



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Convertidor Resonante CD-CD con procesamiento
parcial de energía

presentada por

Ing. Jorge Luis Hernández Mujica

como requisito para la obtención del grado de
**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino

Codirector de tesis

Dr. Mario Ponce Silva

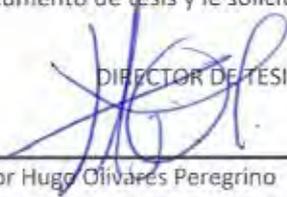
Cuernavaca, Morelos, México. Agosto del 2024.

Cuernavaca, Mor., **06/agosto/2024**
No. de Oficio: **DIE/103/2024**
Asunto: **Aceptación de documentos de tesis**

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. JORGE LUIS HERNÁNDEZ MUJICA**, con número de control **M22CE014** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"CONVERTIDOR RESONANTE CD-CD CON PROCESAMIENTO PARCIAL DE ENERGÍA"**, y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5999002

CODIRECTOR DE TESIS



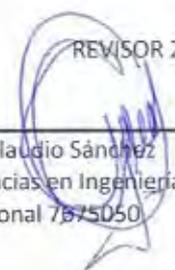
Dr. Mario Ponce Silva
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 3516427

REVISOR 1



Dr. Luis Gerardo Vela Valdés
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 7980044

REVISOR 2



Dr. Abraham Claudio Sánchez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 7675050

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres, Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
JGM/kmq



Cuernavaca, Mor.,
No. De Oficio:
Asunto:

06/agosto/2024
SAC/221/2024
**Autorización de
impresión de tesis**

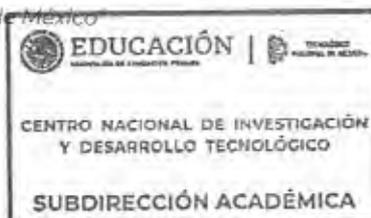
JORGE LUIS HERNÁNDEZ MUJICA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"CONVERTIDOR RESONANTE CD-CD CON PROCESAMIENTO PARCIAL DE ENERGÍA"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"*



CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

C. c. p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz

RESUMEN

En el panorama actual de la electrónica de potencia, el desarrollo de convertidores eficientes es fundamental para enfrentar los desafíos energéticos contemporáneos. La optimización de estos convertidores no solo mejora la eficiencia energética, sino que también reduce las pérdidas y los costos operativos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

Este proyecto se sumerge en el del diseño de convertidores CD-CD LLC, explorando específicamente el empleo innovador del tanque resonante y su relación con el procesamiento de potencia parcial, denominado R²P².

El convertidor CD-CD LLC, conocido por su eficiencia y capacidad para gestionar una amplia gama de voltajes, se convierte en el centro de atención. La inclusión estratégica de un tanque resonante introduce una dimensión adicional de complejidad y oportunidad, ofreciendo potenciales mejoras en la densidad de potencia y la eficiencia global del sistema.

ABSTRACT

In today's power electronics landscape, the development of efficient converters is essential to meet contemporary energy challenges. The optimization of these converters not only improves energy efficiency, but also reduces losses and operating costs, contributing to environmental sustainability.

This project dives into that of LLC CD-CD converter design, specifically exploring the innovative use of the resonant tank and its relationship with partial power processing, termed R²P².

The LLC CD-CD converter, known for its efficiency and ability to handle a wide range of voltages, takes center stage. The strategic inclusion of a resonant tank introduces an additional dimension of complexity and opportunity, offering potential improvements in power density and overall system efficiency.

DEDICATORIA

A mis amados padres, Samuel Hernández Téllez y Yadira Mujica Martínez, a quienes dedico este logro como una expresión de gratitud por su amor incondicional, esfuerzo y apoyo constante a lo largo de mi trayectoria académica. A mi querida hermana, Samantha Hernández Mujica, fuente constante de inspiración en mi día a día; este triunfo también es suyo.

A mi novia y prometida, Miriam Ocampo Rodríguez, gracias por tu amor, paciencia y por ser mi compañera en cada paso de este camino. Tu apoyo ha sido invaluable para alcanzar este logro.

Agradezco profundamente a mis valiosos amigos, cuya amistad y aliento han sido un pilar fundamental en este recorrido.

A mis respetados profesores, cuya sabiduría y orientación han iluminado mi trayecto académico, les expreso mi más sincera gratitud. Su guía ha sido esencial para que este logro se hiciera realidad.

Este logro es el resultado del esfuerzo conjunto de todos ustedes. Con sincero agradecimiento, ¡gracias!

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el respaldo invaluable que me brindaron.

Mi gratitud se extiende también al Tecnológico Nacional de México (TECNM), por ofrecerme la oportunidad de especializarme dentro de la maestría en Ciencia en Ingeniería Electrónica con especialidad en Electrónica de Potencia. Esta experiencia ha sido decisiva para cultivar en mí un profundo interés por la investigación tecnológica.

Estoy profundamente agradecido al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) y a todos los que forman parte de su equipo. Su compromiso y dedicación han sido pilares fundamentales que hicieron posible este avance significativo en mi carrera académica y profesional.

Deseo expresar mi aprecio hacia mis asesores, el Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino y el Dr. Mario Ponce Silva. Sus orientaciones y consejos han sido de un valor incalculable para que pudiera llevar a cabo con éxito mis responsabilidades en este proyecto. Agradezco el conocimiento compartido y su continuo apoyo durante todo este proceso de investigación.

Quiero reconocer también el trabajo de los revisores de mi comité, el Dr. Abraham Claudio Sánchez y el Dr. Luis Gerardo Vela Valdés. Sus observaciones críticas y sugerencias han sido fundamentales para el progreso y perfeccionamiento de mi proyecto, y su colaboración ha sido esencial para alcanzar la calidad que se refleja en este trabajo.

Un agradecimiento especial al Dr. Miguel Martín y al Dr. Andrés Medel por la confianza que depositaron en mí y por permitirme formar parte de su equipo. Trabajar junto a ustedes ha sido una experiencia enriquecedora, y su liderazgo ha sido clave para mi desarrollo profesional.

Por último, pero no menos importante, agradezco profundamente a mis compañeros y amigos, quienes han sido un apoyo constante en esta travesía. También quiero agradecer a los profesores con los que he tenido el privilegio de compartir este camino, por su valiosa enseñanza y apoyo.

CONTENIDO

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 Introducción.....	4
1.2 Estado del arte.....	4
1.2.1 Convertidores de baja potencia.....	4
1.2.3 Principales convertidores de baja potencia.....	5
1.2.4 convertidores CD-CD.....	5
1.2.5 Eficiencia del procesamiento de la energía en convertidores.....	6
1.2.6 Técnicas para mejorar la eficiencia en los convertidores.....	7
1.2.7 R ² P ² (Reduced Redundant Power Processing).....	8
1.2.8 Como implementar la técnica R ² P ² (Reduced Redundant Power Processing).....	9
1.2.9 Problemática a resolver.....	11
1.3 Objetivos.....	11
1.3.1 Objetivo general.....	11
1.3.2 Objetivos específicos.....	12
CAPÍTULO II REVISIÓN DE LOS CONVERTIDORES CD-CDQUE EMPLEAN LA TÉCNICA R ² P ²	14
2.1 Tipos de convertidores CD-CD con R ² P ²	14
2.1.1 Convertidores Resonantes.....	14
2.1.2 Convertidores no Resonantes.....	15
2.1.3 Convertidores Aislados.....	15
2.1.3 Convertidores no Aislados.....	15
2.1.4 Convertidores Resonantes Aislados.....	16
2.2 Aplicación de la Técnica R ² P ² en Diferentes Tipos de Convertidores.....	16
2.2.1 Convertidor Boost.....	17
2.2.2 Convertidor Buck.....	17
2.2.3 Convertidor Buck-Boost.....	18
2.2.4 Convertidor Flyback.....	18
2.2.5 Convertidor Resonante con Aislamiento Magnético.....	19

2.2.6 Convertidor Resonante LLC con aislamiento magnético.....	21
CAPÍTULO III ANÁLISIS Y DISEÑO DEL CONVERTIDOR RESONANTE LLC	23
3.1 Elección de la topología del convertidor	23
3.2 Desarrollo del convertidor resonante LLC.....	23
3.3 Convertidor Resonante LLC clase D con la técnica R ² P ²	25
3.4 Análisis y metodología de diseño del convertidor	25
3.5 Selección de componentes para el convertidor LLC	28
CAPITULO IV SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR RESONANTE CON LA TECNICA R ² P ²	32
4.1 Simulación es Pspice del convertidor	32
4.3 LLC convencional vs LLC con técnica R ² P ²	37
CAPÍTULO V IMPLEMENTACIÓN DEL CONVERTIDOR RESONANTE CON LA TÉCNICA R ² P ²	41
5.1 Selección de componentes	41
5.2 Vista de la PCB en 3D con etapa de control y potencia	44
5.3 Implementación en PCB.....	44
5.4 Pruebas del convertidor en laboratorio	45
CAPITULO VI CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	54
6. CONCLUSIONES	54
6.1 Productos académicos	55
REFERENCIAS.....	57
ANEXO 1	65
ANEXO 2	69
ANEXO 3	76
ANEXO 4.....	79
ANEXO 5	83
ANEXO 6.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Se aplica la técnica r^2p^2 donde se muestra que parte de la energía pasa por el convertidor y otra parte pasa directamente a la carga.	9
Figura 2 Procesamiento en serie.....	10
Figura 3 Procesamiento en paralelo.....	10
Figura 4 Publicaciones a lo largo del tiempo (www.lens.org).....	11
Figura 5 Boost con R^2P^2	17
Figura 6 Buck con R^2P^2	17
Figura 7 Diagramas de flujo de potencia, (a) flyback convencional y (b) flyback reordenado propuesto. P_i es la potencia de entrada al convertidor [64].	19
Figura 8 Convertidor resonante LLC.....	21
Figura 9 Circuito clase D.....	23
Figura 10 Separación por bloques.	24
Figura 11 Tanque resonante como fuente de voltaje o de corriente.....	24
Figura 12 Circuito resonante modificado con procesamiento parcial de la energía.....	25
Figura 13 Circuito resonante con procesamiento parcial de la energía.	26
Figura 14 Inductor.....	28
Figura 15 Transformador.....	29
Figura 16 Medidor de inductancia, capacitancia y resistencia marca EDIBON mod. ED-MLCR01.....	30
Figura 17 Circuito resonante utilizado para simular en Pspice, en la etapa de control cuenta con dos MOSFETs IRFB4710.....	32
Figura 18 Voltaje y corriente en la entrada del tanque resonante en fase mostrando que el circuito se encuentra en resonancia.....	33
Figura 19 Eficiencia del circuito en la carga, se obtiene de la potencia en la carga entre la potencia entregada de la fuente.	34
Figura 20 Voltaje en la carga del circuito.....	35
Figura 21 Potencia de salida en la carga.	35
Figura 22 Circuito con procesamiento parcial con componentes parásitos.	36
Figura 23 Eficiencia del circuito con componentes parásitos.....	37
Figura 24 potencia procesada en el tanque resonante (circuito clásico).....	38
Figura 25 Potencia procesada en el tanque resonante (circuito con técnica R^2P^2).	38
Figura 26 Diseño de la etapa de control con controlador IR2110, controlador UC3825N y MOSFETs IRFB4710 en Altium Designer.	42
Figura 27 Diseño de la etapa de potencia en Altium Designer.	43
Figura 28 Diseño en 3D en Altium Designer.	44
Figura 29 Circuito implementado en PCB con las diferentes etapas.	45
Figura 30 Fuente de alimentación 60 V- 3.3 A.	47
Figura 31 Osciloscopio Tektronix con punta de voltaje diferencial y de corriente. 48	

Figura 32 Corriente de nuestro circuito en color rosa y de color amarillo en voltaje, señales en fase, circuito en resonancia.....	49
Figura 33 Voltaje en la carga de 98.8 v.....	49
Figura 34 Corriente en la carga de 460 mA.....	50
Figura 35 Valores de la fuente de entrada al circuito.....	51
Figura 36 Separación por bloques	65
Figura 37 a) representación de los bloques b) circuito equivalente.	65
Figura 38 (a) Convertidor Flyback (b) Flyback modificado con procesamiento parcial de la energía.....	66
Figura 39 Convertidor resonante CD-CD basado en un amplificador clase D con un tanque resonante LLC.....	66
Figura 40 Separación por bloques.	67
Figura 41 Representación de los bloques.	67
Figura 42 Circuito equivalente.....	67
Figura 43 Circuito resonante modificado con procesamiento parcial de la energía.	68
Figura 44 Rectificador fuente de voltaje.	69
Figura 45 Rectificador fuente de corriente.....	69
Figura 46 Resistencia del rectificador equivalente	70
Figura 47 Resistencia equivalente.	71
Figura 48 Circuito equivalente.....	71
Figura 49 Eficiencia del circuito aplicando la técnica R^2P^2	79
Figura 50 De color verde se observa el voltaje y de color rojo la corriente al estar en fase el circuito está en resonancia.	79
Figura 51 Voltaje en la carga del circuito.....	80
Figura 52 Corriente en la carga del circuito.....	80
Figura 53 Eficiencia del circuito convencional LLC.....	81
Figura 54 De color verde se observa el voltaje y de color rojo la corriente al estar en fase el circuito está en resonancia.	81
Figura 55 Voltaje de salida del circuito.....	82
Figura 56 PCB incluye parte de control y potencia.....	85
Figura 57 PCB incluye parte de control y potencia con componentes soldados para las pruebas.	86
Figura 58 PCB de control.....	86
Figura 59 PCB de control ensamblada.....	87
Figura 60 PCB de potencia.....	87
Figura 61 PCB de potencia ensamblada.....	88
Figura 62 PCB que se utilizó para las pruebas finales.	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de convertidores Resonantes con Aislamiento Magnético	19
Tabla 2. Especificaciones generales del circuito	26
Tabla 3. Valores para componentes del convertidor	27
Tabla 4. Valores obtenidos por el medidor de inductancia, capacitancia y resistencia	30
Tabla 5. Valores de salida del convertidor	50
Tabla 6. Potencia de salida.....	50
Tabla 7. Eficiencia del circuito.....	51
Tabla 8. Potencia de salida.....	52

ABREVIATURAS Y ACRONIMOS

CD-CD	Convertidor corriente continua a corriente continua
R ² P ²	Reduced Redundant Power Processing
LED	Diodo Emisor de Luz
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
PCB	Placa de circuito impreso
RM	Resonancia Magnética
EMI	Interferencia Electromagnética
MOSFET	Transistor de efecto de campo metal-óxido semiconductor (del inglés <i>Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors</i>)
AWG	American Wire Gauge
Pspice	Programa de simulación con énfasis en los circuitos integrados

SIMBOLOGÍA

η	Eficiencia
P_{out}	Potencia disponible en la salida
P_{int}	Potencia suministrada en la entrada
R_{eq1}	Resistencia equivalente 1
R_{eq}	Resistencia equivalente
V_i	Voltaje de alimentación
V_o	Voltaje de salida
P_i	Potencia de entrada
f	Frecuencia en Hz
Q	Factor de calidad
a	Relación de impedancias
V_{diodos}	Voltaje directo de los diodos
r	Rizo de voltaje
L	Inductor del tanque resonante
c_s	Capacitor del tanque resonante
L_{mp}	Transformador primario
L_{ms}	Transformador secundario
C_f	Capacitor de filtrado
R	Resistencia de carga
D	Diodo
S	MOSFET
R_1	Resistencia en la carga
M	Ganancia del convertidor
V_{Rect}	Componente fundamental
M_t	Ganancia del convertidor total

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Este capítulo se dedica a establecer las definiciones fundamentales como son convertidores de baja potencia , convertidores CD/CD, eficiencia en los convertidores, entre otros, que serán empleadas a lo largo de la tesis, proporcionando así un marco teórico sólido centrado en los convertidores resonantes y con procesamiento de potencia redundante reducida o R²P² (Reduced Redundant Power Processing) por sus siglas en inglés. Se realiza una revisión del estado del arte, resaltando los avances y descubrimientos más significativos que han marcado el campo de la electrónica de potencia en las últimas décadas.

Posteriormente, se presentan el objetivo general de la tesis, junto con los objetivos específicos. Estos objetivos guiarán de manera estructurada el desarrollo del trabajo, enfocándose en explorar soluciones innovadoras y efectivas dentro del ámbito de la electrónica de potencia, especialmente en lo que respecta a los convertidores resonantes y el procesamiento de potencia parcial. La elección de estos temas subraya el compromiso de la tesis con contribuir a la resolución de desafíos contemporáneos en la electrónica de potencia, impulsando así el avance tecnológico y científico en este campo vital.

En las últimas décadas, la investigación en electrónica de potencia ha experimentado un notable crecimiento, impulsado por la necesidad de sistemas de conversión de energía más eficientes, confiables y compactos. Dentro de este ámbito, los convertidores resonantes y la técnica R²P² han emergido como soluciones prometedoras, ofreciendo ventajas significativas en términos de eficiencia y tamaño del sistema [1].

1.2 Estado del arte

1.2.1 Convertidores de baja potencia

Los convertidores de baja potencia son dispositivos electrónicos que modifican las características de la energía eléctrica (como el voltaje y la corriente) para adaptarse a las necesidades específicas de carga de los dispositivos de baja potencia. Estos convertidores son esenciales en aplicaciones donde se requieren potencias relativamente pequeñas, como en dispositivos móviles, circuitos electrónicos, y sistemas de iluminación LED, entre otros [2-6].

Los convertidores de baja potencia generalmente manejan potencias de unos pocos mW hasta aproximadamente 55 W. Dentro de este rango, es esencial considerar no solo las necesidades de potencia, sino también la eficiencia, la confiabilidad y el tamaño del convertidor para garantizar que se adapte adecuadamente a la aplicación específica.

1.2.3 Principales convertidores de baja potencia

Convertidores CD-CD: Cambian un nivel de voltaje de corriente continua a otro. Son muy utilizados en electrónica portátil y sistemas de alimentación de energía para optimizar la vida útil de la batería y mejorar la eficiencia [7-11].

Rectificadores: Convierten corriente alterna (AC) a corriente continua (DC). Aunque pueden manejar altas potencias, existen versiones de baja potencia usadas en adaptadores de corriente para dispositivos pequeños [7-11].

Inversores de baja potencia: Transforman la corriente continua en corriente alterna, pero con una capacidad limitada de potencia. Se utilizan en aplicaciones como sistemas de alimentación de respaldo pequeños o dispositivos que necesitan AC y solamente disponen de una fuente DC [12-14].

1.2.4 convertidores CD-CD

Un convertidor CD-CD es un dispositivo electrónico que transforma corriente continua de un nivel de voltaje a otro. Esto se realiza a través de componentes electrónicos como inductores, capacitores, diodos y transistores. Estos convertidores son esenciales en muchas aplicaciones electrónicas donde diferentes partes del sistema requieren diferentes niveles de voltaje para funcionar correctamente [7-11].

Existen diferentes topologías de Convertidores CD-CD, se mencionan algunos de los más utilizados en este ámbito.

Convertidores reductores (Buck): Reducen el voltaje de entrada a un voltaje de salida más bajo. Son comúnmente usados en aplicaciones donde la fuente de energía tiene un voltaje mayor que el necesario para los circuitos de carga [20-22].

Convertidores elevadores (Boost): Elevan el voltaje de entrada a un voltaje de salida más alto. Son útiles en casos donde la fuente de energía proporciona un voltaje que es menor al requerido por el circuito o dispositivo de destino [23-25].

Convertidores elevadores/reductor (Buck-Boost): Capaces de aumentar o disminuir el voltaje según sea necesario. Son versátiles y pueden manejar situaciones donde el voltaje de entrada puede variar por encima o por debajo del voltaje de salida deseado [26-28].

Convertidor Flyback: Utiliza un transformador para almacenar la energía durante la parte del ciclo cuando el interruptor está cerrado y para transferir esta energía al circuito de salida cuando el interruptor está abierto [29-31].

Convertidor Resonante: Los convertidores resonantes utilizan inductores y capacitores para operar a frecuencias resonantes, aprovechando estas características para mejorar el rendimiento del sistema. Estos convertidores se destacan por su alta eficiencia y menor generación de ruido electromagnético debido a la conmutación suave a frecuencias de resonancia.

Al operar a frecuencias de conmutación más altas, los convertidores resonantes pueden reducir el tamaño y el peso de los componentes pasivos, lo que resulta en diseños más compactos y ligeros.

Los convertidores resonantes operan típicamente a frecuencias de conmutación que van desde varios cientos de kHz hasta varios MHz, los convertidores resonantes pueden alcanzar eficiencias superiores al 90% y La conmutación suave a frecuencias resonantes minimiza el ruido electromagnético, estas son algunas características de este tipo de convertidores.

A diferencia de los convertidores conmutados tradicionales que operan con conmutación dura (abrupta), los convertidores resonantes usan conmutación suave, lo que reduce las pérdidas por conmutación y el ruido electromagnético [32-36].

Convertidor Half-Bridge: Usa dos interruptores (generalmente transistores) que se accionan alternadamente para aplicar voltaje a través de un transformador [37-39].

Convertidor Full-Bridge: Utiliza cuatro interruptores para controlar el flujo de corriente a través del transformador en ambas direcciones, lo que permite un mayor control sobre el voltaje y la corriente de salida [40-42].

1.2.5 Eficiencia del procesamiento de la energía en convertidores

La eficiencia del procesamiento de la energía en convertidores CD-CD es un factor crítico que influye directamente en el rendimiento de muchos sistemas electrónicos.

Estos circuitos que conforman los convertidores presentan unas eficiencias muy altas, pero no son constantes y entonces hay una pérdida de energía a través del circuito [43].

La mayoría de las pérdidas se presentan en forma de calor y para poder calcular cuanta eficiencia tiene el convertidor se utiliza la fórmula (1) y de esa forma obtener la eficiencia de nuestro proceso:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{int}} \quad (1)$$

Este parámetro es crucial porque determina cuánta energía de entrada se pierde durante el proceso de conversión.

1.2.6 Técnicas para mejorar la eficiencia en los convertidores

La eficiencia de los circuitos electrónicos es crucial para optimizar el rendimiento minimizar el desperdicio de energía.

Hay diversas técnicas y estrategias que se pueden emplear para mejorar la eficiencia en los circuitos electrónicos, incluyendo tanto el diseño de hardware como el de software. A continuación, se describen algunas de las técnicas más efectivas:

- Uso de Componentes adecuados

Transistores de Baja Resistencia: Utilizar transistores con baja resistencia en estado conducción ($R_{DS(on)}$) minimiza las pérdidas de potencia y aumenta la rapidez de conmutación.

Diodos de Baja Caída de Tensión: Emplear diodos Schottky o de barrera de potencial baja para reducir las pérdidas en los circuitos rectificadores.

- Optimización de la Topología del Convertidor

Convertidores Resonantes: Como los convertidores LLC o resonantes que emplean conmutación suave para reducir las pérdidas asociadas con la conmutación.

Selección Adecuada de la Topología: Elegir la topología correcta (buck, boost, buck-boost, etc.) en función de la relación entre el voltaje de entrada y salida deseada para optimizar la eficiencia.

- R²P² (Reduced Redundant Power Processing)

Esta técnica se utiliza para que los convertidores procesen sólo una parte de la energía total transferida y que el resto de la energía se transfiera directamente de la fuente a la carga.

1.2.7 R²P² (Reduced Redundant Power Processing)

R²P² (Reduced Redundant Power Processing) es una técnica utilizada en el diseño de sistemas de energía, especialmente en aplicaciones que involucran múltiples fuentes de energía o convertidores de energía. Esta técnica tiene como objetivo minimizar las pérdidas de energía asociadas con la conversión y distribución de energía en sistemas electrónicos, lo que resulta en una mayor eficiencia energética y mejor rendimiento general del sistema.

Se explicarán algunas razones clave por las que se utiliza R²P²:

Eficiencia mejorada: En sistemas convencionales, donde múltiples etapas de conversión de energía son comunes (por ejemplo, convertir de DC a AC y de nuevo a DC), cada etapa incurre en pérdidas debido a la eficiencia no perfecta de los convertidores. R²P² intenta reducir el número de etapas de conversión necesarias o optimizar la manera en que estas conversiones ocurren, reduciendo así las pérdidas totales.

Menor disipación de calor: Reduciendo las pérdidas de energía, también se reduce la cantidad de calor generado por los dispositivos. Esto es especialmente beneficioso en entornos donde la disipación de calor es una preocupación crítica, como en sistemas compactos o en aquellos donde el control térmico es difícil.

Aumento de la confiabilidad: Menos etapas de conversión y menor disipación de calor pueden contribuir a un aumento en la confiabilidad del sistema. Los componentes sometidos a menos estrés térmico y eléctrico tienden a tener una vida útil más larga y menores tasas de fallo.

Reducción de costos: Implementar R²P² puede conducir a una reducción en el número de componentes necesarios, como menos convertidores de energía y elementos de refrigeración. Esto puede traducirse en ahorros significativos en costos de producción y mantenimiento.

Simplificación del diseño: Al reducir la cantidad de componentes y etapas de conversión, el diseño del sistema puede simplificarse. Esto no solo ayuda a reducir costos, sino que también puede hacer que el sistema sea más fácil de entender y mantener.

Optimización para fuentes de energía renovables: R²P² es particularmente útil en sistemas que integran fuentes de energía renovables, como solar o eólica, donde la eficiencia en la conversión de energía es crucial para maximizar el aprovechamiento de estas fuentes variables y a menudo intermitentes.

En resumen, la técnica de Reduced Redundant Power Processing es fundamental para mejorar la eficiencia, confiabilidad, y coste-efectividad de los sistemas de energía modernos, especialmente aquellos que buscan integrar tecnologías avanzadas y sostenibles en sus operaciones .[44-53]

1.2.8 Como implementar la técnica R²P² (Reduced Redundant Power Processing)

Para implementar esta técnica se busca que el convertidor solo procese una parte de la energía y otra parte pase directo a la carga, esto puede lograr una mejora significativa de la eficiencia como se muestra en la figura 3 [54]. En [55] hace mención que solo se procesa el 20% de la potencia y gracias a eso se obtiene una eficiencia mayor al 90% con un máximo del 91.63% y en [56] Se obtiene un 6% de eficiencia mayor.

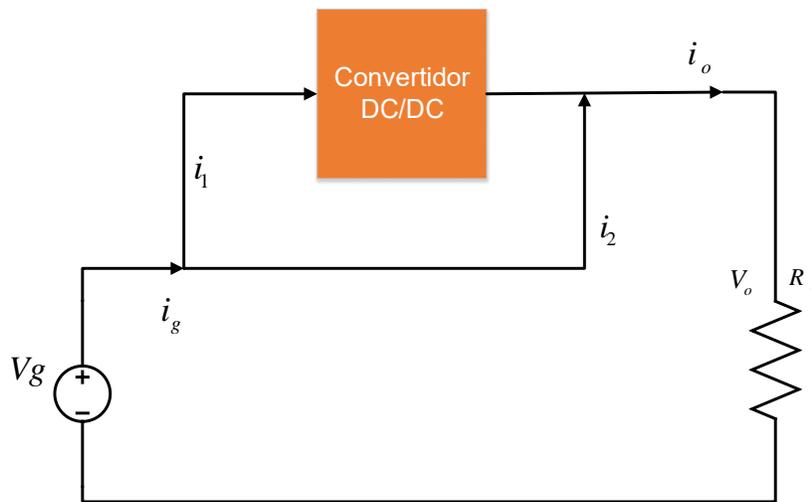


Figura 1 Se aplica la técnica r²p² donde se muestra que parte de la energía pasa por el convertidor y otra parte pasa directamente a la carga.

En los últimos años se han desarrollado más convertidores CD-CD donde los convertidores han sido cada vez más eficientes, actualmente, se logran eficiencias de procesamiento de energía hasta un 5% superiores en comparación con las topologías convencionales. [57].

Para mejorar la eficiencia del convertidor aplicando la técnica R²P², es necesario reorganizar los componentes del convertidor. Aunque la configuración más común

de los convertidores es colocar los componentes en serie para procesar la energía, esta disposición puede disminuir la eficiencia, como se observa en la figura 2.

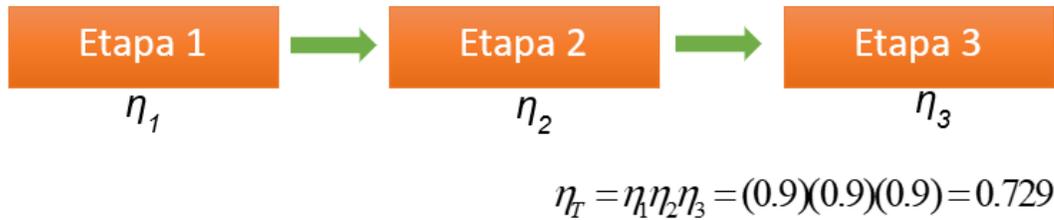


Figura 2 Procesamiento en serie.

Sin embargo, cuando la energía se procesa de forma paralela la eficiencia tiende a subir como se muestra en la figura 3, para ello se recomienda buscar un convertidor con bobinas acopladas ya que estas permiten que los componentes del convertidor se puedan acomodar de tal manera que tenga una configuración en paralelo y a la hora de que la energía sea procesada pueda tener un aumento en la eficiencia.

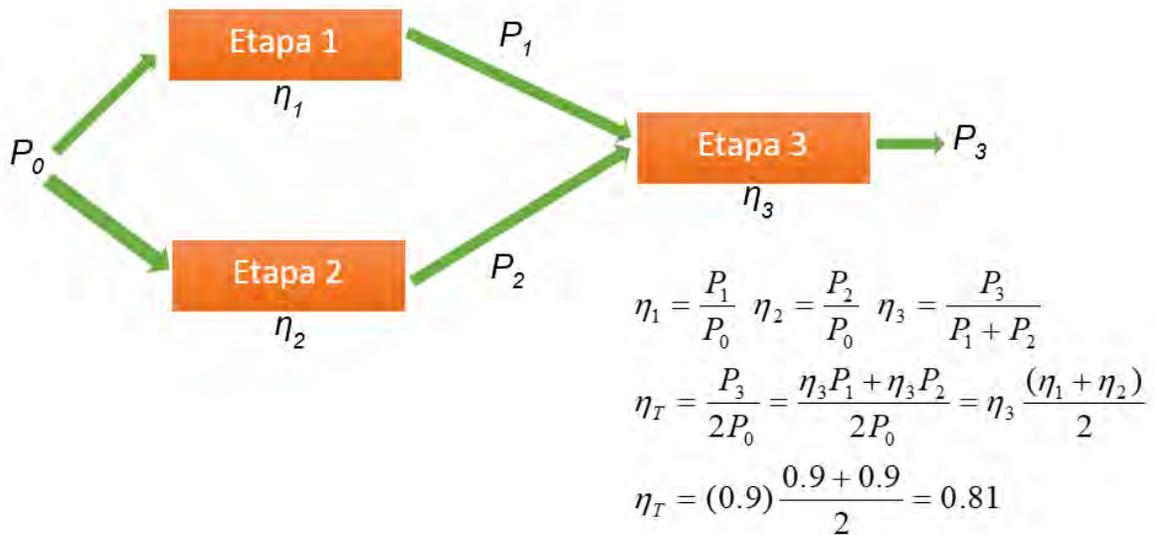


Figura 3 Procesamiento en paralelo.

se realizó una búsqueda del término “reduced redundant power processing” en la página www.lens.org y se observa que se ha publicado muy poco respecto al tema.



Figura 4 Publicaciones a lo largo del tiempo (www.lens.org).

1.2.9 Problemática a resolver

En la revisión de la literatura, se encontró que existen diversos tipos de convertidores que emplean la técnica R^2P^2 . Aunque muchos autores se enfocan en diferentes topologías, se observa que la aplicación de esta técnica a menudo implica la adición de más componentes al convertidor.

Por lo tanto, se busca diseñar un dispositivo que sea eficiente, que sea capaz de aplicar la técnica de procesamiento de potencia parcial. Este dispositivo debe reducir los costos del convertidor.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Se llevará a cabo un análisis de diversos convertidores CD-CD para evaluar su viabilidad en la implementación de la técnica R^2P^2 . Una vez seleccionado un convertidor adecuado, se procederá a su implementación con el objetivo de mejorar la eficiencia en el procesamiento de la energía. Se mantendrán los componentes originales y se controlarán los costos durante todo el proceso.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Explorar las topologías y métodos documentados en la Literatura de convertidores CD-CD que emplean la técnica R²P², centrándose en la modificación estructural sin aumento de costos.
- b) Proponer al menos una alternativa innovadora, ya sea una variante de topología o método de operación, manteniendo una eficiencia eléctrica de al menos 3% mayor a la topología convencional elegida.
- c) Analizar e implementar la opción elegida.
- d) Comparar los resultados experimentales obtenidos con respecto a los resultados simulados.

CAPÍTULO II
REVISIÓN DE LOS
CONVERTIDORES
CD-CDQUE
EMPLEAN LA
TÉCNICA R^2P^2

CAPÍTULO II REVISIÓN DE LOS CONVERTIDORES CD-CDQUE EMPLEAN LA TÉCNICA R²P²

2.1 Tipos de convertidores CD-CD con R²P²

Se puede aplicar la técnica de Reduced Redundant Power Processing (R²P²) utilizando cuatro tipos fundamentales de convertidores: resonantes, no resonantes, aislados y no aislados. Además, existe una quinta categoría que combina características de las categorías mencionadas: los convertidores resonantes aislados. Esta topología híbrida aprovecha las ventajas de los convertidores resonantes y la seguridad del aislamiento galvánico, ofreciendo así soluciones eficientes y seguras para una variedad de aplicaciones.

2.1.1 Convertidores Resonantes

Un circuito resonante es un circuito eléctrico o electrónico que tiene la capacidad de resonar a una frecuencia específica. La resonancia ocurre cuando la impedancia del circuito alcanza su valor mínimo y la corriente alcanza su valor máximo en esa frecuencia de resonancia.

Un circuito resonante típico consta de un inductor (bobina) y un condensador conectado en serie o en paralelo. Estos elementos almacenarán energía en forma de campo magnético (inductor) y campo eléctrico (condensador) respectivamente.

Cuando la frecuencia de la fuente de alimentación del circuito coincide con la frecuencia de resonancia del circuito, se crea un ciclo de carga y descarga continua entre el inductor y el condensador. Esto provoca una amplificación de la corriente y un voltaje máximo en el circuito resonante. En cambio, si la frecuencia de la fuente de alimentación es diferente a la frecuencia de resonancia, la corriente se reduce y el voltaje en el circuito también disminuye.

Los circuitos resonantes se utilizan en una variedad de aplicaciones, como en la sintonización de circuitos de radio, filtros selectivos de frecuencia, osciladores, antenas y sistemas de comunicación inalámbrica. También son utilizados en tecnologías como la resonancia magnética (RM) en medicina y la carga inalámbrica de dispositivos electrónicos [42,43].

La implementación de R²P² con convertidores resonantes proporciona una solución efectiva para mejorar la eficiencia en sistemas de conversión de energía. Esta combinación es especialmente beneficiosa en términos de eficiencia, reducción de EMI (interferencia electromagnética), y manejo térmico, lo que la hace ideal para sistemas modernos que buscan maximizar la eficiencia y la sostenibilidad.

2.1.2 Convertidores no Resonantes

Los convertidores no resonantes no emplean un circuito resonante para la transferencia de energía. En cambio, utilizan inductores y capacitores para almacenar y transferir energía, pero sin la oscilación resonante característica de los convertidores resonantes. Estos convertidores tienden a ser más simples en diseño y más robustos en términos de rango de operación, pero pueden tener mayores pérdidas de conmutación y generar más interferencia electromagnética (EMI) que los convertidores resonantes.

Aunque los convertidores no resonantes no ofrecen la misma eficiencia en la conmutación que los convertidores resonantes, su simplicidad, costo, robustez y facilidad de control pueden hacerlos adecuados para ciertas implementaciones de R^2P^2 . La elección entre convertidores resonantes y no resonantes dependerá de las prioridades específicas del diseño, como el costo, la eficiencia, la simplicidad y las especificaciones técnicas requeridas. En cualquier caso, el objetivo de R^2P^2 de minimizar las conversiones de energía redundantes y optimizar la eficiencia general del sistema sigue siendo un principio guía importante.

2.1.3 Convertidores Aislados

Los convertidores aislados son aquellos que incorporan un método de aislamiento físico entre sus circuitos de entrada y salida, normalmente utilizando transformadores. Estos transformadores no sólo ayudan en la conversión de niveles de voltaje, sino que también proporcionan aislamiento galvánico, esencial para proteger los circuitos y los usuarios de posibles descargas eléctricas y para evitar bucles de tierra.

Sin embargo, hay algunos desafíos al implementar R^2P^2 con convertidores aislados:

Costo y Tamaño: Los convertidores aislados tienden a ser más costosos y más grandes que los no aislados debido al uso de transformadores y circuitos adicionales para el manejo de aislamiento.

Utilizar R^2P^2 con convertidores aislados ofrece beneficios significativos en términos de seguridad, cumplimiento de normativas, y flexibilidad de diseño. Aunque puede implicar un mayor costo y complejidad, la optimización de estos sistemas para minimizar la redundancia y mejorar la eficiencia energética puede justificar estos retos, especialmente en aplicaciones críticas o reguladas.

2.1.3 Convertidores no Aislados

Los convertidores no aislados, como los convertidores buck, boost, y buck-boost, son tipos comunes de convertidores de potencia que directamente regulan el

voltaje de salida a partir de un voltaje de entrada sin utilizar un transformador para proporcionar aislamiento. Esto los hace más compactos, menos costosos y generalmente más eficientes que sus contrapartes aisladas.

Aunque R^2P^2 con convertidores no aislados es eficiente, existen desafíos que deben considerarse:

Limitaciones de Seguridad: La falta de aislamiento puede ser un problema en aplicaciones que requieren una completa separación eléctrica entre la entrada y la salida para proteger los dispositivos y a los usuarios de choques eléctricos o interferencias.

2.1.4 Convertidores Resonantes Aislados

Los convertidores resonantes aislados incorporan un transformador en su diseño para proporcionar aislamiento galvánico mientras utilizan circuitos resonantes (compuestos por inductancias y capacitancias) para realizar la transferencia de energía con alta eficiencia. Estos convertidores están diseñados para operar en frecuencias de resonancia, permitiendo conmutaciones con pérdidas mínimas, lo que reduce significativamente las pérdidas de energía y mejora la eficiencia global del sistema, existen diferentes tipos de convertidores como son el LLC, LCC entre otros.

Ventajas de Usar Convertidores Resonantes Aislados en R^2P^2

Alta Eficiencia: Los convertidores resonantes aislados son conocidos por su alta eficiencia debido a la minimización de pérdidas en la conmutación. Esto es crucial en R^2P^2 , donde la eficiencia en cada etapa de conversión de energía es esencial para reducir el procesamiento redundante de potencia.

Aislamiento Galvánico: El uso de transformadores en estos convertidores proporciona el aislamiento necesario para cumplir con las normativas de seguridad, evitando problemas de tierra y protegiendo los componentes sensibles de posibles daños eléctricos.

2.2 Aplicación de la Técnica R^2P^2 en Diferentes Tipos de Convertidores

Al explorar los distintos tipos de convertidores, es crucial examinar cómo se implementa la técnica R^2P^2 en cada uno de ellos. Para ello, se ha consultado la literatura especializada en busca de ejemplos de implementación en diversos tipos de convertidores. Este análisis comparativo nos permitirá identificar la opción más adecuada que se adapte a las necesidades específicas de nuestro circuito y maximizar los beneficios de esta técnica.

2.2.1 Convertidor Boost

Un convertidor boost es un tipo de convertidor de corriente continua que aumenta el voltaje o la tensión de entrada a un nivel de salida mayor. Este tipo de convertidor es muy útil cuando se necesita proporcionar una tensión de salida mayor que la tensión de entrada.

En el caso de la implementación de un convertidor Boost con la técnica de R²P² se observa que es necesario implementar un mayor número de componentes para poder implementar dicha técnica [60] como se observa en la figura 5, al aplicar esta técnica con este convertidor alcanza una eficiencia del 92%.

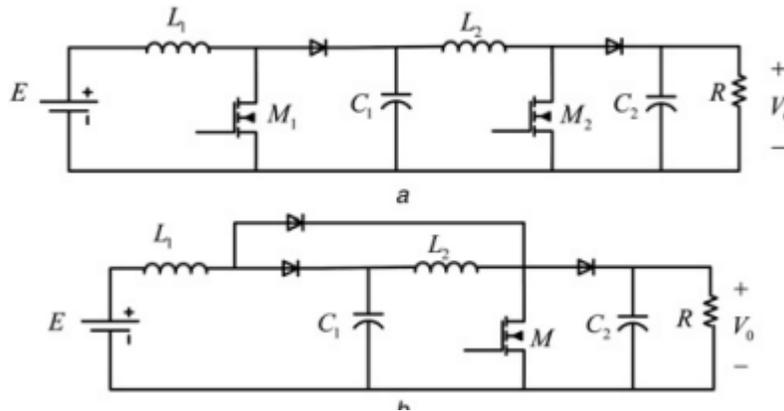


Figura 5 Boost con R²P².

2.2.2 Convertidor Buck

Los convertidores buck son ampliamente utilizados en aplicaciones donde se necesita reducir el voltaje de entrada.

En el caso de la implementación de un convertidor Buck con la técnica de R²P² se observa que es necesario implementar un mayor número de componentes para poder implementar dicha técnica [61] como se observa en la figura 6, al aplicar esta técnica con este convertidor alcanza una eficiencia del 95%.

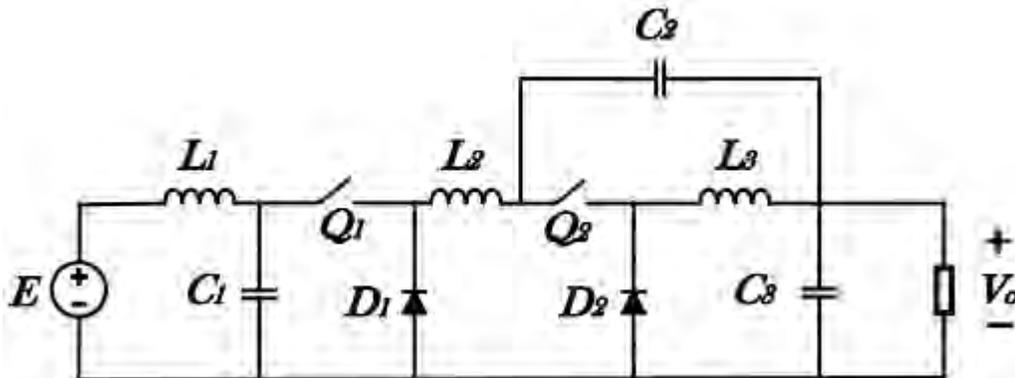


Figura 6 Buck con R²P².

2.2.3 Convertidor Buck-Boost

A través de la búsqueda hecha en la literatura, se identificaron diversos diseños para llevar a cabo el procesamiento parcial de la energía. Uno de ellos es el convertidor tipo Buck-Boost; no obstante, su implementación requiere la adición de componentes con el fin de lograr una mejora significativa en la eficiencia energética [62].

Adicionalmente, se encontró otra topología de convertidor Buck-Boost que emplea una técnica similar. Aunque esta configuración logra aumentar la eficiencia del sistema, el incremento en la cantidad de componentes conlleva un aumento proporcional en el costo del dispositivo [63].

Asimismo, se halló una variante de la topología Buck-Boost que está diseñada específicamente para una potencia de salida de 600W. Aunque esta estructura propuesta muestra una ganancia de eficiencia del orden del 3% en comparación con la estructura clásica, es necesario destacar que su implementación requiere la incorporación de componentes adicionales [56].

La investigación detallada de diversas topologías de convertidores para el procesamiento parcial de la energía ha ofrecido una visión integral de los desafíos y oportunidades en la optimización de la eficiencia energética. Mientras que el convertidor tipo Buck-Boost plantea mejoras notables, es crucial reconocer que su implementación conlleva un aumento en la complejidad y costos asociados. La variante específica para potencias de salida de 600W destaca la necesidad de considerar cuidadosamente los compromisos entre eficiencia y la viabilidad económica.

2.2.4 Convertidor Flyback

En el artículo [64], se detalla cómo se implementa el procesamiento parcial de la energía en un convertidor Flyback. La figura 7 ilustra el diagrama de flujo de potencia de un Flyback convencional en comparación con un diseño reordenado propuesto. Este diagrama facilita la comprensión del funcionamiento del convertidor propuesto, mostrando cómo una parte de la potencia de entrada P_i se suministra directamente a la carga, mientras que el resto es procesado por el convertidor Flyback. Como resultado, este enfoque mejora significativamente la eficiencia total en comparación con un Flyback convencional.

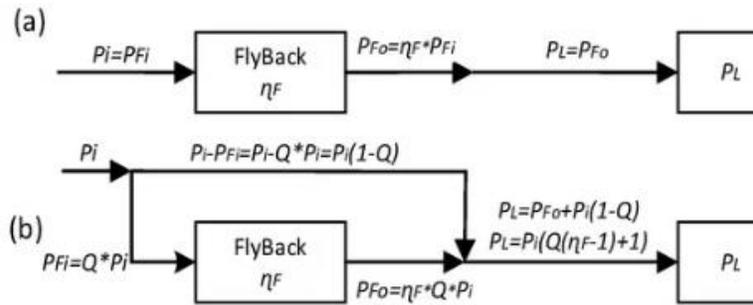


Figura 7 Diagramas de flujo de potencia, (a) flyback convencional y (b) flyback reordenado propuesto. P_i es la potencia de entrada al convertidor [64].

El artículo [64] menciona que El porcentaje de potencia que el convertidor Flyback procesa se llama constante Q . Este valor de Q debe estar entre 0 y 1. Si Q es mayor que 1, no es práctico usar esta topología porque en lugar de obtener beneficios, resultaría en menor eficiencia y un tamaño eléctrico más grande comparado con un Flyback básico aislado.

Sin embargo, resulta muy beneficioso emplear este tipo de convertidores aislados junto con la técnica R^2P^2 , dado que esta combinación puede optimizar significativamente la eficiencia y la seguridad del sistema.

2.2.5 Convertidor Resonante con Aislamiento Magnético

Se han explorado diversas topologías de convertidores y se han estudiado múltiples aplicaciones de la técnica R^2P^2 , con el objetivo de implementar un circuito que satisfaga de manera efectiva las necesidades específicas de implementación. En este proceso, se ha identificado que los convertidores aislados representan una excelente opción. Además, al requerirse el manejo de frecuencias más altas, se ha optado por seleccionar convertidores resonantes. Por lo tanto, se procederá a buscar un convertidor resonante que ofrezca aislamiento magnético, combinando así las ventajas de ambas tecnologías para optimizar el rendimiento y la eficiencia del sistema.

En la tabla 1 se muestran un resumen de los diferentes tipos de convertidores resonantes aislados mostrando ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

Tabla 1. Tipos de convertidores Resonantes con Aislamiento Magnético

Tipo de Convertidor	Ventajas	Desventajas
---------------------	----------	-------------

LLC Resonante	Alta eficiencia por ZVS. Amplio rango de operación. Bajas EMI. Buen manejo de carga variable.	Complejidad en el control y diseño. Requiere componentes de precisión.
Serie Resonante	Buen rendimiento a cargas altas. Simplifica el diseño con menos componentes resonantes.	Menos eficiente a bajas cargas. No siempre logra ZVS, dependiendo de la carga.
Paralelo Resonante	Opera bien a cargas ligeras. Generalmente más sencillo de controlar que el LLC.	Eficiencia baja a cargas altas. Puede requerir mayor control de la frecuencia.
Serie-Paralelo	Versátil, puede diseñarse para optimizar tanto para cargas altas como bajas.	Diseño más complejo. Puede ser más caro de implementar.

El convertidor resonante LLC es a menudo la mejor opción para aplicaciones que requieren un balance entre eficiencia alta, flexibilidad operativa y compatibilidad con una variedad de condiciones de carga. Algunas razones específicas incluyen:

Flexibilidad de Diseño: Gracias al uso de dos inductores y un capacitor, el convertidor LLC puede ser ajustado para optimizar tanto la ganancia de voltaje como las características de impedancia, lo que permite una mayor adaptabilidad en la respuesta a diferentes voltajes de entrada y requisitos de salida.

Reducción de EMI: Los convertidores LLC tienden a generar menos interferencia electromagnética debido a las transiciones suaves de voltaje durante la conmutación. Esto es especialmente beneficioso en entornos donde la interferencia puede afectar negativamente a otros dispositivos electrónicos o donde se deben cumplir estrictas normativas de EMI.

Estas características hacen del convertidor LLC una opción superior para muchas aplicaciones industriales y comerciales, donde la eficiencia, la adaptabilidad y el cumplimiento de normativas son cruciales.

2.2.6 Convertidor Resonante LLC con aislamiento magnético

Para elegir el convertidor más adecuado se busca que cuente con bobinas acopladas ya que eso nos permitirá reacomodar sus componentes.

Una vez que se observan las diferentes topologías de los convertidores CD-CD se observa que convertidor será el adecuado para poder utilizarlo en el procesamiento de la energía ya que puede trabajar con rangos de voltaje y de potencia propuestos y a su vez tienen aislamiento galvánico que nos permite reacomodar sus componentes y aplicar la técnica R^2P^2 , uno de los convertidores más adecuado es el convertidor Resonante. Para ello se busca aplicar la técnica como se aplicó en el artículo [64].

En un convertidor resonante, la operación se sincroniza con la frecuencia natural de resonancia del circuito, lo que puede conducir a ventajas en términos de eficiencia y pérdidas de conmutación reducidas en comparación con algunos convertidores convencionales. Este tipo de diseño se utiliza comúnmente en aplicaciones donde se busca minimizar las pérdidas de conmutación y mejorar la eficiencia del sistema. Este tipo de convertidor cuenta con aislamiento galvánico, una buena densidad de potencia y altas eficiencias en la figura 8 se muestra el convertidor LLC resonante [65-66].

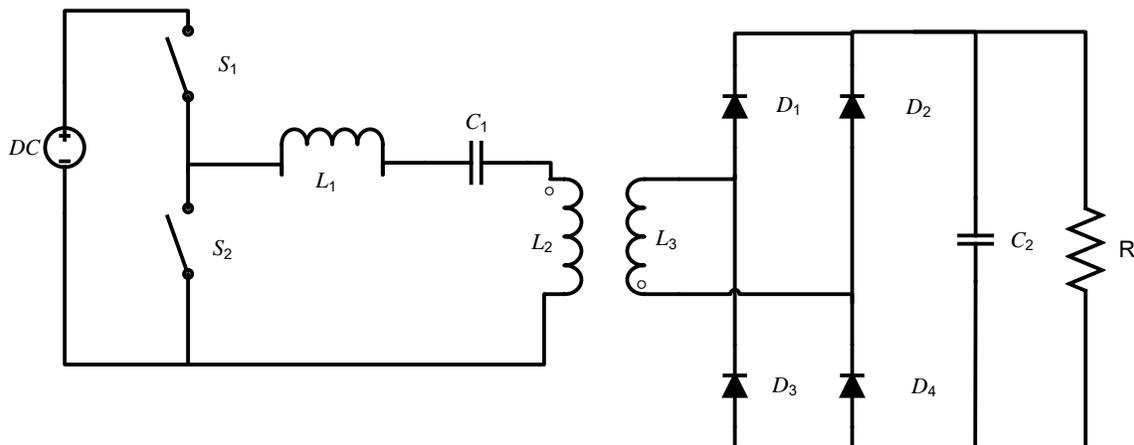


Figura 8 Convertidor resonante LLC.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y

DISEÑO DEL

CONVERTIDOR

RESONANTE LLC

CAPÍTULO III ANÁLISIS Y DISEÑO DEL CONVERTIDOR RESONANTE LLC

3.1 Elección de la topología del convertidor

Se presenta la topología de un convertidor LLC clase D, el cual es utilizado debido a su facilidad de control y permite trabajar a altas frecuencias [67] desde 100 kHz hasta 2 MHz, por lo tanto, se busca un convertidor que trabaje a 500 kHz y tenga una alta eficiencia. En la Figura 9, se muestra el esquema de un inversor clase D.

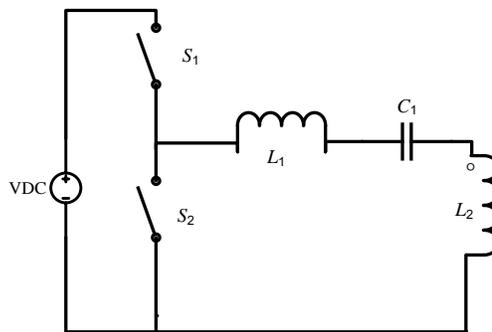


Figura 9 Circuito clase D

3.2 Desarrollo del convertidor resonante LLC

Se utilizará un convertidor resonante LLC con el cual se implementará un procesamiento parcial de la basado en un amplificador clase D con un tanque resonante LLC estos circuitos funcionan a altas frecuencias lo cual permiten mayores eficiencias, este circuito se dividirá en 3 partes para poder reacomodar sus componentes e implementar la técnica R^2P^2 (véase en anexo 1).

Se analizará el convertidor resonante en bloques y con ello nos basaremos como lo explica en [68] donde se realiza un equivalente de cada bloque para poder simplificar el convertidor LLC.

En la figura 10 se observa cómo se pueden representar cada parte del convertidor en un bloque, al tenerlos de esta manera los podemos reacomodar.

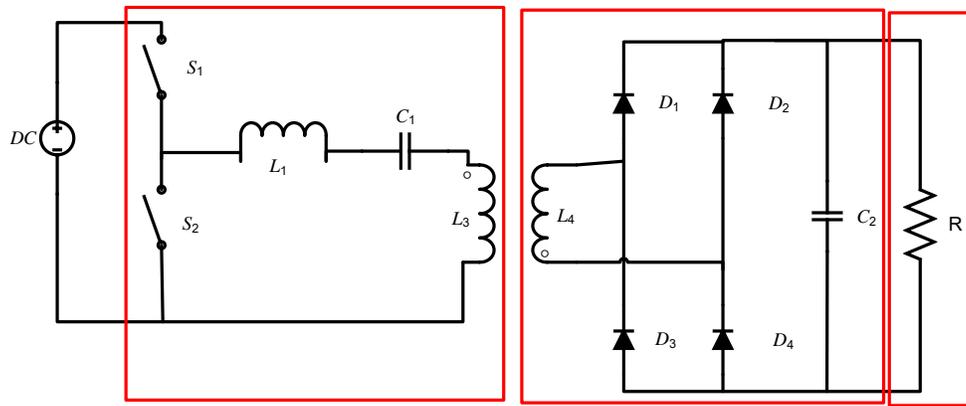


Figura 10 Separación por bloques.

Para comenzar será necesario seleccionar el rectificador que se adecue más a nuestros requerimientos, de igual forma se buscará la compatibilidad con nuestro tanque resonante. Para analizar mejor el convertidor LLC se buscará obtener un modelo más simplificado el cual consiste en obtener un circuito equivalente lo más simple posible. Este trabajo se centra en el funcionamiento del convertidor resonante LLC con transformador el cual el tanque resonante se comporte como una fuente de corriente, para que esto pueda ser posible se recomienda utilizar un circuito rectificador sin inductancia para que se comporte como una fuente de voltaje, por lo tanto, por compatibilidad el tanque resonante tiene que comportarse como una fuente de corriente. Para ello es necesario considerar el valor de las impedancias las cuales definirán el comportamiento del tanque resonante, si $R_{eq1} > R_{LMP}$ predomina R_{LMP} el tanque resonante se comporta como una fuente de voltaje y si $R_{eq1} < R_{LMP}$ predomina R_{eq1} el tanque resonante se comporta como una fuente de corriente como se observa en la figura 11 (véase en anexo 2).

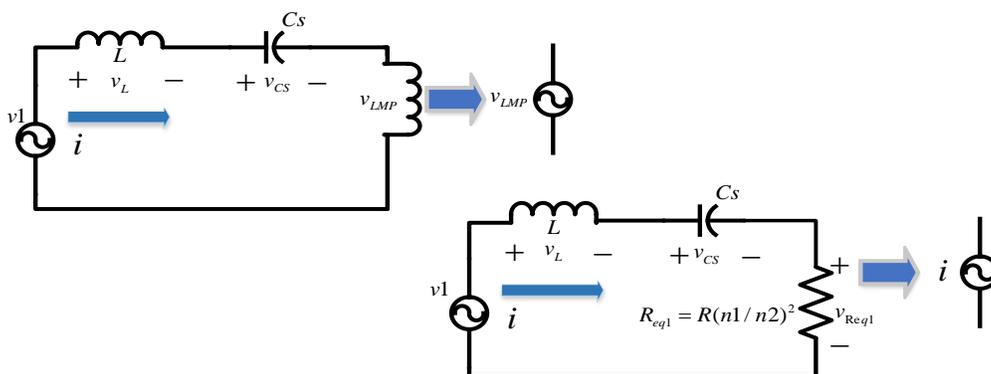


Figura 11 Tanque resonante como fuente de voltaje o de corriente

3.3 Convertidor Resonante LLC clase D con la técnica R²P²

Una vez que el circuito se ha desarrollado de esta manera, tenemos la capacidad de reorganizarlo, como se ilustra en la Figura 12. De esta manera, logramos implementar el procesamiento parcial de la energía sin incrementar el número de componentes, al mismo tiempo que mejoramos la eficiencia del sistema energético.

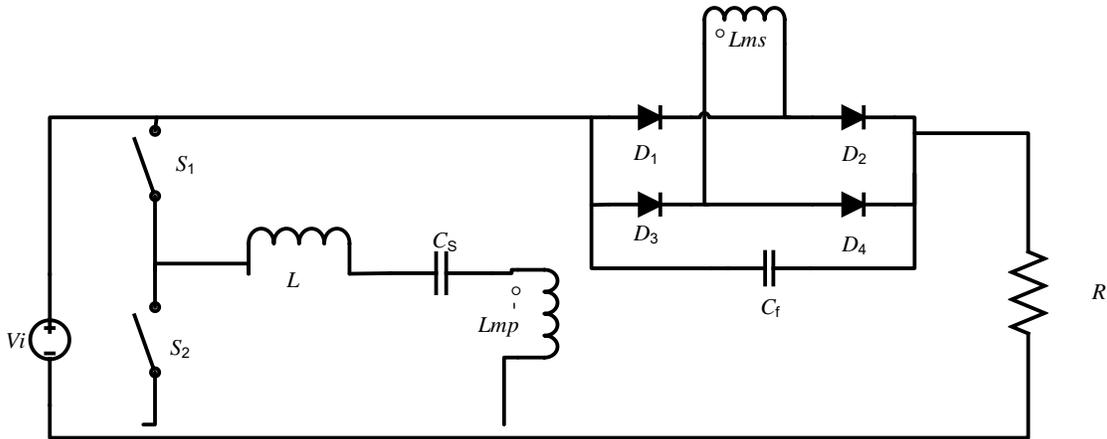


Figura 12 Circuito resonante modificado con procesamiento parcial de la energía

A través del reordenamiento estratégico de los componentes en el convertidor resonante, aplicando la técnica R²P², ofrecen una significativa mejora tanto en la eficiencia del sistema como en la gestión de costos asociados. Este enfoque innovador no solo demuestra su capacidad para optimizar la eficacia energética, sino que también resalta su impacto positivo en la viabilidad económica del convertidor.

3.4 Análisis y metodología de diseño del convertidor

Se lleva a cabo un análisis detallado del circuito con el objetivo de determinar los valores óptimos para componentes clave, tales como los capacitores e inductores, a su vez proponer valores específicos para el desarrollo del mismo como son el voltaje de alimentación, las potencias involucradas, entre otros. Este proceso implica un examen minucioso de las características eléctricas del sistema, utilizando herramientas y métodos de cálculo especializados. La finalidad es asegurar un diseño eficiente y preciso del convertidor, optimizando la selección de componentes para garantizar un rendimiento óptimo en términos de eficiencia energética y cumplimiento de requisitos específicos del sistema.

En la Tabla 2, se muestran las especificaciones generales del circuito, es decir, los valores propuestos para poder desarrollar nuestro convertidor resonante.

Tabla 2. Especificaciones generales del circuito

Variable	Símbolo	Valor
Voltaje de alimentación	V_i	50 V
Voltaje de salida	V_o	100 V
Potencia	P_o	50 W
Frecuencia	f	500 kHz
Factor de calidad	Q	5
Relación de impedancias	a	10
Voltaje directo de los diodos	V_{diodos}	0.7
Rizo de voltaje	r	5%

El análisis y desarrollo de la metodología de diseño se presenta de manera completa en el Anexo 2. En la Figura 13, se muestra el circuito que se utiliza para realizar los cálculos de la metodología.

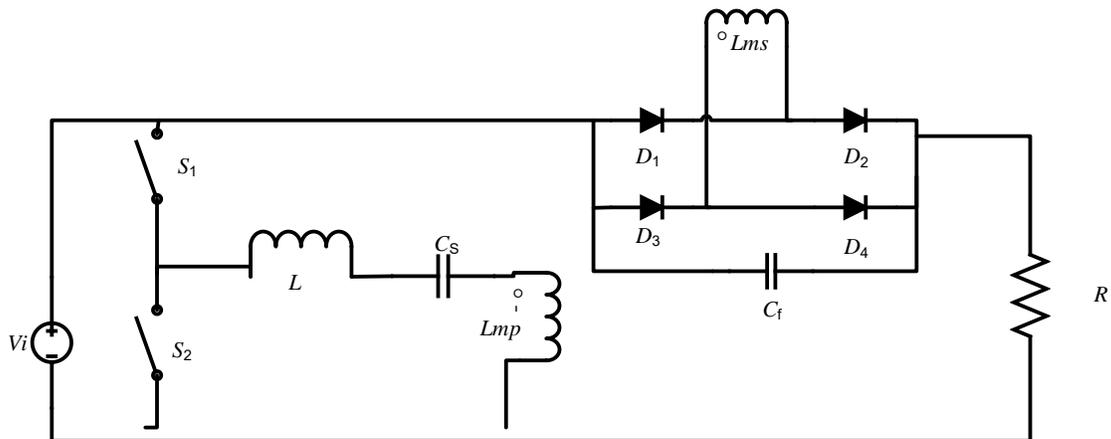


Figura 13 Circuito resonante con procesamiento parcial de la energía.

En el proceso de desarrollo de un convertidor, una fase crucial implica el cálculo preciso de los componentes eléctricos fundamentales. En este contexto, se presentan los valores calculados de capacitores para la simulación del circuito, junto con las determinaciones correspondientes para la inductancia y el transformador.

El cálculo de capacitores es esencial para optimizar el rendimiento del convertidor en distintas condiciones. La variación de estos valores juega un papel crucial en la eficiencia del sistema y en su capacidad para responder a diferentes demandas energéticas.

Asimismo, la determinación de la inductancia y las características del transformador es igualmente vital. Estos elementos desempeñan un papel fundamental en la transferencia eficiente de energía dentro del circuito. El cálculo meticuloso de estos componentes contribuye no solo a maximizar la eficiencia del convertidor, sino también a garantizar su estabilidad y rendimiento consistente.

La Tabla 3 exhibe los resultados de los valores calculados correspondientes al convertidor resonante. Para una comprensión más detallada de los cálculos realizados en la elaboración de este convertidor, se proporcionan las ecuaciones aplicadas en el Anexo 2.

Tabla 3. Valores para componentes del convertidor

Variable	Símbolo	Ecuación	Valor
Inductor del tanque resonante	L	$L = \frac{Xl}{\omega}$	31.307 μH
Capacitor del tanque resonante	c_s	$c_s = \frac{1}{Xlr * \omega}$	3.172 nF
Transformador primario	Lmp	$Lmp = \frac{Xlmp}{\omega}$	65.083 μH
Transformador secundario	Lms	$Lms = Lmp * Rrv^2$	278.837 μH
Capacitor de filtrado	C_f	$C_f = \frac{10.52}{\%r * f * R}$	$C_f \geq 21.040nF$
Resistencia de carga	R	$R = \frac{Vo^2}{Vi}$	200 Ω

La metodología de diseño fue presentada en el Anexo 3 de acuerdo con el análisis del convertidor resonante. El convertidor se diseñó con un medio puente. Esto se hizo con el fin de obtener un alto factor de calidad y una mejor eficiencia, ya que se trabaja con altas frecuencias.

3.5 Selección de componentes para el convertidor LLC

Tras una exhaustiva revisión de la literatura, se encontraron diversas propuestas de diseño para el inductor y el transformador en el contexto del convertidor resonante LLC Clase D. Sin embargo, la mayoría de estos diseños se caracterizan por su robustez, empleando materiales pesados y con inductancias grandes. Este enfoque conlleva a la generación de corrientes elevadas y, como consecuencia, a altas temperaturas en el sistema.

En respuesta a este desafío, se optó por un enfoque de diseño más simplificado, utilizando hilo de Litz. Este material es especialmente adecuado para trabajar a altas frecuencias y presenta la ventaja de generar corrientes relativamente pequeñas en comparación con otros diseños. De este modo, se espera mitigar los problemas asociados con las altas temperaturas y mejorar la eficiencia y fiabilidad del convertidor.

Para ello se utilizó el siguiente hilo de Litz con las siguientes características, alambre cubierto de seda, alambre trenzado, alambre de alta frecuencia, con alambre esmaltado 0.10 de alta pureza, con una resistencia a la temperatura de 155 a 180 grados centígrados y el aislamiento entre cada cable es de 1kV. La resistencia máxima a la temperatura puede alcanzar los 230 grados centígrados y el voltaje soportado puede alcanzar más de 4kV. Baja impedancia de alta frecuencia, bajo autocalentamiento, baja resistencia.

Con Frecuencia aplicable de 15 kHz hasta 300 kHz, donde su aplicación principal aplicación son fuentes de alimentación conmutadas de alta potencia, carga inalámbrica, soldadoras eléctricas, transformadores y otros aparatos eléctricos.

El calibre del alambre utilizado para la construcción de estos componentes fue de 29 AWG.

Para este inductor de 31.307 uH fueron necesarios 14 vueltas del hilo de Litz, este inductor se muestra en la figura 14.



Figura 14 Inductor.

Para el diseño del transformador, se optó por utilizar el mismo tipo de cable de Litz que se empleó para el inductor, con el objetivo de mantener una coherencia en los materiales y optimizar la eficiencia del sistema. Este enfoque se basa en la capacidad del hilo de Litz para minimizar las pérdidas por efecto skin y efecto proximidad, especialmente a altas frecuencias, características cruciales en aplicaciones de alta frecuencia como el convertidor resonante LLC Clase D.

El transformador primario se enrolló con 30 vueltas del hilo de Litz, mientras que para el transformador secundario se utilizaron 45 vueltas como se observa en la figura 15. Este diseño se basa en consideraciones de relación de vueltas para lograr las tensiones de salida deseadas y mantener la compatibilidad con el resto del sistema.

La elección de 30 vueltas para el transformador primario y 45 vueltas para el secundario también se fundamenta en consideraciones de diseño para optimizar el acoplamiento magnético entre las bobinas y garantizar una transferencia de energía eficiente entre las etapas del convertidor. Esto contribuye a mejorar la eficiencia general del sistema y a minimizar las pérdidas de energía durante la operación.

Al utilizar el mismo el hilo de Litz tanto para el inductor como para el transformador, se asegura una coherencia en las características de los componentes magnéticos del convertidor resonante LLC Clase D, lo que facilita el diseño, la implementación y la optimización del sistema en su conjunto. Esta estrategia de diseño integral contribuye a maximizar el rendimiento y la fiabilidad del convertidor en aplicaciones de alta frecuencia.



Figura 15 Transformador.

Para corroborar los valores tanto del inductor como del transformador, se empleó un medidor de inductancias, resistencias y capacitancias (Marca EDIBON mod. ED-MLCR01) como se muestra en la figura 16. Además, se necesitó obtener la resistencia en serie del inductor, así como las resistencias e inductancias en serie del transformador, considerando que estos componentes son los componentes parásitos. Esta medida permitió garantizar la precisión y coherencia de los valores

obtenidos, asegurando un correcto funcionamiento del convertidor resonante LLC Clase D en su conjunto.



Figura 16 Medidor de inductancia, capacitancia y resistencia marca EDIBON mod. ED-MLCR01.

Para obtener los valores necesarios, se requiere especificar las frecuencias a las que se utilizará el circuito diseñado. En este caso, la frecuencia del circuito es de 500 kHz. Esta frecuencia se selecciona para evaluar el comportamiento de los componentes del circuito y su sensibilidad a la frecuencia de operación. Los valores resultantes se detallan en la tabla 4, proporcionando así una visión clara del rendimiento del circuito en la frecuencia designada y permitiendo análisis comparativos con otras frecuencias si fuera necesario

Tabla 4. Valores obtenidos por el medidor de inductancia, capacitancia y resistencia

Componente	Valor del componente	Frecuencia (kHz)	Inductancia L_s (μH)	Resistencia serie (Ω)
Inductor	30.11 μH	500 kHz	-	0.31 Ω
Transformador primario	60.93 μH	500 kHz	1.19 μH	1.95 Ω
Transformador secundario	270 μH	500 kHz	5.08 μH	3.3 Ω

CAPITULO IV

SIMULACIÓN DEL

CONVERTIDOR

RESONANTE CON

LA TECNICA R²P²

CAPITULO IV SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR RESONANTE CON LA TECNICA R²P²

4.1 Simulación es Pspice del convertidor

En este apartado, se detallan las simulaciones realizadas en el convertidor a una frecuencia de 500 kHz. Este análisis es crucial para evaluar la respuesta del sistema y confirmar la precisión de los parámetros previamente estimados, tales como la corriente, el voltaje y la potencia. La validación de estos resultados mediante simulación es esencial para asegurar la efectividad de la metodología de diseño aplicada al circuito. Las simulaciones proporcionan una estimación cercana de los resultados que se esperan obtener en las pruebas experimentales futuras.

El circuito fue simulado utilizando el software Pspice y el diseño empleado se muestra en el esquemático de la Figura 17. Este paso es fundamental para anticipar el comportamiento del circuito bajo condiciones de operación reales y para realizar ajustes necesarios antes de la implementación física.

Además, estas simulaciones permiten identificar posibles mejoras en el diseño y optimizar el rendimiento del convertidor antes de proceder con la construcción del prototipo. Asimismo, proporcionan una base sólida para discusiones técnicas y decisiones de diseño, apoyando el desarrollo de un sistema más robusto y eficiente.

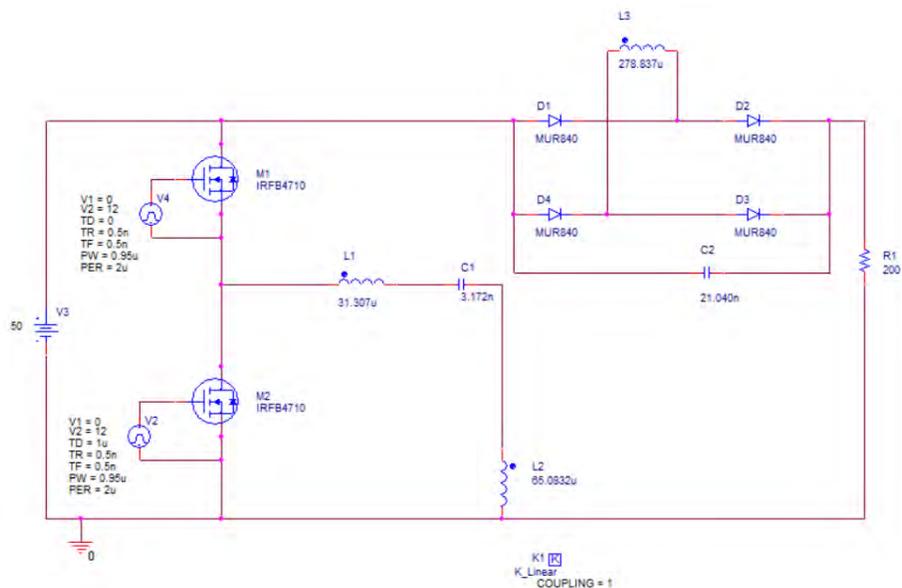


Figura 17 Circuito resonante utilizado para simular en Pspice, en la etapa de control cuenta con dos MOSFETs IRFB4710.

Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 18, donde se representa la corriente de entrada al tanque resonante en color verde, medida en el inductor L1, y el voltaje unipolar en la entrada del mismo, mostrado en color rojo, que se mide en el punto de conexión intermedio entre los MOSFETs y la tierra. La coincidencia de fase entre estos dos valores indica que el circuito está en resonancia.

Esta condición de resonancia es fundamental ya que asegura que el circuito opera en su máxima eficiencia, minimizando las pérdidas de energía y mejorando el rendimiento general del sistema. La representación visual en la Figura 18 no solo facilita la comprensión de la dinámica del circuito, sino que también confirma la efectividad del diseño y la precisión de los componentes utilizados.

Además, la observación de que la corriente y el voltaje están en fase es un indicativo claro de que el tanque resonante está correctamente configurado y funcionando según lo previsto.

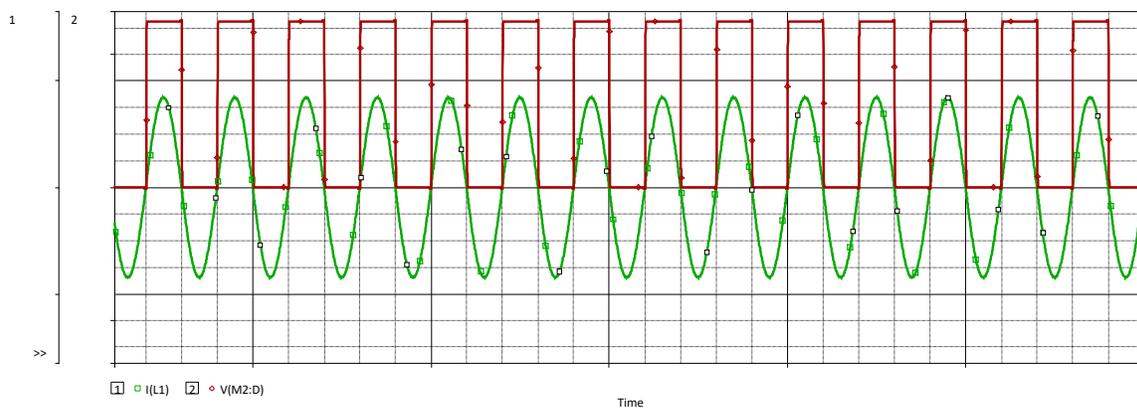


Figura 18 Voltaje y corriente en la entrada del tanque resonante en fase mostrando que el circuito se encuentra en resonancia.

En la Figura 19 se ilustra la eficiencia del convertidor, medida como la relación entre la potencia de salida (R1) y la potencia de entrada suministrada por la fuente (V3). Se observa que la eficiencia alcanzada es del 92.3%. Es importante destacar que esta medida de eficiencia considera exclusivamente las pérdidas ocurridas en los dispositivos semiconductores.

Esta cifra de eficiencia es significativa, ya que subraya la capacidad del convertidor para minimizar las pérdidas de energía en componentes críticos, lo que es esencial para aplicaciones que requieren una gestión energética eficiente y sostenible. Sin embargo, cabe mencionar que las mediciones no incluyen otras

posibles fuentes de pérdidas, como las resistivas en el cableado o las inductivas en otros componentes del circuito.

La alta eficiencia obtenida es indicativa de un diseño de circuito bien optimizado y la efectividad de la técnica de conversión utilizada. Además, el análisis de la eficiencia en la Figura 19 ofrece valiosas iteraciones de diseño, permitiendo identificar áreas donde se podrían reducir aún más las pérdidas y mejorar el rendimiento global del sistema.

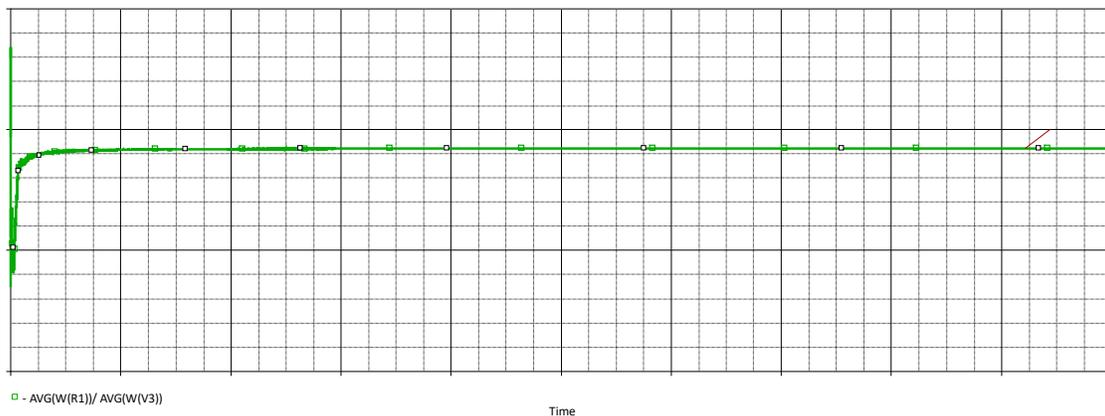


Figura 19 Eficiencia del circuito en la carga, se obtiene de la potencia en la carga entre la potencia entregada de la fuente.

En la Figura 20, se presenta el voltaje medido en la carga del circuito, alcanzando un valor de 96.3 V. Este resultado se obtuvo aplicando la técnica R²P², que es un método avanzado para la regulación y optimización de voltaje en circuitos electrónicos. Esta técnica es fundamental para asegurar la estabilidad y la eficiencia del sistema bajo diversas condiciones de carga.

El éxito en la implementación de la técnica R²P² demuestra su efectividad en el mantenimiento de un voltaje constante y seguro, a pesar de las posibles fluctuaciones en la entrada de energía o en la demanda de carga. Esta característica es crucial para aplicaciones que requieren una fuente de alimentación confiable y precisa para evitar daños en los componentes o fallos en el sistema.

Además, la Figura 20 no solo ilustra el resultado exitoso de la aplicación de la técnica R²P², sino que también destaca la precisión del diseño del circuito y la adecuada configuración de los componentes. Esto subraya la importancia de un diseño meticuloso y una simulación exhaustiva durante las fases de desarrollo y prueba del circuito.

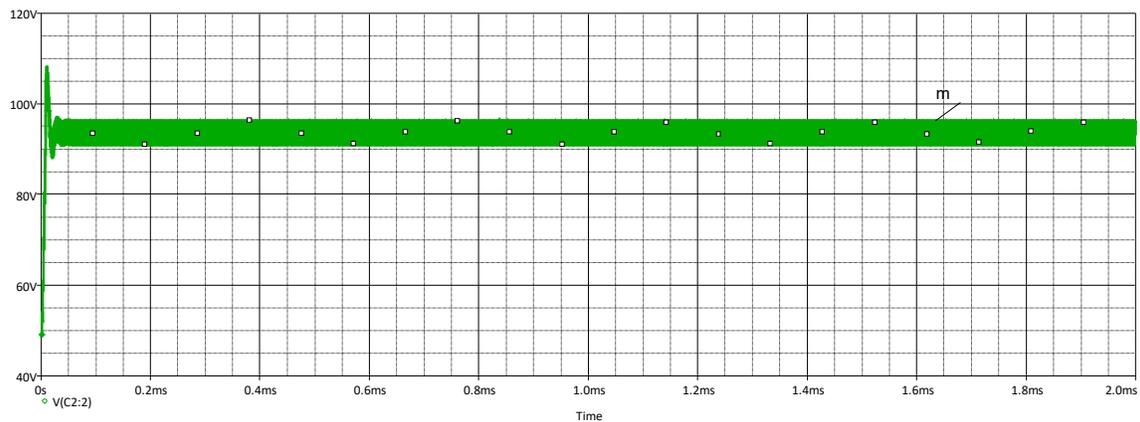


Figura 20 Voltaje en la carga del circuito

En la Figura 21 se presenta la potencia de salida del circuito, destacada por una línea verde que muestra una potencia de salida de 46.67 W. Este valor indica un procesamiento de energía eficiente en el circuito, evidenciando que el diseño cumple con los objetivos de eficacia y eficiencia energética.

Este resultado confirma la efectividad del circuito en términos de su capacidad para manejar y optimizar la transferencia de energía. Al visualizar la potencia de salida de esta manera, se facilita la comprensión de la eficiencia operativa del circuito y se proporciona un punto de referencia claro para futuras mejoras o comparaciones con otros sistemas.

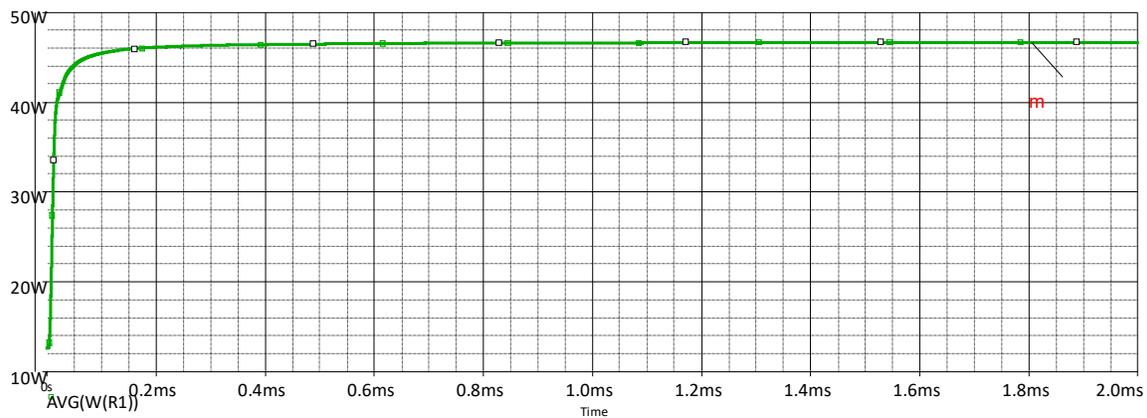


Figura 21 Potencia de salida en la carga.

4.2 Simulación es Pspice del convertidor con componentes parásitos

No obstante, es esencial destacar la importancia de incorporar las resistencias e inductancias parásitas en nuestras consideraciones para una evaluación más precisa y realista. La inclusión de estos componentes parásitos es crucial para anticipar el comportamiento real del circuito durante la fase de implementación.

Sin embargo, existen resistencias parásitas en el inductor y resistencias e inductancias parásitas en el transformador, así que para poder implementar dicho convertidor será necesario agregar en la simulación las resistencias parásitas para comparar los resultados obtenidos en práctica con respecto a simulación.

En la figura 22 se muestra el circuito LLC con el procesamiento parcial con los componentes parásitos donde R2 es la resistencia en serie del inductor L1, se agregó la resistencia R3 que representa la resistencia en serie del inductor L2 y también se agrega el inductor L5 donde representa la inductancia de dispersión del transformador primario L2, representando así los componentes parásitos en la parte del tanque resonante, también se agregaron los componentes parásitos de la parte del transformador secundario donde R5 es la resistencia serie del inductor L3 y L6 representa la inductancia de dispersión del transformador secundario L3 y en la figura 23 se muestra la eficiencia del circuito con 85.8%, donde se observa que la eficiencia ha caído cerca de un 8%, ya que considera no solo las pérdidas en los dispositivos semiconductores, sino que también los componentes parásitos,

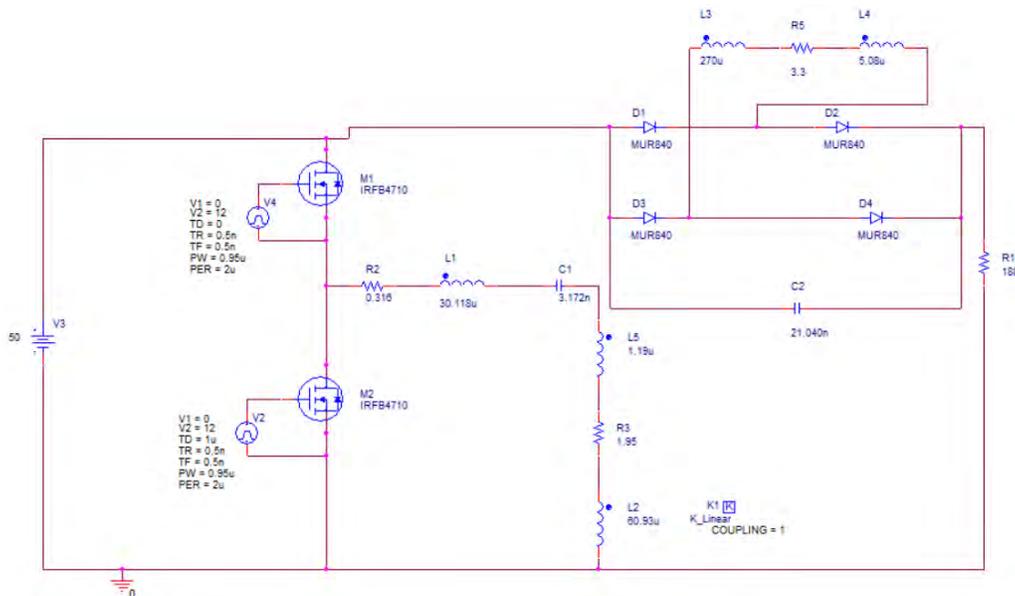


Figura 22 Circuito con procesamiento parcial con componentes parásitos.

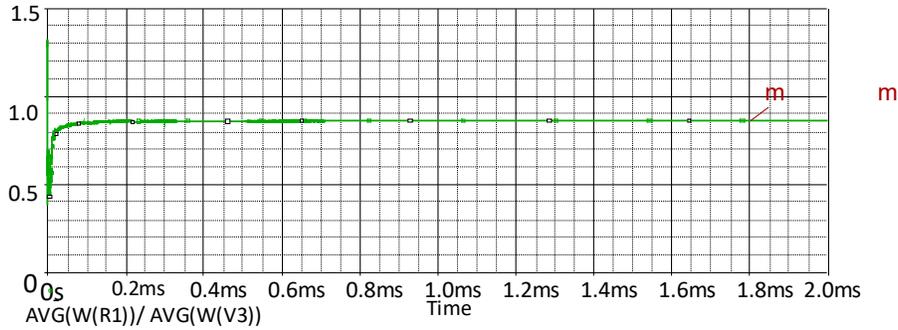


Figura 23 Eficiencia del circuito con componentes parásitos.

Esta aproximación nos permite no solo validar la eficacia de nuestros diseños en un entorno controlado sino también garantizar su fiabilidad y rendimiento en aplicaciones del mundo real, donde las condiciones son inherentemente más complejas y desafiantes. Por lo tanto, aunque las eficiencias teóricas de ambos circuitos parezcan similares, solo mediante la inclusión y el estudio de las resistencias parásitas podremos obtener una comprensión completa y precisa de su desempeño en la práctica. Este análisis nos permite constatar que nuestro circuito, diseñado para el procesamiento parcial de la energía, exhibe una mejora significativa en su rendimiento, con un incremento en la eficiencia del 5.8% en comparación con modelos estándar.

4.3 LLC convencional vs LLC con técnica R²P²

La diferencia entre ambos circuitos radica en la parte del procesamiento de la potencia ya que el convertidor convencional necesita manejar más potencia.

En contraste, el convertidor con procesamiento parcial de energía, al manejar solo el 50% de la potencia total del circuito, mejorando así su eficiencia.

Esta diferencia no solo demuestra una mejora en la eficiencia energética, sino que también refleja un impacto positivo en la economía del diseño del circuito. Estos hallazgos son fundamentales para optimizar el rendimiento y la rentabilidad en aplicaciones que requieren una gestión eficiente de la energía.

Para evaluar el rendimiento del circuito, se llevan a cabo mediciones de la potencia manejada dentro del tanque resonante LLC. Estas mediciones se realizan específicamente en la parte del transformador primario L₂. En la Figura 24, se muestra esta potencia en el tanque resonante del circuito clásico, marcada en color rojo, registrando un valor de 39.84 watts.

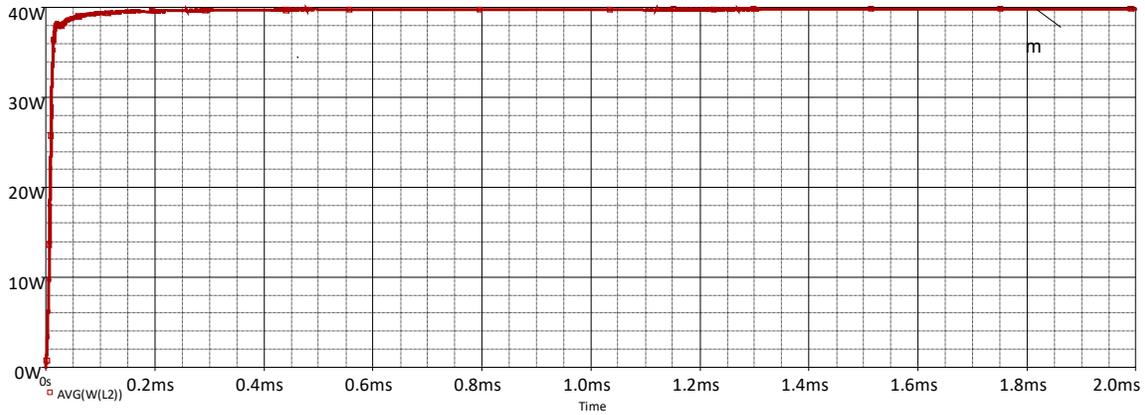


Figura 24 potencia procesada en el tanque resonante (circuito clásico).

La misma medición se llevó a cabo en el tanque resonante LLC aplicando la técnica R^2P^2 , enfocándose específicamente en el inductor L_2 . En la Figura 25, se visualiza la potencia manejada por el tanque resonante, destacada en color verde, donde se registra un valor de 23.60 watts. Esta medición es fundamental para evaluar la eficacia de la técnica R^2P^2 en la optimización del manejo energético dentro del tanque resonante.

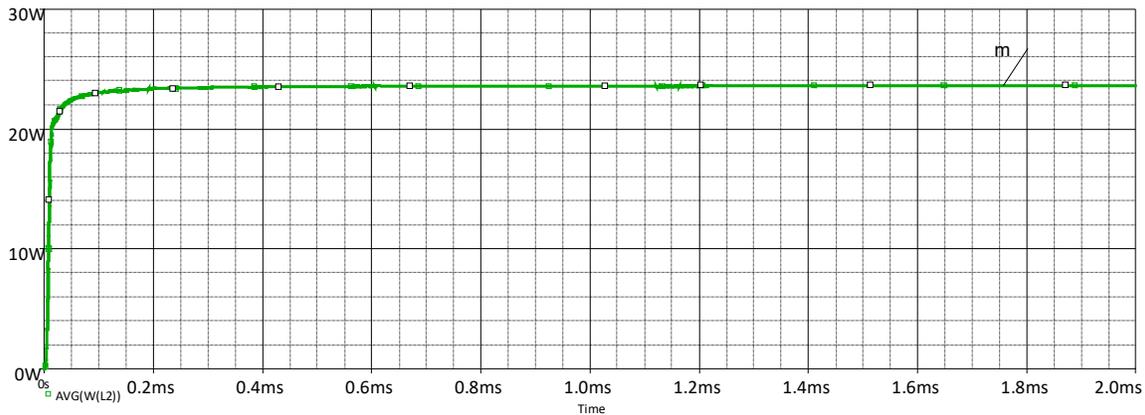


Figura 25 Potencia procesada en el tanque resonante (circuito con técnica R2P2).

La aplicación de la técnica R^2P^2 resulta en una reducción en la potencia manejada en comparación con el circuito clásico, ya que disminuye casi un 60% de la potencia manejada. Esto demuestra que al procesar menos potencia dentro del

circuito y direccionar parte de la potencia directamente a la carga, la eficiencia se verá con un incremento aproximadamente del 6%.

En el anexo 4 se encuentran gráficas con valores comparativos sobre el convertidor resonante LLC convencional vs el convertidor resonante LLC con la técnica R²P².

CAPÍTULO V

IMPLEMENTACIÓN

DEL

CONVERTIDOR

RESONANTE CON

LA TÉCNICA R^2P^2

CAPÍTULO V IMPLEMENTACIÓN DEL CONVERTIDOR RESONANTE CON LA TÉCNICA R²P²

5.1 Selección de componentes

En este apartado se detallan los componentes seleccionados para la placa de circuito impreso (PCB), basándose en los cálculos realizados en el Capítulo 4. Los componentes están organizados por etapas: etapa de control y etapa de potencia.

Etapa de Control:

El diseño de esta etapa incorpora un controlador UC3825N, que es capaz de operar hasta 1 MHz, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren altas frecuencias. Además, se empleó un controlador IR2110 para MOSFETs, un diodo 1N4001 y MOSFETs IRFB4710. Estos componentes han sido elegidos por su alta eficiencia y fiabilidad en el circuito, siendo especialmente efectivos en entornos de alta frecuencia.

Adicionalmente, se utilizaron potenciómetros de precisión de $k\Omega$ y $k\Omega$ para ajustar con precisión el ciclo de trabajo y la frecuencia del circuito.

En la Figura 26 se muestra el diseño del circuito implementado en la PCB para esta etapa, proporcionando una visualización clara de la configuración y disposición de los componentes.

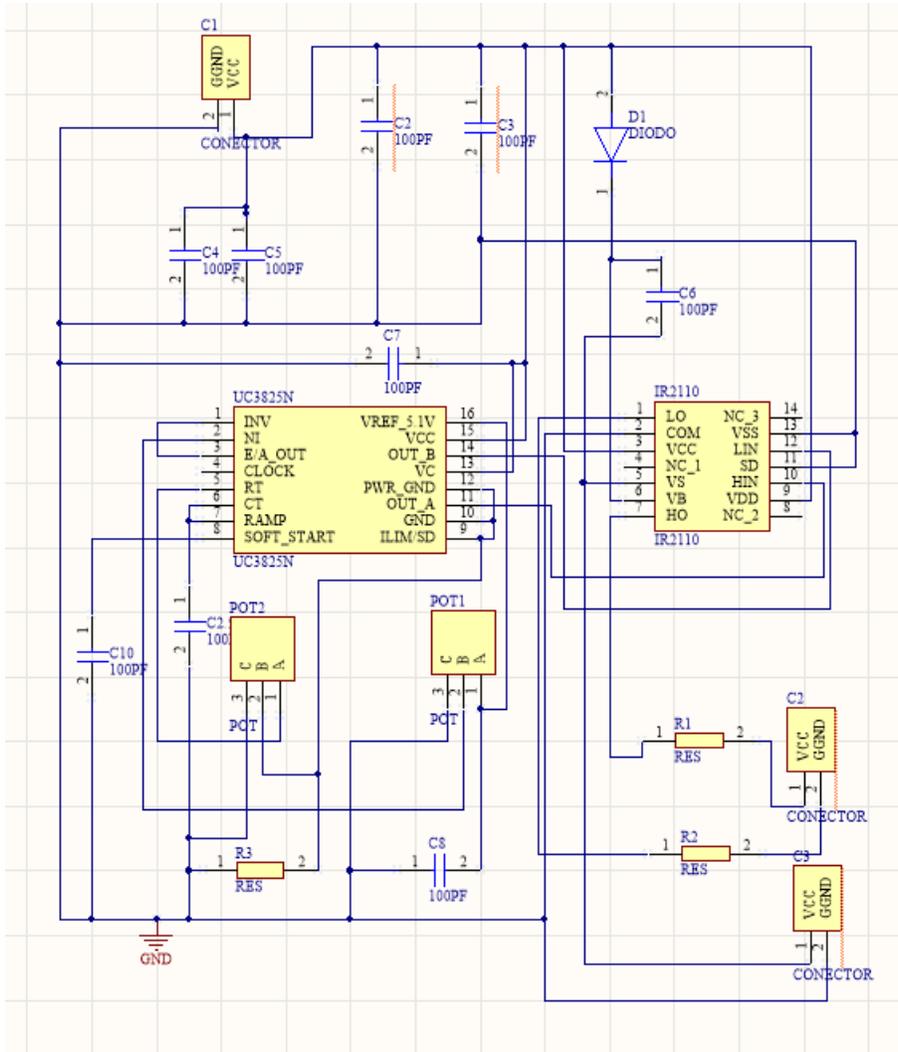


Figura 26 Diseño de la etapa de control con controlador IR2110, controlador UC3825N y MOSFETs IRFB4710 en Altium Designer.

En el Anexo 5, se presenta la hoja de datos del MOSFET IRFB4710.

Se enfrentaron diversos desafíos durante la selección de componentes para el circuito. Un problema destacado fue la presencia de corrientes parásitas en las señales de las etapas de control y de potencia, lo que impedía que el circuito alcanzara la resonancia y, como resultado, reducía su eficiencia. Para mitigar este problema, se implementó un capacitor como filtro en la entrada, lo cual contribuyó a mejorar significativamente la calidad de la señal.

Es crucial en este tipo de aplicaciones seleccionar componentes que cumplan con las especificaciones requeridas para el correcto funcionamiento del sistema. En particular, para este proyecto se utilizó una frecuencia de operación de 500 kHz, lo

que subraya la necesidad de componentes que puedan manejar adecuadamente dicha frecuencia y asegurar un desempeño óptimo del circuito.

Etapa de potencia

En esta sección, se expone el diseño del convertidor LLC clase D, realizado en el software Altium Designer, cuyo detalle se puede apreciar en la Figura 27. Este diseño incluye componentes clave como dos MOSFETs IRFB4710, un inductor, un capacitor de polipropileno, un transformador, un puente de diodos MUR840 y un capacitor de polipropileno para filtrado.

Para la alimentación de las placas de circuito impreso (PCB) asociadas, se utilizaron dos fuentes de energía distintas: una dedicada a la etapa de control y otra a la etapa de potencia. Este enfoque asegura una separación eficaz de las fuentes de alimentación, minimizando las interferencias entre las etapas de control y potencia y optimizando el rendimiento general del sistema.

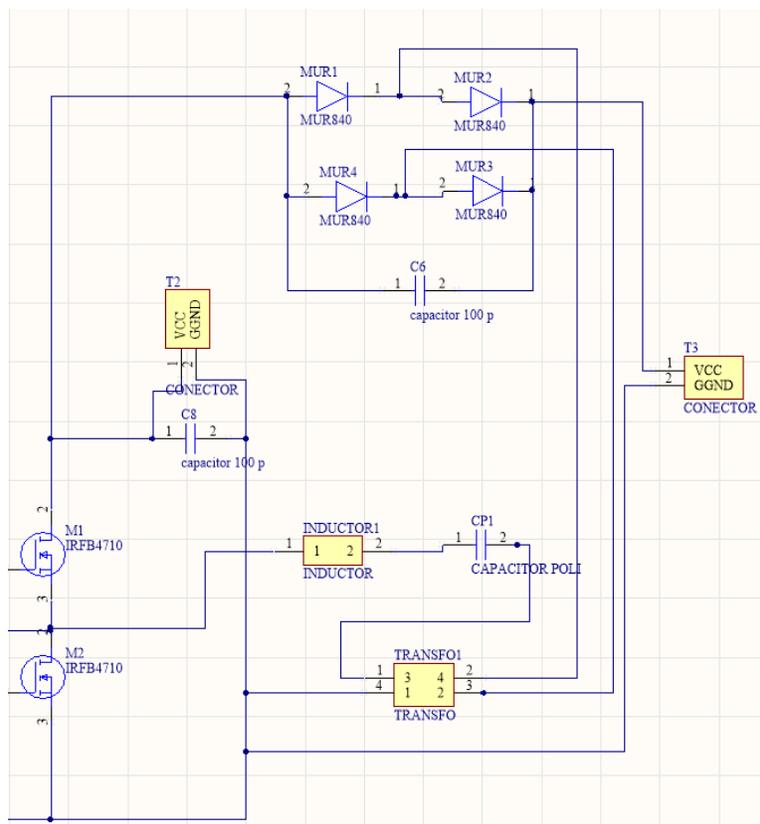


Figura 27 Diseño de la etapa de potencia en Altium Designer.

5.2 Vista de la PCB en 3D con etapa de control y potencia

En la Figura 28 se presenta una visualización en 3D del diseño de la placa de circuito impreso (PCB) realizada en Altium Designer. Esta representación tridimensional permite apreciar de manera detallada cómo quedará la PCB una vez fabricada. La vista en 3D es especialmente útil para evaluar la disposición espacial de los componentes, las rutas de los circuitos y la compatibilidad física de los elementos integrados en la placa.

La utilización de esta herramienta facilita la identificación de posibles problemas de diseño antes de la producción, como interferencias físicas entre componentes o inadecuadas conexiones eléctricas. Además, permite realizar ajustes necesarios de manera eficiente, asegurando así que la versión final de la PCB sea funcional y estéticamente acorde a las especificaciones del proyecto. Esta capacidad de previsualización en 3D es fundamental para optimizar el proceso de diseño y garantizar la calidad del producto final.

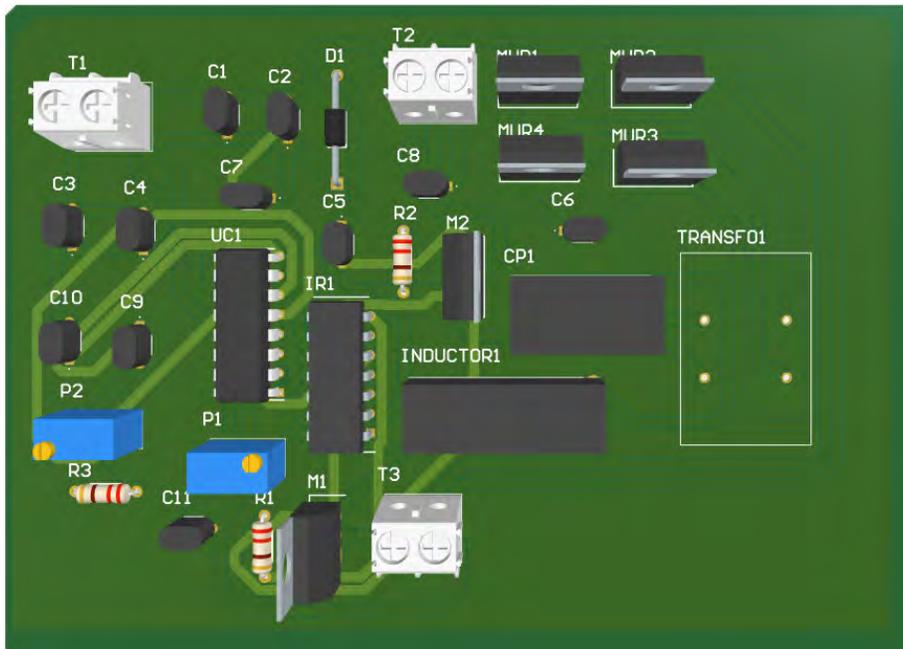


Figura 28 Diseño en 3D en Altium Designer.

5.3 Implementación en PCB

En la Figura 29, se muestra el circuito completamente ensamblado con todos los componentes ya soldados, listo para proceder con las pruebas necesarias. Esta

visualización es esencial para verificar que todos los elementos estén correctamente instalados y funcionales antes de iniciar las evaluaciones de rendimiento del circuito. Este paso asegura que se identifiquen y corrijan posibles defectos o problemas de configuración antes de la implementación final.

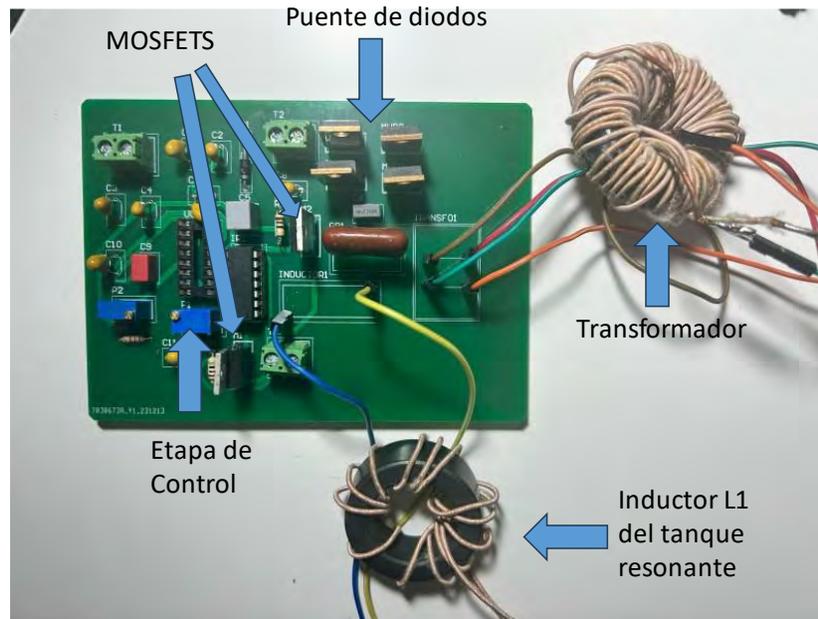


Figura 29 Circuito implementado en PCB con las diferentes etapas.

La implementación en PCB tuvo a lo largo del proceso cambios de la placa por componentes por lo cual fue necesario realizar varios modelos de la misma hasta llegar a este modelo el cual funciono correctamente, estos diferentes modelos se pueden observar en el anexo 6.

5.4 Pruebas del convertidor en laboratorio

Se presentan los resultados que se obtuvieron de las pruebas experimentales, en esta etapa se presentan las pruebas del convertidor en el laboratorio.

Por otro lado, se presentan las gráficas con los resultados de: potencias, corrientes y voltajes. Estos datos se obtuvieron a 500 kHz, por lo cual se presentan todas las gráficas correspondientes.

El equipo de laboratorio utilizado es el siguiente.

- Medidor RLC modelo ED-MLCR01 marca EDIBON.
- fuentes de alimentación modelo PSP-603 marca GW Instek 60 V- 3.3 A.
- Osciloscopio modelo DPO-5054 marca Tektronix.
- Punta de corriente modelo TCP marca Tektronix
- puntas de voltaje modelo TPP marca Tektronix
- Punta de voltaje diferencial modelo P A marca Tektronix

Procedimiento

1. Preparar la fuente para la etapa de control: 12 V.
2. Preparar la fuente para la etapa de potencia con un valor inicial de 50 v.
3. Conectar la fuente de la etapa de control al circuito (Verificar que las puntas estén bien conectadas y en el lugar correcto).
4. Conectar la fuente de la etapa de potencia al circuito (Verificar que las puntas estén bien conectadas y en lugar correcto).
5. Conectar la punta diferencial del osciloscopio en la puerta del IRFB4710.
6. Conectar la punta de corriente del osciloscopio en la punta para prueba correspondiente.
7. Verificar que las puntas anteriores estén conectadas a tierra.

Inicio de las pruebas

1. Prender la fuente de la etapa de control.
2. Prender la fuente de la etapa de potencia.
3. Verificar los parámetros: ciclo de trabajo (50%), frecuencia (500 kHz). Medir corriente en la punta de prueba y voltaje en drenaje del IRFB4710. Verificar que el circuito esté en resonancia, si no es el caso, ajustar la frecuencia hasta que esté en resonancia.
4. Verificar la corriente, voltaje y potencia de salida del convertidor.

5. Descargar los datos del osciloscopio para graficar los resultados obtenidos.
6. Apagar fuente de etapa de control.
7. Apagar fuente de etapa de potencia.

Para realizar estas pruebas fue necesario contar con el equipo adecuado. Para alimentar el circuito en la parte de control y de potencia, se utilizó una fuente de alimentación (mod. PSP-603 marca GW Instek) como se muestra en la figura 30.



Figura 30 Fuente de alimentación 60 V- 3.3 A.

Por otro lado, se utilizó un osciloscopio como se muestra en la figura 31 marca Tektronix (mod. DPO-5054) para obtener las señales del voltaje, la corriente y la potencia en las puntas de prueba del capacitor, inductor auxiliar y la señal de los MOSFETs.



Figura 31 Osciloscopio Tektronix con punta de voltaje diferencial y de corriente.

Continuando con los resultados, se obtuvieron los datos en gráficas para mostrar el comportamiento del circuito, con el voltaje, la potencia y la frecuencia correspondiente para su correcto funcionamiento.

En la figura 32 se observa la corriente de nuestro circuito en color rosa el cual se midió en la entrada del inductor L1 en la parte del tanque resonante y de color amarillo se observa el voltaje de entrada al tanque resonante el cual se midió en el punto intermedio de conexión de los MOSFETs y la tierra al estar en fase la corriente como el voltaje podemos observar que nuestro circuito se encuentra en resonancia y se observa que la resonancia de nuestro circuito es parecida, se observa que el circuito trabaja a una frecuencia de 560 kHz y con un ciclo de trabajo del 50%.

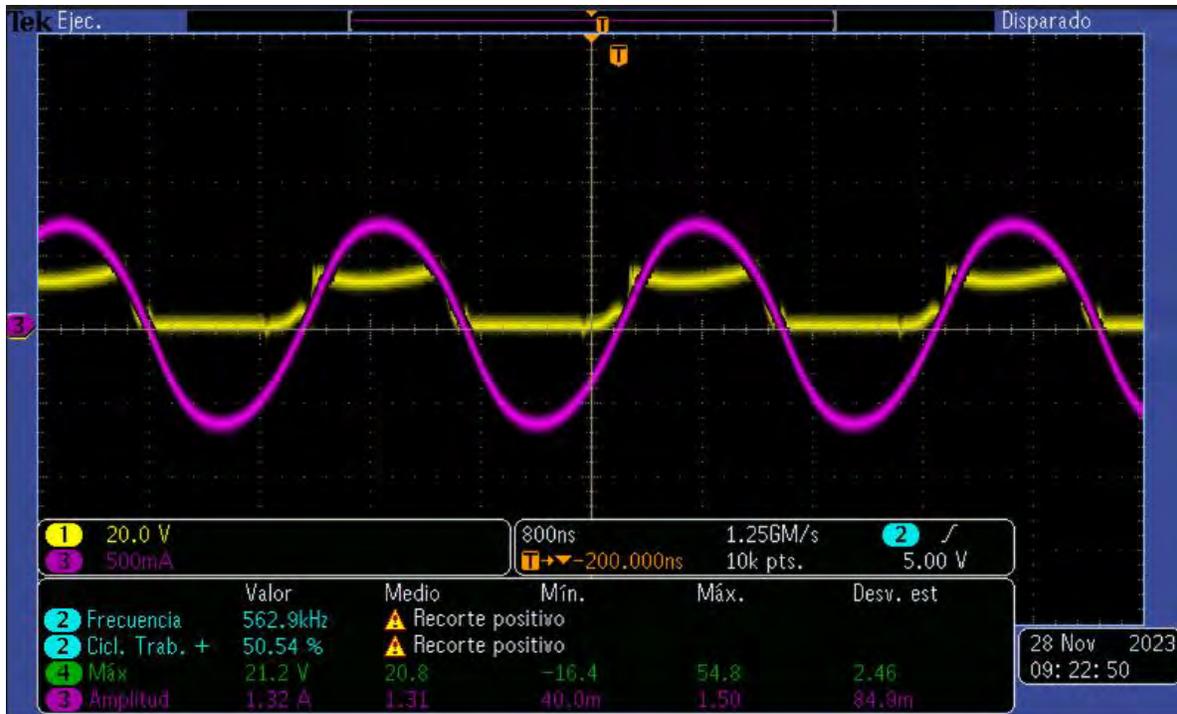


Figura 32 Corriente de nuestro circuito en color rosa y de color amarillo en voltaje, señales en fase, circuito en resonancia.

En la figura 33 se observa que el voltaje en la carga de nuestro circuito el cual es 98.8 V.

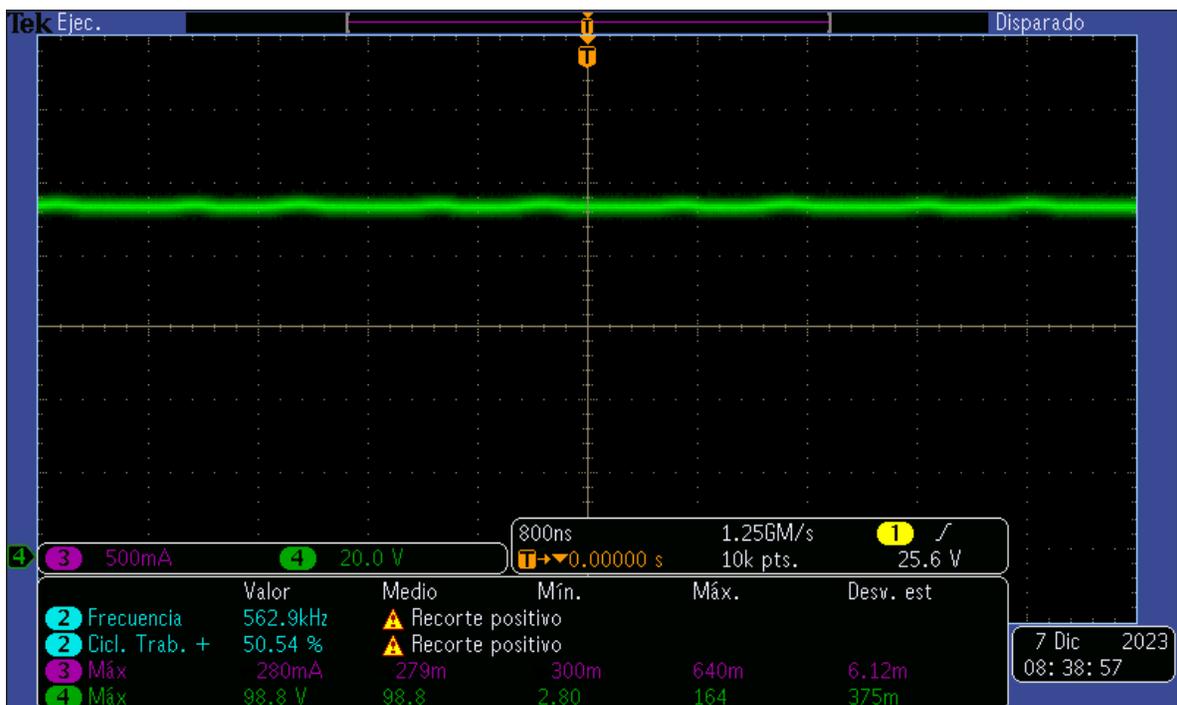


Figura 33 Voltaje en la carga de 98.8 v.

En la figura 34 se observa que la corriente en la carga de nuestro circuito es de 460 mA.

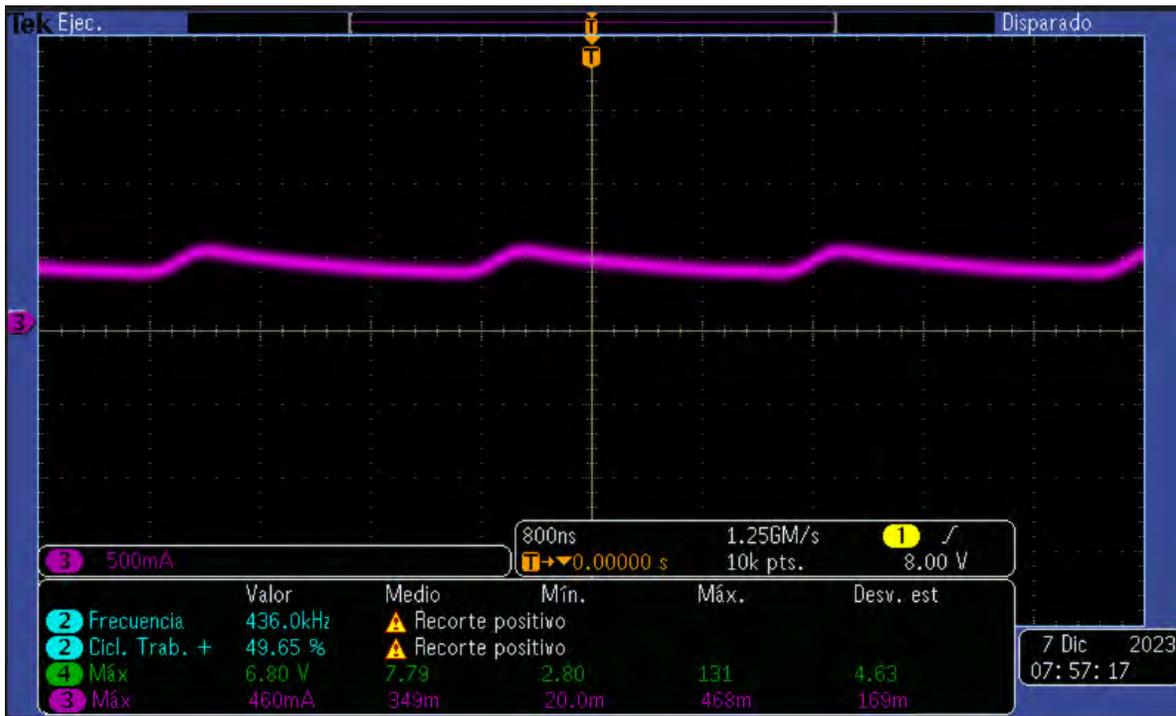


Figura 34 Corriente en la carga de 460 mA.

Con estos datos de salida en mano, estamos en posición de calcular con precisión la potencia de salida correspondiente a nuestro circuito implementado. Este cálculo nos permite evaluar de manera directa el rendimiento del circuito en condiciones reales de operación, proporcionando una medida tangible de su eficiencia.

En la tabla 5 se observa los datos de salida del circuito LLC con R^2P^2

Tabla 5. Valores de salida del convertidor

Variable	Símbolo	Teórico	Experimental	% Error
Voltaje	v	100 v	98.8v	1.2%
Corriente	i	0.512 A	0.460 A	10.15%

En la tabla 6 se muestra la ecuación para calcular la potencia de salida con los datos obtenidos.

Tabla 6. Potencia de salida

Variable	Símbolo	Ecuación	Valor
Potencia de salida	P_o	$P_o = v * i$	45 w

En la figura 35 se observan los datos de entrada de nuestra fuente de voltaje que alimenta a nuestro circuito de potencia el cual sería el circuito LLC con procesamiento parcial de la energía, con ello podemos comparar la potencia que entra respecto a la potencia de salida.



Figura 35 Valores de la fuente de entrada al circuito.

Al tener la potencia de entrada y la potencia de salida del circuito podemos calcular nuestra eficiencia como se observa en la tabla 7.

Tabla 7. Eficiencia del circuito

Variable	Símbolo	Ecuación	Ecuación	Valor
Eficiencia	η	$\eta = \frac{P_o}{P_i}$	$\eta = \frac{45w}{50.7w}$	88.7%

Se alcanzó una eficiencia del 88%, lo cual indica que se ha cumplido con éxito el objetivo propuesto.

En la tabla 8 se muestra las comparaciones de las eficiencias, tanto la calculada en el circuito convencional, en el circuito con la técnica R²P² y los resultados experimentales.

La aplicación de la técnica R²P² resulta en una reducción en la potencia manejada en comparación con el circuito clásico, ya que disminuye casi un 60% de la potencia manejada . Esto demuestra que al procesar menos potencia dentro del

circuito y direccionar parte de la potencia directamente a la carga, la eficiencia se verá con un incremento aproximadamente del 6%.

Tabla 8. Potencia de salida

Variable	Símbolo	LLC convencional	LLC con R ² P ²	Experimental
Eficiencia	η	82%	87.7%	88.7%

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

CAPITULO VI CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el desarrollo del tema de esta tesis se llega a las siguientes conclusiones

- Con base a la revisión del estado del arte, se concluye que el circuito adecuado para la aplicación de la técnica R^2P^2 es con un resonante LLC basado en una clase D, debido a que este circuito puede trabajar a la frecuencia que se estableció de 500 kHz.
- Las pruebas experimentales se realizaron a diferentes intervalos de tiempo, al iniciar las pruebas se tuvo que resintonizar el circuito debido a que se estaba fuera de resonancia. En el lapso que se realizaron dichas pruebas, el circuito se mantuvo en resonancia, esto demuestra que el diseño fue el correcto.
- Es necesario llevar a cabo las pruebas en un entorno controlado. La razón de esto radica en la necesidad de mantener el circuito en resonancia; si se introduce alguna variable no contemplada, el circuito puede salir de resonancia, lo cual tendría un impacto significativo en su rendimiento. Este enfoque garantiza la integridad del circuito y la precisión de los resultados obtenidos.
- Los resultados cumplen con el objetivo de alcanzar una eficiencia mayor a los datos obtenidos con elementos paracitos, ya que en el convertidor LLC clásico se obtuvo en simulación una eficiencia del 82%, sin embargo, se aplicó la técnica R^2P^2 al convertidor LLC buscando una eficiencia superior a la obtenida por circuito clásico, sin embargo, se obtuvo una eficiencia del 88.7% en la parte experimental.

6.1 Productos académicos

Se presentó el artículo llamado: "Diseño de un convertidor CD-CD resonante LLC con transformador" en la 10va. Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada. Dicho artículo propone una variante de topología de convertidor CD-CD utilizando un Termogenerador. Se propone un circuito resonante que se comporta como fuente de corriente y en la parte del rectificador como fuente de tensión, y opera a una frecuencia superior a 500 kHz para reducir su tamaño.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- [1] G. S. - I th W on C and and undefined "Reduced redundant power processing concept: A reexamination" *ieeexplore.ieee.org* Spiazzi2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power, 2016•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Mar. 22, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7556677/>
- [2] M. Jain, M. Daniele, P. J.-I T on power and undefined "A bidirectional DC-DC converter topology for low power application" *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/849029/>
- [3] S. Tang, S. Hui, H. C.-I T on Power and undefined "A low-profile low-power converter with coreless PCB isolation transformer" *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/923762/>
- [4] X Yu A Khambadkone ... H W -... T on P and undefined "Control of parallel-connected power converters for low-voltage microgrid—Part I: A hybrid control architecture" *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5601792/>
- [5] D. Maksimovic, S. D.-30th A. I. P. Electronics, and undefined 1999, "Switched-capacitor DC-DC converters for low-power on-chip applications" *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/788980/>
- [6] A Dancy ... A C - th A I P and undefined "Ultra low power control circuits for PWM converters" *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/616620/>
- [7] S Sivakumar M Sathik ... P M -... and S E and undefined "An assessment on performance of DC–DC converters for renewable energy applications" *Elsevier*, vol. 58, pp. 1475–1485, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.057.
- [8] Z. Rehman, I. Al-Bahadly, S. M.-R. and Sustainable, and undefined 2015, "Multiinput DC–DC converters in renewable energy applications—An overview" *Elsevier*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114007096>
- [9] D. C.-P electronics handbook and undefined "DC–DC Converters" *Elsevier*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123820365000136>

- [10] F Lin Luo Hong Ye and B Raton London New York Washington “Advanced dc/dc converters ” Accessed: May [Online] Available: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315393780/advanced-dc-dc-converters-fang-lin-luo-hong-ye>
- [11] F L Luo and H Ye “Advanced DC/DC converters Second edition” *Advanced DC/DC Converters, Second Edition*, pp. 1–746, Dec. 2016, doi: 10.1201/9781315393780/ADVANCED-DC-DC-CONVERTERS-FANG-LIN-LUO-HONG-YE.
- [12] H. Mao, O. Rahman, I. B.-I T on power and undefined “Zero-voltage-switching DC–DC converters with synchronous rectifiers” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4418437/>
- [13] J Rodríguez J Dixon ... J. E.-I T and undefined “PWM regenerative rectifiers: State of the art” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1391089/>
- [14] R. E.-F. I. C. on Energy, undefined Power, undefined and, and undefined “Some topologies of high quality rectifiers” *Citeseer*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=1e3d6967f8081949d19e938173951631b630d9e8>
- [15] J. García, Z. P.-2017 I. M.-S International and undefined “Class-E rectifiers and power converters” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8058856/>
- [16] R Visintini “Rectifiers ” Accessed: May [Online] Available: <https://cds.cern.ch/record/987551>
- [17] S. De, D. Banerjee, K. Gopakumar, R. Ramchand, C. P.-I. P. Electronics, and undefined “Multilevel inverters for low-power application” *IET*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-pel.2010.0027>
- [18] A Momeneh M Castilla J Miret ... P. M.-... R. P., and undefined 2016, “Comparative study of reactive power control methods for photovoltaic inverters in low-voltage grids,” *Wiley Online Library*, vol. 10, no. 3, pp. 310–318, Mar. 2016, doi: 10.1049/iet-rpg.2014.0402.
- [19] S. De, D. Banerjee, K. Siva Kumar, K. Gopakumar, R. Ramchand, and C. Patel “Multilevel inverters for low-power application” *IET Power Electronics*, vol. 4, no. 4, pp. 384–392, Apr. 2011, doi: 10.1049/IET-PEL.2010.0027.

- [20] E. Fossas, G. O.-I T on C and Systems and undefined “Study of chaos in the buck converter” *ieeexplore.ieee.org*, vol. 43, no. 1, p. 13, 1996, doi: 10.1109/81.481457.
- [21] K. Hwu, T. P.-I T on power electronics and undefined “A novel buck–boost converter combining KY and buck converters” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6119227/>
- [22] J. E.-I T N A TFNA Corn and undefined “Buck converter design” *cdn.badcaps-static.com*, 2013, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://cdn.badcaps-static.com/pdfs/2a997c023d0eda74b0a3c42d4b38ca9c.pdf>
- [23] B. Hasaneen, A. M.- th International and undefined “Design and simulation of DC/DC boost converter” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4562340/>
- [24] F. Lessa Tofoli, D. de Castro Pereira, W. Josias de Paula, and D. de Sousa Oliveira Júnior “Survey on non-isolated high-voltage step-up dc–dc topologies based on the boost converter,” *Wiley Online Library*, vol. 8, no. 10, pp. 2044–2057, Oct. 2015, doi: 10.1049/iet-pel.2014.0605.
- [25] J Figueiredo ... F T - th I and undefined “A review of single-phase PFC topologies based on the boost converter” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5740015/>
- [26] K. Hwu, T. P.-I T on power electronics and undefined “A novel buck–boost converter combining KY and buck converters” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6119227/>
- [27] T Wu Y Lai ... J H -I T on and undefined “Boost converter with coupled inductors and buck–boost type of active clamp” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4387791/>
- [28] M. Gaboriault, A. N.-N A I Applied and undefined “A high efficiency noninverting, buck-boost DC-DC converter” *ieeexplore.ieee.org*, 2018, doi: 10.1109/TIE.2019.2902785.
- [29] C. Mullett, F. C.-2009 T.-F A I Applied and undefined “Improving the regulation of multi-output flyback converters” *ieeexplore.ieee.org*, vol. 13, no. 3, 1998, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4802935/>

- [30] N. Coruh, S. Urgan, T. E.-2010 5th I. conference on, and undefined 2010, "Design and implementation of flyback converters" *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5515894/>
- [31] J. Yao *et al.* "Modeling and reduction of radiated common mode current in flyback converters" *ieeexplore.ieee.org*, 2018, doi: 10.1109/ECCE.2018.8557687.
- [32] Y. Wei, Q. Luo, A. M.-I T on Power and undefined "Overview of Modulation Strategies for LLC Resonant Converter" *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9004550/>
- [33] B Lu W Liu Y Liang ... F L -T.-F A and undefined "Optimal design methodology for LLC resonant converter" *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1620590/>
- [34] B Yang F C Lee R Cheng A J Zhang and G Huang "LLC resonant converter for front end DC/DC conversion" *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/989382/>
- [35] F. L.-P of the IEEE and undefined "High-frequency quasi-resonant converter technologies" *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4424/>
- [36] R. S.-I transactions on P Electronics and undefined "A comparison of half-bridge resonant converter topologies" *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4347/>
- [37] P. W.-I T on I Electronics and undefined "A current-sourced DC-DC converter derived via the duality principle from the half-bridge converter" *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/184830/>
- [38] H. H.- T I P S Design and undefined "Designing an LLC resonant half-bridge power converter" *bbs.dianyuan.com*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://bbs.dianyuan.com/upload/community/2013/12/01/1385867010-65563.pdf>

- [39] R. S.-I transactions on P Electronics and undefined “A comparison of half-bridge resonant converter topologies” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4347/>
- [40] C. Iannello, S. Luo, I. B.-I T on Aerospace and undefined “Full bridge ZCS PWM converter for high-voltage high-power applications” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1008983/>
- [41] V Yakushev ... V M -A F and undefined “Full-bridge isolated current fed converter with active clamp” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/749736/>
- [42] Y. Jang, M. M. Jovanovic, J. Fellow, and Y.-M Chang “A new PWM ZVS full-bridge converter” *ieeexplore.ieee.org*, vol. 18, no. 5, 2003, doi: 10.1109/TPEL.2003.816189.
- [43] M Benitez “Estudio de Convertidores con Eficiencia Máximamente Plana para Aplicaciones de Microrredes en CD” Accessed: Mar [Online]. Available: <http://51.143.95.221/handle/TecNM/2920>
- [44] R. Loera-Palomo, J. M.-I P Electronics and undefined “Family of quadratic step-up dc–dc converters based on non-cascading structures,” *Wiley Online Library*, vol. 8, no. 5, pp. 793–801, May 2013, doi: 10.1049/iet-pel.2013.0879.
- [45] I. Reyes-Portillo ... J M -S.-... M on P and undefined “Modeling of a quadratic buck converter based on the R P concept for PV applications” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9258753/>
- [46] ... S M -E.-... M on P and undefined “Controllability Analysis of a Quadratic Buck Converter with Redundant Power Processing” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10409481/>
- [47] K Bekoski C Gobbato ... C M -... th B P and undefined “LED driver with reduced redundant power processing and dimming for street lighting applications” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9065609/>
- [48] R. Loera-Palomo, J. Morales-Saldana, J. L.-R.-I. power electronics, and undefined “Controller design for a power factor correction regulator R P ” *IET*, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-pel.2009.0075>

- [49] R. Loera-Palomo, J. A. Morales-Saldaña, J. Leyva-Ramos, and E. E. Carbajal-Gutierrez “Controller design for a power factor correction regulator R P ” *IET Power Electronics*, vol. 3, no. 5, pp. 784–792, Sep. 2010, doi: 10.1049/IET-PEL.2009.0075.
- [50] M K H Cheung M H L Chow and C K Tse “Practical design and evaluation of a 1 kW PFC power supply based on reduced redundant power processing principle ” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 2, pp. 665–673, Feb. 2008, doi: 10.1109/TIE.2007.909078.
- [51] R. Loera-Palomo, J. A. Morales-Saldaña, and E. Palacios-Hernández, “Quadratic step-down dc–dc converters based on reduced redundant power processing approach ” *IET Power Electronics*, vol. 6, no. 1, pp. 136–145, Jan. 2013, doi: 10.1049/IET-PEL.2012.0122.
- [52] R. Loera-Palomo, J. A. Morales-Saldaña, and J. Leyva-Ramos “Signal flow graphs for modelling of switching converters with reduced redundant power processing ” *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 7, pp. 1008–1016, Aug. 2012, doi: 10.1049/IET-PEL.2012.0038/CITE/REFWORKS.
- [53] B. N. Reddy, K. B. Shetty, R. Jalli, K. Akhila, K. S. Prudhviraaj, and V. Jagan, “Reduced Redundant Power Processing in DC-DC Converters: A Comprehensive Review ” pp –365, Apr. 2024, doi: 10.1109/PARC59193.2024.10486338.
- [54] G. S.- I th W on C and and undefined “Reduced redundant power processing concept: A reexamination” *ieeexplore.ieee.orgG Spiazzi2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power, 2016•ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Mar. 22, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7556677/>
- [55] K Bekoski C Gobbato ... C M - I th and undefined “LED driver with reduced redundant power processing and dimming for street lighting applications” *ieeexplore.ieee.orgKC Bekoski, C Gobbato, CF Moraes, GW Denardin, J de Pelegrini Lopes2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE, 2019•ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Mar. 22, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9065609/>
- [56] M Cheung ... M C -I transactions on and undefined “Practical design and evaluation of a 1 kW PFC power supply based on reduced redundant power processing principle ” *ieeexplore.ieee.orgMKH Cheung, MHL Chow, KT ChiIEEE transactions on industrial electronics, 2008•ieeexplore.ieee.org*, vol. 55, no. 2, p. 665, 2008, doi: 10.1109/TIE.2007.909078.

- [57] L Luque V Toranzos and L Vera “Uso eficiente de la energía en sistemas fotovoltaicos autónomos: desarrollo de un convertidor CC-CC con seguimiento de punto de máxima potencia” *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - AVERMA*, vol. 16, pp. 63–70, 2012, Accessed: Mar. 22, 2024. [Online]. Available: <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/2133>
- [58] J Zhang J Liu J Yang N Zhao Y Wang and T Q Zheng “An LLC-LC Type Bidirectional Control Strategy for an LLC Resonant Converter in Power Electronic Traction Transformer” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 11, pp. 8595–8604, Nov. 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2808917.
- [59] Y Wei Q Luo and H A Mantooth “Synchronous Rectification for LLC Resonant Converter: An Overview” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 36, no. 6, pp. 7264–7280, Jun. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3040603.
- [60] J. A. Morales-Saldaña, R. Loera-Palomo, E. Palacios-Hernández, and J. L. González-Martínez, “Modelling and control of a DC–DC quadratic boost converter with $R^2 P^2$ ” *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 1, pp. 11–22, Jan. 2014, doi: 10.1049/iet-pel.2012.0749.
- [61] I. A. Reyes-Portillo, J. A. Morales-Saldaña, E. M. Netzahuatl-Huerta, E. R. Palacios-Hernández, and S. R. Méndez-Elizondo “Modeling of a Quadratic Buck Converter Based on the R P Concept for PV Applications” in *2020 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, IEEE, Nov. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/ROPEC50909.2020.9258753.
- [62] C G Zogogianni E C Tatakis and M S Vekic “Non-Isolated Reduced Redundant Power Processing DC/DC Converters: A Systematic Study of Topologies With Wide Voltage Ratio for High-Power Applications” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 34, no. 9, pp. 8491–8502, Sep. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2889294.
- [63] M Cheung ... M C-I transactions on and undefined “Practical design and evaluation of a 1 kW PFC power supply based on reduced redundant power processing principle” *ieeexplore.ieee.orgMKH Cheung, MHL Chow, KT ChiIEEE transactions on industrial electronics, 2008•ieeexplore.ieee.org*, vol. 55, no. 2, p. 665, 2008, doi: 10.1109/TIE.2007.909078.
- [64] M. Ponce-Silva, D. S.-P.- Electronics and undefined “Flyback converter for solid-state lighting applications with partial energy processing” *mdpi.com*, Accessed: May 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/1/60>

- [65] J Koscelnik M Frivaldsky ... M P - and undefined "A review of multi-elements resonant converters topologies" *ieeexplore.ieee.org*J Koscelnik, M Frivaldsky, M Prazenica, R Mazgut2014 ELEKTRO, 2014•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Mar. 29, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6848909/>
- [66] J. Juárez, V. Guzmán, A. D. L. R.- Ingeniería, and undefined 2008, "Electrónica básica para la puesta en marcha de un convertidor resonante serie de CD-CD" *redalyc.org*, pp. 61–72, 2008, Accessed: Mar. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46712107.pdf>
- [67] C C Tai and M K Chen "A compact half-bridge induction heating system for magnetic nanoparticle thermotherapy applications" *Biomed Eng (Singapore)*, vol. 19, no. 1, pp. 27–35, 2007, doi: 10.4015/S1016237207000057.
- [68] M. Ponce-Silva, D. S.-P.- Electronics and undefined "Flyback converter for solid-state lighting applications with partial energy processing" *mdpi.com*M Ponce-Silva, D Salazar-Pérez, OM Rodríguez-Benítez, LG Vela-Valdés*Electronics*, 2020•*mdpi.com*, Accessed: Mar. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/1/60>
- [69] R. Marroquín-Arreola, D. Salazar-Pérez, M. P.-S.- Electronics, and undefined "Analysis of a DC-DC Flyback Converter Variant for Thermoelectric Generators with Partial Energy Processing" *mdpi.com*R Marroquín-Arreola, D Salazar-Pérez, M Ponce-Silva, H Hernandez-De Leon*Electronics*, 2021•*mdpi.com*, Accessed: Mar. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/5/619>

ANEXO 1

En el convertidor Flyback se realiza un reacondo de sus componentes en el convertidor, para poder acomodar los componentes, podemos dividir en 3 partes el convertidor como se puede observar en la figura 36, ya que las bobinas se encuentran por separado y gracias a un aislamiento magnético es posible reacondo los bloques en distintas configuraciones.

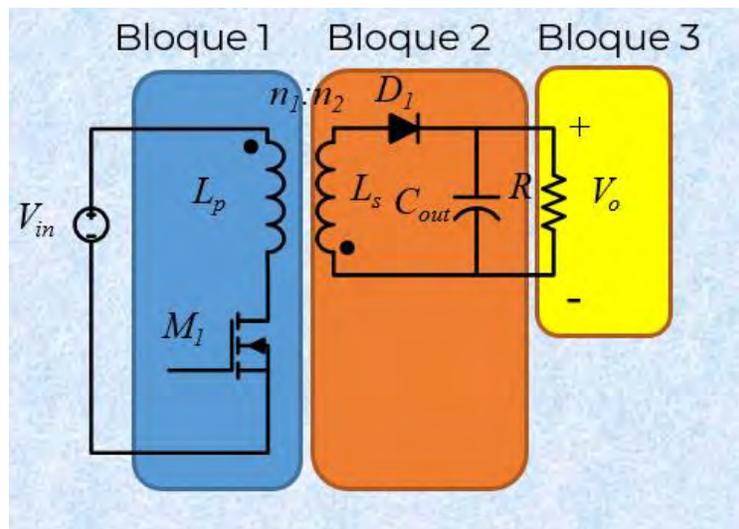


Figura 36 Separación por bloques

En [58] se realiza un equivalente de cada bloque para poder simplificar el convertidor Flyback y así poder acomodar de una manera más sencilla los componentes, en la figura 37 se observa cómo se pueden representar cada bloque y acomodarlos más fácilmente para poder obtener un circuito de tal manera que nos permita un procesamiento parcial de la energía en forma paralela.

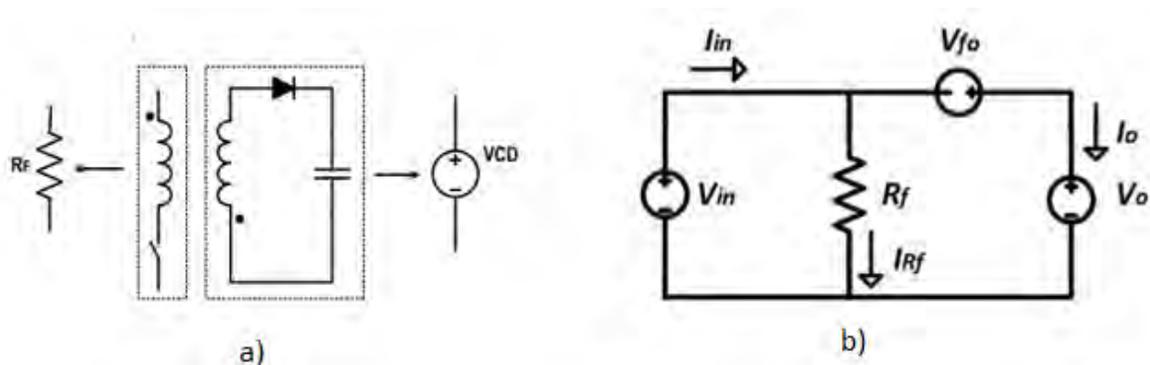


Figura 37 a) representación de los bloques b) circuito equivalente.

En [69] muestra una forma de como reacomodar el convertidor Flyback como se muestra en la figura 38 que gracias a sus bobinas acopladas permiten acomodar sus componentes de tal forma que se aplique la técnica R^2P^2 sin aumentar el número de componentes.

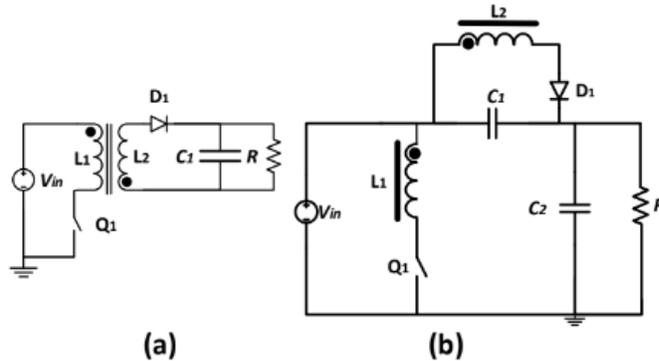


Figura 38 (a) Convertidor Flyback (b) Flyback modificado con procesamiento parcial de la energía.

Esto mismo se puede aplicar a un convertidor resonante CD-CD basado en un amplificador clase D con un tanque resonante LLC como se observa en la figura 39 ya que este nos permite trabajar a altas frecuencias y poder mejorar la eficiencia de la energía, en este circuito se puede aplicar la misma representación de bloques como se realizó con el Flyback y de esta misma manera separarlos y reacomodarlos por bloques de forma paralela.

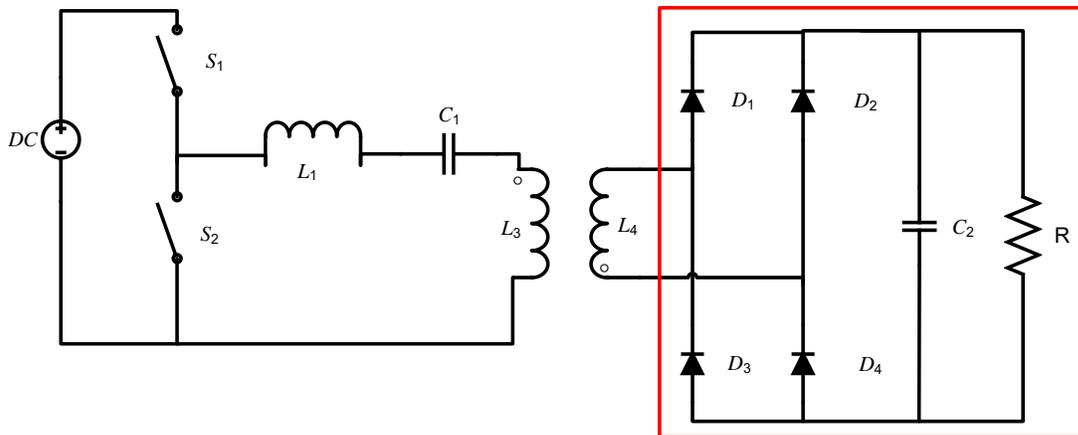


Figura 39 Convertidor resonante CD-CD basado en un amplificador clase D con un tanque resonante LLC.

Este circuito resonante también se puede dividir en 3 bloques como se muestra en la figura 40.

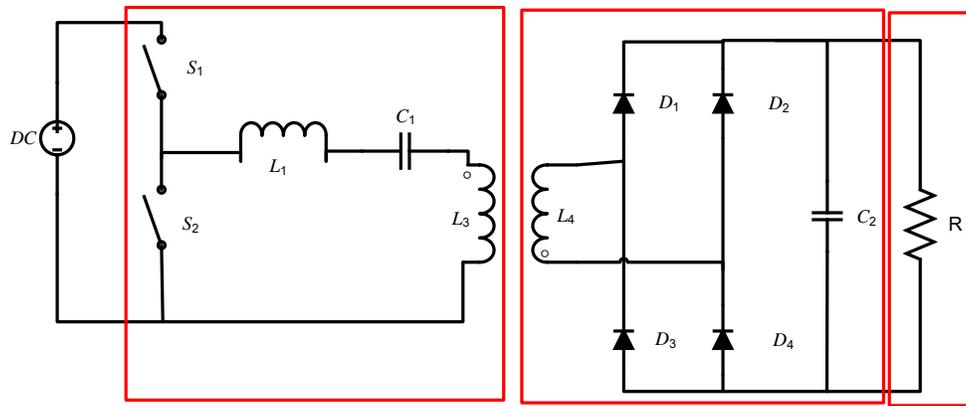


Figura 40 Separación por bloques.

Una opción para reacomodar el circuito es como se muestra en la figura 41 Y42, donde se puede aplicar la misma interpretación que en el convertidor Flyback.

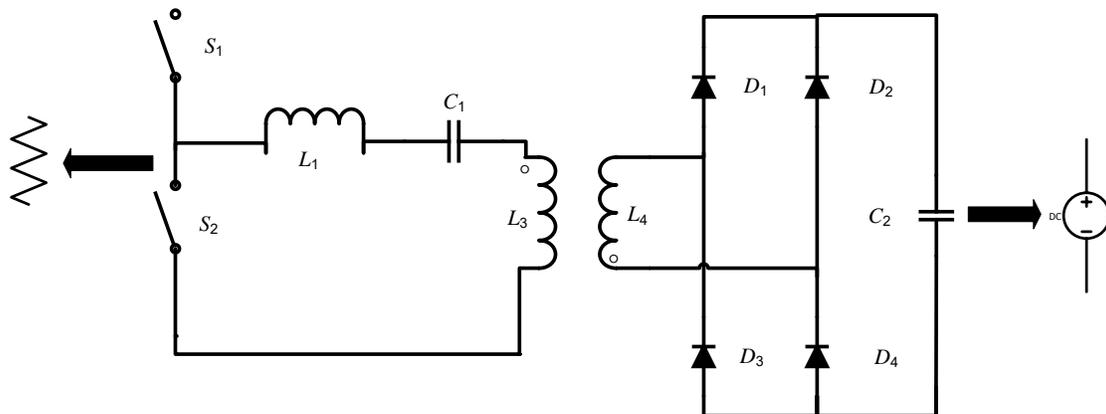


Figura 41 Representación de los bloques.

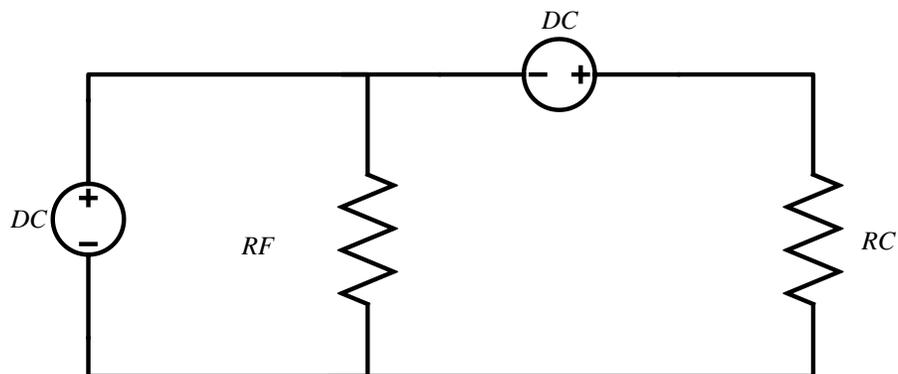


Figura 42 Circuito equivalente.

Se muestra una forma de como reacomodar el convertidor resonante CD-CD basado en un amplificador clase D con un tanque resonante LLC como se muestra en la figura 43 que gracias a sus bobinas acopladas permiten acomodar sus componentes de tal forma que se aplique la técnica R²P² sin aumentar el número de componentes.

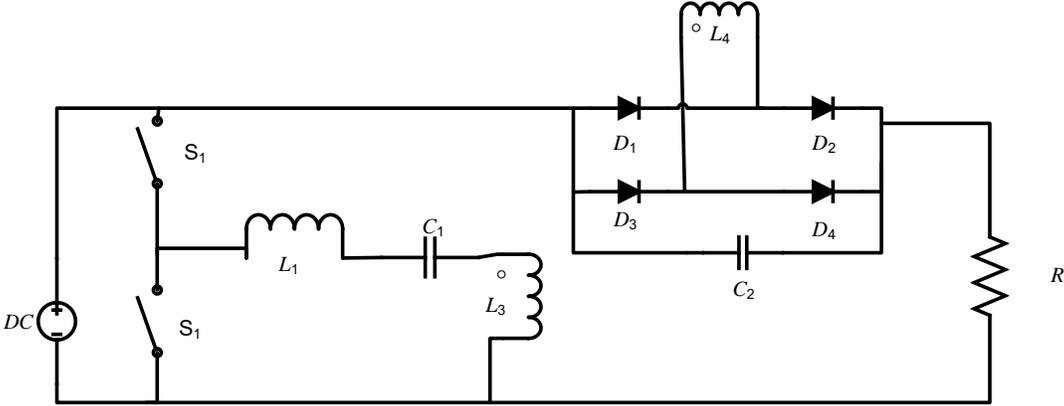


Figura 43 Circuito resonante modificado con procesamiento parcial de la energía.

ANEXO 2

Para empezar con nuestro análisis es necesario elegir nuestro puente rectificador, existen dos tipos de rectificadores, uno que se comporte como fuente de voltaje como se observa en la figura 44 para ello es necesario agregar un rectificador que se comporte como una fuente de voltaje cuadrada y se asume que el capacitor y la resistencia se comportan como una fuente de voltaje constante y otro que funcione como fuente de corriente como se observa en la figura 45 para ello se agrega un rectificador que se comporte como una fuente de corriente cuadrada así que se asume que el inductor, el capacitor y la resistencia se comportan como una fuente de corriente constante.

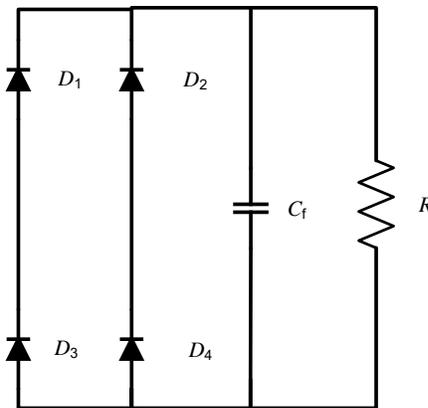


Figura 44 Rectificador fuente de voltaje.

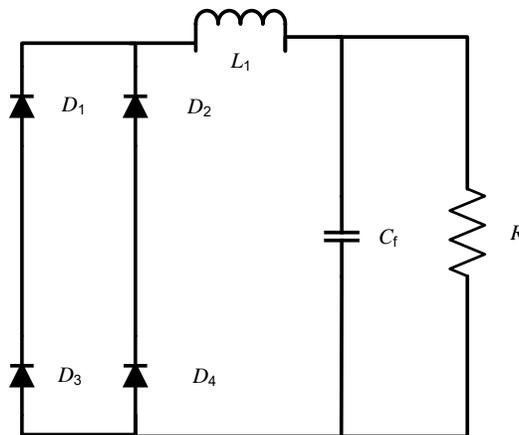


Figura 45 Rectificador fuente de corriente.

Una vez teniendo en cuenta esos datos se comenzará a analizar el convertidor resonante LLC clase D con transformador para obtener el circuito equivalente. El

primer paso el cual consiste en obtener una resistencia equivalente de la parte del rectificador, el capacitor y la carga, lo cual se puede obtener por medio de la ecuación (1).

$$R_{eq} = \frac{8R\eta_{rec}}{\pi^2} \quad (1)$$

El circuito equivalente de la parte del rectificador queda representado por medio de una resistencia que lleva por nombre R_{eq} como se muestra en la figura 46.

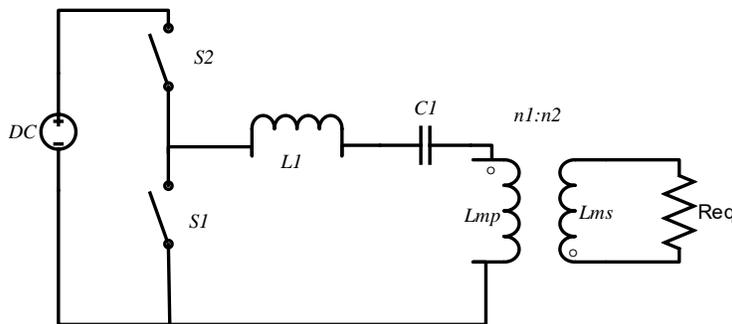


Figura 46 Resistencia del rectificador equivalente

El siguiente paso es reflejar la R_{eq} hacia el devanado primario, para este análisis se considera la ecuación (2), donde R_{eq1} se obtiene por medio de la ecuación (3) y el circuito equivalente que se obtiene se observa en la figura 47.

$$\frac{v1}{v2} = \frac{n1}{n2} \quad (2)$$

$$\frac{v1}{v2} = \frac{n1}{n2}$$

$$R_{eq1} = R_{eq} \left(\frac{n1}{n2} \right)^2 \quad (3)$$

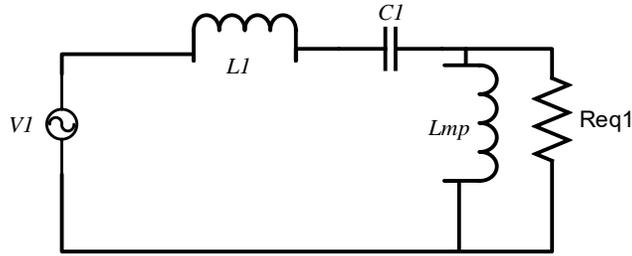


Figura 47 Resistencia equivalente.

Como se observa en la figura 48 el circuito equivalente quedaría de esa manera. Teniendo en cuenta que la reactancia de L_{mp} es mucho mayor a la reactancia de R_{eq1} .

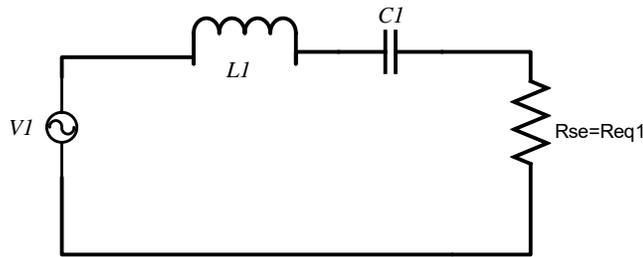


Figura 48 Circuito equivalente

Partiendo de la ecuación para la reactancia de la inductancia magnetizante del primario obtenida en el análisis del tanque resonante LLC con transformador.

$$R_{Lmp} = \frac{R_{eq1}}{\sqrt{M^2 - 1}} \quad \text{si } R_{eq1} \ll R_{Lmp} \quad (4)$$

Esto implica que:

$$\begin{aligned} \sqrt{M^2 - 1} &\ll 1 \\ M^2 - 1 &\ll 1 \\ M^2 &\ll 2 \\ M^2 &\ll \sqrt{2} \end{aligned} \quad (5)$$

Por otro lado, para que R_{Lmp} exista, de acuerdo a la misma ecuación $M > 1$, por lo tanto:

$$1 < M \leq 1.4102 \quad (6)$$

En la ecuación 7 se observa que entre mayor sea (a) menor será R_{eq1}

$$R_{eq1} = \frac{R_{Lmp}}{a} \quad (7)$$

Sustituyendo en:

$$R_{Lmp} = \frac{R_{eq1}}{\sqrt{M^2 - 1}} \quad (8)$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{M^2 - 1}}$$

Se despejará M de la ecuación 8:

$$M = \frac{\sqrt{a^2 + 1}}{a} \quad (9)$$

Dándole un valor para a=10, obtenemos un valor de M=1.0049

En el convertidor CD-CD con tanque resonante LLC se tienen dos ganancias, la primera ganancia es total del convertidor la cual se define con la ecuación 10.

$$M_{Rect} = \frac{V_R}{V_{CD}} \quad (10)$$

La segunda ganancia del tanque resonante LLC es la ganancia con el transformador sin el rectificador la cual se observa en la ecuación 11.

$$M_t = \frac{V_{Rect1}}{V_{CD}} = \frac{n_2}{n_1} \frac{2M}{\pi} \quad (11)$$

Donde V_{Rect1} es la componente fundamental de V_{Rect} esta componente fundamental se obtiene por medio de la ecuación 12.

$$V_{Rect1} = \frac{4V_R}{\pi} \quad (12)$$

De esta forma se sustituye V_{Rect1} en M_t , despejando V_R y sustituyendo en M_{Rect} como se observa en la ecuación 13.

$$M_{Rect} = \frac{n_2}{n_1} \frac{M}{2} \longrightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{2M_{Rect}}{M} \quad (13)$$

Se deberá calcular el valor máximo de la componente fundamental del voltaje de alimentación V_1 , la ganancia total M_{Rect} , como se observa en la ecuación 14.

$$V_1 = \frac{2V_{CD}}{\pi} \quad M_{Rect} = \frac{V_R}{V_{CD}} \quad (14)$$

Se deberá calcular la ganancia del tanque resonante con la ecuación 15.

$$M = \frac{\sqrt{a^2 + 1}}{a} \quad (15)$$

Se deberá calcular el factor de calidad mínimo con la ecuación 16.

$$Q_{min} = \sqrt{M^2 - 1} \quad (16)$$

Se deberá calcular el valor de la carga con la ecuación 17.

$$R = \frac{V_R^2}{P} \quad (17)$$

Se deberá calcular la relación de vueltas con la ecuación 18.

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{2M_{Rect}}{M} \quad (18)$$

Se deberá calcular la eficiencia del convertidor con la ecuación 19.

$$\eta_r = \frac{V_R}{2V_F + V_R} \quad (19)$$

Se deberá calcular la resistencia equivalente del rectificador con la ecuación 20.

$$R_{eq} = \frac{8\eta_r}{\pi^2} R \quad (20)$$

Se deberá calcular la resistencia equivalente del rectificador reflejada hacia el primario con la ecuación 21.

$$R_{eq1} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 R_{eq} \quad (21)$$

Se deberá calcular la reactancia R_{Lmp} y la inductancia magnetizante del primario L_{mp} con la ecuación 22.

$$R_{Lmp} = \frac{R_{eq1}}{\sqrt{M^2 - 1}} \quad L_{mp} = \frac{R_{Lmp}}{\omega} \quad (22)$$

Se deberá calcular X_{Lse} y L_{se} con la ecuación 23.

$$X_{Lse} = \frac{X_{Lmp} R_{Req1}^2}{R_{Req1}^2 + X_{Lmp}^2} \quad L_{se} = \frac{X_{Lse}}{\omega} \quad (23)$$

Se deberá calcular R_{se} con la ecuación 24.

$$R_{se} = \frac{X_{Lmp}^2 R_{Req1}}{R_{Req1}^2 + X_{Lmp}^2} \quad (24)$$

Se deberá calcular X_{Lr} y X_L con la ecuación 25.

$$X_{Lr} = X_{cs} = QR_{se} \quad X_L = X_{Lr} - X_{Lse} \quad (25)$$

Se deberá calcular el capacitor de filtrado C_f con la ecuación 26.

$$C \geq \frac{10.52}{\%_{vr} fR} \quad (26)$$

Se deberá calcular L y C_s con la ecuación 27.

$$L = \frac{X_L}{\omega} \quad C_s = \frac{1}{X_{cs} \omega} \quad (27)$$

Se deberá calcular L_{ms} con la ecuación 28.

$$L_{ms} = L_{mp} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (28)$$

Se deberá calcular la corriente del tanque resonante con la ecuación 29.

$$I_p = \frac{V_1}{R_{se}} \quad (29)$$

Para poder elegir correctamente el Mosfet que se utilizara es necesario calcular la $R_{DS(on)}$ por medio de la ecuación 30.

$$R_{DS(on)} \leq \frac{0.04P}{I_p^2} \quad (30)$$

ANEXO 3

El anexo presenta las ecuaciones fundamentales utilizadas para el diseño, análisis y optimización del convertidor resonante LLC Clase D con el software Maple. Estas ecuaciones proporcionan una base sólida para calcular valores clave como inductancias, capacitancias, entre otros. Además, sirven como referencia fundamental para la implementación práctica del sistema y la obtención de resultados coherentes y confiables.

> $p := 53$	$p := 53$
> $v := 50$	$v := 50$
> $f := 500000$	$f := 500000$
> $vr := 52$	$vr := 52$
> $q := 5$	$q := 5$
> $a := 20$	$a := 20$
> $vd := 0.7$	$vd := 0.7$
> $vI := \frac{2 \cdot v}{3.1416}$	$vI := 31.83091418$
> $Mrect := \frac{vr}{v}$	1.0400
> $M := 1.0049$	1.00×10^0
> $R := \frac{100^2}{50}$	200.0000
> $Rrv := \frac{2 \cdot Mrect}{M}$	$Rrv := 2.069857698$
> $Nr := \frac{vr}{(2 \cdot vd + vr)}$	$Nr := 0.9737827715$

$$\begin{aligned}
> Req &:= \frac{8 \cdot Nr}{9.86960} \cdot 110 & Req &:= 86.82508298 \\
> Req1 &:= \left((Rrv)^{-1} \right)^2 \cdot Req & Req1 &:= 20.26582225 \\
> Xlmp &:= \frac{Req1}{\sqrt{M^2 - 1}} & Xlmp &:= 204.4654022 \\
> w &:= 2 \cdot 3.1416 \cdot f & & 3.1416 \times 10^6 \\
> Lmp &:= \frac{Xlmp}{w} & & 65.0832 \times 10^{-6} \\
> Xlse &:= \frac{Xlmp \cdot Req1^2}{Req1^2 + Xlmp^2} & Xlse &:= 1.989128934 \\
> Lse &:= \frac{Xlse}{w} & & 633.158 \times 10^{-9} \\
> Rse &:= \frac{Xlmp^2 \cdot Req1}{Req1^2 + Xlmp^2} & Rse &:= 20.06866746 \\
> Xlr &:= q \cdot Rse & Xlr &:= 100.3433373 \\
> Xl &:= Xlr - Xlse & Xl &:= 98.35420837 \\
> \%r &:= 5 & \%r &:= 5 \\
> C &:= \frac{10.52}{\%r \cdot f \cdot R} & & 21.040 \times 10^{-9} \\
> L &:= \frac{Xl}{w} & & 31.307 \times 10^{-6} \\
> Cs &:= \frac{1}{Xlr \cdot w} & & 3.172 \times 10^{-9} \\
> Lms &:= Lmp \cdot Rrv^2 & & 278.837 \times 10^{-6}
\end{aligned}$$

$$> I_p := \frac{vI}{R_{se}}$$

$$I_p := 1.586100036$$

$$> R_{dson} := \frac{0.04 \cdot p}{I_p^2}$$

$$R_{dson} := 0.8427033320$$

ANEXO 4

En este anexo se encuentran graficas con valores comparativos sobre el convertidor resonante LLC convencional vs el convertidor resonante LLC con la técnica R²P², ambos circuitos cuentan con los componentes parásitos para acercarnos a resultados más asertivos a la práctica.

En la figura 49 se muestra la eficiencia del circuito con valor de 87.7% con la técnica R²P².

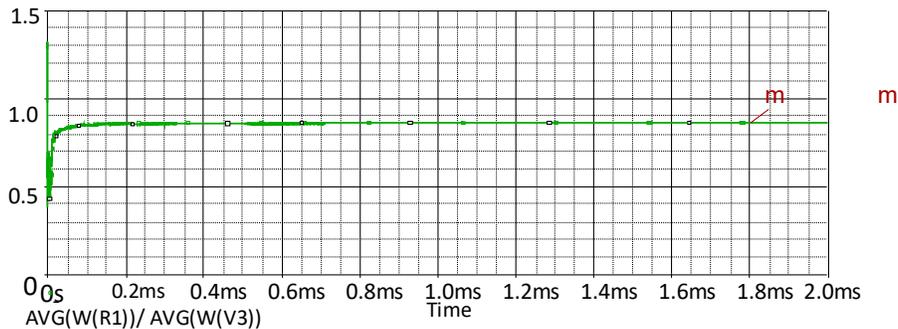


Figura 49 Eficiencia del circuito aplicando la técnica R²P².

En la figura 50 se observa de color rojo la corriente en el inductor del tanque resonante y de color verde el voltaje unipolar de la entrada del tanque resonante, al estar la corriente y el voltaje en fase se considera que el tanque se encuentra en resonancia con la técnica R²P².

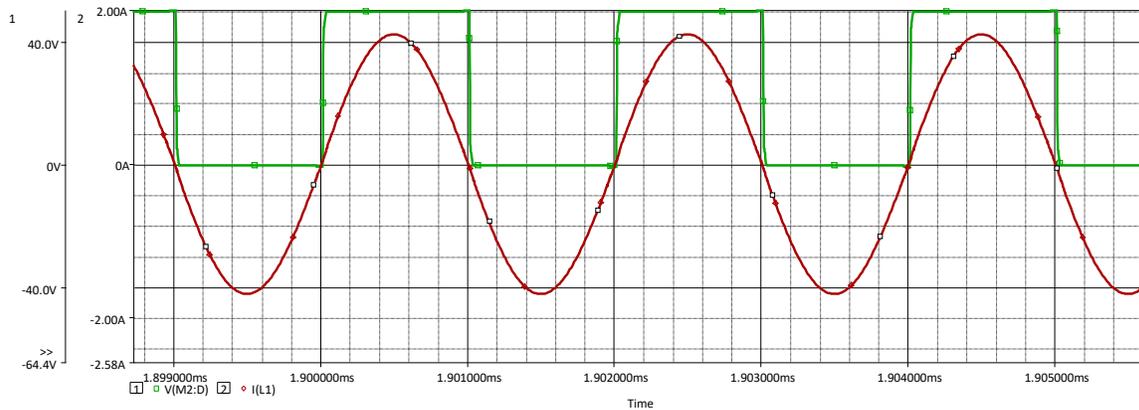


Figura 50 De color verde se observa el voltaje y de color rojo la corriente al estar en fase el circuito está en resonancia.

En la imagen 51 se observa el voltaje en la carga de 96.3 v del circuito con la técnica R²P².

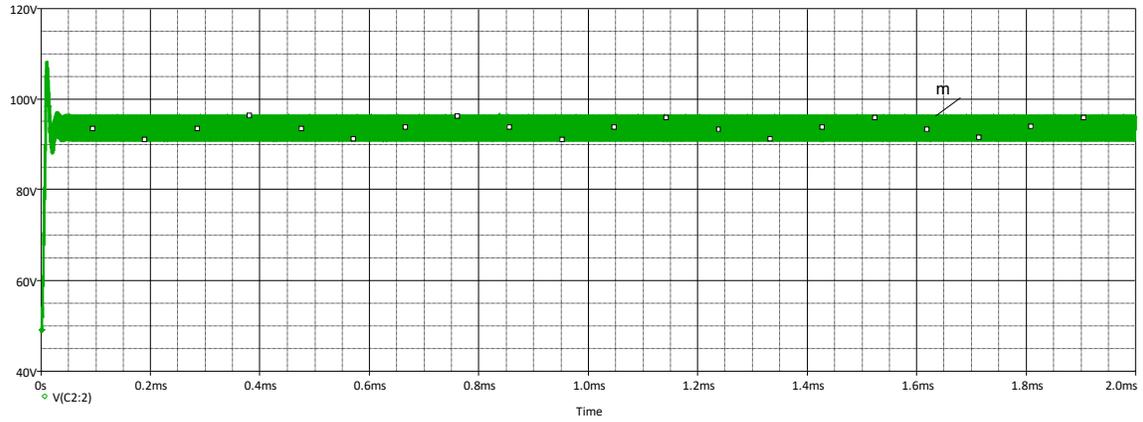


Figura 51 Voltaje en la carga del circuito.

En la figura 52 se muestra la corriente en la carga con la técnica R²P² con un valor de 512.4 mA.

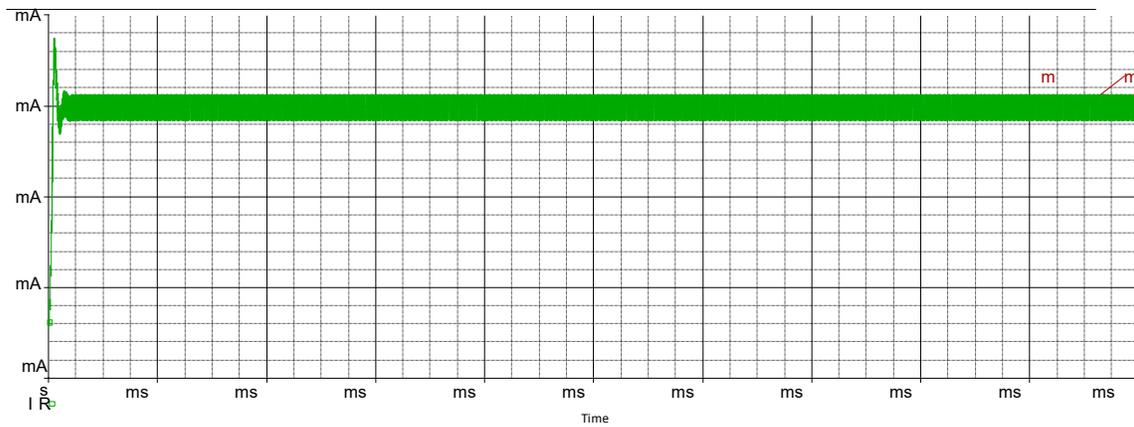


Figura 52 Corriente en la carga del circuito.

En la figura 53 se muestra la eficiencia de 82% del circuito convencional LLC.

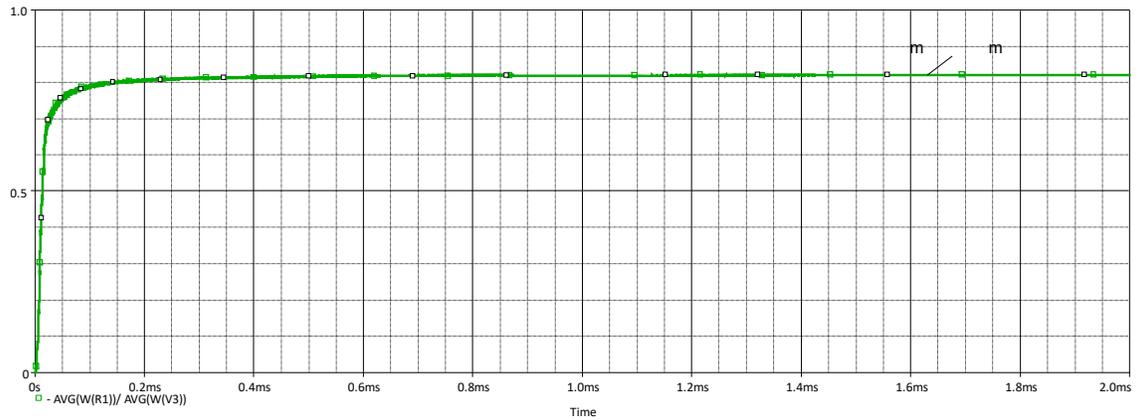


Figura 53 Eficiencia del circuito convencional LLC.

En la figura 54 se observa de color rojo la corriente en el inductor del tanque resonante y de color verde el voltaje unipolar de la entrada del tanque resonante, al estar la corriente y el voltaje en fase se considera que el tanque se encuentra en resonancia en el circuito convencional LLC.

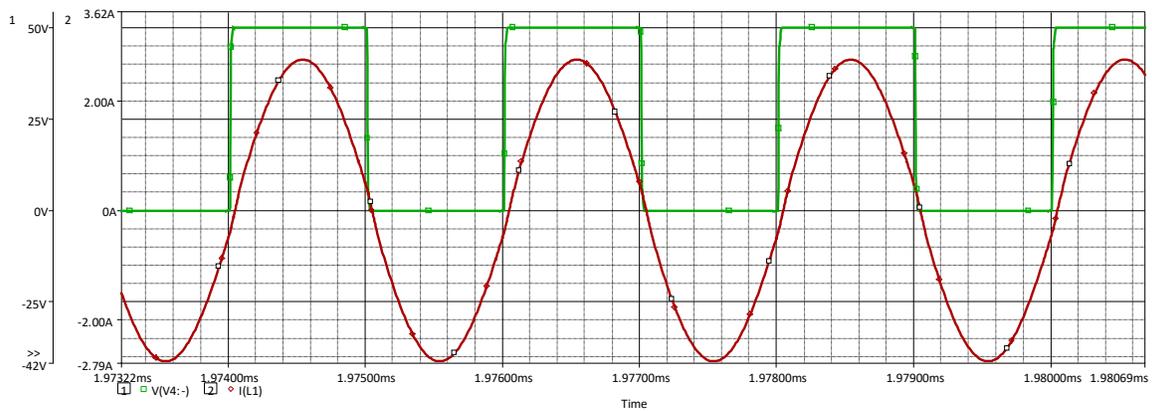


Figura 54 De color verde se observa el voltaje y de color rojo la corriente al estar en fase el circuito está en resonancia.

En la imagen 55 se observa el voltaje de 89 v en la carga con el circuito convencional LLC.

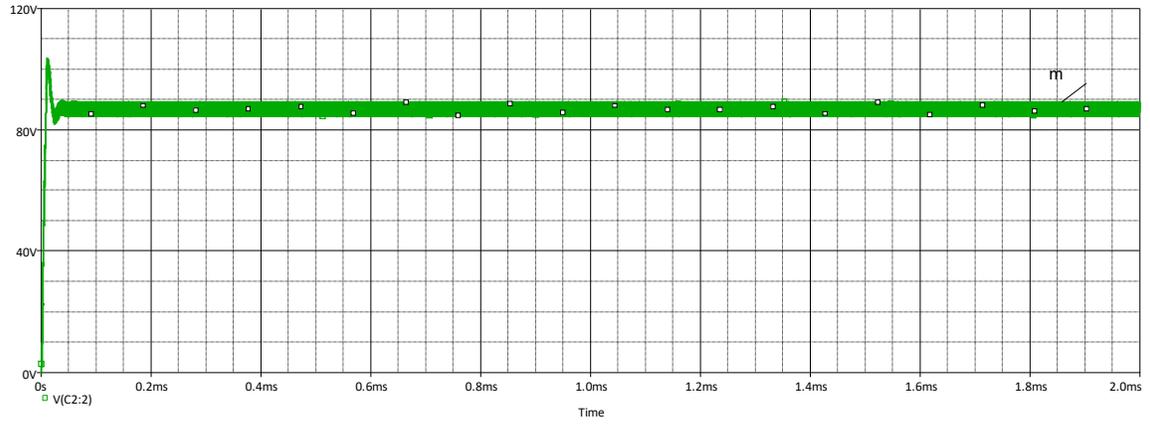


Figura 55 Voltaje de salida del circuito.

ANEXO 5

Hoja de datos del MOSFET IRFB4710

International
 Rectifier

PD- 94080

IRFB4710

IRFS4710

IRFSL4710

HEXFET® Power MOSFET

Applications

- High frequency DC-DC converters
- Motor Control
- Uninterruptible Power Supplies

V_{DSS}	$R_{DS(on) \max}$	I_D
100V	0.014 Ω	75A

Benefits

- Low Gate-to-Drain Charge to Reduce Switching Losses
- Fully Characterized Capacitance Including Effective C_{OSS} to Simplify Design, (See App. Note AN1001)
- Fully Characterized Avalanche Voltage and Current



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	75	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	53	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	300	
$P_D @ T_A = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation ②	3.8	W
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	200	
	Linear Derating Factor	1.4	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	8.2	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw④	10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.74	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface ⑤	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient⑥	—	62	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient⑦	—	40	

Static @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.11	—	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	0.011	0.014	Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 45A$ ①
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	3.5	—	5.5	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	1.0	μA	$V_{DS} = 95V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 80V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$

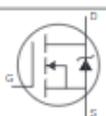
Dynamic @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
g_{fs}	Forward Transconductance	35	—	—	S	$V_{DS} = 50V, I_D = 45A$
Q_g	Total Gate Charge	—	110	170	nC	$I_D = 45A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	43	—		$V_{DS} = 50V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	40	—		$V_{GS} = 10V,$
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	35	—	ns	$V_{DD} = 50V$
t_r	Rise Time	—	130	—		$I_D = 45A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	41	—		$R_G = 4.5\Omega$
t_f	Fall Time	—	38	—		$V_{GS} = 10V$ ①
C_{iss}	Input Capacitance	—	6160	—	pF	$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	440	—		$V_{DS} = 25V$
C_{riss}	Reverse Transfer Capacitance	—	250	—		$f = 1.0MHz$
C_{oss}	Output Capacitance	—	1580	—		$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 1.0V, f = 1.0MHz$
C_{oss}	Output Capacitance	—	280	—		$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 80V, f = 1.0MHz$
$C_{oss\ eff.}$	Effective Output Capacitance	—	430	—		$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 0V \text{ to } 80V$ ②

Avalanche Characteristics

	Parameter	Typ.	Max.	Units
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy②	—	190	mJ
I_{AR}	Avalanche Current①	—	45	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy①	—	20	mJ

Diode Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	75	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①②	—	—	300		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 45A, V_{GS} = 0V$ ①
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	74	110	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 45A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	180	260	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ①
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

ANEXO 6

Para poder llevar a cabo este proyecto fue necesario implementar y diseñar varios modelos de PCB, cada uno de los modelos fueron creados en Altium Designer y a su vez se realizaron pruebas, sin embargo, se iban descartando por diferentes modificaciones entre ellos componentes de filtrados de señales que se incorporaron a la parte de control, estos componentes fueron capacitores para mejorar la señal a su vez diferentes modificaciones para implementar diferentes diodos.

En la figura 56 se observa el primer diseño realizado en Altium designer y en la figura 57 se observa la PCB ensamblada con la cual se realizaron las primas pruebas sin embargo no se obtuvieron los resultados esperados.

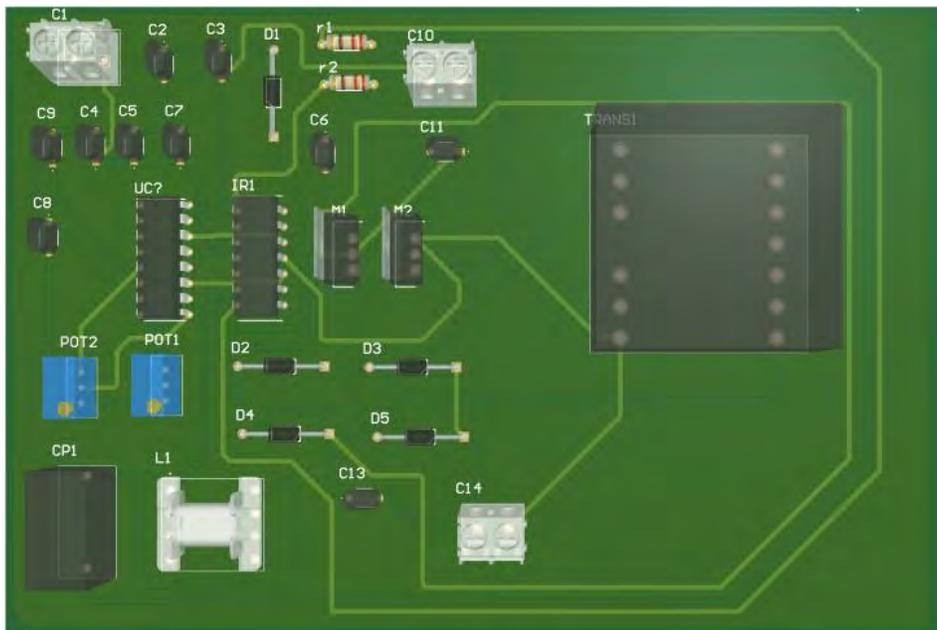


Figura 56 PCB incluye parte de control y potencia.

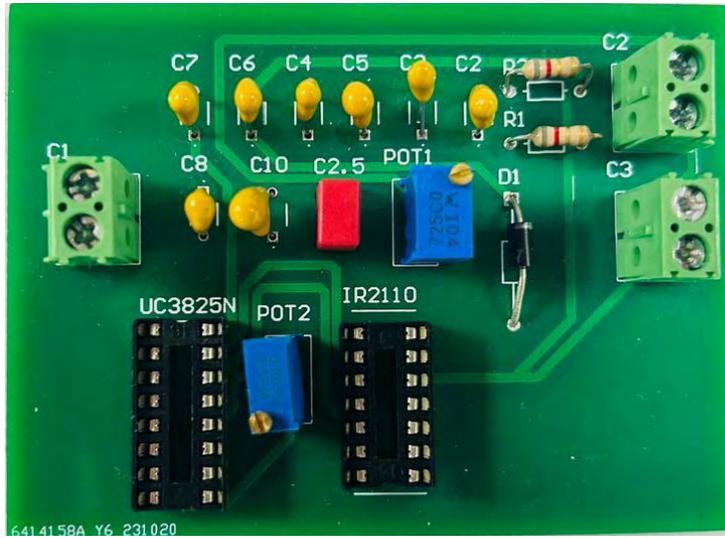


Figura 59 PCB de control ensamblada.

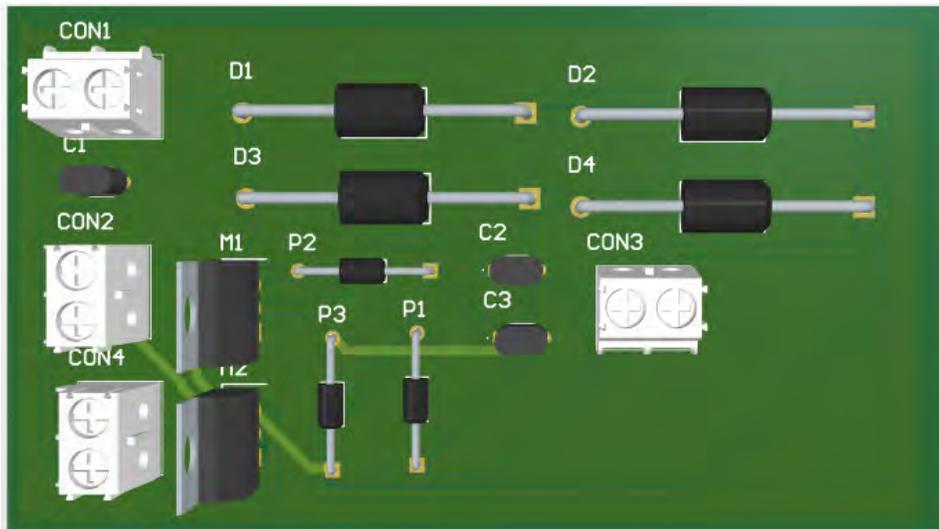


Figura 60 PCB de potencia.

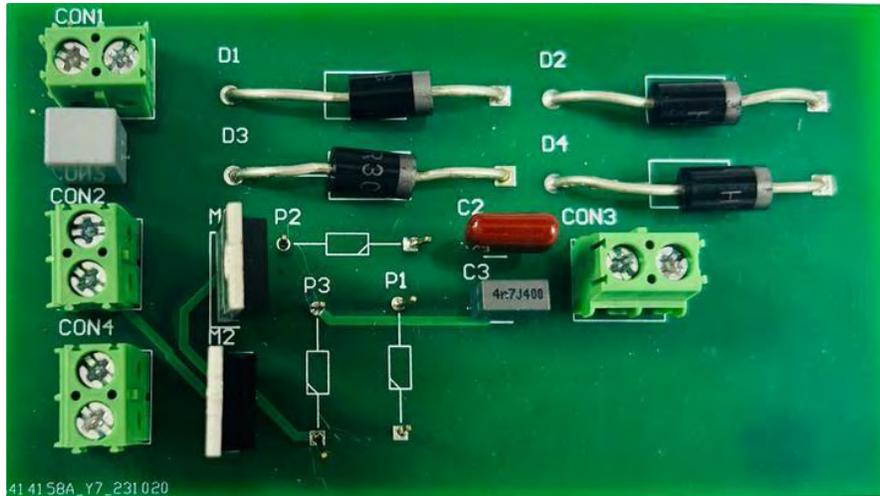


Figura 61 PCB de potencia ensamblada.

En la figura 62 se muestra el ultimo diseño de PCB al cual se le coloco otro capacitor d filtrado en la parte de control y se modificó el puente de diodos por lo que se cambiaron a diodos MUR480 y las terminales del inductor y del trasformador para que a su vez se mejore la densidad de potencia.

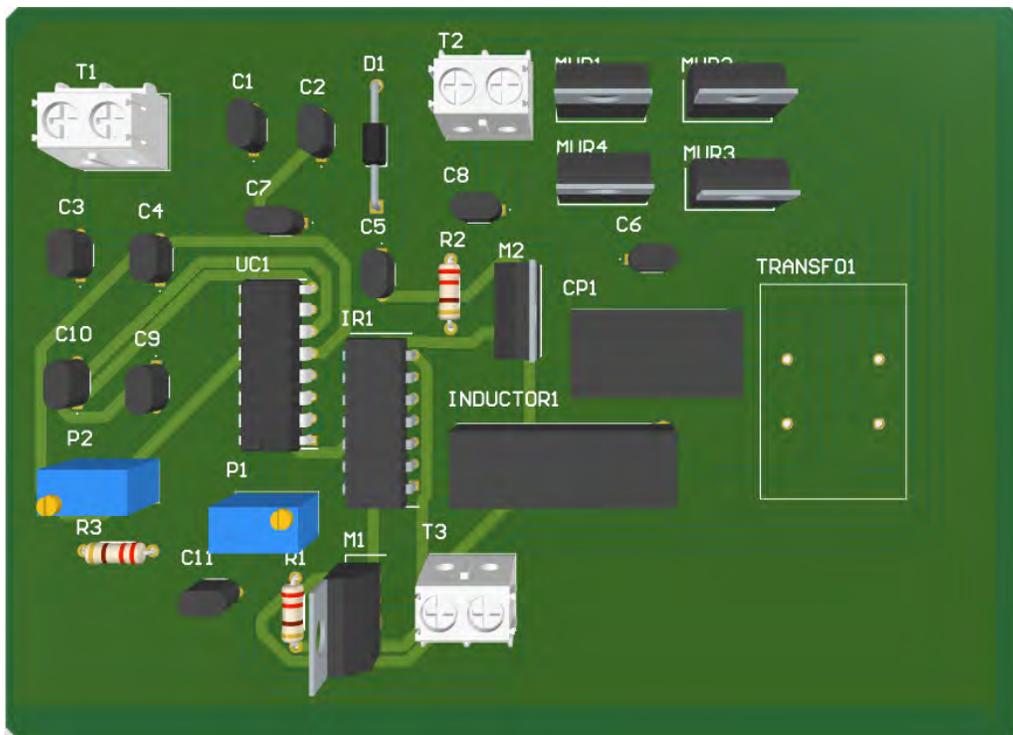


Figura 62 PCB que se utilizó para las pruebas finales.