento por inducción electromagnética

El calentamiento por inducción es un principio que se compone de tres factores importantes: la inducción electromagnética, el efecto piel o kelvin y la transferencia de calor. Se puede explicar su funcionamiento por medio de una corriente que fluye por unas bobinas, generando un campo electromagnético, el cual al someter una pieza de material ferromagnética en el interior de este, se verá inducido por corrientes parásitas, de esta forma, se genera el calor obteniendo menos pérdidas de energía, ya que solamente se centra de manera uniforme en el recipiente [23].

### 1.4.8 Efecto piel

Se conoce como “efecto piel” o “efecto kelvin” a la tendencia de la corriente alterna que viaja y se concentra en el borde exterior de un conductor o piel, ya que en el interior del conductor se genera un campo magnético variable, generando corrientes inducidas o de Foucault en la misma dirección teniendo como referencia la parte externa y opuesta en la parte interna. De esta manera la corriente en el centro del conductor se anula y se refuerza en los bordes, el flujo real se produce sólo en la superficie del conductor [24].

### 1.4.9 Energía solar

La energía solar es conocida como una fuente renovable limpia e ilimitada, la cual es aprovechada para diferentes fines ya sean de tipo térmicos o fotovoltaicos. Es obtenida a partir del sol, la cual es una estrella esencial para el planeta tierra, que se encarga de mantener con vida todo el globo terráqueo, se conoce que esta estrella emite una potencia de 62 mil 600 Kilowatts por cada metro cuadrado de su superficie, demostrando la gran importancia que tiene esta para los seres humanos, además se estima que en dos días nuestra planta recibe una cantidad de energía equivalente a las reservas existentes de petróleo, gas y carbón [25].

### 1.4.10 Paneles solares

Los paneles solares son una tecnología limpia, respetuosa con el medio ambiente y con el ser humano, cuya funcionalidad es la de aprovechar la radiación solar a través de sus celdas fotovoltaicas, que están fabricadas con materiales metálicos como el silicio, el grafeno, etc. Los cuales son susceptibles a la luz solar, por lo que al entrar que al entrar en contacto con esta luminosidad genera un desprendimiento de electrones para posteriormente transformarla en energía eléctrica en forma de corriente continua, se encuentran tres tipos de placas las cuales su composición y eficiencias varían, las de tipo monocristalino que tiene una eficiencia entre el 14% y el 16% las cuales son costosas, ya que contienen alrededor de 36 celdas o más, las policristalinas con una operatividad de funcionamiento del 10% y 15% siendo las más utilizadas y económicas, por último las amorfas con una eficacia inferior al 10%, estos sistemas suelen aplicarse en empresas o residencias que buscan promover el uso alternativo de energías renovables o que buscan disminuir los costos energéticos generados por el consumo de la iluminación o equipos electrónicos, suelen encontrarse en las azoteas o áreas abiertas para aprovechar al máximo el sol [26].

### 1.4.11 Inversor

En el contexto de los sistemas fotovoltaicos el inversor es un dispositivo de acondicionamiento de potencia, que convierte la Corriente Directa(DC) producida por los paneles solares y almacenadas en las baterías, en Corriente Alterna (AC), siendo utilizada por diferentes componentes o equipos eléctricos, dependiendo de la función de la onda de la señal de salida estos se pueden clasificar en tres tipos: inversor de onda cuadrada, inversor de onda senoidal modificada y finalmente el inversor de onda senoidal, esto va de acuerdo a las necesidades o aplicaciones que se tenga en las diferentes instalaciones ya sea para la iluminación, televisión o demás electrodomésticos [27]. De esta manera su principio de funcionamiento se basa en tres factores que son: el oscilador; encargado de generar la frecuencia de salida, un convertidor; recibe la corriente continua para posteriormente convertirla en alterna con respecto a la salida y finalmente la protección; el cual bloquea al sistema en caso de detectar un fallo o exceso.

### 1.4.12 Regulador de carga

Los controladores son equipos electrónicos utilizados para mantener un carga óptima en las baterías, evitando así la sobrecarga y la descarga, de tal manera que estas puedan solventar la necesidad del consumo cuidando así mismo la vida útil de estos acumuladores de energía, algunos de estos aparatos contienen funciones adicionales como alarmas, monitoreo, visualizadores, entre otros, varía de acuerdo a la necesidad o economía para la adquisición de este dispositivo, comúnmente encontramos dos tipos de reguladores: el tipo serie y el tipo paralelo [28].

### 1.4.13 Batería o acumulador

Las baterías, conocidas como acumuladores, son dispositivos electroquímicos, que tienen la función de almacenar energía química, para posteriormente transformarla y liberarla en energía eléctrica. Este artefacto consta de las siguientes partes: celdas, trampa de sedimentación, placa positiva, placa negativa y nivel de electrolito, los cuales son esenciales para su correcto funcionamiento. Además, existen algunos parámetros los cuales determinan el comportamiento de estos componentes, como lo son la capacidad de descarga, la profundidad de descarga y la vida útil o ciclos de vida, por lo cual es necesario realizar un dimensionamiento de estas de manera cuidadosa, un solo error puede reducir la duración del acumulador drásticamente [29].

## 1.5 ESTADO DEL ARTE

En el ejercicio de la investigación literaria con relación a las estufas de inducción con suministros energéticos duales cabe mencionar algunos trabajos.

En un enfoque general, se han realizado algunas investigaciones para apoyar la salud, el medio ambiente y la economía de las personas a través de las estufas de inducción, como en el artículo “Diseño e implementación de un prototipo de cocina de inducción electromagnética basado en un inversor monofásico de alta frecuencia”, este proyecto surge del mal uso de fuentes no renovables y de las estufas eléctricas en la preparación de alimentos, por lo que parte de la necesidad de desarrollar y mejorar las estufas de inducción, cuya metodología consiste en el diseño de productos innovadores, que se divide en tres fases: investigación preliminar, desarrollo del producto, e implementación. Este proyecto se caracteriza principalmente por su inversor monofásico de puente completo, un PIC18F4550, un atmega 328P-PU, un driver IGBT, un inversor Schmitt-Trigger, y otros componentes electrónicos del sistema como rectificadores, fuente de alimentación, bobinas, recipiente ferromagnético entre otros. De esta manera, se obtienen resultados de un prototipo que tiene un modelo del 86,72%, demostrando que al hervir 1 litro de agua se produce una reducción del coste energético del 50%, en comparación con las estufas de resistencia, que gastan el doble, sin embargo, se han encontrado picos de radiación considerables que aumentan hasta 10 veces los valores mínimos recomendados por la norma NTP 698, por otro lado, tiene una frecuencia de resonancia ($f_s$) entre 20 kHz y 24 kHz, con una potencia máxima de 1451,8 W y un rendimiento del 80,1%. En conclusión, se observó una caída de corriente de 3 amperios, variaciones de frecuencia y cambios de tensión, por lo que se recomienda implementar un control de refrigeración del sistema dinámico [30].

La investigación denominada “diseño y construcción de una cocina de inducción electromagnética de una zona de calentamiento basado en un inversor monofásico de alta frecuencia y un microcontrolador” de los autores Francisco Aguirre y Herman Alarcón, se enfocan en desarrollar una estufa de inducción, la cual sea una

alternativa energética que pueda brindar mayor seguridad a la población y que pueda lograr una disminución del GLP de uso doméstico. La metodología de este dispositivo se divide en tres factores que son: experimental, analítico e inductivo, se puede observar que a los 25 segundos el agua comienza a calentarse a una potencia de 9, cabe destacar que en este trabajo se utilizó una extensión de 220V a 60Hz, logrando una eficiencia del 90%, con una potencia máxima de salida de 1800W a 220V y una frecuencia de resonancia ($f_s$) entre 20 KHz a 30 KHz, concluyendo que estos sistemas son eficientes, aunque la inversión es alta debido a que los componentes son caros [31].

Otro caso similar, elaborado por Elías Cushicóndor y Diego Tito, en su investigación "diseño y construcción de un prototipo de una cocina de inducción electromagnética", se centran en la fabricación de una estufa de bajo costo y de alto rendimiento, para demostrar su eficiencia, aplicando así el principio de calentamiento por inducción. Además, de implementar un circuito de potencia, una fuente de alimentación, un circuito de disparo, un circuito de control, y un circuito de realimentación y acondicionamiento, los resultados de esta investigación se basaron en hervir 3 litros de agua, a una temperatura inicial de 85 °C, por lo tanto se obtuvo que el prototipo tuvo una eficiencia de 75,6%, consumiendo 0,323 kWh en 21 minutos, 5 segundos, concluyendo que este sistema es más rentable en cuanto al GLP y la resistencia eléctrica, en este caso, el proceso fue facilitado gracias al inversor cuasi resonante a una frecuencia entre 24 KHz [32].

Por otro lado, se encuentra el artículo denominado "Solar based Induction Heating system", elaborado por Hanriprasad Dande y S. D. Markande, quienes proponen un sistema de calefacción por inducción, utilizando la energía solar como fuente principal, dejando la opción de la carga eléctrica de las baterías para los días de lluvia, evitando el uso de la electricidad y el gas, pudiendo así apoyar en la reducción de costos y la escasez de suministros de GLP doméstico. La metodología se basa en el diagrama de bloques y algoritmos para el control, obteniendo que este dispositivo calienta 200 ml de agua en un tiempo de 5-6 minutos, utilizando una señal PWM de 25 kHz para la generación de calor, cabe destacar que en este proyecto se implementa una topología resonante de medio puente en serie que es una técnica para controlar la temperatura, concluyendo que este prototipo tiene una eficiencia del 80%, el cual puede ser utilizado ya sea de día o de noche, lo cual se puede extender a diferentes áreas como para la cocción de alimentos o calefacción comercial [33].

En un enfoque específico, se relacionan diferentes investigaciones que contribuyen directamente al proyecto entre ellas se encuentra el documento denominado "Smart induction cooking system using solar energy", elaborada por Bandile Innocent Sibiya, ve la necesidad de implementar nuevas tecnologías en el área de la cocción de alimentos, con el fin de reducir la contaminación y aumentar la sostenibilidad, de tal manera que no afecte la salud y la economía de la población, en comparación con las estufas convencionales que generan emisiones de CO2, además de ser

inseguras e ineficientes, construyendo así un sistema de cocción de inducción que puede funcionar con energía solar o con la red eléctrica, gracias al método de selección automática, cabe destacar que en este caso se implementa un inversor de medio puente y de 8 niveles de potencia, obteniendo como resultados que la eficiencia aumenta de acuerdo al incremento de la frecuencia de conmutación ($f_c$), sin embargo, entre las 3 primeras etapas de potencia existe una gran pérdida en el IGBT, la frecuencia osciló entre 62,5 y 10KHz, teniendo una eficiencia del 67% al 91%, concluyendo que la instalación del producto puede ser costosa, pero puede ser recuperada en el futuro, dejando como recomendaciones recortar los picos de tensión de PWM y utilizar un mejor controlador entre otros [34].

En este mismo contexto, Juan Pablo Ochoa y Fernando Lessa en su artículo "Household induction cooking system based on a grid-connected photovoltaic system", diseñan un sistema de cocina de inducción con el fin de dar un apoyo al futuro sostenible, libre del uso de combustibles sólidos y energías no renovables, implementando así una metodología de alimentación dual o híbrida, por la cual este dispositivo puede funcionar conectándolo a la red eléctrica o a través del módulo fotovoltaico utilizando un enlace de corriente continua, por otro lado, se utiliza un inversor resonante de clase DE de medio puente para suministrar energía a la estufa y para el sistema de control se maneja una topología de puente completo para regular y permitir la transferencia de energía de diferentes fuentes de alimentación, obteniendo así un sistema que proporciona 3 KW, un calentador de inducción que consume 1,5 KW y el conjunto fotovoltaico genera 1,5 KW, finalmente se puede considerar que este proyecto es una integración de soluciones que contribuye a las necesidades de las personas y a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero [35].

Gracias a la búsqueda previa de literatura se concluye que, aunque existen trabajos relacionados a las estufas de inducción la aplicación directa con el suministro energético dual (AC o DC) en el área de las viviendas para la cocción de los alimentos en un contexto rural apenas se encuentra en auge, los antecedentes y trabajos adelantados en esta área son muy escasos, por tal motivo la presente investigación podrá contribuir a futuras investigaciones aportando los conocimientos adquiridos y evidencia empírica al desarrollo del estado del arte del área.

## 1.6 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos en el proyecto denominado “desarrollo de un prototipo de estufa de inducción con doble alimentación energética destinado a viviendas rurales” se utiliza una adecuación del método científico propuesto por Mario Bunge [36]. Para la construcción del prototipo se siguen algunas de las actividades de la metodología de diseño mecatrónico [37].

### 1.6.1 Fase 1: Planteamiento del problema

Para esta fase se utiliza la propuesta realizada por “Smart induction cooking system using solar energy" [34], que propone un dispositivo para la preparación de alimentos que permite abordar la problemática a tratar en el dominio de las energías renovables y los dispositivos con alimentación dual que apoyan el proceso de cocción. A continuación, se listan las principales actividades de esta fase.

- Reconocimiento de los hechos: Clasificación y selección de los hechos.
- Descubrimiento del problema: Hallazgo de un vacío o faltante. Estudio de los referentes teóricos del proyecto sobre las estufas que apoyan la cocción de alimento en un contexto rural.
- Formulación del problema: Planteamiento de una pregunta, reducción del problema a su núcleo significativo.

**Producto**: Planteamiento del problema, pregunta problema y revisión de la literatura.

### 1.6.2 Fase 2: Construcción del modelo teórico

En esta fase se emplea la metodología de diseño mecatrónico [37], donde se expresan las directrices principales para desarrollar un producto con mejor sinergia en cualquier dominio de aplicación. Las actividades de esta fase se enumeran a continuación.

- Selección de los factores pertinentes: Estudio de los diferentes dispositivos que apoyan la cocción de alimentos.
- Identificación de estrategias: Seleccionar e identificar las diferentes tecnologías que pueden ser aplicados en el dominio del problema.
- Desarrollo del prototipo propuesto.

**Producto**: Reporte con la caracterización de los diferentes dispositivos que apoyan el proceso de cocción y desarrollo del prototipo propuesto.

### 1.6.3 Fase 3: Validación del dispositivo propuesto

En esta fase se implementan algunas directrices reportadas en la metodología general de validación [38], que guían el desarrollo de la prueba de concepto.

- Búsqueda de soportes: Deducción de consecuencias particulares que pueden haber sido verificadas en proyectos similares.
- Planteamiento de predicciones o resultados esperados al realizar el dispositivo propuesto.
- Diseño y planeación de la prueba de concepto: planteamiento de los objetivos, hipótesis y fuentes y medios para realizar el estudio de caso.
- Ejecución de la prueba de concepto: Validar el prototipo propuesto.

**Producto**: Reporte técnico con las consecuencias verificables, además, de las predicciones de resultados y reporte técnico de la prueba de concepto ejecutada.

### 1.6.4 Fase 4: Introducción a las conclusiones en la teoría

- Confrontación de los resultados obtenidos con las predicciones.
- Reajustes al prototipo propuesto: Análisis de resultados y ajustes necesarios.

### 1.6.5 Fase 5: Documentación

- Escritura de artículo.
- Redacción del documento final de la tesis.

**Producto**: Documento final de trabajo de fin de grado y artículo científico.

# 2 CAPÍTULO 2 - REVISIÓN DE LITERATURA: MAPEO SISTEMÁTICO DE LITERATURA

## 2.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo se enfoca en la revisión de literatura a través de un mapeo sistemático de literatura, el cual es una técnica muy utilizada en el campo de la investigación para identificar, evaluar y resumir la literatura existente sobre algún tema en específico, además de generar una serie preguntas las cuales se deben responder acorde a la información extraída, presentándose en un formato fácil de leer y entender como tablas o diagramas [39]. Considerando lo anterior, la siguiente investigación tiene como objetivo recopilar, extraer y sintetizar la evidencia empírica en el dominio de los dispositivos de cocción de alimentos que utilizan tecnologías de inducción como método de calentamiento primario, mediante un Mapeo Sistemático de Literatura (MSL). Esto permitirá establecer y aclarar los principales aspectos, detallar el estado actual, los avances, los retos y las tecnologías relevantes en el dominio.

Este mapeo sistemático se enfoca en el dominio general del principio de inducción aplicado a sistemas de cocción domésticos, en contraste con otros estudios que se centran en elementos específicos, como los convertidores y los inversores y su rendimiento. Este es el caso de [40], que revisa las topologías utilizadas por los sistemas de cocción por inducción y el modelado de inversores y convertidores. De lo anterior se deduce que estos estudios obvian elementos de carácter general como las principales aplicaciones, retos o problemas en el área, que son fundamentales para establecer nuevas perspectivas de investigación en el dominio.

El artículo se divide en cinco etapas: planificación del MSL, estrategia de extracción de datos, etapa de ejecución, resultados y análisis de resultados. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas a partir de la investigación.

## 2.2 PLANIFICACIÓN DEL MAPEO SISTEMÁTICO DE LITERATURA

Los mapeos sistemáticos de literatura son una estrategia ampliamente utilizada en investigación para recopilar y extraer información de diferentes bases de datos y repositorios científicos sobre un tema o área específica, permitiendo a los investigadores y lectores trazar rutas precisas de indagación a través de un proceso ordenado, sistemático y reproducible [41]. Además, permite delimitar el ámbito de estudio mediante preguntas críticas, lo que reduce el riesgo de error y facilita la obtención de conclusiones precisas [42]. Para la planificación y ejecución del presente mapeo sistemático se han seguido algunas pautas propuestas por Petersen et al. en [43], así como algunos elementos descritos por Solis y Hurtado

[39], y los lineamientos de Kitchenham en [44]. El estudio se ha dividido en cinco etapas, que se pueden ver en la Figura 1.

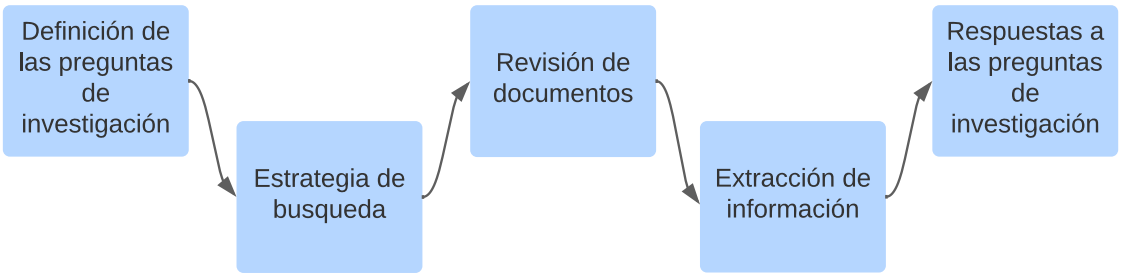



***Figura 1.*** *Metodología utilizada para la revisión de literatura considerando la propuesta de Petersen.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

### 2.2.1 Definición de las preguntas de investigación

Las preguntas de investigación se han formulado con el objetivo de delimitar el ámbito de estudio y conocer en qué contexto se están implementando las nuevas tendencias en cocinas de inducción, cómo se está gestionando su abastecimiento energético, qué tecnologías están influyendo en su desarrollo y qué roles predominantes pueden tener estos elementos en la reducción de enfermedades, así como su eficiencia en comparación con otras alternativas. La Tabla 1 presenta las preguntas de investigación, sus motivaciones y las respectivas respuestas, que son fundamentales para analizar y categorizar la información.

**Tabla 1.** Planteamiento de preguntas del área de investigación.

| Preguntas | Motivante | Respuestas |
|---|---|---|
| ¿Cuál es la frecuencia de publicación de investigaciones que realizan desarrollos tecnológicos de inducción relativos al proceso de cocción de alimentos y a las energías renovables? | Permitir un análisis de la frecuencia de publicaciones del área de interés, con el fin de saber cómo están siendo acogidos los sistemas de cocción basados en tecnologías de inducción y las energías renovables. | Se analizan los artículos primarios acorde a su fecha de publicación en periodo anual. |
| ¿Las metodologías de validación de las estufas de inducción se están aplicando de manera ad-hoc o siguiendo un estándar o metodología ya probada? | Conocer en qué estado se encuentra las metodologías de validación actuales con el fin de garantizar la eficiencia de los diferentes sistemas de inducción aplicados en la cocina domestica encaminados a las energías limpias. | • Experimental<br>• Simulación<br>• Combinación de ambas.<br>• Sin método de validación |
| ¿Con qué frecuencia se relacionan las herramientas y los enfoques de materiales y energías renovables en el dominio de | Estudiar la tendencia y la aceptación de las cocinas de inducción con alimentación dual; uso de dos tipos de energía como suministro energético. | Se resolverá detalladamente al momento de contestar las preguntas de investigación. |

| | | |
|---|---|---|
| las estufas de inducción con suministro energético dual en los estudios analizados? | | |
| ¿Cuáles son los principales problemas, riesgos y retos en el dominio de las estufas de inducción con suministro energético dual? | Saber en qué contexto se encuentran los sistemas de inducción con alimentación dual, además de analizar las alternativas y/o soluciones que se han propuesto para alcanzar cada vez más un mayor grado de eficiencia de esta novedosa tecnología. | • Topologías<br>• Materiales<br>• Frecuencias<br>• Conmutación |
| ¿En qué contexto se está haciendo los principales aportes al dominio de los métodos alternativos para la preparación de alimentos con técnicas de estufas de inducción con suministro energético? | Encontrar en que contexto se está apoyando a los sistemas de cocción de alimentos basados en la tecnología de inducción y el uso del suministro energético. Además de conocer como contribuyen al entorno y que desconocimientos del tema existen. | • Académico<br>• Industrial<br>• Ambas |
| ¿Cuál es la eficiencia de los sistemas de inducción propuestos, y cómo contribuyen al dominio? | Analizar la eficiencia que se está alcanzando a partir de las diferentes propuestas de sistemas de inducción, asimismo conocer las ventajas o desventajas de los sistemas de inducción propuestos. | Se resolverá al momento de contestar las preguntas de investigación en el apartado de resultados y análisis de resultados. |
| ¿Qué tendencias futuras respecto a algoritmos, materiales para la inducción, energías novedosas, entre otros, se están aplicando en el dominio? | Exponer que tendencias futuras se están investigando y/o implementando en las diferentes investigaciones que promuevan en la evolución continua de los sistemas de cocción de alimentos basados en la tecnología de inducción en el enfoque de las energías limpias. | Se resolverá al momento de contestar las preguntas de investigación en el apartado de resultados y análisis de resultados. |
| ¿Qué tecnologías, enfoques o técnicas relacionan las energías renovables con la cocina de inducción de alimentos? | Identificar los principales aportes que se están generando, con respecto a las energías renovables aplicadas en las cocinas de inducción. | Se resolverá al momento de contestar las preguntas de investigación en el apartado de resultados y análisis de resultados. |

### 2.2.2 Estrategia de búsqueda

Para la ejecución del MSL se aplicaron los criterios PICOC (Population, Intervention, Comparison, Outcomes y Context) para facilitar la creación de cadenas de búsqueda y estructurar los conceptos de forma ordenada y metodológica, cubriendo todos los aspectos relevantes [45]. De esta manera, se construye la cadena de búsqueda (Tabla 2) para obtener información ordenada y metódica. La estrategia de búsqueda se implementó en las bases de datos IEEE Xplore, Scopus, ACM Digital Library, ScienceDirect y Web of Science, que son adecuadas y válidas para la búsqueda de información en el área de la ingeniería [46]. Cabe destacar que la cadena de búsqueda tuvo en cuenta el título, el resumen y las palabras clave de

todas las bases de datos, excepto ScienceDirect; ya que este sitio web no acepta cadenas de búsqueda de más de ocho conectores booleanos. Por esta razón, fue necesario acotar la cadena de búsqueda, dejando así las palabras más importantes y significativas para el área de interés. Igualmente, se realizó una búsqueda manual en Google Académico (utilizando el criterio de relevancia del buscador [39]), para añadir las investigaciones más significativas del dominio en el presente estudio. Finalmente, la búsqueda en las bases de datos seleccionadas tiene una ventana temporal de 10 años y se incluyen todos los estudios publicados desde 2013 hasta marzo de 2022.

**Tabla 2.** Cadena de búsqueda

| Cadena de búsqueda |
|---|
| "Induction cooking" **OR** "Induction stove" **OR** "Induction cooktop" **OR** "Induction hob" **OR** "Industrial furnace" **OR** "Direct fired heater" **OR** "cooking" **OR** "food preparation" **OR** "cooking system" **OR** "cooking technology" **OR** "dual power supply" **OR** "double power supply" **OR** "induction cooking" **OR** "electromagnetic induction cooker" **OR** "stove" **OR** "kitchen") **AND** ("Electromagnetic induction" **OR** "Magnetic induction" **OR** "Induction coil" **OR** "Induction heating" **OR** "Induction principle" **OR** "Maximum power point tracking" **OR** "MPPT" **OR** "Photovoltaic system" **OR** "PV" **OR** "PV system" **OR** "Solar Panels" **OR** "Solar power system" **OR** "photovoltaic cells" **OR** "photovoltaic panels" **OR** "solar cells") |

### 2.2.3 Criterios de selección de estudios primarios

Continuando con la planificación del mapeo sistemático de literatura y siguiendo la metodología de Petersen et al. en [43], se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión (Tabla 3), sirviendo de apoyo para determinar los artículos más importantes que ayudarán a responder las preguntas planteadas anteriormente, de manera que se puedan obtener resultados confiables [47]. Así, un estudio se considera aceptado si cumple con todos los criterios de inclusión de la Tabla 3, mientras que, si cumple con al menos uno de los criterios de exclusión, se considera un artículo rechazado.

**Tabla 3.** Criterios de inclusión y exclusión.

| Criterios de inclusión |
|---|
| Estudios presentados en inglés que consideren el desarrollo y los prototipos de cocinas de inducción con doble alimentación (red eléctrica y sistema fotovoltaico) o trabajos relacionados que contribuyan al dominio de la cocción de alimentos mediante tecnologías de inducción. |
| Artículos completos publicados en revistas, conferencias o congresos con revisión por pares. |
| La investigación presenta una solución concreta al área de tecnologías aplicadas a la cocción de alimentos y/o energías renovables. |
| **Criterios de exclusión** |
| El estudio primario no presenta una solución concreta al área de los materiales y energías renovables. |
| Estudios que no son accesibles en texto completo. |
| Estudios que presentan material no revisado por pares. |
| Estudios secundarios o terciarios que reportan y analizan los resultados de otras investigaciones. |
| Publicaciones duplicadas de los mismos autores. |

## 2.3 ESTRATEGIA DE EXTRACCIÓN DE DATOS

En esta etapa se pretende recolectar y extraer toda la información que pueda aportar a la investigación de manera significativa para que a partir de estos datos se generen algunas posibles respuestas a las preguntas planteadas (Tabla 1), cabe destacar que en este proceso se asegura el uso de los criterios de exclusión e inclusión, con la finalidad de obtener una mayor precisión en los resultados. Posteriormente se buscaron las investigaciones en el contexto de las estufas de inducción con alimentación dual, que se refiere a las estufas con dos alternativas de suministro de energía para funcionar ya sea con energía solar (sistemas fotovoltaicos) o a través de la red eléctrica, y también se analiza cómo están diseñadas éstas. Por otro lado, se cuestionan tres casos, primero, cómo las energías renovables están cobrando cada vez más fuerza para reducir la contaminación en el medio ambiente; segundo, cómo las cocinas tradicionales generan problemas de salud y tercero, qué efectos tienen en la economía.

## 2.4 ETAPA DE EJECUCIÓN

Esta etapa describe el proceso que se lleva a cabo una vez ejecutadas las fases anteriores, por lo que se ha decidió dividirla en tres fases; cabe mencionar que se utiliza la herramienta en línea denominada Parsifal [48], la cual ayuda a realizar el proceso de mapeo/revisión de literatura de manera ordenada.

En la fase uno, se ha aplicado la cadena de búsqueda en las cinco bases de datos mencionadas en la estrategia de búsqueda, obteniéndose 1703 estudios; estos artículos se han revisado en el título, resumen y palabras clave, teniendo en cuenta los criterios de inclusión y exclusión para eliminar las investigaciones que podrían haber sido filtradas por ruido en la cadena de búsqueda, además, también se han eliminado las investigaciones duplicadas de los mismos autores, quedando un total de 113 documentos. En la fase 2, se ha llevado a cabo una lectura completa de los artículos, aplicando los criterios de la Tabla 3, resultando 58 artículos. Finalmente, en la fase 3, se ha extraído la información y se han respondido a las preguntas planteadas.

## 2.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la etapa de ejecución indican que en la fase 1 se encontraron un total de 1703 estudios; se puede observar (Figura 2) que Scopus es la base de datos que ofreció el mayor número de investigaciones encontradas, representando el 45,5% de las mismas. En cuanto a las demás bases de datos bibliográficas, ACM Digital supone el 10,8%, ScienceDirect el 8,3%, Web of Science el 19,5%, IEEE Xplore el 15,7%, mientras que otras fuentes el 0,2%.

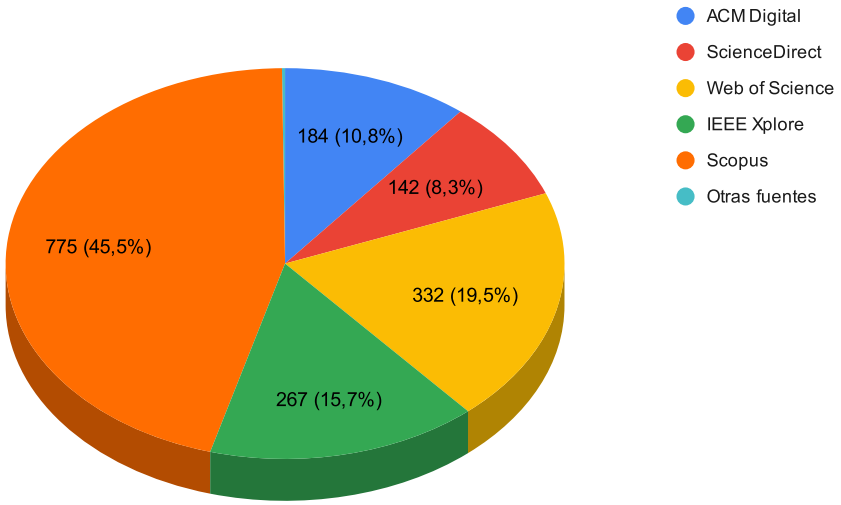



***Figura 2.*** *Contribuciones de cada una de las bases de datos científicas.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

En la fase 3, se aceptaron 58 artículos, que son los artículos primarios. La Figura 3 muestra una descripción detallada de los estudios aportados por cada base de datos bibliográfica antes y después de ser evaluados. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede observar que ACM Digital no aportó ningún estudio relevante para el dominio de interés. Por otro lado, ScienceDirect tiene un bajo índice de investigaciones aceptadas, con sólo una contribución a esta revisión. También cabe destacar que Web of Science, IEEE Xplore y Scopus son los que más estudios aceptados aportan, puesto que la suma de estos tres equivale al 93,1% de los artículos primarios, por lo que se puede indicar que son repositorios eficaces para la recopilación de evidencias bibliográficas relevantes en el dominio.

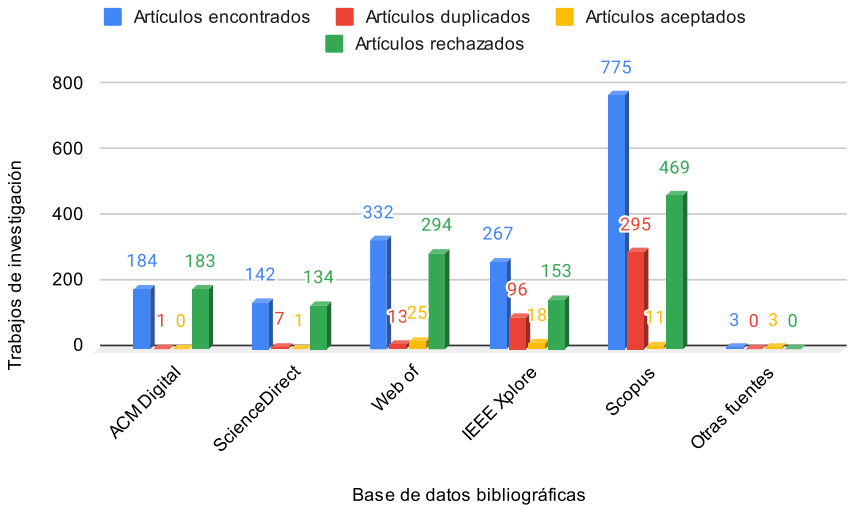



***Figura 3.*** *Artículos aportados por cada una de las bases de datos y motores de búsqueda académicos antes y posterior a ser evaluados.*
***Fuente**: Elaboración propia.*

### 2.5.1 Respuestas a las preguntas de investigación

En la siguiente sección, se abordan las preguntas planteadas en el proceso de la revisión de literatura utilizando la información obtenida de las fuentes primarias aceptadas.

#### 2.5.1.1 ¿Cuál es la frecuencia de publicación de investigaciones que realizan desarrollos tecnológicos de inducción relativos al proceso de cocción de alimentos y a las energías renovables?

El principio de inducción electromagnética aplicado a sistemas de cocción de alimentos es un campo en el que se hacen pocos aportes en comparación con otros dominios, como las ciencias médicas [49] o las ciencias de los materiales [50], lo que presupone un campo en maduración en el que se están sentando las bases

para popularizar posteriormente este tipo de tecnología. La Figura 4 indica la frecuencia de publicación anual de los sistemas de cocción de alimentos basados en la tecnología de inducción hasta marzo de 2022. De esta manera, se inicia con una baja tasa de publicaciones en los años 2013, 2014 y 2016, se puede identificar que hubo una nula frecuencia de publicaciones en el año 2015, por lo que en este dominio no se realizaron avances relevantes, lo que podría explicarse en primera instancia que se estaba explorando el principio de inducción aplicado en el ámbito doméstico y con energías limpias. Posteriormente, se produjo un crecimiento sistemático de la investigación en el área para el año 2017, cuando se comenzó a explorar en mayor medida la aplicación de estas tecnologías. Por otro lado, los años que tuvieron mayor relevancia fueron 2018 y 2019, siendo estos dos equivalentes al 41,2% de los estudios publicados. Finalmente, en los años 2020, 2021 y 2022 se observa una disminución en el número de estudios publicados; esto puede deberse a elementos externos al dominio, como la pandemia de Covid-19 [51], donde en general se ha reportado una disminución sustancial en el tiempo dedicado a la investigación [52].

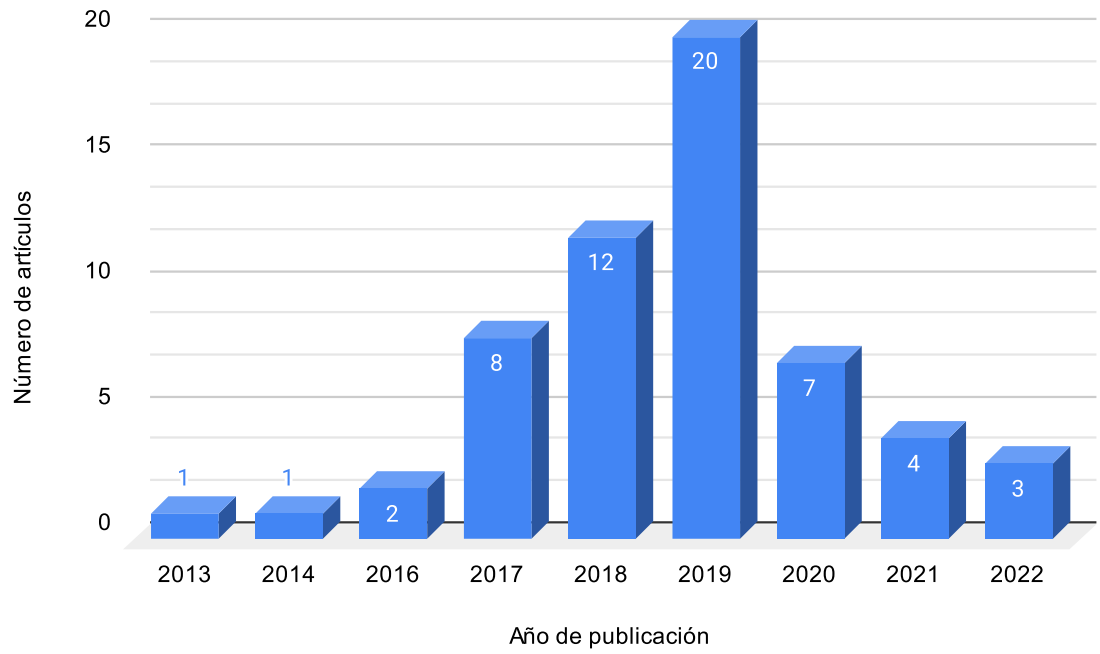



***Figura 4.*** *Distribución de publicaciones anuales de publicaciones relacionadas con las estufas de inducción.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

#### 2.5.1.2 ¿Las metodologías de validación de las estufas de inducción se están aplicando de manera ad-hoc o siguiendo un estándar o metodología ya probada?

En los últimos cinco años, el desarrollo de tecnologías de inducción para la cocción de alimentos ha cobrado importancia, lo que ha impulsado el análisis de los diversos métodos de validación de las propuestas y prototipos presentados. La revisión realizada indica que no existe un protocolo estándar u obligatorio para la validación de estos sistemas, más allá de los casos obvios, como las pruebas de concepto o los estudios de caso. En particular, se ha identificado que algunos investigadores comprueban sus hallazgos mediante métodos como la simulación [53] o la experimentación [54], e incluso en casos particulares, la combinación de ambos [55].

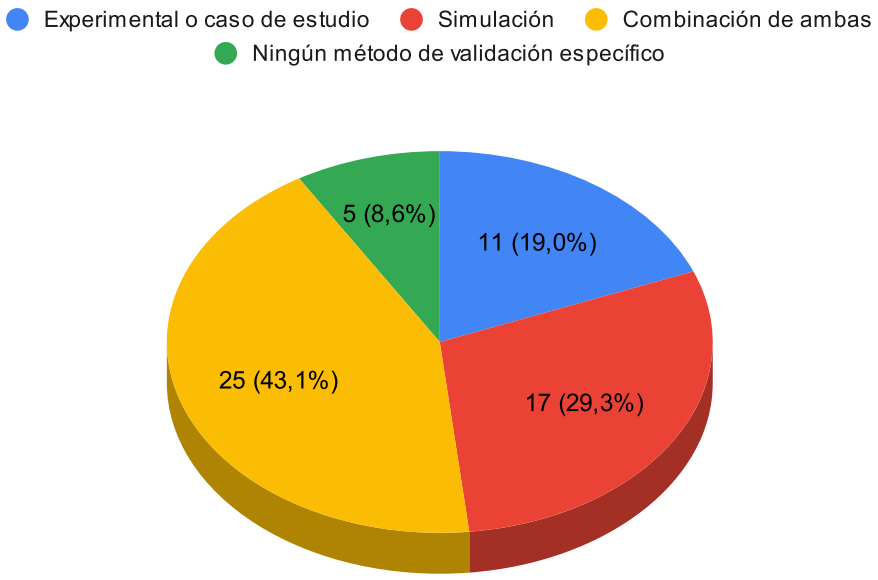



***Figura 5.*** *Métodos de validación para las propuestas realizadas desde el ámbito académico y sus respectivos prototipos.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

En la Figura 5, se pueden evidenciar las formas de validación de tecnologías de inducción que se utilizan en el dominio de la cocción de alimentos. Esto significa que el 19% (11 artículos) de las investigaciones se validan mediante pruebas experimentales en un entorno controlado, ya sea a pequeña o gran escala, verificando el comportamiento del sistema. También, se observa que el 29,3% (17 artículos) utilizan la simulación como forma de verificar el método o tecnología propuesta, por lo que utilizan diferentes software para validar la propuesta, como Matlab/Simulink [56] entre otros. Después, el 43,1% (25 artículos) emplean como

método de verificación la combinación de simulación y experimentación, ya sea del hardware, software o del proyecto en general.

Ahora bien, si se enfoca el análisis en las simulaciones. En ese caso, algunos de los programas mencionados en los diferentes artículos formaron parte del proceso de investigación y corroboración de las anteriores formas de validación (experimental, simulación y combinación de ambas); entre ellos se encuentran Matlab [57], Multisim [53], Proteus [33], COMSOL Multiphysics [58], PSIM [59], Simulink [60], Labview [61], Spice [54], PSpice [62], OrCAD PSpice [63], LTspice [64], entre otros. La Figura siguiente muestra que Matlab (29,5%) está presente en la mayoría de las simulaciones, reforzando su posición como líder en ingeniería en diferentes dominios. También es importante destacar que las diferentes forks de Spice (PSIM, PSpice y ORCAD PSpice) son una alternativa viable ya que han sido utilizados en varios estudios de sistemas de inducción y cocción.

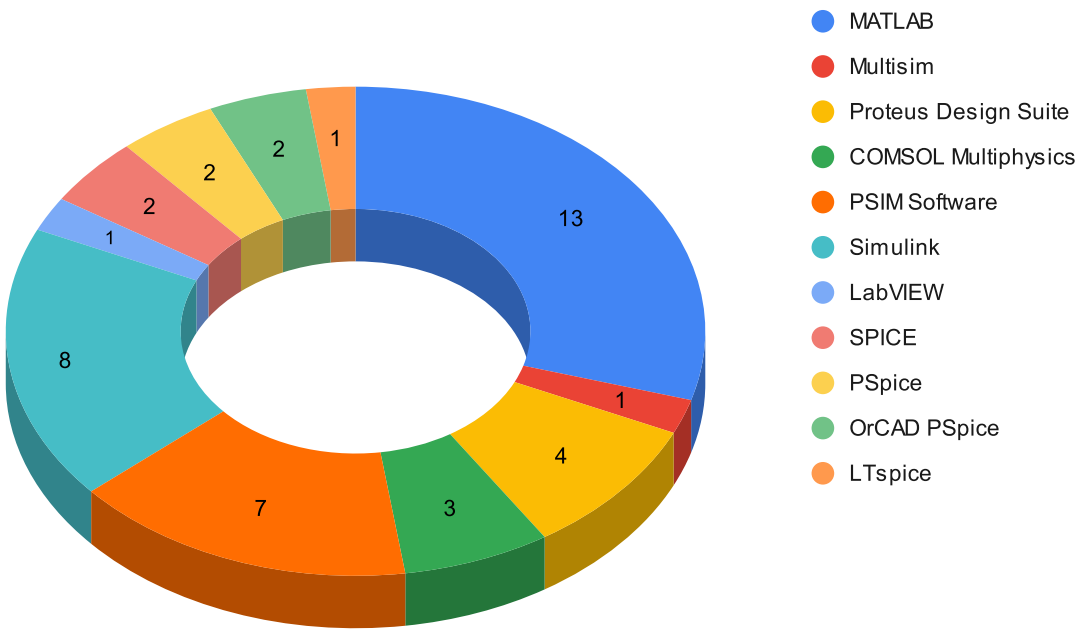



***Figura 6.*** *Alternativas de simulación software utilizadas para planificar y validar las propuestas.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Posteriormente, el 8,6% (5 artículos) no contaba con un método de validación verificable, como es el caso de Kumar, et al. en [65], que se enfocan en recopilar y proporcionar información sobre diferentes tipologías de inversores (cuasi-resonante, medio puente y puente completo), técnicas de control de potencia de salida (desplazamiento de fase y modulación por ancho de pulsos asimétrico), entre otros. Aunque estos aportes son valiosos al recopilar información existente, no proporcionan evidencias empíricas.

En este contexto, es importante tener en cuenta que no todos los artículos desarrollan proyectos físicos. Algunos se basan en propuestas simuladas, lo que dificulta la validación de las propuestas en un entorno real. Al analizar los diferentes estudios, se puede concluir que el uso de software es de gran ayuda para llevar a cabo un proceso ordenado y metodológico, así como para facilitar la búsqueda de las mejores soluciones en cuanto a tecnologías, herramientas o materiales para su implementación en prototipos reales [66].

#### 2.5.1.3 ¿Con qué frecuencia se relacionan las herramientas y los enfoques de materiales y energías renovables en el dominio de las estufas de inducción con suministro energético dual en los estudios analizados?

El uso de dos fuentes de energía como forma de suministro energético en estufas de inducción es un tema novedoso que permite que las estufas puedan funcionar tanto conectadas a la red eléctrica como a través de fuentes de energía alternativa. En este enfoque, hay pocos estudios que contribuyan al dominio de las estufas de inducción con doble alimentación; sin embargo, de los estudios existentes, algunos obtienen resultados satisfactorios, donde la relación entre las herramientas y los materiales aplicados al sistema, así como las topologías, las diferentes frecuencias, los componentes de respuesta rápida, entre otros, juegan un papel esencial.

En concreto, Sibiya & Venugopal en [67] se centran en la eficiencia energética del sistema, implementando un sistema de inducción de tipo dual respetuoso con el medio ambiente a través del método de conmutación automática que utiliza la energía disponible en ese momento. En caso de no disponer de energía solar, el sistema conmutaría a energía eléctrica y viceversa, lo que lo convierte en una alternativa interesante para implementar en hogares. En este caso, se utiliza un inversor de medio puente, por lo que una adaptación a cuasi-resonante o de puente completo podría ser conveniente para analizar su comportamiento y compararlo con las estufas de inducción convencionales.

Otro estudio relevante que combina dos formas de suministro de energía es el de Soni et al. en [68], que presentan una propuesta que busca eliminar la dependencia en un solo tipo de energía mediante la hibridación de gas propano y energía eléctrica convencional en sistemas de inducción. Sin embargo, la combustión del gas propano sigue siendo perjudicial para el medio ambiente [69].

Los estudios previos han demostrado que la doble alimentación en el dominio de la inducción es posible y es una alternativa válida para estos dispositivos, incluso cuando se utilizan fuentes de energía menos eficientes como los sistemas fotovoltaicos. Esto habla de la eficiencia del principio de la inducción. Además, la escasez de investigaciones que combinan esta forma de alimentación sugiere que los investigadores pueden estar enfocados en otros desafíos del dominio, como

mejorar la eficiencia, utilizar materiales más adecuados para la inducción y aumentar la seguridad de los usuarios.

#### 2.5.1.4 ¿Cuáles son los principales problemas, riesgos y retos en el dominio de las estufas de inducción con suministro energético dual?

La aplicación de la tecnología de inducción en sistemas de cocción de alimentos plantea ciertos problemas en su funcionamiento, principalmente relacionados con el requerimiento de potencia en el caso de uso en serie. Estos problemas han sido objeto de investigaciones en busca de soluciones [70]. Además, para emplear estas tecnologías se manejan frecuencias muy altas, por lo que la topología utilizada, ya sea de tipo cuasi-resonante [71], de medio puente [72] o de puente completo [55], debe ser seleccionada y evaluada adecuadamente porque, en gran medida, esto depende de la potencia calorífica transferida. Otro factor que ha generado cierto conflicto son los materiales de los recipientes ya que usualmente deben ser ferromagnéticos para que exista una óptima transferencia de energía, por lo que los materiales no ferromagnéticos dejan de ser útiles por su baja permeabilidad y resistividad [73]. Por otro lado, la adaptación de los sistemas fotovoltaicos a estos dispositivos de inducción domésticos tiene un grado de complejidad ya que los equipos son caros y además deben mantener una potencia entregada constante, lo cual es un reto de mantener en los sistemas fotovoltaicos [74]; sin embargo, se consideran viables a medida que se publican nuevas innovaciones. También, un factor importante es el control de la potencia ya que esto podría favorecer o desfavorecer el sistema dependiendo de cómo se implemente.

En esta línea, se analizan algunos casos en general que buscan dar solución a los retos mencionados anteriormente, cabe destacar que son propuestas enfocadas a algunas áreas específicas, por lo que sus resultados no pueden generalizarse para todos los casos, pero son de gran importancia para posibles mejoras futuras. Un enfoque específico desde el punto de vista de la doble alimentación se encuentra en [67], mejorando la eficiencia del sistema de cocción por inducción; sin embargo, presenta cierta ineficiencia al aumentar el nivel de cocción, por lo que a partir de esta contribución, se decide sugerir el uso de dos inversores con topología de medio puente de clase D y DE, permitiendo manejar tanto la salida de alta como de baja potencia. Asimismo, Annie et al. en [75], genera una propuesta que es simulada y validada con el software PSIM, donde se busca diseñar una topología basada en el inversor paralelo cuasi-resonante con el planteamiento de IGBTs los cuales tienen una rápida velocidad de conmutación y generan menores pérdidas, lo cual podría generar una mayor eficiencia en las estufas de inducción, además de que este sistema utiliza la energía solar como entrada y así reducir el uso de gas natural. En este contexto, Mounika et al. en [63], utiliza el programa OrCAD PSpice, para el diseño y la validación de un inversor resonante en serie de puente completo que maneja dos frecuencias con la finalidad de que el calentamiento pueda ser aplicado a materiales ferromagnéticos y no magnéticos, además de emplear el método ADC para la regulación de la potencia. Las investigaciones anteriores, permiten concluir

que hay investigaciones que buscan apoyar y contribuir a esta al principio de inducción no sólo en la alimentación energética dual, sino también en áreas específicas de los sistemas de inducción domésticos.

Las tecnologías de inducción presentan ciertos riesgos para la salud de las personas que las utilizan, en particular en relación con los campos electromagnéticos generados por estos dispositivos. Por ello, se han realizado investigaciones para evaluar si estos campos pueden causar problemas de salud. Nagatomo et al. en [76], estudian la posibilidad de interferencia en los receptores de implantes de marcapasos unipolares o de fibrilación cardioversora debido a la inducción electromagnética. En este estudio se encontró que el peor escenario se puede dar en pacientes con un implante unipolar que está muy cerca de la placa del recipiente en el horno de inducción, por lo que se considera que una distancia segura es de 50 cm o más del horno.

Además de los campos electromagnéticos, otra preocupación en los sistemas de inducción es la radiación producida por estos dispositivos. Para proteger la salud y la seguridad de las personas, se han desarrollado lineamientos y normas específicas, como la norma española NTP 698, que establece que los niveles de radiación aceptables a los que puede estar expuesto un ser humano son de 100 microTeslas. Esto es fundamental para garantizar la seguridad en caso de llevar un prototipo a un sistema comercial [77].

Uno de los principales desafíos en el desarrollo de estufas de inducción es la selección del material adecuado para los recipientes, ya que generalmente se utilizan materiales ferromagnéticos debido a su alta eficiencia y baja resistividad y permeabilidad [63]. Esto ha llevado a la creación de propuestas comerciales como las estufas "all metal induction", que permiten calentar cualquier material utilizando el principio de conducción en la malla magnética, pero con una eficiencia reducida. Por lo tanto, el desafío consiste en mejorar la eficiencia de este tipo de sistemas para generalizar su uso a nivel comercial [78].

Ahora, la elección de la frecuencia a la que deben operar las estufas de inducción es uno de los parámetros más importantes a considerar al momento de diseñarlas e implementarlas, ya que esto permite la relación de eficiencia en el calentamiento del recipiente, dentro de las estufas de inducción se sabe que generalmente operan en rangos de 20 KHz a 100 KHz, específicamente las comerciales, de igual manera el análisis de la topología y componentes son fundamentales ya que deben manejar altas frecuencias para garantizar mayor seguridad y rendimiento [79]. En este mismo contexto, el control preciso de la potencia de salida es importante en los dispositivos de inducción, ya que si no se controla la potencia se generarían distorsiones armónicas que disminuirían el rendimiento del sistema [65].

#### 2.5.1.5 ¿En qué contexto se están haciendo los principales aportes al dominio de los métodos alternativos para la preparación de alimentos con estufas de inducción?

El contexto en el que se realizan los aportes sobre los sistemas de cocción de alimentos basados en el principio de inducción se puede observar en la Figura 7, que muestra que 56 (96,6%) artículos basan sus estudios en el ámbito académico. Estas investigaciones presentan aportes sobre arquitecturas [53], algoritmos [73], topologías [80] y materiales que permiten contribuir a la mejora de la eficiencia de las estufas de inducción, las cuales han sido muy bien recibidas por la población y las entidades estatales por ser más eficientes en comparación con los sistemas de cocción convencionales. Estos últimos pueden ser perjudiciales para la salud, la economía y el medio ambiente. Además, se han realizado estudios que buscan implementar energías renovables en las cocinas de inducción como medio de abastecimiento energético, mediante el uso de sistemas fotovoltaicos o en casos con doble alimentación (red eléctrica y energía solar), lo que permite generar mayor autonomía, especialmente en zonas alejadas donde no existe una red eléctrica fija, o en zonas afectadas por la escasez de GLP [33] o por la quema de leña o carbón [53].

En el contexto de los sistemas de cocción de alimentos basados en el principio de inducción, se encontró que solo un 1,7% de los estudios provienen de la industria. Uno de estos estudios genera productos de nuevo conocimiento sobre un inversor multiresonante que reduce el tamaño de la estufa y disminuye las pérdidas de calefacción de los recipientes no ferromagnéticos [81]. Además, solo se desarrolló un 1,7% de trabajos que combinan el contexto académico y el industrial, aportando evidencia empírica sobre las fuerzas electromagnéticas que actúan sobre los utensilios cuando son sometidos a sistemas de calentamiento por inducción, utilizando métodos como el tensor de Maxwell y elementos finitos [82]. Por lo tanto, es necesario seguir aportando desde la academia y la empresa para fortalecer su relación y aumentar la capacidad de innovación y recursos económicos.

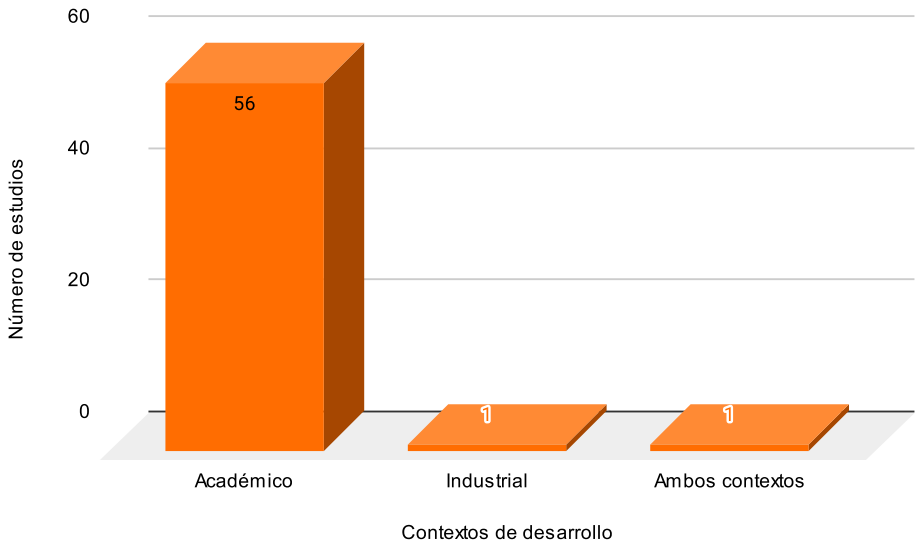



***Figura 7.*** *Contexto de las propuestas realizadas en el dominio de las estufas de inducción en dispositivos de cocción.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Los resultados anteriores indican que desde la academia se están haciendo múltiples propuestas al área de los sistemas de cocción por inducción, lo que podría significar un dominio en maduración que busca fortalecer sus bases, resolver problemas generales y combinar nuevas tecnologías de hardware y software. Por lo tanto, el paso natural es que en pocos años se realicen esfuerzos a nivel de industria para que las propuestas realizadas por la academia sean rápidamente adoptadas por los profesionales, logrando así una mayor trascendencia y desarrollo tecnológico en estos dispositivos a nivel comercial.

#### 2.5.1.6 ¿Cuál es la eficiencia de los sistemas de inducción propuestos y cómo contribuyen al dominio?

Los sistemas de cocción por inducción son ampliamente aceptados por los usuarios por sus ventajas, como el calentamiento rápido, la seguridad y la facilidad de limpieza [83]. La población es cada vez más consciente de que el gas licuado de petróleo es un recurso que puede escasear en el futuro; quemar madera, queroseno y otros materiales no es la mejor opción porque genera contaminación y problemas de salud para la población. Por lo tanto, es fundamental determinar la eficiencia de las estufas de inducción para entender si esta tecnología es generalizable a todos los contextos. En concreto, en esta investigación se ha constatado que las propuestas realizadas en algunos casos sólo son validadas e implementadas desde el campo de la simulación. Sin embargo, algunas excepciones llevan el estudio al punto de desarrollar un prototipo real con altas eficiencias, constituyendo un aporte al dominio.

En esta línea, en la propuesta de Sibiya & Venugopal en [67], se plantea una estufa de inducción con alimentación dual mediante sistemas fotovoltaicos y de suministro eléctrico. La estufa utiliza tres frecuencias fijas de 30KHz, 45KHz y 65KHz. Los resultados de las pruebas individuales muestran una eficiencia del sistema de 91,42%, 80,96% y 57,12%, respectivamente. Estos resultados indican que a medida que aumenta el nivel de cocción, la eficiencia disminuye. En el caso de Dande & Markande en [33], se propone un sistema de inducción doméstico que utiliza energía solar como única fuente de alimentación. Este sistema proporciona una alternativa respetuosa con el medio ambiente y alcanza una eficiencia del 80% a una frecuencia de 25KHz.

Finalmente, en [53] se analiza la eficiencia del sistema mediante simulación. En primer lugar, se evalúa una estufa de inducción comercial de corriente alterna, que alcanza una eficiencia de 85.56% experimentalmente. Luego, se analiza el circuito de la estufa de inducción mediante el software Multisim. Posteriormente, se evalúa el sistema propuesto en base al diseño y simulación con el software Proteus y Multisim de una estufa de inducción de corriente continua con potencias de salida de 500 W a 1500 W, obteniendo una eficiencia media del 90,10%. Es importante tener en cuenta que las simulaciones son aproximaciones al dominio real, pero pueden no ser totalmente precisas debido a la presencia de elementos ideales que no existen en la vida real. Por lo tanto, son aproximaciones útiles, pero no verificadas totalmente.

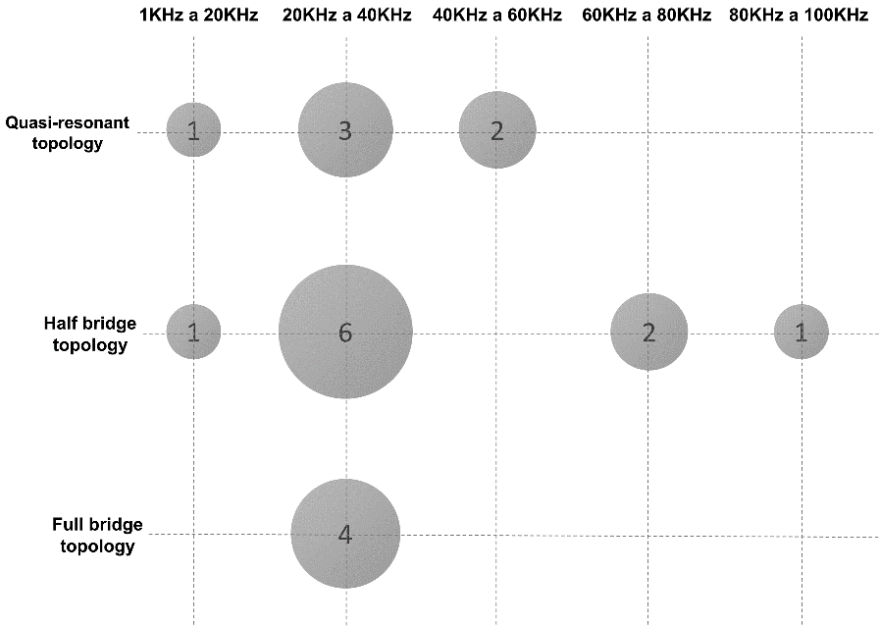



***Figura 8.*** *Gráfico de burbujas que relaciona las topologías utilizadas en las estufas de inducción en relación con la frecuencia de funcionamiento.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

El gráfico de la Figura 8 ilustra las frecuencias utilizadas en los sistemas de inducción. Los datos trazados sugieren que la mayoría de las investigaciones se han centrado en la utilización de frecuencias dentro del rango de 20-40 kHz para el calentamiento por inducción. Este rango se elige debido a la alta eficiencia de las ondas electromagnéticas en estas frecuencias para dispositivos con alta permeabilidad magnética, lo que resulta en mayores niveles de calentamiento. Cabe destacar que las frecuencias propuestas representadas en el gráfico provienen principalmente de investigaciones académicas, ya que los dispositivos profesionales de calentamiento por inducción tienden a utilizar tecnologías electrónicas más complejas y costosas [84]. En esta línea, un estudio [85] ha demostrado que el uso de frecuencias electromagnéticas cercanas a 100 kHz puede eliminar eficazmente las corrientes de rizado en materiales y geometrías específicas debido a la resonancia con la frecuencia natural de oscilación de la corriente de rizado. La eficacia de este método puede variar en función del material y la geometría del objeto sobre el que se aplique; por lo tanto, es crucial realizar pruebas y evaluaciones antes de su aplicación. Algunos observan que las frecuencias más bajas pueden tener una eficacia menor debido a su mayor longitud de onda. En comparación, las frecuencias más altas pueden ser menos eficaces debido a su mayor atenuación en el medio y a su menor capacidad para penetrar en el material e interactuar con la corriente de ondulación.

#### 2.5.1.7 ¿Qué tendencias futuras respecto a algoritmos, materiales para la inducción, energías novedosas, entre otros, se están aplicando en el dominio?

El principio de la inducción aplicado al ámbito doméstico, como lo es para la cocción de alimentos, es una tecnología novedosa que permite calentar el recipiente a través de diferentes fenómenos que se producen durante la inducción electromagnética, como las corrientes de Foucault y la histéresis, entre otros [65]. Por lo tanto, cada vez se busca mejorar y avanzar hacia nuevas tendencias futuras en cuanto a metodologías, materiales, energías y estrategias que ayuden a generar una mayor seguridad, eficiencia y rendimiento de las cocinas de inducción. De esta manera, existen propuestas enfocadas a las estufas flexibles [86], los métodos de aprendizaje profundo [87], las energías renovables como fuente de alimentación [88] y la tecnología de compuestos de Nitruro de Galio (GaN) [79].

Entre las nuevas tendencias se encuentran casos como el de las estufas de inducción flexibles, que permiten colocar recipientes de diferentes tamaños en cualquier parte de la superficie de la estufa, pasando así de las zonas de calentamiento fijas a toda la superficie. En estas estufas se implementan pequeños inductores o bobinas que permiten distribuir el calor por toda la superficie [89]. En esta línea, se mencionan los inversores más utilizados en las estufas flexibles, y cómo mejorarlos es una tendencia futura; de esta manera, se conocen dos tipos los convencionales que sólo manejan una sola salida, disminuyendo el número de dispositivos de salida generando menores rendimientos y los inversores de salida

múltiple que se ven más frecuentemente en este tipo de dispositivos flexibles, debido a su alto rendimiento. Aun así, con un coste elevado, sin embargo, para mejorar aún más las estufas de inducción, se ha propuesto un inversor resonante de múltiples salidas para dispositivos de calentamiento por inducción de múltiples bobinas. Este tipo de inversor permite una mayor eficiencia en el sistema de bobinas, una conmutación suave y un control preciso de la potencia de salida, además de una gestión independiente de cada bobina [80].

Finalmente, el aprendizaje profundo se ha vuelto relevante en varios campos, como la salud y el hogar. En el ámbito de las estufas de inducción, se encuentra el estudio de Villa en [90], donde implementa una red neuronal convolucional entrenada para identificar la impedancia equivalente de la carga y distinguir entre las ollas que se encuentran en la superficie de la estufa. Además, la red neuronal permite estimar si la olla está desalineada del inductor. Esto es importante porque si el utensilio no está en la posición correcta, la resistencia disminuye, lo que aumenta la corriente y puede dañar la potencia de los componentes electrónicos. Esto indica que la red neuronal convolucional podría permitir nuevas experiencias para las personas en estos dispositivos, como el reconocimiento de las ollas más utilizadas, la recepción de alertas cuando se desalinea la olla, el monitoreo del uso del sistema y el seguimiento del deterioro de los utensilios.

#### 2.5.1.8 ¿Qué tecnologías, enfoques o técnicas relacionan las energías renovables con la cocina de inducción de alimentos?

En la actualidad, se han realizado algunas propuestas para utilizar energías renovables en las cocinas de inducción, pero no se han generalizado sus resultados en la industria. Se busca cada vez más que estos sistemas funcionen con fuentes de energía limpias, como la energía solar, mediante sistemas fotovoltaicos [88]. Por ejemplo, en [67] se propone una estufa de inducción que puede funcionar tanto con un sistema fotovoltaico como con la red eléctrica mediante el método de auto-conmutación, lo que permite utilizar la energía disponible en cada momento. En el caso de Adhikari et al. en [53] se centra en el diseño y simulación de un sistema de calefacción por inducción electromagnética que utiliza un sistema fotovoltaico como fuente de energía para reducir el consumo de GLP y biomasa. El software utilizado, Proteus y Multisim, permite analizar el comportamiento del sistema y prepararlo para su futuro desarrollo en un prototipo físico.

## 2.6 CONCLUSIONES PARCIALES

Las cocinas de inducción han emergido como una alternativa viable para la cocción de alimentos en el ámbito doméstico debido a su eficiencia, menor consumo energético y costo. En este mapeo sistemático de literatura se analiza el dominio actual del uso de estufas de inducción, donde los resultados sugieren que es un campo en auge para la comunidad científica, con una tendencia positiva en la frecuencia de las publicaciones científicas. La principal contribución de esta

investigación es profundizar en el dominio de las cocinas de inducción, determinando su eficiencia y las últimas técnicas, tendencias tecnológicas y desafíos en este campo, estableciendo evidencia empírica en un ámbito donde la información no es abundante.

Entre las nuevas tendencias tecnológicas en este campo se encuentra la implementación de estufas de inducción con sistemas de doble alimentación que utilizan energía fotovoltaica y convencional. Además, el uso del aprendizaje automático podría mejorar el rendimiento de los sistemas propuestos.

# 3 CAPÍTULO 3 - MODELADO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE ESTUFA DE INDUCCIÓN CON SUMINISTRO ENERGÉTICO DUAL

En este capítulo se describe metodológicamente, todo el proceso a realizar para entender y comprender cómo implementar un prototipo de estufa de inducción con doble alimentación energética, siguiendo algunas pautas de la metodología de diseño mecatrónico, por lo que se divide en dos secciones como son el diseño electrónico, que abarca todas las etapas y cálculos para el diseño del sistema interno (etapa de regulación, etapa de control, etapa de driver/mosfet, y la etapa de driver/mosfet). La sección de diseño e implementación CAD, se centra en realizar el modelo 3D de forma virtual asistido por software, en este caso, SolidWorks y Proteus, y así llevarlo a su implementación física de la mejor y más segura forma posible. Para el control se utiliza el método de modulación por ancho de pulso, la implementación de una topología de puente completo y 20 KHz de frecuencia.

La figura 9 muestra las principales etapas y procesos del prototipo diseñado para lograr el calentamiento por inducción. Es importante recordar que la fuente de alimentación se controlará en un entorno de laboratorio, con una primera alimentación de 12 V DC, 24 V DC, 32 V DC, y para la segunda alimentación de 46.5 V AC. Se sabe que un sistema fotovoltaico suministra energía en forma de corriente continua, por lo que, en este caso, se utilizó una fuente de corriente continua como forma de validación de este primer suministro de energía, y para el segundo suministro que es de corriente alterna se realiza a través de un transformador reductor de AC.

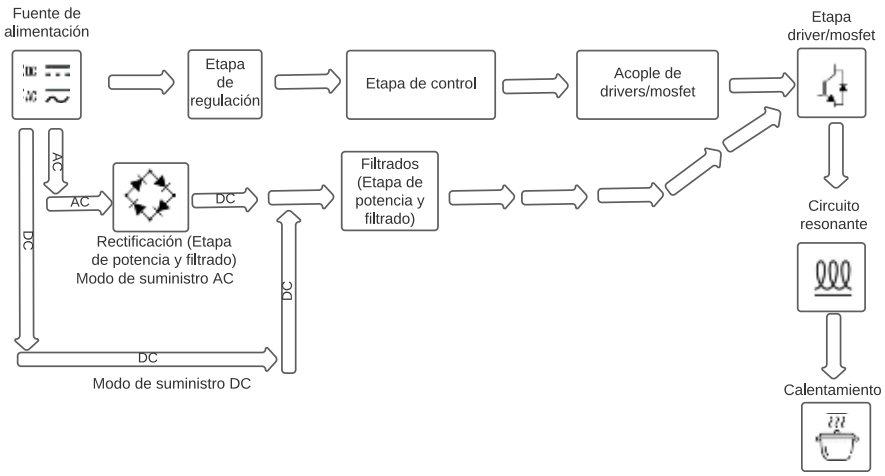



***Figura 9.*** *Fases de diseño del prototipo de estufa de inducción con suministro energético dual.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

## 3.1 DISEÑO ELECTRÓNICO

En este apartado se profundiza en el proceso necesario para desarrollar el prototipo de estufa de inducción con doble fuente de alimentación, tanto las teorías como los cálculos que se deben tener en cuenta, de esta forma se dividió en cuatro etapas, que son la etapa de regulación, etapa de control, la etapa de driver/mosfet y la etapa de potencia y filtrados. De esta forma, todas ellas son esenciales para que el sistema obtenga la mayor eficiencia y están relacionadas entre sí.

### 3.1.1 Etapa de regulación

El regulador de tensión es un dispositivo muy común en electrónica, utilizado para mantener un voltaje de salida constante y estable, evitando fluctuaciones, en este sentido se implementa un circuito con los tres reguladores para diferentes partes de la etapa del sistema.

En la Figura 10, se puede observar de izquierda a derecha el regulador LM7805 que mantiene el voltaje en 5 V DC, el cual alimenta a los optoacopladores y la parte baja de los drivers, mientras que el regulador LM7812 de 12 V DC es utilizado para alimentar el microcontrolador (Arduino Nano). Por último, el regulador LM7815 de 15 V DC se utiliza para la parte de control de los MOSFET de la etapa de potencia.

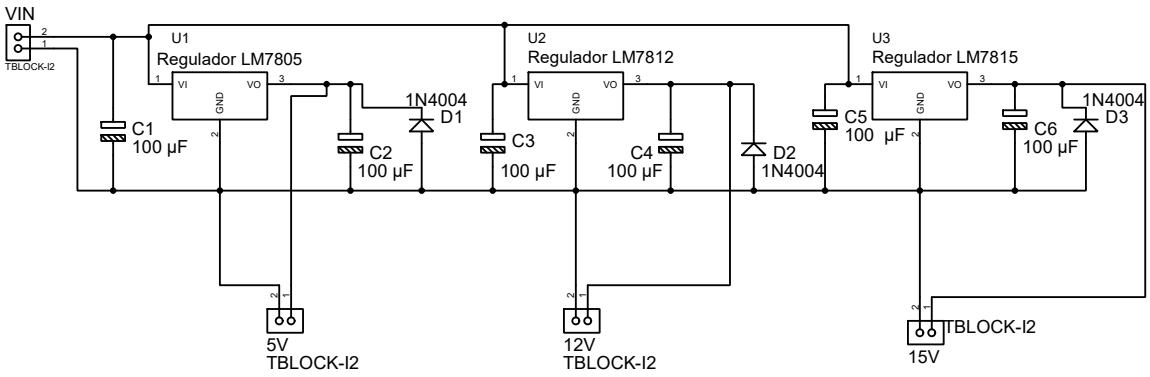



***Figura 10.*** *Esquema del circuito de la etapa de regulación.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Para suministrar la energía a los reguladores, se utiliza una fuente de alimentación comercial (Figura 11), siendo el regulador principal, que toma los 110 V AC de la red y los ajusta a 17 DC, y sobre éste, ya están conectados los reguladores donde cada uno se encarga de alimentar las partes del sistema antes mencionadas.

***Figura 11.*** *Fuente de alimentación conmutada.*
***Fuente:*** *Adquisición comercial.*

En la tabla 4, se puede observar las características de la fuente comercial implementada:

| **Tabla 4.** Características de la Fuente de alimentación. | |
|---|---|
| Voltaje de salida | 24 V DC |
| Corriente de salida | 2 amperios (A) |
| Potencia | 48 W |
| Dimensiones (Lado x Ancho x Altura) | 11 cm x 7.7 cm x 3.5 cm |

### 3.1.2 Etapa de control

Esta etapa de control corresponde a todo lo relacionado con el acondicionamiento de la señal de control, que debe pasar por una serie de pasos a través de diferentes componentes, hasta llegar a su instancia final, de acuerdo con la información recopilada durante el mapeo sistemático de literatura, teniendo en cuenta también los parámetros y límites de los componentes del prototipo.

#### 3.1.2.1 Topología de puente completo

En el proceso del desarrollo del prototipo de estufa de inducción, el primer paso es elegir el tipo de topología a implementar, en este caso, el inversor de puente completo (Figura 12), por sus ventajas como mejorar las bajas y altas frecuencias y además genera una disminución de armónicos en la tensión de salida, ya que la onda es más a la sinusoidal [91]. Esta topología consta de cuatro interruptores semiconductores, los cuales son controlados por dos drivers, uno en cada rama que se encarga de manejar la velocidad de conmutación con la que se encienden y apagan los FETs, esto es de forma cruzada, en donde en cada ciclo se activan dos,

luego se apagan y se prenden los otros dos y así sucesivamente [92]. Cabe destacar que estos componentes serán seleccionados posteriormente para su correcta intervención, pero es importante conocer el tipo de topología ya que este es el punto de partida del sistema.

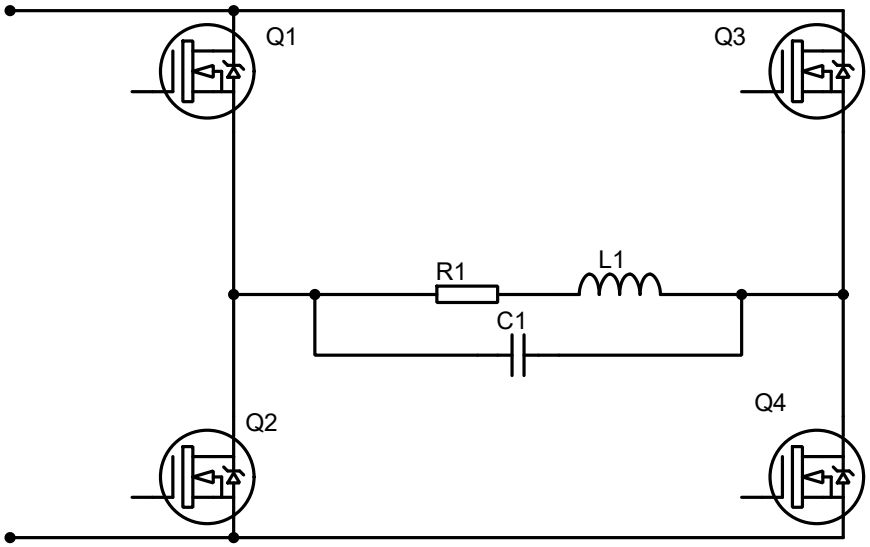



***Figura 12.*** *Esquema general de la topología puente completo en paralelo a la carga.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

La figura 13, muestra cómo deben activarse y desactivarse los FETs (Field-Effect Transistor en inglés, transistor de efecto de campo en español) en cada rama del puente. También hay que tener en cuenta que debe haber un tiempo muerto, principalmente cuando se apaga uno y se enciende el otro, para evitar que se activen al mismo tiempo, lo que podría generar un cortocircuito en el sistema [91].

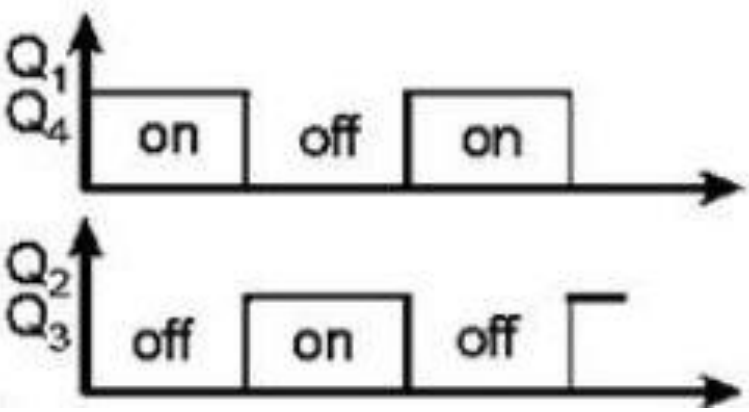



***Figura 13.*** *Onda de activación en cada rama de los FETs, inversamente con respecto a la otra.*
***Fuente****:* [91].

#### 3.1.2.2 Selección la frecuencia de operación

De acuerdo con el mapeo sistemático de literatura del Capítulo 2, para generar un calentamiento por inducción electromagnética, se debe generar una frecuencia adecuada, y un control de la potencia, para que el sistema entre en resonancia. Así, se utiliza una frecuencia de 20 KHz para el sistema de inducción en el ámbito doméstico [93], permitiendo una mayor eficiencia energética en el sistema de inducción y un mejor calentamiento en cuanto a ollas y/o sartenes grandes, especialmente en materiales ferromagnéticos, ya que el campo magnético generado es mayor, proporcionando que el calor sea uniforme y estable [94]. Ahora, para el control, se utiliza el método de modulación por ancho de pulso (PWM) [65], para ajustar la potencia de salida y tener un mayor control sobre el calentamiento. Es importante tener en cuenta que la eficiencia depende de otros factores, como los materiales, los componentes, el tipo de topología, la fuente de alimentación y la calidad, entre otros. Además, hay que tener en cuenta que los MOSFETs conmutarán a la frecuencia seleccionada y, en consecuencia, el circuito tanque resonará.

#### 3.1.2.3 Arduino Nano: acondicionamiento de la señal de control del prototipo de inducción

Ahora, se implementa un Arduino Nano (Figura 14), que es un dispositivo compacto y económico que utiliza un microcontrolador ATmega328 como procesador principal, ideal para prototipar proyectos electrónicos de forma rápida y sencilla, ya sean de baja o alta complejidad, ya que esta placa de desarrollo es compatible con una gran variedad de librerías y herramientas de programación, siendo favorable tanto para personas que se inician en el área de la programación como para profesionales [95].

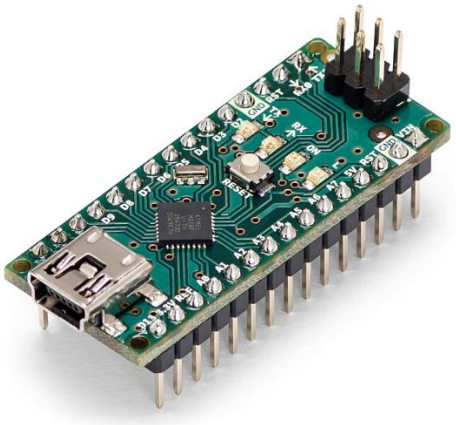


***Figura 14.*** *Arduino Nano como microcontrolador del sistema.*
**Fuente:** *Adquisición comercial.*

Para programar este dispositivo y generar señales PWM a la frecuencia requerida por el sistema, es necesario entender su arquitectura AVR y utilizar la variedad de funciones y registros disponibles en su procesador. Tales como la configuración de los modos de operación de los canales del temporizador, el preescalador del temporizador, el polarizado de la señal, el tiempo muerto y el control del ancho de onda, entre otros [96]. Esto se puede lograr mediante la programación y el uso adecuado de la diversidad de librerías y herramientas que el Arduino Nano ofrece en todo su esplendor.

Para cumplir con los requerimientos del sistema, se implementó un código (Figura 15) capaz de generar dos señales PWM 180° desfasadas a una frecuencia de 20 KHz. Además, se incluyó un control de ancho de onda mediante un potenciómetro, que evita el cruce de señal proporcionando un tiempo muerto, además de que a través de este componente se ajusta principalmente la temperatura del prototipo de estufa de inducción.

Código de control del prototipo de estufa de inducción

```
1  float a =0;
2  float b =0;
3
4  void setup() {
5  Serial.begin(9600);
6
7  TCCR1A = B10100010;
8  TCCR1B = B00010001;
9
10 ICR1 = 400;
11 TCNT1 = 0;
12
13 pinMode( 9, OUTPUT);
14 pinMode(10, OUTPUT);
15 }
16
17 void loop() {
18 a=analogRead(A0);
19 b=analogRead(A1);
20
21 float s = map(a,0,1023,50,135);
22 float f = map(b,0,1023,210,360);
23 myAnalogWrite( 9, s);
24 myAnalogWrite(10, f);
25 TCCR1A = (TCCR1A & 0b00111111) | 0b11000000;
26 }
27
28 void myAnalogWrite(int pin, int value) {
29 if (pin == 9) OCR1A = value;
30 if (pin == 10) OCR1B = value;
31 }
```

***Figura 15.*** *Diseño del código de control para el prototipo de estufa de inducción.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

### 3.1.2.4 Optoacoplamiento de la señal de control

El optoacoplador es un componente electrónico que tiene la función de proteger al microcontrolador, aislando la etapa de control y la etapa de potencia para que en caso de un corto circuito o algún daño en el área de potencia, el sistema quede protegido, por lo general, este semiconductor es encapsulado tipo DIP (Dual In-line Package en inglés, doble paquete en línea en español) [97]. Es importante seleccionar el tipo de optoacoplador adecuado, tomando en cuenta parámetros como el tiempo de respuesta, que es la velocidad con la que puede cambiar su estado, y también el ruido, ya que este podría generar que la señal salga correctamente o con perturbaciones, entre otros [98]. Así, debe tener la capacidad de trabajar en la frecuencia del sistema, garantizando que la onda cuadrada continúe en toda su forma.

De acuerdo al sistema, se sabe que se necesitan dos aisladores, uno para cada rama, que tuvieran un tiempo de respuesta rápido y que pudieran manejar la frecuencia de 20 KHz, por lo que se selecciona el optoacoplador 6N137, el cual consta (Figura 16) de un diodo emisor de alta intensidad y un fotodiodo de alta ganancia, este componente puede manejar altas frecuencias de conmutación [99], cumpliendo así con los requerimientos básicos del sistema.

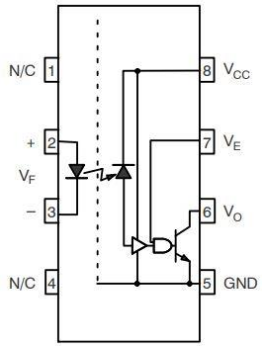



***Figura 16.*** *Esquema del optoacoplador 6N137.*
***Fuente:*** [99]***.***

### 3.1.2.5 Drivers y semiconductores de potencia

Profundizando en la topología de puente completo, descrita anteriormente, se implementan dos Drivers IR2113 de la marca International Rectifier [100], los cuales son utilizados para este tipo de topologías de puente completo, según la literatura y basados en electrónica de potencia, donde se utilizan para manejar las compuertas de los MOSFETs IRFP250N [101], cabe recordar que se implementan cuatro FETs donde se dividen en dos por cada rama con su respectivo driver.

Ahora, conociendo el driver IR2113, se utilizan los de tipo de paquete DIP (Figura 17), para tener una mejor manipulación, ya que el otro es el tipo superficie mucho

más pequeño, por lo que se requiere más precisión para soldar y maniobrar. También se puede encontrar el IR2110 que cumple la misma función, pero esto es de acuerdo al comercio en cada zona.

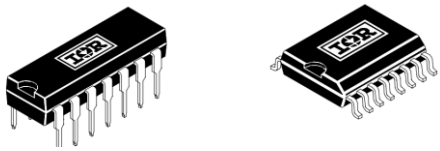


***Figura 17.*** *Driver IR2113 en sus dos tipos comerciales, de izquierda a derecha se tiene el tipo encapsulado y el de superficie.*
***Fuente****:* [100].

A continuación, se muestra la conexión típica del controlador (Figura 18), sin embargo, esto varía en función de cada aplicación, pero es una base para entender la función de los pines del IR2113.

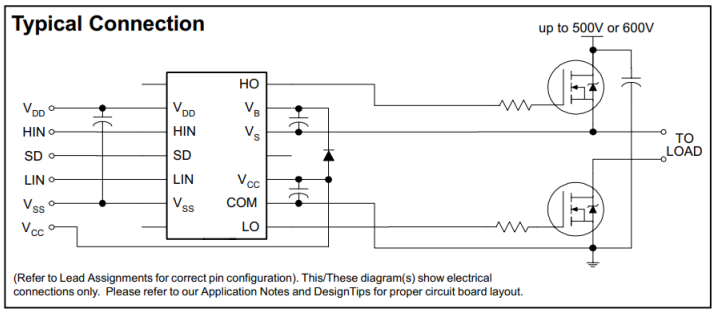



***Figura 18.*** *Típica conexión del controlador IR2113.*
***Fuente:*** [100].

En la Tabla 5, se muestran algunas de las características del controlador, también se pueden encontrar muchos más detalles en la hoja de datos del controlador IR2113.

| **Tabla 5.** Características del driver IR2113. | |
|---|---|
| Cantidad de canales | 2 |
| Tipo de configuración | Lado alto y lado bajo |
| Entrada de voltaje Mínima ($V_{OUT}$) | 10 V |
| Entrada de voltaje máxima ($V_{OUT}$) | 20 V |
| Tipo de aislamiento | Cambio de nivel funcional |
| Corriente de salida (Fuente) | 2.5 A |
| Corriente de salida (Disipación) | 2.5 A |
| Desactivar retraso de propagación ($t_{off}$) | 94 ns |
| Activar retardo de propagación ($t_{on}$) | 120 ns |
| $V_{bs}$ UVLO (encendido) | 8.6 V |
| $V_{bs}$ UVLO (Apagado) | 8.2 V |
| $V_{CC}$ UVLO (Encendido) | 8.5 V |
| $V_{CC}$ UVLO (Apagado) | 8.2 V |
| Clase de voltaje | 600 V máximo |

Continuando, se aclara que para elegir los MOSFETs se debe tener en cuenta el voltaje, la corriente, la frecuencia y la temperatura que pueden manejar, entre otros. Teniendo en cuenta lo anterior y que el prototipo está diseñado para trabajar con corriente alterna o con corriente continua, según la que vaya a utilizar, donde una de ellas es la red alterna controlada a través de un transformador reductor.

De esta manera, se selecciona el MOSFET IRFP250N de la marca IOR, el cual es adecuado para el sistema ya que es capaz de suplir las necesidades básicas del prototipo, además de ser económico en el mercado. Puede manejar un voltaje máximo entre sus terminales D (Drain) y S (Source) de hasta 200 V, con una corriente máxima de 30 A (Figura 19), además este FET es generalmente utilizado para aplicaciones que manejan frecuencias menores a 100 KHz, entre muchas otras características que se pueden ver en su respectiva hoja de datos [101]. Hay que tener en cuenta que para el correcto funcionamiento de los drivers y los MOSFETs, se debe aplicar entre estos dos un circuito llamado “Bootstrap capacitor”.

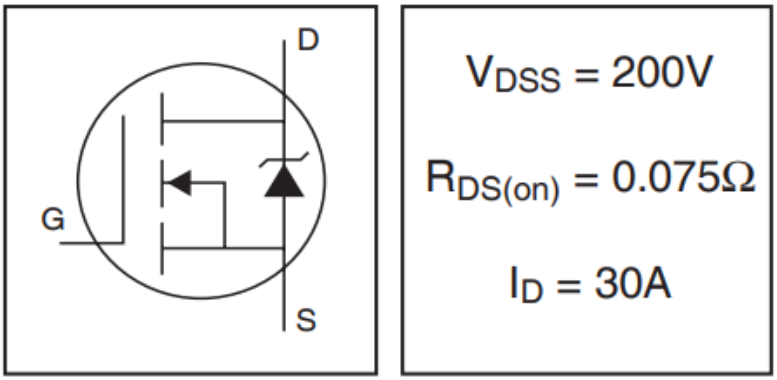



***Figura 19.*** *Esquema del MOSFET IRFP250N e información general.*
***Fuente:*** [101].

### 3.1.2.6 Circuito capacitor bootstrap

Para mejorar la eficiencia del sistema y principalmente para generar una alimentación flotante $V_{bs,}$ que se refiere al voltaje entre los pines $V_b$ y $V_s$ del driver IR2113, garantizando así el correcto trabajo del circuito integrado, se debe tener en cuenta que la alimentación de este oscila en el rango de 10V y 20V. De esta manera se implementa el método mejor conocido como “Bootstrap capacitor”, donde este es una combinación de un diodo y un capacitor como se muestra en la figura 20, por lo que se debe aplicar el cálculo correspondiente y en base al resultado obtenido utilizar el componente con ese valor o uno cercano, de acuerdo a los componentes comerciales de cada lugar, ya que si esto no se implementa correctamente, el sistema puede sufrir serios daños, provocando que el integrado IR2113 se queme, ya que estos son extremadamente sensibles. Este método implementado tiene ciertas ventajas ya que es simple de implementar, pero tiene ciertas limitaciones en cuanto al ciclo de trabajo y tiempos de encendido ya que el capacitor de arranque

debe ser refrescado, por lo tanto, es necesaria una elección adecuada de este componente ya que puede disminuir considerablemente las limitaciones del sistema [102].

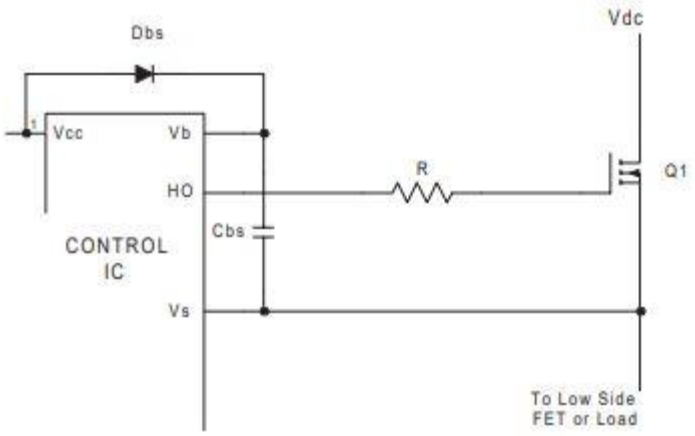



***Figura 20.*** *Esquema básico del circuito bootstrap para una sola rama del FET.*
***Fuente:*** [103].

Según la Figura 20, podemos detallar que el capacitor de arranque se carga a través del diodo de arranque, sólo cuando Vs baja a tierra a través del FET en el lado bajo de la carga, generando así una alimentación $V_{bs}$. Cabe destacar que al implementar una topología de puente completo, el sistema necesita utilizar dos controles IC, en este caso, los drivers IR2113 [100], por lo que los cálculos deben aplicarse para cada circuito integrado, pero como son iguales, se aplica una fórmula ya que los valores son los mismos [103].

- **Cálculos del capacitor bootstrap**

Antes de iniciar el cálculo del capacitor bootstrap, es necesario considerar algunos factores que deben tenerse en cuenta en el momento del cálculo:

1. Carga necesaria para activar la puerta del MOSFET.
2. La corriente de reposo $I_{QBS}$ para la correcta activación del lado alto del circuito.
3. Corriente dentro de los niveles admisibles del circuito integrado.
4. Corriente de fuga del puerta-fuente del MOSFET.
5. Corriente de fuga del condensador de arranque.

Es importante mencionar que la corriente de fuga del condensador de Bootstrap sólo se toma en cuenta si es de tipo electrolítico, por lo tanto, si es de tantalio o cerámico se omite este valor [103], sin embargo, en este caso se implementó uno electrolítico debido a que son más comerciales y manejan mayores rangos de voltajes, por lo que se tomaron en cuenta sus parámetros. Así, con base en las recomendaciones dadas, se procede a calcular la carga mínima que debe

suministrar el condensador Bootstrap, la cual está dada por la ecuación ( 1 ), proporcionada por la nota de aplicación AN-978 [102].

$$Q_{bs} = 2 * Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs}}{f} \quad (1)$$

$Q_g$= Carga del lado alto del FET (En este caso del IGBT).
$I_{qbs(max)}$= Corriente de fuga del capacitor de Bootstrap.
$Q_{ls}$= Carga de cambio de nivel requerida por ciclo =5nC (500V/600V CI's) O 20nC (1200 V CI's).
$I_{Cbs}$= Corriente de reposo máxima de $V_{BS.}$
$f$ = frecuencia de operación (conmutación).

La tabla 6 muestra los datos extraídos de los componentes utilizados según los parámetros solicitados de la ecuación( 1 ), para calcular la carga mínima del sistema:

**Tabla 6.** Datos extraídos de los componentes**.**

| Símbolo | Valor | Localizado |
|---|---|---|
| $Q_g$ | 123 $nC$ | Ficha técnica del MOSFET IR2113 |
| $I_{qbs(max)}$ | 230 µA | Ficha técnica del driver IR2113 |
| $Q_{ls}$ | 5 $nC$ | Ficha técnica del driver IR2113 y nota de aplicación |
| $I_{Cbs}$ | 3 µ$A$ | Ficha técnica del capacitor electrolítico |
| $f$ | 20 $KHz$ | Valor seleccionado inicialmente |

De esta forma tenemos que la carga mínima tiene un valor de:

$$Q_g = 2 * (123 * 10^{-9}) + \frac{230 * 10^{-6}}{20 * 10^3} + (5 * 10^{-9}) + \frac{3 * 10^{-6}}{20 * 10^3} \quad (2)$$

$$Q_g = 2.6265 * 10^{-7} = 0.26265 * 10^{-6} \quad (3)$$

Ahora bien, el condensador de arranque debe ser capaz de suministrar al menos la carga calculada y retener toda su tensión, ya que si esto no se cumple se generarían algunas ondulaciones en el voltaje $V_{BS,}$ que podría caer. Después de todo, el voltaje no estaría en el rango requerido, provocando que la salida no funcione correctamente [103]. Por lo tanto, para calcular el condensador bootstrap se debe aplicar la ecuación ( 4 ) [102], que es similar a la anterior, pero con una ampliación y es la siguiente:

$$C \geq \frac{2 * [2 * Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs}}{f}]}{V_{cc} - V_f - V_{LS} - V_{Min}} \quad (4)$$

$V_{cc}$ = Fuente de tensión del área lógica
$V_f$ = Caída de voltaje a través diodo de Bootstrap
$V_{LS}$ = Caída de tensión a través del IGBT del lado o carga del driver del lado alto
$V_{Min}$= Voltaje mínimo que existe entre $V_B$ y $V_S$ del controlador

De esta forma, se obtienen los datos que se muestran en la Tabla 7, por lo que se aplican a la ecuación del condensador de Bootstrap. Cabe mencionar que para este proceso se toman en cuenta los datos de la Tabla 6.

**Tabla 7.** Datos complementarios.

| Símbolo | Valor | Localizado |
|---|---|---|
| $V_{cc}$ | 15 $V$ | Ficha técnica del driver IR2113 |
| $V_f$ | 0.7 $V$ | Ficha técnica del diodo Zener 1N4148 |
| $V_{LS}$ | 1.5 $V$ | Ficha técnica del MOSFET IRFP250N |
| $V_{Min}$ | 9.5 $V$ | Ficha técnica del driver IR2113 |

Ahora, implementando la ecuación ( 4 )**,** obtenemos que el valor del capacitor de Bootstrap es el siguiente:

$$C \geq \frac{2 * (2 * (123 * 10^{-9}) + \frac{230 * 10^{-6}}{20 * 10^{3}} + (5 * 10^{-9}) + \frac{3 * 10^{-6}}{20 * 10^{-3}})}{15 \ - 0.7 \ - 1.5 \ - 9.5} \quad (5)$$

$$C \geq 1.59 * 10^{-7} = 0.159 * 10^{-6} \quad (6)$$

Se puede observar que el capacitor bootstrap dio como resultado 0.15918 $\mu F$, sin embargo, se debe recordar que este es el valor mínimo de arranque que necesita el sistema, por lo que se recomienda multiplicarlo por un factor de 15, garantizando una mejor eficiencia y accionamiento de los integrados [103].

$$C_{bs} = C * 15 \quad (7)$$

$$C_{bs} = (0.1541 * 10^{-6}) * 15 \quad (8)$$

$$C_{bs} = 2.39 * 10^{-6} \quad (9)$$

Finalmente, se ha optado por implementar el capacitor ($C_{bs}$) de 2,2 $\mu F$ a 200V, debido a su fácil comercialización, cumpliendo los requisitos según los valores obtenidos y el sistema en general, lo cual es vital para el funcionamiento del prototipo.

- **Selección del diodo de bootstrap**

Ahora, según la Figura 18, se debe implementar un diodo bootstrap ($D_{bs}$), el cual es vital, ya que debe de tener la capacidad de bloquear la tensión de alimentación producida por la activación del lado alto del sistema. Por lo tanto, se recomienda utilizar diodos de recuperación rápida, que impidan el aumento de la carga realimentada a la alimentación $V_{cc}$ del circuito integrado, procediendo así a calcular el diodo de arranque que se basa en una relación con el valor obtenido anteriormente de la carga mínima ($Q_g$), obtenida en la ecuación ( 3 ) y la frecuencia de conmutación($f_c$).

$$I_f = Q_g * f \quad (10)$$

$$I_f = (0.26265 * 10^{-6}) * (20 * 10^{3} *) \quad (11)$$

$$I_f = 5.25 * 10^{-3} \quad (12)$$

Así, en base al resultado obtenido de la ecuación ( 12 ) se implementa el diodo Zener 1N4148, teniendo en cuenta algunas consideraciones como la tensión de alimentación y el tiempo de respuesta de este componente de acuerdo al sistema propuesto.

- **Protección bootstrap**

Esta sección consiste en implementar la protección contra inductancias parásitas y picos que se puedan generar en el sistema, por lo que se recomienda implementar un capacitor para el desacoplamiento, ahora bien, para seleccionar este capacitor generalmente se debe multiplicar el resultado obtenido del capacitor bootstrap ($C_{bs}$), por un factor de 10 [102]. Basándonos en los valores de los condensadores

disponibles en el mercado y en el resultado obtenido en la ecuación ( 15 ), se utiliza para el circuito un condensador de 2,2 $\mu F$ a 200 V.

$$Capacitor\ de\ protección = C_{bs} * 10 \quad (13)$$

$$Capacitor\ de\ protección = (2.39 * 10^{-6}) * 10 \quad (14)$$

$$Capacitor\ de\ protección = 23.9 * 10^{-6} \quad (15)$$

### 3.1.2.7 Circuito etapa de control

En esta sección, tenemos el esquema del circuito (Figura 21 y Figura 21.1), que cubre gran parte del control (microcontroladores, optoacopladores y drivers con su circuito bootstrap, entre otros). Cabe destacar que se están generando dos señales PWM a 20 KHz, una inversamente relacionada con la otra.

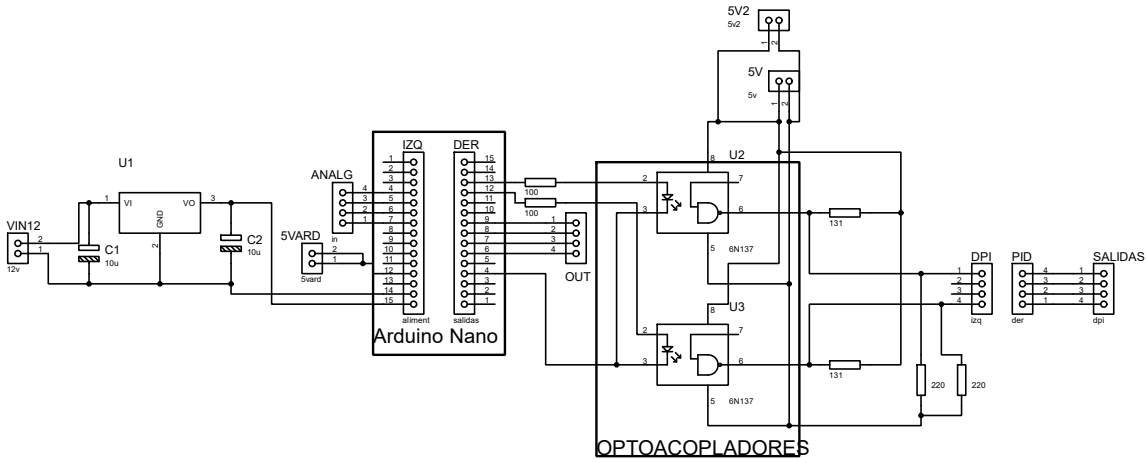



***Figura 21.*** *Esquema del circuito de la etapa de control.*
**Fuente:** Elaboración propia.

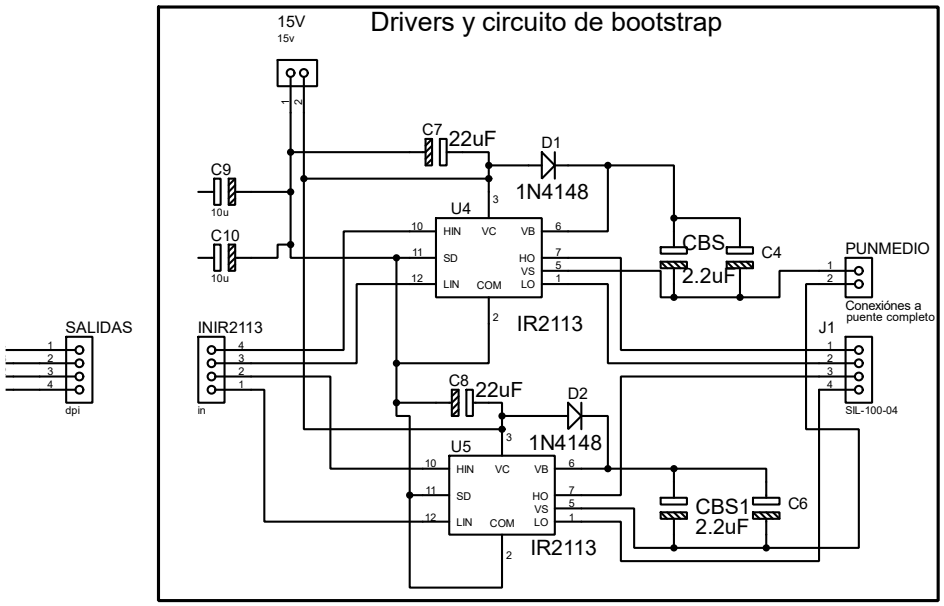



***Figura 21.1.*** *Continuación del esquema del circuito de la etapa de control.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

En este sentido, se puede observar el comportamiento de la señal proveniente del microcontrolador (Figura 22), en este punto la señal aún no tiene el tiempo muerto para evitar cortocircuitos.

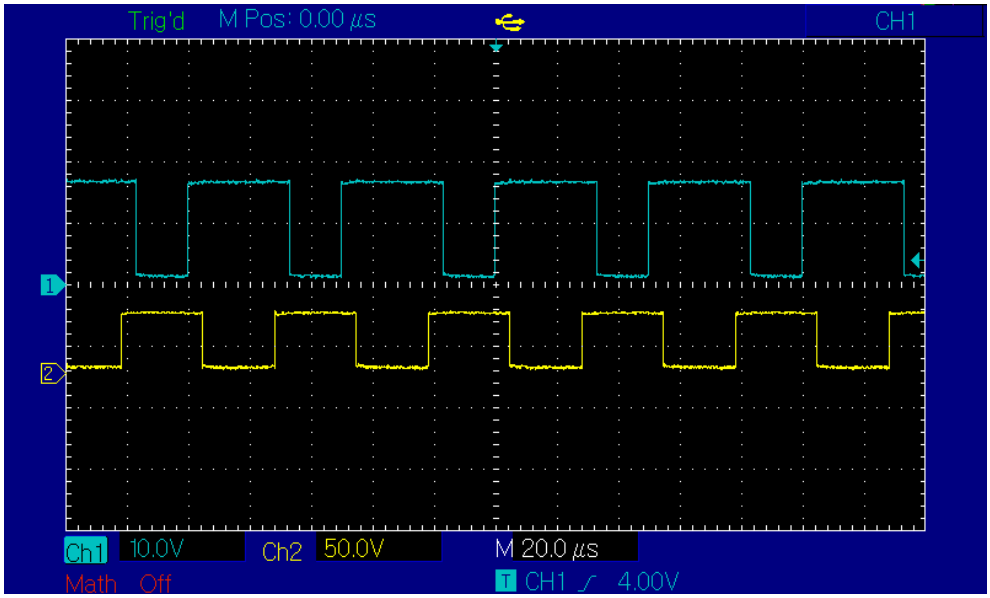



***Figura 22.*** *Señales PWM generadas desde el Arduino Nano.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Continuando, las señales PWM a través de los optoacopladores, aquí las señales ya tienen un tiempo muerto, también se puede controlar el ancho de la onda a través de un potenciómetro (Figura 23 y Figura 24).

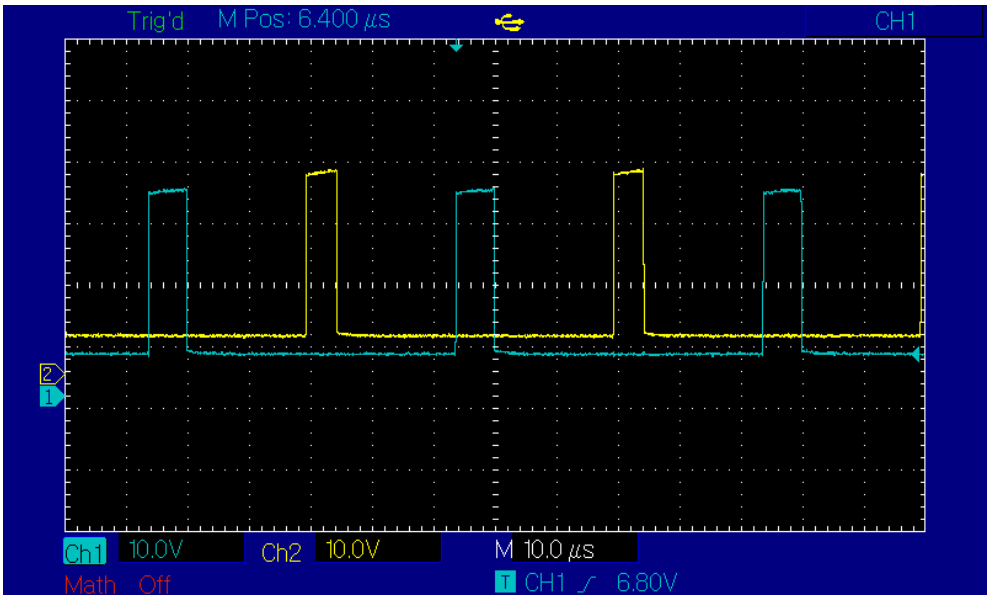



***Figura 23.*** *Señal optoacoplada con el ancho de pulso en su límite mínimo.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

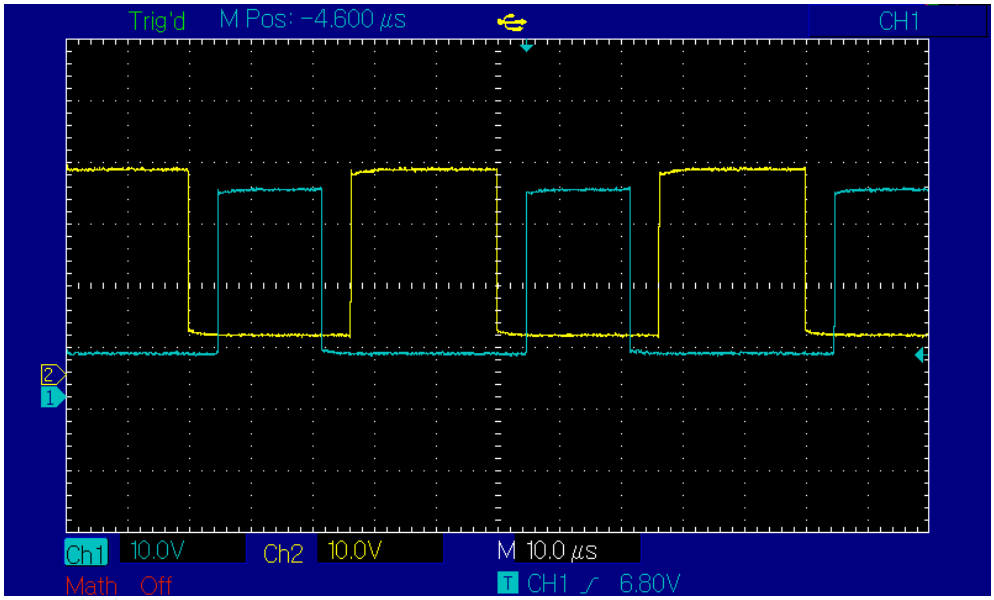



***Figura 24.*** *Señal optoacoplada con el ancho de pulso en su límite máximo.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Finalmente, la señal llega a los drivers (Figura 25 y Figura 26**)** que van de la mano con la sección del circuito del condensador de arranque. Cabe señalar que esta

señal es netamente en control, ya que luego es conducida, pero en la zona de potencia hasta llegar al circuito tanque de la bobina plana.

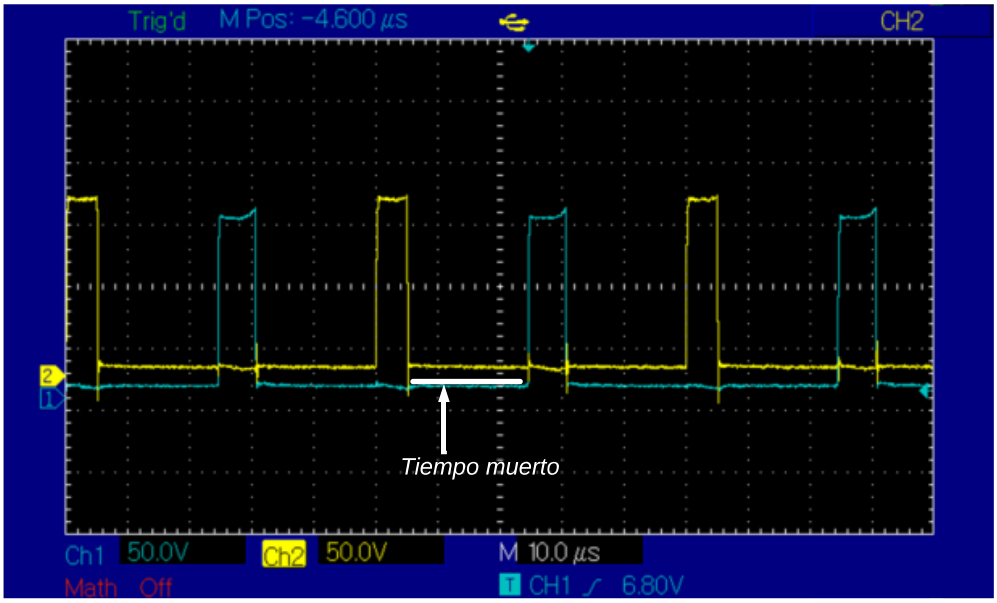



***Figura 25.*** *Señal a través del driver con el ancho del pulso en su límite mínimo, con tiempo muerto de 19 µs aproximadamente.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

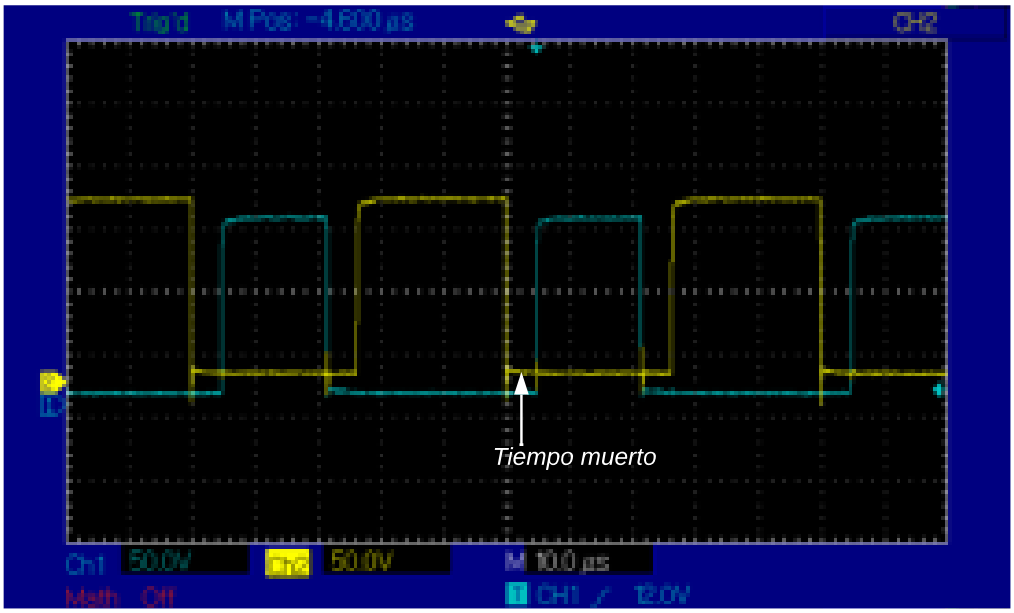



***Figura 26.*** *Señal a través del driver con el ancho del pulso en su límite máximo, con tiempo muerto de 4 µs aproximadamente.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

### 3.1.3 Etapa driver/mosfet

Esta sección corresponde a la etapa del circuito driver/mosfet (Figura 27), que abarca parte de la continuación del control, pero se centra en la potencia de los MOSFETs, que se conectan a las salidas de los canales de los controladores del circuito de control. De esta forma se dispone de cuatro FET, con una adaptación de protección para corrientes inversas.

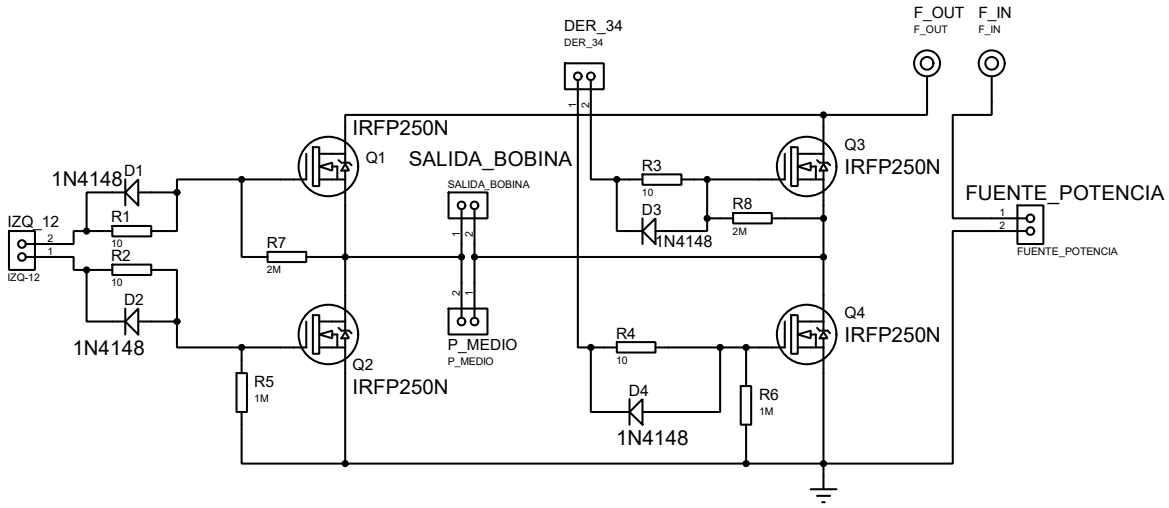



***Figura 27.*** *Esquema del circuito de la etapa driver/mosfet.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Cabe señalar que después de esto se conecta el capacitor tanque seguido por la bobina plana comercial, el cual se calcula y encuentra en la etapa de potencia y filtrados, ya que todas las etapas dependen unas de otras para el funcionamiento del sistema.

### 3.1.4 Etapa de potencia y filtrados

Esta etapa corresponde al circuito que cubre la potencia del sistema y el proceso de filtrado para tener un sistema estable, seguro y libre de perturbaciones o ruidos que puedan ser generados, ya sea por la red doméstica o por los componentes que conforman el prototipo.

#### 3.1.4.1 Rectificación y filtrado

Este proceso se utiliza para rectificar la señal de corriente alterna en una señal de corriente continua, ya que los componentes electrónicos necesitan este tipo de señal de DC. En este caso, se opta por utilizar el puente rectificador que está formado por diodos rectificadores (Figura 28), los cuales permiten que la corriente

fluya en un solo sentido, dejando pasar sólo los ciclos positivos de forma pulsante ya que se eliminan los ciclos negativos entrantes [104].

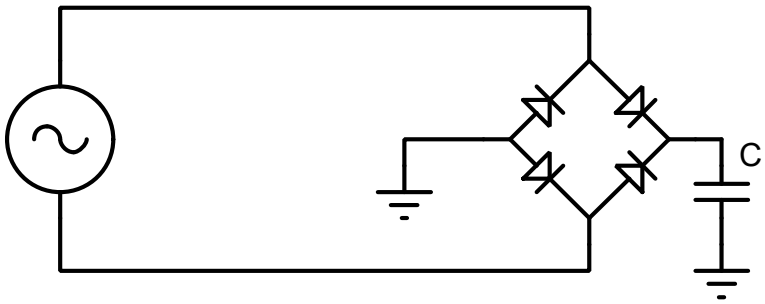



***Figura 28.*** *Esquema general de un rectificador en puente y filtrado.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Ahora, es necesario añadir a la rectificación un proceso de filtrado para eliminar el posible ruido que se pueda generar. De esta forma, se opta por implementar el método de filtración con condensador a la entrada, que es el más utilizado en electrónica, principalmente en fuentes de alimentación, ya que ayuda a eliminar los rizados de la señal rectificada, obteniendo una señal de corriente continua [104]. En la Figura 29, podemos tomar como referencia donde $V_{in}$ es un voltaje de entrada y $V_{out}$ es la tensión de salida y es lo que se busca para tener una señal continua según al $V_p$ (voltaje pico) limpia y lineal.

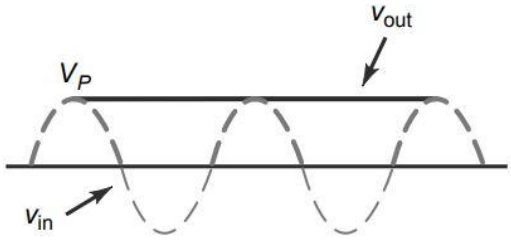



***Figura 29.*** *Onda ideal con la eliminación de rizados pasando a ser una función lineal en términos de corriente continua.*
***Fuente****:* [104].

### 3.1.4.2 Implementación filtro LC

Continuando en el proceso de alimentación, se implementa un filtro LC, cuya finalidad consiste en eliminar el ruido y las corrientes armónicas generadas por la conmutación de los diferentes elementos y/o componentes [30]. Para realizar el cálculo correspondiente se utilizó la ecuación( 16 ), proporcionada por Tituana y Santiago en [105]. Es importante señalar que se parte de un capacitor comercial de 560 nF a 650 V y la frecuencia del sistema es de 20 KHz.

$$L = \frac{1}{C * (f * \pi)^2} \quad (16)$$

Reemplazando los datos iniciales tenemos:

$$L = \frac{1}{(560 * 10^{-9}) * (20000 * \pi)^2} \quad (17)$$

$$L = 4.52 * 10^{-4} = 0.45 * 10^{-3} = 0.45\ mH \quad (18)$$

De acuerdo al resultado obtenido, se hace uso de una bobina toroidal de 0.45 mH (Figura 30), el cual se verifico su valor con un probador multicomponente.

***Figura 30.*** *Bobina toroidal.*
***Fuente:*** *Adquisición propia.*

### 3.1.4.3 Filtro EMI

Ahora, se implementa un filtro EMI purificador de ruido de red pública comercial (Figura 31), en este caso, se utiliza uno que trabaja a 110 V AC como a 220 V AC hasta un máximo de 15 A, el cual se utiliza en la entrada de corriente del equipo para filtrar las interferencias electromagnéticas que puedan provenir de la red eléctrica, además de que incluso los mismos componentes eléctricos pueden generar interferencias o ruido, por lo que es necesario aplicar de este filtro, ayudando así a proteger el sistema de cualquier evento que pueda afectar el estado del sistema. De esta manera, este dispositivo es utilizado para proporcionar un suministro de energía más limpio y estable, además de que puede ser utilizado para la mayoría de los aparatos eléctricos como televisores, fuentes de sonido, entre otros [106].

***Figura 31.*** *EMI filtro purificador de ruido de red pública.*
***Fuente:*** *Adquisición comercial.*

### 3.1.4.4 Circuito de la etapa de potencia

Posteriormente se realiza la unión e implementación de los temas pertenecientes a la sección de alimentación de potencia y filtrado (Figura 32), obteniendo así el circuito correspondiente a esta área. Cabe destacar la alimentación AC se conecta desde la sección de AC_FUENTE y el interruptor ubicado cerca del rectificador debe estar cerrado para que fluya la corriente, y para la alimentación DC el interruptor debe estar abierto para evitar inconvenientes con el área de rectificación, por lo que una vez abierto, se conecta en el punto de DC_FUENTE, este cambio debe hacer de realizarse manualmente, es decir, con la intervención de la persona dependiendo del tipo de alimentación que se vaya a utilizar.

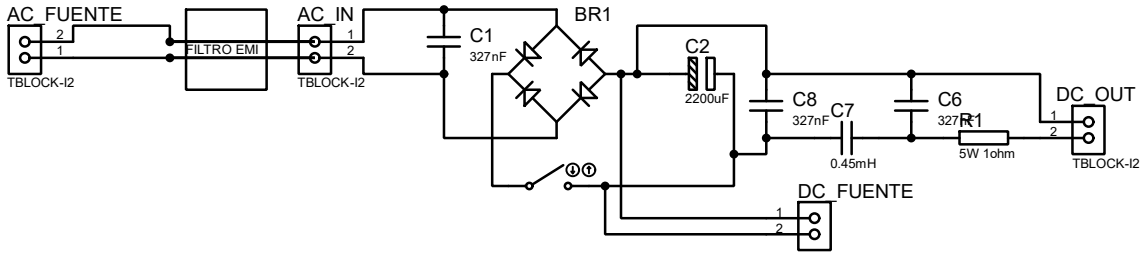



***Figura 32.*** *Esquema del circuito de potencia y filtrados.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

A continuación, en la Figura 33, se puede observar la señal que viene desde el transformador reductor que baja la tensión de la red domiciliario de 110 V AC a 46.7 V AC para tener así un proceso más controlado.

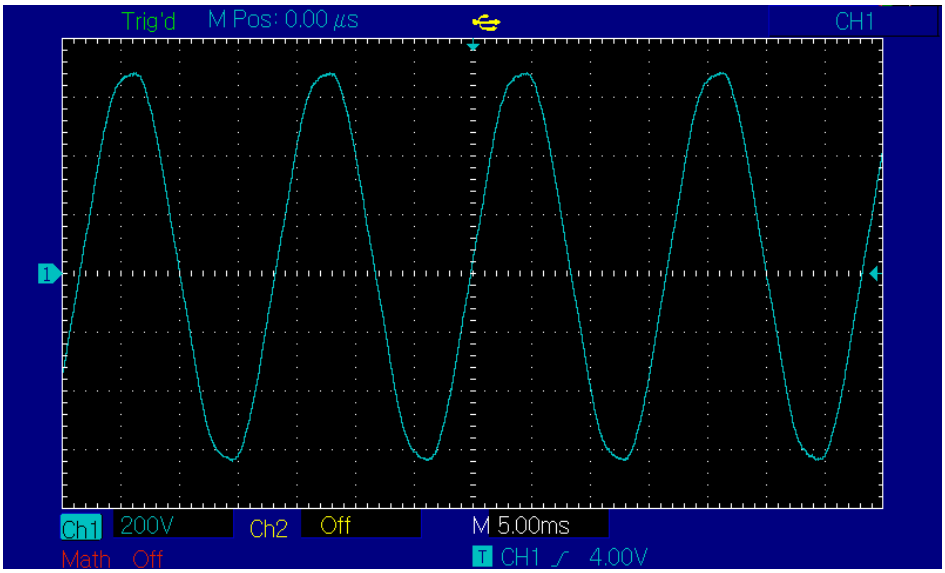



***Figura 33.*** *Señal proveniente del transformador reductor de 110 V AC a 46.5 V AC.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Una vez la señal sinusoidal tomada del transformador reductor, esta pasa a través del filtro EMI para eliminar cualquier ruido que puede estar dado en la red (Figura 34).

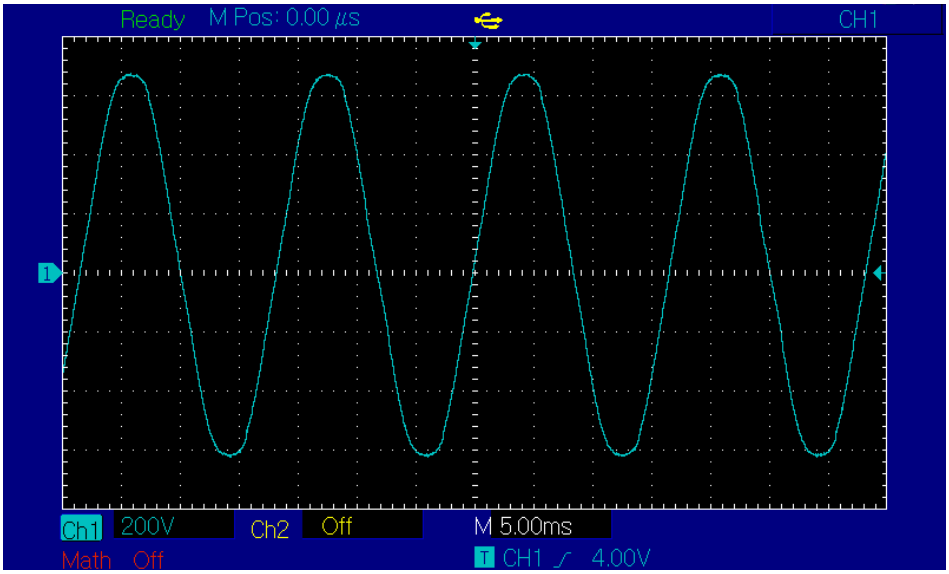



***Figura 34.*** *Señal proveniente del filtro EMI.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Continuando con el recorrido de la señal, esta al salir del filtro EMI pasa al rectificador y filtrado, el cual pasa esta señal a una de tipo DC, en este caso se puede observar una gran cantidad de ruido, el cual se tomó con un osciloscopio, donde la punta está en modo 10x.

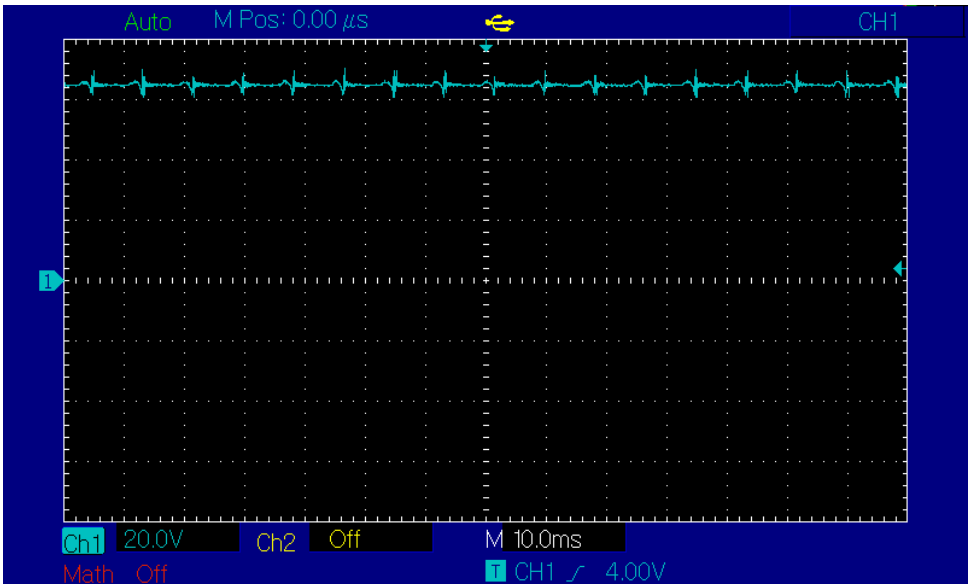



***Figura 35.*** *Señal rectificada a DC y primer filtrado.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Finalmente, una vez rectificada la señal pasa al filtro LC, que consigue reducir el ruido, sin embargo, sigue habiendo algo de ruido, pero en este punto, ya es trabajable para el sistema, por lo que un aumento de condensadores electrolíticos a la salida del filtrado podría hacer que la señal mejorase aún más.

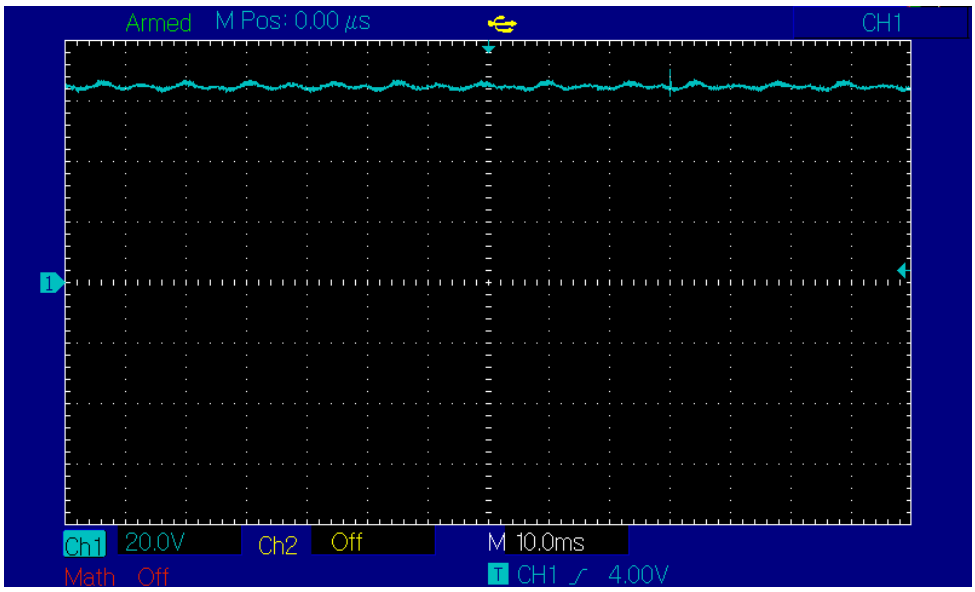



***Figura 36.*** *Señal final proveniente del filtro LC.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

### 3.1.4.5 Circuito tanque resonante

El circuito resonante del tanque consiste en una relación de inductancia y capacitancia (Figura 37), basado en un modelo de circuito LC, donde la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva son iguales, generando así el efecto conocido como resonancia, de acuerdo a la frecuencia seleccionada, de esta manera, se obtiene la inducción electromagnética, es importante señalar que durante este proceso se debe contar con la integración de todos los circuitos del prototipo [30].

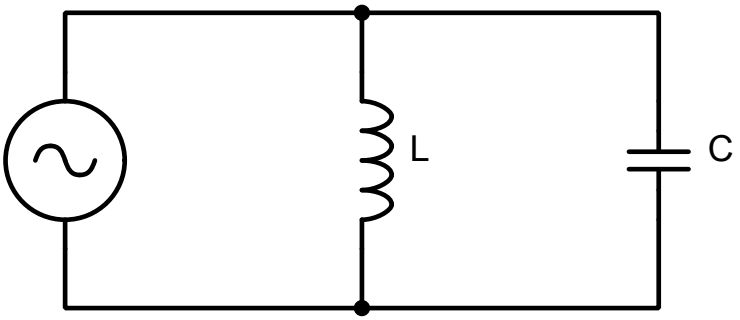



***Figura 37.*** *Esquema básico del circuito tanque resonante basado en un modelo LC.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Durante la implementación del circuito tanque, se partió de una bobina plana comercial (Figura 38), de la cual se procedió a extraer algunos datos para caracterizar e identificar sus dimensiones, número de espiras y modelo, entre otros. Durante este proceso, se utiliza un probador multicomponentes M329 tester lcr-t4 Esr resistencia, que permite conocer parámetros como la resistencia y la inductancia.

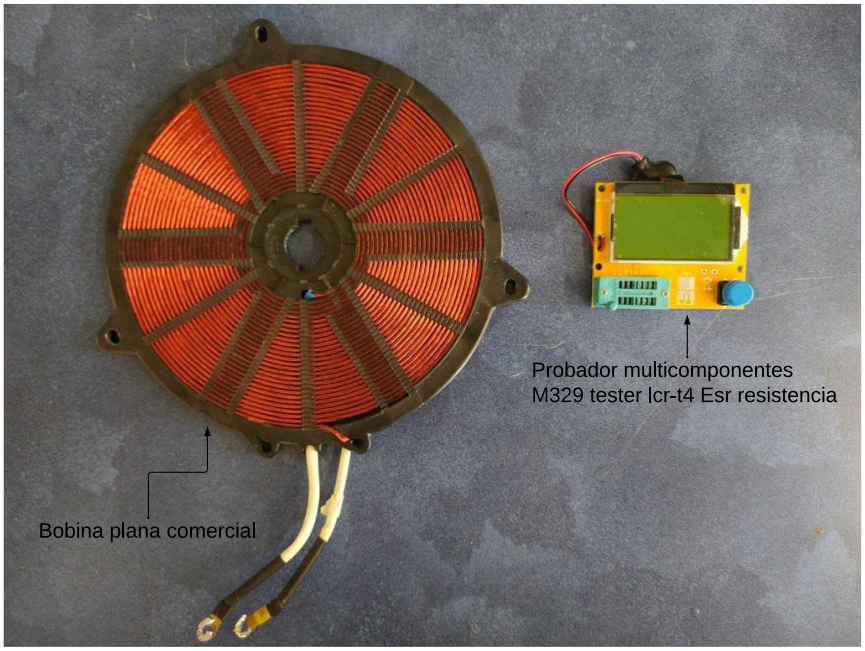



***Figura 38.*** *Bobina comercial plana y probador multicomponentes.*
***Fuente:*** *Adquisición comercial.*

A continuación, en la Tabla 8 se muestra los datos extraídos de la bobina plana comercial:

| **Tabla 8.** Datos extraídos de la bobina plana. | |
|---|---|
| Número de modelo | A22A |
| Origen | China |
| Material de las espiras | Alambre de aluminio esmaltado |
| Diámetro total | 195 mm |
| Número de espiras | 28 |
| Diámetro alambre bobina | 0.15 mm |
| Potencia | 2000 W |
| Inductancia (L) | 0.08 mH |
| Resistencia | 0.5 ohmios |

Una vez obtenidos estos datos, se calcula el capacitor tanque (C) aplicando la fórmula 6 proporcionada por Guerrero Silva y Funeme Molano en [30], teniendo en cuenta datos conocidos como la inductancia encontrada previamente de la bobina y la frecuencia de conmutación($f_c$) del sistema, de esta forma se realizan los cálculos correspondientes.

Se parte de la siguiente ecuación ( 19 ), a la cual se le despeja la variable C, para conocer el valor del capacitor tanque:

$$f = \frac{1}{2 * \pi\sqrt{L * C}} \quad (19)$$

$$C = \frac{1}{L * (2 * f * \pi)^2} \quad (20)$$

Así, se obtiene la ecuación ( 20 ) para calcular el capacitor tanque, ahora se procede a sustituir los variables por los valores conocidos:

$$C = \frac{1}{(0.08 * 10^{-3}) * (2 * 20000 * \pi)^2} \quad (21)$$

$$C = 0.79 * 10^{-6} \quad (22)$$

De acuerdo al resultado obtenido de la ecuación ( 22 ), se realiza un arreglo de capacitores comerciales en paralelo (Figura 39) donde se utilizaron dos de 0.45 mF a 630 V debido a que no se encontró algún condensador con la referencia exacta, cabe recordar que la suma de estos dos equivale a 0.90 mF.

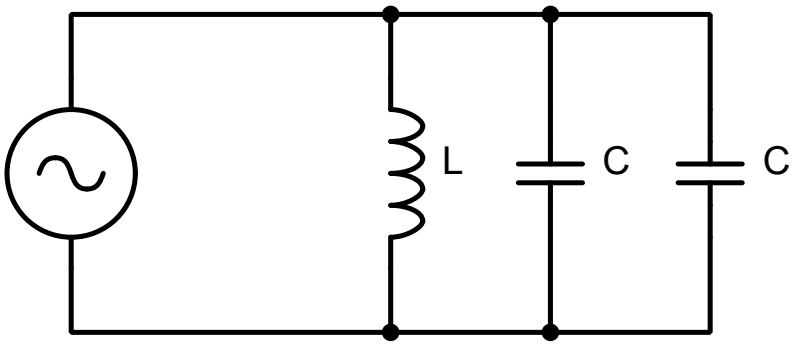



***Figura 39.*** *Esquema del circuito tanque con el arreglo de los capacitores en paralelo propuesto para el circuito tanque resonante.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

## 3.2 DISEÑO CAD E IMPLEMENTACIÓN

El modelado CAD (diseño asistido por computadora) es un proceso comúnmente utilizado en diferentes campos de la ingeniería, donde a través de software especializado, es posible crear diseños 2D y/o 3D, ya sea de estructuras, piezas,

sistemas, entre otros. En este proyecto se utilizaron las herramientas conocidas como Proteus [107] y SolidWorks [108].

### 3.2.1 Desarrollo y modelado 3D de circuitos electrónicos en Proteus

Inicialmente, se utiliza el software Proteus, el cual es una herramienta enfocada al diseño electrónico y de circuitos; sin embargo, entre sus opciones, tiene la función de mostrar el diseño en 2D y 3D, además de permitir simulaciones [107]. Por lo tanto, se utiliza para la elaboración de los PCB de las etapas mencionadas y explicadas en la sección de diseño electrónico. Cabe destacar que no todos los componentes se encontraban en las librerías, por lo que en algunos casos fue necesario tomar las dimensiones del elemento para insertarlo en la placa, dejando los orificios para los pines de acuerdo al componente.

#### 3.2.1.1 Modelado 3D e implementación del circuito regulador

Este circuito corresponde al esquema electrónico adjunto en la etapa de reguladores mostrado anteriormente en la Figura 10, al cual se le generó su diseño 3D y posteriormente se imprimió el circuito listo para ser plasmado, utilizando el método de planchado sobre la placa PCB [109].

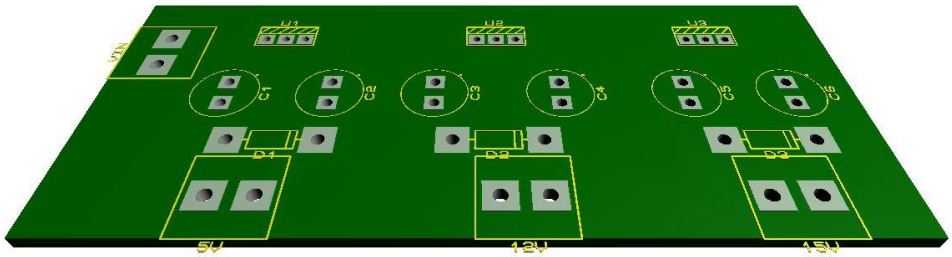



***Figura 40.*** *Circuito de la etapa de regulación en 3D sin componentes.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

La Figura 40, muestra el diseño 3D sin los componentes, y la Figura 41 con los componentes proporcionados por Proteus [107].

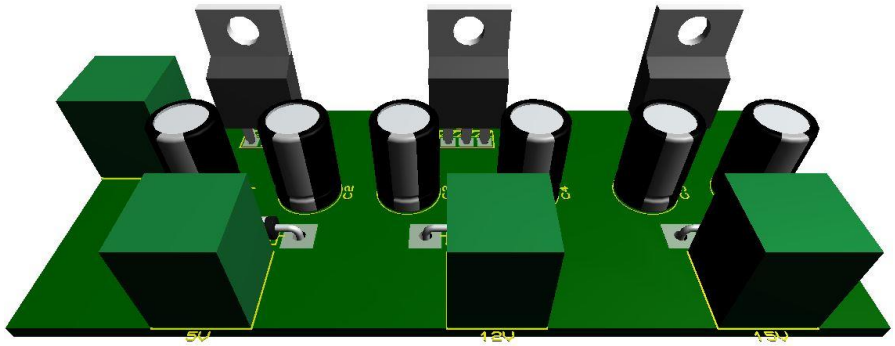



***Figura 41.*** *Circuito de la etapa de regulación con algunos componentes.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Posteriormente, la figura 42 corresponde al circuito que se va a imprimir.

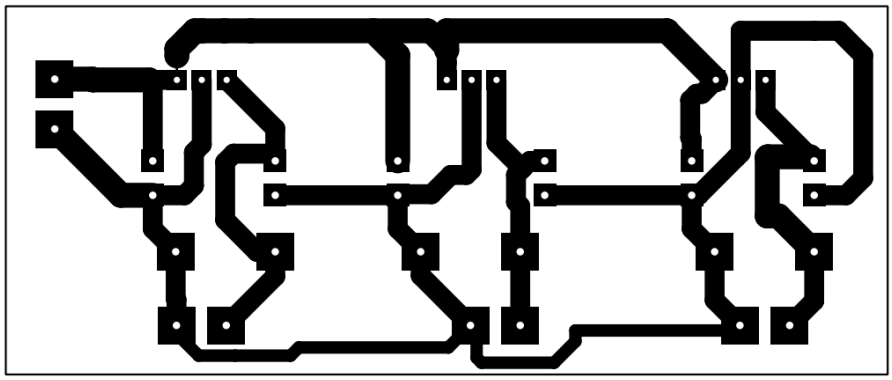


***Figura 42.*** *Esquema para impresión del circuito de la etapa de regulación.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Finalmente, el circuito montado físicamente se puede ver en la Figura 43, además de implementarlo con un disipador para evitar el calentamiento de los reguladores.

***Figura 43.*** *Implementación del circuito de regulación.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

### 3.2.1.2 Modelado 3D e implementación del circuito de control

En este apartado se realiza el diseño PCB del esquema correspondiente al circuito de la etapa de control. La Figura 44 muestra en primer lugar el modelo 3D de la placa sin componentes. Cabe señalar que se realiza a partir del esquema de control (Figura 21).

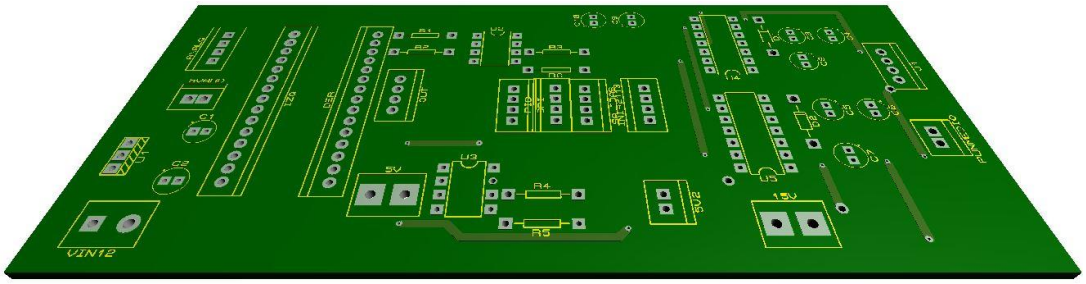


***Figura 44.*** *Circuito de la etapa de control en 3D sin componentes.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

En la Figura 45 se observa la placa con algunos de los componentes proporcionados por las bibliotecas del software Proteus [107].

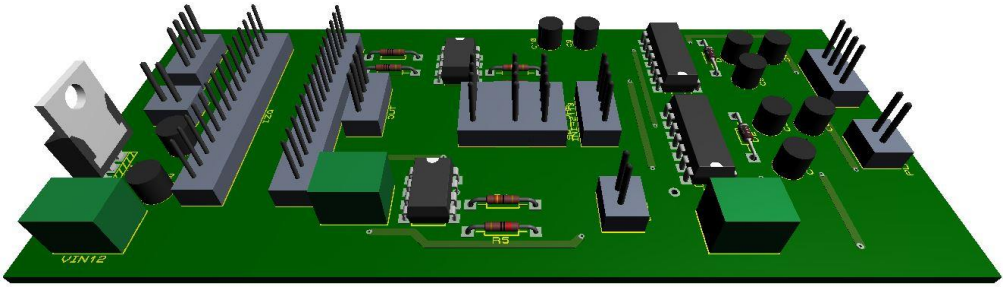


***Figura 45.*** *Circuito de la etapa de control en 3D con algunos componentes.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

A continuación, se dispone de un esquema del circuito en formato imprimible (Figura 46) para su implementación en la placa de circuito impreso.

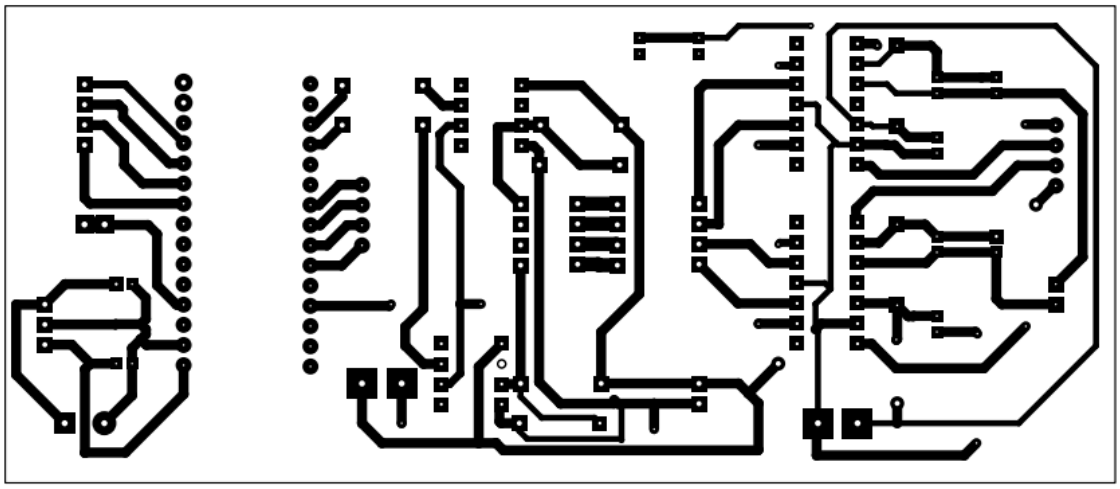


***Figura 46.*** *Esquema para impresión del circuito de la etapa de control.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Por último, en la figura 47, muestra el desarrollo y la implementación del circuito de forma física.

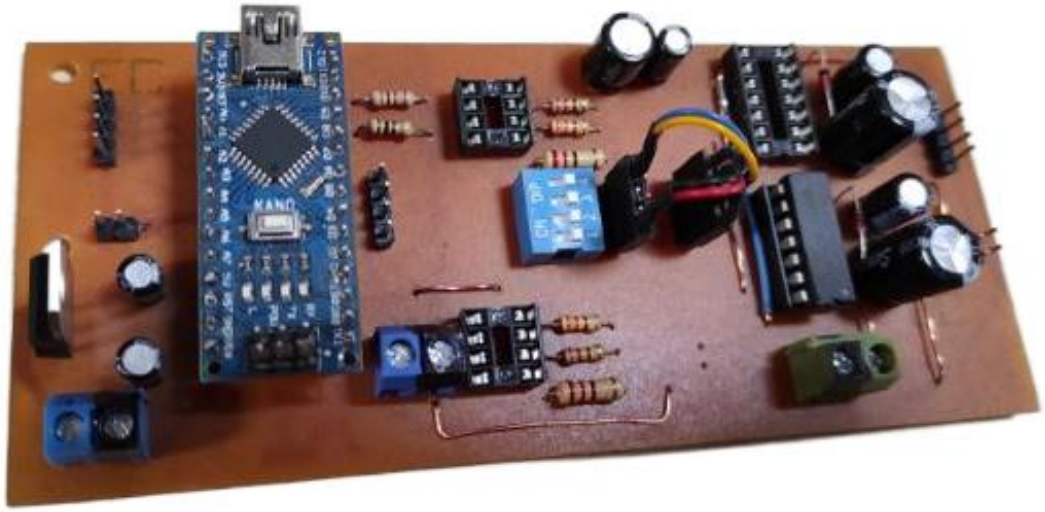


***Figura 47.*** *Implementación del circuito de control.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

### 3.2.1.3 Modelado 3D e implementación del circuito de driver/mosfet

Esta sección corresponde al circuito esquemático de la etapa driver/mosfet (Figura 27), de esta forma se genera la placa 3D, cuidando de que no existan errores de líneas o pistas que puedan causar problemas en el sistema. Así, en la Figura 48, se puede ver la PCB sin componentes.

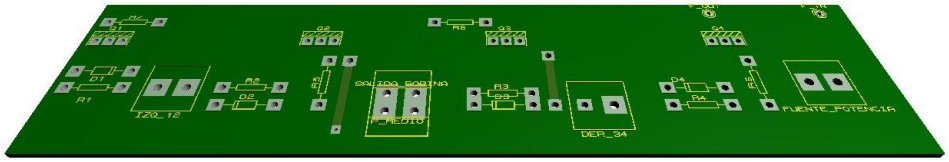


***Figura 48.*** *Implementación del circuito la etapa de driver/mosfet sin componentes.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

La figura 49, corresponde al circuito con los componentes proporcionados por Proteus y en la Figura 50 muestra el esquema para imprimir.

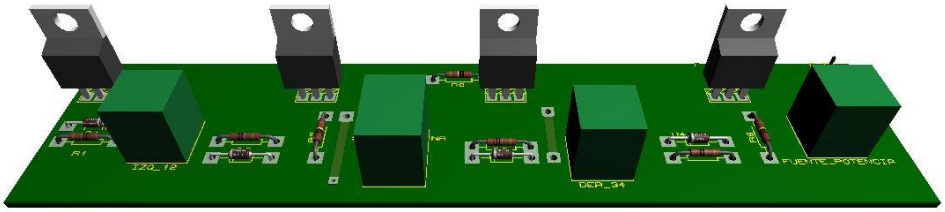


***Figura 49.*** *Implementación del circuito la etapa de driver/mosfet con componentes.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

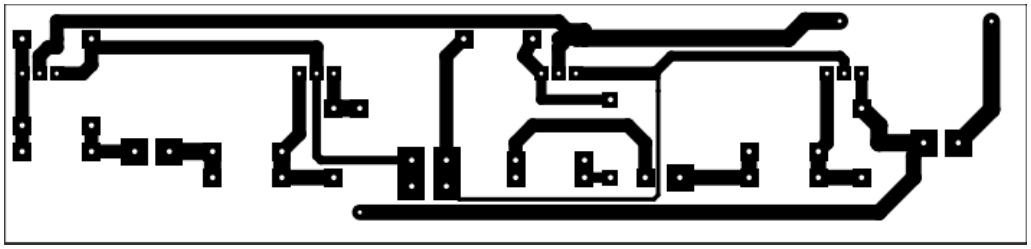


***Figura 50.*** *Esquema para impresión del circuito de la etapa de driver/mosfet.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Por último, se realiza la implementación, como se muestra en la Figura 51. Cabe destacar que la marca roja es el disipador implementado para los MOSFETs para disipar el calor generado por los mismos.

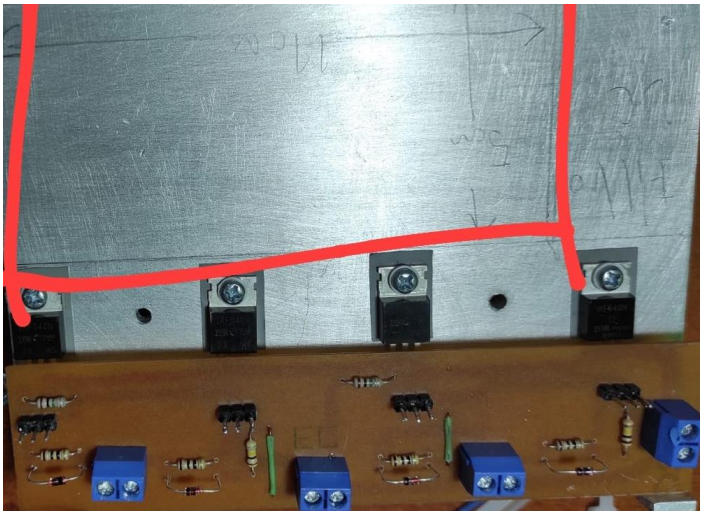


***Figura 51.*** *Implementación del circuito de la etapa de driver/mosfet.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

### 3.2.1.4 Modelado 3D e implementación del circuito de potencia y filtrado

Este paso corresponde al modelo 3D de algunas partes del circuito propuesto anteriormente para la etapa de potencia y filtrados (Figura 32). Así, en la Figura 52 se muestra la PCB 3D sin componentes.

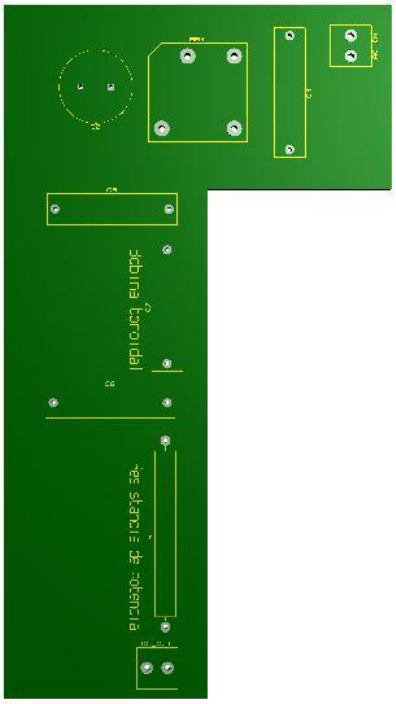


***Figura 52.*** *Circuito de la etapa potencia y filtrados en 3D sin componentes.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

En la Figura 53, se puede observar el circuito con algunos componentes.

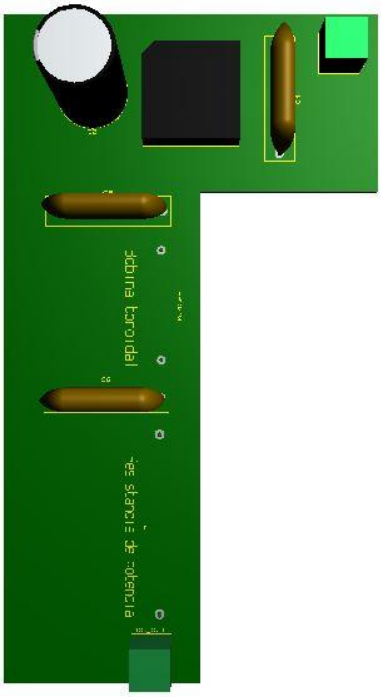


***Figura 53.*** *Circuito de la etapa potencia y filtrados en 3D con componentes.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Por último, la Figura 54 muestra la realización de la tarjeta física. Cabe señalar que esta tarjeta no se hizo por el método de planchado, por lo que no fue necesario imprimir el circuito, sino que se hizo a mano alzada.

***Figura 54.*** *Implementación del circuito de la etapa de potencia y filtrados.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

### 3.2.2 Desarrollo y modelado 3D del chasis empleando SolidWorks

El modelado de la estructura o chasis se lleva a cabo utilizando el software SolidWorks, que es una herramienta muy popular en el campo de la industria para el diseño mecánico y de productos. Con la capacidad de crear modelos 3D y ensamblajes, así como realizar una gran variedad de funciones de análisis y simulación, por lo tanto, esta herramienta es ideal para crear el chasis del prototipo de la estufa de inducción, donde cada pieza se crea en esta herramienta y luego se ensambla de forma simulada para verificar el diseño y comprobar posibles errores. La figura 55 muestra el ensamblaje 3D resultante del proceso [108].

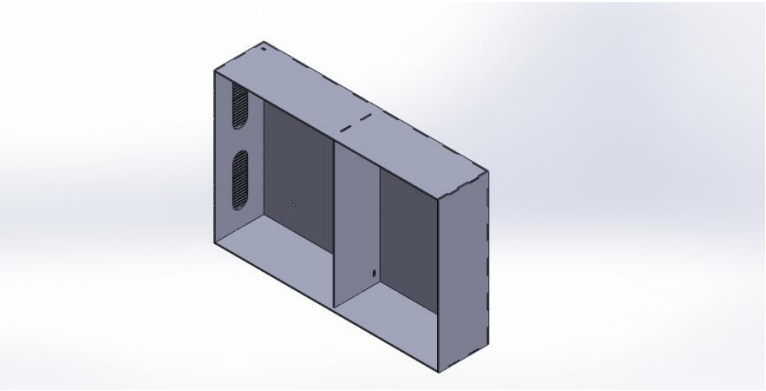


***Figura 55.*** *Ensamblaje 3D del chasis del prototipo de estufa de inducción.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

A continuación, una vez que todo está correcto en el ensamblaje 3D, cada pieza (Figura 56) se exporta a un archivo con extensión dfx para ser cortada por una máquina láser, a la que se le debe configurar la potencia y velocidad, mediante el software RDWorksV8 [110], de acuerdo al material, en este caso, se utiliza una lámina acrílica negra de 60 cm de largo, 90 cm de ancho y con un espesor de 2.4 mm.

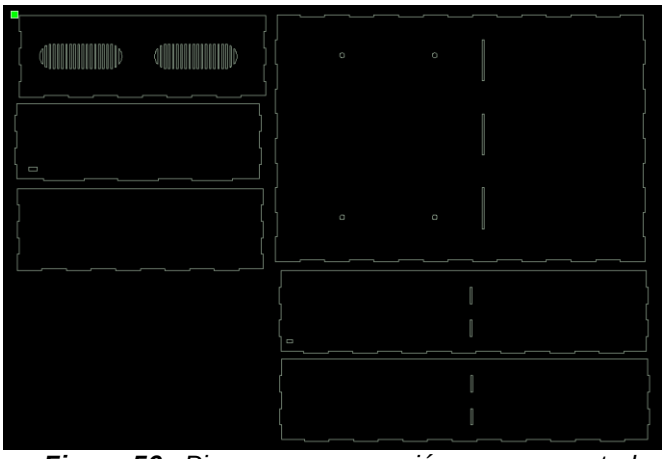


***Figura 56.*** *Piezas en preparación para ser cortadas.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Posteriormente, una vez cortadas las piezas, se realiza el ensamblaje (Figura 57), que se sujeta con soportes en forma de L, para dar mayor firmeza a la estructura y también para poderla montar y desmontar en caso de tener que realizar algún cambio.

***Figura 57.*** *Implementación de la estructura del prototipo.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Por último, el diseño de la estructura se divide en dos zonas como se muestra en la Figura 58, una específica para las placas de circuito impreso y todo lo relacionado con la electrónica y otra para la bobina plana, que sería boquilla.

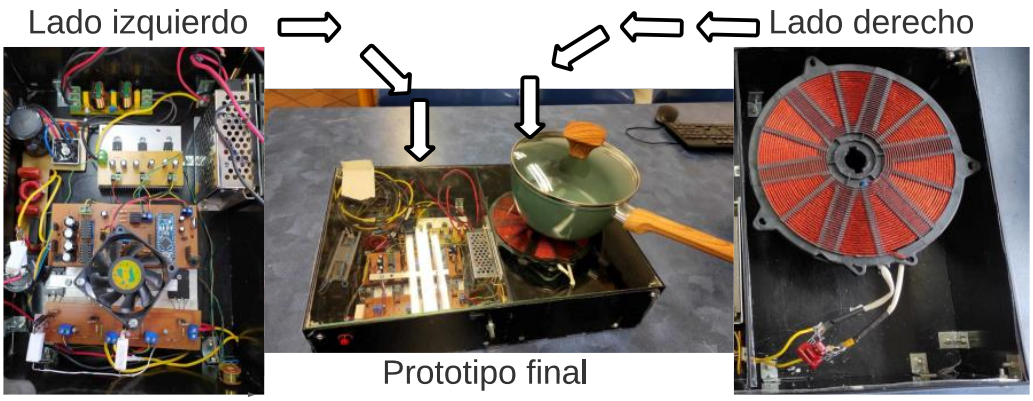



***Figura 58.*** *Implementación del prototipo final.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

# 4 CAPÍTULO 4 - VALIDACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

En este capítulo se lleva a cabo la validación del prototipo de estufa de inducción con doble suministro energético. De tal forma que el sistema pueda funcionar tanto con corriente alterna como con corriente continua de forma controlada. Cabe señalar que, durante el mapeo sistemático de la literatura, no se encontró ningún método estandarizado para validar el funcionamiento de estos prototipos de estufas de inducción con doble fuente de alimentación a escala de laboratorio.

De esta manera, el prototipo es sometido a pruebas a escala de laboratorio (Figura 59), llevando un proceso controlado para analizar y observar el comportamiento del sistema y validar que sea óptimo para operar con los dos tipos de energía mencionados anteriormente. Cabe señalar que se deben seguir algunas consideraciones, mencionadas en las secciones de este capítulo.

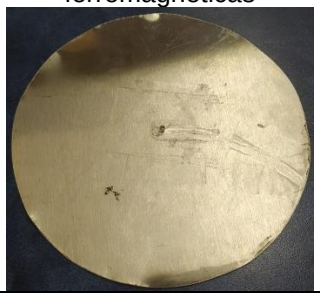
***Figura 59.*** *Collage de fotos del prototipo de estufa de inducción con doble suministro energético, en laboratorio.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Asimismo, se compararon los resultados de esta investigación con los obtenidos en [34], que es un prototipo enfocado al campo de las estufas de inducción con doble alimentación energética. Cabe señalar que existen algunas diferencias en la construcción de los prototipos, como topología y componentes utilizados, entre otros que se mencionan más adelante, por lo que no es posible realizar una confrontación como tal con los resultados. Sin embargo, es una base y guía de apoyo.

## 4.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA DE CONCEPTO

En este orden de ideas, se propone someter tres piezas, un disco de zinc, un disco de acero inoxidable con propiedades ferromagnéticas y una sartén especial (Tabla 9) al calentamiento por inducción electromagnética, primero, utilizando la entrada de energía en corriente continua (DC/CC) y, después, en corriente alterna (AC/CA). De este modo, se comprueba que el sistema es óptimo para ser alimentado por cualquiera de estos dos tipos de energía y se observa el calentamiento del dispositivo.

**Tabla 9.** Elementos utilizados para las pruebas de concepto de calor por inducción.

| Material | Especificaciones generales |
|---|---|
| Disco de Zinc | Diámetro =19.4 cm<br>Espesor = 0.20 mm |
| Acero inoxidable con propiedades ferromagnéticas  | Diámetro = 19 cm<br>Espesor = 1.15 mm |
| Olla y/o perol especial | Diámetro = 18 cm<br>Altura = 8.3<br><br>Cabe destacar que esta olla y/o perol es especial porque se puede utilizar para diferentes cocinas, incluidas las de inducción, ya que la parte inferior de la base tiene una especie de disco empotrado con propiedades ferromagnéticas, y el resto está distribuido por diferentes materiales. Para más especificaciones, véase [111]. |

En el presente estudio, cada pieza (Tabla 9) se sometió a diferentes tensiones (12 V DC, 24 V DC, 32 V DC y 46.5 V AC) durante cinco minutos para realizar una prueba controlada en el laboratorio. El material se aplicó directamente sobre la bobina plana y se consideró un tiempo adecuado para la toma de datos, evitando la

fatiga o el desgaste del quemador. Cada prueba se realizó con cinco réplicas para cada voltaje en cada material, para tomar datos sobre la temperatura alcanzada por el material, así como el consumo de amperaje del sistema propuesto.

Después de cada prueba, se dejaba reposar el prototipo durante un periodo de 10 a 20 minutos y se realizaba una comprobación rápida de los componentes para asegurarse de que funcionaban correctamente. En particular, se tuvo en cuenta la posibilidad de sobrecalentamiento de los MOSFET, ya que pueden soportar tensiones, corrientes y temperaturas elevadas, como se mencionó en la etapa de control. Para reducir las temperaturas, se adaptaron distintos disipadores, uno para los reguladores y otro para los MOSFET, y también se implementó un ventilador.

## 4.2 EQUIPOS Y/O ELEMENTOS A USAR

En este apartado se realizará la correspondiente descripción de los equipos utilizados para el funcionamiento del sistema tanto para entrada AC como DC. Además, se utilizarán algunos otros dispositivos para extraer algunos datos del prototipo como la temperatura ambiente de la pieza y la temperatura alcanzada durante el tiempo mencionado, así como el consumo sin carga y con carga.

En primer lugar, para la alimentación de corriente continua, se utiliza una fuente de alimentación de laboratorio, que permite regular los voltajes, a partir de los cuales se obtienen 12 V DC, 24 V DC, y finalmente 32 V DC, que es el máximo que proporciona este equipo (Figura 60) [112]. Por otro lado, para la otra fuente de alimentación de AC, se realiza un sistema a partir de un transformador reductor (Figura 61), el cual pasa de 110 V AC a 46.5 V AC para tener un proceso controlado y seguro en el laboratorio.

***Figura 60.*** *Fuente para pruebas del suministro DC a 12 V DC, 24 V DC y 32 V DC.*
***Fuente:*** *Adquisición de la CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA-UNICOMFACAUCA.*

***Figura 61.*** *Sistema para pruebas del suministro AC a 46.5 V AC en su interior el transformador reductor.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

En segundo lugar, se utilizaron herramientas de medida para obtener los datos de temperatura alcanzados por cada material durante el tiempo propuesto. En

concreto, se utilizó una cámara termográfica de bolsillo Fluke Pti120 (Figura 62) [113] y un pirómetro (Figura 63) con su respectivo termopar tipo K, que se adaptó a la pieza para asegurar que el valor de temperatura indicado en un dispositivo era el mismo o aproximado en el otro.

***Figura 62.*** *Cámara termográfica de bolsillo Fluke PTi120.*
***Fuente:*** *Adquisición de la CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA-UNICOMFACAUCA.*

***Figura 63.*** *Pirómetro y/o controlador de temperatura.*
***Fuente****: Adquisición propia*

En tercer lugar, se utilizaron dos multímetros (Figura 64) para realizar mediciones específicas en el sistema. El primer multímetro se utilizó para observar y tomar datos de consumo sin carga en la parte más baja del control, es decir, en el potenciómetro. Esto permitió medir el consumo del sistema mientras estaba encendido, pero a baja temperatura, sin tener ninguna pieza en la bobina plana. También se utilizó el mismo equipo para medir el consumo con carga encima del quemador, es decir, con el material encima de la bobina plana a una temperatura más alta.

Por otra parte, el segundo multímetro se utilizó únicamente para controlar el sistema, en particular el consumo de amperaje de la etapa de control. De este modo, se pudo comprobar que el sistema funcionaba correctamente y que no había anomalías que pudieran afectarlo.

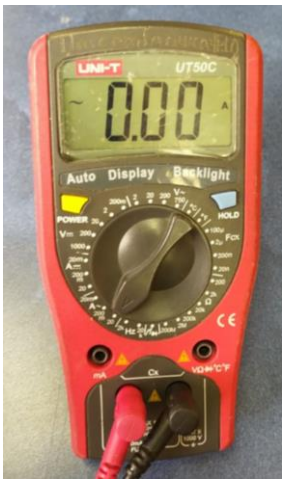



***Figura 64.*** *Multímetro.*
***Fuente:*** *Adquisición de la Corporación Universitaria Comfacauca-Unicomfacauca.*

En cuanto al conexionado, sólo se puede tener en cuenta la Figura 32, donde el esquema muestra las entradas para la fuente de corriente alterna y la fuente de corriente continua, de forma que, si se utiliza la entrada de corriente alterna, hay que poner el polímetro en serie en modo amperímetro para poder observar el consumo de amperaje, y lo mismo para la entrada de la fuente de corriente continua. En este sentido, sólo se utiliza un aparato y depende de la entrada utilizada, pero queda una representación (Figura 65) de la conexión.

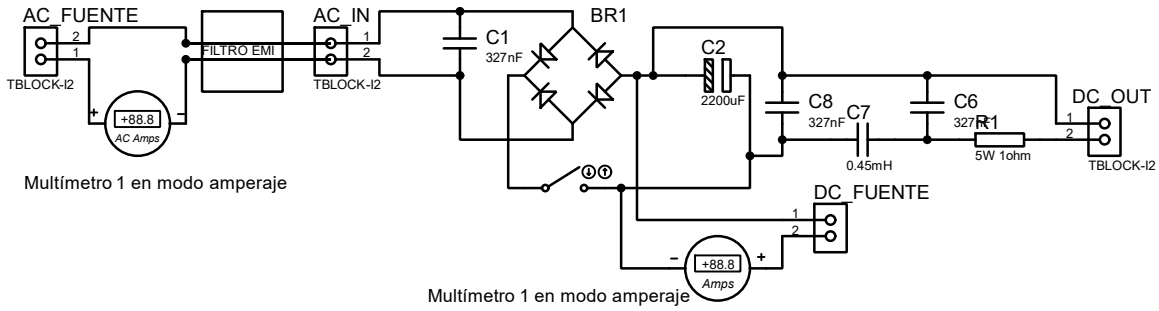



***Figura 65.*** *Representación gráfica de conexión de equipos para detectar el consumo de amperaje del sistema, así como para entender la conexión de una fuente AC o de la de DC.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

## 4.3 PRUEBA DE CALENTAMIENTO CON LA ALIMENTACIÓN DC

En primer lugar, se probaron las tres piezas mencionadas anteriormente utilizando la fuente de alimentación de DC del laboratorio, donde se probaron tres voltajes para cada pieza, es decir, 12 V DC, 24 V DC, y 32 V DC, ya que era el máximo que podía proporcionar la fuente de alimentación. El resultado fue el siguiente:

**Tabla 10.** Resultados obtenidos para la primera pieza (zinc), utilizando la alimentación DC.

| Sección de pruebas | Voltaje (DC) | Consumo sin carga (A) | Consumo con carga (A) | Temperatura ambiente en el material(°C) | Temperatura final (°C) |
|---|---|---|---|---|---|
| Prueba 1 | 12 V | 0.076 | 1.073 | 26.2 | 40.1 |
| | | | 1.044 | 24.4 | 42.2 |
| | | | 1.067 | 24.4 | 39.2 |
| | | | 1.059 | 24.4 | 39.3 |
| | | | 1.046 | 24.6 | 41.0 |
| Prueba 2 | 24 V | 0.147 | 1.929 | 26.3 | 67.2 |
| | | | 1.909 | 24.3 | 69.5 |
| | | | 1.907 | 24.6 | 66.2 |
| | | | 1.893 | 24.4 | 68.6 |
| | | | 1.993 | 24.6 | 72.9 |
| Prueba 3 | 32 V | 0.201 | 2.425 | 26.3 | 87.4 |
| | | | 2.383 | 24.3 | 89.9 |
| | | | 2.412 | 24.2 | 89.5 |
| | | | 2.384 | 24.2 | 92.2 |
| | | | 2.284 | 24.6 | 86.7 |

**Tabla 11.** Resultados obtenidos para la segunda pieza (Acero inoxidable), utilizando la alimentación DC.

| Sección de pruebas | Voltaje (DC) | Consumo sin carga (A) | Consumo con carga (A) | Temperatura ambiente en el material (°C) | Temperatura final (°C) |
|---|---|---|---|---|---|
| Prueba 4 | 12 V | 0.076 | 0.791 | 26.0 | 36.8 |
| | | | 0.780 | 25.0 | 31.3 |
| | | | 0.780 | 26.5 | 32.5 |
| | | | 0.780 | 26.4 | 32.2 |
| | | | 0.786 | 25.9 | 31.0 |
| Prueba 5 | 24 V | 0.147 | 1.467 | 26.1 | 49.7 |
| | | | 1.486 | 25.9 | 48.7 |
| | | | 1.450 | 26.4 | 47.2 |
| | | | 1.450 | 26.3 | 48.7 |
| | | | 1.467 | 25.2 | 43.6 |
| Prueba 6 | 32 V | 0.201 | 1.870 | 26.0 | 62.7 |
| | | | 1.870 | 25.6 | 59.4 |
| | | | 1.838 | 26.0 | 57.6 |
| | | | 1.838 | 25.0 | 57.9 |
| | | | 1.822 | 25.2 | 56.6 |

| **Tabla 12.** Resultados obtenidos para la tercera pieza (Perol-Olla especial), utilizando la alimentación DC. | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Sección de pruebas | Voltaje (DC) | Consumo sin carga (A) | Consumo con carga (A) | Temperatura ambiente en el material (°C) | Temperatura final (°C) |
| Prueba 7 | 12 V | 0.076 | 0.906 | 24.5 | 29.3 |
| | | | 0.867 | 23.3 | 27.7 |
| | | | 0.862 | 24.1 | 28.8 |
| | | | 0.866 | 24.6 | 29.0 |
| | | | 0.862 | 25.5 | 29.6 |
| Prueba 8 | 24 V | 0.147 | 1.809 | 26.3 | 44.9 |
| | | | 1.771 | 24.3 | 40.7 |
| | | | 1.772 | 24.4 | 40.9 |
| | | | 1.776 | 24.5 | 41.5 |
| | | | 1.767 | 25.8 | 41.9 |
| Prueba 9 | 32 V | 0.201 | 2.382 | 27.1 | 55.6 |
| | | | 2.354 | 24.4 | 52.7 |
| | | | 2.348 | 24.3 | 53.2 |
| | | | 2.352 | 25.8 | 50.8 |
| | | | 2.348 | 26.0 | 52.5 |

A continuación se muestran algunas tomas de cámara termográfica de los diferentes materiales durante las pruebas de DC (Figura 66), sin embargo, cada pieza se acondicionó con un termopar tipo K para comprobar que la temperatura era igual o cercana al valor mostrado por el dispositivo Fluke.

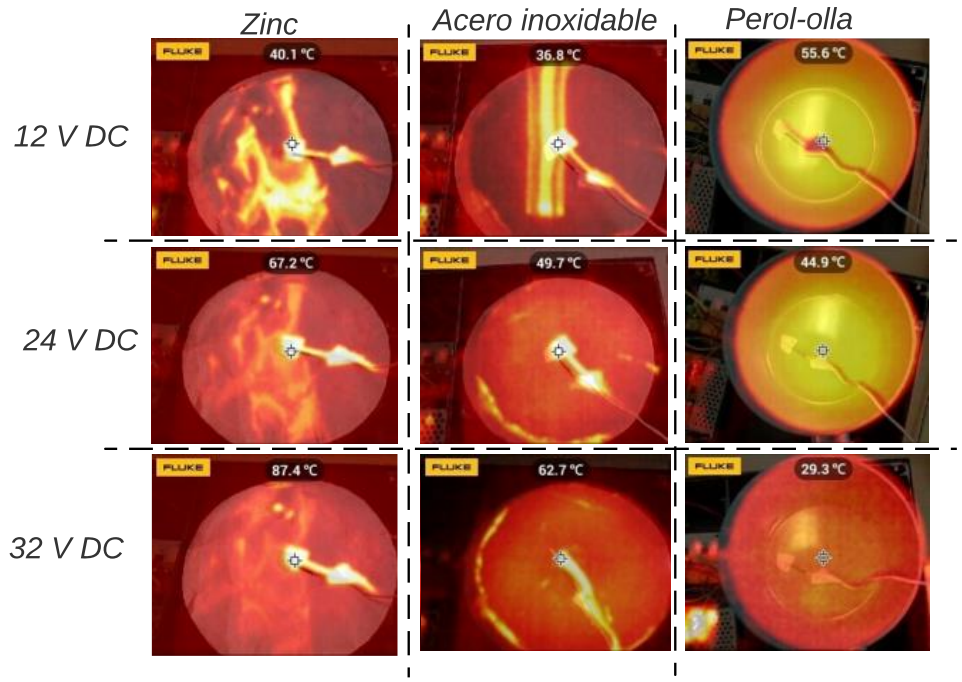



***Figura 66.*** *Muestra de algunas capturas tomadas con la cámara Fluke de las tres piezas a 12 V DC, 24 V DC y 32 V DC.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

## 4.4 PRUEBA DE CALENTAMIENTO CON ALIMENTACIÓN AC

Ahora, para la segunda alimentación, se utiliza un transformador reductor para realizar un proceso controlado del sistema, el cual de 110V AC se reduce a 46.5 V AC y este ya rectificado tomaría un valor aproximado de 65.76 V DC, también se somete cada pieza y se observa el calentamiento que alcanza la pieza y el consumo de amperaje generado por el prototipo. En este caso, las tres tienen el mismo voltaje ofrecido por el transformador, y también se toma un tiempo de cinco minutos para la prueba de calentamiento de los materiales.

**Tabla 13.** Resultados obtenidos para cada material utilizando la alimentación AC.

| Sección de pruebas | Material | Voltaje (AC) | Consumo sin carga (A) | Consumo con carga (A) | Temperatura ambiente en el material (°C) | Temperatura final (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Prueba 10 | Zinc | 46.5 V | 0.33 | 3.52 | 26.3 | 124.0 |
| | | | | 3.63 | 25.0 | 118.7 |
| | | | | 3.63 | 26.0 | 117.9 |
| | | | | 3.66 | 25.0 | 119.6 |
| | | | | 3.63 | 26.0 | 117.6 |
| Prueba 11 | Acero inoxidable con propiedades ferromagnéticas | 46.5 V | 0.33 | 2.79 | 26.0 | 82.0 |
| | | | | 2.78 | 25.0 | 81.0 |
| | | | | 2.78 | 26.0 | 80.6 |
| | | | | 2.78 | 26.0 | 81.4 |
| | | | | 2.82 | 25.0 | 80.1 |
| Prueba 12 | Perol-Olla especial | 46.5 V | 0.33 | 3.38 | 25.0 | 79.9 |
| | | | | 3.39 | 26.0 | 78.3 |
| | | | | 3.38 | 24.0 | 76.9 |
| | | | | 3.38 | 25.0 | 80.0 |
| | | | | 3.39 | 24.0 | 79.7 |

En la figura 67 se muestran algunas tomas obtenidas, dejando una representación para cada material y corroboradas también con el termopar tipo K. Cabe señalar que la luz ambiental influyó en la captura de la imagen y también lo que había alrededor ya que el zinc y el acero inoxidable eran muy reflejantes por lo que en ocasiones se capturaban o aparecían en el material, además de mencionar que para cada temperatura se tomaron pruebas tanto con la cámara fluke como con el pirómetro con el termopar, sin embargo, algunas son visibles, esto aplica para las imágenes dejadas en las pruebas de corriente directa (DC) y corriente alterna (AC).

***Figura 67.*** *Muestra de algunas capturas tomadas con la cámara Fluke de las tres piezas a 46.5 V AC.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

## 4.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Teniendo en cuenta los resultados anteriores de los ensayos realizados variando la tensión, se ha observado una relación directa entre el amperaje consumido y la temperatura alcanzada por el material. Es decir, a mayor amperaje consumido, mayor temperatura alcanzada por el material. Sin embargo, es importante tener en cuenta la temperatura ambiente del material y la del entorno, ya que puede afectar a los resultados. Por ello, el experimento se realizó en un espacio de laboratorio con ventanas cerradas y, en ocasiones, con las lámparas apagadas para minimizar la influencia de la temperatura ambiente en los resultados obtenidos.

Se puede analizar que el consumo con carga varía constantemente y no se mantiene en un rango fijo sobre todo para el disco de zinc, ya que tiende a doblarse por la manipulación constante, por lo que se presentan algunas variaciones, sin embargo, la pieza sometida alcanza altos grados de temperatura, un factor que permite esto es el espesor del material. Pero, el disco de acero inoxidable con propiedades ferromagnéticas aquí tiene un mayor espesor y firmeza, por lo que el consumo con carga tiende a estabilizarse un poco más, la ventaja de este material es que retiene el calor por más tiempo, mientras que el disco de zinc se enfría rápidamente después de la prueba.

Ahora, con las pruebas en la olla especial, se obtuvo un consumo con carga más estable ya que es de tamaño adecuado, por lo que al colocar este material encima de la bobina plana el consumo con carga no varió tanto en comparación con las otras dos piezas sometidas, ahora cabe señalar que la olla tenía un disco ferromagnético incrustado en su base y los lados del recipiente eran de aluminio, siendo un buen conductor del calor. Cabe destacar que este recipiente no tenía tapa y el interior estaba vacío con sólo el termopar tipo K.

De esta manera, se puede analizar que el prototipo propuesto en esta investigación demostró ser eficiente, al igual que el estudio previo desarrollado en [34] ya que

ambos proyectos demostraron trabajar con un consumo de amperaje óptimo para este tipo de estufas, lo cual es un factor importante a tomar en cuenta ya que se busca una mejor optimización de la energía en beneficio de la población ubicada en zonas rurales. Sin embargo, en [34] se logró un menor costo para la construcción del sistema, ya que el sistema de medio puente requiere de menos componentes, mientras que en el presente estudio se utiliza la topología de puente completo, la cual requiere de una mayor inversión, aunque esto es relativo. Cabe señalar que la Tabla 14 se genera teniendo en cuenta algunas características esenciales de ambos prototipos.

**Tabla 14.** Algunas características diferenciadoras entre los prototipos.

| Prototipo desarrollado en [34]. | Prototipo propuesto en la presente investigación. |
|---|---|
| Topología: Medio puente.<br>A partir de IGBTs. | Topología: Puente completo.<br>A partir de MOSFETs. |
| Frecuencia: Variable.<br>En este caso manejan 8 niveles de potencia, en la experimentación, aplicando diferentes frecuencias y tensiones que son:<br>62.5 KHz a 32.5 V, 50 KHz a 50.12 V, 41.67 KHz a 67 V, 35.1 KHz a 78.2 V, 27.78 KHz a 78.2 V, 20 KHz a 94.4 V, 15.15 KHz a 94.6 V y finalmente 10 KHz a 94.9 V. | Frecuencia: Fija.<br>El prototipo maneja una única frecuencia la cual es de 20 KHz y se manejan 4 voltajes (12 V DC, 24 V DC, 32V DC y 46.5 V AC). Cabe resaltar que el voltaje AC se rectifica pasando a ser 65.76 V DC aproximadamente. |
| Amperaje consumido: entre 5 Amperios y 9.1 Amperios. | Amperaje consumido: Dirigirse a las tablas 10, 11, 12 y 13. |
| En este caso se somete una olla, no se menciona su elaboración como tal, pero se puede apreciar en una imagen que tiene una especie de disco incrustado o empotrado en la base de dicho elemento. | En este caso se someten tres piezas, un disco de zinc, un disco de acero inoxidable y una olla especial, descrita anteriormente. |
| Cuenta tanto como suministro para AC como para DC. | Cuenta tanto suministro para AC como para DC. |
| El cambio de suministro energético es de forma automática, se entiende que es a través de algún tipo de relay. | Cambio de suministro de manera manual, ósea se debe oprimir un interruptor. |

Es importante destacar que al aplicar la topología de puente completo en este caso, se obtiene una ventaja sobre la topología de medio puente utilizada en [34], ya que la topología de puente completo utiliza cuatro semiconductores (MOSFETs), lo que permite manejar mayores corrientes y, en consecuencia, es más eficiente en aplicaciones de alta potencia. Por otro lado, la topología de medio puente utiliza sólo dos semiconductores, lo que la hace ideal para baja potencia debido a su simplicidad y facilidad de implementación.

Por último, en cuanto al dispositivo y su finalidad, que es su implementación en un entorno rural. Se puede indicar que el prototipo es una alternativa viable para este contexto, considerando dos tipos de energía: la corriente alterna, que es fluctuante, y la corriente continua, que es constante. Las pruebas realizadas en laboratorio

indican que la energía fotovoltaica podría ser adecuada para el funcionamiento de la estufa de inducción. Sin embargo, es necesario seguir estudiando los sistemas fotovoltaicos, como el uso de algoritmos para la extracción del punto de máxima potencia o elementos de mayor eficiencia. Esto es especialmente relevante en zonas como el Cauca, que no se caracterizan por tener un gran potencial fotovoltaico.

## 4.6 RECONOCIMIENTOS Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Actualmente esta investigación ha participado en diferentes eventos y ha sido evaluada por diferentes evaluadores, lo cual ayuda y motiva a continuar con el estudio tanto en la investigación como en el área de emprendimiento.

- Participación en la IX convocatoria de emprendimiento capital semilla de la Corporación Universitaria Comfacauca-Unicomfacauca quedando en tercer lugar.
- Sometimiento de un artículo de revisión de literatura, el cual se encuentra en proceso de revisión por pares de la revista “Tecnológicas”
- Participación en el segundo encuentro de semilleros de investigación Uniautónomos 2022-“Investigación para el desarrollo sostenible”
- Elaboración de un segundo artículo enfocado netamente a la construcción del prototipo propuesto.

***Figura 68.*** *Reconocimientos y participación en eventos.*
***Fuente:*** *Elaboración propia.*

# 5 CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis sistemático, no existe un único método de validación estándar para los dispositivos propuestos; sin embargo, se observa una tendencia hacia la combinación de metodologías experimentales y de simulación. Entre los programas más adecuados para esta tarea se encuentran Matlab y Simulink. En cuanto a las topologías, se ha identificado que las más utilizadas en los sistemas de inducción son el inversor de medio puente (con un 50% de frecuencia de uso) y la topología de puente completo (con un 30% de frecuencia de uso), las cuales son esenciales para la eficiencia y el rendimiento del sistema. Además, se ha observado que las frecuencias de conmutación se aplican generalmente en el rango de 20KHz a 40KHz, dado que en este intervalo el ruido acústico es mínimo.

En este trabajo se ha desarrollado en un entorno controlado de laboratorio un prototipo de estufa de inducción con doble fuente de alimentación, que funciona tanto con corriente alterna como con corriente continua. De esta manera, se ofrece una alternativa viable específicamente para los hogares ubicados en zonas rurales que están siendo afectados por los métodos tradicionales de preparación de alimentos como la quema de leña o carbón para cocinar lo que genera problemas pulmonares crónicos, donde uno de los principales electrodomésticos es la cocina de gas propano cuyo valor ha ido en aumento y las cocinas eléctricas no son una opción porque demandan altas corrientes y además son inseguras. De esta manera, este proyecto brinda una alternativa que favorece a la población tanto en salud como en economía y no daña el medio ambiente.

El prototipo de estufa de inducción con doble fuente de alimentación desarrollado en este proyecto se considera exitoso en términos de topología de puente completo y frecuencia de operación a 20 KHz, demostrando ser muy eficiente en la generación de calor rápidamente y en el manejo de altas corrientes. Además, la capacidad de operar con ambas corrientes ofrece una mayor flexibilidad y adaptabilidad a diferentes entornos y situaciones, esto también es gracias a los diferentes procesos de filtrado, disminuyendo gran parte del ruido o perturbación en la señal. Lo anterior se basó en gran medida en el mapeo sistemático de literatura que sin duda fue de gran apoyo para analizar y estudiar qué tipo de elementos, métodos o técnicas utilizar para desarrollar un prototipo en esta área.

El sistema propuesto podría considerarse una alternativa eficiente en términos de consumo de amperaje y temperatura, ya que al aplicar una tensión elevada como 46.5 V AC; que al rectificarse toma un valor de 65.76 V DC, los materiales alcanzan temperaturas elevadas superiores a 76 °C e inferiores a 125 °C en un tiempo de 5 minutos y donde el consumo de amperaje es superior a 2 Amperios e inferior a 4 Amperios, dependiendo del material. Cabe señalar que la temperatura del material después del tiempo propuesto tiene la posibilidad de seguir subiendo rápidamente, a diferencia de cuando se aplica un voltaje menor como 12 V DC, 24 V DC y 24 V

DC, y 32 V DC, cuya temperatura tarda mucho tiempo en alcanzarse y después de ese tiempo tiende a estancarse, es decir, es difícil que siga subiendo la temperatura, aunque el consumo de amperaje es bajo, es muy inestable. Ahora, aunque los resultados fueron hechos en laboratorio, muestran y/o sugieren que son replicables en zonas rurales, además si una casa rural cuenta con sistemas fotovoltaicos estos podrían ser acondicionados o conectados al sistema para que haya un mayor beneficio para la población, para la economía y el medio ambiente. Sin embargo, se necesitan más estudios en diferentes condiciones, ambientes y voltajes, pero es una gran contribución a la comunidad de investigadores.

Esta investigación no sólo ha conseguido algunas cosas buenas, sino que también el prototipo de estufa desarrollado tiene algunos fallos, por lo que no es perfecto, ya que estamos hablando de una escala de laboratorio, donde la aplicación de un voltaje más alto genera ruidos en la señal. Por lo tanto, es un factor a tener en cuenta, ya que podría causar daños en los semiconductores de potencia o quemar los drivers. Por otro lado, el número de placas generaba más cableado, por lo que éste no era fácil de manipular, provocando que algunas cosas se desconectaran, por lo que había que tener cuidado al realizar las pruebas, comprobando que todo estaba en su sitio.

En conclusión, este proyecto ha permitido desarrollar un prototipo de estufa de inducción con doble fuente de alimentación que podría considerarse un proyecto tecnológico innovador y eficiente que podría hacer frente a las limitaciones de las estufas convencionales que funcionan con un solo tipo de corriente o que presentan ciertas desventajas para la población y el medio ambiente. Este proyecto sienta las bases para futuras investigaciones y mejoras en el campo de las cocinas de inducción.

# 6 TRABAJOS Y RECOMENDACIONES A FUTURO

Esta investigación ha sentado bases importantes en el campo de las cocinas de inducción, pero aún queda mucho camino por recorrer para conseguir una tecnología casi perfecta. Por lo tanto, este prototipo o estudios similares pueden tenerse en cuenta para futuras mejoras de la eficiencia energética. De esta manera, se podría considerar una conexión a la red doméstica de 110 V AC para analizar el sistema al aplicar este voltaje, ya que es uno con el que cuentan algunas de las zonas rurales, además de esto, una opción sería la implementación de sistemas fotovoltaicos directamente sobre la entrada DC del prototipo para contribuir a la sostenibilidad ambiental, la salud y la economía.

La implementación de nuevos materiales y/o componentes tecnológicos es un factor a tener en cuenta, para permitir una mejor eficiencia del sistema, como la implementación de semiconductores IGBT o lo que se considere mejor, ya que permitiría una conmutación más rápida, por lo tanto, se podría reducir el tiempo muerto lo que puede mejorar tanto el consumo como la temperatura. Así como la optimización de las placas electrónicas en una única placa para tener un producto cada vez óptimo y evitar largos cableados. Por otro lado, deja abierta la posibilidad de implementar un método de auto conmutación para doble alimentación, es decir, pasar de AC a DC automáticamente o viceversa, ya que en este caso el prototipo se aplica de forma manual donde la alimentación se conecta a un lado u otro dependiendo del tipo de alimentación, por lo que se podría aplicar una técnica que conmute automáticamente a una sola línea, una alternativa podría ser a través de un relé.

Por último, considerar la realización de un estudio energético y de mercado del prototipo en una casa rural para analizar cómo se comporta la cocina bajo un uso constante en un hogar donde se suelen utilizar estos electrodomésticos para cocinar el desayuno, el almuerzo y la cena, analizando así cuánto consumo genera el sistema para un hogar rural. Por otro lado, se podría implementar un método para variar la frecuencia y observar qué efectos tiene sobre el consumo y la generación de temperatura. De esta manera, se deja abierta la posibilidad de llevar el prototipo a un estado en el que pueda convertirse en un producto una vez que se hayan realizado posibles mejoras en el equipo.

## BIBLIOGRAFÍA


[1] J. A. Aguilar Lagos, «Calidad y características organolépticas de los alimentos», *Repositorio Institucional - UNE*, 2017, Accedido: 2 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.une.edu.pe/handle/UNE/3860

[2] C. Martínez Rincón y Á. Rodríguez Cisneros, «Influencia de la alimentación en el comportamiento humano a través de la historia», *Offarm*, vol. 21, n.º 7, pp. 80-86, jul. 2002.

[3] G. Manuel Moreno y A. Alejandra, «Higiene alimentaria para la prevención de trastornos digestivos infecciosos y por toxinas», *Revista Médica Clínica Las Condes*, vol. 21, n.º 5, pp. 749-755, sep. 2010, doi: 10.1016/S0716-8640(10)70596-4.

[4] R. Ramanathan y L. S. Ganesh, «A multi-objective analysis of cooking-energy alternatives», *Energy*, vol. 19, n.º 4, pp. 469-478, abr. 1994, doi: 10.1016/0360-5442(94)90125-2.

[5] C. A. Pizarro-Loaiza, A. Antón, M. Torrellas, P. Torres-Lozada, J. Palatsi, y A. Bonmatí, «Environmental, social and health benefits of alternative renewable energy sources. Case study for household biogas digesters in rural areas», *Journal of Cleaner Production*, vol. 297, p. 126722, may 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126722.

[6] V. Montalvo Bonilla, «Suministro de energía para las zonas rurales de Colombia», *instname:Universidad de los Andes*, 2016, Accedido: 4 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/15744

[7] «Story Map Series». https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=e53e1178fb1f497cac9b241dbafb1690 (accedido 5 de febrero de 2022).

[8] C. A. Torres-Duque, M. C. García-Rodriguez, y M. González-García, «Enfermedad pulmonar obstructiva crónica por humo de leña: ¿un fenotipo diferente o una entidad distinta?», *Archivos de Bronconeumología*, vol. 52, n.º 8, pp. 425-431, ago. 2016, doi: 10.1016/j.arbres.2016.04.004.

[9] R. González Celis y others, «Uso del gas natural en la transición energética colombiana», 2020.

[10] K. Viñals Góngora, «Diseño y construcción de una cocina solar», Tesis, Departamento de Eléctrica, 2017. Accedido: 6 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1822

[11] M. E. Macías García, C. Contreras Hinojosa, R. Anaya Zamora, M. E. M. García, C. C. Hinojosa, y R. A. Zamora, «¿Qué es la corriente alterna?», nov. 2018, Accedido: 3 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.tec.mx/handle/11285/631179

[12] A. L. Farina, «Corriente continua».

[13] G. Solis *et al.*, «Capítulo 2 - Módulo 3: Temperaturas Seguras para los Alimentos», Texas Woman's University, 2014. Accedido: 15 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: https://twu-ir.tdl.org/handle/11274/5274

[14] A. K. R. Julio y M. de L. S. Rios, «Enfermedades respiratorias relacionadas con el uso de fogones de leña».
[15] E. Pineda Agudelo y M. F. Quintero Vanegas, «Implementación del control de un turco generador de vapor a gas, usando un PLC.», 2017.
[16] R. Karim, R. Islam, y M. Alam, *Installation of Solar PV System as an Alternate Source of Electric Stove and Gas Stove*. 2015.
[17] F. Echeverri Riqueth, «Ensayos de eficiencia térmica para gasodomésticos y electrodomésticos», 2018, Accedido: 17 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/1672
[18] L. Montoya Mendoza, D. Serrano Aguirre, y others, «Diseño, análisis y construcción de una estufa de uso doméstico utilizando como fuente de combustible biomasa sólida», B.S. thesis, Espol, 2017.
[19] J. F. Salazar Masson, «Estudio técnico-comparativo para la introducción de cocinas eléctricas de inducción magnética en el Ecuador», bachelorThesis, QUITO/EPN/2010, 2010. Accedido: 14 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2165
[20] J. Ulloa y C. Cruz, «Consumo energético en cocinas de inducción y cocinas a gas», *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, n.º marzo, mar. 2018, Accedido: 14 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.eumed.net/rev/oel/2018/03/consumos-energeticos.html#google_vignette
[21] K. Troncoso *et al.*, «Afecciones respiratorias por el uso de leña y carbón en comunidades de Paraguay», *Pediatría (Asunción)*, vol. 45, n.º 1, pp. 45-52, abr. 2018, doi: 10.31698/ped.45012018006.
[22] A. Mühlbauer, *History of induction heating and melting*. Vulkan-Verlag GmbH, 2008.
[23] F. Semiconductor, «Induction Heating System Topology Review», 2000.
[24] C. A. Talavera Villamarín, «Impacto de las corrientes armónicas de las cocinas de inducción en los transformadores de distribución», B.S. thesis, Quito, 2017., 2017.
[25] C. A. Bulnes, R. Best, y B. Lejos, «Energía del sol», *Revista Ciencia*, vol. 61, pp. 10-17, 2010.
[26] G. Arencibia-Carballo, «La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica», *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, vol. 17, n.º 9, pp. 1-4, 2016.
[27] F. de J. Acevedo Garcés, «Diseño de una instalación solar fotovoltaica con capacidad para 3 kilovatios», *instname:Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, dic. 2016, Accedido: 20 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: http://repository.unad.edu.co/handle/10596/11352
[28] M. A. Abella, «Sistemas fotovoltaicos», *SAPT Publicaciones Técnicas, SL*, 2005.
[29] P. D. Valdiviezo Salas, «Diseño de un sistema fotovoltaico para el suministro de energía eléctrica a 15 computadoras portátiles en la PUCP», *Pontificia Universidad Católica del Perú*, jul. 2014, Accedido: 20 de febrero de 2022. [En

línea]. Disponible en: https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/5447
[30] S. F. Guerrero Silva y H. H. Funeme Molano, «Diseño e implementación de un prototipo de cocina de inducción electromagnética basado en un inversor monofásico de alta frecuencia», Accedido: 6 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/22362
[31] F. A. Aguirre Coello y H. D. Alarcón Loor, «Diseño y construcción de una cocina de induccción eléctromagnética de una zona de calentamiento basado en un inversor monofásico de alta frecuencia y un microcontrolador.», B.S. thesis, 2015.
[32] E. A. Cushicóndor Collaguazo Elías Antonio, «Diseño y construcción de un prototipo de una cocina de inducción electromagnética», 2009.
[33] H. D. Dande y S. Markande, «Solar based induction heating system», en *2014 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, IEEE, 2014, pp. 1-5.
[34] B. I. Sibiya, «Smart induction cooking system using solar energy.», PhD Thesis, 2017.
[35] J. P. O. Avilés, V. V. R. e Silva, y F. L. Tofoli, «Household induction cooking system based on a grid-connected photovoltaic system», *IET Circuits, Devices & Systems*, vol. 14, n.º 8, pp. 1117-1128, 2020.
[36] M. Bunge, *Philosophy of Science: Volume 1, From Problem to Theory*. Routledge, 2017.
[37] D. Shetty y R. A. Kolk, *Mechatronics system design*. Cengage Learning, 2010.
[38] R. Sanchis, B. Andrés Navarro, y R. Poler, «Methodology to Validate Results from European Research Projects: The C2NET Case Study», *International Journal of Production Management and Engineering*, vol. 7, n.º Especial, pp. 81-90, 2019.
[39] A. Solis y J. Hurtado, «Reutilización de software en la robótica industrial: un mapeo sistemático», *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 17, n.º 4, pp. 354-367, 2020, doi: https://doi.org/10.4995/riai.2020.13335.
[40] P. Vishnuram, G. Ramachandiran, T. Sudhakar Babu, y B. Nastasi, «Induction Heating in Domestic Cooking and Industrial Melting Applications: A Systematic Review on Modelling, Converter Topologies and Control Schemes», *Energies*, vol. 14, n.º 20, 2021, doi: 10.3390/en14206634.
[41] G. Tebes, D. Peppino, P. Becker, y L. Olsina, «Proceso para revisión sistemática de literatura y mapeo sistemático», *Electronic Journal of SADIO*, vol. 19, 2020.
[42] O. Revelo-Sánchez, C. A. Collazos-Ordoñez, y J. A. Jimenez-Toledo, «La gamificación como estrategia didáctica para la enseñanza/aprendizaje de la programación: un mapeo sistemático de literatura», *Lámpsakos*, n.º 19, pp. 31-46, 2018.
[43] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba, y M. Mattsson, «Systematic Mapping Studies in Software Engineering», jun. 2008, doi: 10.14236/ewic/EASE2008.8.
[44] B. Kitchenham, O. Pearl Brereton, D. Budgen, M. Turner, J. Bailey, y S. Linkman, «Systematic literature reviews in software engineering – A systematic

literature review», *Information and Software Technology*, vol. 51, n.º 1, pp. 7-15, ene. 2009, doi: https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009.
[45] L. Rivero y T. Conte, «A Systematic Mapping Study on Research Contributions on UX Evaluation Technologies», en *Proceedings of the XVI Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*, en IHC 2017. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, oct. 2017, pp. 1-10. doi: 10.1145/3160504.3160512.
[46] L. Codina, «Scopus: el mayor navegador científico de la web», *El profesional de la información*, vol. 14, n.º 1, pp. 44-49, 2005.
[47] T. Meline, «Selecting Studies for Systemic Review: Inclusion and Exclusion Criteria», *Contemporary Issues in Communication Science and Disorders*, vol. 33, n.º Spring, pp. 21-27, mar. 2006, doi: 10.1044/cicsd_33_S_21.
[48] D. Stefanovic, S. Havzi, D. Nikolic, D. Dakic, y T. Lolic, «Analysis of the Tools to Support Systematic Literature Review in Software Engineering», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1163, n.º 1, p. 012013, ago. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1163/1/012013.
[49] M. J. Vinolo-Gil, M. Rodríguez-Huguet, C. García-Muñoz, G. Gonzalez-Medina, F. J. Martin-Vega, y R. Martín-Valero, «Effects of Peripheral Electromagnetic Fields on Spasticity: A Systematic Review», *Journal of Clinical Medicine*, vol. 11, n.º 13, 2022, doi: 10.3390/jcm11133739.
[50] T. Bayerl, M. Duhovic, P. Mitschang, y D. Bhattacharyya, «The heating of polymer composites by electromagnetic induction – A review», *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 57, pp. 27-40, feb. 2014, doi: 10.1016/j.compositesa.2013.10.024.
[51] A. F. Solis Pino, L. M. Vargas-Ordoñez, y C. A. Collazos, «Model for Writing Scientific Articles Remotely Through Collaborative Tasks», *TecnoLógicas*, vol. 24, n.º 50, p. e1701, ene. 2021, doi: 10.22430/22565337.1701.
[52] J. Gao, Y. Yin, K. R. Myers, K. R. Lakhani, y D. Wang, «Potentially long-lasting effects of the pandemic on scientists», *Nature Communications*, vol. 12, n.º 1, p. 6188, oct. 2021, doi: 10.1038/s41467-021-26428-z.
[53] B. Adhikari, J. N. Shrestha, y S. R. Shakya, «Design and simulation of a solar electricity based induction cooker using quasi resonant topology», en *Proceedings of IOE Graduate Conference*, 2016, pp. 1-11.
[54] H. Sarnago, Ó. Lucía, A. Mediano, y José. M. Burdío, «Class-D/DE Dual-Mode-Operation Resonant Converter for Improved-Efficiency Domestic Induction Heating System», *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, n.º 3, pp. 1274-1285, mar. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2206405.
[55] D. Vijaya Bhaskar, N. Vishwanathan, T. Maity, y S. Porpandiselvi, «Hybrid controlled dual frequency inverter for two load induction cooking application», *EPE Journal*, vol. 27, n.º 2, pp. 60-73, abr. 2017, doi: 10.1080/09398368.2017.1317138.
[56] F. N. Ansari y K. Subramanian, «Solar PV based resonant inverter for induction cooker», en *2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI)*, may 2017, pp. 888-891. doi: 10.1109/ICOEI.2017.8300834.

[57] R. Dharmambal y S. D. Joshi, «MPPT based power control of resonant converter applied to induction cooktops», en *2016 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, may 2016, pp. 477-482. doi: 10.1109/ICACCCT.2016.7831685.

[58] X. Carbajal y D. S. y Rosas, «A general study of designing an electromagnetic induction cooking device prototype for microgrids in rural areas», *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2180, n.º 1, p. 012012, ene. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2180/1/012012.

[59] H.-P. Park y J.-H. Jung, «Load-Adaptive Modulation of a Series-Resonant Inverter for All-Metal Induction Heating Applications», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, n.º 9, pp. 6983-6993, sep. 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2793270.

[60] J. Villa, A. Domínguez, L. A. Barragán, J. I. Artigas, J. Español, y D. Navarro, «Conductance Control for Electromagnetic-Compatible Induction Heating Appliances», *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, n.º 3, pp. 2909-2920, mar. 2022, doi: 10.1109/TPEL.2021.3118319.

[61] W. Han, K. T. Chau, H. C. Wong, C. Jiang, y W. H. Lam, «All-In-One Induction Heating Using Dual Magnetic Couplings», *Energies*, vol. 12, n.º 9, 2019, doi: 10.3390/en12091772.

[62] D. Vijaya Bhaskar, N. Vishwanathan, T. Maity, y S. Porpandiselvi, «A three-output inverter for induction cooking application with independent control», *EPE Journal*, vol. 28, n.º 2, pp. 89-99, abr. 2018, doi: 10.1080/09398368.2018.1442543.

[63] D. Mounika, S. Porpandiselvi, y V. K. S. Veeramallu, «Dual frequency full-bridge inverter for all metal induction heating cooking applications», en *2017 International Conference on Inventive Computing and Informatics (ICICI)*, nov. 2017, pp. 292-296. doi: 10.1109/ICICI.2017.8365357.

[64] M. Prist *et al.*, «An automatic temperature control for induction cooktops to reduce energy consumption», en *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, ene. 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICCE.2018.8326313.

[65] A. Kumar, M. Sadhu, N. Das, P. Sadhu, D. Roy, y A. Ganguly, «A Survey on High-Frequency Inverter and Their Power Control Techniques for Induction Heating Applications», *Journal of Power Technologies*, vol. 97, n.º 3, pp. 201-213, 2017.

[66] A. Altouni, S. Gorjian, y A. Banakar, «Development and performance evaluation of a photovoltaic-powered induction cooker (PV-IC): An approach for promoting clean production in rural areas», *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 6, p. 100373, 2022.

[67] B. I. Sibiya y C. Venugopal, «Solar Powered Induction Cooking System», *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 145-156, jun. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.05.117.

[68] A. Soni, P. K. Maduri, K. Singh, y R. Maurya, «Angular Flame Hybrid Stove with Auto Align Base Frame», *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 748, n.º 1, p. 012028, feb. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/748/1/012028.

[69] S. Shiradkar, S. Telagamsetti, N. Shiradkar, J. Venkateswaran, y C. S. Solanki, «Field Experience of Deployment and Adoption of PV based DC Induction Cookstoves in Rural India», en *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, jun. 2019, pp. 1684-1689. doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8980676.
[70] W. Gao *et al.*, «Electromagnetic induction effect induced high-efficiency hot charge generation and transfer in Pd-tipped Au nanorods to boost plasmon-enhanced formic acid dehydrogenation», *Nano Energy*, vol. 80, p. 105543, feb. 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105543.
[71] M. OZTURK, S. ASLAN, N. ALTINTAS, y S. SINIRLIOGLU, «Comparison of Induction Cooker Power Converters», en *2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)*, oct. 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/CEIT.2018.8751920.
[72] J. Serrano, J. Acero, I. Lope, C. Carretero, y J. M. Burdio, «High power density PCB coil array applied to domestic induction heating appliances», en *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, mar. 2018, pp. 2673-2677. doi: 10.1109/APEC.2018.8341394.
[73] S. M. Park, E.-S. Jang, B. K. Lee, y D. Joo, «Power Curve-Fitting Control Method with Temperature Compensation for All-Metal Induction Heating Systems», en *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, mar. 2019, pp. 3388-3393. doi: 10.1109/APEC.2019.8721830.
[74] S. Malge, K. Bhole, y R. Narkhede, «Designing of dual-axis Solar tracking system with remote monitoring», en *2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC)*, Pune, India: IEEE, may 2015, pp. 1524-1527. doi: 10.1109/IIC.2015.7150991.
[75] S. I. Annie, K. M. Salim, Z. Tasneem, y M. R. Uddin, «Design and performance analysis of a ZVS parallel quasi resonant converter for a solar based induction cooking system», en *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, nov. 2016, pp. 2638-2641. doi: 10.1109/TENCON.2016.7848516.
[76] T. Nagatomo *et al.*, «Electromagnetic interference with a bipolar pacemaker by an induction heating (IH) rice cooker», *Int Heart J*, vol. 50, n.º 1, pp. 133-137, ene. 2009, doi: 10.1536/ihj.50.133.
[77] S. F. Guerrero Silva, H. H. Funeme Molano, y others, «Diseño e implementación de un prototipo de cocina de inducción electromagnética basado en un inversor monofásico de alta frecuencia».
[78] I. Millán, J. M. Burdío, J. Acero, O. Lucía, y S. Llorente, «Series resonant inverter with selective harmonic operation applied to all-metal domestic induction heating», *IET Pwr. Electr.*, vol. 4, n.º 5, p. 587, 2011, doi: 10.1049/iet-pel.2010.0107.
[79] H. Sarnago, J. M. Burdío, y O. Lucia, «High-Frequency GaN-Based Induction Heating Versatile Module for Flexible Cooking Surfaces», en *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, mar. 2019, pp. 448-452. doi: 10.1109/APEC.2019.8721779.
[80] H. Sarnago, J. M. Burdío, y Ó. Lucía, «High-Performance and Cost-Effective ZCS Matrix Resonant Inverter for Total Active Surface Induction Heating

Appliances», *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, n.º 1, pp. 117-125, ene. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2815902.
[81] T. Hirokawa, M. Imai, y A. Fujita, «Multi-resonant Inverter Realizing Downsizing and Loss Reduction for All-metallic IH Cooktop», en *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*, may 2018, pp. 296-301. doi: 10.23919/IPEC.2018.8507690.
[82] J. Acero, C. Carretero, I. Lope, y J. M. Burdío, «An analysis of electromagnetic forces on cooking vessels used in domestic induction heating appliances oriented to identify the properties of materials», en *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, mar. 2019, pp. 1971-1975. doi: 10.1109/APEC.2019.8722115.
[83] O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede, y J. M. Burdio, «Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, n.º 5, pp. 2509-2520, may 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2281162.
[84] C. Mazón-Valadez, L. H. Quintero-Hernández, E. E. Mazón-Valadez, A. Hernández-Sámano, J. Ávila-Paz, y M. E. Cano-González, «Developing a self-regulating soldering iron based on induction heating», *Dyna*, vol. 83, n.º 196, pp. 159-167, 2016, doi: https://doi.org/10.15446/dyna.v83n196.51208.
[85] S. Devabhaktuni, N. Viswanathan, y S. Porpandiselvi, «Source Current Ripple Reduction For Multiple Load Induction Cooking Applications», en *2019 National Power Electronics Conference (NPEC)*, Tiruchirappalli, India: IEEE, dic. 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/NPEC47332.2019.9034887.
[86] M. Pérez-Tarragona, H. Sarnago, Ó. Lucía, y J. M. Burdío, «A front-end PFC stage for improved performance of flexible induction heating appliances», *JAE*, vol. 63, pp. S115-S121, jul. 2020, doi: 10.3233/JAE-209114.
[87] O. Lucia, D. Navarro, P. Guillén, H. Sarnago, y S. Lucia, «Deep Learning-Based Magnetic Coupling Detection for Advanced Induction Heating Appliances», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 181668-181677, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2960109.
[88] K. V. Anusree y A. Sukesh, «Solar Induction Cooker», en *2020 International Conference on Power Electronics and Renewable Energy Applications (PEREA)*, nov. 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/PEREA51218.2020.9339725.
[89] J. Serrano, I. Lope, J. Acero, C. Carretero, J. M. Burdío, y R. Alonso, «Design and Optimization of Small Inductors on Extra-Thin PCB for Flexible Cooking Surfaces», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, n.º 1, pp. 371-379, ene. 2017, doi: 10.1109/TIA.2016.2602217.
[90] J. Villa, D. Navarro, A. Dominguez, J. I. Artigas, y L. A. Barragan, «Vessel Recognition in Induction Heating Appliances—A Deep-Learning Approach», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 16053-16061, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3052864.
[91] A. Rodríguez Portilla, «Propuesta de nueva función PWM para circuitos inversores», ene. 2017, Accedido: 11 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/174

[92] M. H. Rashid, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación, 2004.
[93] S. Khatroth y P. Shunmugam, «Cascaded full-bridge resonant inverter configuration for different material vessel induction cooking», *IET Power Electronics*, vol. 13, n.º 19, pp. 4428-4438, 2020, doi: 10.1049/iet-pel.2020.0728.
[94] J. O. Alejos *et al.*, «Sistema de calentamiento por inducción electromagnética para pruebas experimentales en laboratorios de Físico-Química», *Pistas Educativas*, vol. 36, n.º 112, Art. n.º 112, abr. 2018, Accedido: 10 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/400
[95] «Arduino Nano», *Arduino Online Shop*. https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-nano (accedido 13 de marzo de 2023).
[96] «ATmega328P». https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega328P#document-table (accedido 12 de marzo de 2023).
[97] D. Cabrera Pérez, «Desarrollo de prácticas de laboratorio virtuales para la asignatura de Optoelectrónica y Láser», Thesis, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, 2011. Accedido: 12 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: http://dspace.uclv.edu.cu:8089/xmlui/handle/123456789/2905
[98] A. T. Alejandro, «Inversor trifásico SPWM para el control de velocidad de un motor de inducción implementado en el microcontrolador PIC18F243», vol. 2, n.º 1, 2006.
[99] «hcpl2631-d.pdf». Accedido: 26 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.onsemi.com/download/data-sheet/pdf/hcpl2631-d.pdf
[100] I. T. AG, «IR2113 - Infineon Technologies». https://www.infineon.com/cms/en/product/power/gate-driver-ics/ir2113/ (accedido 19 de febrero de 2023).
[101] I. T. AG, «IRFP250N - Infineon Technologies». https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/n-channel/irfp250n/ (accedido 26 de marzo de 2023).
[102] H. F. M.-G. D. ICs, «Application Note AN-978», *Rev D*, 2007.
[103] J. Adams, «Bootstrap Componet Selection For Control IC's», *http://www. irf. com/technical-info/designtp/dt98-2. pdf*, 2001.
[104] A. P. Malvino, D. J. Bates, y others, *Principios de electrónica*, vol. 2. McGraw-Hill, 1991.
[105] B. Tituana y D. Santiago, «Diseño y construcción de una cocina de inducción de una hornilla que utilice ollas ferromagnéticas y no ferromagnéticas», bachelorThesis, CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E INDUSTRIAS FACULTAD:INGENIERÍA MECATRÓNICA, 2018. Accedido: 27 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.ute.edu.ec/xmlui/handle/123456789/18149
[106] R. L. Ozenbaugh, R. L. Pullen, y T. M. Pullen, *Diseño de filtro EMI*. doi: 10.1201/9780203910313.
[107] *Proteus VSM*. USERSHOP.
[108] A. V. Lázaro, *Simulación con Solidworks*. Editorial Macro, 2014.

[109] O. Apolinar Hernández, «Reloj digital de manufactura artesanal», 2017, Accedido: 22 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.lasalle.mx/handle/lasalle/1961
[110] F. A. Alvarado Álvarez, «Practica académica en Tecnoparque Nodo Bucaramanga», 2019, Accedido: 17 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/14209
[111] H. Universal, «PEROL CERAMIC GREEN+TV 18CM - Hogar Universal». https://www.hogaruniversal.com/perol-ceramic-green-tv-18cm/p (accedido 19 de abril de 2023).
[112] «UTP1000-DC Power Supplies-UNI-T Voltage Meter, Multimeter, Oscilloscope | UNI-T-UNI-T Voltage Meter, Multimeter, Oscilloscope | UNI-T». https://instruments.uni-trend.com/list_82/997.html (accedido 9 de mayo de 2023).
[113] «Cámara termográfica portátil compacta | Cámara termográfica de bolsillo PTi120». https://www.fluke.com/es-mx/producto/camaras-termicas/de-bolsillo-pti120 (accedido 9 de mayo de 2023).