

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

Escuela de Ingeniería en Electrónica



Diseño de circuito electrónico para la alimentación energética de un sistema de monitoreo remoto en un sistema fotovoltaico.

Informe de proyecto de graduación para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería en Electrónica.

ELABORADO POR:
Francinie Rodríguez Solórzano
Carné: 2016087201

Cartago, Noviembre 2023



Diseño de circuito electrónico para la alimentación energética de un sistema de monitoreo remoto en un sistema fotovoltaico © 2023 por Francinie Rodríguez Solórzano tiene licencia CC BY-NC-SA

4.0

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

Defensa del Trabajo Final de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniería en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del Trabajo Final de Graduación denominado *Diseño de circuito electrónico para la alimentación energética de un sistema de monitoreo remoto de un sistema fotovoltaico.*, realizado por Francinie Rodríguez Solórzano y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador

LUIS ROBERTO PEREIRA ARROYO (FIRMA) Firmado digitalmente por LUIS ROBERTO PEREIRA ARROYO (FIRMA) Fecha: 2023.11.29 10:23:21 -06'00'

Dr. Roberto Pereira Arroyo
 Profesor Lector

RENATO RIMOLO DONADIO (FIRMA) Firmado digitalmente por RENATO RIMOLO DONADIO (FIRMA) Fecha: 2023.11.29 10:27:34 -06'00'

Dr. Renato Rimolo Donadio
 Profesor Lector

 TEC | Instituto Tecnológico de Costa Rica Firmado digitalmente por HUGO ANDRES SANCHEZ ORTIZ (FIRMA) Fecha: 2023.11.29 17:44:05 +01'00'

Ing. Hugo Sánchez Ortiz
 Profesor Asesor

Alajuela, 29 de noviembre de 2023

Declaratoria de Autenticidad

Declaro que el presente proyecto de graduación ha sido enteramente de mi autoría, utilizando herramientas, conocimientos obtenidos a lo largo de mi educación superior y resultados experimentales propios.

En algunos casos he consultado fuentes bibliográficas que he indicado, citado y referenciado correctamente. Por lo tanto, asumo la responsabilidad del contenido de este documento y el trabajo realizado.

Francinie Rodríguez Solórzano
Cédula: 1-1612-0951
Cartago, 01 de junio del 2023

Agradecimientos

Debo agradecer a muchas personas por el apoyo brindado durante todos estos años a lo largo de la carrera y en la elaboración de este proyecto. Sin embargo, debo un gran agradecimiento especial a mis padres, mi hermana Carolina Rodríguez Solórzano, por el apoyo brindado estos años para poder culminar mi carrera.

Asimismo, agradezco a mis amigos, compañeros y familiares cercanos que siempre mostraron su apoyo. También agradezco a mis profesores de la carrera por sus consejos y correcciones, especialmente a mi asesor el profesor Hugo Sánchez Ortiz, el profesor Carlos Mauricio Segura Quirós por su apoyo y ayuda en el laboratorio de SESLab.

Francinie Rodríguez Solórzano
Cartago, 14 de noviembre del 2023

Resumen

En este informe se presenta el proyecto de tesis diseñado para obtener el título de Licenciatura en Ingeniería Electrónica en el Tecnológico de Costa Rica. El foco de este proyecto recae en el desarrollo de una fuente de alimentación destinada a un sistema de monitoreo y análisis de variables eléctricas en paneles solares ubicados en el laboratorio SESLab de la institución. La investigación realizada para este propósito se centra en la búsqueda de un diseño de fuente de alimentación que se ajuste a las necesidades del sistema de monitoreo, garantizando una alimentación adecuada y evitando los problemas eléctricos previamente identificados.

El problema a abordar se encuentra en la versión inicial del diseño del sistema de monitoreo, donde la conexión a tierra entre las fuentes de alimentación de los amplificadores utilizados para las mediciones de corriente estaba compartida. Este inconveniente provocaba cortocircuitos al intentar realizar mediciones entre las cadenas de los paneles fotovoltaicos en el laboratorio SESLab, ya que estas cadenas no estaban referenciadas al mismo nivel. Para resolver esta problemática, se llevó a cabo una investigación sobre fuentes de alimentación conmutadas, centrándose específicamente en las de múltiples salidas con topología de convertidores *Flyback*.

A lo largo del proyecto, se realizaron tres iteraciones del diseño para ajustes relacionados con la selección apropiada de transformadores, controladores, diodos y resistencias. Estas iteraciones se llevaron a cabo con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del diseño y su adaptabilidad a las necesidades del proyecto. Finalmente, se lograron los objetivos propuestos, culminando en el diseño y construcción exitosos de una fuente de alimentación conmutada aislada. Esta fuente logra alimentar el sistema de monitoreo de manera eficiente, con una eficiencia que varía entre el 40 % y el 70 %.

Palabras clave: Placa de Circuito Impreso (PCB), fuentes conmutadas, transformadores, opto-acopladores, convertidores, PWM, DCM, CCM, Flyback.

Abstract

This report presents the graduation project developed to obtain a Bachelor's degree in Electronic Engineering at the Technological Institute of Costa Rica. The project focuses on the development of a power supply for a monitoring and analysis system of electrical variables in solar panels located in the SESLab laboratory of the institution. The research conducted for this purpose revolves around finding a suitable power supply design that meets the needs of the monitoring system, ensuring proper equipment power and addressing electrical issues identified in the past.

The problem to be addressed lies in the initial version of the monitoring system design, where the ground connection between the power supplies of the amplifiers used for current measurements was shared. This issue caused short circuits when attempting measurements between the chains of photovoltaic panels in the SESLab laboratory, as these chains were not referenced at the same level. To solve this problem, research was conducted on switched-mode power supplies, specifically those with multiple outputs using Flyback converter topology.

Throughout the project, three iterations of the design were carried out to make adjustments related to the proper selection of transformers, controllers, diodes, and resistors. These iterations were conducted to verify that the design worked correctly and adapted to the project's needs. Finally, the project's objectives were achieved, resulting in the successful design and construction of an isolated switched-mode power supply. This power supply effectively powers the monitoring system, with an efficiency ranging from 40 % to 70 %.

Palabras clave: Placa de Circuito Impreso (PCB), fuentes conmutadas, transformadores, opto-acopladores, convertidores, PWM, DCM, CCM, Flyback.

Acrónimos

CA Corriente Alterna. 24, 26, 28–30, 37

CC Corriente Continua. 26, 27, 29, 32

CCM Modo Continuo. 30, 31

CD Corriente Directa. 30, 37

DCM Modo Discontinuo. 30

EMI Interferencia Electromagnética. 27, 29, 37, 38

FET Field-Effect transistor. 21, 22

FV Fotovoltaicos. 15, 16

LSD Least Significant Difference. 15, 16

PCB Placa de Circuito Impreso. 6, 7, 9–12, 19, 29, 36, 43–45, 49, 50, 52–57, 61, 74

PWM Modulación de Ancho de Pulso. 19, 27, 39, 41, 42, 47

RC Resistencia-Capacitor. 27

RL Resistencia-Inductor. 27

SESLab Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad. 16–18, 35, 57, 68

TEC Tecnológico de Costa Rica. 16, 18

Índice general

1. Introducción	15
1.1. Entorno del Proyecto	15
1.2. Definición del Problema	16
1.2.1. Síntesis del problema	17
1.3. Objetivos	18
1.3.1. Meta	18
1.3.2. Objetivo General	18
1.3.3. Objetivos Específicos	18
1.4. Estructura del documento	18
2. Fundamentos Teóricos	20
2.1. Marco Teórico	20
2.1.1. Tipos de fuentes	20
2.1.2. Tipos Convertidores	21
2.1.3. Transformadores	24
2.1.4. Rectificación	26
2.1.5. PWM	27
2.1.6. Filtrado	27
2.1.7. Optoacopladores	28
2.1.8. PCB y planos de potencia	29
2.2. Topologías prácticas para fuentes de alimentación	29
2.2.1. Aplicaciones	30
2.2.2. Síntesis del capítulo	33
3. Desarrollo de la solución	35
3.1. Planteamiento de la Solución	35
3.1.1. Enfoque de la solución	35
3.1.2. Solución seleccionada:	35
3.2. Diseño de la solución	38

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	10
3.2.1. Descripción de las alternativas del proyecto	38
3.2.2. Simulación	41
3.2.3. Prototipo	43
3.2.4. Selección de componentes	49
3.2.5. Esquemáticos para diseño de PCB	50
4. Implementación	52
4.1. Iteraciones de propuestas para fabricación de PCB	52
4.1.1. Iteración 1 primer diseño de fabricación para PCB	52
4.1.2. Iteración 2 segundo diseño de fabricación para PCB con correcciones	55
4.1.3. Iteración 3 tercer diseño de fabricación para PCB, duplicado de fuente conmutada previsto para el diseño de 6 salidas de alimentación	57
5. Pruebas y Resultados	61
5.1. Mediciones de tensión, corriente y potencia	61
5.2. Mediciones de frecuencia de conmutación	64
5.3. Pruebas de eficiencia de la fuente	65
5.4. Pruebas con sistema de monitoreo	68
5.4.1. Prueba de fuente conmutada con sistema de monitoreo sin arreglos fotovoltaicos	68
5.4.2. Prueba de fuente conmutada con sistema de monitoreo en los arreglos fotovoltaicos	70
5.4.3. Mediciones y cálculos de consumo de potencia	71
6. Conclusiones y Recomendaciones	73
6.1. Conclusiones	73
6.2. Recomendaciones	74
A. Fabricación de PCBs	76
A.1. Primer diseño del PCB fabricado	76
A.2. Segundo diseño del PCB fabricado con correcciones	80
A.3. Tercer diseño del PCB duplicada	81

Índice de figuras

1.1. Sistema de monitoreo implementado con fuentes independientes [1]	17
2.1. Diagrama de convertidor <i>Buck</i> . [2]	21
2.2. Diagrama de convertidor <i>Boost</i> . [2]	22
2.3. Diagrama de convertidor <i>Buck-Boost</i> . [2]	22
2.4. Diagrama de convertidor <i>Flyback</i> . [2]	23
2.5. Diagrama de controlador <i>Flyback</i> . [3]	24
2.6. Diagrama de convertidor <i>Flyback</i> dos transistores. [2]	32
2.7. Diagrama de convertidor <i>Flyback</i> en paralelo. [4]	32
2.8. Diagrama Fuente de alimentación con modo de conmutación <i>Flyback</i> de salidas múltiples [5]	33
3.1. Diagrama de bloques de solución elegida	37
3.2. Diagrama de propuesta de solución	38
3.3. Diagrama etapa de rectificación y filtrado	39
3.4. Diagrama etapas propuesta solución	40
3.5. Esquemático de simulación en LTSpice	42
3.6. Tensiones en salidas de simulación en LTSpice	42
3.7. Primer diseño del esquemático hecho en Eagle para diseño PCB	43
3.8. Segundo diseño del esquemático hecho en Eagle para diseño PCB	44
3.9. Tercer diseño del esquemático hecho en Eagle para diseño PCB	45
3.10. Diagrama recomendado por fabricante del controlador	48
3.11. Prototipo de segundo diseño con transformador 17W armado en protoboard	48
3.12. Prototipo de segundo diseño con transformador 10W armado en protoboard	49
3.13. Esquemático propuesto hecho en Eagle para PCB versión1	51
4.1. Esquemático Primer diseño del PCB fabricado	53
4.2. Foto de primer PCB fabricada	53

4.3.	Diagrama de transformador y el <i>Footprint</i> descargado para <i>Eagle</i> . .	54
4.4.	Esquemático Segundo diseño del PCB fabricado	55
4.5.	Foto de segunda PCB fabricada	57
4.6.	Esquemático Tercer diseño del PCB fabricado duplicado	58
4.7.	PCB fabricado duplicado para 6 fases foto desde arriba	59
4.8.	PCB fabricado duplicado para 6 fases foto desde lado	59
4.9.	PCB fabricado duplicado para 6 fases sistema de monitoreo foto desde arriba	59
4.10.	PCB fabricado duplicado para 6 fases sistema de monitoreo foto desde abajo	60
4.11.	PCBs fabricados para 6 fases acoplados	60
5.1.	Gráfico potencia en función de la corriente de salida de las 3 fases .	62
5.2.	Gráfico potencia en función de la corriente de salida de las 3 fases .	63
5.3.	Gráfico potencia en función de la corriente de salida de las 1 fase con carga	64
5.4.	Gráfica frecuencia de conmutación	65
5.5.	Gráfico de eficiencia de las 3 salidas	66
5.6.	Gráfico de eficiencia de 1 salida	67
5.7.	Gráfico de densidad de flujo versus pérdidas del núcleo [6]	68
5.8.	Diagrama de simulación arreglos FV	69
5.9.	Fuente con sistema de monitoreo conectado para la simulación . . .	70
5.10.	Resistencias Shunt en arreglos de paneles fotovoltaicos en el SESLab	70
5.11.	Fuente con sistema de monitoreo conectado en arreglos de paneles fotovoltaicos en el SESLab	71
5.12.	Datos en consola desplegados por la <i>Raspberry Pi</i>	71
A.1.	Primer diseño del PCB1 sin corregir	76
A.2.	Primer diseño del PCB capa top	77
A.3.	Primer diseño del PCB capa bottom	77
A.4.	Primer diseño del PCB placa capa top	78
A.5.	Primer diseño del PCB placa capa bottom	78
A.6.	Primer diseño del PCB fabricado capa top	79
A.7.	Primer diseño del PCB fabricado capa bottom	79
A.8.	Segundo diseño del PCB fabricado	80
A.9.	Segundo diseño del PCB fabricado con planos	80
A.10.	Segundo diseño del PCB fabricado capa top	81
A.11.	Segundo diseño del PCB fabricado capa Botton	81

A.12. Tercer diseño del PCB	83
A.13. Tercer diseño del PCB planos	84
A.14. Tercer diseño del PCB capa top	85
A.15. Tercer diseño del PCB capa Bottom	86

Índice de cuadros

3.1. Matriz de Pugh	37
3.2. Etapa de rectificación y filtrado	39
3.3. Etapa de controlador y retroalimentación	40
3.4. Etapa de transformador, regulador, rectificación y filtrado de salida .	41
3.5. Mediciones en prototipo transformador 67W	46
3.6. Mediciones en prototipo transformador 17W	46
3.7. Mediciones en prototipo con controlador TNY267 y transformador 17W	48
3.8. Mediciones en prototipo con controlador TNY267 y transformador 10W	48
3.9. Lista de componentes para primer prototipo en PCB	50
4.1. Lista de componentes para segundo prototipo en PCB	56
5.1. Tabla de mediciones potencia, tensión y corriente de entrada	62
5.2. Tabla de mediciones potencia, tensión y corriente de salida 1	62
5.3. Tabla de mediciones potencia, tensión y corriente de salida 2	63
5.4. Tabla de mediciones potencia, tensión y corriente de salida 3	63
5.5. Tabla de mediciones potencia, tensión y corriente de salida 1 mayor corriente	64
5.6. Tabla de cálculos para eficiencia	65
5.7. Tabla de cálculos para eficiencia de 1 salida mayor corriente	66
5.8. Mediciones y cálculos de potencia consumida por las salida del sistema monitoreo	72
5.9. Mediciones y cálculos de potencia consumida por sistema monitoreo	72

Capítulo 1

Introducción

1.1. Entorno del Proyecto

El aprovechamiento de todo sistema de generación eléctrico depende de su rendimiento, el cual es máximo bajo condiciones de funcionamiento óptimo; esto ha implicado un incremento día a día de las prácticas de mantenimiento que atienden las problemáticas que surgen de forma indeseada.

En los últimos años en Costa Rica se han implementado fuentes renovables para la generación de energía, una de ellas es la energía solar mediante uso de paneles fotovoltaicos. En el plan nacional de energía 2015-2030 se menciona que, en el área ambiental, el sector de energía del país encara el reto formidable de contribuir con un desarrollo económico cada vez más bajo en emisiones de gases de efecto invernadero. Se debe tener en cuenta que el sector energía produce cerca del 80 % de la emisión total de gases de efecto invernadero del país [7]. Por lo que los sistemas fotovoltaicos representan una alternativa para la generación de energía ya que es un ejemplo de fuente renovable.

Y debido a lo anterior se ha desarrollado amplia investigación para la detección de condiciones subóptimas en sistemas FV, llevando a la existencia de una gama de técnicas de detección de fallas en paneles solares. Cada método cuenta con sus capacidades y limitaciones, implicando que las instalaciones FV deban saber cómo seleccionar y usar una o varias técnicas en sus planes de mantenimiento [8].

Una de estas técnicas para la detección de fallas en los paneles solares es el algoritmo LSD de Fisher, que se utiliza para evaluar la detección de fallas por medio de variables eléctricas, específicamente la corriente [1]. Para el correcto funcionamiento de un sistema fotovoltaico se necesita el mantenimiento adecuado y constante monito-

reo.

El SESLab de la Escuela de Ingeniería en Electrónica en el Tecnológico de Costa Rica, es un laboratorio de investigación aplicada que se enfoca en la evaluación, análisis y desarrollo de sistemas electrónicos usados específicamente en aplicaciones de carbono neutral y bajo impacto ambiental, como sistemas de energía renovable, transporte de cero emisiones de carbono y monitoreo ambiental [9].

Para el laboratorio es de importancia el monitoreo de sus sistemas fotovoltaicos para verificar su funcionamiento, por lo que SE implementa un sistema de sensores a nivel de monitoreo en un sistema fotovoltaico para la medición y procesamiento de información, basado en el algoritmo LSD de Fisher.

1.2. Definición del Problema

El SESLab implementó un sistema fotovoltaico en la sede de San Carlos del TEC, el cual tiene un sistema de monitoreo, basado en el algoritmo LSD de Fisher, utilizado para evaluar la detección de fallas por medio de variables eléctricas, específicamente la corriente en los sistemas fotovoltaicos. El monitoreo permite el cuidado de estos sistemas fotovoltaicos y aprovechar al máximo su vida útil, evitando y detectando a tiempo daños en el sistema.

El circuito implementado en el sistema de monitoreo tiene 3 canales de monitoreo, una etapa de aislamiento de protección, para aislar la etapa de potencial alto (300VDC) con la etapa de potencial bajo (5VDC), un amplificador aislado, para el muestreo y procesamiento de las señales que vienen de los sensores. Este amplificador aislado, según [10] en su hoja de datos para su alimentación, el fabricante recomienda una tensión en el rango de 4.5V mínimo, 5V típico y 6V como máximo. También recomienda una corriente de consumo máximo de 10 mA.

Se implementó el sistema de monitoreo de fallas con el algoritmo LSD para este sistema fotovoltaico, Sin embargo, en la primera versión del diseño existente, la tierra entre las fuentes de alimentación de los amplificadores estaba compartida. Dado que las cadenas de los paneles FV no se encuentran referenciados al mismo nivel, se producen cortocircuitos cuando se intentan realizar mediciones entre las cadenas [1]. Al analizar el problema se determina que la falla esta en la alimentación del sector de alto voltaje(300VDC) ya que existen diferencias de potenciales entre las fases, lo que imposibilita usar una única referencia, ya que de usarse provoca cortocircuitos entre las fases. Al tener problemas con esta etapa el laboratorio decidió utilizar un

cargador por cada línea de medición, lo cual hace que escalar el sistema se vuelva poco práctico, sin embargo, esa es solo una solución temporal, ya que se requiere trabajar en un adecuado aislamiento para alimentar de manera correcta y eficiente el sistema de las 6 etapas a la vez. En la figura 1.1 se puede observar el sistema de monitoreo implementado, con sus fuentes independientes.

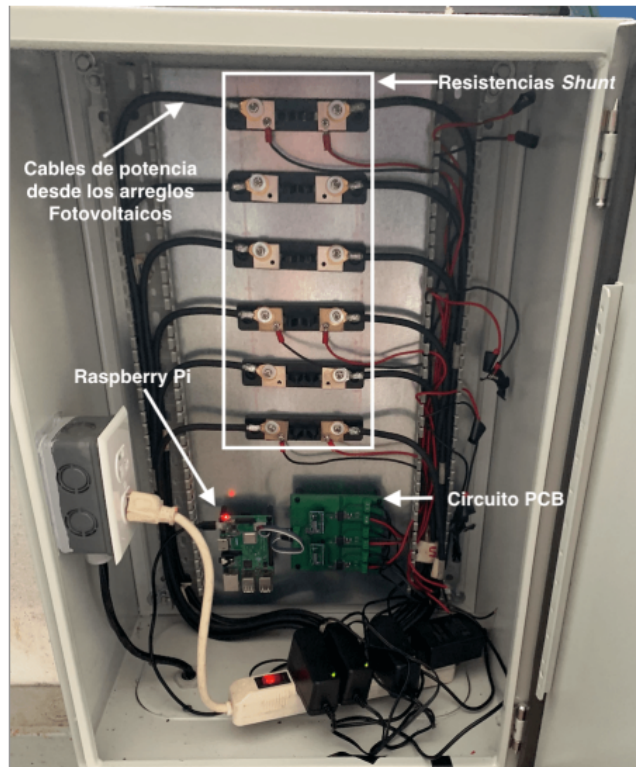


Figura 1.1: Sistema de monitoreo implementado con fuentes independientes [1]

Como se presentaron problemas con el diseño inicial del circuito en la parte de la alimentación para todas las etapas, el laboratorio SESLab busca implementar una fuente de poder que pueda alimentar a las 6 etapas al mismo tiempo, para esta fuente de poder se requiere que se emplee un mecanismo para aislar estas tierras, para así evitar el conflicto de los cortocircuitos entre etapas. Con este proyecto se desea solventar esta carencia y resolver el problema presentado.

1.2.1. Síntesis del problema

Carencia de una fuente de alimentación única que permita operar todas las fases de medición del sistema de monitoreo de corriente, evitando la posibilidad de cor-

tocircuito entre las fases de alta tensión de los sistemas fotovoltaicos del laboratorio SESLab.

1.3. Objetivos

1.3.1. Meta

- Contribuir a un producto de fácil montaje y operación para la medición de la corriente por cadena en sistemas fotovoltaicos, por medio de un circuito de alimentación eléctrica con un adecuado aislamiento, que permita su correcto funcionamiento.

1.3.2. Objetivo General

- Desarrollar un sistema electrónico de potencia para alimentar energéticamente el sistema de monitoreo remoto del sistema fotovoltaico del TEC en el Campus de Cartago, a través de una fuente de poder de múltiples fases que evite daños en los sistemas implementados.

1.3.3. Objetivos Específicos

- Diseñar una única etapa de alimentación aislada que permita la operación y funcionamiento de un sistema de medición de corriente directa por cadena en un sistema fotovoltaico.
- Integrar la etapa de alimentación única al sistema de medición existente mediante el desarrollo de una placa de circuito impreso.
- Implementar y verificar el correcto funcionamiento de la etapa de alimentación deseada en la nueva integración del sistema.

1.4. Estructura del documento

La estructura del documento consiste en 7 capítulos cuyo detalle se brinda a continuación. En el capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos sobre el tema, es el sustento teórico abordado y estudiado a lo largo del desarrollo de este proyecto. Además se describen aspectos técnicos relacionados con tipos de fuentes de poder,

tipos de convertidores, transformadores, rectificación, PWM, filtrado, optoacopladores, PCB y planos de potencia, topologías prácticas para fuentes de alimentación, sus aplicaciones y una síntesis del marco teórico.

Para el capítulo 3 se detalla el planeamiento de la solución, el enfoque de la solución, descripción de las alternativas del proyecto, selección de la solución. El capítulo 4 presenta el proceso de diseño de la solución, donde se describe las alternativas del proyecto, simulación, prototipo, selección de componentes y esquemáticos para diseño del PCB.

El capítulo 5 contiene la implementación de un prototipo, el desarrollo de 3 iteraciones y el diseño final fabricado. El capítulo 6 presenta las pruebas, mediciones de tensión corriente y potencia, además del cálculo de la eficiencia y finalmente el capítulo 7 resume las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

Este capítulo expone el fundamento teórico explorado y examinado durante la evolución de este proyecto. Además, se detallan aspectos técnicos vinculados al tema central del proyecto. Entre los conceptos abordados se incluyen la teoría de fuentes y rectificación. La sección abarca la documentación del estado del arte en cuanto a las fuentes conmutadas con la topología de convertidores *Flyback*.

2.1. Marco Teórico

En esta sección se documentan conceptos teóricos necesarios para la comprensión del proyecto. El enfoque principal se concentra en la teoría relacionada con las fuentes de alimentación conmutadas y una variedad de convertidores. Estas secciones explorarán los principios fundamentales de los convertidores, sus modos de operación, aplicaciones, aspectos críticos del diseño de placas de circuito impreso y la gestión de tierras. En conjunto, estas secciones formarán un marco integral de conocimiento que permite abordar este proyecto en el campo de las fuentes de alimentación conmutadas.

2.1.1. Tipos de fuentes

Fuentes lineales

Son fuentes que basan su funcionamiento en la reducción de tensión en un circuito de corriente alterna mediante un transformador, comúnmente este transformador es un transformador de núcleo de hierro, y su posterior rectificado y filtrado de la señal obtenida [11].

Fuentes conmutadas

Según [12] en las fuentes conmutadas lo que se hace es utilizar un transistor en la zona de corte y saturación, de esta forma se tiene periodos de tiempo en la que la corriente y la tensión son nulos. Esto se logra convirtiendo la tensión de entrada en una señal cuadrada siendo el concepto básico de las fuentes conmutadas. En las fuentes conmutadas comúnmente se utilizan transformadores de núcleo de ferrita, debido a las altas frecuencias de conmutaciones que se utilizan.

2.1.2. Tipos Convertidores

Según [12] existen distintas configuraciones de convertidores:

- **Buck / step down** : la tensión de salida es menor que la tensión de entrada.
- **Boost / step up** : la tensión de salida es mayor que la tensión de entrada.
- **Buck-Boost / inverter** : la tensión de salida es opuesta a la tensión de entrada.
- **Flyback** : posee una configuración similar que el *inverter* pero su funcionamiento se basa en 2 o varios inductores acoplados, posee la ventaja de permitir obtener varias salidas de tensión.

Convertidor *Buck*

Un convertidor *Buck* reduce un voltaje de entrada a un nivel de voltaje de salida más bajo. La energía se transfiere a la salida cuando el FET está conduciendo [2]. En la figura 2.1 se muestra el diagrama de un convertidor *Buck*.

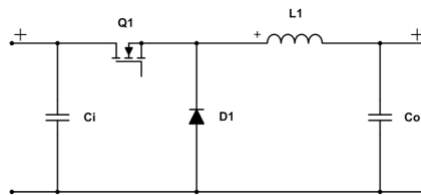


Figura 2.1: Diagrama de convertidor *Buck*. [2]

Convertidor *Boost*

Un convertidor *Boost* aumenta un voltaje de entrada a un nivel de voltaje de salida más alto. La energía se transfiere a la salida cuando el FET no está conduciendo

[2]. En la figura 2.2 se muestra el diagrama de un convertidor *Boost*, donde se puede observar una bobina en serie.

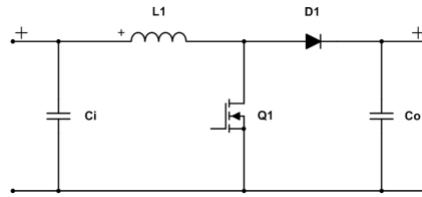


Figura 2.2: Diagrama de convertidor *Boost*. [2]

Convertidor *Buck-Boost*

Un regulador *Buck-Boost* inversor convierte un voltaje de entrada positivo en un nivel de voltaje de salida negativo más alto o más bajo. La energía se transfiere a la salida cuando el FET no está conduciendo [2]. En la figura 2.3 se muestra el diagrama de un convertidor *Buck-Boost*, donde se puede observar que a diferencia del convertidor *Boost*, este tiene una bobina en paralelo.

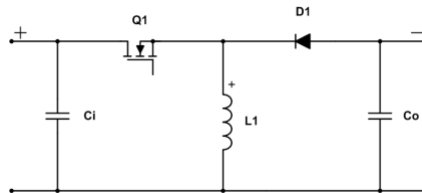


Figura 2.3: Diagrama de convertidor *Buck-Boost*. [2]

Convertidor *Flyback*

Un regulador *Flyback* convierte un voltaje de entrada a un nivel de voltaje de salida positivo o negativo, mayor o menor. La energía se transfiere a la salida cuando el FET no está conduciendo [2]. En la figura 2.4 se muestra el diagrama de un convertidor *Flyback*, donde se puede observar que a diferencia del convertidor *Buck-Boost*, este usa un transformador con las bobinas en polaridades inversas.

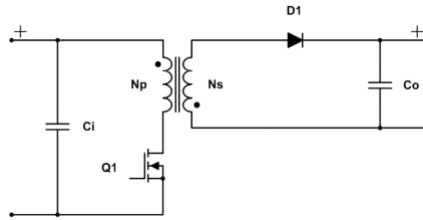


Figura 2.4: Diagrama de convertidor *Flyback*. [2]

Controlador *Flyback* En fuentes conmutadas se utiliza la realimentación negativa para mantener la tensión de salida en el valor deseado, rechazando perturbaciones por ruido, variaciones en la carga y para compensar alinealidades propias del convertidor. Además, se incluyen lazos de control con funciones secundarias o de protección que actúan ante condiciones anormales de operación [13]. Una de las implementaciones más comunes en la etapa de control de las fuentes de alimentación conmutadas es el control en modo de corriente.

Con el control en modo corriente, hay dos lazos de control en funcionamiento. El primer bucle interior de acción rápida controla la corriente primaria máxima, mientras que el segundo bucle exterior, mucho más lento, ajusta el bucle de control de corriente para definir el voltaje de salida. El efecto general de estos dos lazos de control es que la fuente de alimentación responde como una fuente de corriente controlada por voltaje [5].

Hay una serie de ventajas que se pueden obtener del control de modo actual. En primer lugar, el sistema responde como si el primario fuera una fuente de corriente de alta impedancia y la inductancia efectiva del transformador convertidor se elimina del circuito equivalente del filtro de salida para pequeños cambios de señal. Esto da como resultado una función de transferencia simple de primer orden. Por lo tanto, el circuito de control puede tener una buena respuesta de alta frecuencia, mejorando el rendimiento transitorio de entrada. Se mejoran el rechazo de la ondulación de la línea y la estabilidad del bucle. Una segunda gran ventaja es que la limitación de corriente primaria se proporciona automáticamente sin componentes adicionales [5].

En la figura 2.5 se puede observar el diagrama de un convertidor *Flyback*

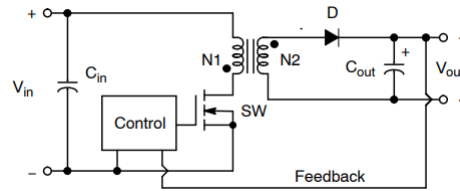


Figura 2.5: Diagrama de controlador *Flyback*. [3]

Modo de Control en Corriente Detecta no sólo la tensión de salida, sino también la cantidad de corriente que fluye a través del inductor o transformador. Cuando la salida exige más potencia, el controlador permite ingresar mayor carga de corriente en el inductor o transformador. A la inversa, si el voltaje de entrada cambia repentinamente, es inmediatamente detectado por el controlador y responde, manteniendo la tensión de salida en su nivel requerido. Controladores en modo de corriente pueden ser identificados por la salida del amplificador de error que es colocado en un comparador, donde se detecta el nivel de la rampa de corriente [14].

Modo de Control en Voltaje En el Modo de control de Voltaje solamente la tensión de salida es detectada a fin de mantener el nivel de voltaje requerido. Este tipo de control puede ser reconocido porque la salida del amplificador de error de entrada es un comparador que “compara” el voltaje de error con la rampa creada por la sección de oscilador del circuito integrado [14].

2.1.3. Transformadores

Según [15] el transformador es un dispositivo eléctrico diseñado con base en el concepto del acoplamiento magnético. Se sirve de bobinas magnéticamente acopladas para transferir energía de un circuito a otro. Los transformadores son elementos clave de circuitos y se usan en sistemas eléctricos para aumentar o reducir tensiones o corrientes de CA. También se les emplea en circuitos electrónicos, como en receptores de radio y televisión, para propósitos tales como acoplamiento de impedancias, aislamiento de una parte de un circuito respecto de otra y aumento o reducción de tensiones y corrientes de CA.

Transformadores de núcleo de hierro: según [16] los transformadores de núcleo de hierro se utilizan en general para frecuencia de audio (FA) y aplicaciones de potencia.

Estos transformadores se componen de devanados sobre un núcleo construido a partir de hojas laminadas de material ferromagnético aisladas una de otra. Esta construcción proporciona una trayectoria fácil para el flujo magnético e incrementa la cantidad de acoplamiento entre los devanados.

Los materiales de aleaciones de hierro del núcleo (a menudo denominados aceros magnéticos) suelen emplearse sólo en aplicaciones de baja frecuencia (2 kHz o menos para transformadores) debido a la pérdida por corrientes parásitas. Los materiales magnéticos de aleaciones de hierro deben estar laminados para reducir pérdidas por corrientes parásitas incluso con frecuencias moderadas, del orden de 60 Hz [4].

Transformadores de núcleo de ferrita: Los núcleos de ferrita son comunes en sistemas de comunicación de alta frecuencia [16]. Las ferritas son materiales cerámicos que se utilizan en la industria electrónica para núcleos en inductancias (reactores) y transformadores para altas frecuencias. Tienen la apariencia de núcleos fundidos compactos en una amplia variedad de formas geométricas diferentes y se utilizan donde los núcleos hechos de láminas de transformadores no son adecuados. En términos generales, la ventaja de este material es que puede tener una permeabilidad muy alta y pérdidas bajas, y puede trabajar a altas frecuencias. La desventaja es que se satura fácilmente (su densidad de flujo de saturación suele ser $<0,5$ T) [17].

Las materiales de ferrita son en esencia mezclas de óxidos de hierro y otros elementos magnéticos. Tienen una resistividad eléctrica muy grande pero bajas densidades de flujo de saturación, por lo general de alrededor de 0.3 T. Las ferritas sólo tienen pérdidas por histéresis. No ocurre ninguna corriente parásita de importancia debido a la alta resistividad eléctrica. Las ferritas son el material de elección para núcleos que operan con altas frecuencias (mayores a 10 kHz) debido a la baja pérdida por corrientes parásitas [4].

Existen dos tipos de pérdidas se encuentran en materiales de aleaciones de hierro: la pérdida por histéresis y la pérdida por corrientes parásitas.

Pérdida por histéresis: Según [4] todos los núcleos magnéticos muestran algún grado de histéresis en su característica B-H (Densidad de flujo y densidad magnética). La energía se disipa en el material, y el calor causado por la disipación sube la temperatura del material. La pérdida por histéresis se incrementa en todo el material del núcleo y con ello el aumento de la densidad del flujo y la frecuencia de operación o conmutación [4].

Pérdida por corrientes parásitas en núcleos laminados: Las corrientes parásitas que se generan en el núcleo conductivo disipan potencia, lo que en forma genérica se llama pérdida por corriente parásita en el núcleo, y aumentan su temperatura [4].

De acuerdo con lo anterior, los materiales magnéticos para los núcleos de inductores y transformadores tienen dos tipos de pérdidas eléctricas: por corrientes parásitas debido a la conductividad eléctrica finita y por histéresis (magnéticas) [4]. La operación de alta frecuencia dicta el uso de ferritas, las cuales tienen una resistividad eléctrica grande y por tanto sólo tienen pérdidas magnéticas [4]. Esto hace que las ferritas sean una mejor opción para el diseño de fuentes de alimentación ya que algunos problemas como el efecto superficial y la pérdida por corrientes parásitas que causa la conductividad finita de aceros magnéticos se evitan en gran medida en los materiales como las ferritas. La resistividad tan grande que se encuentra en las ferritas reduce todos estos problemas que se presentan en los núcleos laminados.

2.1.4. Rectificación

Los rectificadores son circuitos realizados con diodos, capaces de cambiar la forma de onda de la señal que reciben en su entrada. Se utilizan sobre todo en las fuentes de alimentación de los equipos electrónicos. Hay que tener en cuenta que es común que los equipos electrónicos funcionan internamente con corriente continua, y aunque se les conecte a la red eléctrica (CA), la fuente de alimentación se encarga de convertir esa corriente alterna en corriente continua. El elemento fundamental de esa fuente de alimentación será precisamente el circuito rectificador [18].

Según [18] los circuitos rectificadores se puede clasificar en 3 tipos:

- Rectificador de media onda, formado por un único diodo.
- Rectificador de onda completa. Dentro de este tipo podemos distinguir:
 - Rectificador con transformador de toma intermedia, formado por dos diodos.
 - Rectificador con puente, formado por cuatro diodos.

La mayoría de las aplicaciones de electrónica de potencia, como los suministros de energía de conmutación de CC, los controles de motores de CA, los servocontrol de CC, etc., utiliza estos rectificadores no controlados. En la mayoría de estas aplicaciones, los rectificadores se alimentan directamente desde la fuente de alimentación principal de electricidad, sin transformador de 60 Hz, frecuencia utilizada en la red eléctrica para la mayoría de países de América. El hecho de que se evitara este

costoso y voluminoso transformador de 60 Hz, es importante en la mayoría de los sistemas modernos de electrónica de potencia [4].

2.1.5. PWM

La modulación de anchura de pulso PWM (*pulse width modulation*) es una forma de codificar la información que utiliza, para ello, pulsos de anchura variable; es decir, en lugar de una señal que expresa la información a través de su amplitud (variaciones de tensión), se utilizan pulsos de amplitud fija cuya anchura (la duración de los pulsos) es variable, proporcional al valor de la señal en cada momento [19].

Un método para controlar el voltaje de salida es que se emplea la conmutación con una frecuencia constante (por ende, un periodo de conmutación constante $T_s = t_{enc} + t_{apag}$) y el ajuste de la duración de encendido del interruptor para controlar el voltaje medio de salida. En este método, llamado conmutación por modulación de anchura de pulsos (PWM), la relación de trabajo del interruptor D , que se define como la proporción de la duración de encendido con el periodo de conmutación, es variada [4].

2.1.6. Filtrado

Un filtro es un circuito que se diseña para dejar pasar señales con frecuencias deseadas y rechazar o atenuar otras [15]. Los diversos dispositivos en los que los circuitos RC y RL encuentran aplicación incluyen el filtrado en fuentes de potencia de CC [15]. En una fuente de poder conmutada los filtros son utilizados tanto en la etapa de filtrado de la entrada como en la etapa de filtrado de la salida. Las fuentes conmutadas por lo general tienen tres etapas de filtrado las cuales son llamadas de entrada, EMI y salida.

Filtro entrada: En una fuente de alimentación según [20], el filtro es el encargado de transformar la tensión rectificada en un nivel continuo, que normalmente tiene una cierta cantidad de rizado. La utilización de un filtro a la salida del circuito rectificador hace que la tensión sobre la carga deje de ser pulsante y pase a ser constante. Se dice generalmente así porque casi siempre queda un rizado residual que puede ser mayor o menor en función de los valores de los componentes que forman el filtro.

Filtro EMI o EMC (compatibilidad electromagnética): Un filtro EMI es un dispositivo que se basa en la combinación de un inductor, un resistor y capacitores que crean

una topología de filtro que puede suprimir una banda de frecuencias de las señales en un circuito. Pueden ser pequeños dispositivos de montaje de superficial adecuados para bajar la potencia, el suministro y los circuitos de línea de señal. También pueden ser módulos más grandes compuestos por componentes de mayor potencia para aplicaciones como suministro de energía de CA. Estos filtros se utilizan comúnmente para evitar problemas electromagnéticos de la red eléctrica, y a su vez evitar emitir interferencias a través de ésta. Es decir, que el equipo quede aislado del resto en lo que se refiere a ruido electromagnético [21].

Filtro salida: Según [22] para suprimir el fuerte voltaje de rizado generado por las altas frecuencias de conmutación, se requerirá una red de filtrado en el secundario del transformador posterior a la rectificación. El filtro puede ser una red L-C, doble L-C o un simple capacitor y esto dependerá del nivel de voltaje de rizado que se requiera en la tensión de salida del convertidor.

2.1.7. Optoacopladores

En las fuentes de alimentación conmutadas, los optoacopladores, o, más precisamente, los elementos de aislamiento y acoplamiento optoelectrónicos, a menudo se utilizan para transmitir información desde los circuitos de salida secundarios a los circuitos de control primarios de entrada sin comprometer el aislamiento galvánico entre los dos [5].

Un optoacoplador proporciona un enlace óptico entre un lado primario, generalmente conectado a la red eléctrica, y un lado secundario aislado del primario por razones obvias de seguridad. El enlace se realiza a través de la luz emitida por un LED (fotones), apuntando a la base de un transistor bipolar que recogerá los fotones [23].

Según [24] los optoacopladores son un método efectivo y de bajo costo para aislar señales. El tipo más común de componente de aislamiento que se usa hoy en día es el optoacoplador. El aislamiento óptico hace uso de un diodo emisor de luz (LED) y un fototransistor para transmitir información a través de una barrera de aislamiento. En su forma más básica, un El LED del optoacoplador simplemente transforma una corriente de entrada en una señal óptica que es detectada por el fototransistor y transformada nuevamente en una corriente de salida.

2.1.8. PCB y planos de potencia

Una tarjeta de circuito impreso o PCB, es un dispositivo compuesto por trazas de material conductor laminado sobre una base no conductiva o material dieléctrico. La tarjeta se usa para realizar interconexiones entre los componentes pero presenta muchas ventajas sobre tarjetas de prototipo, como una superficie para montar los componentes, conexiones fijas, mayor inmunidad a ruido, menor probabilidad de fallas, entre otras [25].

En los circuitos impresos es posible identificar trayectorias que portan corrientes con comportamientos pulsantes, sobre picos y componentes de alta frecuencia, estas características contribuyen en gran medida con la EMI, y es indispensable que el diseñador de PCB preste atención a los lazos que transportan estas corrientes; por lo tanto es apropiado que estos sean los primeros caminos que se incorporen al diseño del impreso. En segundo lugar deben ser dispuestas las trayectorias que conducen las señales de control [26].

Las tierras dentro de un circuito de potencia se deben considerar por separado, teniendo en cuenta los lazos de alta corriente discutidos anteriormente. Las referencias son especialmente importantes debido a que representan los retornos de corriente, así como el punto de potencial con respecto al cual se referencian el resto de las señales. Estas constan de componentes CC y CA, las cuales son conducidas entre varios puntos del sistema de tierras físico. Hay secciones del sistema de tierra que se deben considerar por separado una de otra. Si estas tierras se interconectan incorrectamente, el circuito conmutado de potencia puede llegar a ser inestable [26].

2.2. Topologías prácticas para fuentes de alimentación

Las fuentes de alimentación de CC reguladas son necesarias para la mayoría de los sistemas electrónicos analógicos y digitales. En su mayor parte, las fuentes de alimentación están diseñadas para cumplir con algunos o todos los requisitos siguientes:

- **Salida regulada.** La tensión de salida se debe mantener constante dentro de una tolerancia especificada para cambios dentro de un rango especificado en la tensión de entrada y la carga de salida.
- **Aislamiento.** Es posible que se requiera que la salida esté eléctricamente aislada de la entrada.
- **Salidas múltiples.** Puede haber salidas múltiples (positivas y negativas) con distintas tensiones y corrientes nominales. Estas salidas se pueden aislar entre

sí.

Además de estos requisitos, las metas comunes son la reducción del tamaño y peso, así como la mejora de su eficiencia. Antes se usaban fuentes de alimentación lineales. Sin embargo, los avances en la tecnología de semiconductores permitieron fuentes de alimentación de conmutación más pequeñas y mucho más eficaces respecto de las fuentes de alimentación lineales. La comparación de costos entre fuentes de alimentación lineales y de conmutación depende de su potencia nominal.

Flyback es la topología más conocida para fuentes de alimentación aisladas ya que puede suministrar múltiples salidas aisladas con un único transformador y una limitada cantidad de componentes externos. Sin embargo, una fuente de alimentación *Flyback* presenta algunas características que pueden limitar su rendimiento general si no está correctamente optimizado su diseño. Las aplicaciones CD -CD , tanto salida múltiple como salida aislada, pueden necesitar ser implementadas dependiendo de su uso [27].

Según [28] los convertidores *Flyback* se pueden ver en adaptadores CA/CD para electrónica de consumo, teléfono celular y tableta cargadores de baterías, fuentes de alimentación auxiliares, etc.

2.2.1. Aplicaciones

Fuente conmutada con convertidor *Flyback*

La topología *Flyback* es recomendable para aplicaciones en fuentes aisladas *off-line* (Fuera de línea). La fuente *Flyback* tiene bajo número de componentes, una amplia gama de entrada de voltaje, la capacidad del voltaje de salida única o múltiple, tensión de salida puede ser mayor o menor que el voltaje de entrada, y la capacidad para proporcionar voltajes positivos y negativos [14]. Existen dos modos distintos de operación en la topología *Flyback*, dependiendo del valor de la corriente secundaria. Si la corriente secundaria decae a cero en o antes del tiempo final de conmutación, se está operando en el DCM. Si la corriente secundaria es mayor que cero en el final del tiempo de apagado, se está operando en el CCM [14].

Operación en Modo de Conducción Discontinuo (DCM). En una fuente de alimentación que opera en el modo discontinuo, el controlador ajustará el ciclo de trabajo del conmutador principal para suministrar suficiente energía a la carga para mantener la tensión de salida deseada. El ciclo de trabajo está en función tanto de la tensión de entrada y la carga de salida [14].

Operación en Modo de Conducción Continuo (CCM). Mientras la fuente de alimentación está funcionando en el modo continuo, no existe una dependencia directa de la tensión de salida en la carga de salida. Para un primer orden, el ciclo de trabajo de la fuente se mantendrá constante a medida que cambia la carga, y el valor inicial de la forma de onda de corriente primaria va a cambiar [14].

El CCM en un *Flyback* se puede explicar en función de la densidad de flujo y no en función de las corrientes del inductor. El transformador *Flyback* se comporta como un inductor acoplado. Los devanados primarios transportan corriente durante el período *ON* y el devanado secundario durante el período *OFF*; por lo tanto, el inductor tiene intervalos de corriente cero. Se dice que un convertidor *Flyback* está funcionando en CCM si la densidad de flujo del núcleo no llega a cero. es decir, la densidad de flujo aumenta cuando el interruptor está en *ON* y disminuye cuando está en *OFF*, pero no disminuye a cero; antes de eso, el interruptor se vuelve a conectar. [29]

Fuente conmutada con convertidor *Flyback* de dos transistores.

Un convertidor *Flyback* de dos interruptores convierte un voltaje de entrada en una salida más alta o más baja, positiva o negativa Nivel de voltaje. La energía se transfiere a la salida cuando los FET no están conduciendo [2]. En la figura 2.6 se puede observar el diagrama de una fuente conmutada con convertidor *Flyback* de dos transistores.

En esta versión de dos transistores de un convertidor *Flyback*, Q1 y Q2 se encienden y apagan en forma simultánea. La ventaja de esta topología respecto de un convertidor *Flyback* de un solo transistor, como ya vimos, es que el voltaje nominal de los interruptores es la mitad de la versión de un solo transistor. Además, como existe una ruta de corriente a través de los diodos conectados al devanado primario, no se necesita un amortiguador disipador a través del devanado primario para disipar la energía asociada a la inductancia de dispersión del devanado primario del transformador [4].

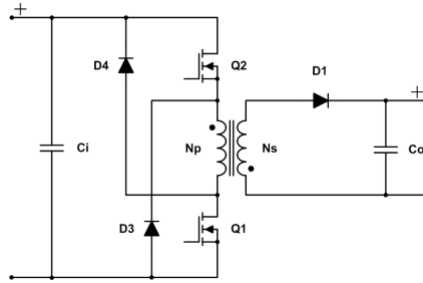


Figura 2.6: Diagrama de convertidor *Flyback* dos transistores. [2]

Fuente conmutada con convertidores *Flyback* en paralelo.

Para altos niveles de potencia puede ser beneficioso poner dos o más convertidores *Flyback* en paralelo en lugar de una sola unidad de potencia más grande. Algunas ventajas de la colocación en paralelo, que no se limitan al convertidor *Flyback*, son a) que proporciona una mayor confiabilidad del sistema debido a la redundancia; b) que incrementa la frecuencia de conmutación efectiva y por ende reduce las pulsaciones de corriente en la entrada y/o salida, y c) que permite que los módulos de baja potencia puedan estar estandarizados, y se pueden colocar más en paralelo para proporcionar una mayor capacidad [4]. En la figura 2.7 se puede observar el diagrama de una fuente conmutada con convertidores *Flyback* en paralelo.

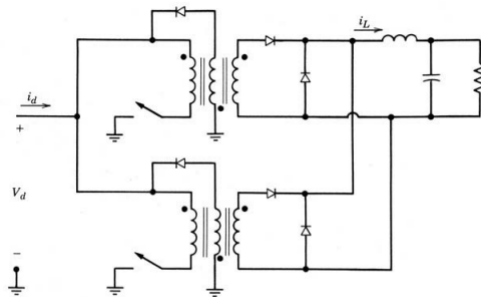


Figura 2.7: Diagrama de convertidor *Flyback* en paralelo. [4]

Fuentes de alimentación con modo de conmutación *Flyback* de salidas múltiples

La unidad *Flyback* combina las acciones de un transformador de aislamiento, un inductor de salida y un diodo volante con un solo transformador. Como resultado de esta integración magnética, el circuito proporciona salidas de CC estabilizadas extremadamente rentables y eficientes [5]. La técnica es particularmente útil para aplicaciones de múltiples salidas, donde se requieren varias salidas semiestabilizadas de un

solo suministro. La principal desventaja es que fluyen altas corrientes de ondulación en el transformador y los componentes de salida, lo que reduce su eficiencia. Como resultado de esta limitación, el convertidor *Flyback* suele estar restringido a niveles de potencia inferiores a 150 W [5]. En la figura 2.8 se puede observar el diagrama de una fuentes de alimentación con modo de conmutación *flyback* de salidas múltiples.

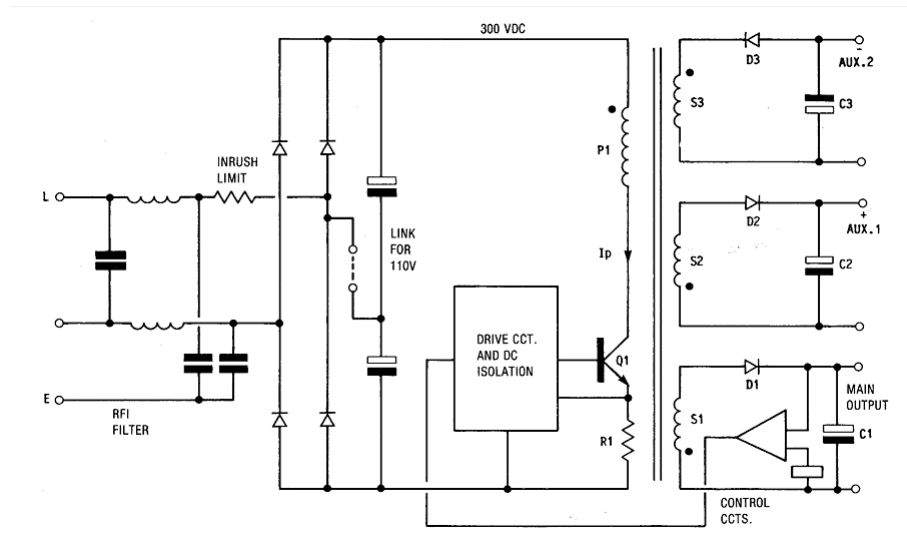


Figura 2.8: Diagrama Fuente de alimentación con modo de conmutación *Flyback* de salidas múltiples [5]

2.2.2. Síntesis del capítulo

Las fuentes de poder conmutadas (*Switching Power Supplies*) son componentes esenciales en la electrónica moderna, utilizadas en una amplia gama de aplicaciones, desde dispositivos electrónicos portátiles hasta sistemas industriales de gran relevancia. Estas fuentes se diferencian de las fuentes de poder lineales en su capacidad para ofrecer una mayor eficiencia energética y una mayor versatilidad en términos de diseño [29].

Las fuentes de poder conmutadas funcionan convirtiendo la energía eléctrica de una forma a otra mediante la conmutación de componentes activos, como transistores, a alta frecuencia. Estos dispositivos permiten una regulación precisa de la tensión de salida, un mejor rendimiento y una mayor eficiencia en comparación con las fuentes de poder lineales tradicionales.

Entre las distintas topologías de fuentes de poder conmutadas, la topología *Flyback* se destaca como una opción ideal cuando se requieren múltiples salidas. A

continuación, se analizan las razones clave detrás de esta elección:

- **Aislamiento:** Los convertidores CC-CC se pueden clasificar en aislados y no aislados. El convertidor *Flyback* es una de las topologías simples en convertidores aislados [30]. La topología *Flyback* ofrece un aislamiento galvánico entre la entrada y la salida, lo que resulta crucial en aplicaciones donde la seguridad eléctrica es primordial, como en equipos médicos, sistemas de comunicaciones y electrónica de potencia. Esto evita que los problemas en una salida afecten a otras, proporcionando un entorno eléctrico seguro.
- **Múltiples Salidas:** El convertidor *Flyback* se puede diseñar para obtener una salida única o múltiples salidas [31]. Esta característica distintiva de la topología *Flyback* de generar múltiples salidas a partir de una sola etapa de conversión es especialmente útil en aplicaciones que requieren distintas tensiones de salida, como una fuente de alimentación que suministra voltajes para un microcontrolador, una pantalla LCD y otros componentes en un dispositivo electrónico, como es el caso del propósito de este proyecto, el cual requiere múltiples salidas para alimentar un sistema de monitoreo.
- **Sencillez de Diseño:** La topología *Flyback* es relativamente sencilla de diseñar y económica en comparación con algunas alternativas, como las topologías *forward*, *half bridge* y *full bridge* [31]. Esto la hace atractiva para aplicaciones de costos ajustados sin comprometer la calidad y el rendimiento.
- **Alto Rendimiento:** Aunque no siempre es la topología más eficiente en términos de conversión de energía, la topología *Flyback* sigue siendo eficiente en comparación con las fuentes de poder lineales. Además, las mejoras en la tecnología de conmutación han permitido reducir las pérdidas de energía y aumentar la eficiencia de las fuentes *Flyback*.

En resumen, las fuentes de poder conmutadas son fundamentales en la electrónica moderna debido a su eficiencia y versatilidad. La topología *Flyback* destaca como una elección óptima cuando se requieren múltiples salidas, gracias a su aislamiento, simplicidad de diseño y eficiencia. Esto la convierte en una opción atractiva para una amplia gama de aplicaciones electrónicas que buscan un rendimiento óptimo y una gestión eficiente de la energía. Por lo que la topología *Flyback* es de gran importancia y una buena opción para el desarrollo de este proyecto.

Capítulo 3

Desarrollo de la solución

3.1. Planteamiento de la Solución

3.1.1. Enfoque de la solución

Este proyecto se enfoca en el desarrollo de un sistema que pueda alimentar energéticamente un sistema de monitoreo y análisis de variables eléctricas para la identificación oportuna de las anomalías más comunes que reducen la eficiencia de los paneles solares, estos paneles de SESLab se encuentran instalados en la sede San Carlos del Tecnológico de Costa Rica. Para el desarrollo del proyecto se realiza una investigación para la búsqueda de un diseño de fuente de poder apropiado que se adapte a las necesidades del sistema de monitoreo. El Laboratorio de SESLab realizó un estudio por parte de los miembros del laboratorio para determinar las causas del problema inicial, con lo que se dedujo que el problema se debía a las tierras, las cuales debían aislarse, por lo que esto ayudará a establecer qué tipo de fuente a implementar y su aislamiento.

3.1.2. Solución seleccionada:

Fuente de alimentación conmutada aislada: debido a los elementos que la componen este modo de operación permite una disipación de potencia más baja, estas fuentes son menos pesadas que las no conmutadas, pero tienen la desventaja de que son más complejas y ruidosas. Sin embargo en estas fuentes los elementos de conmutación (transistores de potencia o MOSFET) operan como interruptores: completamente apagados o encendidos. Al evitar su operación en su región activa se logra una reducción significativa de pérdidas de potencia. Esto permite una mayor eficiencia de energía en el rango de 70 a 90 %. Además se utiliza un transistor que trabaja en el modo de encendido/apagado, de esta forma se tiene una capacidad de manejo

de mayor potencia en comparación con su modo lineal. Se usa un transformador de aislamiento de alta frecuencia (en comparación con un transformador de 50 o 60 Hz en una fuente de alimentación lineal), por lo que el tamaño y peso de las fuentes son mucho menores [4].

Para la selección de la solución se emplea el método de *Pugh*, este método compara cada concepto relativo a un concepto de referencia o *datum* y para cada criterio determina si el concepto en cuestión es mejor, más pobre o casi igual que el concepto de referencia. Por tanto, es una técnica de comparación relativa [32]. Para la selección de la solución se utilizó una matriz de *Pugh* para analizar 3 posibles soluciones con la ayuda de 4 criterios importantes, donde sus pesos van de 1 a 5 en el cual la escala del peso va desde 1 como el criterio menos importante y 5 el más importante.

Los criterios que se tomaron para elegir la solución son:

- **Costo:** el costo de la solución es de suma importancia en el caso de este proyecto, ya que el laboratorio actualmente no cuenta con muchos recursos económicos y está en busca de fuentes de financiamiento, por lo que se cuenta con un presupuesto limitado y se debe tomar en consideración el costo para la selección de una solución que se adapte a el presupuesto.
- **Aislamiento:** este es el segundo criterio de mayor peso porque en el proyecto requiere que la fuente de alimentación sea de tierras aisladas, para resolver el problema que se presenta entre los canales.
- **Consumo de energía:** es importante que la fuente de alimentación eléctrica del sistema tenga un consumo bajo, para evitar sobrecalentamientos y se permita el correcto funcionamiento de todo el sistema de medición.
- **Complejidad:** la complejidad es otro criterio importante, ya que el tiempo del proyecto es reducido, por esta razón, se debe considerar la logística, la compra de elementos fuera del país, en este último aspecto hay que considerar el tiempo en que tardan los elementos en llegar, también se debe considerar la fabricación del PCB que dependiendo de la implementación, en caso que este requiera de varias capas. Si el proyecto se vuelve complejo, se aumenta la posibilidad de no concluir a tiempo el proyecto.

Solución Elegida: Fuente de alimentación conmutada aislada. Se elige esta opción porque a pesar de ser un diseño que genera más ruido por utilizar transformadores de alta frecuencia y es más compleja su implementación, es mejor en la parte de

Criterio	Peso	Fuente para cada modulo	Fuente conmutada aislada	Fuente no conmutada aislada
Aislamiento	7	Datum	1	0
Costo	5		0	-1
Complejidad implementación	3		-1	1
Consumo de energía	1		1	-1
Score		0	5	-5
Solución elegida:		Fuente conmutada aislada		
Escala de pesos:				
1-Menos importante				
5-Más importante				
Comparativa:				
1:Mejor				
0:Igual				
-1:Peor				

Cuadro 3.1: Matriz de Pugh

aislamiento, lo cual es de suma importancia en este proyecto para corregir los problemas eléctricos que se presentan en la parte de alimentación del sistema de monitoreo.

Diagrama de bloques de solución elegida

En la figura 3.1 se puede observar el diagrama de bloques de la solución elegida, la cual consta de 6 bloques, la primera parte es el filtro EMI el cual ayuda con problemas de ruido e interferencia de entrada causados principalmente por la red eléctrica. En el segundo bloque tenemos el rectificador y filtro de entrada, el cual rectifica y filtra la señal CA de entrada, luego se muestra el bloque con contiene el convertidor en CD, el cual ayudara a transformar la señal de entrada a las salidas de alimentación deseadas. También se tiene un bloque de retroalimentación para poder controlar y sensar las salidas de alimentación para que se encuentren en el nivel deseado. Por ultimo se muestra el bloque de Rectificación y filtrado de salida, que ayuda a rectificar y regular las salidas de alimentación para luego alimentar el sistema de monitoreo. Más adelante se muestra más detallado este diagrama.

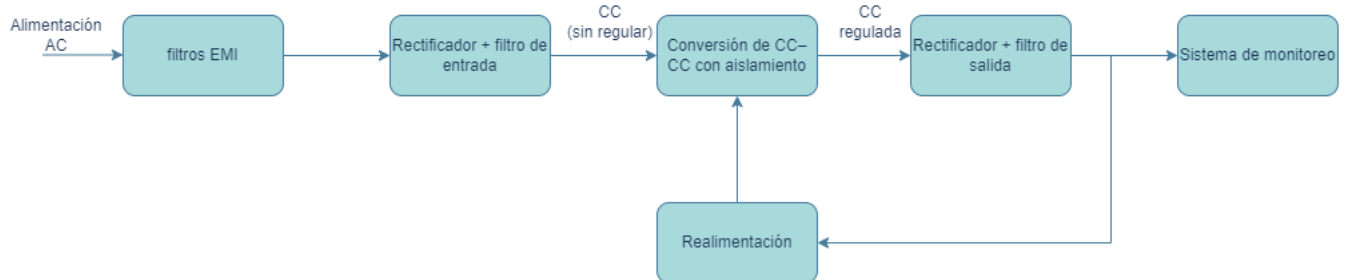


Figura 3.1: Diagrama de bloques de solución elegida

Basados en el diagrama presentado, se utiliza este como base para realizar una diseño que contemple los requerimientos que fueron planteados de peso. Posteriormente, en la próxima sección, se detalla exhaustivamente cada bloque del diagrama, proporcionando una descripción más completa y precisa de la solución diseñada.

3.2. Diseño de la solución

3.2.1. Descripción de las alternativas del proyecto

Es esta sección se presentan las alternativas de solución, y la evaluación que se llevo a cabo para llegar a la solución final.

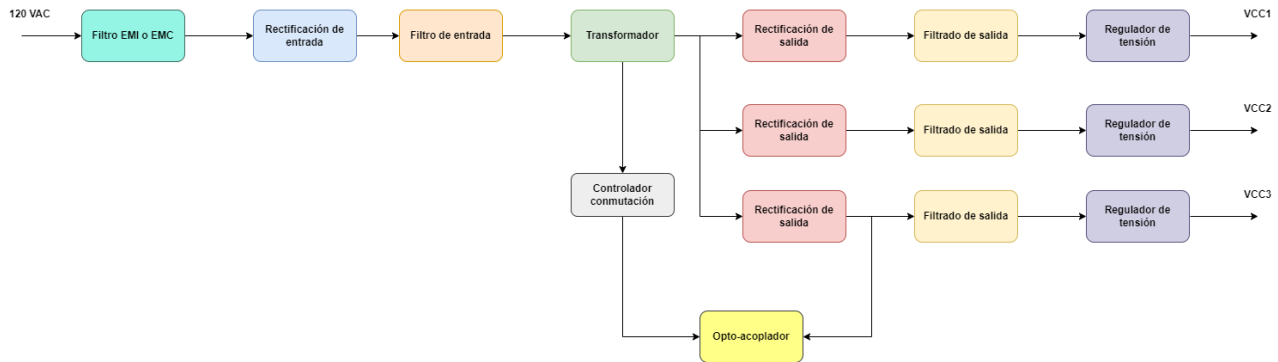


Figura 3.2: Diagrama de propuesta de solución

Etapas de rectificación y filtrado

Para la etapa de la rectificación de la fuente de poder, se desea que cumpla con varias características, como lo es el tamaño y forma de la placa, accesibilidad, características eléctricas, y facilidad para implementar la placa que se va a utilizar. Para poder comprender mejor esta etapa, en la figura 3.3 se puede observar el diagrama de las etapas de rectificación, filtrado y el filtro EMI. El filtro EMI que se observa en la figura 3.3 en color azul, esta formado por un condensador, una bobina de choque y una bobina toroidal. Mientras que la parte de rectificación y filtrado de entrada esta formada por un puente de diodos y un condensador.

En el cuadro 3.2 se muestra la comparación de las características que poseen los componentes que se tienen disponibles, para su adecuada selección.

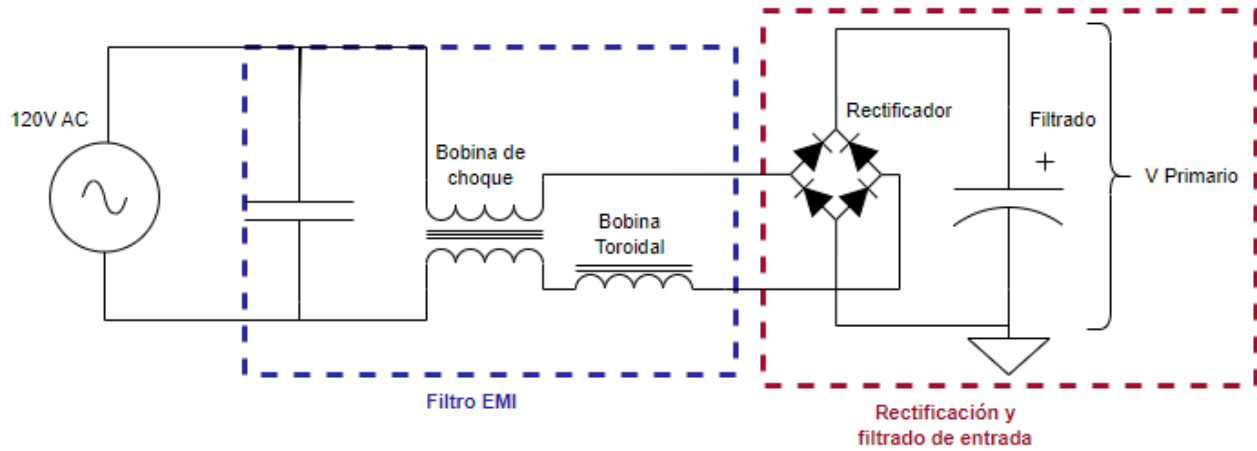


Figura 3.3: Diagrama etapa de rectificación y filtrado

Etapa de rectificación y filtrado		
Componente	Alternativas	Características
Puente rectificador	KBP06G	$V_{m\acute{a}x}=600$ Voltios y $I_{m\acute{a}x}=1.5$ A [33].
Condesadores	R474I310050A1K	$C=0.1\mu F$, $V_{max}=440V$ [34].
	UCS2G470MHD	$C=47\mu F$, $V_{max}=400V$ [35].
Bobina toroidal	7447028	Inductancia: $150\mu H$, $I_{m\acute{a}x}=1$ A y $R=130m\Omega$ [36].
Bobina de choke	744821150	Inductancia= 5 mH, $F_{m\acute{a}x}=10$ kHz y $I_{m\acute{a}x}=1$ A [37].

Cuadro 3.2: Etapa de rectificación y filtrado

Etapas del Controlador, transistor y retroalimentación

Existen muchos tipos de circuitos integrados para el control de fuentes de alimentación conmutada tipo *Flyback*, hay integrados que solo generan el pulso de PWM que requiere el transistor. Sin embargo, existen controladores que tienen integrado el transistor que realiza el corte para que el transformador pueda funcionar correctamente. En la figura 3.4 se observa la etapa del controlador y el lazo de retroalimentación, los cuales están formados por un controlador *Flyback*, un transistor y un optoacoplador. En el cuadro 3.3 se muestra la comparación de las características que poseen los componentes que se tienen disponibles, para su adecuada selección.

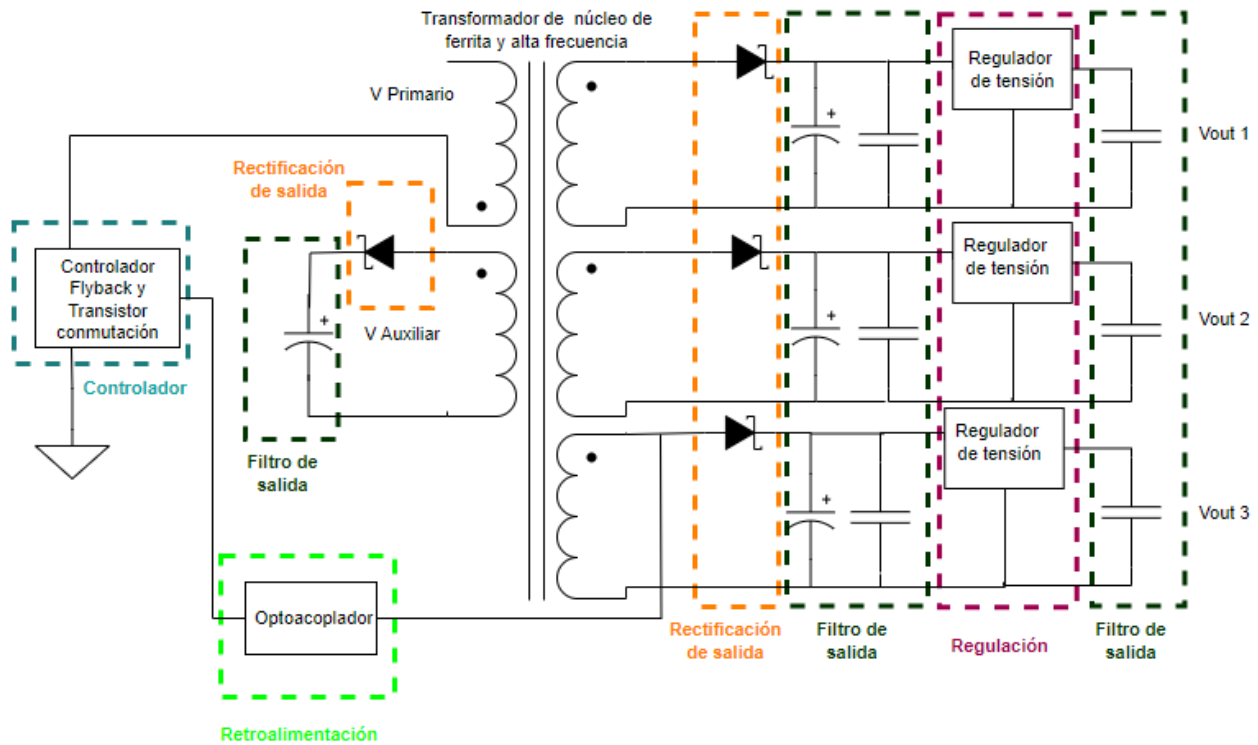


Figura 3.4: Diagrama etapas propuesta solución

Etapa de controlador y retroalimentación		
Componente	Alternativas	Características
Controlador Flyback	UCC28711DR	F _{máx} conmutación= 100 kHz, Modo de conducción discontinua (DCM), no necesita optoacoplador, necesita transistor de conmutación [38].
	FSL146MRBN	F _{máx} conmutación: 73kHz, P _{máx} = 17 W, necesita optoacoplador, no necesita transistor de conmutación, transistor integrado [39].
	TNY267	F _{máx} conmutación= 132kHz, P _{máx} =12 W, no necesita transistor, necesita optoacoplador, operación DCM [40].
Transistor	TK12A60D	MOSFET de canal N, V _{máx} =600 V, I _{máx} = 12A, P _{máx} =45W [41].
Optoacoplador	VO618A	Baja capacitancia de acoplamiento, tensión de aislamiento=5300 VRMS. [42].

Cuadro 3.3: Etapa de controlador y retroalimentación

Etapas del Transformador, Reguladores tensión, Rectificación y filtrado de salida

En la figura 3.4 se pueden observar las etapas del Transformador, Reguladores tensión, Rectificación y filtrado de salida. En la etapa del transformador se utiliza un transformador de núcleo de ferrita capaz de operar en altas frecuencias, estos transformadores son utilizados en fuentes conmutadas en topologías de convertidores de tipo *flyback*; para regular la tensión de los secundarios del transformador se utilizan reguladores de tensión. Para la rectificación en las salidas del secundario, se utiliza

un diodo y para el filtrado unos condensadores. En el cuadro 3.4 se muestra la comparación de las características que poseen los componentes que se tienen disponibles, para su adecuada selección.

Etapas de transformador, regulador, rectificación y filtrado de salida		
Componente	Alternativas	Características
Transformador	Transformador 10W (750341526)	Aislamiento:4000 Vrms, F conmutación: 67 kHz. Rango de operación de 60 a 600 voltios, Tensiones: 15V y 9 V. Corriente: 0.15 A - 0.45 A, P _{máx} =10W. [43].
	Transformador 67W (760871333)	Aislamiento: 4000 Vrms, F conmutación: 130 kHz. Primario de 125 a 385 V, Tensiones: 15 V, Corriente:50mA - 1.875 A, P _{máx} =67W [44].
	Transformador 17W (750318302)	Aislamiento: 3000 Vrms, F Conmutación: 70 kHz a 130kHz, P _{máx} = 17W. Primario de 120 a 375 voltios, Tensiones: 15 V, 16.7 V. Corriente:50 mA a 1 A [45].
Reguladores de tensión	LM7805	Regulador de voltaje lineal Positivo Fijo, Corriente: 1.5A [46].
	TLV76050	Regulador de voltaje lineal Positivo fijo, Corriente: 100 mA [47].
Filtrado de salida	860080375014	C=10 μ F, V _{máx} = 50V, tipo Cerámico [48].
	EEU-FC1C470	C= 47 μ F, V _{max} = 16 V, tipo electrolítico [49].
Rectificación de salida	1N4003-T	V _{máx} = 200 V y I _{máx} = 1 Amperio [50].
	SB1H100-E3/73	Diodo schottky, V _{máx} =100 V, I _{máx} = 1 A, alta velocidad [51].

Cuadro 3.4: Etapas de transformador, regulador, rectificación y filtrado de salida

3.2.2. Simulación

El propósito de realizar la simulación es evaluar el concepto del transformador *Flyback* y corroborar que la topología elegida tiene los resultados esperados. Ya al obtener los resultados esperados, poder armar el circuito en prototipo para realizar las pruebas de su funcionamiento.

Para la simulación del prototipo de la fuente de poder se utiliza el programa *LTPice*, donde se prueba el funcionamiento de los transformadores propuestos, y del circuito en general. Para la simulación se utilizaron diferentes esquemáticos y distintos diseños donde se probaron cada uno y se evaluó su funcionalidad, tanto por etapas como todo el diseño completo con todas sus partes integradas.

Primero se realizó la simulación por etapas, algunas de estas son: filtro de entrada con rectificación de entrada, controlador PWM con transformador, rectificación de salida con filtrado de salida. Luego se realizó una integración de la parte de filtrado, rectificación, transformador, controlador conmutación, filtrado de salida, rectificación de salida, regulación de salida.

Para lograr la simulación con éxito, se consideró al transformador como bobinas acopladas, para la parte del controlador se utilizó un generador de funciones que

genera los pulsos PWM para que el transistor haga la conmutación, tal y como se muestra en la figura 3.5. Al hacer la simulación se gráfica señales de las tensiones en la etapa de ratificación de salida de cada bobina en la lado del secundario, donde se obtuvieron señales desde lo 5V hasta las 12V, tal y como se muestra en la figura 3.6. En la imagen 3.6 se observa una transiente por un leve tiempo al inicio de la salida 1, esto es debido al tipo de regulador que se utilizo para la simulación, este dura un tiempo determinado para la respuesta, por lo que se genera una deformación en la señal por un leve tiempo y luego se regula, eliminando las ondulaciones en la señal.

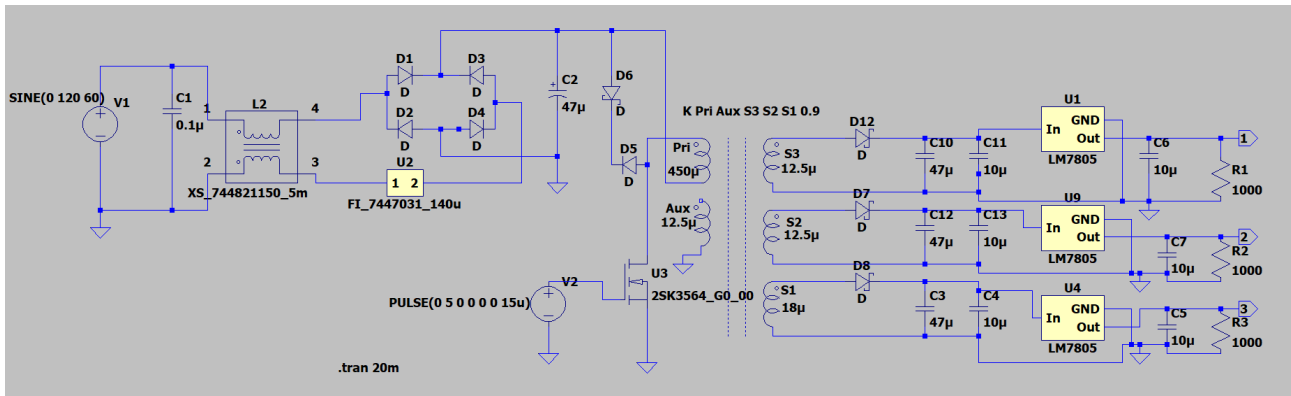


Figura 3.5: Esquemático de simulación en LTSpice

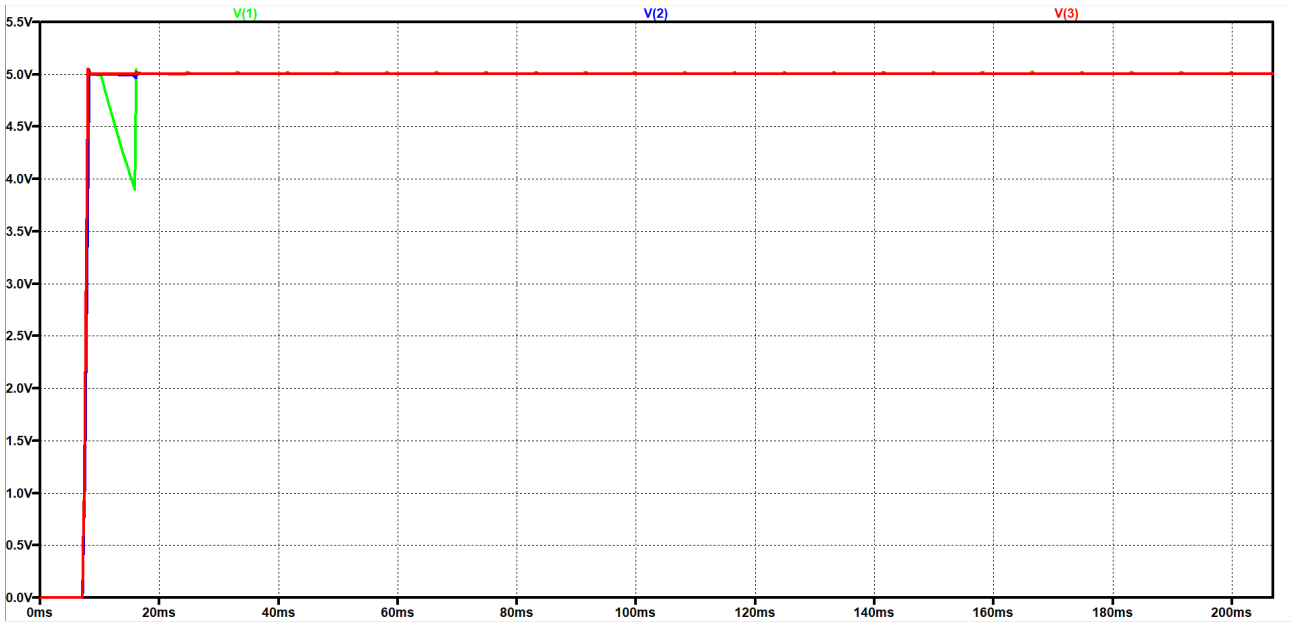


Figura 3.6: Tensiones en salidas de simulación en LTSpice

3.2.3. Prototipo

Esquemáticos de prototipos

Para el diseño del esquemático de la solución se utilizó el programa *Eagle*, este esquemático funciona de guía para poder realizar distintas pruebas en prototipos y lograr elegir un diseño correcto y funcional. Se realizaron varias versiones para los diferentes tipos de controlador y transformadores, pero con las elecciones de los componentes se llegó a uno final.

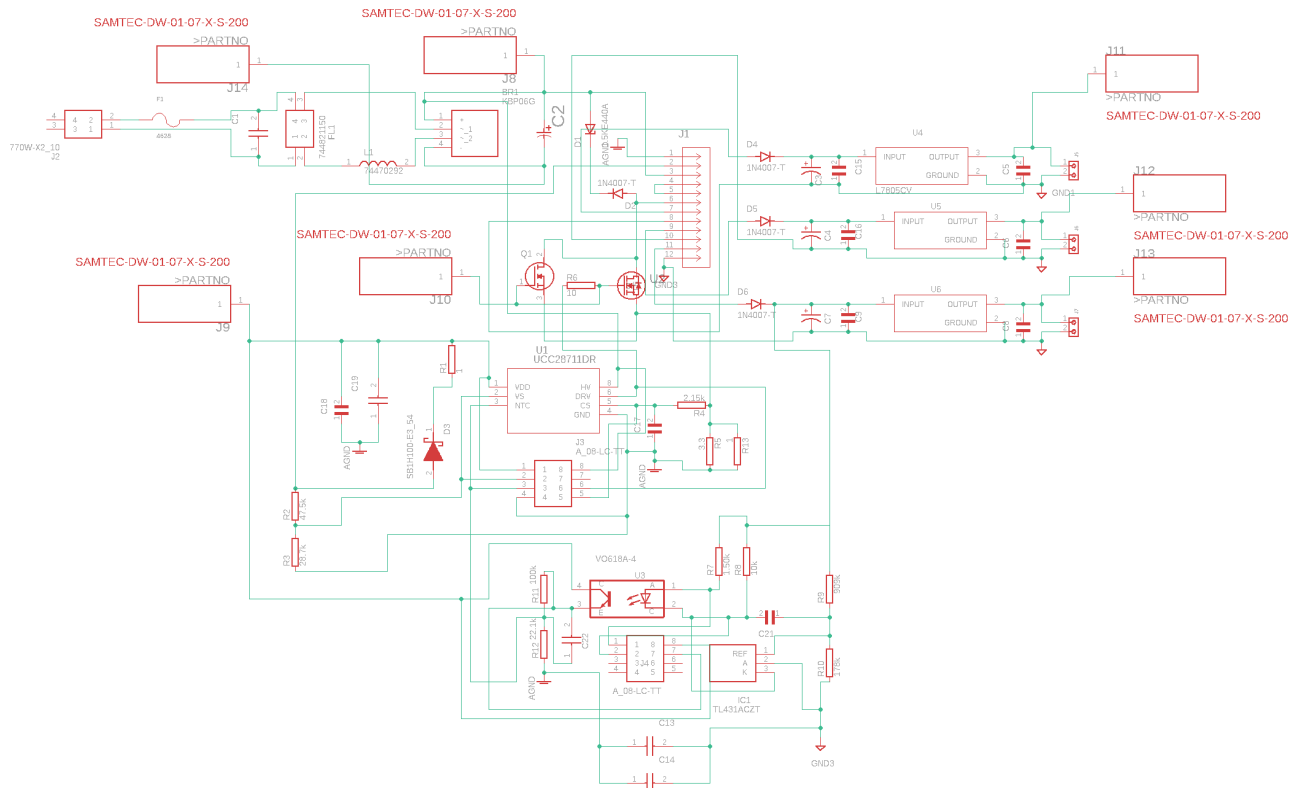


Figura 3.7: Primer diseño del esquemático hecho en Eagle para diseño PCB

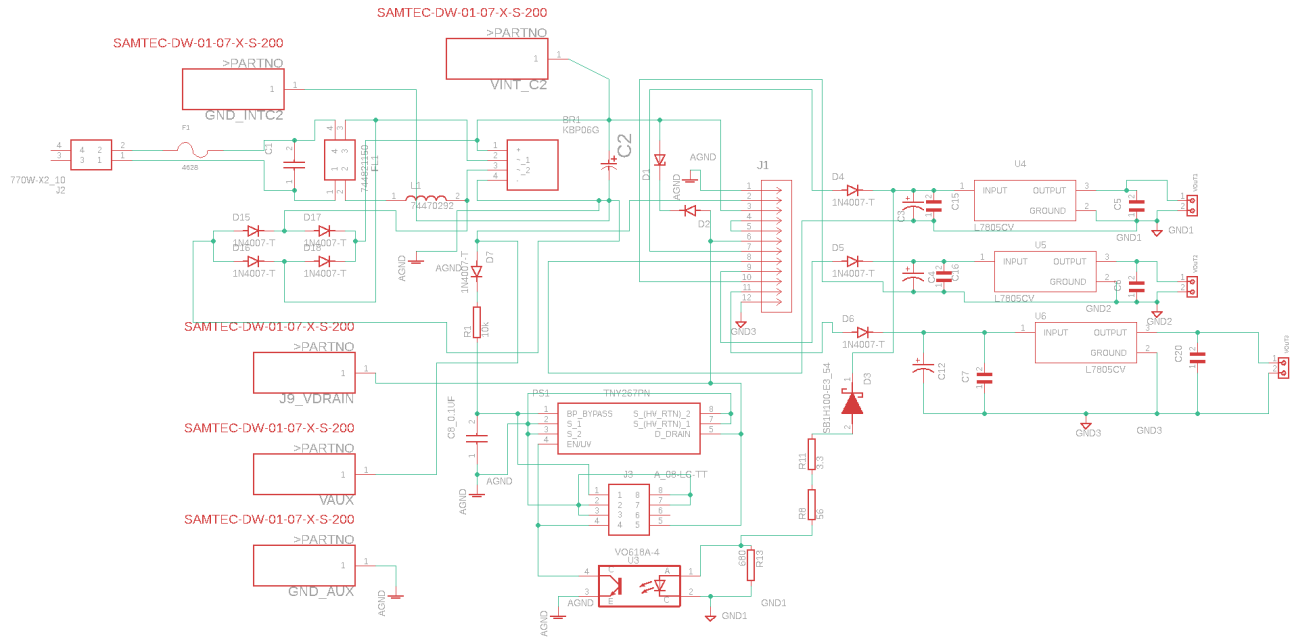


Figura 3.8: Segundo diseño del esquemático hecho en Eagle para diseño PCB

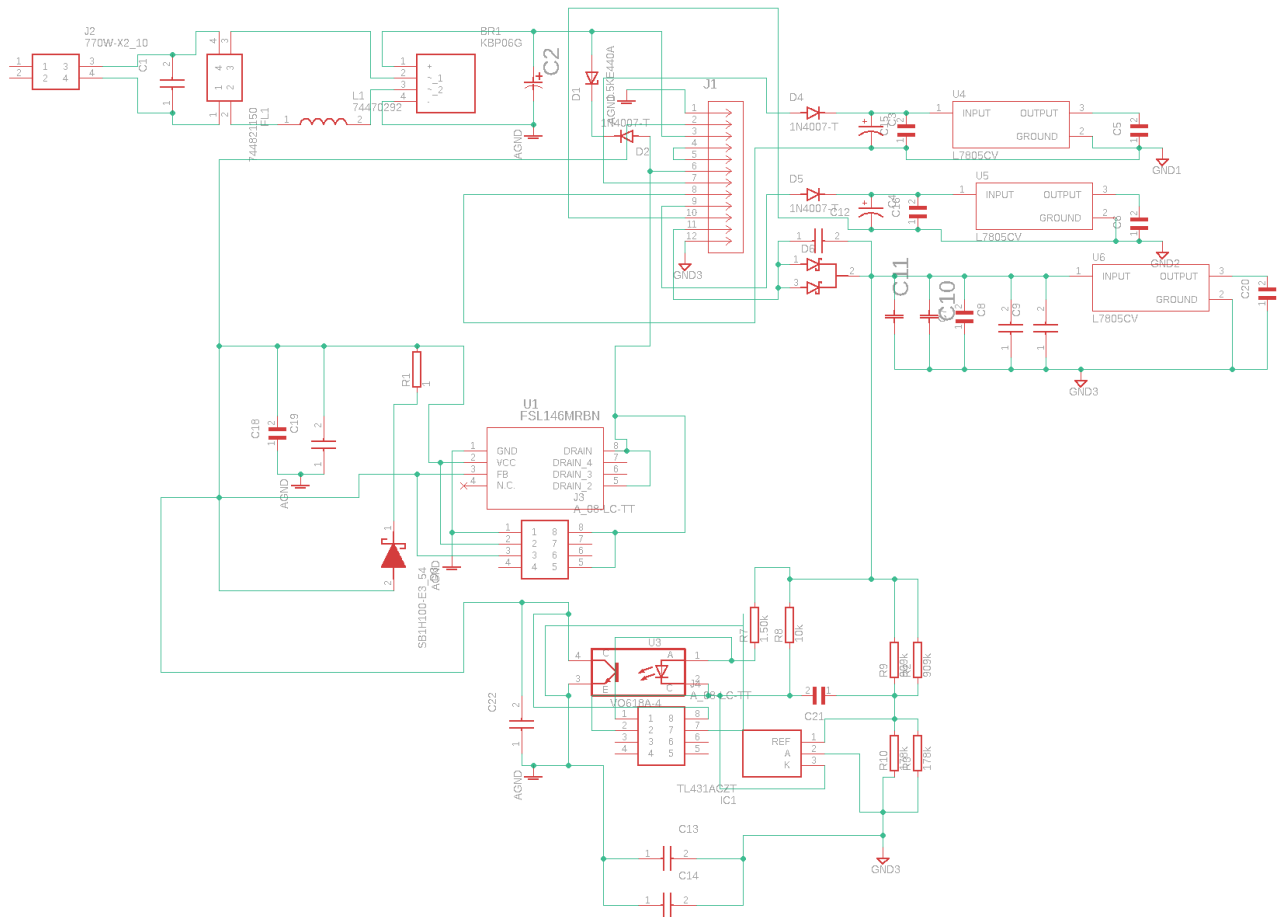


Figura 3.9: Tercer diseño del esquemático hecho en Eagle para diseño PCB

En el primer esquemático de la figura 3.7 se consideró puntos de prueba, fusible de protección, conectores de entrada y salida. Además en este diseño solo se consideran 3 salidas de tensión, esto debido a que se quiere primero hacer pruebas con este diseño para luego hacer una replica con las 6 fases que se desean en el proyecto. A demás se puede notar que en este primer diseño se utiliza el controlador UCC28711DR y un transistor para el control de la parte de conmutación.

Por otro lado el segundo diseño del esquemático de la figura 3.8, muestra otro diseño donde se utiliza el controlador TNY267P, el cual ya tiene un transistor integrado, por lo que ya no se necesita el transistor para la conmutación y se eliminan algunos componentes adicionales aparte del transistor.

También se tiene el tercer diseño del esquemático de la figura 3.9, muestra otro diseño donde se utiliza el controlador FSL146M, el cual ya tiene un transistor integrado, por lo que ya no se necesita el transistor para la conmutación y se eliminan algunos componentes adicionales aparte del transistor.

Iteraciones de pruebas con distintos controladores y transformadores

Para el desarrollo de prototipo para realizar pruebas en el diseño propuesto, primero se realizaron pruebas en una protoboard, luego se realizo un prototipo en placas perforadas. Se realizaron primero pruebas en la parte de filtro y rectificación de entrada, luego se hicieron pruebas aparte con el transformador y un generador de funciones, por ultimo se realiza una integración de todas las partes en las placas perforadas para realizar pruebas de funcionamiento y mediciones de corriente y tensión.

Se hicieron pruebas aparte a los transformadores 67W (760871333) y 17W (750318302), con un generador de funciones conectado al transistor y una fuente de poder de 30 voltios. Para corroborar su correcto funcionamiento y medir las tensiones que puede generar a su salida. En la tablas 3.5 y 3.6 se muestran los resultados de las pruebas realizadas a los dos transformadores, en estas se puede ver como al aumentar la frecuencia las tensiones a la salida de los secundarios disminuye.

Transformador 67W					
Entrada	Frecuencia kHz	Sec1(4-5) V	Sec2(9-6) V	Sec3(10-7) V	Sec4(11-8) V
	50	19,2	14,4	14,4	12
30V	55	19,6	14,8	15,2	12,8
	60	18,4	14	14	11,6
	65	18	14	14	11,6
	70	17,6	13,6	13,6	11,2
	75	16	12,8	12,8	10,4
	80	15,2	11,6	12	9,6

Cuadro 3.5: Mediciones en prototipo transformador 67W

Transformador 17W					
Entrada	Frecuencia kHz	Sec1(1-2) V	Sec2(7-8) V	Sec3(9-10) V	Sec4(11-12) V
	50	18,4	16	16	14,4
30V	55	18	15,6	15,6	14
	60	16,8	14,4	14,4	13,2
	65	15,2	13,2	13,2	12
	70	14	12	12	10
	75	12,8	11,2	11,2	10
	80	12,8	11,2	11,2	10

Cuadro 3.6: Mediciones en prototipo transformador 17W

Iteración 1 pruebas con el controlador UCC28711DR En el primer diseño al realizar las pruebas con el controlador UCC28711DR, se tuvieron problemas con este integrado

debido a que no respondió como se esperaba. No generó la señal de PWM correctamente por lo que hubieron problemas de calentamiento con el transistor debido a una corriente elevada y a una incorrecta o nula conmutación. Por lo que el transformador no logro funcionar correctamente, debido a que no se presentaron mediciones de corriente o tensión en los secundarios, además de esto hubieron sobre corrientes debido al mal funcionamiento de la conmutación y se quemaron varios componentes como el transistor y un fusible de protección. Por lo que después de varios intentos y pruebas, se llego a la conclusión que este controlador no es idóneo para el diseño del proyecto.

Iteración 2 pruebas con el controlador FSL146M Para el segundo diseño al realizar las pruebas con el controlador FSL146M, sin embargo el transformador no genera las tensiones a la salida como se espera, ya que el controlador no realiza la conmutación con la velocidad necesaria. Lo que provoca que las tensiones a la salida varíen y no se mantengan constante el nivel de tensión requerido. Debido a estas fallas se llega a la conclusión que este controlador no es ideal para el diseño de este proyecto.

Iteración 3 pruebas con el controlador TNY267P Para el segundo diseño al realizar las pruebas con el controlador TNY267P, la fuente funciona correctamente, los dos transformadores 17W y 10W elegidos para pruebas por su tamaño, ya que son más pequeño que el 67W, generan las tensiones deseadas a la salida, la conmutación se realiza correctamente a aproximadamente 72kHz, la cual es la frecuencia de operación de los transformadores.

Para realizar estas pruebas se utiliza la configuración recomendada por el fabricante que se observa en la figura 3.10 y los prototipos armados para realizar las pruebas con los dos transformadores se muestran en las figuras 3.11 y 3.12. Además se realizan mediciones de tensión y de corriente en las salidas ya rectificadas del transformador, como se muestra en los cuadros 3.7 y 3.2.3. Ambos transformadores funcionan bien con el controlador TNY267P, sin embargo el transformador de 17W es el más idóneo, debido a que los niveles de las tensiones de salidas son más estables y las 3 son del mismo valor. Estos resultados demuestran que el controlador se adapta bien a estos transformadores.

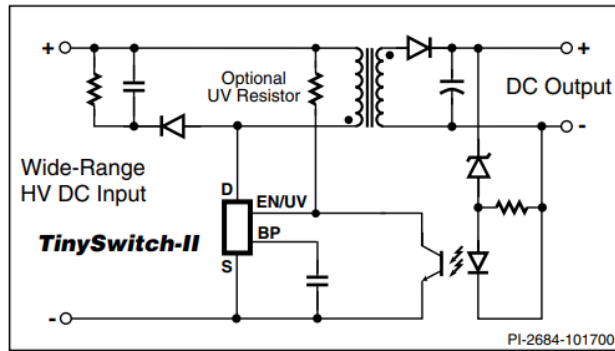


Figura 3.10: Diagrama recomendado por fabricante del controlador

Transformador 17W		
Devanados	Tensión (V)	Corriente (mA)
Salida (7-8)	10.9	3.07
Salida (9-10)	10.32	3.06
Salida (11-12)	8.59	3.06
Aux (1-2)	12.06	3.05

Cuadro 3.7: Mediciones en prototipo con controlador TNY267 y transformador 17W

Transformador 10W		
Devanados	Tensión (V)	Corriente (mA)
Salida (7-8)	22	3.062
Salida (10-11)	21.7	3.034
Salida (13-14)	11.3	3.063
Aux (5-6)	20	3.05

Cuadro 3.8: Mediciones en prototipo con controlador TNY267 y transformador 10W

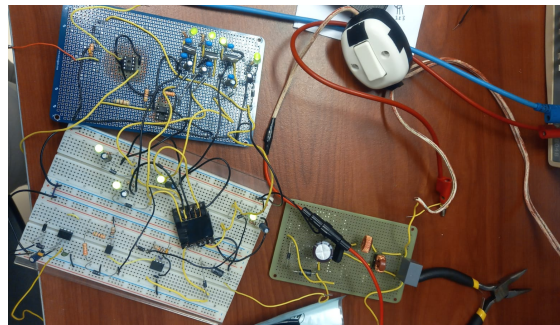


Figura 3.11: Prototipo de segundo diseño con transformador 17W armado en protoboard

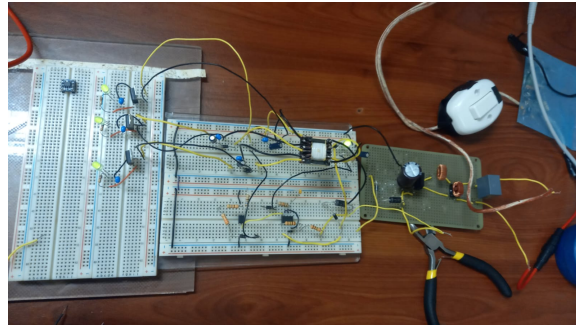


Figura 3.12: Prototipo de segundo diseño con transformador 10W armado en protoboard

3.2.4. Selección de componentes

Como solución al problema para diseñar el prototipo, luego de plantear varias alternativas de solución en tres diferentes iteraciones, se elige la alternativa de la iteración 3 mostrado en la sección 3.2.3, la cual se considera como la más adecuada y funcional. Esto porque se demuestra con los resultados anteriormente obtenidos, esta cumple con los requerimientos deseados del proyecto para proseguir con el armado del prototipo y posteriormente realizar pruebas al prototipo real. Algo importante a considerar es el espacio, tamaño y cantidad de componentes, así como el precio de estos y por supuesto su funcionalidad en las pruebas para el diseño.

Lista de componentes a utilizar en primer PCB

Para que la fuente funcione correctamente se logra considerando circunstancias de funcionamiento como que el prototipo no produzca calentamientos, que los niveles de tensión a la salida sean los adecuados y que se mantenga estable. Luego de realizar pruebas y llegar a los componentes con los cuales se logra que el diseño de la fuente conmutada funcione de la forma deseada para la aplicación del proyecto, se crea una lista de componentes para la implementación de la fuente conmutada en un PCB, la cual se puede observar en la tabla 3.9.

Lista de componentes para primer prototipo en PCB		
Cantidad	Descripción	Número Parte
1	Transformador	750318302
1	Bobina toroidal	7447028
1	Bobina choque	744821150
1	Condensador 0.1uF	R474I310050A1K
1	Puente Rectificador	KBP06G
1	Condensador 47uF	UCS2G470MHD
1	Diodo TVS	1.5KE440A
1	Diodo	1N4007-T
1	Controlador de conmutación para topología Flyback	TNY267PN
1	Optoacoplador	VO618A
1	Resistencia de 3.3 Ohmios	1/2 W
1	Resistencia de 56 Ohmios	1/2 W
1	Resistencia de 680 Ohmios	1/2 W
1	Resistencia de 10k Ohmios	1/2 W
5	Diodo schottky	SB1H100
1	Capacitor ceramico 0.1uF	K104Z15Y5VE5TL2
4	Condensador Electrolitico 47uF	EEU-FC1C470
6	Condensador 10uF	FG20X7S1H106KRT06
3	Regulador de tensión	L7805CV
1	Conector AC 120V	770W-X2/10
1	PortaFusible	5TT 3-R
3	Conector bloque de tornillo	691214310002
4	Conector puntos prueba	DW-01-07-T-S-200

Cuadro 3.9: Lista de componentes para primer prototipo en PCB

Además de los componentes mencionados en la lista anterior, se agregaron componentes para protección como un fusible y un interruptor.

3.2.5. Esquemáticos para diseño de PCB

En la figura 3.13 se puede observar el esquemático propuesto para el primer prototipo de la fuente conmutada para la fabricación del PCB.

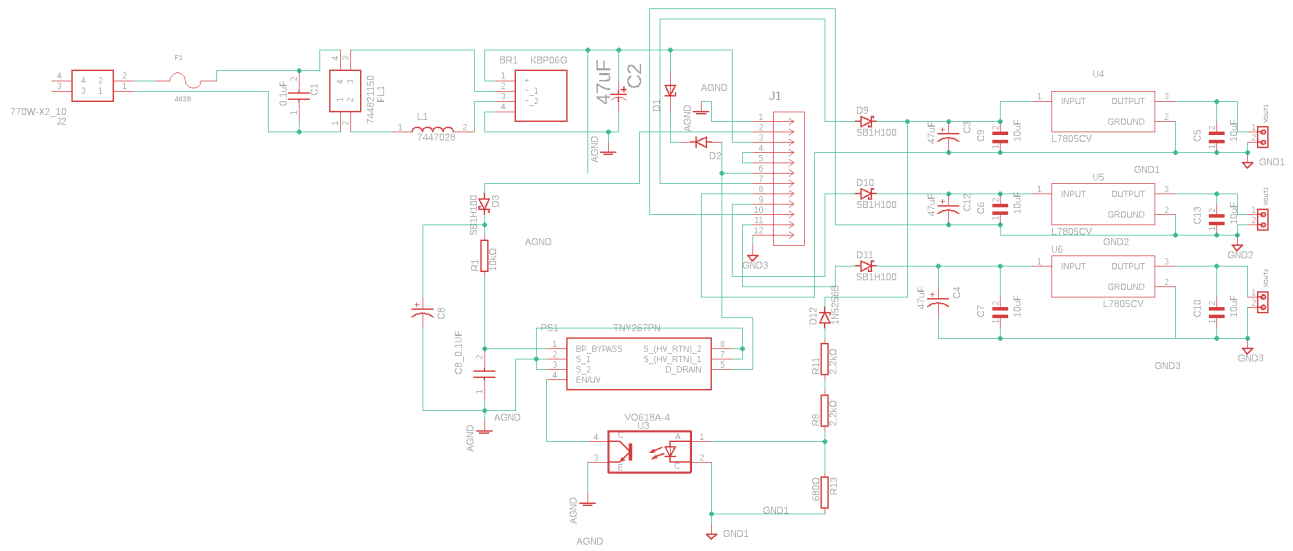


Figura 3.13: Esquemático propuesto hecho en Eagle para PCB versión 1

Capítulo 4

Implementación

En este capítulo se abordará el proceso de implementación de todas las etapas del proyecto, como lo son rectificación y filtro de entrada, transformador, controlador, opto acoplador y rectificación de salida y filtro de salida.

En el proceso de implementación primero se realizó el diseño del PCB para realizar las pruebas con el sistema de monitoreo y corroborar el funcionamiento de todo el sistema integrado.

4.1. Iteraciones de propuestas para fabricación de PCB

En esta sección se muestra las dos iteraciones de los diseños para la fabricación de PCB, se tuvieron que fabricar 2 PCB porque el primer diseño presento problemas. Estos problemas se corrigieron y se implementó el diseño del segundo PCB.

4.1.1. Iteración 1 primer diseño de fabricación para PCB

En el primer diseño del PCB, se fabrica en el laboratorio de PCBs, este tiene un tamaño de 100x100mm, se agregan algunas correcciones necesarias para su fabricación, como grosor de las pistas, ángulos y errores. En este diseño solo se tomo en cuenta tres fases o tres salidas; el objetivo de este prototipo corroborar la funcionalidad correcta de la fuente conmutada con las 3 salidas de alimentación y que el sistema a alimentar funciona correctamente. A razón de que el tamaño de fabricación del PCB en el laboratorio de PCBs es limitado, y al replicar el diseño del PCB, este aumenta de tamaño, se espera finalizar el diseño de las 6 salidas de alimentación más adelante. Se realizó la corrección en el diseño del PCB, como la adición de planos, esto se pueden observar en las figuras A.2 y A.3, que se adjuntan en la parte de apéndices.

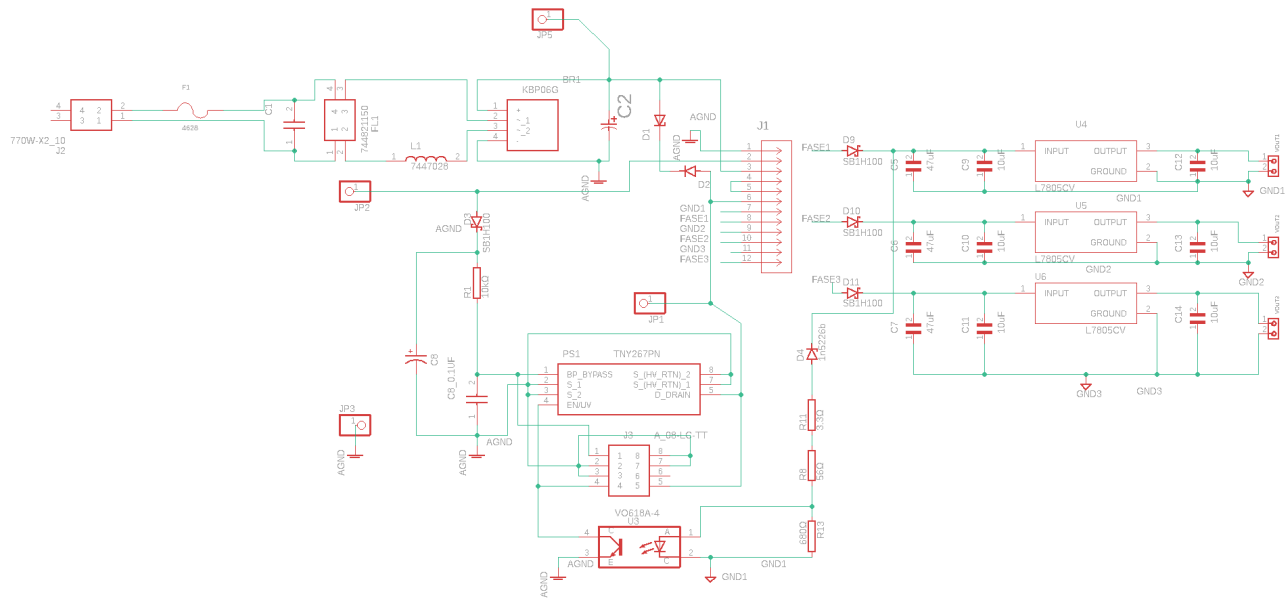


Figura 4.1: Esquemático Primer diseño del PCB fabricado



Figura 4.2: Foto de primer PCB fabricada

El diseño finalizado del primer PCB se presenta en la figura 4.2. Después de su montaje, se procedió a realizar pruebas en la placa, revelando inconvenientes relacionados con el calentamiento. Tras llevar a cabo diversas mediciones y revisiones en el PCB, se identificó que la raíz del problema residía en la inversión de las patillas del secundario del transformador con respecto al símbolo en la librería del *footprint* descargada para el software *Eagle*. Esta discrepancia provocó que las bobinas del secundario quedaran con polaridad inversa, generando un flujo de corriente invertido y, como consecuencia, un calentamiento anormal en el transformador. En la figura

4.3 se muestra como la numeración del *footprint* del transformador en la parte del secundario es inversa al diagrama de la hoja de datos del transformador.

Además, se indica con una línea roja y azul como los pines 7 y 12 están en una posición invertida. Esto hace que las bobinas tengan la polaridad invertida; en el diagrama de la hoja de datos del transformador 17W, se puede notar que el pin 7 es el lado positivo de una de las bobinas secundarias y el pin 12 por el contrario es el lado negativo de una de las bobinas secundarias, lo cual provoca que todas las bobinas secundarias inviertan su polaridad, esto provocó un error en el esquemático del PCB y generó problemas de calentamiento en este.

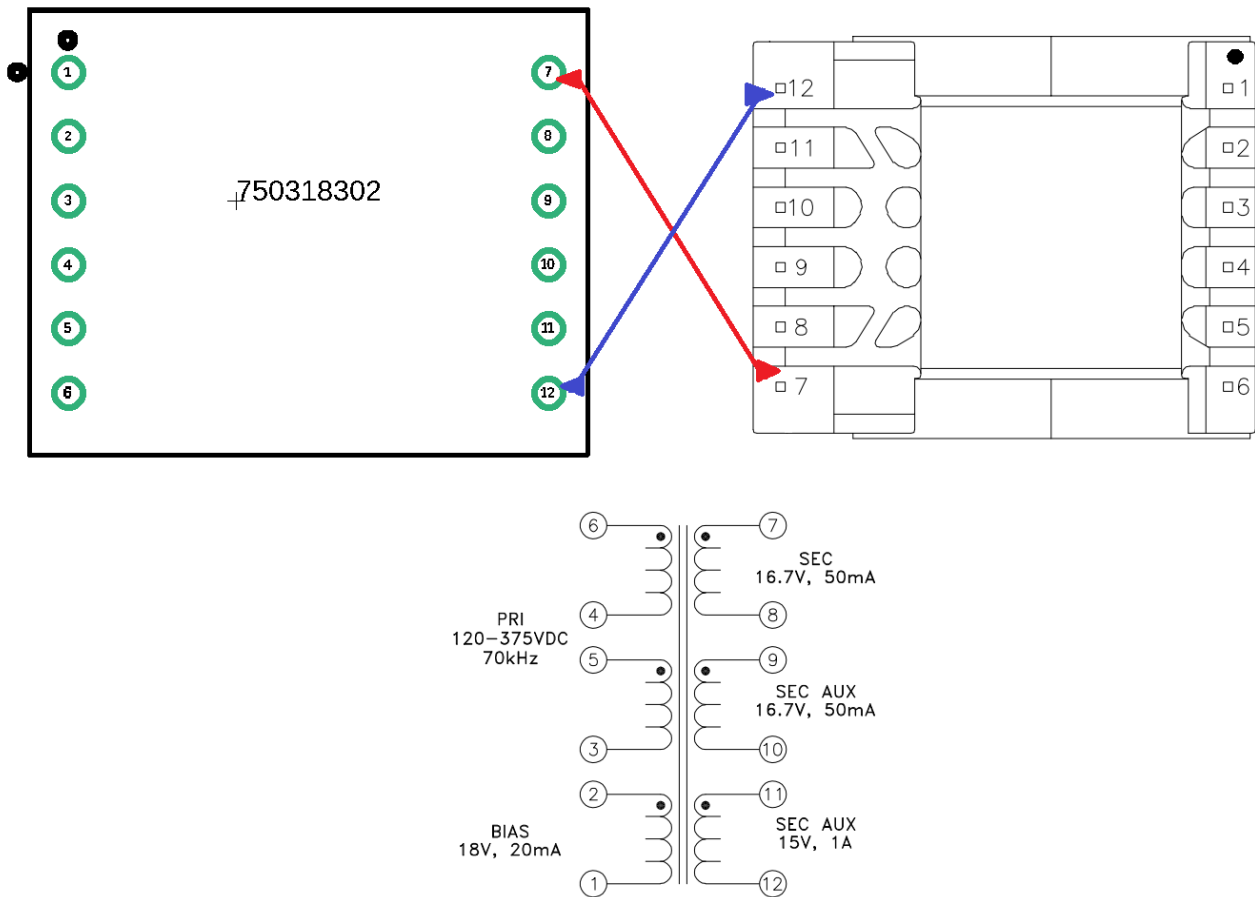


Figura 4.3: Diagrama de transformador y el *Footprint* descargado para *Eagle*

4.1.2. Iteración 2 segundo diseño de fabricación para PCB con correcciones

Luego de encontrar el error en el primer diseño del PCB, se procedió a corregir el error en las conexiones del transformador en el esquemático visto en la figura 4.4. Ya con la corrección en el esquemático se fabrica la segunda versión del PCB. Adicional a la corrección, se agregan otros componentes como un interruptor a la entrada de la fuente y un diodo led como símbolo del encendido de la fuente conmutada. Además se agregaron 2 resistencias a el controlador, estas resistencias son de detección de sobrevoltaje, y para evitar fallas por apagado de la fuente de alimentación.

En la tabla 4.1 se documentan los componentes agregados a la lista de componentes y además de esto su precio estimado. Este precio es un valor aproximado, estos valores no toman en cuenta otros costos como lo son los costos de envío e impuestos, en el caso de los componentes que se compran fuera del país. Esta es la lista de componentes finales para la fuente conmutada para 3 salidas de alimentación.

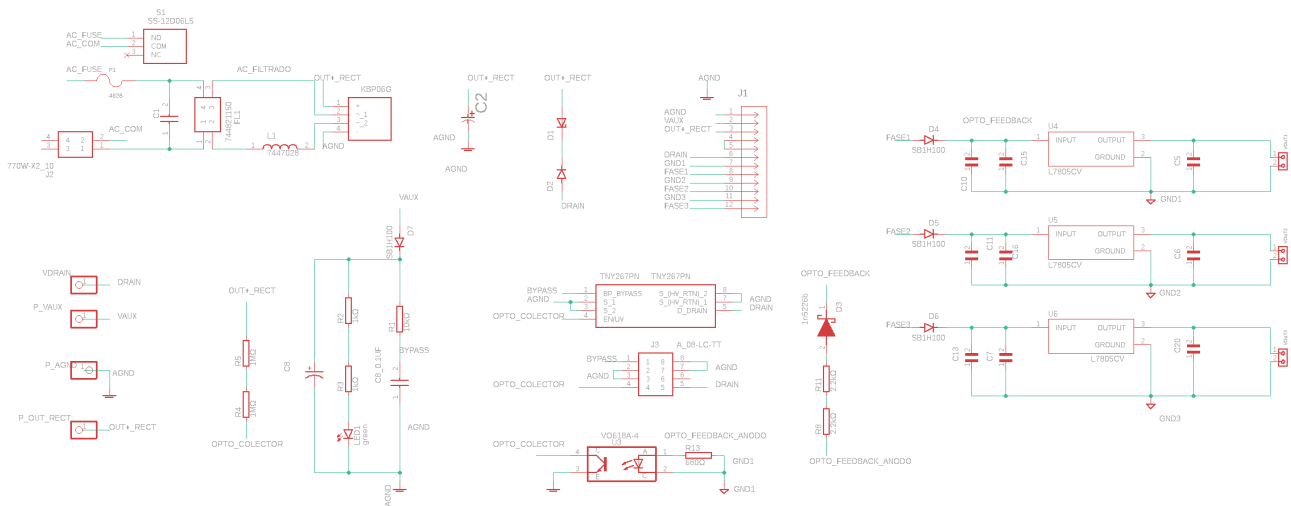


Figura 4.4: Esquemático Segundo diseño del PCB fabricado

Lista de componentes para segundo prototipo en PCB				
Cantidad	Descripción	Número Parte	Precio estimado por unidad	Subtotal
1	Transformador	750318302	€4500	€4500
1	Bobina toroidal	7447028	€1500	€1500
1	Bobina choque	744821150	€2500	€2500
1	Condensador 0.1uF	R474I310050A1K	€500	€500
1	Puente Rectificador	KBP06G	€500	€500
1	Condensador 47uF	UCS2G470MHD	€1500	€1500
1	Diodo TVS	1.5KE440A	€500	€500
1	Diodo	1N4007-T	€300	€300
1	Controlador de conmutación para topología Flyback	TNY267PN	€1000	€1000
1	Optoacoplador	VO618A	€500	€500
1	Resistencia de 2.2k Ohmios	1/2 W	€300	€300
1	Resistencia de 2.2k Ohmios	1/2 W	€300	€300
1	Resistencia de 680 Ohmios	1/2 W	€300	€300
1	Resistencia de 10k Ohmios	1/2 W	€300	€300
2	Resistencias de 1k Ohmios	1/2 W	€300	€600
4	Diodo schottky	SB1H100	€300	€1200
1	Diodo Zener	1n5226b	€500	€500
1	Capacitor ceramico 0.1uF	K104Z15Y5VE5TL2	€300	€300
4	Condensador Electroлитico 47uF	EEU-FC1C470	€300	€1200
6	Condensador 10uF	FG20X7S1H106KRT06	€300	€1800
3	Regulador de tensión	L7805CV	€700	€2100
1	Conector AC 120V	770W-X2/10	€1000	€1000
1	PortaFusible	5TT 3-R	€500	€500
3	Conector bloque de tornillo	6,9121E+11	€400	€1200
4	Conector puntos prueba	DW-01-07-T-S-200	€100	€400
1	Interruptor deslizante SPDT	SS12D06	€500	€500
1	Diodo led	Verde	€250	€250
			Total:	€26050

Cuadro 4.1: Lista de componentes para segundo prototipo en PCB

En la figura 4.5 se muestra la imagen del segundo PCB fabricado y armado con correcciones, su tamaño es de 100x100 mm.



Figura 4.5: Foto de segunda PCB fabricada

4.1.3. Iteración 3 tercer diseño de fabricación para PCB, duplicado de fuente conmutada previsto para el diseño de 6 salidas de alimentación

En esta iteración se diseñó el prototipo de la fuente de poder conmutada, prevista para la alimentación de 6 canales del sistema de monitoreo, el cual actualmente solo cuenta con 3 canales, esto para que en el futuro cuando en el laboratorio de SESLab se diseñe la ampliación de la parte del sistema de monitoreo, se tenga en previsto el diseño para la alimentación de los 6 canales. Por cuestiones de tiempo y capacidad de fabricación en el laboratorio de PCBs del Tecnológico del Costa Rica este prototipo no se logra implementar al cabo de este proyecto. En la figura 4.6 se puede observar el diseño del esquemático de la fuente conmutada duplicada, en esta se utiliza una única rectificación de entrada a partir del condensador de filtrado de entrada se conectan los dos transformadores separadamente, como en la topología de un convertidor *Flyback*, mencionado anteriormente en el capítulo del Marco teórico, no se pueden usar dos transformadores en forma paralela y compartir el mismo control porque implica problemas en la parte de control, ya que solo se podría controlar uno y el otro quedaría fuera de control. Esa configuración de dos transformadores en paralelo se suele utilizar para aumentar la corriente de salida. Por las razones anteriores se duplica el sistemas de control y los dos transformadores se colocan por separado, solo se comparte la parte de rectificación de entrada y filtrado de entrada, además se agregan dos diodos luego del filtrado de entrada uno para cada entrada de

los transformadores, esto para evitar corrientes no deseadas por el desequilibrio de las cargas de los transformadores. De esta manera se permite que los dos transformadores puedan trabajar correctamente por separado pero que puedan compartir la etapa de rectificación y filtrado de entrada.

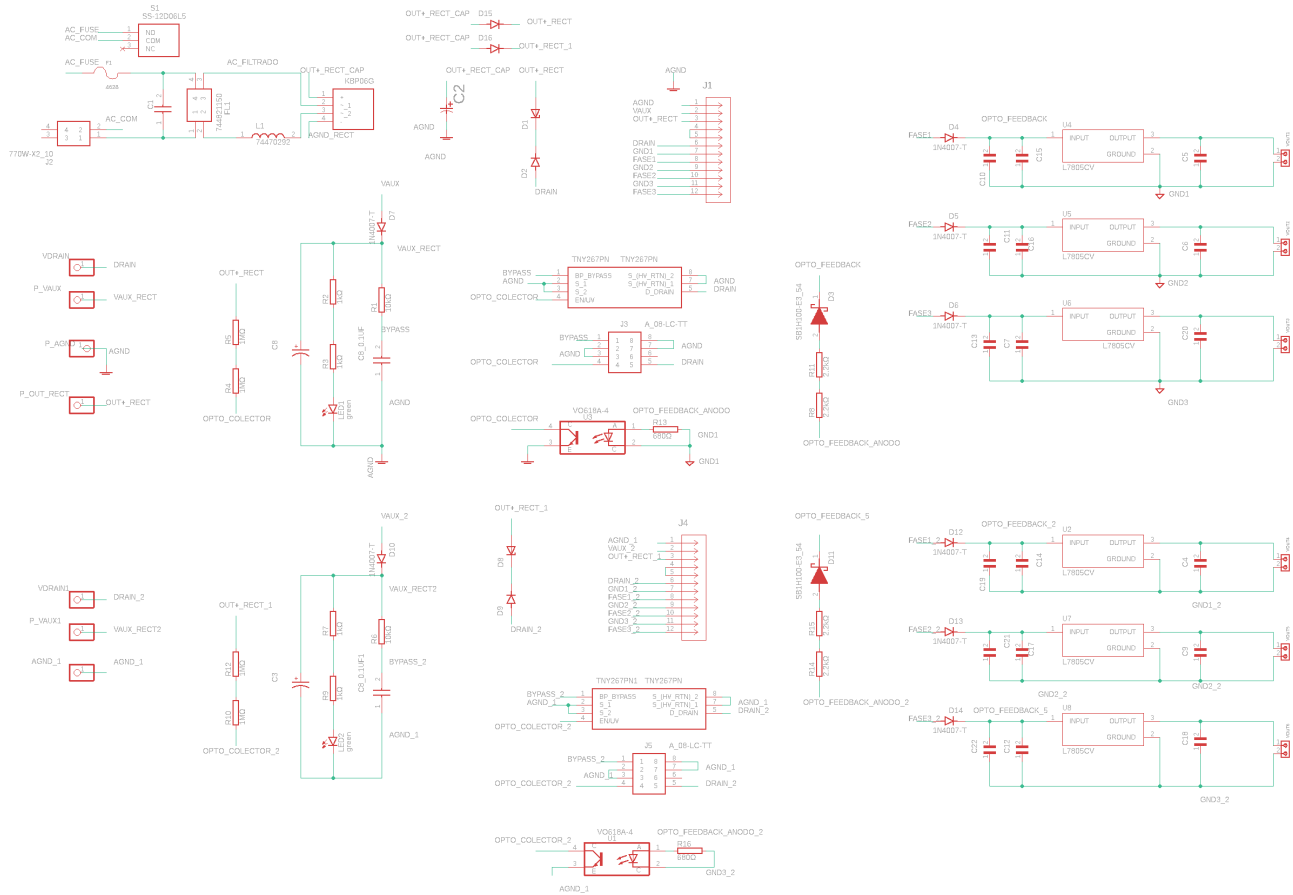


Figura 4.6: Esquemático Tercer diseño del PCB fabricado duplicado

En las figuras 4.7 y 4.8, se presenta el producto final de la fabricación y ensamblaje de la placa de circuito impreso (PCB) destinada a las seis fases de la fuente de alimentación. Además de esto, se ha llevado a cabo la fabricación y ensamblaje de otro PCB con el propósito de expandir el sistema de monitoreo a seis fases de medición, como se ilustra en las figuras 4.9 y 4.11. Estas placas se mandaron a fabricar a china por cuestiones de capacidad y tiempo, ya que el laboratorio de circuitos impresos se encontraba muy saturado y con limitada capacidad para la fabricación de placas más grandes. Estas placas tienen un tamaño de 90x180mm para la fuente de alimentación y 100x180mm para el sistema de monitoreo.

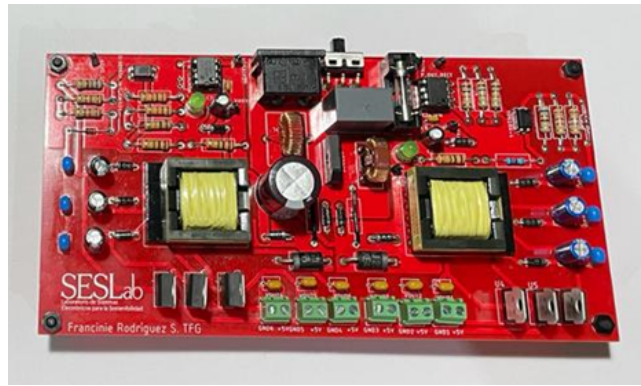


Figura 4.7: PCB fabricado duplicado para 6 fases foto desde arriba

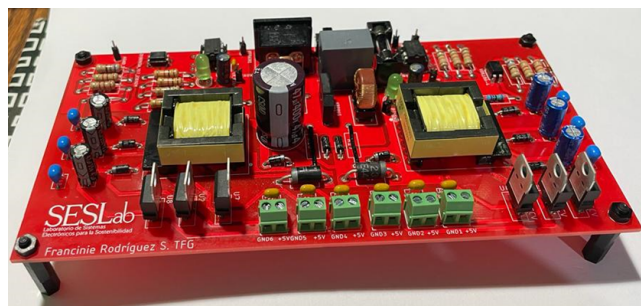


Figura 4.8: PCB fabricado duplicado para 6 fases foto desde lado

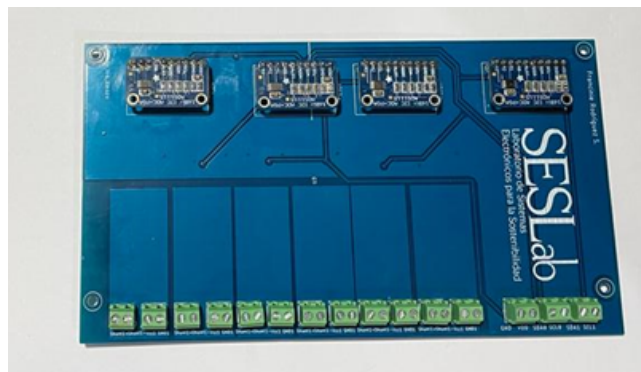


Figura 4.9: PCB fabricado duplicado para 6 fases sistema de monitoreo foto desde arriba

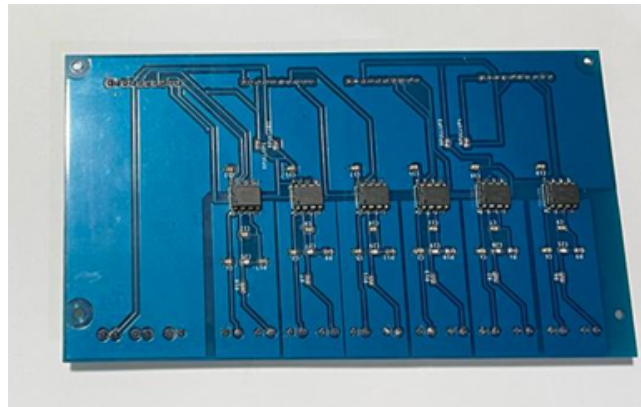


Figura 4.10: PCB fabricado duplicado para 6 fases sistema de monitoreo foto desde abajo

Las dos placas de circuito impreso (PCBs) fabricadas fueron diseñadas para permitir su acoplamiento mutuo. De esta manera, el sistema conformado por la unión de ambas placas PCB se realiza de acuerdo con la representación visual proporcionada en la figura 4.11.

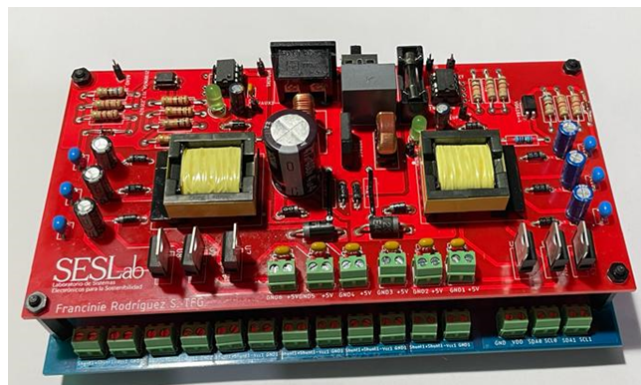


Figura 4.11: PCBs fabricados para 6 fases acoplados

Capítulo 5

Pruebas y Resultados

En este capítulo se abordará el proceso de la implementación final de la fuente conmutada, para la versión de sus tres salidas, y la prueba como fuente de alimentación. También se mostrará el desarrollo de la integración de las dos partes tanto fuente conmutada como el sistema de monitoreo para corroborar el correcto funcionamiento al estar ambos sistemas conectados. Por último, se documentan las pruebas de funcionamiento del diseño final, como lo son mediciones de tensión, corriente y potencia, para corroborar su eficiencia.

5.1. Mediciones de tensión, corriente y potencia

Al tener el prototipo listo, con el PCB fabricado y armado de la fuente de poder conmutada, se procede a conectarla a la red, a realizar mediciones de tensión y corriente para verificar su correcto funcionamiento y probar su capacidad de alimentación energética.

Primero se realiza mediciones a las 3 salidas con carga, se les agrega la misma carga resistiva a las 3 y luego se procede a medir tensiones, corrientes y calcular la potencia, tanto de entrada de la fuente como de salida. En la tabla 5.1 se observan las mediciones obtenidas para la entrada de la fuente de poder, para distintos valores de carga. además con ayuda de un Wattímetro se obtiene el factor de potencia, la tensión, la corriente y la potencia aproximada de entrada.

Factor de potencia	Carga Ω	V_IN (VRMS)	I_IN (mA RMS)	P_IN (mW)
0,29	510	119,40	9,81	339,68
0,36	250	120,10	12,93	559,04
0,43	168	120,20	16,05	829,56
0,48	127	120,00	14,75	849,60
0,48	100	119,70	16,62	954,92

Cuadro 5.1: Tabla de mediciones potencia, tensión y corriente de entrada

En la figura 5.1 se muestra el gráfico de la potencia de entrada en función de la corriente de la tabla 5.1, esto para las 3 salidas con carga.

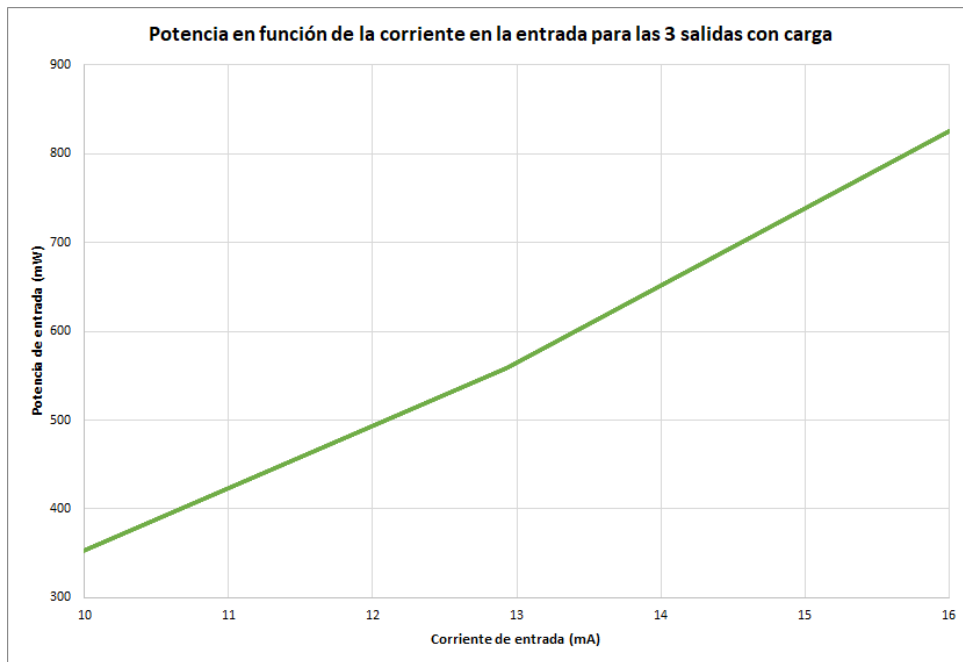


Figura 5.1: Gráfico potencia en función de la corriente de salida de las 3 fases

Luego en los cuadros 5.2, 5.3 y 5.4, se tienen las mediciones de tensión, corriente y el calculo de potencia, que se obtienen en cada una de las salidas de la fuente conmutada. En este se observa como la potencia aumenta conforme va aumentando la corriente.

Vout 1	Iout1 (mA)	Pout1 (mW)
5,04	9,93	50,027
5,04	19,33	97,34
5,03	29,18	146,89
5,04	37,97	191,25
5,29	47,30	250,22

Cuadro 5.2: Tabla de mediciones potencia, tensión y corriente de salida 1

Vout 2	Iout2 (mA)	Pout2 (mW)
4,99	9,82	49,00
4,99	19,76	98,60
4,98	29,34	146,11
4,99	38,18	190,59
4,98	48,20	240,13

Cuadro 5.3: Tabla de mediciones potencia, tensión y corriente de salida 2

Vout 3	Iout3(mA)	Pout3 (mW)
5,04	9,72	48,94
5,04	19,84	99,89
5,03	28,68	144,35
5,04	38,30	192,88
5,04	48,70	245,20

Cuadro 5.4: Tabla de mediciones potencia, tensión y corriente de salida 3

En el gráfico 5.2 se resumen las tablas de mediciones 5.2, 5.3 y 5.4, donde se observa la potencia de salida en función de la corriente de salida de cada una de las fases de la fuente conmutada. En este se observa como la potencia aumenta conforme va aumentando la corriente para las tres fases.

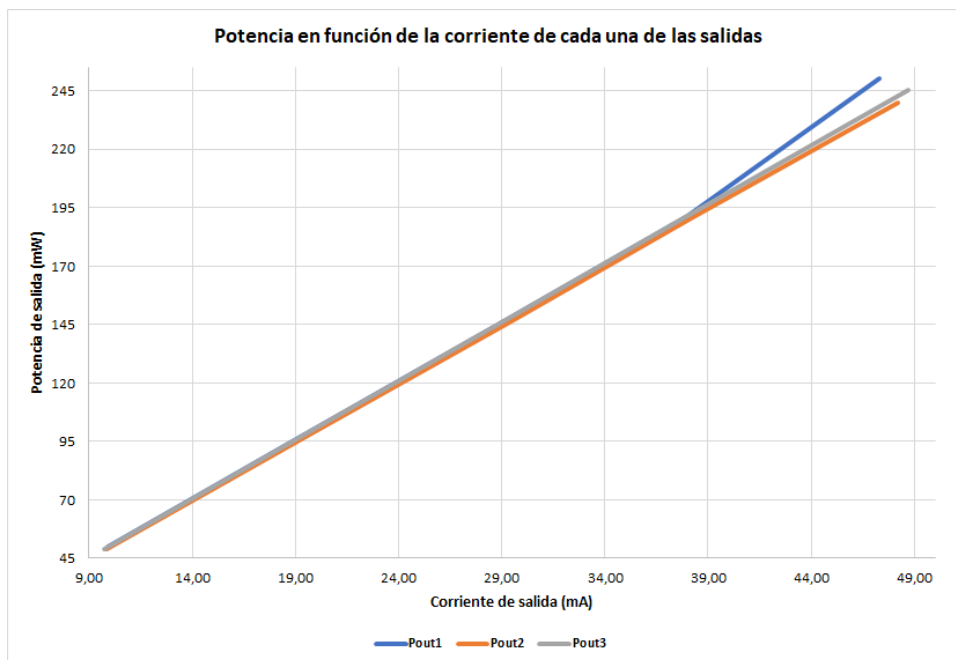


Figura 5.2: Gráfico potencia en función de la corriente de salida de las 3 fases

Además se realiza más mediciones adicionales, pero esta vez solo para la salida

de mayor corriente, las demás se dejan en vacío. Los resultados de las mediciones realizadas para solo esta salida se muestran en el cuadro 5.5.

Factor de potencia	Carga Ω	V_IN (V)	I_IN(mA)	P_IN (mW)
0,24	50,00	120,30	15,32	921,50
0,38	20,00	120,50	36,03	2170,81
0,46	10,00	120,00	40,60	2436,00
0,48	7,50	120,30	48,00	2887,20
0,5	5,00	120,40	58,40	3515,68

Cuadro 5.5: Tabla de mediciones potencia, tensión y corriente de salida 1 mayor corriente

En la figura 5.1 se muestra el gráfico de la potencia de entrada en función de la corriente de la tabla 5.5, esto para una salida con carga. En este se observa como la potencia aumenta conforme va aumentando la corriente.

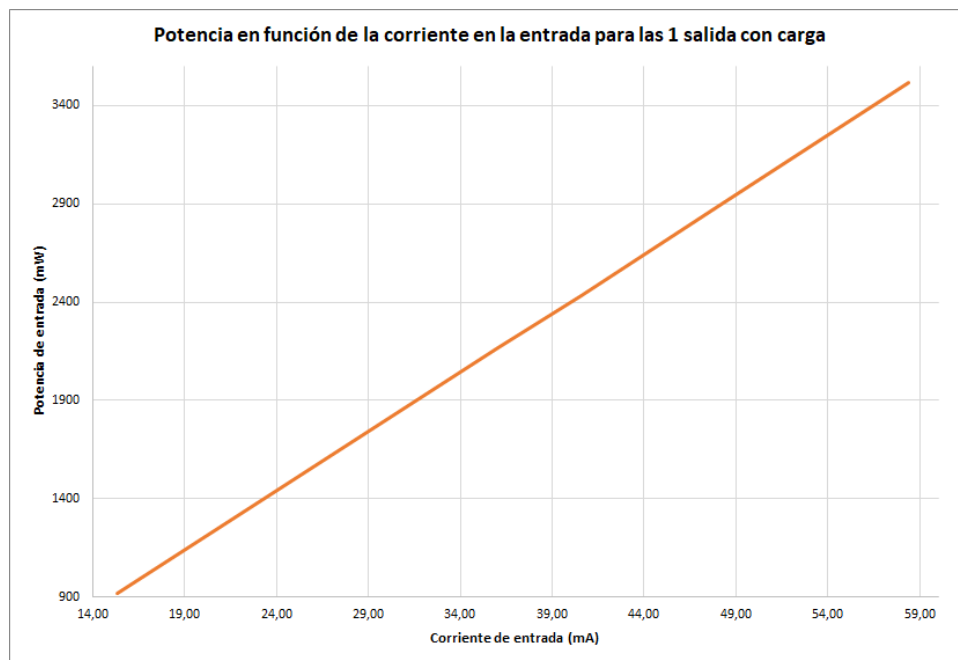


Figura 5.3: Gráfico potencia en función de la corriente de salida de las 1 fase con carga

5.2. Mediciones de frecuencia de conmutación

En la figura 5.4 se muestra la captura de la frecuencia de conmutación a la que esta operando la fuente de poder realizada con la ayuda de un osciloscopio, además se logra observar las forma de onda que se genera con la conmutación. La frecuencia de conmutación se encuentra a 126.7kHz aproximadamente, lo cual es lo esperado según el controlador que se esta utilizando.

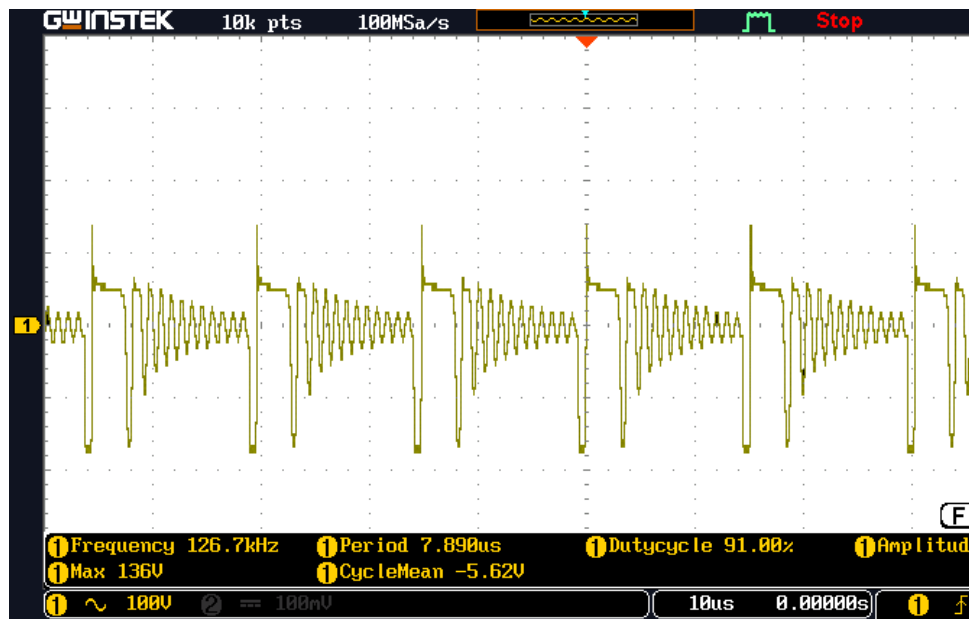


Figura 5.4: Gráfica frecuencia de conmutación

5.3. Pruebas de eficiencia de la fuente

Para lograr determinar la eficiencia de la fuente de poder conmutada, se tomaron los datos de las mediciones anteriores para poder calcular su eficiencia y pérdidas aproximadas respecto a la potencia de entrada y salida. En los cuadros 5.6 y 5.7, se tienen las mediciones y cálculos para la eficiencia y las pérdidas de la fuente de poder, tanto para las 3 salidas con carga como para solo una salida de mayor corriente con carga. En estos cálculos se puede observar que la eficiencia va desde un 40 % a un 70 % aproximadamente.

P_IN (mW)	Iout (mA)	Potencia total salida	Eficiencia	Pérdidas (mW)
339,68	29,47	147,97	43,6 %	191,71
559,04	58,93	295,84	52,9 %	263,20
829,56	87,20	437,35	52,7 %	392,21
849,60	114,45	574,73	67,6 %	274,87
954,92	144,20	735,55	77,0 %	219,36

Cuadro 5.6: Tabla de cálculos para eficiencia

P_IN (mW)	Vout 1	Iout1 (mA)	Pout1 (mW)	Eficiencia(%) ¹	Pérdidas (mW)
921,50	5,02	88,30	443,62	48,1 %	477,88
2170,81	5,00	196,30	982,09	45,2 %	1188,72
2436,00	4,97	314,50	1561,49	64,1 %	874,51
2887,20	4,96	365,20	1811,39	62,7 %	1075,81
3515,68	4,80	513,00	2462,40	70,0 %	1053,28

Cuadro 5.7: Tabla de cálculos para eficiencia de 1 salida mayor corriente

De los cálculos anteriores se obtienen los gráficos que se muestran en las figuras 5.5 y 5.6, en los cuales se puede observar la eficiencia y las pérdidas en función de la corriente de salida.

Para la figura 5.5 donde los cálculos fueron realizados para las 3 salidas con carga, se nota como la eficiencia va en aumento conforme aumenta la corriente de salida, mientras que las pérdidas aumentan hasta cierto punto y luego disminuyen un poco.

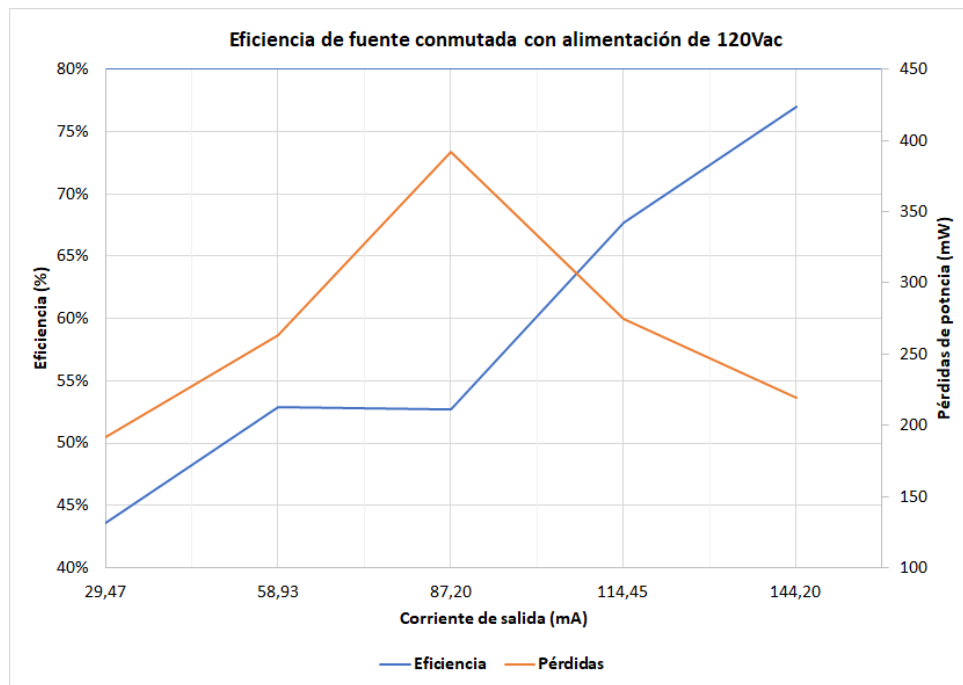


Figura 5.5: Gráfico de eficiencia de las 3 salidas

Para la figura 5.6 donde los cálculos fueron realizados para una sola salida de mayor corriente con carga, se nota como la eficiencia va en aumento conforme aumenta la corriente de salida, hasta llegar a una estabilidad, mientras que las pérdidas van en aumento conforme aumenta la corriente de salida.

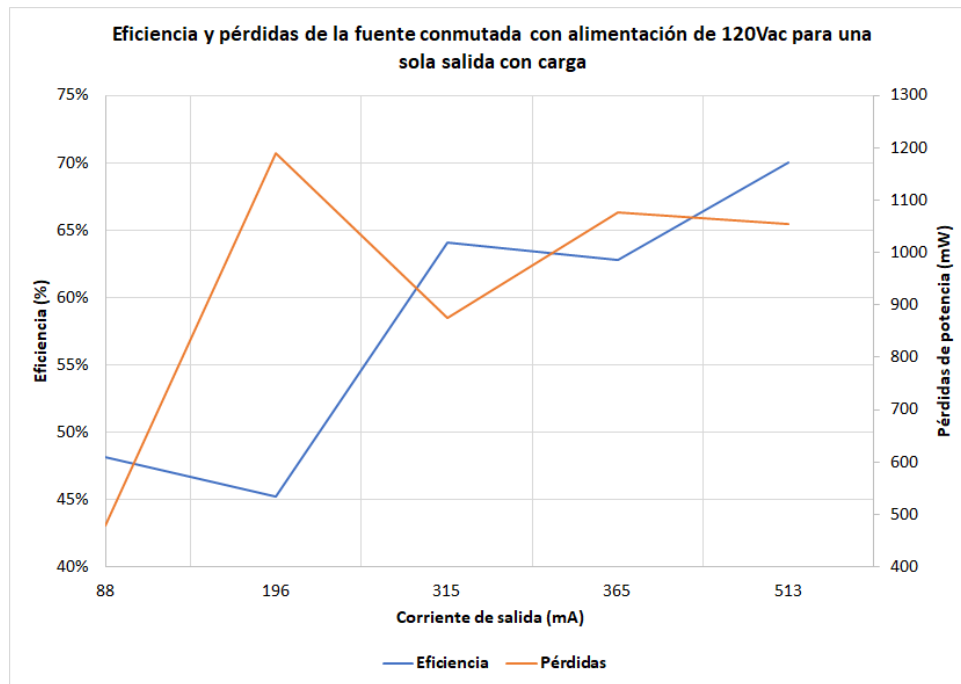


Figura 5.6: Gráfico de eficiencia de 1 salida

Analizando los cálculos obtenidos, se puede concluir que la fuente de alimentación conmutada puede llegar hasta un 70 % de eficiencia aproximadamente, esto se podría justificar porque según el fabricante del transformador utilizado, el núcleo del transformador va a tener pérdidas dependiendo de la frecuencia de conmutación en la que se encuentre operando. Esto se puede entender mejor al ver en la figura 5.7 la gráfica de Densidad de flujo versus pérdidas del núcleo para material TP4A, donde se puede observar como conforme aumenta la frecuencia de conmutación las pérdidas en el núcleo aumentan, por lo que al tener una frecuencia de conmutación mayor a 100kHz en el diseño de la fuente de conmutación fabricada, la curva de pérdidas en la que se ubica la operación del núcleo estaría más arriba de la curva verde, esta curva se ubica en la zona con las mayores pérdidas en el núcleo.

Otro razón por la que la eficiencia de la fuente conmutada es baja, es que tal como se menciona en la sección 2.2.1, las fuentes de alimentación con modo de conmutación *flyback* de salidas múltiples es una técnica útil para aplicaciones de múltiples salidas, donde se requieren varias salidas semiestabilizadas de un solo suministro. Sin embargo la principal desventaja es que fluyen altas corrientes de ondulación en el transformador y los componentes de salida, lo que reduce su eficiencia.

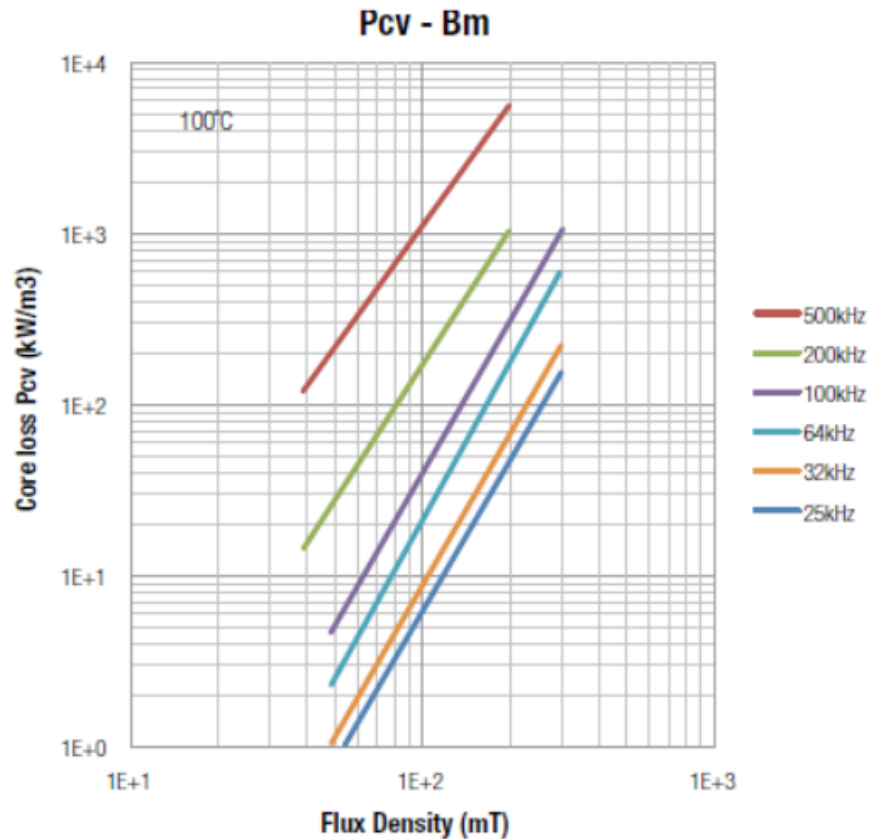


Figura 5.7: Gráfico de densidad de flujo versus pérdidas del núcleo [6]

5.4. Pruebas con sistema de monitoreo

5.4.1. Prueba de fuente conmutada con sistema de monitoreo sin arreglos fotovoltaicos

Antes de iniciar las pruebas al conectar la fuente de poder conmutada con el sistema de monitoreo conectado a los arreglos de los paneles fotovoltaicos del laboratorio SESLab, se realiza una prueba solo con el sistema de monitoreo para corroborar que la fuente de alimentación es capaz de alimentar el sistema de monitoreo antes de proceder a conectarlo directamente de lo arreglos fotovoltaicos. En la figura 5.8 se muestra un diagrama de bloques para entender mejor el diseño creado para la simulación de las tensiones que caen sobre las resistencias *shunt* de medición de los arreglos fotovoltaicos. Se diseñan 3 divisores de tensión para simular una tensión aproximada de 50 mV, 60 mV, y 70mV, ya que la tensión máxima esperada en las resistencias *shunt* es de 75 mV según [1].

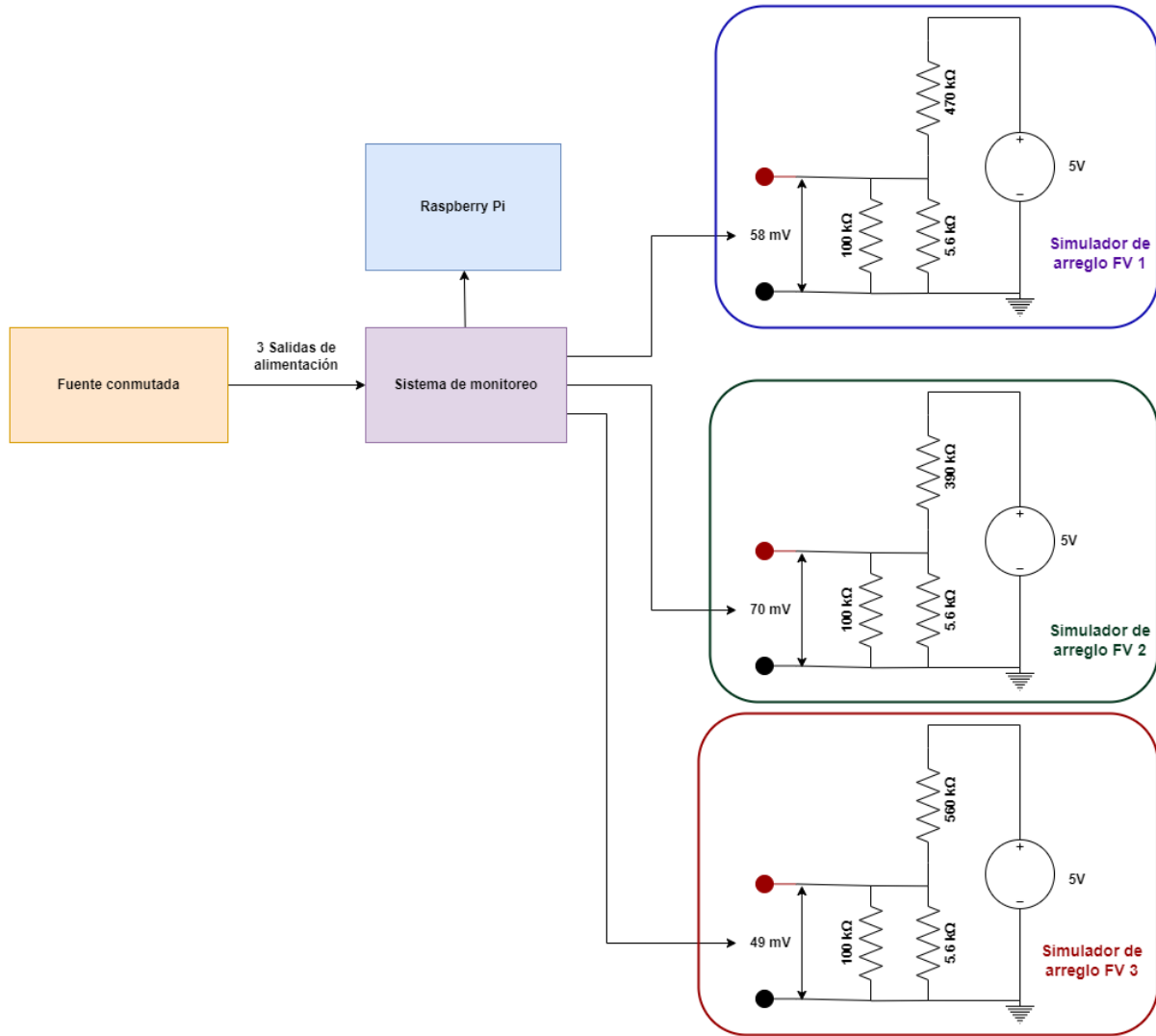


Figura 5.8: Diagrama de simulación arreglos FV

En la figura 5.9 se muestra la fotografía donde se encuentra el sistema conectado para simular las resistencias *shunt*, al probarlo se genera los datos de medición de corriente correctamente. Una de las mediciones desplegadas por la *Raspberry Pi* se muestra en la figura 5.12, lo que demuestra que el sistema está trabajando correctamente, ya que se obtienen los datos de medición de las *shunt* simuladas conectadas.

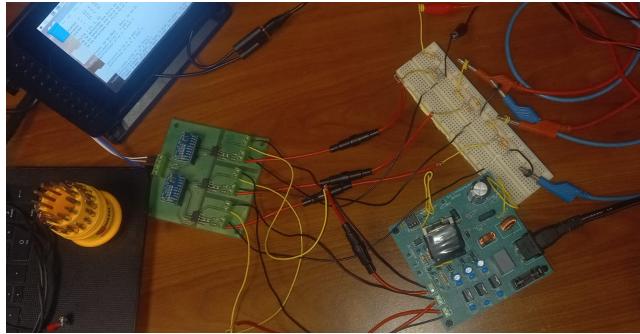


Figura 5.9: Fuente con sistema de monitoreo conectado para la simulación

5.4.2. Prueba de fuente conmutada con sistema de monitoreo en los arreglos fotovoltaicos

Luego de hacer pruebas a la fuente conmutada conectada al sistema de monitoreo simulando las resistencias *shunt*, se procede a conectar el sistema de monitoreo a las resistencias *shunt* de medición de los arreglos de los paneles solares del SESLab. Para realizar esta prueba se conectaron unos interruptores para interrumpir los cables que van conectados sobre las resistencias *shunt* que se encuentran en el gabinete que se muestra en la figura 5.10, esto para protección y facilidad de la conexión del equipo.



Figura 5.10: Resistencias Shunt en arreglos de paneles fotovoltaicos en el SESLab

En la figura 5.11 se puede observar todo el sistema conectado por medio de los interruptores agregados, este sistema se dejó conectado por una hora aproximadamente, para la verificación de la obtención de los datos de medición del sistema de monitoreo y para verificar la funcionalidad del sistema alimentado por la fuente conmutada. El sistema funciona correctamente y no se obtuvieron problemas con la fuente de alimentación.

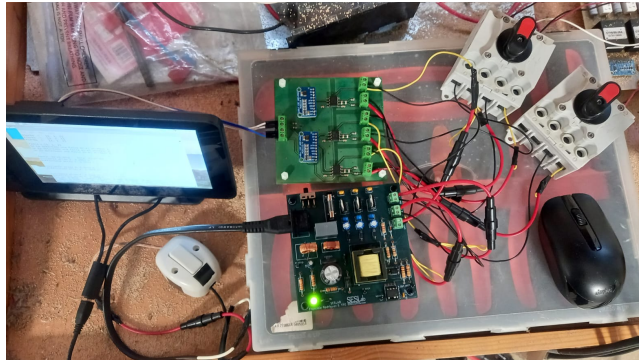


Figura 5.11: Fuente con sistema de monitoreo conectado en arreglos de paneles fotovoltaicos en el SESLab

En la figura 5.12 se tiene uno de los datos que despliega en consola la *Raspberry Pi* en el momento de la medición, por lo que el sistema opera correctamente al ser alimentado por la fuente de poder conmutada.

```

File Edit Tabs Help
Se ha detectado una falla en el arreglo 2
Se ha detectado una falla en el arreglo 3

Fecha: 19-10-2023 hora: 15:39:12
Corriente array 1: 0.25 A
DiffVoltaje array 1: 0.0013 v

Corriente array 4: 10.7948 A
DiffVoltaje array 4: 0.054 V

Corriente array 6: 10.666 A
DiffVoltaje array 6: 0.0536 V
[[0.25, 10.8071, 10.6782], [0.25, 10.8101, 10.6782], [0.25, 10.8132, 10.68
0.25, 10.8101, 10.6966], [0.25, 10.7979, 10.6261], [0.25, 10.7979, 10.712]
5, 10.8071, 10.6445], [0.25, 10.7948, 10.7243], [0.25, 10.7764, 10.666], [
10.7948, 10.666]]
10 de 10

Proyecto:
Matriz de entrada = [0.25, 10.8101, 10.6782]

```

Figura 5.12: Datos en consola desplegados por la *Raspberry Pi*

5.4.3. Mediciones y cálculos de consumo de potencia

Para conocer el consumo que tiene la fuente de poder conmutada cuando esta conectada al sistema de monitoreo, se realizan mediciones de corriente, tensión y potencia. En el cuadro 5.8 se tiene las mediciones de corriente, tensión y cálculos de potencia de las salidas de alimentación de la fuente de poder. En estas mediciones se muestra que la corriente que consume el sistema de monitoreo es de 5.7 mA y la potencia que consume es de 28.6 mW por fase aproximadamente.

En el cuadro 5.9 se observa las mediciones de tensión, corriente y potencia de entrada de la fuente de poder, así como la potencia total que esta entregando la fuente de poder al sistema de monitoreo.

Salida	Vout (V)	Iout (mA)	Pout (mW)
1	5,04	5,53	27,87
2	4,99	5,69	28,42
3	5,04	5,67	28,57

Cuadro 5.8: Mediciones y cálculos de potencia consumida por las salida del sistema monitoreo

V_IN (V)	I_IN(mA)	P_IN (mW)	P_Out (mW)
118,90	8,3	493,44	84,85

Cuadro 5.9: Mediciones y cálculos de potencia consumida por sistema monitoreo

Con las mediciones anteriores se puede corroborar que el consumo de potencia que tiene la fuente de poder al alimentar el sistema de monitoreo es de 494 mW aproximadamente, esto es un consumo bajo de potencia, comparado con la potencia del transformador utilizado. A pesar de la fuente esta sobre dimensionada para el nivel de potencia que debe suplir, el sistema funciona adecuadamente, ya que el diseño se baso principalmente en el requerimiento de aislamiento entre fases y no en la potencia.

A partir de las mediciones previas, se puede verificar que el consumo de potencia de la fuente de alimentación al suministrar energía al sistema de monitoreo es de aproximadamente 494 mW. Este valor representa un consumo reducido en comparación con la capacidad de potencia del transformador empleado. Aunque la fuente está dimensionada en exceso para el nivel de potencia que debe suministrar, el sistema opera de manera funcional. Esto se debe a que el diseño se centró principalmente en el requisito de aislamiento entre fases y no en la capacidad de potencia, evidenciando así una implementación funcional del proyecto.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

En el cierre de este estudio orientado hacia el desarrollo de un sistema electrónico de potencia, con el propósito fundamental de alimentar energéticamente el sistema de monitoreo remoto del sistema fotovoltaico en el laboratorio de SESLab, nos adentramos en el capítulo de conclusiones y recomendaciones. El objetivo general de esta investigación ha sido la concepción y materialización de un sistema de alimentación energética, basado en una fuente de poder de múltiples fases utilizando la topología de convertidor *Flyback*, con la finalidad de salvaguardar los sistemas implementados de posibles daños. A lo largo de este capítulo, se sintetizarán los hallazgos más significativos derivados de la ejecución de este proyecto, se reflexionará sobre su relevancia en el contexto de la energía solar y el monitoreo remoto, y se ofrecerán recomendaciones clave para la implementación futura y la mejora continua del sistema propuesto.

6.1. Conclusiones

Dado lo realizado en el presente proyecto, es posible sintetizar los resultados en las siguientes conclusiones.

- Se presentó un diseño de fuente de alimentación utilizando la topología de convertidor Flyback con controlador, este convertidor AC-DC utiliza un único lazo de retroalimentación para proveer tres salidas de 5V con aislamiento galvánico entre todas las etapas, el diseño del circuito esquemático se observa en la figura 4.4.
- Se diseñó un sistema de alimentación que satisface los requerimientos planteados para dar energía al sistema de monitoreo, se corrobora que la operación y

funcionamiento del sistema se comporta de manera análoga al actual sistema de fuentes independientes que se muestra en la figura 1.1.

- Las pruebas de funcionamiento de la fuente de alimentación junto con el sistema de monitoreo demuestran que existe aislamiento eléctrico entre las fases de medición, por lo que demostramos que hay aislamiento galvánico entre las distintas etapas de la fuente de alimentación tal como se muestra en la sección 5.4.2.
- Se integró la fuente de poder basada en la topología de convertidor *Flyback* con 3 fases de alimentación en una placa PCB de 100x100mm, donde se integra un filtro EMI, rectificador AC, convertidor DC-DC, circuito de control, rectificador y filtro de salida. La tarjeta impresa se muestra en la figura 4.5.
- La fuente de alimentación implementada presenta un consumo de 493.44 mW, esto se da en el punto de operación al alimentar 3 fases del sistema de monitoreo. Cada fase consume aproximadamente 28 mW en las condiciones previstas de la fuente de poder. El cuadro 5.8 y 5.9 presentan las mediciones sobre el sistema en condiciones de trabajo.
- De acuerdo a las pruebas realizadas con cargas resistivas, se determinó que la eficiencia de la fuente de poder se encuentra en un rango entre el 40 % y 70 %. En la gráfica 5.5 se muestra la curva de tendencia de eficiencia y pérdidas de potencia.

6.2. Recomendaciones

El trabajo mostrado en el presente informe muestra que se obtuvo con éxito los resultados planteados originalmente, no obstante, en el desarrollo del mismo, se encontraron puntos de mejora que se deberán tomar en cuenta para futuras iteraciones de la presente solución.

- La fuente de alimentación elaborada funciona correctamente, sin embargo, una posible mejora en un rediseño es prever el uso de elementos de disipación en los reguladores de tensión de salida para evitar calentamientos. Dadas las pruebas de eficiencia realizadas, al demandar corrientes en las fases mayores a 500 mA, los reguladores tienden a aumentar su temperatura. En caso de ser requerida más potencia por parte de la fuente de alimentación se pueden utilizar disipadores para no comprometer la integridad de los componentes del circuito.

- Con la incorporación de más fases o salidas en la fuente de alimentación conmutada, se podrían conectar más arreglos de paneles fotovoltaicos para su monitoreo, además se podría agregar una fase de alimentación adicional prevista para la *Raspberry Pi*, de esta forma la fuente de poder alimentaría el sistema de monitoreo y la *Raspberry Pi*.
- Se podría mejorar la eficiencia de la fuente de poder conmutada, al cambiar el controlador por uno con una menor frecuencia de conmutación, ya que al disminuir la frecuencia se reducen las pérdidas en el núcleo del transformador.
- Se podría mejorar la eficiencia al reducir pérdidas de potencia para disminuir la tensión de salida, al buscar un transformador de menor potencia, con tensiones de salida menores y que se adapte a las necesidades del sistema de monitoreo.
- Se recomienda implementar y probar el diseño propuesto en la figura 4.6 donde se plantea el diseño de 6 fases, además de ampliar el diseño de sistema de monitoreo a 6 fases y probar el sistema integrado.

Apéndice A

Fabricación de PCBs

Imágenes de las versiones de los PCB fabricados, sus diseños, proceso de fabricación y correcciones.

A.1. Primer diseño del PCB fabricado

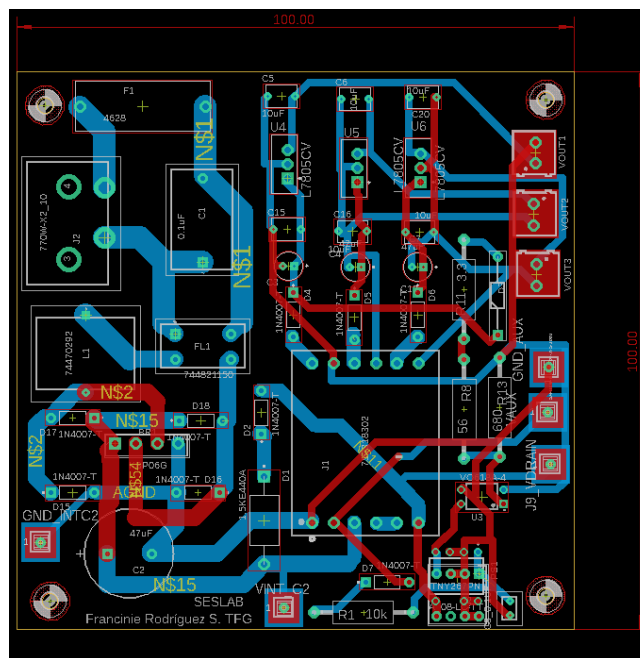


Figura A.1: Primer diseño del PCB1 sin corregir

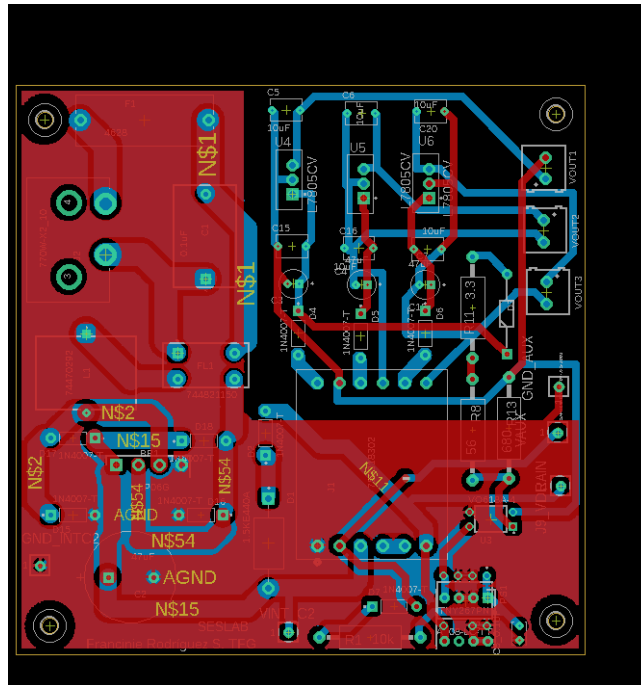


Figura A.2: Primer diseño del PCB capa top

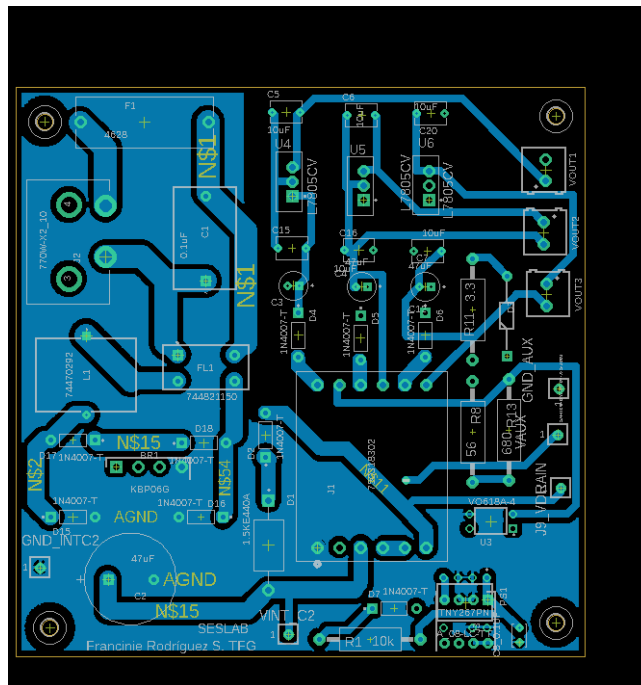


Figura A.3: Primer diseño del PCB capa bottom

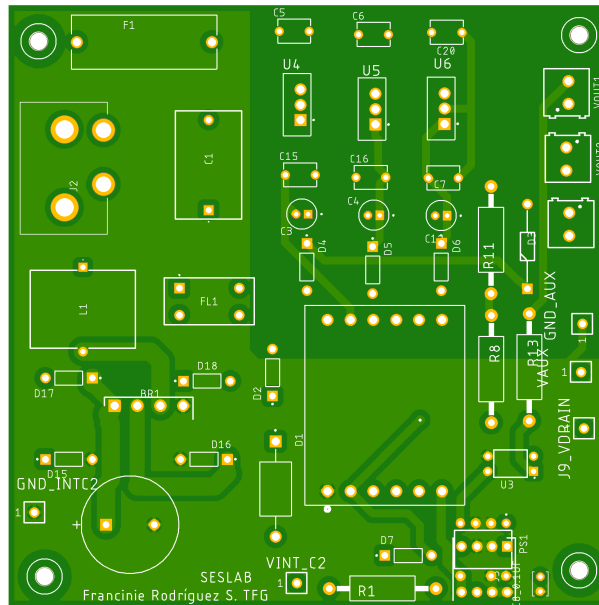


Figura A.4: Primer diseño del PCB placa capa top

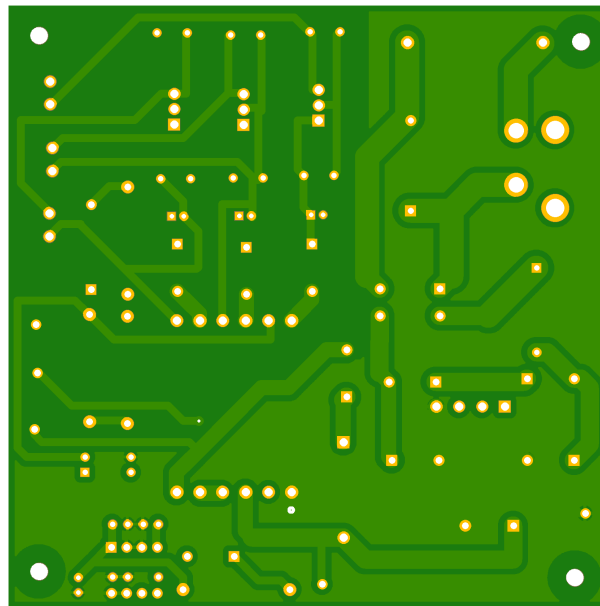


Figura A.5: Primer diseño del PCB placa capa bottom

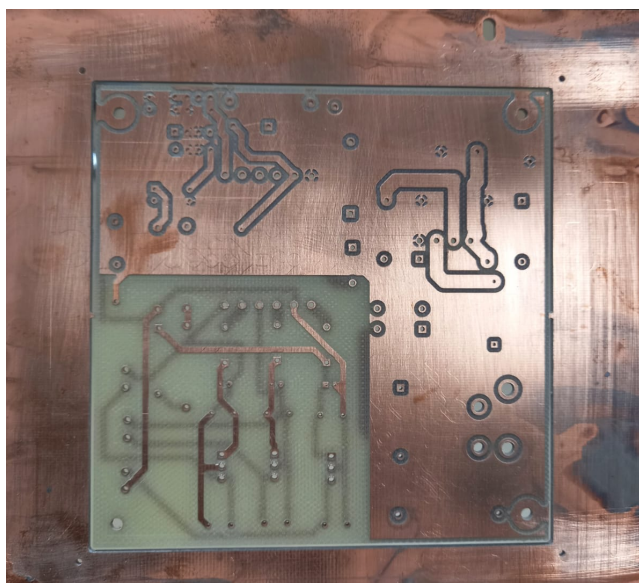


Figura A.6: Primer diseño del PCB fabricado capa top

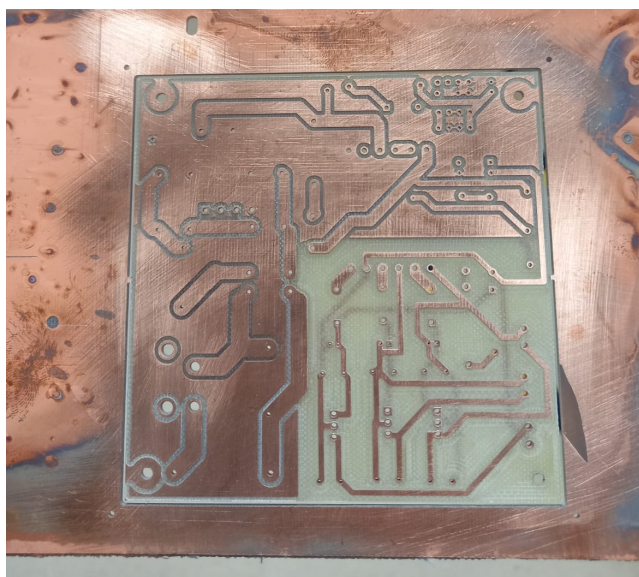


Figura A.7: Primer diseño del PCB fabricado capa bottom

A.2. Segundo diseño del PCB fabricado con correcciones

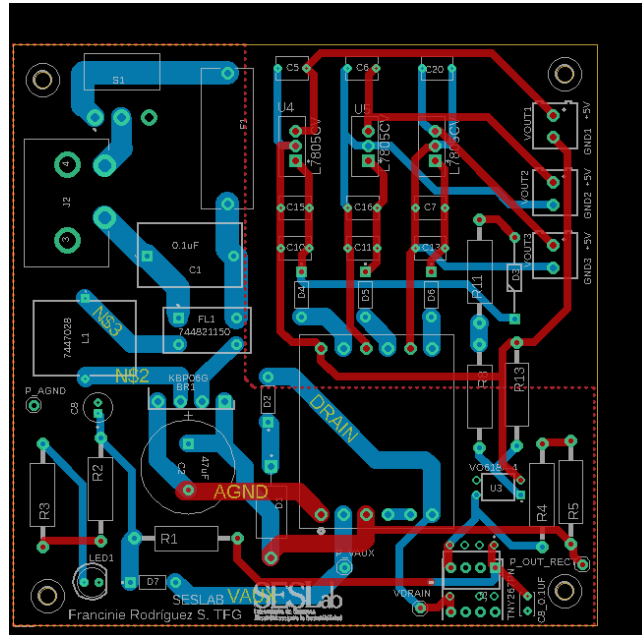


Figura A.8: Segundo diseño del PCB fabricado

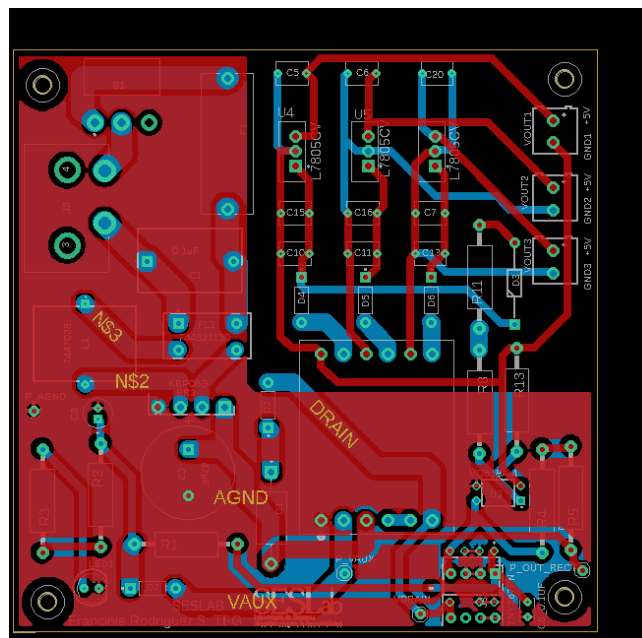


Figura A.9: Segundo diseño del PCB fabricado con planos

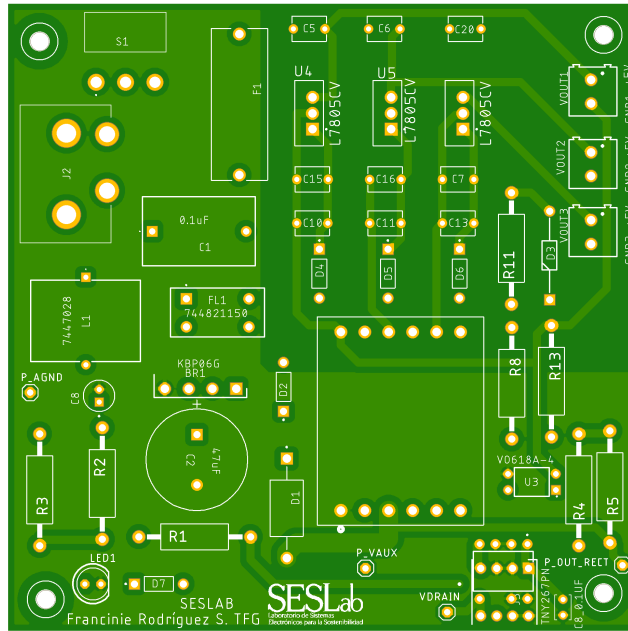


Figura A.10: Segundo diseño del PCB fabricado capa top

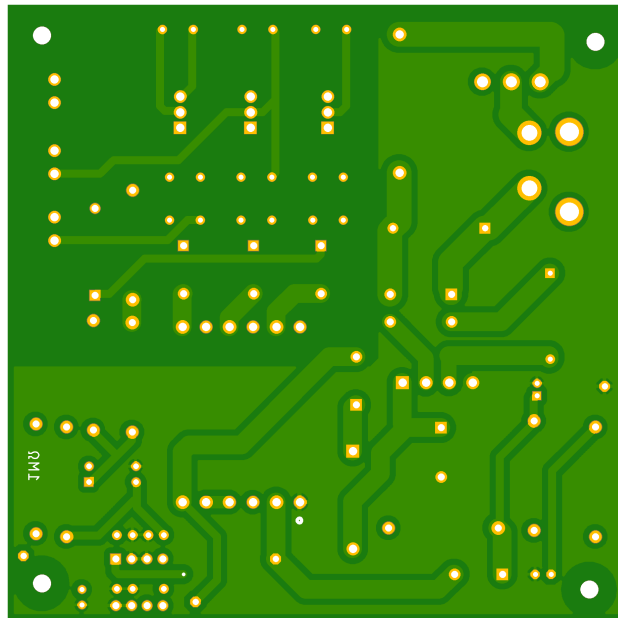
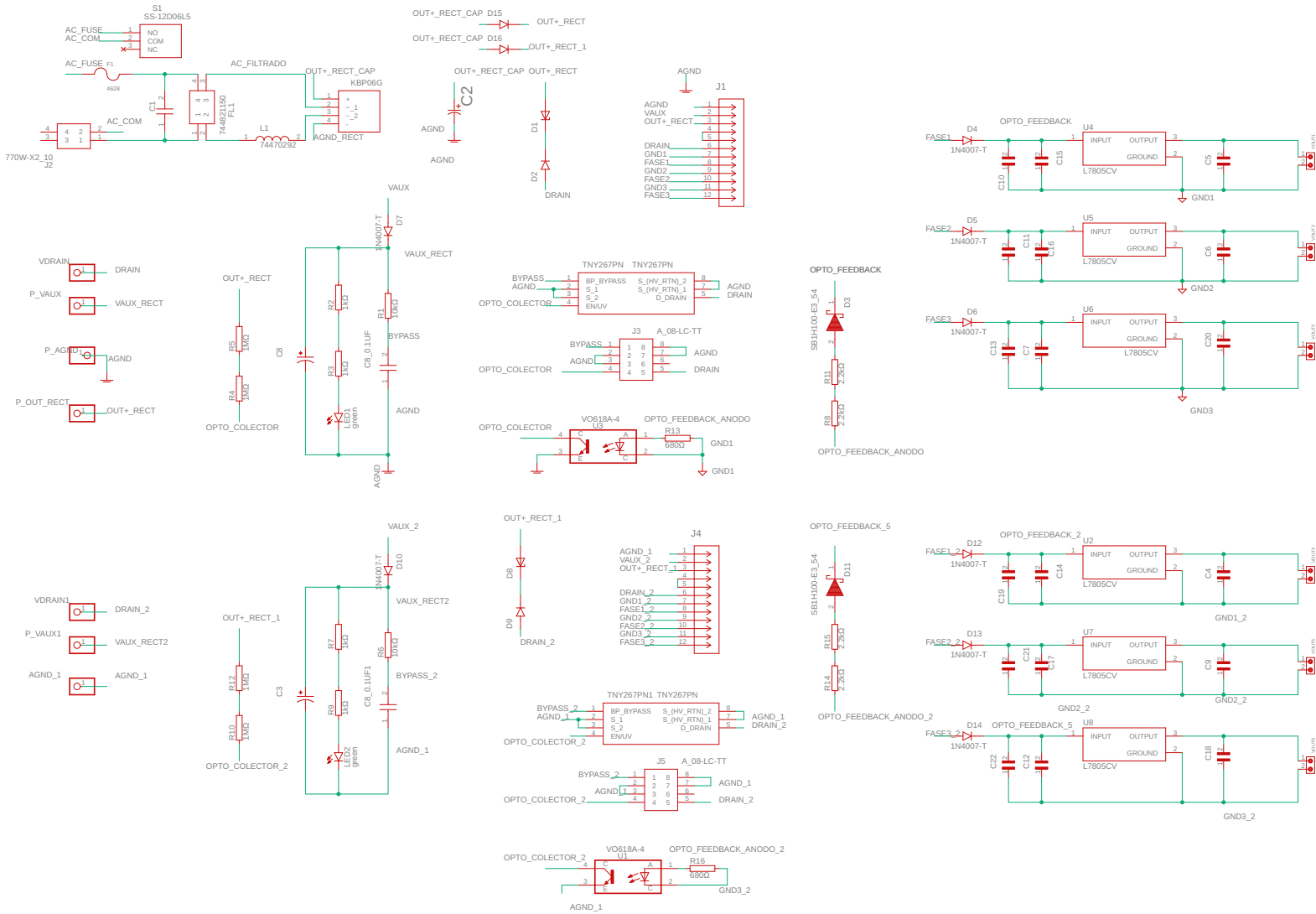


Figura A.11: Segundo diseño del PCB fabricado capa Botton

A.3. Tercer diseño del PCB duplicada

En esta sección se muestran los archivos diseñados para la fuente conmutada duplicada. Tanto el esquemático, como el diseño del PCB.



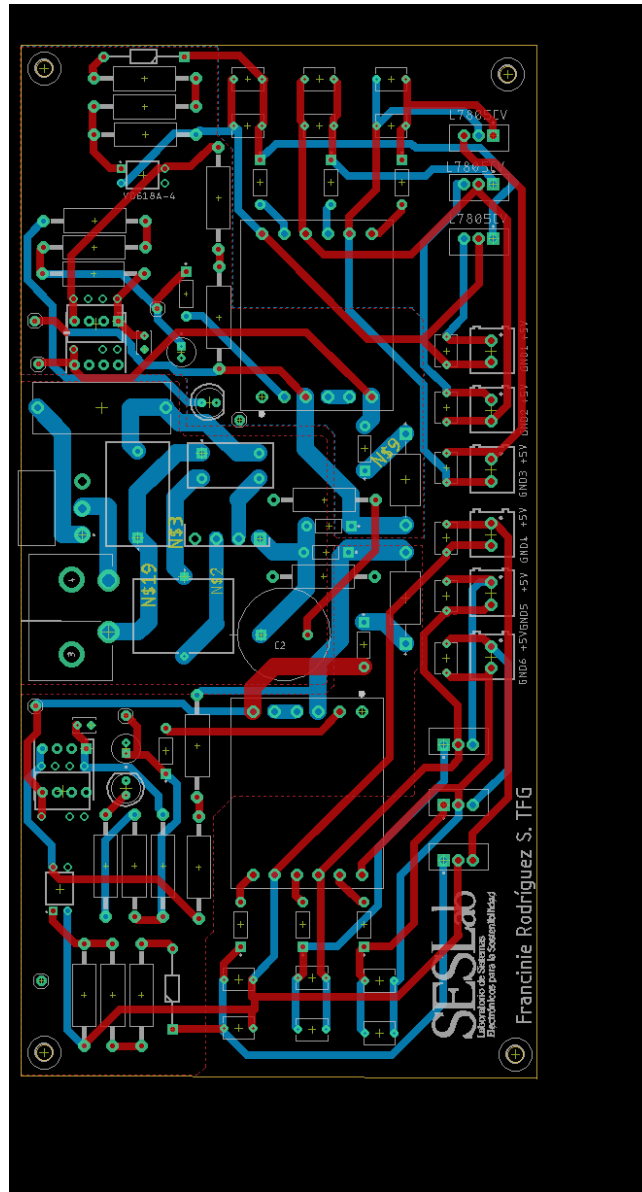


Figura A.12: Tercer diseño del PCB

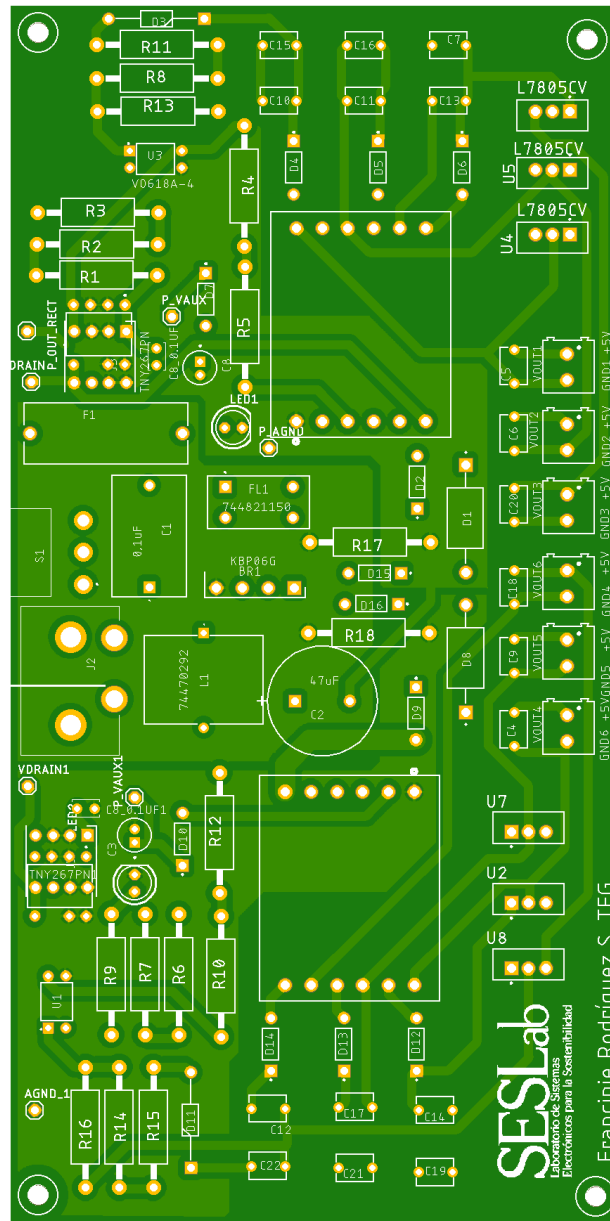


Figura A.14: Tercer diseño del PCB capa top

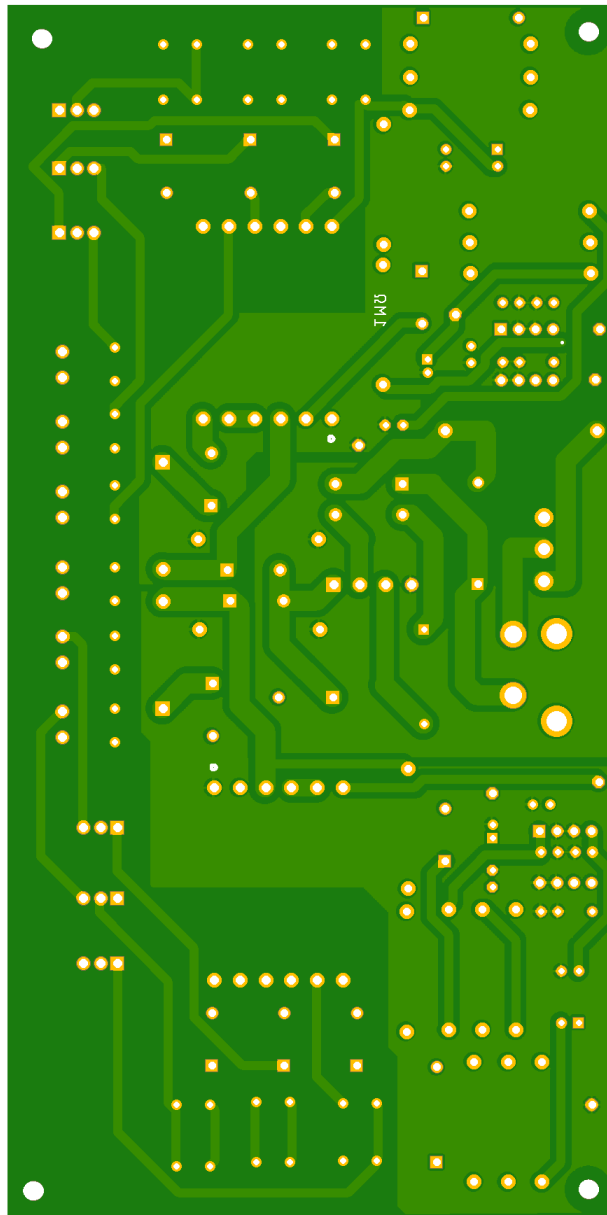


Figura A.15: Tercer diseño del PCB capa Bottom

Bibliografía

- [1] B. Rodríguez, “Diseño e implementación de un sistema de detección de fallas en sistemas fotovoltaicos.” *Trabajo Final de Graduación. Dept. Ing. Electrónica.*, 2021.
- [2] M. Zehendner and M. Ulmann, *Power Topologies Handbook. Texas Instruments Incorporated*, 1st ed., Belgium, 2016, vol. 1. [Online]. Available: <https://www.ti.com/seclit/ug/slyu036/slyu036.pdf>
- [3] “Switch mode power supply reference manual,” ON Semiconductor, 2014. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/Smpsrm-D.PDF>
- [4] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Electrónica de Potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño*, 3rd ed., México, 2010, vol. 1, no. 8448171624.
- [5] K. Billings and T. Morey, *Switchmode Power Supply Handbook*, 3rd ed., New York, 2011, vol. 1, no. ISBN: 9780071639712.
- [6] “15w multi output offline flyback transformer, design considerations taken to achieve over 86[Online]. Available: <https://www.we-online.com/components/media/o183213v410%20ANP094a%2015W%20Multi%20Output%20Offline%20Flyback%20Transformer.pdf>
- [7] M. de Ambiente y Energía MINAE. (2015) «vii plan nacional de energía 2015-2030,» 2015. [Online]. Available: <https://minae.go.cr/recursos/2015/pdf/VII-PNE.pdf>
- [8] T. website. (2021) «tecnológico de costa rica,» proyectos de investigación. identificación de fallas en instalaciones solares fotovoltaicas. [Online]. Available: <https://www.tec.ac.cr/proyectos/identificacion-fallas-instalaciones-solares-fotovoltaicas>.

- [9] S. website. (2021) «laboratorio de sistemas electrónicos para la sostenibilidad,» escuela de ingeniería en electrónica. [Online]. Available: <http://www.ie.tec.cr/seslab/>
- [10] “Amc1200/b fully-differential isolation amplifier,” 2015. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1200.pdf?ts=1701280314005&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [11] J. C. M. Castillo, *Fuentes de alimentación (Electrónica)*, 1st ed., Madrid, 2017, vol. 1.
- [12] E. SA. (2014) Fuentes de alimentación. [Online]. Available: https://www.sase.com.ar/2011/files/2010/11/SASE2011-Fuentes_de_alimentacion.pdf
- [13] M. E. O. Eduardo A. Binda and H. E. Tacca, “Lazo de control optoacoplado para fuente conmutada,” *RIAI Departamento de Electrónica, Facultad de Ingeniería*, vol. 5, no. 1, pp. 37–50, 2008. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791208701225>
- [14] J. A. R. Alvarado and J. M. R. Lara, “Diseño de una fuente de alimentación en modo conmutado usando la topología flyback para aplicaciones en iluminación led,” *Universidad Privada Antenor Orrego. Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica*, vol. 1, no. 1, pp. 26–54, 2015. [Online]. Available: http://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/20.500.12759/1931/1/RE_ING_ELEC_JUAN.ROMERO_JASON.ROMAN_FUENTEDE.ALIMENTACION.TOPOGIA_DATOS_T046-18109360T.PDF
- [15] C. K. Alexander and M. N. O. Sadiku, *Fundamentos de circuitos eléctricos*, 5th ed., México, 2013, vol. 1.
- [16] T. L. Floyd, *Principios de circuitos eléctricos*, 8th ed., México, 2007, vol. 1, no. ISBN: 978-970-26-0967-4.
- [17] Noratel. (2023) Ferrite transformers. [Online]. Available: https://imistorage.blob.core.windows.net/imidocs/59400005_Ferrite%20transformers.pdf
- [18] G. Carmona and T. Díaz, *Electrónica Aplicada*, 1st ed., México, 2010, vol. 1, no. 8448171624.
- [19] T. Pollán, *Electrónica digital. Un libro para su estudio.*, 1st ed., Zaragoza, España, 2010, vol. 1.

- [20] C. D. M. M. EMTP Departamento de Electricidad. (2016) Filtros. [Online]. Available: http://www.matte.cl/wp-content/uploads/2016/11/Apunte-N%C2%B04_Filtros.pdf
- [21] J. L. Paucar, “Desarrollo de dos sistemas de amplificación basados en fuentes conmutadas y amplificadores clase d utilizando un enlace inalámbrico para la transmisión de audio,” *Facultad de Informática y Electrónica*, pp. 32–35, 2019.
- [22] “Diseño de una fuente de alimentación en modo conmutado usando la topología flyback para aplicaciones en iluminación led,” *Facultad de Ingeniería. Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica*, p. 104, 2015.
- [23] C. P. Basso, *Switch-Mode Power Supplies*, 2nd ed., New York, 2014, vol. 1, no. ISBN: 9780071823463.
- [24] R. Kliger, “Integrated transformer-coupled isolation,” *IEEE Instrumentation Measurement Magazine*, vol. 6, no. 1, pp. 16–19, 2003.
- [25] H. T. Ortega. (2014) Guía de diseño de pcb con eagle introducción y recomendaciones generales. [Online]. Available: https://hetpro-store.com/images/Tutoriales/pcb_eagle/hetpro_tutorial_pcb_eagle.pdf
- [26] C. L. T. R. Jaime López, Fernando A. Rojas and J. A. Guacaneme, “Recomendaciones para el diseño de circuitos impresos de potencia,” *Revista científica y tecnológica de la facultad de ingeniería universidad distrital Francisco José de caldas*, vol. 9, no. 2, pp. 44–47, 2004. [Online]. Available: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/reving/article/view/1885/2459>
- [27] Álvaro Giménez Pérez, “Diseño y simulación de un convertidor flyback para un sistema fotovoltaico,” *Universidad Politécnica de Valencia, Escuela técnica superior de ingeniería del diseño*, vol. 1, no. 1, pp. 1–52, 2016. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/73885/GIM%C3%89NEZ%20-%20Dise%C3%B1o%20y%20simulaci%C3%B3n%20de%20un%20convertidor%20Flyback%20para%20un%20sistema%20fotovoltaico.pdf?sequence=4>.
- [28] B. King and M. O’Loughlin, “Common mistakes in flyback power supplies and how to fix them,” *Texas Instruments Power Supply Design Seminar SEM2400*, vol. 1, no. SLUP392, pp. 1–29, 2020. [Online]. Available: https://www.ti.com/seclit/ml/slup392/slup392.pdf?ts=1663258109243&ref_url=https%253A%252F%252Ftraining.ti.com%252F

- [29] S. Koshy, Deepu E y TK, “Diseño y análisis de una fuente de alimentación universal de ca a cc aislada fuera de línea con factor de potencia corregido y salida cuádruple con regulación cruzada mejorada,” pp. 1–6, 2022.
- [30] N. R. Goyal, Umesh y Prakash, “Diseño de fuente de alimentación de salida múltiple de bajo consumo para sistemas integrados,” pp. 1–5, 2013.
- [31] N. C, A. Sreedevi, and M. Gopal, “Simulation and hardware implementation of 24 watt multiple output flyback converter,” pp. 366–370, 2015.
- [32] G. E. D. y L. C. Schmidt, *Engineering Design*, 5th ed., New York, 2009, vol. 1.
- [33] *KBP005G - KBP10G , 1.5A, Glass Passivated Bridge Rectifier*, Diodes Incorporated, 2023. [Online]. Available: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds21203.pdf>
- [34] *R47 X1 440 VAC, Film Metallized Polypropylene Automotive Safety*, Kemet a YAGEO Company, 2006. [Online]. Available: <https://connect.kemet.com:7667/gateway/IntelliData-ComponentDocumentation/1.0/download/specsheet/R474I310050A1K>
- [35] *Aluminum Electrolytic Capacitors*, Diodes Incorporated, 2023. [Online]. Available: https://www.mouser.co.cr/datasheet/2/293/e_ucs-3082307.pdf
- [36] *7447028 Datasheet WE-FI Leaded Toroidal Line Choke*, Würth Elektronik, 2023. [Online]. Available: <https://www.we-online.com/components/products/datasheet/7447028.pdf>
- [37] *744821150 Datasheet WE-CMB Common Mode Power Line Choke*, Würth Elektronik, 2023. [Online]. Available: <https://www.we-online.com/components/products/datasheet/744821150.pdf>
- [38] *UCC2871x Constant-Voltage, Constant-Current Controller With Primary-Side Regulation*, Texas Instruments, 2023. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ucc28710.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-ww&ts=1695614989421>
- [39] *FSL146MRBN — Green-Mode Fairchild Power Switch*, Fairchild Semiconductor, 2023. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/fsl146mrbn-d.pdf>

- [40] *TNY263-268, TinySwitch-II Family Enhanced, Energy Efficient, Low Power Offline Switcher*, Power Integrations, 2023. [Online]. Available: https://www.mouser.com/datasheet/2/328/tny263_268-1512708.pdf
- [41] *TOSHIBA Field Effect Transistor Silicon N Channel MOS Type TK12A60D*, Toshiba Semiconductor and Storage, 2023. [Online]. Available: https://toshiba.semicon-storage.com/info/TK12A60D_datasheet_en_20131101.pdf?did=681&prodName=TK12A60D
- [42] *Optocoupler, Phototransistor Output, High Reliability, 5300 VRMS, Low Input Current*, Vishay Semiconductor Opto Division, 2023. [Online]. Available: <https://www.vishay.com/docs/83432/vo618a.pdf>
- [43] *750341526 d1 Model*, Würth Elektronik, 2023. [Online]. Available: <https://www.we-online.com/components/icref/datasheet/750341526.pdf>
- [44] *Spezifikation für Freigabe specification for release*, Würth Elektronik, 2023. [Online]. Available: <https://www.we-online.com/components/products/datasheet/760871333.pdf>
- [45] *750318302 d1 Mode*, Würth Elektronik, 2023. [Online]. Available: <https://www.we-online.com/components/products/datasheet/750318302.pdf>
- [46] *L78, Positive voltage regulator ICs*, STMicroelectronics, 2023. [Online]. Available: <https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/41/4f/b3/b0/12/d4/47/88/CD00000444.pdf/files/CD00000444.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000444.pdf>
- [47] *TLV760 100-mA, 30-V, Fixed-Output, Linear-Voltage Regulator*, Texas Instruments, 2023. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv760.pdf?ts=1698496716956&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTLV760
- [48] *WCAP-ATLI Aluminum Electrolytic Capacitors*, Würth Elektronik, 2023. [Online]. Available: <https://www.we-online.com/components/products/datasheet/860080375014.pdf>
- [49] *Panasonic Aluminum Electrolytic Capacitors (Radial Lead Type)*, Panasonic Electronic Components, 2023. [Online]. Available: https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/2188/FC_Series_TypeA_Rev2016.pdf

- [50] *1N4001 – 1N4007, 1.0A RECTIFIER*, Diodes Incorporated, 2023. [Online]. Available: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds28002.pdf>
- [51] “SB1H90 - SB1H100, high voltage schottky plastic rectifier high barrier technology for improved high temperature performance,” Vishay General Semiconductor, 2023. [Online]. Available: <https://www.vishay.com/docs/88716/sb1h90.pdf>