



# GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Convertor CC/CC de alta eficiencia para para  
alimentar la electrónica de control desde paneles  
solares en aparcamientos de bicicletas

Autor: Alejandro Fernández Pérez

Director: Jesús Teijeiro Bello

Madrid



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
**Convertor CC/CC de Alta Eficiencia para para alimentar la electrónica de control  
desde paneles solares en aparcamientos de bicicletas**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024-2025 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Alejandro Fernández Pérez

Fecha: 28/ 07/ 2025



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Jesús Teijeiro Bello

Fecha: 26/08/ 2025







# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Convertor CC/CC de alta eficiencia para alimentar la  
electrónica de control desde los paneles solares en  
aparcamientos de bicicletas

Autor: Alejandro Fernández Pérez

Director: Jesús Teijeiro Bello

Madrid



# Agradecimientos

Este proyecto trabajo de fin de grado ha sido un gran proyecto de mucha materia, aprendizaje y conocimiento tanto en la electrónica de potencia como control automático y diseño de PCB's que no hubiese sido posible sin la ayuda de mis profesores Daniel Muñoz Frías y Aurelio García Cerrada, mi director de TFG Jesús Teijeiro Bello y el apoyo de la universidad y mi familia y amigos.

Han sido muchas horas en el despacho de Aurelio tratando de entender las diferentes tipologías, y en qué iba a consistir mi convertidor DC-DC así como enfocar lo que ha sido el resultado obtenido. También hay que destacar el apoyo y enseñanza de Daniel, quien me ha ayudado mucho en lo referente al tema del diseño de la PCB con kicad así como a la adquisición y fabricación de placa. Mi director Jesús siempre ha estado ahí cuando lo he necesitado y me ha informado de todo lo referente a las tecnologías de transistores, tipologías de convertidores, el mercado actual y las soluciones para las que se presentan.

Por último, cabe destacar un lugar especial a mi familia y amigos, quienes me han apoyado durante toda la carrera, han hecho posible que yo llegara hasta aquí y que este proyecto fuera posible.



# Conversor CC/CC de alta eficiencia para para alimentar la electrónica de control desde paneles solares en aparcamientos de bicicletas

**Autor: Fernández Pérez, Alejandro**

Director: Teijeiro Bello, Jesús.

Entidad Colaboradora: Future Electronics

## RESUMEN DEL PROYECTO

### 1. Introducción

El crecimiento de las energías renovables y la expansión de sistemas autónomos han llevado a un desarrollo de soluciones para la electrónica de potencia (en este caso convertidores) que sean eficientes, compactas y capaces de adaptarse a entornos con alta variabilidad en la tensión de entrada. Un caso representativo es la alimentación de electrónica de control desde fuentes solares, donde la tensión disponible puede variar sustancialmente en función de las condiciones ambientales.

Para garantizar un funcionamiento estable y fiable de la electrónica asociada, es necesario diseñar convertidores capaces de mantener una tensión de salida regulada con independencia de las condiciones de entrada, optimizando al mismo tiempo el rendimiento energético y el tamaño del sistema.

### 2. Definición del Proyecto

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en el diseño de un convertidor DC-DC de topología buck-boost no inversora basado en el controlador LM51772 de Texas Instruments. El sistema ha sido diseñado para convertir tensiones de entrada comprendidas entre 8 V y 48 V en una salida estable de 12 V, con una corriente de carga máxima de 5 A.

La finalidad principal es la futura aplicación en la alimentación de electrónica de control de sistemas renovables y dispositivos autónomos, donde las limitaciones de espacio, eficiencia y coste son determinantes. Para este proyecto se ha optado por la topología buck-boost de cuatro transistores, la cual responde a la necesidad de mantener la polaridad de la señal y mejorar la eficiencia del sistema en todos los rangos de operación.

### 3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

El convertidor diseñado está formado por una arquitectura de cuatro transistores que permite operar en modos buck, boost o buck-boost, según las condiciones de entrada. El sistema está dividido en dos bloques principales; el bloque de control formado por el controlador LM51772 y los componentes pasivos para formar el lazo de control y el bloque de potencia formado por los cuatro transistores, los condensadores de entrada y salida y la bobina.

Se utiliza el controlador LM51772 en configuración de control por modo corriente, que permite una transición automática entre los distintos modos de operación y una regulación precisa de la salida. Los transistores están implementados mediante transistores “GaN” (Nitruro de Galio) IGC019S06S1, capaces de trabajar a 600 kHz. El sistema incluye una bobina de 3,3  $\mu$ H, una lazo de realimentación ajustado a la tensión objetivo, y condensadores cerámicos/electrolíticos que garantizan bajo rizado y estabilidad.

La PCB se ha diseñado en dos capas, con planos diferenciados para masa analógica y de potencia, así como puntos de test para verificación funcional.

#### **4. Conclusiones**

El convertidor diseñado en este proyecto representa una solución tecnológicamente avanzada y económicamente viable para su integración en aplicaciones reales. Su flexibilidad de entrada, eficiencia mejorada y diseño compacto lo convierten en un sistema adecuado para alimentar electrónica de control en entornos exigentes como instalaciones fotovoltaicas, vehículos eléctricos ligeros o sistemas industriales descentralizados.

El uso de transistores “GaN” permite anticipar una evolución futura del diseño hacia módulos aún más compactos y sostenibles. Se concluye que el sistema es reproducible, escalable y fácilmente integrable en arquitecturas electrónicas modernas orientadas a la eficiencia energética.

#### **5. Referencias**

- [1] Vlassis, N.A.; Papakonstantinou, G.; Tsanakas, P. *Dynamic sensory probabilistic maps for mobile robot localization*. Source: Proceedings. 1998 IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications (Cat. No.98CH36190) New York, NY, USA: IEEE, 1998.p.718-23 vol.2 of 3 vol. xlv+2010 pp. 11.

- [2] Loeffler, B. “Cloud Computing: What is Infrastructure as a Service”, Microsoft Technet Magazine, October 2011. <https://technet.microsoft.com/en-us/magazine/hh509051.aspx>
- [3] Herrero Alcántara, T. “Big Data: ¿Moda u oportunidad de negocio para el emprendedor?”, Think Big, Octubre 2014. <http://blogthinkbig.com/big-data-emprendedor/>.

# High-efficiency DC/DC converter to power control electronics from solar panels in bicycle parking facilities

**Author: Fernández Pérez, Alejandro**

Director: Teijeiro Bello, Jesús.

Supportive entity: Future Electronics

## PROYECT SUMMARY

### 1. Introduction

The growth of renewable energies and the expansion of autonomous systems have led to the development of power electronics solutions (in this case converters) that are efficient, compact, and capable of adapting to environments with high variability in input voltage. A representative case is the power supply of control electronics from solar sources, where the available voltage can vary substantially depending on environmental conditions.

To ensure stable and reliable operation of the associated electronics, it is necessary to design converters capable of maintaining a regulated output voltage regardless of input conditions, while optimizing energy efficiency and system size.

### 2. Project definition

This Final Degree Project focuses on the design of a non-inverting buck-boost DC-DC converter based on the LM51772 controller from Texas Instruments. The system has been designed to convert input voltages between 8 V and 48 V into a stable 12 V output, with a maximum load current of 5 A.

The main purpose is future application in the power supply of control electronics for renewable energy systems and autonomous devices, where space, efficiency, and cost constraints are decisive factors. For this project, a four-transistor buck-boost topology was chosen, which meets the need to maintain signal polarity and improve system efficiency across all operating ranges.

### 3. Model/system/tool description

The converter is designed with a four-transistor architecture that allows it to operate in buck, boost, or buck-boost modes, depending on the input conditions. The system is divided into

two main blocks: the control block, consisting of the LM51772 controller and passive components to form the control loop, and the power block, consisting of the four transistors, input and output capacitors, and the coil.

The LM51772 controller is used in a current mode control configuration, which allows automatic transition between the different operating modes and precise output regulation. The transistors are implemented using IGC019S06S1 gallium nitride (GaN) transistors, capable of operating at 600 kHz. The system includes a 3.3  $\mu$ H coil, a feedback loop adjusted to the target voltage, and ceramic/electrolytic capacitors that guarantee low ripple and stability.

The PCB has been designed in two layers, with separate planes for analog and power ground, as well as test points for functional verification.

#### **4. Conclusions**

The converter designed in this project represents a technologically advanced and economically viable solution for integration into real-world applications. Its input flexibility, improved efficiency, and compact design make it a suitable system for powering control electronics in demanding environments such as photovoltaic installations, light electric vehicles, or decentralized industrial systems.

The use of GaN transistors allows us to anticipate future design developments towards even more compact and sustainable modules. We conclude that the system is reproducible, scalable, and easily integrable into modern energy-efficient electronic architectures.

#### **5. References**

- [1] Vlassis, N.A.; Papakonstantinou, G.; Tsanakas, P. *Dynamic sensory probabilistic maps for mobile robot localization*. Source: Proceedings. 1998 IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications (Cat. No.98CH36190) New York, NY, USA: IEEE, 1998.p.718-23 vol.2 of 3 vol. xlv+2010 pp. 11.
- [2] Loeffler, B. "Cloud Computing: What is Infrastructure as a Service", Microsoft Technet Magazine, October 2011. <https://technet.microsoft.com/en-us/magazine/hh509051.aspx>
- [3] Herrero Alcántara, T. "Big Data: ¿Moda u oportunidad de negocio para el emprendedor?", Think Big, Octubre 2014. <http://blogthinkbig.com/big-data-emprendedor/>.





## Índice de la memoria

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>5</b>
1.1 Motivación del proyecto .....	5
1.2 Objetivos del proyecto .....	6
1.3 Metodología .....	8
<b>Capítulo 2. Estado De La Cuestión.....</b>	<b>9</b>
2.1 Comparación de tecnologías DC-DC.....	9
2.1.1 Consideración del Flyback como Alternativa .....	11
2.2 Tecnologías de transistores: Silicio vs GaN.....	12
2.3 Comparativa de controladores comerciales .....	14
<b>Capítulo 3. Fundamentos Teóricos.....</b>	<b>18</b>
3.1 Tipos de tecnologías utilizadas en el diseño .....	18
3.1.1 Convertidores conmutados DC-DC.....	18
3.1.2 Transistores de potencia: GaN vs Silicio .....	19
3.1.3 Controlador LM51772.....	19
3.1.4 Herramientas de diseño asistido (KiCad).....	20
3.2 Funcionamiento de la topología buck-boost de cuatro transistores.....	20
3.2.1 Estructura del convertidor.....	21
3.2.2 Modos de operación .....	21
3.2.3 Ventajas frente a otras topologías .....	22
3.2.4 Aplicación al proyecto .....	22
<b>Capítulo 4. Sistema/Modelo Desarrollado.....</b>	<b>24</b>
4.1 Especificaciones del proyecto.....	24
4.2 Dimensionamiento y elección de componentes .....	25
4.2.1 Transistores de potencia.....	25
4.2.2 Controlador LM51772.....	26
4.2.3 Bobina .....	26
4.2.4 Condensadores .....	27
4.2.5 Pasivos auxiliares.....	27

4.3	Diseño del esquemático .....	29
4.3.1	Entrada .....	29
4.3.2	Etapa de potencia .....	30
4.3.3	Controlador LM51772 .....	32
4.3.4	Salida .....	33
4.3.5	Componentes auxiliares .....	34
4.4	Diseño de la PCB .....	35
4.4.1	Herramientas utilizadas .....	36
4.4.2	Consideraciones generales del layout .....	36
4.4.3	Disposición de los componentes .....	39
<b>Capítulo 5. Análisis de Resultados.....</b>		<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
<b>Capítulo 6. Viabilidad Económica y Sostenibilidad .....</b>		<b>45</b>
6.1	Estimación costes del prototipo .....	45
6.2	Viabilidad en producción.....	46
6.3	Sostenibilidad en el diseño .....	48
6.4	Comparación con soluciones comerciales .....	49
<b>Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros .....</b>		<b>51</b>
<b>Capítulo 8. Bibliografía.....</b>		<b>55</b>
<b>ANEXO I</b>		<b>56</b>

## *Índice de figuras*

Figura 1. Esquemático completo de la placa .....	29
Figura 2. Filtro de entrada Vin .....	30
Figura 3. Pin de entrada Vin.....	30
Figura 4. Circuito de potencia .....	31
Figura 5. Controlador LM51772 .....	33
Figura 6. Pin y Test point de salida Vout .....	34
Figura 7. Condensadores cerámicos de salida Vout.....	34
Figura 8. Layout de la PCB .....	35
Figura 9. Layout de la PCB con solo el plano de masa .....	37
Figura 10. Layout de la PCB con solo el plano de alimentación.....	38
Figura 11. Anchos de pista de la PCB .....	39
Figura 12. Parte central del layout.....	39
Figura 13. Parte inferior central del layout.....	40
Figura 14. Zona superior central del layout.....	41
Figura 15. Zona inferior derecha del layout .....	41
Figura 16. Parte superior de la PCB .....	42
Figura 17. Zona izquierda del layout.....	43
Figura 18. Zona superior-derecha PCB .....	43
Figura 19. Circuito de control del layout.....	44

## *Índice de tablas*

Tabla 1. Características de las diferentes tipologías DC-DC .....	10
Tabla 2. Comparativa entre tecnología GaN y Si para transistores.....	14
Tabla 3. Especificaciones del sistema .....	24
Tabla 4. Precios estimados para el prototipo de la PCB.....	46
Tabla 5. Precios estimados para producción en serie de la PCB.....	47

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En este proyecto se va a evaluar y diseñar un convertidor DC/DC alimentar la electrónica de control desde los paneles solares. La característica innovadora de este proyecto consiste en el uso de transistores de nitruro de galio (GaN) con el fin de mejorar la eficiencia energética y reducir el tamaño de este.

### *1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO*

Con el auge de la generación eléctrica a partir de fuentes renovables y la implantación de sistemas de control en entornos industriales, de telecomunicaciones y energías limpias, surge la necesidad de soluciones compactas, eficientes y robustas. En el caso de la energía solar fotovoltaica, la tensión de salida de los paneles varía significativamente con la irradiancia y la temperatura, lo que exige convertidores capaces de regular la tensión para garantizar el funcionamiento estable de la electrónica de control.

En este contexto, el desarrollo de convertidores DC-DC se ha convertido en un elemento clave en sectores como la automoción, las telecomunicaciones, la industria aeroespacial o la electrónica de consumo. La demanda creciente de fuentes de alimentación compactas, eficientes y robustas, capaces de adaptarse a condiciones variables, ha impulsado la evolución de nuevas topologías de conversión y tecnologías de conmutación.

Entre las soluciones emergentes destaca el nitruro de galio (GaN), un material que está ganando presencia como alternativa a los tradicionales MOSFETs de silicio. Gracias a sus propiedades eléctricas, los transistores GaN permiten operar a frecuencias de conmutación más altas con menores pérdidas, lo que se traduce en convertidores más eficientes, compactos y con menos componentes pasivos.

Además, el uso generalizado de baterías como fuente de alimentación en dispositivos portátiles, sistemas embarcados o aplicaciones móviles introduce una variabilidad

significativa en la tensión de entrada, que puede comprometer el funcionamiento si no se emplean convertidores capaces de regular dinámicamente la salida. En este sentido, los convertidores buck-boost no inversores representan una solución versátil y eficaz.

En este proyecto se aborda el diseño, implementación y validación de una fuente conmutada basada en la topología buck-boost con capacidad para entregar 12 V a partir de un rango de entrada de 8 V a 48 V. El sistema emplea transistores GaN para optimizar la eficiencia, reducir las pérdidas y minimizar el tamaño. El objetivo es ofrecer una solución robusta, reproducible y escalable, adecuada para su integración en prototipos industriales, sistemas auxiliares en energías renovables o aplicaciones automotrices.

Este trabajo busca demostrar no solo la viabilidad técnica del diseño, sino también su potencial como plataforma versátil en el ámbito de la electrónica de potencia moderna.

## ***1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO***

El objetivo principal de este proyecto es el diseño, implementación y validación de un convertidor DC-DC buck-boost no inversor, capaz de mantener una tensión de salida constante de 12 V, incluso en condiciones de entrada variables comprendidas entre 8 V y 48 V. Para ello, se emplearán transistores de nitruro de galio (GaN) y un controlador síncrono de alto rendimiento, con el propósito de obtener un sistema eficiente, compacto y adecuado para aplicaciones en las que el espacio, la disipación térmica y la robustez son factores críticos.

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos:

- Analizar y comparar diferentes topologías de convertidores DC-DC, destacando sus ventajas y limitaciones, con el fin de justificar la elección de la topología buck-boost no inversora de cuatro transistores.

- Estudiar el funcionamiento y configuración del controlador LM51772, evaluando sus características técnicas, modos de operación (buck, boost, transición) y su compatibilidad con transistores GaN.
- Justificar el uso de tecnología GaN en lugar de MOSFETs de silicio, señalando características como eficiencia, velocidad de conmutación, reducción de tamaño y mejoras térmicas.
- Realizar el dimensionamiento de los componentes activos y pasivos del convertidor, aplicando criterios de diseño para cumplir con las especificaciones requeridas por el usuario en este caso.
- Diseñar el esquemático del sistema, implementando correctamente la arquitectura buck-boost y considerando elementos de protección, arranque suave y detección de corriente.
- Desarrollar el layout de la PCB, optimizado para minimizar inductancias parásitas, favorecer la disipación térmica y evitar perturbaciones de señal en las rutas de potencia y control.
- Evaluar experimentalmente el funcionamiento del sistema, mediante la realización de pruebas en laboratorio que permitan verificar el cumplimiento de los requisitos de diseño.
- Identificar posibles mejoras en el diseño, tanto a nivel de esquemático como de rutado, en base a los resultados obtenidos y las observaciones durante el proceso de validación.
- Valorar la viabilidad económica del diseño, considerando el coste de los componentes seleccionados, la posibilidad de producción a pequeña escala y el uso de tecnologías emergentes como GaN.

### **1.3 METODOLOGÍA**

La metodología seguida en este proyecto ha sido constante y metódica, basada en un enfoque de diseño y validación de sistemas electrónicos. El proceso se ha dividido en varias etapas que permiten abordar el problema de forma ordenada, desde el análisis de necesidades hasta la evaluación del prototipo final. Las principales fases del trabajo han sido:

- **Estudio de diferentes topologías de elevador- reductor:** se investigaron distintas topologías de conversión DC-DC, con el objetivo de seleccionar una solución adecuada en términos de eficiencia, tamaño, viabilidad y simplicidad.
- **Elección del controlador y la topología elegida:** una vez estudiados los tipos de elevadores reductores, se eligió el modelo deseado, y con ello el controlador necesario para las especificaciones dadas.
- **Diseño del sistema:** se llevó a cabo el dimensionamiento de los componentes, el diseño del esquemático y el rutado de la PCB, optimizando el rendimiento térmico y eléctrico del conjunto.
- **Compra y elección de los componentes:** después de diseñar el esquemático y el rutado del circuito impreso, se compraron los distintos componentes del sistema en función de las características y precios de estos.
- **Validación experimental:** se realizaron pruebas de funcionamiento sobre el prototipo montado para verificar el cumplimiento de los requisitos, evaluando parámetros como la eficiencia, la respuesta a variaciones de entrada, la estabilidad y el comportamiento térmico.
- **Revisión crítica:** se documentaron las incidencias encontradas durante el desarrollo y se propusieron mejoras para futuras iteraciones del diseño.

## **Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN**

Los convertidores DC-DC son elementos fundamentales en sistemas electrónicos alimentados directamente desde paneles solares, donde se requiere transformar una tensión de entrada variable dependiente de las condiciones ambientales y del punto de operación del generador fotovoltaico en una tensión de salida regulada y estable. En este tipo de aplicaciones, la fiabilidad, la eficiencia energética y la capacidad de respuesta rápida ante cambios súbitos en la entrada son factores críticos que condicionan el diseño del sistema de alimentación.

Con el crecimiento de la generación fotovoltaica distribuida y la necesidad de soluciones de conversión compactas, eficientes y robustas para alimentar sistemas de control y comunicaciones, han surgido nuevas topologías, tecnologías de conmutación y dispositivos de control orientados a mejorar el rendimiento y reducir costes. Este capítulo presenta una revisión de las principales alternativas tecnológicas disponibles, con el objetivo de justificar las decisiones adoptadas en el diseño de un convertidor específico para la alimentación de electrónica de control desde paneles solares.

### ***2.1 COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS DC-DC***

Las topologías más comunes incluyen tanto soluciones aisladas como no aisladas. A continuación, en la Tabla 1 se resumen las principales opciones técnicas:

<i>Topología</i>	<i>Salida</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Limitaciones</i>	<i>Aplicaciones típicas</i>
<b>Buck</b>	$V_{out} < V_{in}$	Alta eficiencia, simplicidad	No eleva tensión	Reguladores de tensión, baterías
<b>Boost</b>	$V_{out} > V_{in}$	Pocos componentes, fácil de controlar	No regula por debajo de $V_{in}$	Iluminación LED, powerbanks
<b>Buck-Boost clásico</b>	Inversora	Eleva y reduce	Salida negativa, más ruido	Electrónica industrial puntual
<b>SEPIC</b>	No inversora	Salida positiva con $V_{in}$ variable	Más componentes, eficiencia media	Electrónica embarcada, automoción
<b>Flyback aislado</b>	Aislada	Permite múltiples salidas y aislamiento galvánico	Dependerá de la frecuencia de conmutación y del modo de control.	Cargadores de baterías
<b>4-switch Buck-Boost</b>	No inversora	Alta eficiencia, transición suave	Layout y control más complejos	Electrónica de potencia avanzada

*Tabla 1. Características de las diferentes tipologías DC-DC*

### **2.1.1 CONSIDERACIÓN DEL FLYBACK COMO ALTERNATIVA**

La topología flyback aislado es una de las más utilizadas en fuentes de alimentación y cargadores de baterías debido a su capacidad para proporcionar aislamiento galvánico, su diseño relativamente simple en comparación con otras topologías aisladas, y su versatilidad para generar múltiples salidas con distintos niveles de tensión.

En aplicaciones de fuentes de alimentación, el flyback ha sido una solución ampliamente adoptada cuando se parte de una entrada AC (como una red eléctrica), ya que el aislamiento mejora la seguridad del sistema. Sin embargo, en configuraciones DC-DC como la que se plantea en este proyecto donde el sistema se alimenta a partir de fuentes de tensión continua ya reguladas o protegidas, el aislamiento no siempre es necesario ni recomendable, especialmente si se prioriza la eficiencia, el tamaño y la simplicidad.

Ventajas del flyback:

- Permite aislamiento galvánico, útil en aplicaciones conectadas a la red o entornos críticos.
- Puede generar varias salidas con diferentes tensiones.
- Es fácil de escalar en potencia baja/media sin necesidad de muchos componentes externos.

Limitaciones frente al buck-boost no aislado:

- Mayor tamaño debido al uso de un transformador, que suele ser el componente más voluminoso.
- Mayor complejidad en el diseño: requiere snubber, control del pico de tensión en el switch, compensación adecuada.
- Menor eficiencia que una topología no aislada a potencias medias (40–100 W).
- Aumento de ruido electromagnético (EMI), lo que exige un filtrado más riguroso.

### **El papel del GaN en el flyback**

El uso de transistores de nitruro de galio (GaN) ha mejorado notablemente el rendimiento de los convertidores flyback. Al permitir conmutaciones a frecuencias más altas (por ejemplo, 500 kHz o incluso más de 1 MHz), se consigue:

- Reducir significativamente el tamaño del transformador o bobinas, ya que disminuye la cantidad de energía almacenada por ciclo.
- Minimizar el volumen de los condensadores de entrada y salida.
- Mejorar la eficiencia global del sistema, al reducir las pérdidas por conmutación.

Esto ha hecho que el flyback resurja como opción en diseños compactos, especialmente en cargadores USB-PD o fuentes tipo GaN de pared. Sin embargo, estas ventajas no compensan sus limitaciones cuando:

- El aislamiento no es necesario (como en este proyecto).
- Se busca máxima eficiencia y disipación mínima.
- El diseño debe integrarse dentro de un espacio físico reducido sin necesidad de múltiples salidas.

## ***2.2 TECNOLOGÍAS DE TRANSISTORES: SILICO VS GAN***

En la evolución de los convertidores DC-DC modernos, la elección de la tecnología de conmutación tiene un impacto directo sobre la eficiencia, el tamaño del sistema y la capacidad de integración. Tradicionalmente, los MOSFETs de silicio (Si) han sido el estándar de la industria debido a su bajo coste, disponibilidad y facilidad de control. Sin embargo, el desarrollo de semiconductores de Wide band gap, en particular el nitruro de galio (GaN), ha introducido una nueva generación de dispositivos con características

superiores, especialmente en aplicaciones de alta frecuencia, alta eficiencia y tamaño reducido.

Los MOSFETs convencionales presentan un equilibrio adecuado entre coste, rendimiento y robustez para la mayoría de aplicaciones de potencia media. Sus principales características son:

- Frecuencias de conmutación típicas: hasta 200–400 kHz.
- $R_{DS(on)}$  moderado, que implica pérdidas en conducción.
- Carga de puerta ( $Q_g$ ) elevada, que limita la velocidad de conmutación.
- Mayor dependencia térmica: incremento de pérdidas con la temperatura.
- Alta madurez tecnológica y amplia oferta comercial.

Pese a sus limitaciones, siguen siendo una opción adecuada en diseños donde el coste es crítico y las exigencias térmicas/frecuenciales no son elevadas.

Los transistores GaN han sido diseñados para superar las limitaciones fundamentales del silicio. Estas mejoras son especialmente relevantes en convertidores de alta frecuencia, como el propuesto en este proyecto. Sus principales ventajas son:

- Conmutación ultrarrápida: muy baja  $Q_g$ , lo que reduce pérdidas en cada ciclo.
- Baja  $R_{DS(on)}$ , incluso a altas frecuencias.
- Menor capacitancia parásita, lo que facilita el diseño de layouts rápidos.
- Mayor densidad de potencia: permite reducir inductores y condensadores.
- Menor generación térmica, con eficiencia superior incluso en diseños compactos.

Estas propiedades hacen que los dispositivos GaN sean ideales para convertidores de alta eficiencia en espacios reducidos, como cargadores de batería de bicicletas eléctricas, donde

es prioritario minimizar el volumen del sistema, mejorar la eficiencia energética y evitar la necesidad de disipación activa.

A continuación, se muestra una tabla comparativa de ambas tecnologías.

<i>Característica</i>	<i>MOSFET (Si)</i>	<i>GaN</i>
Frecuencia de conmutación	100–400 kHz	>600 kHz – 1 MHz
Pérdidas por conmutación	Moderadas	Muy bajas
Carga de puerta (Qg)	Alta	Muy baja
RDS_ON	Moderado	Bajo
Sensibilidad al layout	Baja	Alta (por velocidad de conmutación)
Tamaño de los pasivos asociados	Mayor	Menor
Coste	Bajo	Medio-alto (pero bajando)
Eficiencia	Buena	Excelente

*Tabla 2. Comparativa entre tecnología GaN y Si para transistores*

### **2.3 COMPARATIVA DE CONTROLADORES COMERCIALES**

La elección del controlador adecuado es un aspecto fundamental en el diseño de un convertidor DC-DC, ya que determina el modo de operación, la estabilidad del sistema, la

facilidad de integración y la eficiencia global. En este apartado se analizan varias soluciones comerciales disponibles para topologías buck-boost, especialmente aquellas que permiten operar en un rango amplio de tensión de entrada y mantener una tensión de salida regulada, como es el caso de la alimentación de la electrónica de control en aparcamientos de bicicletas..

---

- Requisitos del controlador para este proyecto

Dado el objetivo de diseñar un convertidor DC-DC con:

- Entrada variable entre 8 V y 48 V,
- Salida estable de 12 V,
- Transición continua entre modos buck y boost,
- Y el uso de transistores GaN,

El controlador seleccionado debe cumplir los siguientes criterios:

- Soporte para topología buck-boost no inversora de cuatro transistores.
  - Operación en modo corriente para mejorar la respuesta dinámica.
  - Capacidad para frecuencias altas ( $\geq 600$  kHz).
  - Compatibilidad con transistores GaN (rápida conmutación, bajo  $Q_g$ ).
  - Funciones de protección integradas (OVP, UVLO, SCP, etc.).
  - Sencillez de integración en diseño con alta densidad de potencia.
- 

- Comparativa de soluciones disponibles
-

<i>Controlador</i>	<i>Topología</i>	<i>Frecuencia máx.</i>	<i>Modo de control</i>	<i>Notas relevantes</i>	<i>Controlador</i>
LM51772 (TI)	Buck-Boost 4-switch	600 kHz	Modo corriente pico	Ideal para entrada amplia, soporte GaN, compacto	LM51772 (TI)
LTC3780 (Analog)	Buck-Boost 4-switch	500 kHz	Corriente continua	Versátil, menos optimizado para GaN	LTC3780 (Analog)
TPS63070 (TI)**	Buck-Boost 2-switch	2,4 MHz	Modo voltaje	Integrado, no adecuado para potencias medias-altas	TPS63070 (TI)
MAX77818 (Maxim)	Buck-Boost 4-switch	1 MHz	Control híbrido	Más enfocado a portátiles, menor flexibilidad	MAX77818 (Maxim)

- Justificación de la elección del LM51772

El LM51772 ha sido seleccionado por cumplir de forma precisa los requisitos del diseño. Es un controlador síncrono bidireccional capaz de operar eficientemente en topología buck-boost de cuatro transistores, manteniendo la continuidad de operación incluso en transiciones complejas de entrada. Algunas de sus características clave son:

- Frecuencia ajustable hasta 600 kHz, adecuada para GaN.
- Regulación por modo corriente en cada ciclo (peak current mode).

- Funciones de protección integradas: arranque suave, soft-stop, undervoltage, overcurrent, etc.
- Múltiples opciones de configuración mediante resistencias externas.
- Documentación extensa y buena disponibilidad comercial.

Su diseño está orientado a aplicaciones de automoción, industriales y sistemas de alimentación con entrada variable, lo que lo convierte en una solución idónea para cargadores DC-DC de bicicletas eléctricas, donde la fiabilidad, eficiencia y compacidad son factores clave

## Capítulo 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 3.1 TIPOS DE TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL DISEÑO

El convertidor desarrollado en este proyecto se apoya en diferentes tecnologías clave dentro del campo de la electrónica de potencia. Estas tecnologías abarcan desde las arquitecturas de conversión energética hasta los dispositivos semiconductores de última generación y los controladores de señal. A continuación, se describen las principales.

#### 3.1.1 CONVERTIDORES CONMUTADOS DC-DC

Los convertidores DC-DC transforman una tensión continua de entrada en otra tensión continua de salida utilizando transistores electrónicos (transistores) y elementos pasivos (bobinas y condensadores). A diferencia de los reguladores lineales, trabajan en régimen de conmutación, permitiendo alcanzar eficiencias superiores al 90 %.

Las principales topologías incluyen:

- **Buck:** reducción de tensión.
- **Boost:** elevación de tensión.
- **Buck-Boost:** permite elevar y reducir la tensión de salida.
- **SEPIC:** salida no inversora con entrada variable.
- **Flyback (aislado):** usado donde se necesita aislamiento galvánico.

En este proyecto se emplea una topología buck-boost no inversora de cuatro transistores, seleccionada por su capacidad para mantener una tensión de salida constante (12 V) frente a una entrada variable (8–48 V), sin invertir la polaridad.

### 3.1.2 TRANSISTORES DE POTENCIA: GAN VS SILICIO

Los transistores de potencia son los encargados de realizar la conmutación de energía. Tradicionalmente se han utilizado MOSFETs de silicio, pero en aplicaciones de alta frecuencia y eficiencia compacta, los transistores GaN (nitruro de galio) representan una solución más avanzada.

- **MOSFETs de silicio:** más económicos, buena disponibilidad, pero limitados en frecuencia y eficiencia a altas potencias.
- **GaN:** menor  $R_{DSon}$ , carga de puerta baja, conmutación rápida, ideal para diseños compactos y eficientes. Son especialmente adecuados para operar a 600 kHz o más, como se exige en este proyecto.

Se han utilizado IGC019S06S1, transistores GaN comerciales con excelente rendimiento para aplicaciones de media potencia.

### 3.1.3 CONTROLADOR LM51772

El controlador LM51772 está específicamente diseñado para topologías buck-boost no inversoras de cuatro transistores. Sus principales características son:

- Operación continua en los tres modos (buck, boost y buck-boost).
- Frecuencia ajustable hasta 600 kHz.
- Control en modo corriente pico, que mejora la estabilidad dinámica.
- Protecciones integradas contra sobrecorriente y subtensión.
- Compatibilidad con transistores de alta conmutación como GaN.

Gracias a este controlador, el diseño se simplifica, se reduce el número de componentes externos y se mejora la eficiencia en todo el rango de funcionamiento.

### **3.1.4 HERRAMIENTAS DE DISEÑO ASISTIDO (KICAD)**

El diseño se ha realizado mediante software de diseño electrónico (como KiCad), que permite generar tanto el esquemático funcional como el layout de la PCB. Estas herramientas facilitan:

- La organización del circuito.
- La optimización del trazado de pistas.
- El cumplimiento de reglas de diseño para alta frecuencia.
- La integración de modelos de componentes y librerías personalizadas.
- Herramientas de cálculo de pistas.

Esto ha permitido obtener una placa compacta, reproducible y lista para fabricación

## **3.2 *FUNCIONAMIENTO DE LA TOPOLOGÍA BUCK-BOOST DE CUATRO TRANSISTORES***

La topología buck-boost no inversora de cuatro transistores (también conocida como 4-switch buck-boost) es una arquitectura versátil que permite mantener una tensión de salida constante tanto si la entrada es mayor como menor que la salida. A diferencia del buck-boost clásico, esta variante no invierte la polaridad de la salida y ofrece una transición suave entre los modos step-down (buck) y step-up (boost).

Esta topología es especialmente adecuada para aplicaciones en las que la tensión de entrada puede fluctuar ampliamente, como ocurre en sistemas alimentados por baterías, adaptadores universales o paneles solares-

### 3.2.1 ESTRUCTURA DEL CONVERTIDOR

El convertidor consta de cuatro transistores activos (normalmente MOSFETs o GaN) dispuestos en dos ramas:

- **Rama Buck:** formada por Q1 (superior) y Q2 (inferior).
- **Rama Boost:** formada por Q3 (superior) y Q4 (inferior).

Un inductor de acoplamiento está situado entre ambas ramas, y los condensadores de entrada y salida aseguran el filtrado energético.

La posición del inductor entre los puentes permite la operación continua del convertidor y facilita la transición entre los tres modos de funcionamiento.

### 3.2.2 MODOS DE OPERACIÓN

La topología opera en tres modos distintos, según la relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida:

#### **Modo Buck ( $V_{in} > V_{out}$ )**

- El convertidor actúa como un buck clásico.
- Solo se activan los transistores de la rama buck (Q1 y Q2).
- Q3 permanece apagado y Q4 cerrado (sirve como diodo).
- La energía fluye directamente de la entrada a la salida a través del inductor.

#### **Modo Boost ( $V_{in} < V_{out}$ )**

- El convertidor actúa como un boost clásico.
- Solo se activan los transistores de la rama boost (Q3 y Q4).
- Q1 permanece apagado y Q2 cerrado (sirve como diodo).

- La energía se almacena en el inductor desde la entrada y se transfiere a la salida elevando la tensión.

### **Modo Buck-Boost (transición)**

- Ocurre cuando  $V_{in} \approx V_{out}$ .
- El controlador activa todas las ramas de forma alterna.
- Se modulan los cuatro transistores para mantener una salida estable.
- Permite una transición continua sin caídas ni picos de tensión.
- El LM51772 maneja automáticamente esta transición mediante control en modo corriente.

### **3.2.3 VENTAJAS FRENTE A OTRAS TOPOLOGÍAS**

- No invierte la polaridad (a diferencia del buck-boost clásico).
- Permite alta eficiencia en todo el rango de entrada.
- Mantiene la tensión de salida regulada de forma continua.
- Facilita el diseño compacto al integrar las funciones de dos convertidores en uno.
- Es compatible con dispositivos GaN, lo que mejora aún más la eficiencia y permite conmutar a frecuencias elevadas, reduciendo el tamaño del inductor.

### **3.2.4 APLICACIÓN AL PROYECTO**

El convertidor desarrollado en este proyecto opera con un rango de entrada de 8 V a 48 V y regula la salida a 12 V constantes. Gracias a esta topología, se asegura una transición sin cortes ni saltos de tensión en todo el rango de funcionamiento. El uso del controlador LM51772 permite implementar este control de forma sencilla, fiable y con eficiencia

elevada, especialmente en combinación con transistores GaN, optimizando así el rendimiento térmico y energético del sistema.

## Capítulo 4. SISTEMA/MODELO DESARROLLADO

### 4.1 ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

El objetivo principal de este proyecto es el diseño, desarrollo y validación de una fuente de alimentación conmutada capaz de proporcionar una salida regulada de 12 V a partir de un rango amplio de tensiones de entrada comprendido entre 8 V y 48 V. El sistema debe ser capaz de entregar una corriente de salida máxima de 5 A, lo que implica una potencia de salida máxima de 60 W. Para lograr una buena eficiencia y un tamaño compacto, se ha optado por el uso de un controlador síncrono buck-boost y transistores GaN, operando a una frecuencia de 600 kHz.

A continuación, se resumen las principales especificaciones técnicas del sistema:

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Tensión de entrada $V_{in}$	8 V – 48 V
Tensión de salida $V_{out}$	12 V $\pm$ 3%
Corriente máxima $I_{out}$	5 A
Frecuencia de conmutación	600 kHz
Tecnología de potencia	GaN (IGC019S06S1)
Controlador	LM51772

*Tabla 3. Especificaciones del sistema*

## **4.2 DIMENSIONAMIENTO Y ELECCIÓN DE COMPONENTES**

El dimensionamiento de los componentes del convertidor se ha realizado teniendo en cuenta las especificaciones establecidas en el apartado 5.1, las recomendaciones del fabricante Texas Instruments para el controlador LM51772 y una hoja de cálculo Excel aportada por Texas Instruments para una aplicación determinada. El objetivo ha sido garantizar un funcionamiento fiable en todo el rango de entrada (8 V–48 V), manteniendo la salida regulada a 12 V con un margen de  $\pm 3\%$ , y optimizando la eficiencia térmica y eléctrica.

Diseño del esquemático

### **4.2.1 TRANSISTORES DE POTENCIA**

Se han seleccionado transistores IGC019S06S1 basados en tecnología GaN (nitruro de galio) por sus excelentes prestaciones en eficiencia y densidad de potencia:

- $R_{DS\_on} = 19\text{ m}\Omega \rightarrow$  pérdidas de conducción reducidas.
- Alta velocidad de conmutación  $\rightarrow$  ideal para frecuencias elevadas (600 kHz).
- Baja carga de puerta ( $Q_g$ )  $\rightarrow$  menores pérdidas de conmutación.
- Encapsulado DFN compacto  $\rightarrow$  facilita integración térmica y eléctrica.

Las pérdidas por conducción y conmutación por transistor en condiciones nominales se han estimado como:

$$P_{cond} = I^2 \cdot R_{DS(on)} = 5^2 \cdot 0,019 = 0,475W$$

$$P_{SW} = \frac{1}{2} \cdot V_{DS} \cdot I \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot f = 0,5 \cdot 24 \cdot 5 \cdot 30 \cdot 10^{-9} \cdot 600 \cdot 10^3 = 1,08W$$

## 4.2.2 CONTROLADOR LM51772

Se ha elegido el controlador LM51772 de Texas Instruments por ser compatible con topologías buck-boost no inversoras de cuatro transistores y operar en modo corriente pico.

- Frecuencia de conmutación: 600 kHz
- Modo de control: peak current mode
- Protecciones: UVLO, OCP, soft-start, PGOOD
- Configuración flexible mediante resistencias y compensación externa

La frecuencia se ajusta mediante la resistencia  $R_{RT}$ :

$$f_{SW} = \frac{10^5}{R_{RT}}$$

## 4.2.3 BOBINA

La bobina se ha dimensionado para limitar el rizado de corriente al 30 % de la corriente máxima, garantizando operación en modo CCM (modo de conducción continua):

$$\Delta I_L = 0,3 \cdot I_{OUT} = 1,5A$$

$$L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot D}{f \cdot \Delta I_L} ; D = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

En este cálculo se ha asumido operación en modo buck, por ser el caso dominante para  $V_{IN}=16\text{ V}$  y  $V_{OUT}=12\text{ V}$ . En otras condiciones, el LM51772 gestiona automáticamente la transición entre modos. Por tanto:

$$D = \frac{12}{16} = 0,75 \quad ; \quad L = \frac{(16 - 12) \cdot 0,75}{600 \cdot 10^3 \cdot 1,5} = 3,33\mu H$$

#### 4.2.4 CONDENSADORES

- **Condensadores de salida**

$$C_{OUT} \geq \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f \cdot \Delta V_{OUT}} = \frac{1,5}{8 \cdot 600 \cdot 10^3 \cdot 0,24} = 1,3\mu F$$

En este proyecto se usarán  $4 \times 10 \mu F$  cerámicos X7R  $\rightarrow$  mayor fiabilidad, baja ESR, buena respuesta en alta frecuencia.

- **Condensadores de entrada**

Para el caso nominal  $V_{IN}=16 V$  y  $V_{OUT}=12 V$ :

$$C_{IN} \geq \frac{I_{OUT} \cdot D \cdot (1 - D)}{f \cdot \Delta V_{IN}} = \frac{5 \cdot 0,75 \cdot (1 - 0,75)}{600 \cdot 10^3 \cdot 0,5} = 3,125\mu F$$

Este cálculo considera operación en CCM sin efectos de ESR. En la implementación se ha sobredimensionado la capacidad de entrada y se ha combinado tecnología cerámica y electrolítica para garantizar estabilidad ante transitorios rápidos y minimizar el rizado total.

Para ello se han cogido los siguientes condensadores:

- $1 \times 100 \mu F$  electrolítico (reserva energética)

#### 4.2.5 PASIVOS AUXILIARES

- **Soft-start**

Con  $I_{SS} = 5\mu A$ ,  $V_{REF} = 0,8 V$  para  $t_{SS} \approx 2 ms$

$$C_{SS} \geq \frac{I_{SS} \cdot t_{SS}}{V_{REF}} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{0,8} = 22nF$$

Se ha cogido un valor normalizado de 22 nF.

- **UVLO (Undervoltage Lock-Out)**

Para activar el convertidor a  $V_{IN} \geq 9$  V usando  $V_{EN}=1,2$  V

$$\frac{R_{UP}}{R_{DOWN}} = \frac{9}{1,2} - 1 = 6,5 \quad \frac{R_{UP}}{R_{DOWN}} = \frac{9}{1,2} - 1 = 6,5$$

Para esta relación de resistencias se han elegido:

$$R_{UP} = 62k\Omega, R_{DOWN} = 10k\Omega$$

- **Red de realimentación**

$$V_O = V_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_{FB1}}{R_{FB2}}\right) \Rightarrow \frac{R_{FB1}}{R_{FB2}} = \frac{12}{0,8} - 1 = 14$$

$$R_{FB2} = 9,76k\Omega ; R_{FB1} \approx 137k\Omega$$

### 4.3 DISEÑO DEL ESQUEMÁTICO

El esquemático ha sido desarrollado en KiCad, dividiendo el sistema en bloques funcionales que reflejan la arquitectura interna: entrada, potencia, control y salida. Se ha priorizado una disposición clara para facilitar el diseño de la PCB y la depuración.

En la Figura 1 se puede observar el esquemático completo de la placa. En ella se puede diferenciar claramente la parte de control del circuito de potencia, siendo la primera la mitad del esquemático correspondiente al cuadro azul y el segundo, el cuadro rojo. También se han representado las zonas de entrada (cuadros verdes) y las zonas de salida (cuadro amarillo).

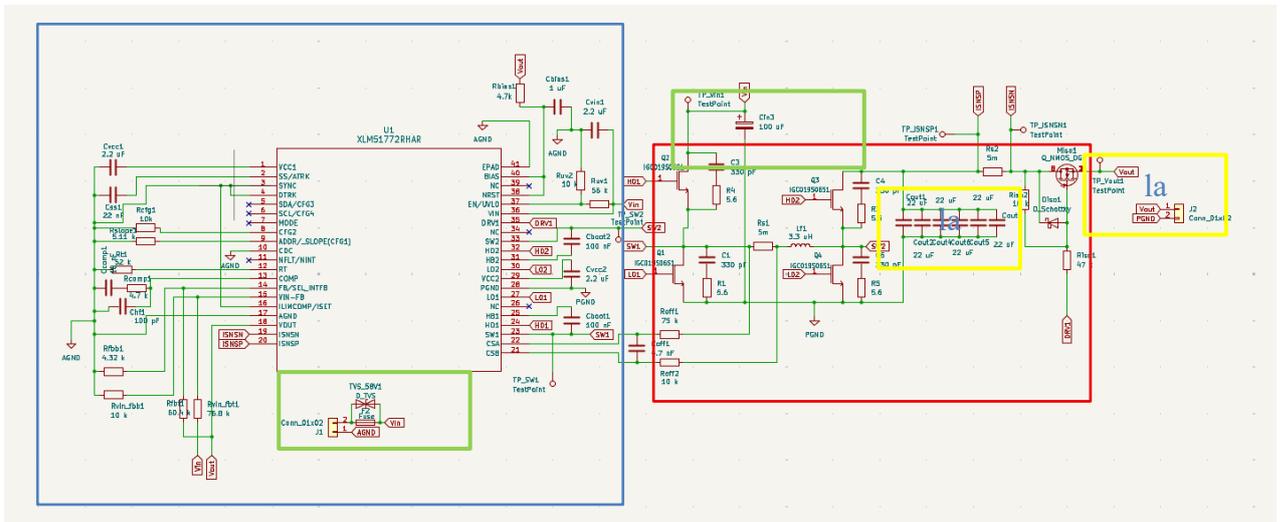


Figura 1. Esquemático completo de la placa

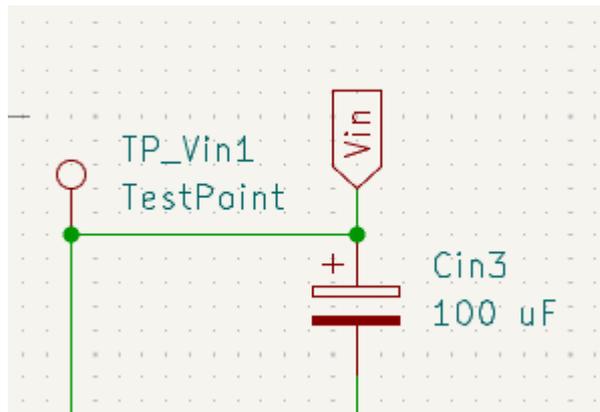
#### 4.3.1 ENTRADA

Incluye:

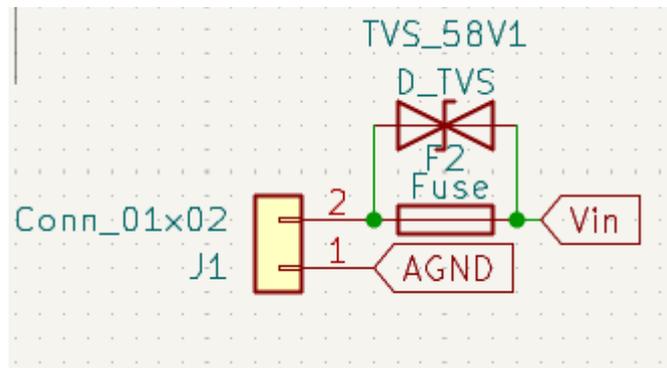
- Filtro de entrada con condensador electrolítico.
- TVS para protección contra sobretensiones.

- Test point para monitorización de VIN.

En la Figura 2 y Figura 3 podemos observar en más detalle el bloque de entrada. La primera imagen corresponde con el filtro de entrada y el test point. La segunda se corresponde con el pin de entrada y el filtro protector TVS.



*Figura 2. Filtro de entrada Vin*



*Figura 3. Pin de entrada Vin*

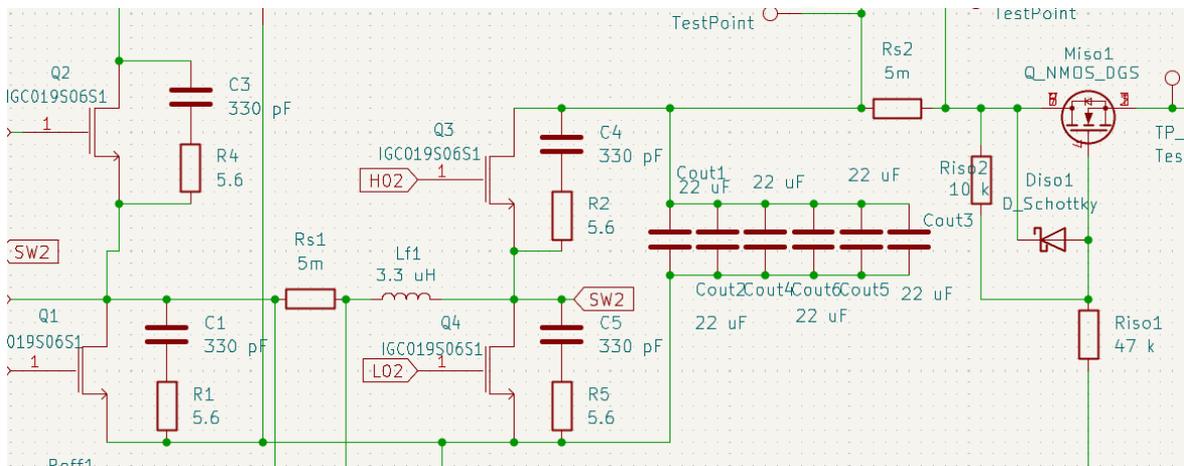
### 4.3.2 ETAPA DE POTENCIA

Implementa la topología buck-boost no inversora de 4 transistores:

- Q1 y Q2 forman la rama buck, Q3 y Q4 la rama boost. Se utilizan transistores GaN IGC019S06S1.
- Bobina de 3.3  $\mu\text{H}$  conectada entre ambas ramas.
- Nodo de conmutación dividido (SW1 y SW2).
- Diodo Schottky en la salida para protección contra caídas negativas.

La elección de un inductor de 3.3  $\mu\text{H}$  permite mantener el rizado de corriente en modo continuo (CCM) dentro de un rango aceptable y una respuesta rápida ante transitorios. Se han dimensionado también los condensadores de entrada y salida para mantener el rizado de tensión dentro de los límites establecidos por el LM51772.

A continuación, se ve en la Figura 4 una imagen más detallada del mismo. En ella se puede observar los transistores GaN (Q1, Q2, Q3 y Q4) con su correspondiente snubber, la bobina y la protección del diodo schotcky con el mosfet. Además, se puede observar también las resistencias de medida de la corriente (Rs1 y Rs2), encargadas de medir las corrientes de bobina y salida y realimentadas al LM51772.



*Figura 4. Circuito de potencia*

### 4.3.3 CONTROLADOR LM51772

El controlador LM51772 se encuentra justo antes del circuito de potencia. En el esquemático, se han conectado todos los pines críticos según las recomendaciones del fabricante:

- RT con  $RRT = 52.3 \text{ k}\Omega \rightarrow 600 \text{ kHz}$ .
- SS con  $CSS = 22 \text{ nF} \rightarrow 2 \text{ ms}$ .
- FB con divisor RFB1, RFB2 ajustado a 12 V.
- COMP con red R-C-C correctamente implementada.
- EN con divisor UVLO.
- Pines DRVx y BOOTx conectados a las compuertas de los transistores y sus respectivos bootstrap.
- Pines de alimentación (VCCx, VDD) desacoplados con condensadores cerámicos de baja ESR.

Los pines ISNP e ISNN están conectados a través de una resistencia de shunt de  $5 \text{ m}\Omega$ , ubicada entre el nodo SW y el inductor, de forma que el controlador pueda monitorizar la corriente real y aplicar tanto el control en modo corriente como las protecciones internas de sobrecorriente.

Además, se han dejado accesibles los pines PGOOD, SYNC y otras salidas auxiliares mediante test points, facilitando su monitorización.

En la Figura 5 se muestra el controlador LM51772 con los diferentes componentes auxiliares conectados a cada pin.

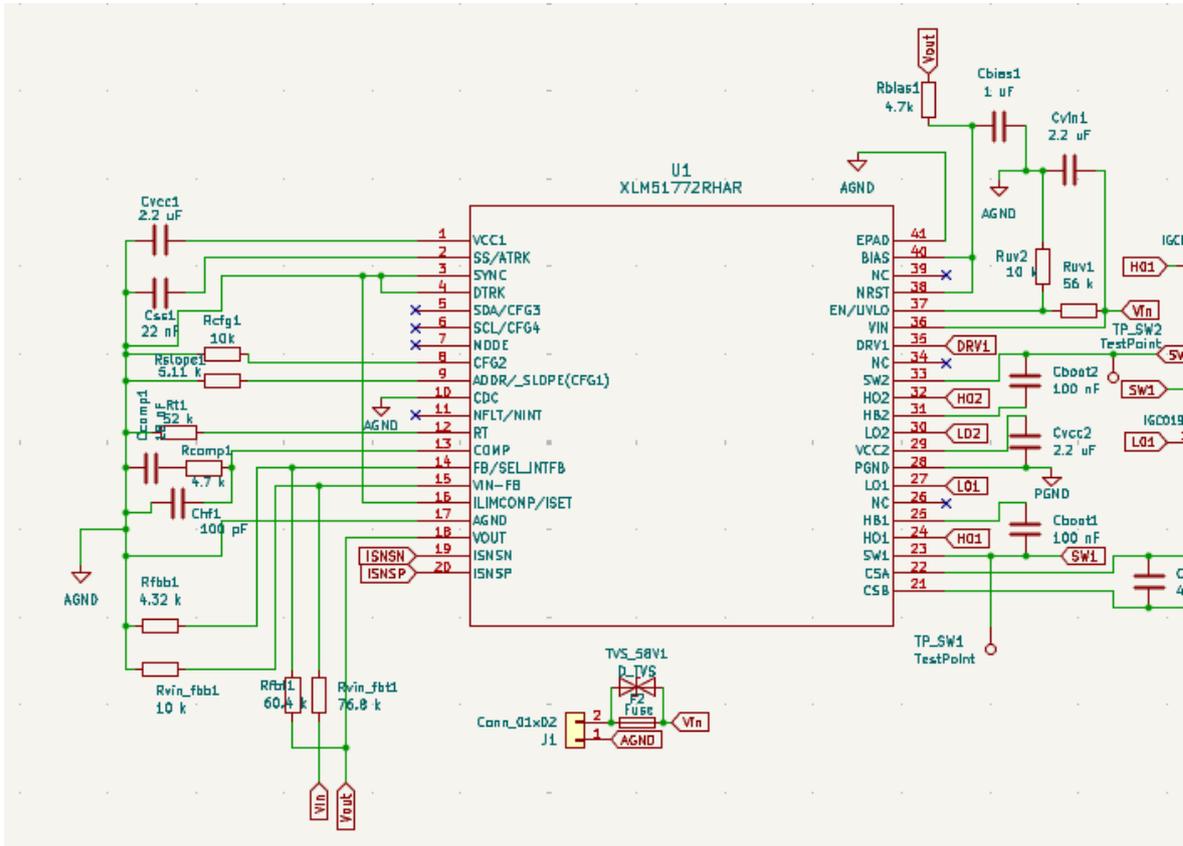


Figura 5. Controlador LM51772

#### 4.3.4 SALIDA

El bloque de salida se compone de lo siguiente:

- Red de salida con 6x22  $\mu$ F cerámicos
- Test point para VOUT y validación de rizado.
- Conector para carga externa o carga simulada.

A continuación, la Figura 6 y la Figura 7 muestran el pin de salida y el test point de Vout, así como los condensadores cerámicos de salida Vout.

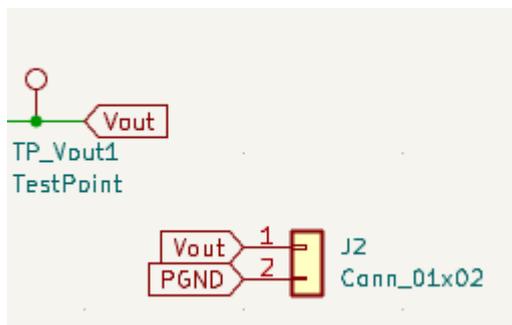


Figura 6. Pin y Test point de salida Vout

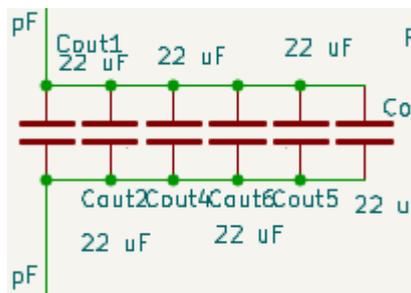


Figura 7. Condensadores cerámicos de salida Vout

#### 4.3.5 COMPONENTES AUXILIARES

Entre los componentes auxiliares cabe mencionar los siguientes:

- Pull-ups/pull-downs para EN, PGND, etc.
- Condensadores de desacoplo (100 nF – 1  $\mu$ F) en pines críticos.
- Red de compensación accesible desde pin COMP.
- Test points en señales clave para medida.
- Pads de medida para los nodos SW1, SW2 y VOUT.

Todos los componentes están seleccionados según criterios eléctricos y recomendaciones del fabricante, con valores comerciales estándar y adecuados para el montaje de la placa. Las referencias están contenidas en la hoja de cálculo de dimensionamiento y el listado de materiales (BOM) asociado al diseño.

En la Figura 6 vista en el punto 4.3.3 se pueden observar los diferentes componentes auxiliares conectados al LM51772.

#### 4.4 DISEÑO DE LA PCB

El objetivo principal del diseño de la PCB fue es la reproducción del esquemático en una fuente física, que es la que realmente se va a usar en la realidad. Esta etapa busca optimizar tanto el rendimiento eléctrico como la disipación térmica, garantizando la integridad de la señal y reduciendo interferencias electromagnéticas (EMI). El diseño del layout define directamente el comportamiento dinámico del sistema, por lo que su calidad impacta en la eficiencia, fiabilidad y facilidad de monitorización del convertidor.

En la Figura 8 se puede observar el diseño final de la PCB, mostrando en rojo la capa correspondiente al plano de alimentación, y en azul a los planos de masa.

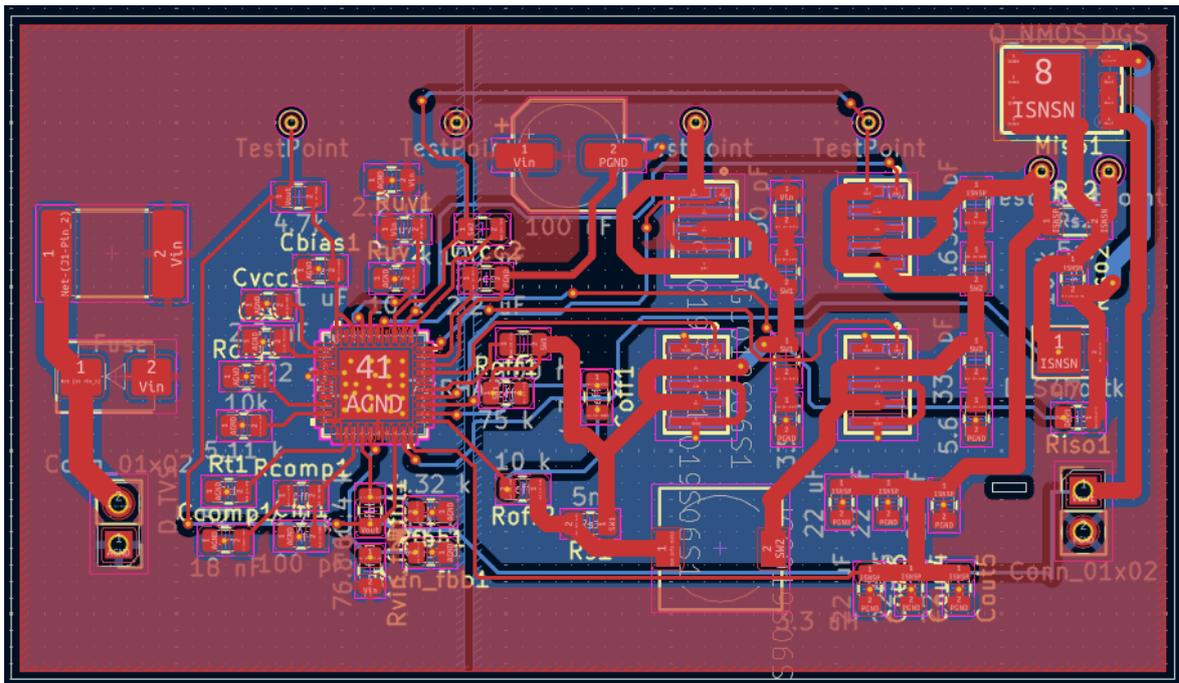


Figura 8. Layout de la PCB

#### **4.4.1 HERRAMIENTAS UTILIZADAS**

El diseño se realizó utilizando la interfaz para diseño de PCB's KiCad, una herramienta de diseño electrónico de código abierto que permite la creación de esquemáticos y diseño de PCBs. Para el enrutamiento automático se empleó el programa FreeRouting, ejecutado mediante la máquina virtual Java Temurin JDK 17, necesaria para lanzar la interfaz gráfica del autorouter. Las huellas de componentes y modelos 3D del controlador LM51772 y los transistores GaN se obtuvieron desde la plataforma UltraLibrarian y otras bibliotecas de componentes. Por último, los componentes utilizados fueron seleccionados del distribuidor Mouser Electronics, el cual ofrece datos actualizados de disponibilidad y encapsulados.

#### **4.4.2 CONSIDERACIONES GENERALES DEL LAYOUT**

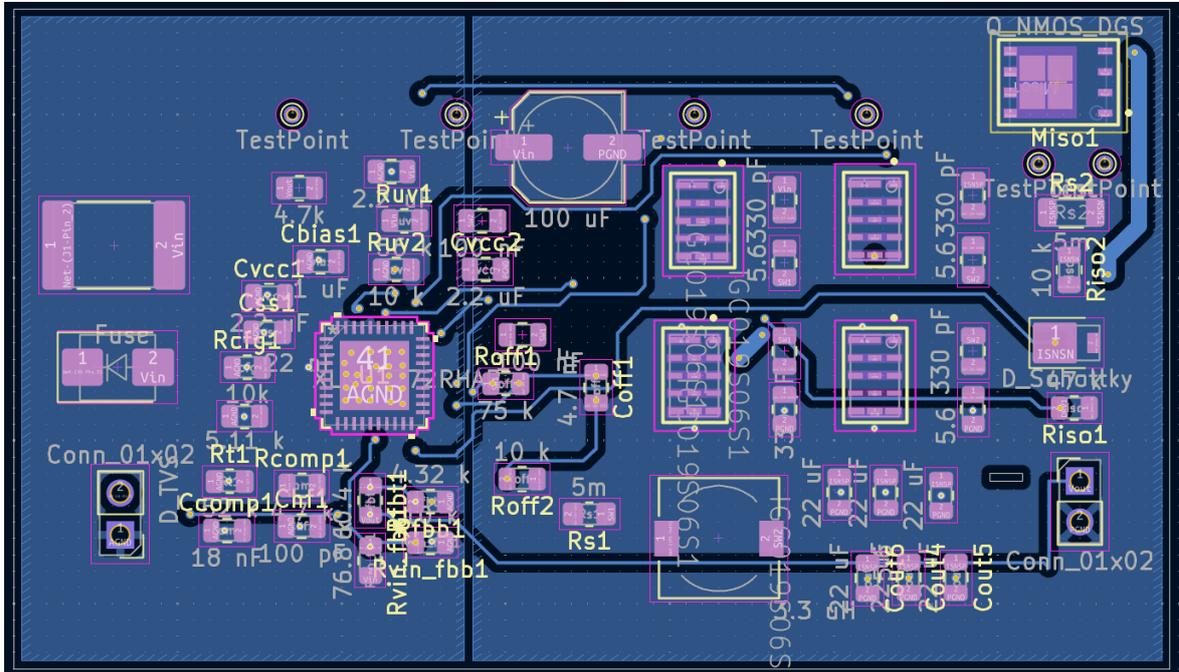
##### **Asignación de huellas y estructura de capas**

Inicialmente, se asignó manualmente una huella a cada componente del esquemático. Para los transistores GaN y el controlador LM51772, se descargaron e importaron las huellas específicas, asegurando un buen encapsulado y compatibilidad con los pads. La estructura de la PCB se definió con dos capas: una destinada al plano de masa y otra para enrutamiento de señales y alimentación.

##### **División de planos de masa**

El plano de masa se dividió cuidadosamente en dos dominios: AGND (masa del circuito de control) y PGND (masa del circuito de potencia). Esta separación permite aislar la señal de control de los transitorios de alta potencia y evitar la contaminación del lazo de realimentación. Las masas se conectan en un único punto de unión para evitar la formación de bucles parásitos.

En la Figura 9 se proyecta el layout de la PCB, mostrando únicamente la parte correspondiente a la capa de masa.

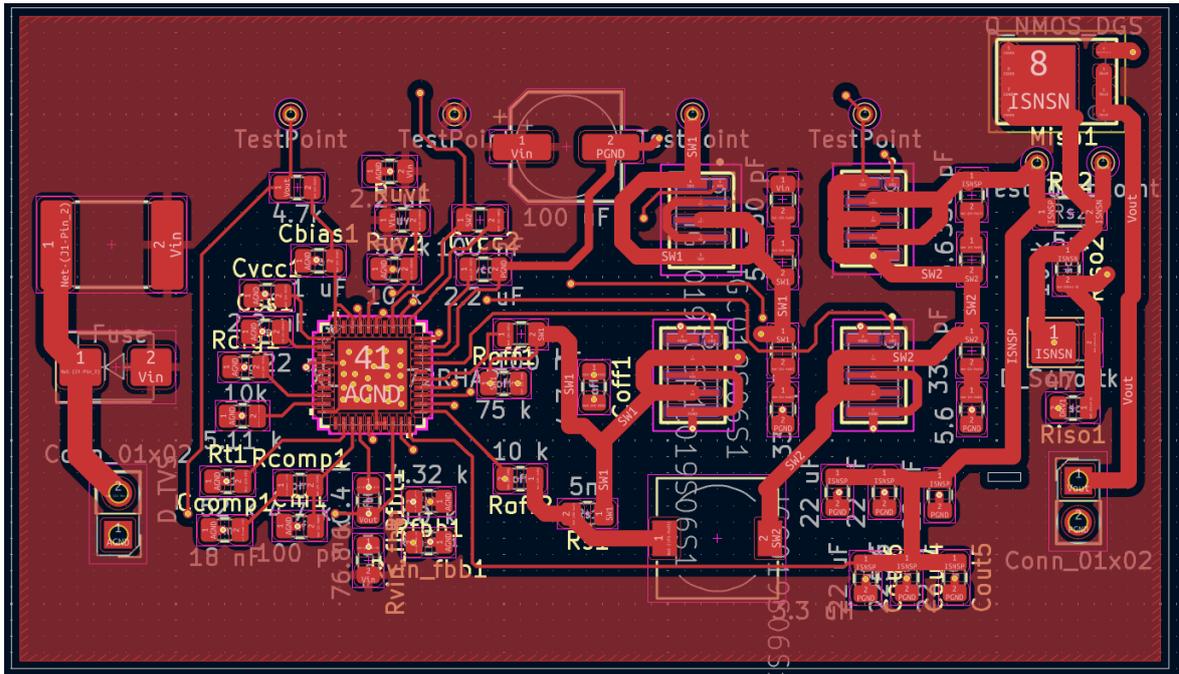


*Figura 9. Layout de la PCB con solo el plano de masa*

### **Distribución de señales y uso de vías**

La capa superior se utilizó para enrutar principalmente la tensión de entrada (VIN). Como no era posible realizar todo el enrutamiento en una única capa debido a limitaciones geométricas, se utilizaron vías para trasladar las señales entre capas. Algunas pistas transcurren parcialmente por la capa inferior, aprovechando el espacio disponible en el plano de masa.

En la Figura 10 se puede observar la parte del layout de la PCB, correspondiente a la capa de alimentación (VIN).

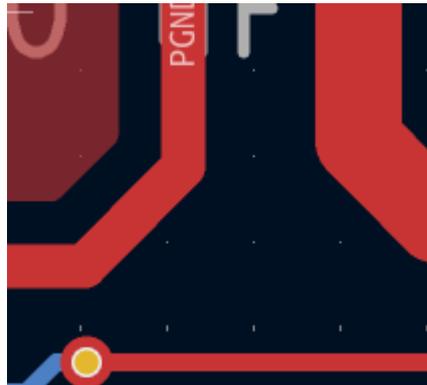


*Figura 10. Layout de la PCB con solo el plano de alimentación*

### Ancho de pistas

La mayoría de las pistas de señal se diseñaron con un ancho de 0,2 mm, suficiente para intensidades bajas. En cambio, las pistas que transportan corrientes elevadas en la etapa de potencia se diseñaron con 1mm de ancho para reducir pérdidas por conducción y evitar sobrecalentamientos (esto es lo más importante, una sobrecorriente puede quemar la placa). También cabe destacar que las pistas para unir zonas de masa en la capa de alimentación se dimensionaron con un ancho de 0,5 mm.

En la Figura 11 se ha querido ilustrar los diferentes anchos de vía que hay en la PCB.



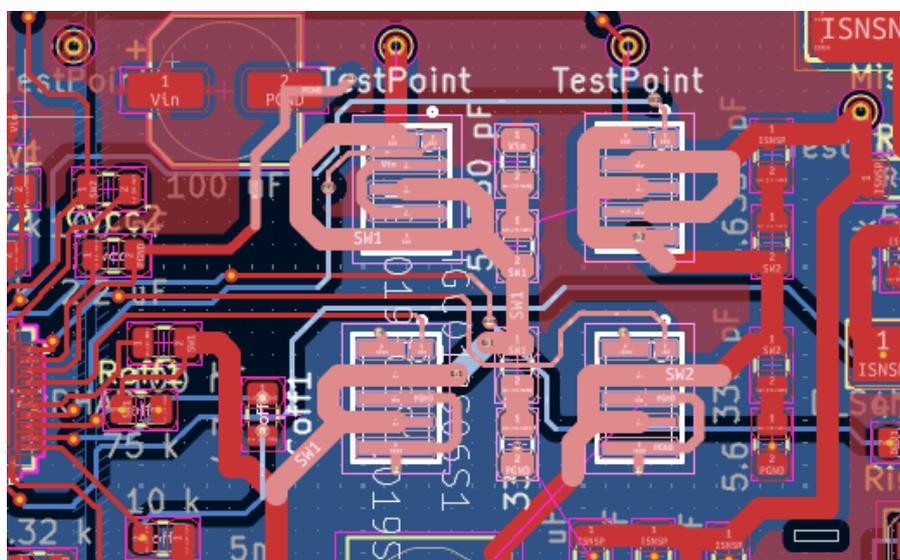
*Figura 11. Anchos de pista de la PCB*

#### 4.4.3 DISPOSICIÓN DE LOS COMPONENTES

##### Transistores GaN

Los cuatro mosfets de potencia (GaN) se colocaron cerca de la bobina y de los condensadores de entrada-salida para formar bucles compactos de conmutación. Se dejaron zonas de cobre para disipación térmica sin necesidad de disipadores activos.

En la Figura 12 se muestra la parte central del layout, dónde los componentes con un rojo más blanquecino representan los mosfets GaN.

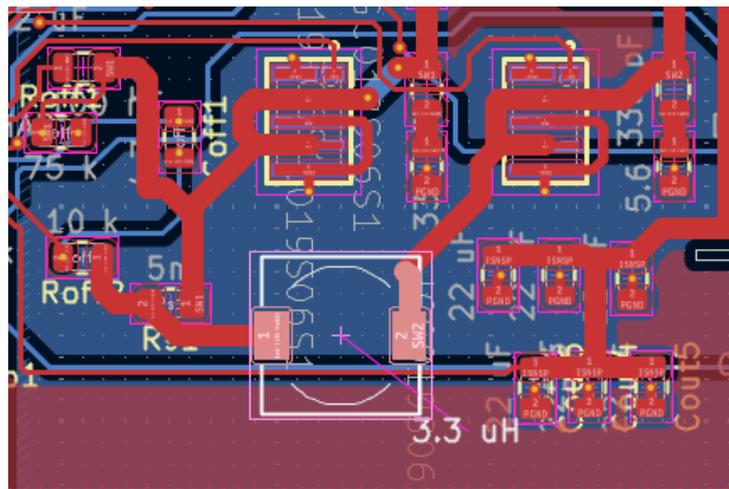


*Figura 12. Parte central del layout*

## Bobina

Situado entre las etapas buck y boost, centrado respecto a los transistores para equilibrar el flujo magnético y facilitar el diseño simétrico del layout.

En la Figura 13, el componente de rojo más claro corresponde a la bobina.

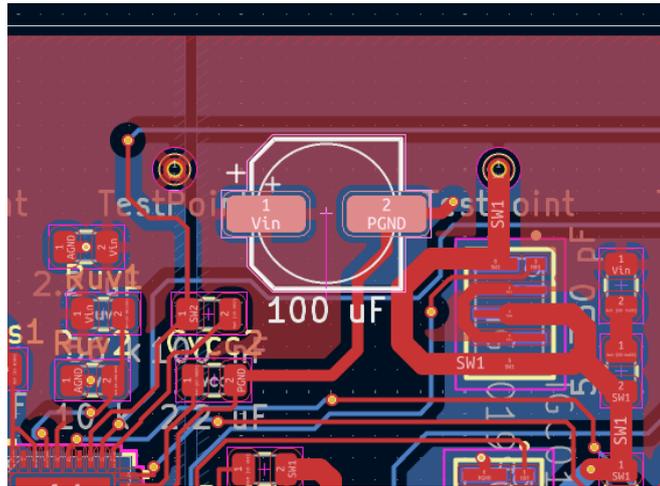


*Figura 13. Parte inferior central del layout*

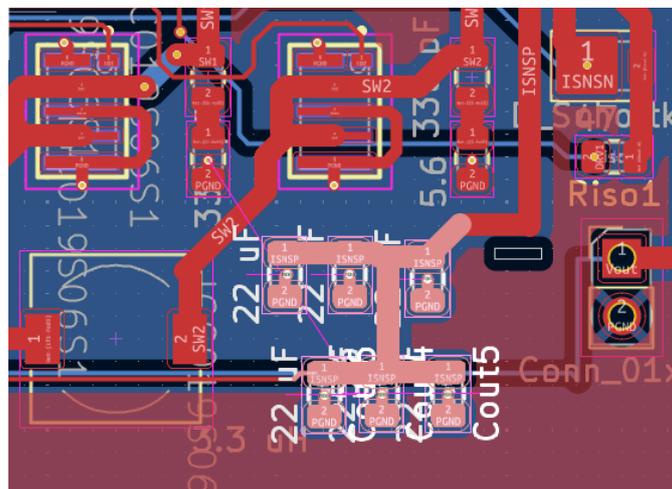
## Condensadores de entrada y salida

Se distribuyeron múltiples condensadores cerámicos de entrada entre VIN y PGND, posicionados cerca de los transistores de entrada para minimizar la inductancia del bucle de conmutación y estabilizar la tensión ante transitorios. En la salida, se dispusieron condensadores electrolíticos y cerámicos entre VOUT y PGND para mantener la estabilidad de la tensión de salida bajo cambios de carga y reducir el rizado. Se prestó atención a su proximidad al inductor de salida y a la ruta de realimentación.

En la Figura 14 se muestra la zona superior central del layout, resaltando el condensador electrolítico de entrada. Debajo se sitúa la Figura 15 en la que se puede observar la zona inferior derecha del layout, resaltando los condensadores cerámicos de salida.



*Figura 14. Zona superior central del layout*



*Figura 15. Zona inferior derecha del layout*

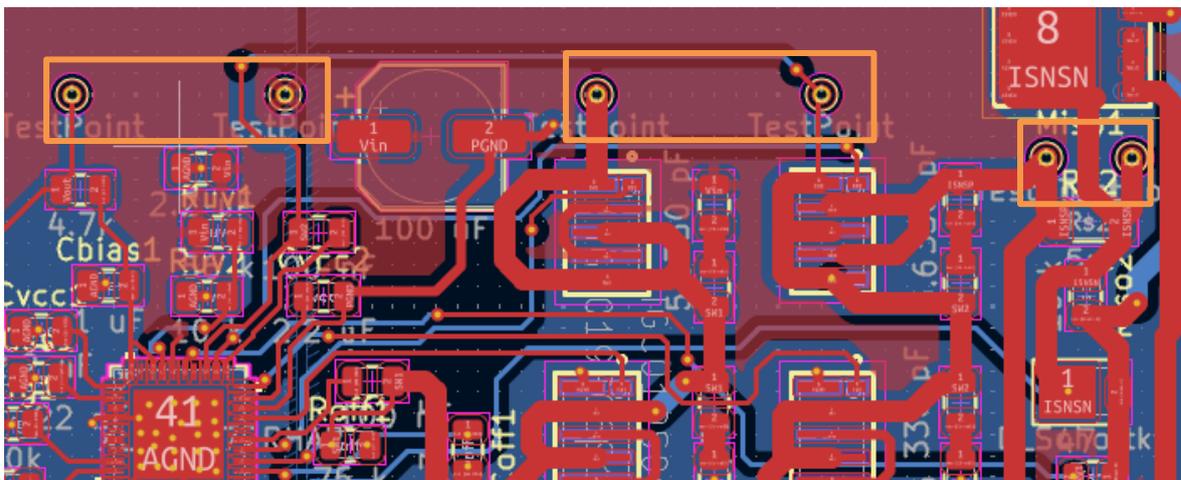
### **Red snubber**

Se posicionó pegado a la derecha de los mosfets (GaN) , con pistas cortas y gruesas, ayudando a absorber sobretensiones transitorias y reducir EMI.

### **Test points**

Se añadieron test points accesibles en nodos clave como VOUT, VIN, SW1, SW2, ISNSP e ISNSN. Estos permiten la monitorización directa con sondas de osciloscopio o multímetro, lo que facilita enormemente las tareas de validación y depuración del sistema. Se han colocado en la parte superior de la placa para facilitar la maniobra de ellos.

En la Figura 16 los test points se corresponden con los señalados por cuadros naranjas, donde Vout y Vin corresponden con el cuadro de la izquierda, SW1 y SW2 con el del centro y ISNSP, ISNSN con el de la izquierda.

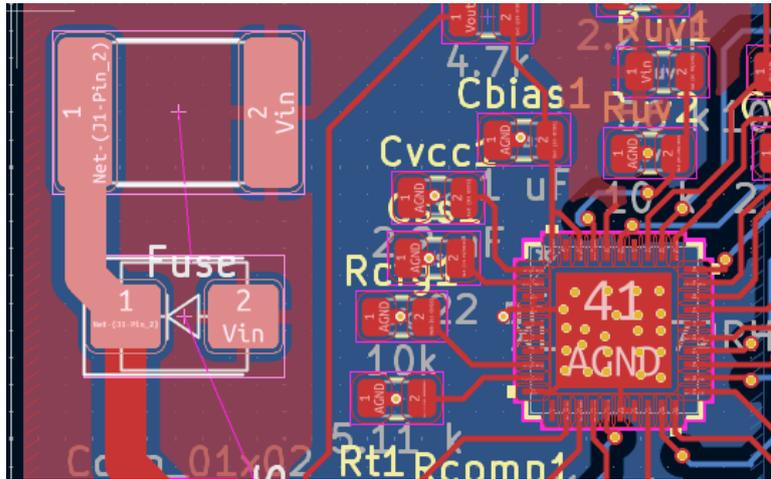


*Figura 16. Parte superior de la PCB*

## **Protecciones**

Se incluyeron diodos TVS y fusibles en la entrada para proteger el convertidor frente a sobretensiones y cortocircuitos. Estas protecciones se colocaron lo más cerca posible del conector de entrada para una actuación efectiva ante transitorios.

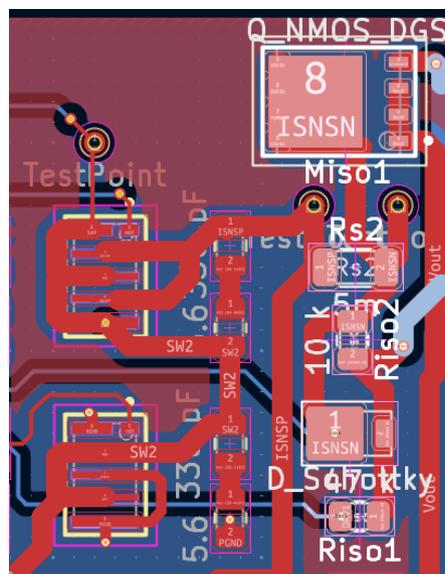
En la Figura 17 la zona más clara de la imagen equivale a la protección de la tensión de alimentación Vin.



*Figura 17. Zona izquierda del layout*

Asimismo, en la salida del convertidor se incorporaron un diodo Schottky y un MOSFET tipo MISO, cuya función es evitar la circulación de corriente inversa hacia la carga en situaciones de apagado o mal conexionado. Estos componentes se ubicaron cerca del conector de salida, y sus pistas fueron dimensionadas para soportar la máxima corriente a la salida.

La Figura 18 muestra el circuito equivalente en un color más blanquecino.



*Figura 18. Zona superior-derecha PCB*

### Controlador LM51772 y red de realimentación

El controlador se ubicó en la zona izquierda de la placa (imitando al esquemático) justo encima del plano de AGND, manteniendo rutas cortas hacia los componentes críticos. Se colocaron numerosos condensadores de desacoplo lo más cerca posible del LM51772 para reducir la impedancia de entrada a altas frecuencias y evitar interferencias de conmutación. En el centro del encapsulado se añadieron múltiples vías térmicas conectadas al plano de masa para facilitar la disipación del calor generado internamente.

En el centro de la Figura 19 con el pin 41 se encuentra el controlador LM51772 rodeado de los componentes auxiliares.

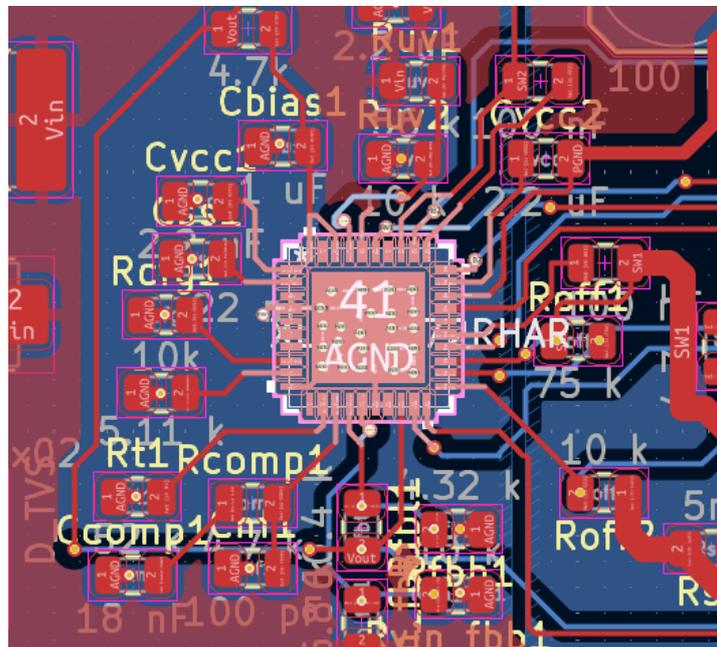


Figura 19. Circuito de control del layout

## Capítulo 5. VIABILIDAD ECONÓMICA Y SOSTENIBILIDAD

El siguiente capítulo tiene como objetivo evaluar la viabilidad económica del diseño propuesto, así como estimar los costes asociados tanto a la fabricación de un prototipo funcional como a una posible producción en serie. El análisis se basa en precios reales obtenidos de distribuidores como Mouser, JLCPCB y otros proveedores industriales, con una estimación para el caso de producción en serie, teniendo en cuenta la evolución del precio frente a economías de escala.

### 5.1 ESTIMACIÓN COSTES DEL PROTOTIPO

Para la construcción del primer prototipo se han adquirido todos los componentes de forma individual, sin aplicar descuentos por volumen. Además, el montaje del circuito ha sido realizado de forma externa, lo cual incrementa significativamente el coste total. La siguiente tabla recoge los costes estimados por componente:

<i>Componente</i>	<i>Modelo / Descripción</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio unitario (€)</i>	<i>Subtotal (€)</i>
MOSFET GaN	IGC019S06S1	4	4,00	16,00
Controlador Buck-Boost	LM51772	1	6,50	6,50

PCB (2 capas, 10×10 cm)	JLCPCB	1	7,00	7,00
Montaje externo	—	1	15,00	15,00
Condensadores	—	—	0,586	1,51
Diodo Schottky	V2P6X-M3/H	1	0,075	0,327
Fusible PPTC	2920L050/72DR	1	0,45	0,576
Bobina 3,3 μH	SRP5030CA-3R3M	1	0,75	1,08
Resistencias	—	—	0,29871	1,54194
<b>TOTAL</b>				<b>52,53 €</b>

*Tabla 4. Precios estimados para el prototipo de la PCB*

Este coste representa una inversión adecuada para prototipado y pruebas de laboratorio, pero sería económicamente inviable en una producción a escala comercial sin ajustes.

## **5.2 VIABILIDAD EN PRODUCCIÓN**

Considerando una posible fabricación del sistema en lotes de 1000 unidades, se realiza una estimación del coste unitario de producción. En este caso se contempla:

- Compra de componentes en gran volumen, con descuentos asociados.
- Fabricación de la PCB mediante panelización.
- Montaje interno automatizado del circuito en una planta industrial.

- Caída de precios progresiva de tecnologías emergentes como MOSFETs GaN.

<i>Componente</i>	<i>Modelo / Descripción</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio unitario (€)</i>	<i>Subtotal (€)</i>
MOSFET GaN	IGC019S06S1	4	2,00	8,00
Controlador Buck-Boost	LM51772	1	4,20	4,20
PCB (producción propia)	JLCPCB	1	2,00	2,00
Montaje interno	—	1	3,00	3,00
Condensadores	—	—	0,12	0,36
Diodo Schottky	V2P6X-M3/H	1	0,035	0,175
Fusible PPTC	2920L050/72DR	1	0,17	0,17
Bobina 3,3 $\mu$ H	SRP5030CA-3R3M	1	0,22	0,22
Resistencias	—	—	0,06	0,30
<b>TOTAL</b>				<b>18,43 €</b>

*Tabla 5. Precios estimados para producción en serie de la PCB*

La reducción de costes en este caso es claramente menor, con un ahorro de más del 60 % respecto al prototipo. Esta caída se debe al aprovechamiento de economías de escala, la eliminación de intermediarios y la automatización del montaje.

### **5.3 SOSTENIBILIDAD EN EL DISEÑO**

Además del análisis económico, como en cualquier proyecto hay una parte importante de valorar el impacto ambiental y la sostenibilidad del sistema diseñado. De este modo, el convertidor DC-DC ha sido diseñado teniendo en cuenta principios de eficiencia energética, reducción de materiales (haciéndolo más compacto) y posible integración en sistemas de movilidad eléctrica, contribuyendo así a un modelo energético más limpio.

Aspectos destacados de sostenibilidad:

- **Alta eficiencia energética:** gracias al uso de transistores GaN, el convertidor presenta menores pérdidas por conmutación, lo que reduce el calor disipado y el consumo energético total. Una mayor eficiencia implica menos energía desperdiciada y menor necesidad de disipadores, reduciendo materiales auxiliares.
- **Reducción de tamaño y peso:** al permitir frecuencias de conmutación más elevadas, se emplean bobinas y condensadores de menor tamaño, lo que disminuye el volumen total del sistema. Esto favorece un diseño más compacto, con menor uso de plásticos y materiales estructurales.
- **Facilidad de desmontaje y reciclaje:** el sistema utiliza componentes estándar montados en superficie (SMD), lo que facilita su desensamblarse para reciclaje o reutilización
- **Uso en movilidad eléctrica:** al estar orientado a alimentar el sistema de control de un aparcamiento para bicicleta, el convertidor fomenta el uso de transporte sostenible y eficiente, cumpliendo así con los objetivos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> actuales.

- **Proyección a fabricación local:** en un escenario industrial, la posibilidad de fabricación interna o en proximidad (por ejemplo, mediante SMT en Europa) permitiría reducir la huella de carbono asociada al transporte internacional de componentes o productos ensamblados.

#### 5.4 COMPARACIÓN CON SOLUCIONES COMERCIALES

En la actualidad, existen convertidores con tensión de entrada ancha (típicamente 6–60 V) y salidas reguladas en el entorno de los 12 V–15 V, utilizados en sectores como automoción, telecomunicaciones o iluminación LED. Sin embargo, muchas de estas soluciones presentan las siguientes limitaciones:

Para evaluar la competitividad del convertidor diseñado, se ha llevado a cabo un análisis comparativo frente a convertidores DC-DC comerciales disponibles en el mercado con características similares: tensión de entrada (de 8–60 V), salida de 12 V y corriente de salida de al menos 3–5 A.

En la Tabla 6 se muestra una comparativa de distintas soluciones que existen en el mercado incluyendo las características de las mismas.

<i>Modelo comercial</i>	<i>Rango entrada (V)</i>	<i>Salida (V)</i>	<i>Corriente máx.</i>	<i>Eficiencia (%)</i>	<i>Precio (€)<sup>1</sup></i>
RECOM RPA60H-12	9–60	12	5 A	~91 %	~59,00
Traco Power THN 20-2412WI	9–36	12	1.67 A	~89 %	~41,00
MeanWell RSD-60G-12	8–60	12	5 A	~90 %	~38,00

Murata	OKI-78SR-	7-36	12	1.5 A	~92 %	~10,50
12						

*Tabla 6. Comparativa de soluciones comerciales de DC-DC similares*

A continuación, se muestran las diferencias clave frente al convertidor diseñado:

- **Coste:** el prototipo del presente TFG tiene un coste estimado de 52,53 €, pero en volumen podría fabricarse por 18,43 €, lo que significaría una reducción superior al 60 % respecto a la mayoría de los productos ofertados.
- **Arquitectura personalizable:** al tratarse de un diseño propio, el sistema puede modificarse fácilmente a nivel de esquemático y layout, permitiendo adaptaciones o cambios en los requisitos de entrada/salida sin depender de diseños cerrados.
- **Tecnología GaN:** el uso de transistores de nitruro de galio permite trabajar a frecuencias más altas (600 kHz), reduciendo el tamaño de pasivos y mejorando la eficiencia sin empeorar la estabilidad térmica.
- **Certificaciones:** a diferencia de los productos comerciales, el prototipo aún no ha pasado pruebas oficiales de EMC, seguridad o conformidad industrial.

En resumen, el convertidor diseñado en este proyecto ofrece un rendimiento comparable o superior a muchas soluciones comerciales, a un coste significativamente inferior si se produce en volumen. Además, su arquitectura abierta permite su adaptación a diversos entornos, lo que podría ser una opción interesante para fabricantes o integradores de soluciones personalizadas.

## Capítulo 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSIONES

Este Trabajo de Fin de Grado ha abordado el diseño completo de un convertidor DC-DC de topología buck-boost no inversora, orientado a la alimentación de electrónica de control en sistemas con fuentes de energía renovable, como instalaciones solares. El sistema ha sido diseñado para entregar una tensión de salida estable de 12 V a partir de una entrada variable entre 8 V y 48 V, utilizando para ello el controlador LM51772 y transistores GaN, optimizando tanto la eficiencia como la compacidad del diseño.

A lo largo del desarrollo se han cumplido los objetivos marcados:

- Se ha realizado un estudio comparativo de tecnologías de transistores y topologías de convertidores, justificando la elección final.
- Se ha dimensionado el sistema completo, seleccionando componentes reales, calculando sus valores teóricos y ajustando sus parámetros según las recomendaciones del fabricante.
- Se ha desarrollado el esquemático del convertidor y su correspondiente layout en PCB, según los criterios de diseño térmico, separación de planos de masa y reducción de interferencias.
- Se ha externalizado la fabricación y montaje de la placa, comprobando su integridad estructural y continuidad eléctrica.
- Se ha realizado un análisis económico y de sostenibilidad, demostrando que en producción en volumen el convertidor puede ser competitivo frente a soluciones comerciales equivalentes.

A pesar de no haberse llevado a cabo pruebas de laboratorio funcionales, el diseño ha sido validado en su totalidad desde el punto de vista teórico, estructural y económico, con vistas a implementarlo físicamente en un futuro cercano.

En definitiva, el convertidor desarrollado constituye una solución eficiente, fiable y escalable para la alimentación de electrónica de control en entornos fotovoltaicos, contribuyendo a mejorar el rendimiento global y la sostenibilidad de los sistemas basados en energía solar.

## **6.2 TRABAJOS FUTUROS**

Aunque el presente trabajo ha desarrollado un diseño completo y funcional del convertidor, quedan abiertas varias líneas de desarrollo que permitirían llevar el sistema a un nivel superior de validación, optimización y preparación para su aplicación real. Estas líneas se agrupan en tres grandes ámbitos:

### **6.2.1 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL**

Actualmente, el sistema ha sido desarrollado, fabricado y montado, pero no se ha sometido a ensayos funcionales. Las primeras tareas futuras deberán centrarse en la caracterización completa del prototipo en laboratorio, incluyendo:

- Medición de la eficiencia en los distintos modos de operación (buck, boost y buck-boost) bajo diversas condiciones de carga.
- Análisis del rizado de tensión de salida y su respuesta ante variaciones bruscas en la entrada.
- Evaluación de la estabilidad térmica mediante pruebas prolongadas a plena carga.
- Verificación de la conmutación de los interruptores GaN y su comportamiento en alta frecuencia.

Estos ensayos permitirán contrastar los resultados reales con las estimaciones teóricas y, en su caso, ajustar parámetros o rediseñar ciertos elementos del sistema.

### **6.2.2 MEJORA DEL DISEÑO**

Tras la validación inicial, el diseño puede evolucionar para mejorar su rendimiento, robustez y facilidad de integración. Algunas propuestas en esta dirección incluyen:

- Revisión del layout del PCB para reducir longitudes críticas, mejorar la disipación térmica y minimizar interferencias electromagnéticas.
- Incorporación de protecciones adicionales frente a sobretensiones, inversión de polaridad o fallos de conmutación.
- Sustitución de componentes clave por versiones con menor resistencia serie (ESR o RDS(on)) o tolerancias más estrictas.
- Reducción del tamaño total del circuito mediante uso de encapsulados más compactos o integración de funciones.

Estas mejoras no requieren alterar la arquitectura base del convertidor, pero sí permiten escalar su rendimiento y adaptarlo a entornos más exigentes.

### **6.2.3 INDUSTRIALIZACIÓN Y ESCALADO**

Finalmente, si se considera viable la producción del sistema como producto, será necesario avanzar en tareas de preparación para la fabricación a escala:

- Diseño de un encapsulado industrial, protegido frente a condiciones ambientales adversas y listo para su montaje en cajas, carcasas o racks eléctricos.
- Optimización del diseño para su fabricación en cadena: selección de componentes fácilmente disponibles, estandarización de procesos de soldadura y pruebas funcionales automatizadas.

- Evaluación de certificaciones necesarias para su comercialización (EMC, seguridad eléctrica, RoHS, etc.).
- Estudio de viabilidad económica ampliado, incluyendo OPEX/CAPEX en línea de producción y comparación con otras soluciones del mercado.

Estas tareas permitirían convertir el convertidor diseñado en un producto real, integrable en sistemas comerciales de movilidad eléctrica, energías renovables o electrónica de control industrial.

## Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Texas Instruments. *LM51772 Wide VIN, 4-Switch Buck-Boost Controller*. Datasheet.. [LM51772 55V 4-Switch Buck-Boost Controller with I2 C interface datasheet \(Rev. C\)](#)
- [2] Texas Instruments. *LM51772EVM-HP Evaluation Module User's Guide*. SLUUBX7A. [TPS560430-Q1 Evaluation Module User's Guide \(Rev. A\)](#)
- [3] Texas Instruments. *AN-1229 Simple Success With Conducted EMI From DCDC Converters*. SNVA489C.
- [4] Texas Instruments. *LM51772 Quickstart Calculator Tool*. [LM51772-QUICKSTART-CALC Calculation tool | TI.com](#)
- [5] Texas Instruments. *DAC Circuit Precision Products*. [Precision DACs \( \$\leq 10\$  MSPS\) product selection | TI.com](#)
- [6] Ultra Librarian for Texas Instruments. LM51772 Symbol, Footprint & 3D Model Download. [Ultra Librarian for TI](#)
- [7] Infineon Technologies. *IGC019S06S1 CoolGaN™ G3 Transistor Datasheet*. [Datasheet IGC019S06S1](#)
- [8] Infineon Technologies. *Light Electric Vehicle Solutions – E-Bikes*. [E-bike solutions | Infineon Technologies](#)
- [9] Infineon Technologies. *GaN Power and Motion Control Solutions for E-Bike Applications*.  
(documento interno)
- [10] FaultyProject. *Cálculo de pérdidas en transistores de potencia*. [Cálculo de pérdidas en transistores de potencia](#)
- [11] Eclipse Foundation. *Adoptium Temurin JDK 17 – OpenJDK Binary Releases*. [Latest Releases | Adoptium](#)
- [12] FreeRouting Project. *FreeRouting – Open Source PCB Autorouter*. [FreeRouting | FreeRouting Documentation](#)
- [13] KiCad Project. *KiCad EDA - Open Source PCB Design Tool*. [KiCad - Schematic Capture & PCB Design Software](#)
- [14] Mouser Electronics. *Distribuidor global de componentes electrónicos*. [Distribuidor de Componentes Electrónicos - Mouser Electronics España](#)

## **ANEXO I**

### ***PLANOS DE LA PCB Y DATASHEETS DE COMPONENTES***

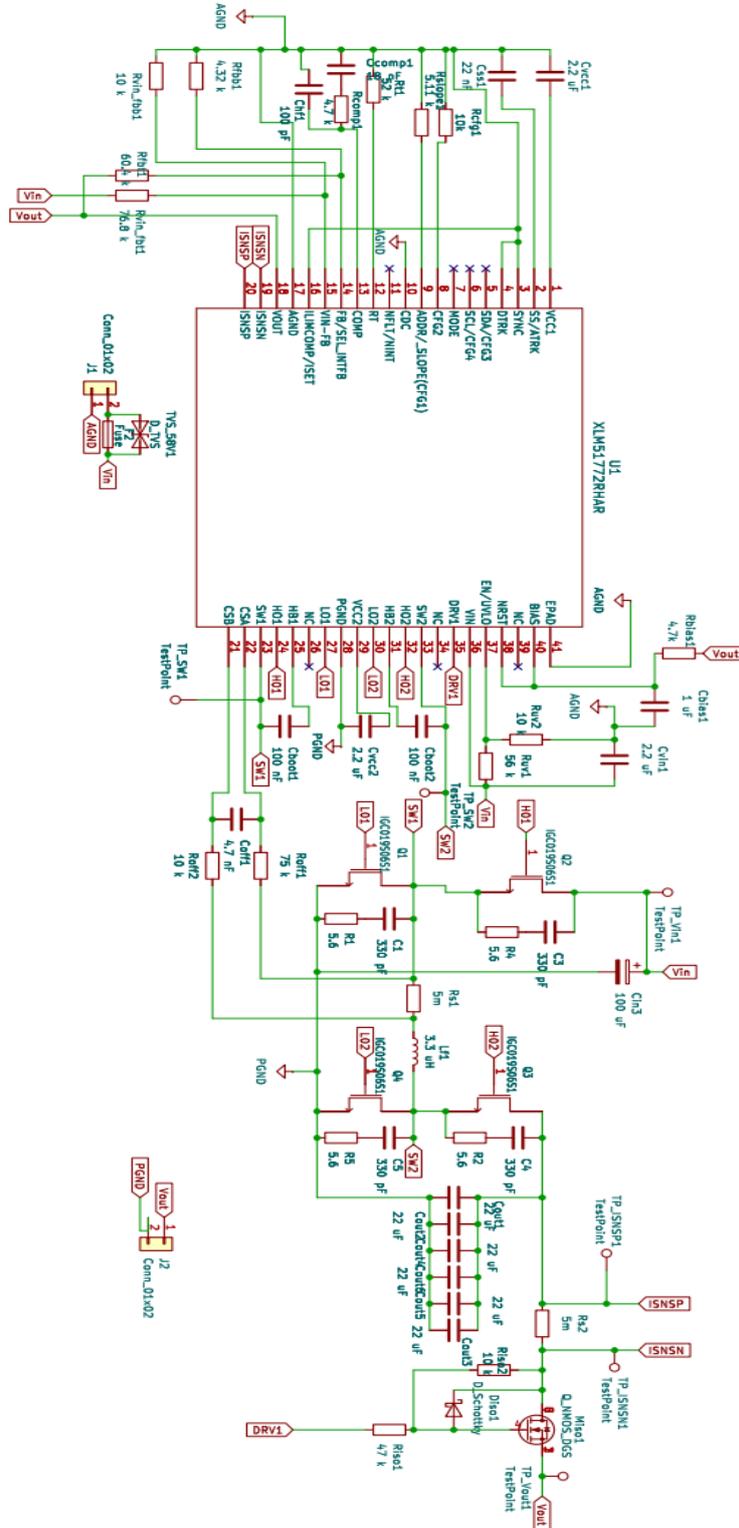


Figura 20. Esquema completo del convertidor DC-DC

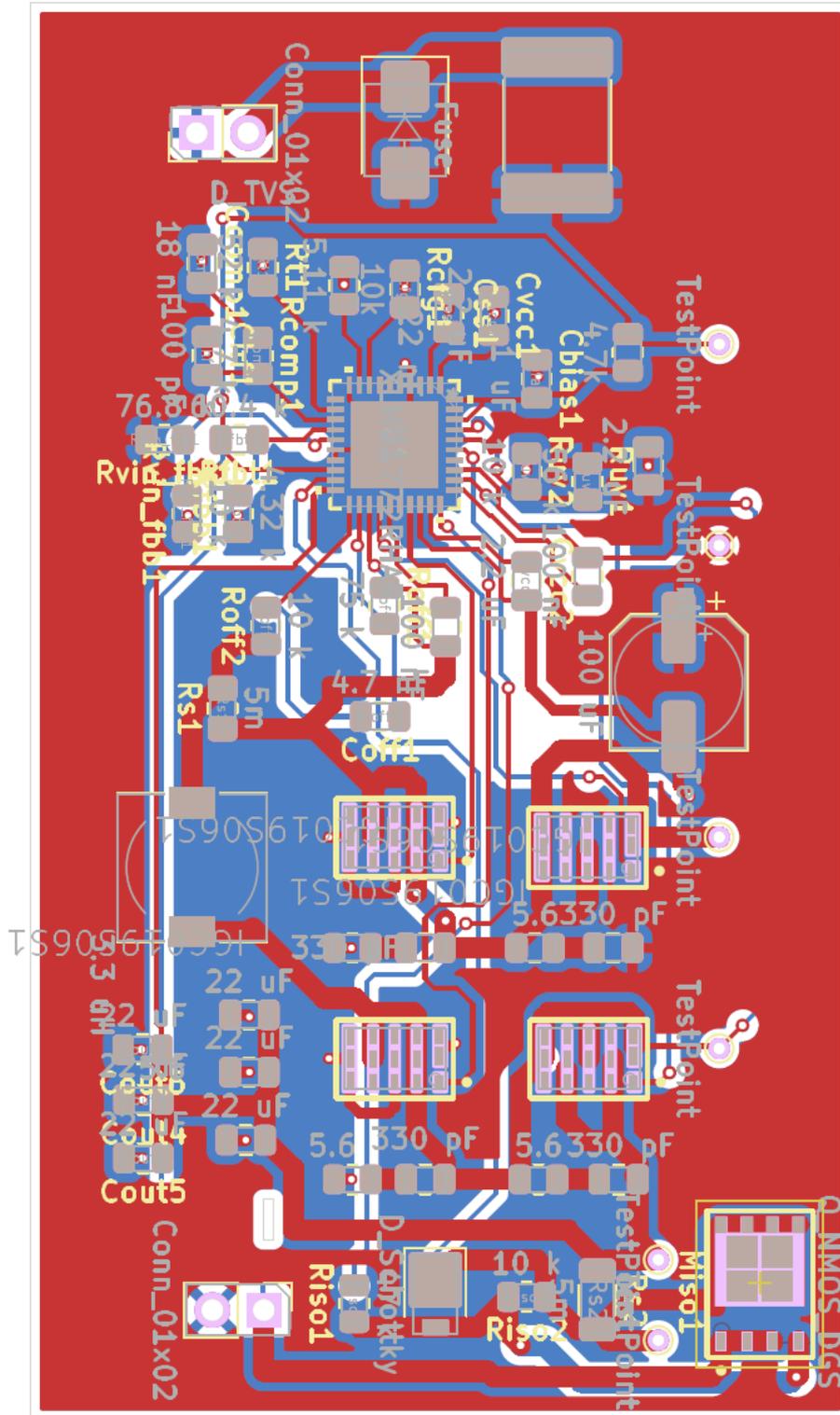


Figura 21. Plano completo de la PCB

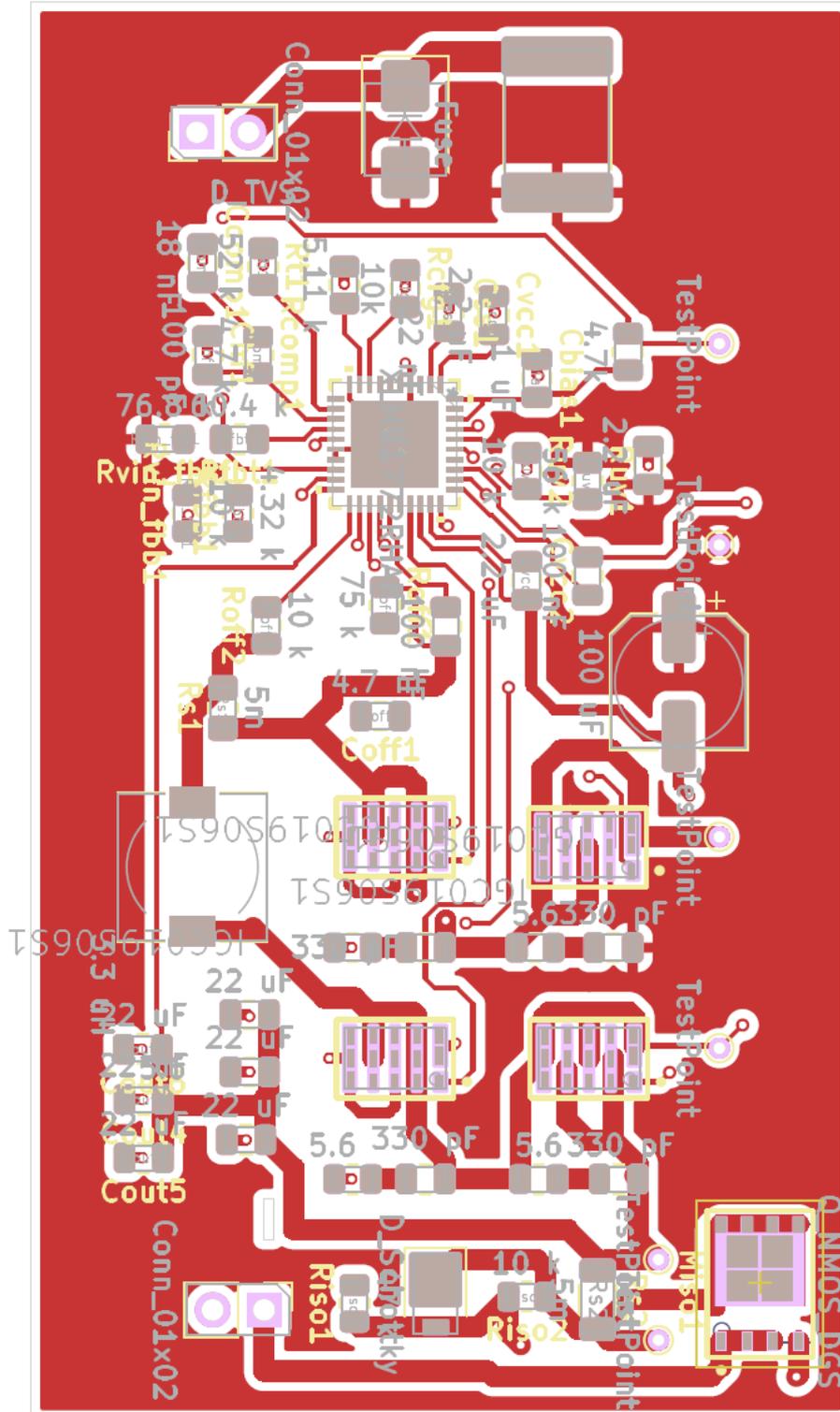


Figura 22. Plano de alimentación de la PCB

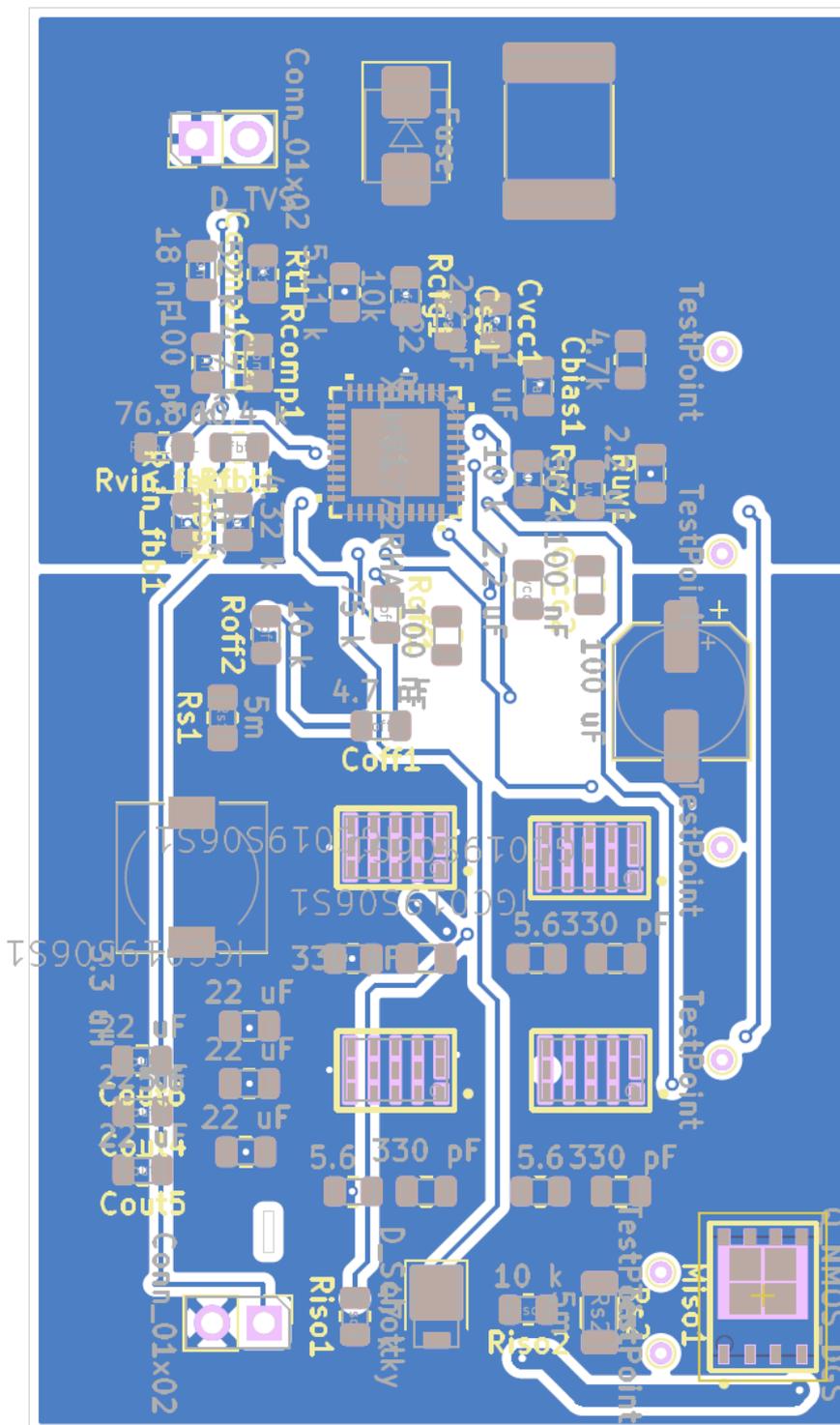


Figura 23. Plano de masa de la PCB