



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

  
ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial  
y Diseño Industrial

Diseño del prototipo de un rectificador activo con alto factor  
de potencia

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR/A: Cabedo Moreno, Marta

Tutor/a: Martínez Navarro, Germán

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE  
VALENCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Aeroespacial y Diseño Industrial

# DISEÑO DEL PROTOTIPO DE UN RECTIFICADOR ACTIVO CON ALTO FACTOR DE POTENCIA

Trabajo Final de Grado

Grado en Ingeniería electrónica industrial y  
automática

**AUTORA:** Marta Cabedo Moreno

**TUTOR:** Germán Martínez Navarro

**CURSO ACADÉMICO:** 2024/2025

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a mis padres por su apoyo constante y por estar siempre ahí para mí. A mi hermana, por sus palabras de ánimo y por soportarme durante este tiempo.

A mis amigos, por su compañía y ayuda. En especial a Adrián, por sus consejos y su disposición a echarme una mano siempre que lo he necesitado.

A mi tutor, por su orientación y paciencia durante todo el proceso de este trabajo.

Gracias a todos por vuestro apoyo.



## **Abstract**

The present project involves designing the hardware and selecting the components for a high power factor (HPF) rectifier to be used in laboratory practices for the course "Power Electronic Converters." This course is part of the Master's Degree in Electronic Systems Engineering at UPV. The project will include the calculation of control loops and their simulation, as well as the design of the PCB using the KiCad program.

## Resumen

El presente proyecto consiste en realizar el diseño del Hardware y la selección de los componentes de un rectificador con alto factor de potencia (HPF) para su utilización docente en las prácticas de laboratorio de la asignatura: "Convertidores Electrónicos de Potencia". cursada en el Master Universitario en Ingeniería de Sistemas Electrónicos de la UPV. Se realizará el cálculo de los lazos de control y la simulación de los mismos además del diseño de la PCB con el programa Kikad.

## Resum

El present projecte consisteix en realitzar el disseny del Hardware i la selecció dels components d'un rectificador amb alt factor de potència (HPF) per a la seua utilització docent en les pràctiques de laboratori de l'assignatura: "Convertidors Electrònics de Potència". Cursada en el Màster Universitari en Enginyeria de Sistemes Electrònics de la UPV. Es realitzarà el càlcul dels llaços de control i la simulació dels mateixos, a més del disseny de la PCB amb el programa KiCad.



# Índice general

|  |          |
|--|----------|
| Agradecimientos . . . . .  | i        |
| Abstract . . . . .   | iii      |
| Resumen . . . . .  | iv       |
| Resum . . . . .  | v        |
| Índice de figuras . . . . .  | 1        |
| Índice de tablas . . . . .   | 1        |
| Abreviaturas y acrónimos . . . . .   | 4        |
| <b>1 Memoria</b>   | <b>5</b> |
| 1.1 Introducción . . . . .   | 5        |
| 1.1.1 Ámbito del Trabajo de Fin de Grado . . . . .                                   | 5        |
| 1.1.2 ¿Qué son los armónicos de una señal? . . . . .                                 | 6        |
| 1.1.3 ¿Qué es el factor de potencia? . . . . .                                       | 7        |
| 1.1.4 Necesidad de mejora de la eficiencia del factor de potencia . . . . .          | 8        |
| 1.2 Antecedentes . . . . .   | 9        |
| 1.2.1 Razones por las que es necesaria la realización del proyecto . . . . .         | 9        |
| 1.2.2 Intentos previos de resolución . . . . .                                       | 9        |
| 1.2.3 Estudio de viabilidad . . . . .  | 9        |
| 1.3 Estudio de necesidades . . . . .   | 10       |
| 1.3.1 Especificaciones . . . . .   | 10       |
| 1.3.2 Normativa considerada . . . . .  | 10       |
| 1.3.3 Factores . . . . .   | 11       |
| Factores técnicos . . . . .  | 11       |
| Factores de gestión . . . . .  | 11       |
| Factores económicos . . . . .  | 11       |
| 1.4 Planteamiento de soluciones alternativas y justificación de la solución adoptada | 12       |
| 1.5 Descripción detallada de la solución adoptada . . . . .                          | 14       |
| 1.5.1 Potencia . . . . .   | 14       |
| Red eléctrica . . . . .  | 14       |
| Transformador . . . . .  | 14       |
| Rectificador . . . . .   | 14       |
| Bobina . . . . .   | 14       |
| Transistor . . . . .   | 15       |
| Condensadores . . . . .  | 15       |

|       |   |    |
|-------|---|----|
|       | Diodo . . . . .                                   | 15 |
|       | Resistencia de carga . . . . .                    | 15 |
| 1.5.2 | Alimentación . . . . .                            | 15 |
|       | Convertidor DC/DC de $V_{cc}$ a 15 V . . . . .    | 15 |
|       | Convertidor DC/DC de 15 V a 5 V . . . . .         | 15 |
|       | Convertidor DC/DC aislado . . . . .               | 16 |
| 1.5.3 | Instrumentación . . . . .                         | 16 |
|       | Sensado $V_r$ . . . . .                           | 16 |
|       | Sensado $I_L$ . . . . .                           | 16 |
|       | Sensado $V_o$ . . . . .                           | 17 |
| 1.5.4 | Driver . . . . .                                  | 18 |
| 1.5.5 | Control . . . . .                                 | 18 |
|       | Microcontrolador . . . . .                        | 18 |
| 1.5.6 | Detección del paso por cero . . . . .             | 18 |
|       | Conversor DC/DC no aislado de 24 a 5 V . . . . .  | 18 |
| 1.6   | Elección de componentes . . . . .                 | 19 |
| 1.6.1 | Elementos pasivos . . . . .                       | 19 |
|       | Resistencias . . . . .                            | 19 |
|       | Condensadores . . . . .                           | 19 |
| 1.6.2 | Etapa de potencia . . . . .                       | 20 |
|       | Transformador . . . . .                           | 20 |
|       | Rectificador . . . . .                            | 20 |
|       | Bobina . . . . .                                  | 20 |
|       | Transistor . . . . .                              | 20 |
|       | Diodo . . . . .                                   | 22 |
|       | Condensador . . . . .                             | 22 |
|       | Resistencia de carga . . . . .                    | 22 |
|       | Conector doble banana hembra . . . . .            | 22 |
|       | Punto de prueba PCB . . . . .                     | 22 |
| 1.6.3 | Alimentación . . . . .                            | 23 |
|       | Convertidor DC/DC de $24V_{RMS}$ a 15 V . . . . . | 23 |
|       | Convertidor DC/DC(15-5 V) . . . . .               | 23 |
|       | Convertidor DC/DC Aislado . . . . .               | 23 |
| 1.6.4 | Driver . . . . .                                  | 23 |
| 1.6.5 | Instrumentación . . . . .                         | 23 |
|       | Amplificador operacional . . . . .                | 24 |
|       | Amplificador de instrumentación . . . . .         | 24 |
|       | Diodo Zener . . . . .                             | 24 |
| 1.6.6 | Control . . . . .                                 | 24 |
|       | Microcontrolador . . . . .                        | 24 |
|       | Receptáculos para PCB . . . . .                   | 24 |
| 1.6.7 | Detección del paso por cero . . . . .             | 24 |
| 1.7   | Simulación . . . . .                              | 26 |
| 1.7.1 | Herramientas utilizadas . . . . .                 | 26 |
|       | Software de simulación . . . . .                  | 26 |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
|          | Circuito Montado . . . . .                                | 26        |
| 1.7.2    | Control . . . . .   | 27        |
|          | Lazo de corriente . . . . .                               | 27        |
|          | Lazo de tensión . . . . .                                 | 28        |
| 1.7.3    | Modo Continuo . . . . .                                   | 29        |
|          | Descripción del Modo Continuo . . . . .                   | 29        |
|          | Resultados de la Simulación del Modo Continuo . . . . .   | 29        |
| 1.7.4    | Modo Discreto . . . . .                                   | 33        |
|          | Descripción del Modo Discreto . . . . .                   | 33        |
|          | Resultados de la Simulación del Modo Discreto . . . . .   | 34        |
| 1.7.5    | Comparación entre Modo Continuo y Modo Discreto . . . . . | 35        |
| 1.8      | Verificación . . . . .                                    | 36        |
| 1.9      | Diseño PCB . . . . .                                      | 38        |
| <b>2</b> | <b>Planos</b>   | <b>41</b> |
|          | Etapas . . . . .  | 41        |
|          | Potencia . . . . .  | 43        |
|          | Alimentación . . . . .                                    | 44        |
|          | Control . . . . .   | 45        |
|          | Driver . . . . .  | 45        |
|          | Instrumentación . . . . .                                 | 46        |
|          | Control . . . . .   | 47        |
|          | Detección del paso por cero . . . . .                     | 48        |
|          | Placa de circuito impreso . . . . .                       | 49        |
| <b>3</b> | <b>Pliego de Condiciones</b>                              | <b>51</b> |
| 3.1      | Descripción . . . . .                                     | 52        |
| 3.2      | Lista de materiales . . . . .                             | 52        |
|          | 3.2.1 Componentes pasivos . . . . .                       | 52        |
|          | 3.2.2 Rectificador y diodos . . . . .                     | 53        |
|          | 3.2.3 Circuitos integrados . . . . .                      | 54        |
|          | 3.2.4 Convertidores y transformador . . . . .             | 54        |
|          | 3.2.5 Conectores y puntos de prueba . . . . .             | 54        |
|          | 3.2.6 Transistor . . . . .                                | 55        |
| 3.3      | Montaje . . . . .   | 55        |
|          | 3.3.1 Soldaduras . . . . .                                | 55        |
|          | Soldaduras de componentes tipo agujero pasante . . . . .  | 56        |
|          | Soldaduras de componentes tipo SMD . . . . .              | 56        |
| <b>4</b> | <b>Presupuesto</b>  | <b>57</b> |
| 4.1      | Cuadro de precios unitarios . . . . .                     | 58        |
| 4.2      | Precios descompuestos . . . . .                           | 60        |
| 4.3      | Cuadro de mediciones . . . . .                            | 64        |
| 4.4      | Presupuesto de ejecución del material . . . . .           | 65        |
| 4.5      | Resumen del presupuesto . . . . .                         | 67        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Anexos</b>   | <b>71</b> |
| .1 Fichas técnicas . . . . .  | 71        |
| .1.1 Elementos pasivos . . . . .  | 71        |
| .1.2 Rectificador y diodos . . . . .  | 71        |
| .1.3 Circuitos integrados . . . . .   | 72        |
| .1.4 Convertidores y transformador . . . . .                                | 72        |
| .1.5 Conectores y puntos de prueba . . . . .                                | 72        |
| .1.6 Transistor . . . . .   | 72        |
| .1.7 Conector banana hembra . . . . .                                       | 72        |
| .1.8 Microcontrolador . . . . .   | 72        |
| .1.9 Receptáculo para PCB . . . . .   | 73        |
| .1.10 Punto de prueba para PCB . . . . .                                    | 73        |
| .2 Cálculos . . . . .   | 74        |
| .2.1 Ciclo de trabajo . . . . .   | 74        |
| .2.2 Cálculos de diseño . . . . .   | 74        |
| Resistencia de carga . . . . .  | 74        |
| Bobina . . . . .  | 74        |
| Condensador . . . . .   | 75        |
| .2.3 Microcontrolador . . . . .   | 76        |
| .2.4 Puentes de resistencias y filtros . . . . .                            | 76        |
| Sensado de la tensión de entrada rectificadora ( $V_r$ ) . . . . .          | 76        |
| Sensado de la tensión de salida ( $V_o$ ) . . . . .                         | 77        |
| Sensado de la corriente en la bobina ( $I_L$ ) . . . . .                    | 77        |
| Puente de resistencias y filtro de la detección del paso por cero . . . . . | 78        |
| Ancho de las pistas de la placa de circuito impreso . . . . .               | 78        |
| .3 Potencias consumidas por las resistencias . . . . .                      | 79        |
| .4 ODS . . . . .  | 80        |
| .4.1 Introducción . . . . .   | 80        |
| Objetivos de Desarrollo Sostenible . . . . .                                | 80        |
| Agenda 2030 . . . . .   | 81        |
| .4.2 Descripción de las ODS relevantes . . . . .                            | 81        |
| Educación de calidad . . . . .  | 81        |
| Energía Asequible y No Contaminante . . . . .                               | 81        |
| Ciudades y comunidades sostenibles . . . . .                                | 82        |

# Índice de figuras

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Diagrama de bloques de un sistema de electrónica de potencia [16]. . . . .   | 5  |
| 1.2  | Señal senoidal sin contenido armónico [3]. . . . .   | 6  |
| 1.3  | Señal senoidal con contenido armónico [3]. . . . .   | 7  |
| 1.4  | Triángulo de potencia. . . . .   | 7  |
| 1.5  | Esquema eléctrico del filtro activo con un alto factor de potencia. . . . .  | 10 |
| 1.6  | Organigrama técnico. . . . .   | 14 |
| 1.7  | Características de conmutación por interruptor genérico (linealizada): a) circuito simplificado de conmutación impuesta inductiva; b) formas de onda de interruptores; c) pérdida de energía instantánea del interruptor [13]. . . . . | 21 |
| 1.8  | Circuito del filtro activo con alto factor de potencia en software MATLAB-Simulink. . . . .  | 26 |
| 1.9  | Diagrama de bloques del esquema de control. . . . .  | 27 |
| 1.10 | Diagrama de bloques del diagrama de control en Simulink en modo continuo [2].  | 29 |
| 1.11 | Gráfica de Simulink de la tensión de entrada. . . . .  | 30 |
| 1.12 | Gráfica de Simulink de la corriente de entrada. . . . .  | 30 |
| 1.13 | Gráfica de Simulink de la corriente que circula por la bobina en modo continuo.  | 31 |
| 1.14 | Gráfica de Simulink de la corriente que circula por la bobina en modo continuo.  | 32 |
| 1.15 | Gráfica de Simulink de la tensión de salida en modo continuo. . . . .  | 32 |
| 1.16 | Armónicos de la señal de salida en modo continuo. . . . .  | 33 |
| 1.17 | Diagrama de bloques del control en MATLAB-Simulink en modo discreto. . .   | 34 |
| 1.18 | Señal de la corriente por la bobina en modo discreto. . . . .  | 34 |
| 1.19 | Señal de la corriente por la bobina en modo discreto. . . . .  | 35 |
| 1.20 | Señal de la tensión de salida en modo discreto. . . . .  | 35 |
| 1.21 | Pulsos MOSFET y conducción de la carga. . . . .  | 36 |
| 1.22 | Pulsos MOSFET y conducción de la carga. . . . .  | 36 |
| 1.23 | Gráfica detección paso por cero. . . . .   | 37 |
| 1.24 | Alzado PCB. . . . .  | 39 |
| 1.25 | Planta PCB. . . . .  | 39 |
| 1.26 | Vista PCB. . . . .   | 40 |
| 1    | ODS [9]. . . . .   | 81 |



# Índice de tablas

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Descripción de las soluciones. . . . .                            | 13 |
| 1.2 | Modelo y fabricante de los conensadores. . . . .                  | 19 |
| 1.3 | Valores de la simulación en modo continuo y discreto. . . . .     | 35 |
| 3.1 | Lista de materiales de los componentes pasivos. . . . .           | 53 |
| 3.2 | Lista de materiales de los diodos y rectificador. . . . .         | 54 |
| 3.3 | Lista de materiales de los circuitos integrados. . . . .          | 54 |
| 3.4 | Lista de materiales de los convertidores y transformador. . . . . | 54 |
| 3.5 | Lista de materiales de los conectores y puntos de prueba. . . . . | 55 |
| 1   | Potencias consumidas por las resistencias. . . . .                | 79 |
| 2   | ODS relevantes. . . . .   | 83 |

## Abreviaturas y acrónimos

$V_r$  Señal de tensión de entrada rectificada

$V_o$  Señal de tensión de salida

$V_{24V_{RMS}}$  Tensión senoidal de entrada al rectificador

# Capítulo 1

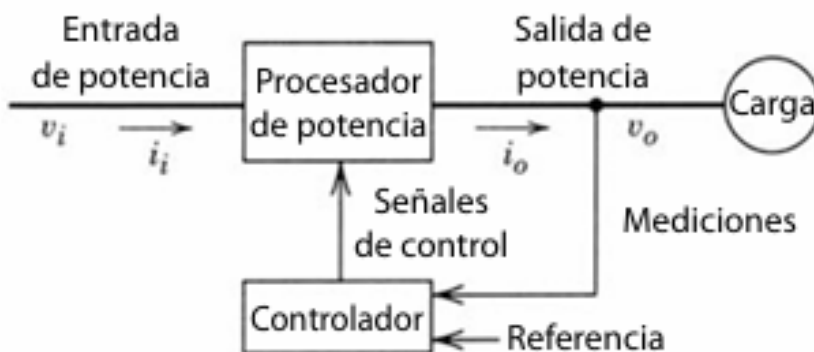
## Memoria

### 1.1 Introducción

En esta sección se proporcionará el contexto del proyecto, que se centra en el campo de la electrónica de potencia y aborda específicamente la problemática de la inserción de armónicos en la red eléctrica.

#### 1.1.1 Ámbito del Trabajo de Fin de Grado

Este Trabajo de Fin de Grado se sitúa en el área de la electrónica de potencia. Según Rashid, M.H. (2004), en términos generales, la función de la electrónica de potencia es gestionar y regular el flujo de energía eléctrica, proporcionando voltajes y corrientes de manera óptima para satisfacer las necesidades de las cargas de los usuarios [16].



**Figura 1.1:** Diagrama de bloques de un sistema de electrónica de potencia [16].

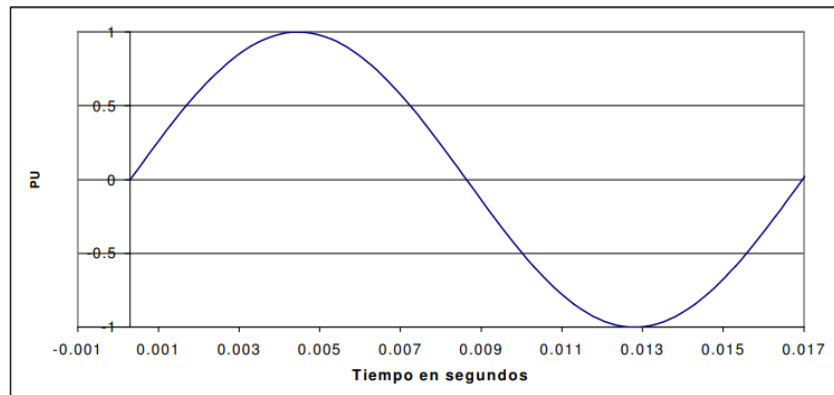
La figura 1.1 presenta un sistema de electrónica de potencia representado mediante un diagrama de bloques que recibe usualmente la energía de la red eléctrica, con frecuencias de

50 o 60 Hz, monofásica o trifásica. El ángulo de fase entre el voltaje y la corriente de entrada, de lo que tratará el presente proyecto, depende de la topología y el control del procesador de potencia. El procesador de potencia ajusta el voltaje, corriente, frecuencia y número de fases de salida según las necesidades de la carga. Un controlador de realimentación compara la salida con un valor deseado y ajusta el sistema para minimizar cualquier discrepancia. El controlador está compuesto por circuitos integrados lineales y/o procesadores digitales de señales.

El desarrollo de dispositivos electrónicos, como computadoras, equipos de comunicación y productos de consumo, requiere un suministro eléctrico regulado de corriente continua mediante fuentes de alimentación conmutadas. El aumento de los costos de energía y las preocupaciones ambientales ha convertido la conservación de energía en una prioridad. Además, la creciente demanda de bombas y compresores con velocidades ajustables para mejorar el control de procesos industriales, junto con el interés en el transporte eléctrico, ha generado un aumento en la demanda de la electrónica de potencia.

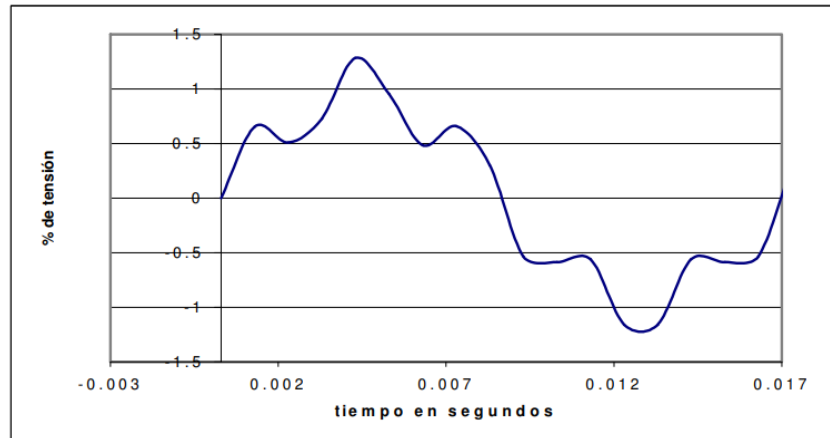
### 1.1.2 ¿Qué son los armónicos de una señal?

Los sistemas eléctricos actuales contienen una variedad de elementos no lineales, como rectificadores o inversores, que generan armónicos a partir de formas de onda sinusoidales y con la frecuencia de la red eléctrica. Estos armónicos son ondas adicionales con frecuencias diferentes a la fundamental de la red [3].



**Figura 1.2:** Señal senoidal sin contenido armónico [3].

En la figura 1.2 se muestra una señal senoidal de 60 Hz sin contenido armónico.

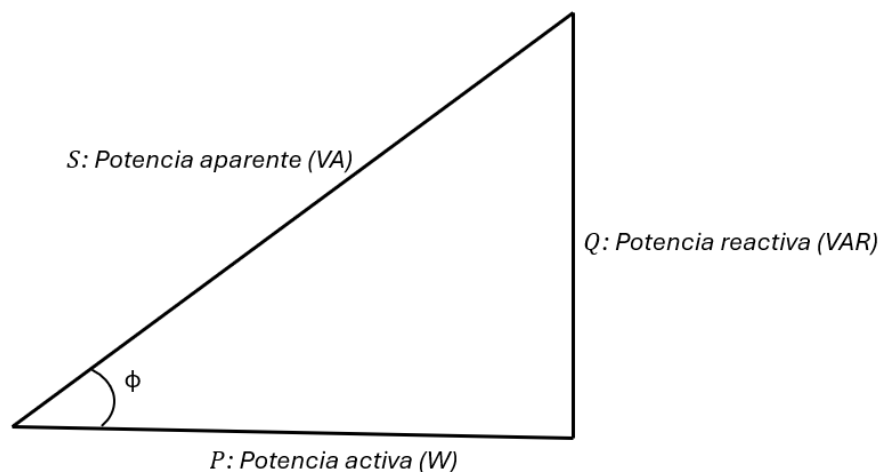


**Figura 1.3:** Señal senoidal con contenido armónico [3].

En la figura 1.3 se observa la misma señal pero con contenido armónico.

### 1.1.3 ¿Qué es el factor de potencia?

En los sistemas de corriente alterna, la potencia consumida por las cargas se descompone en dos componentes vectoriales: la potencia activa (en Vatios), que representa la energía utilizada para realizar trabajo físico como movimiento mecánico o generación de calor, y la potencia reactiva (en Voltio-Amperio reactivo), asociada con los campos magnéticos y eléctricos en las máquinas eléctricas, que aunque no produce trabajo físico directamente para su funcionamiento es esencial en los sistemas de corriente alterna. La combinación de estos dos componentes da como resultado la potencia aparente (en Voltio-Amperio), denotada como  $S$ , y los tres pueden representarse gráficamente en el triángulo de potencias de la figura 1.4. El ángulo de potencia,  $\phi$ , refleja la relación entre los tres componentes de la potencia en un sistema eléctrico y se conoce como factor de potencia (FP) [7].



**Figura 1.4:** Triángulo de potencia.

Matemáticamente, el factor de potencia (FP) se calcula como el coseno del ángulo de fase ( $\phi$ ) entre la corriente y el voltaje en un circuito de corriente alterna. La fórmula para calcular el factor de potencia es:

$$P = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{\text{gef}} \cdot I_{\text{gef}}} \quad (1.1)$$

Si asumimos que la tensión y la corriente de entrada son sinusoidales y no están desfasadas y que  $V_{\text{gef}}$  y  $I_{\text{gef}}$  son respectivamente la tensión de corriente eficaces de entrada, la fórmula se simplifica a  $\cos \phi$ , donde  $\phi$  representa el ángulo de fase entre la tensión y la corriente de entrada.

$$P = \frac{P}{S} = \frac{V_{\text{gef}} \cdot I_{\text{gef}} \cdot \cos \phi}{V_{\text{gef}} \cdot I_{\text{gef}}} = \cos \phi \quad (1.2)$$

Se puede deducir de esta afirmación que el factor de potencia oscila entre 0 y 1, y este valor está influenciado por la potencia reactiva. Cuando la potencia reactiva es nula, el factor de potencia alcanza el valor de 1, lo que significa que estamos utilizando eficientemente toda la potencia de la red eléctrica [18].

### 1.1.4 Necesidad de mejora de la eficiencia del factor de potencia

En la Electrónica de Potencia, la calidad de las fuentes de alimentación ha sido un tema crucial durante mucho tiempo, pero en los últimos años se ha vuelto aún más relevante para asegurar la eficiencia energética.

Es fundamental evitar que los equipos introduzcan armónicos en la red eléctrica y que puedan manejar el ruido proveniente de la misma. Esto ha llevado al desarrollo de técnicas de regulación más sofisticadas para las fuentes de alimentación conmutadas, ya que los métodos de filtrado pasivo tradicionales a menudo no cumplen con todos los requisitos de calidad.

En los últimos años, se han introducido nuevas técnicas de regulación que incorporan la eficiencia del factor de potencia, especialmente en aplicaciones de baja potencia. Una de las áreas de investigación más prometedoras en este campo es la integración de dos etapas de convertidor en una sola para lograr corrección de factor de potencia y conversión AC/DC y DC/DC simultáneamente [6]. Esto proporciona una regulación más eficiente a un costo menor. El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un dispositivo de conversión AC/DC y DC/DC simultáneamente con un factor de potencia eficiente que pueda ser utilizado en una amplia gama de aplicaciones de baja potencia.

## 1.2 Antecedentes

Esta sección presenta la evolución del proyecto. Además, detalla los antecedentes que llevaron al diseño de un filtro activo con un alto factor de potencia.

### 1.2.1 Razones por las que es necesaria la realización del proyecto

El factor de potencia es una medida que indica la eficiencia con la que se utiliza la energía eléctrica en un sistema. Cuando este es bajo, pueden surgir problemas en el suministro eléctrico, como un mayor consumo de energía y una menor capacidad de carga.

La corrección del factor de potencia tiene varias ventajas, como el ahorro de energía, la mejora de la eficiencia y el cumplimiento de normativas. Además, contribuye a una mayor vida útil del equipo y a una mejor calidad de la energía eléctrica. Así que, la corrección del factor de potencia es esencial para optimizar el uso de la energía eléctrica y evitar problemas en el suministro [18].

Por este motivo, en el Máster Universitario en Ingeniería de Sistemas Electrónicos (MUISE) se ha decidido incluir un temario que se centra en la corrección del factor de potencia. El objetivo de la presente placa de circuito impreso será que los alumnos aprendan de una manera más práctica sobre este tema.

### 1.2.2 Intentos previos de resolución

Existen varias formas de corregir el factor de potencia de un circuito eléctrico. A continuación, se detallan las principales:

- Instalación de condensadores en paralelo: Los condensadores se conectan en paralelo con la carga eléctrica para compensar la energía reactiva. Al igual que en los bancos de fórmula, su función es mejorar el factor de potencia. Estos condensadores generan una potencia reactiva opuesta a la inductiva de la instalación, reduciendo así la reactancia total y mejorando el factor de potencial [17].
- Uso de equipos eléctricos más eficientes: Al utilizar equipos que generen menos pérdida de energía reactiva, se contribuye a mejorar el factor de potencia. Esto implica seleccionar motores, transformadores y otros dispositivos con características que minimicen la potencia reactiva.
- Análisis de carga y medidas correctivas: Realizar un análisis detallado de la carga eléctrica permite identificar los equipos que consumen más energía reactiva. Luego, se pueden tomar medidas para reducir este consumo, como ajustar la operación de los motores o redistribuir la carga entre fases.

### 1.2.3 Estudio de viabilidad

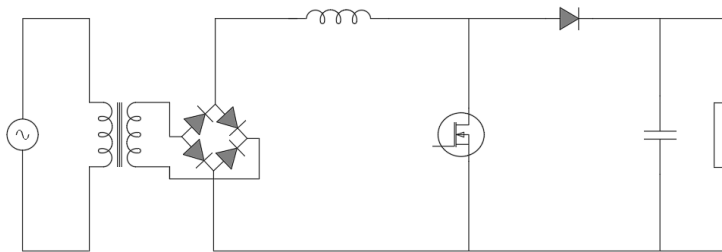
En el presente proyecto, no consta la realización de un estudio de viabilidad, dado que el fin de este proyecto es totalmente educativo.

## 1.3 Estudio de necesidades

En esta sección, se detallarán las especificaciones proporcionadas en el encargo o solicitud del proyecto. Esto incluirá los requisitos específicos para el diseño del rectificador activo HPF (High Power Factor).

### 1.3.1 Especificaciones

El dispositivo electrónico del que se basa el proyecto consta de un rectificador no controlado de 2 ramas con un convertidor DC/DC Boost a su salida. Además, a la entrada del rectificador se conectará un transformador con el fin de reducir la amplitud de la señal senoidal de entrada. En la figura 1.5 se observa el esquema en cuestión.



**Figura 1.5:** Esquema eléctrico del filtro activo con un alto factor de potencia.

Los parámetros eléctricos incluyen:

- Tensión de entrada:  $V_{RMS}$  a 50 Hz desde la red eléctrica. Esta tensión puede tener una variación de hasta un 10%.
- Tensión de salida: 100 V proporcionada a la carga. El rizado de esta tensión no debe superar el 5% de su valor máximo.
- Potencia de salida: 200 W.
- Rizado de la corriente en la bobina del convertidor Boost: No debe superar el 20% de su valor máximo.
- Frecuencia de conmutación del transistor: 50 kHz.

Cabe destacar que se cumplirá rigurosamente con estos parámetros para garantizar la seguridad y el rendimiento óptimo del sistema.

### 1.3.2 Normativa considerada

En el presente proyecto se diseña e implementa un sistema conectado a la red de baja tensión, por lo tanto, se debe cumplir con los requisitos legales establecidos en el BOE. Estos requisitos se detallan en el Real Decreto 842/2002 sobre el reglamento electrotécnico de baja

tensión [10]. Además, al ser un filtro activo con corrección de potencia, se tendrá en cuenta la norma IEEE 1547 que establece los requisitos para la interconexión de recursos de energía distribuida con la red eléctrica [5].

Para el diseño correcto y óptimo de la placa de circuito impreso se considerará la normativa IPC-2221 [11].

### 1.3.3 Factores

En esta sección se explicarán los factores, tanto técnicos, de gestión y económicos que se ha tenido en cuenta para la ejecución de este proyecto.

#### Factores técnicos

Para asegurar un diseño adecuado de la placa de circuito impreso, se deberá cumplir la normativa IPC-2221 que proporciona los criterios de diseño generales para este propósito [11]. También se deberá tener en cuenta la normativa IPC-D-275 que se enfoca a definir los estándares de diseño de placas rígidas y rígidas-flexibles y además, en la normativa IPC-6012 que se centra especialmente en el diseño de placas de circuito impreso rígidas [12].

#### Factores de gestión

Para garantizar el éxito del proyecto en cuestión, se ha elaborado un plan de gestión integral que abarca diversos aspectos clave.

- La gestión de producción se centra en la planificación meticulosa de cada etapa, desde la selección de proveedores hasta el control del funcionamiento durante el montaje y las pruebas.
- En cuanto a la gestión de calidad, se han establecido criterios rigurosos para las pruebas y verificaciones del prototipo, garantizando que cumpla con las especificaciones requeridas.
- La gestión del tiempo incluye un cronograma detallado que define hitos importantes y plazos de entrega, con planes de contingencia para mitigar posibles retrasos.
- La gestión de documentación abarca la creación de manuales técnicos y de usuario para facilitar el uso y mantenimiento del prototipo.

Este enfoque integral asegura no solo la eficacia del prototipo en el ámbito educativo, sino también su sostenibilidad y alineación con los objetivos del Máster Universitario en Ingeniería de Sistemas Electrónicos de la UPV.

#### Factores económicos

El coste del diseño y la implementación del primer prototipo del dispositivo electrónico es aproximadamente de 5.096,43 €. El precio podrá variar dependiendo de las características de los elementos electrónicos.

## 1.4 Planteamiento de soluciones alternativas y justificación de la solución adoptada

En la presente sección, se plantean diferentes propuestas de solución dadas las necesidades de aprendizaje que los alumnos deben adquirir en el Máster Universitario de Sistemas Electrónicos Industriales (MUISE).

Los filtros activos se utilizan para mitigar problemas de calidad de potencia al inyectar una corriente de compensación en el sistema. Esta corriente está desfasada 180 con las corrientes armónicas, anulándolas efectivamente. Esto mejora la calidad de la energía y aumenta la eficiencia general del sistema. El objetivo de este proyecto será que el alumnado aprenda de una manera práctica los conceptos fundamentales relacionados con los filtros activos, la corrección del factor de potencia y otros conceptos teóricos [1].

Las soluciones planteadas son las siguientes:

- Uso de filtros pasivos para corregir el factor de potencia. La primera solución se basa en filtros que pueden mejorar el factor de potencia al compensar la energía reactiva mediante la adición de capacitores o inductores. A diferencia de los filtros activos, en este caso no se utilizan componentes activos como los transistores [4].
- Corrección del factor de potencia mediante software. La segunda solución consiste en una técnica de corrección mediante software, cuyo uso está más enfocado para las cargas no lineales, ya que los armónicos que generan requieren técnicas más avanzadas para corregir el factor de potencia [14].
- Uso de técnicas de simulación para propósitos educativos en lugar del hardware físico. La tercera solución consiste en centrar el aprendizaje del alumnado en el desarrollo de simulaciones de filtros activos con corrección de factor de potencia.
- Implementación de una placa de circuito impreso de un filtro activo. La cuarta solución consiste en centrar el aprendizaje del alumnado realizando pruebas reales mediante una PCB física y testeando las diferentes señales del circuito en cuestión.

**Tabla 1.1:** Descripción de las soluciones.

|                     | <b>Solución 1</b>  | <b>Solución 2</b>   | <b>Solución 3</b>  | <b>Solución 4</b>  |
|---------------------|--|---|--|--|
| <b>Ventajas</b>     | Menor coste  | Mayor simplicidad y menor coste                                   | Los estudiantes pueden experimentar con distintos parámetros y configuraciones | Mayor flexibilidad   |
| <b>Desventajas</b>  | Mayor complejidad y menor flexibilidad                                   | Menor eficiencia y flexibilidad                                   | Experiencia práctica limitada  | Mayor complejidad  |
| <b>Conclusiones</b> | Este dispositivo presenta limitaciones de rendimiento, control y ajuste. | Esta solución presenta limitaciones de procesamiento y precisión. | El objetivo del proyecto es el aprendizaje y con esta solución es limitado.    | Se considera que es la mejor solución por su equilibrio entre complejidad y accesibilidad. |

La solución adoptada es la implementación de una placa de circuito impreso de un filtro activo con corrección del factor de potencia por su equilibrio entre flexibilidad, precio, accesibilidad, comprensión por parte del alumnado y compatibilidad con los objetos educativos del máster universitario. Esta alternativa permitirá a los estudiantes experimentar de forma práctica los conocimientos adquiridos. Además, se implementarán puntos de prueba (*text points*) de los distintos valores más relevantes del dispositivo electrónico.

## 1.5 Descripción detallada de la solución adoptada

En este apartado se explicará de forma general las partes de este proyecto que consiste en un filtro activo con alto factor de potencia y tiene como objetivo el aprendizaje del alumnado del Máster Universitario en Ingeniería de Sistemas Electrónicos (MUISE).

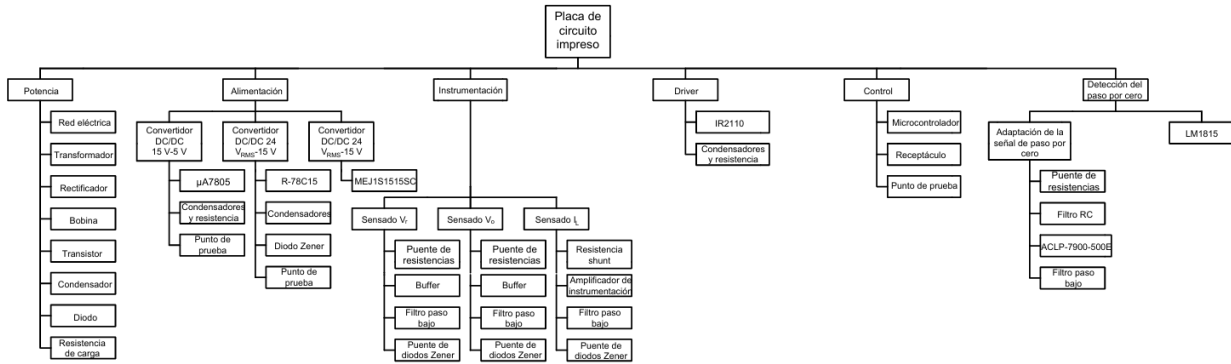


Figura 1.6: Organigrama técnico.

### 1.5.1 Potencia

En esta sección se relatarán las partes de la etapa de potencia del proyecto. Estos elementos se muestran en el plano número 2.

#### Red eléctrica

La tensión de entrada del filtro activo será la red eléctrica que se caracteriza por ser una señal monofásica senoidal de  $230 V_{RMS}$  (con una tolerancia del 10 %) a 50 Hz (con una tolerancia de 1 Hz).

#### Transformador

La red eléctrica se conectará a un transformador. La tensión de salida de este transformador será una señal senoidal de valor  $24 V_{RMS}$  a 50 Hz.

#### Rectificador

La señal senoidal de  $24 V_{RMS}$  se empalmará a un rectificador de doble onda, que consta de cuatro diodos. Esta señal rectificada será nombrada  $V_{CC}$  y gracias a ella obtendremos la alimentación necesaria para los circuitos integrados mediante convertidores DC/DC.

#### Bobina

La bobina forma parte del convertidor Boost que pertenece al filtro activo diseñado. La función de este componente consiste en almacenar la energía en forma de campo magnético cuando la corriente pasa a través de él. Durante el ciclo de conducción del transistor, el inductor

almacenará energía y cuando el transistor se abre, libera esta energía hacia la carga a través del diodo.

## Transistor

El transistor forma parte del convertidor Boost que pertenece al filtro activo diseñado y tiene como función controlar el flujo de corriente a través del inductor. Será un MOSFET y conmutará a una frecuencia de 50 kHz.

## Condensadores

Los condensadores forman parte del convertidor Boost que pertenece al filtro activo diseñado. La función de este componente pasivo se basa en almacenar la energía y suavizar el voltaje de salida, proporcionando una tensión continua y estable a la carga. También reduce el rizado en el voltaje de salida, mejorando la calidad de la energía suministrada a la carga.

## Diodo

El diodo forma parte del convertidor Boost que pertenece al filtro activo diseñado. Conducirá corriente por este componente cuando el transistor esté apagado, es decir, sea equivalente a un circuito abierto. Permite el flujo de corriente desde el inductor hacia el condensador y la carga cuando el interruptor está apagado y bloquea el flujo en la dirección opuesta. Esto asegura que el voltaje no vuelva a la fuente de entrada.

## Resistencia de carga

La caída de tensión de la resistencia de carga será la especificada como tensión de salida, en este caso, 100 V con una potencia de 200 W. A partir de la ley de Ohm, se deduce que la corriente que circulará por esta resistencia será de 2 A y su valor será 50  $\Omega$ .

## 1.5.2 Alimentación

Los circuitos integrados usados en el proyecto necesitan una determinada tensión de alimentación para su funcionamiento. Estos elementos se muestran en el plano 3.

### Convertidor DC/DC de $V_{cc}$ a 15 V

Como se ha explicado en la subsección 1.5.1, la tensión de entrada rectificada se convierte a 15 V con el fin de alimentar el driver. Esta tensión de 15 V será usada para transformarla en otro valor de tensión deseado, para alimentar los los circuito sintegrados restantes que forman parte del proyecto.

### Convertidor DC/DC de 15 V a 5 V

El circuito integrado LM1815 y los amplificadores operacionales se alimentan con una tensión de valor de 5 V. Por lo tanto, los 15 V que hemos obtenido de la subsección 1.5.2 se convierten en 5 V mediante otro convertidor DC/DC.

## Convertidor DC/DC aislado

En el circuito de adaptación para la señal de entrada del circuito de detección del paso por cero, se necesita el aislamiento de la señal senoidal de entrada de 24 V eficaces. Por ello, se implementa un convertidor de aislamiento que convierte los 5 V referidos a la masa de la senoidal de entrada en 5 V referidos a la masa del resto del circuito.

### 1.5.3 Instrumentación

En esta sección se explicarán las partes de la instrumentación del sensado. Estos elementos se muestran en el plano 4.

#### Sensado $V_r$

En la presente subsección se explicarán las partes de la instrumentación del sensado de la señal de entrada rectificada. Todos los cálculos pertinentes a esta subsección se encuentran en el anexo .2.4.

#### Puente de resistencias

Con el fin de disminuir el valor de corriente de la señal sensada, se conectará un puente de resistencias en paralelo a la señal de entrada rectificada ( $V_r$ ). Este puente constará de tres resistencias, las dos primeras del mismo valor y la última de distinto. La caída de tensión de esta última resistencia será la tensión que se medirá. Esta señal tendrá la misma forma que la tensión de entrada rectificada, pero con valores de corriente y tensión más pequeños para que los componentes electrónicos de instrumentación conectados a continuación la puedan asimilar.

#### Buffer

A continuación del puente de resistencias, se agregará un buffer con el propósito de escapar de la desadaptación de impedancias.

#### Filtro paso bajo

Posteriormente, se acoplará un filtro paso bajo de primer orden con el fin de filtrar la frecuencia de conmutación y eliminar ruido en la señal. Además, proporcionará la ganancia deseada para amplificar la señal sensada con el objetivo de que el microcontrolador la pueda leer sin perder información.

#### Diodo Zener

Finalmente, se conectará un diodo Zener para la protección de los dispositivos electrónicos.

#### Sensado $I_L$

En esta sección se explicarán las partes de la instrumentación del sensado de la intensidad que circula por la bobina. Los cálculos referentes a esta sección se encuentran en el anexo .2.4.

## **Resistencia shunt**

La resistencia shunt es un tipo de resistor de baja resistencia usado para medir corrientes de alto valor ya que soporta potencias elevadas. Esta resistencia se muestra conectada a la etapa de potencia en el plano número 2.

## **Amplificador de instrumentación**

A continuación de la resistencia shunt, se utilizará un amplificador de instrumentación para convertir la corriente medida en una señal de voltaje proporcional. Este amplificador es crucial porque la medición de corriente no se toma directamente desde tierra, a diferencia de los otros métodos de sensado utilizados en este proyecto. En esta configuración, la corriente fluye a través de la resistencia shunt, generando una caída de voltaje proporcional a la corriente. El amplificador de instrumentación detectará y amplificará este pequeño voltaje, proporcionando una señal de salida precisa y controlada.

## **Filtro paso bajo**

El filtro paso bajo cumple la misma función que el descrito en la sección Filtro paso bajo utilizado para el sensado de la señal de entrada rectificada.

## **Diodo Zener**

El diodo zener desempeña la misma función descrita en la sección correspondiente al Diodo Zener utilizado en el sensado de la señal de entrada rectificada.

## **Sensado $V_o$**

En esta sección se explicarán las partes de la instrumentación del sensado de la señal de salida. Los cálculos pertinentes a esta sección se encuentran en el anexo .2.4.

## **Puente de resistencias**

El puente de resistencias tiene la misma función que la explicada en el apartado de Puente de resistencias del sensado de la tensión de entrada rectificada.

## **Buffer**

El buffer tiene la misma función que la explicada en el apartado de Buffer del sensado de la tensión de entrada rectificada.

## **Filtro paso bajo**

El filtro paso bajo tiene la misma funcionalidad que el Filtro paso bajo explicado en el apartado del sensado de la señal de entrada rectificada.

## **Diodo Zener**

El diodo Zener desempeña la misma función descrita en la sección correspondiente al Diodo Zener utilizado en el sensado de la señal de entrada rectificada.

### **1.5.4 Driver**

La función del driver es proporcionar pulsos de la tensión de control (entre puerta y surtidor del transistor) en el rango que el transistor necesite a partir de los pulsos de la señal digital del microcontrolador, cuyo valor máximo es de 3,3 V. La tensión de los pulsos proporcionados por el driver será igual a su tensión de alimentación, 15 V.

### **1.5.5 Control**

En la subsección presente se explicará la etapa de control del proyecto, de la que forma parte el microcontrolador.

#### **Microcontrolador**

El microcontrolador tiene una función crucial en el control del sistema. Por una parte, proporcionará una señal de pulsos de salida digital para el control del transistor, es decir, para su encendido y apagado. Esta señal digital es la que se conectará al driver. Por otra parte, se usará para suministrar las señales sensadas a partir de su convertidor analógico-digital. El microcontrolador será alimentado mediante USB desde el PC.

### **1.5.6 Detección del paso por cero**

En la presente subsección se explicará el circuito diseñado para proporcionar los pasos por cero de la señal eléctrica al microcontrolador. Esta etapa del circuito se muestra en el plano número 6.

#### **Convertor DC/DC no aislado de 24 a 5 V**

Este convertor se utilizará con la finalidad de proporcionar al microcontrolador los pasos por cero de la señal de la red eléctrica, la señal de entrada. Este dispositivo necesitará un circuito de adaptación y asilamiento de la señal senoidal de 24 V eficaces, que tendrá la misma frecuencia que la red eléctrica y será la señal de entrada al circuito de adaptación de la señal de entrada al convertor DC/DC.

## 1.6 Elección de componentes

En esta sección se nombrarán y explicarán los componentes seleccionados para la implementación del proyecto según las especificaciones comentadas en el apartado 1.3.1. Cabe destacar que los componentes electrónicos elegidos cumplirán con valores máximos de tolerancia que excederán los requisitos mínimos necesarios para garantizar la seguridad del sistema. Las fichas técnicas de estos componentes se encuentran en el anexo .1.

### 1.6.1 Elementos pasivos

En la presente subsección se expondrán los modelos elegidos para los componentes pasivos de todo el proyecto.

#### Resistencias

Las resistencias utilizadas en este proyecto serán del modelo MF del fabricante *Koa Speer Electronics Inc.* y del modelo RN del fabricante *Vishay*. Los modelos presentados pertenecen a la serie E24, con una tolerancia del 1%. Estos componentes son de tipo agujero pasante.

Además, para que el diseño y montaje de la placa de circuito impreso sea posible se implementarán resistencias de valor  $0 \Omega$  del modelo MFR del fabricante *Yageo*.

La resistencia shunt y la resistencia de carga no se incluyen en este apartado, ya que se explicarán en su sección correspondiente.

#### Condensadores

El modelo de los condensadores utilizados en todo el proyecto varía según su valor de capacitancia, como se muestra en la tabla 1.2. Los condensadores de la etapa de potencia, denominados C1 y C2 en el plano número 2, están excluidos de esta sección y se explicarán en su apartado correspondiente.

**Tabla 1.2:** Modelo y fabricante de los condensadores.

| Capacitancia  | Modelo                | Fabricante       |
|---------------|-----------------------|------------------|
| 68 pF         | FKP20100681D00        | <i>WIMA</i>      |
| 100pF         | MC0805N101J101A2.54MM | <i>MULTICOMP</i> |
| 0,33 $\mu$ F  | BFC237111334          | <i>Vishay</i>    |
| 0,001 $\mu$ F | MMK5102K50J01L4       | <i>EPCOS/TDK</i> |
| 10 nF         | BFC237011103          | <i>Vishay</i>    |
| 100 nF        | BFC237111104          | <i>KEMET</i>     |
| 1 $\mu$ F     | ESE105M050AC3         | <i>KEMET</i>     |
| 10 $\mu$ F    | B41851B6106M          | <i>EPCOS/TDK</i> |

Cabe destacar que todos los componentes anteriormente mencionados en la tabla 1.2 son de tipo agujero pasante.

Los condensadores de valor 100 nF que se conectan a las tensiones de alimentación de los circuitos integrados tienen como objetivo proporcionar una alimentación estable.

## 1.6.2 Etapa de potencia

En esta subsección se explicarán los modelos de los componentes elegidos para la etapa de potencia (plano número 2) del proyecto en cuestión.

### Transformador

El transformador que se utilizará para este proyecto será del fabricante *Tecnotrafo* con referencia 225F13TKS. Tendrá una entrada de 230  $V_{RMS}$  y una salida de 24  $V_{RMS}$ . Este dispositivo tiene protección contra choques eléctricos de Clase I. Además, los bobinados están protegidos por una carcasa autoextinguible y tiene un adaptador guía DIN que soporta hasta 250VA.

### Rectificador

El rectificador de onda completa que se implementará debe tolerar la tensión rectificadora de entrada de valor 24  $V_{RMS}$ . Se ha seleccionado el modelo CDBHD160L-HF del fabricante *Comchip*. Este componente soporta tensiones de hasta 42  $V_{RMS}$  y cada diodo presenta una caída de tensión de 0,625 V.

### Bobina

Se usará una bobina disponible en el laboratorio de la universidad que tiene un valor de 850  $\mu\text{H}$  y una resistencia en serie equivalente de 0,85  $\text{m}\Omega$ .

### Transistor

La corriente que circulará por el transistor cuando esté en conducción será igual a la corriente que circula por la bobina, que no será superior a 11,78 A según los cálculos teóricos del anexo .2.2, y la tensión máxima que soportará será igual a 100 V, la tensión de salida.

Para la elección del transistor del circuito de este proyecto, se han considerado tres modelos. En primer lugar, el IGBT IHW20N140R5L del fabricante *Infineon*, que soporta una tensión de hasta 1400 V entre colector y emisor y una corriente en el colector de hasta 20 A. Este componente se descartó ya que para la aplicación del proyecto se prefirió el uso de un MOSFET que se caracteriza por proporcionar una respuesta rápida a potencias bajas.

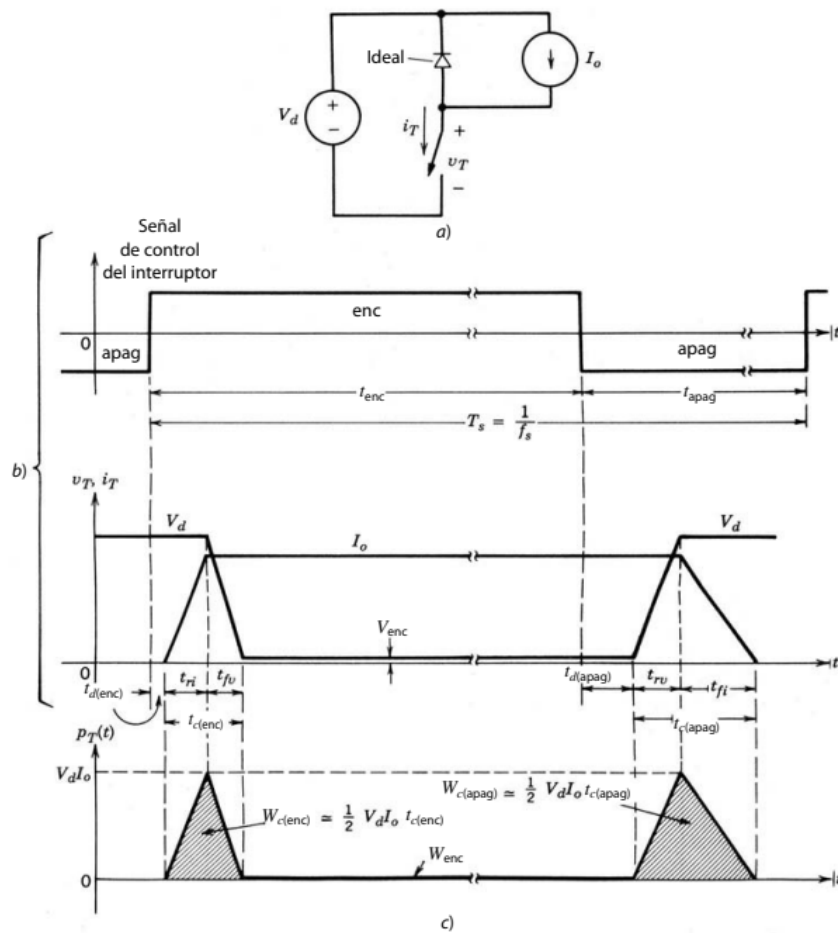
En segundo lugar, el MOSFET TPH9R00CQ5 del fabricante *Toshiba*, que soporta una tensión de hasta 150 V entre drenador y surtidor y una corriente de 64 A, con una resistencia ON de 7,3  $\text{m}\Omega$  y una tensión entre puerta y surtidor de 10 V. Este componente no es de tipo SMD y dificultaría el montaje en la placa.

En tercer lugar, y el que finalmente se ha escogido, el MOSFET STP30NF20 del fabricante *STMicroelectronics*. Este componente tolera una tensión de hasta 200 V entre drenador y surtidor y una corriente máxima de 30 A con una resistencia ON de 75  $\text{m}\Omega$ . La potencia de

disipación máxima del MOSFET STP30NF20 es de 125 W, con una resistencia térmica entre el punto de unión y el aire ambiente de 50 °C/W. Para justificar que el transistor elegido no necesita radiador se han hecho los cálculos pertinentes. A partir de la resistencia del transistor cuando está en conducción, conocida como resistencia ON es posible calcular las pérdidas de conducción en el MOSFET:

$$P_{\text{cond}} = R_{\text{ds(on)}} \cdot I_o^2 \cdot D \quad (1.3)$$

Durante la conmutación, debido a la presencia de capacidades parásitas dentro del transistor, el cambio de un estado a otro no es ideal y requiere un tiempo de conmutación. Al analizar las formas de onda en una célula de conmutación básica compuesta por un diodo y un transistor, se obtiene una representación similar a la mostrada en la figura 1.7.



**Figura 1.7:** Características de conmutación por interruptor genérico (linealizada): a) circuito simplificado de conmutación impuesta inductiva; b) formas de onda de interruptores; c) pérdida de energía instantánea del interruptor [13].

En la figura 1.7, se observa que el tiempo total necesario para el encendido incluye varios componentes:  $t_{d(\text{enc})}$  el tiempo de reacción del transistor una vez la señal de control ha cambiado y  $t_{c(\text{enc})}$  que se divide en dos:  $t_{ri}$ , que es el tiempo necesario para que la corriente del drenador alcance  $I_o$ ;  $t_{fv}$ , que representan el tiempo necesario para que el transistor alcance su

tensión de encendido finalice el transitorio. En el apagado sucede algo similar tal como se aprecia en la gráfica. Se considera que el tiempo total de conmutación es la suma entre el tiempo que transcurre tanto en el encendido como en el apagado.

En las hojas de datos del MOSFET STP30NF20, estos tiempos y sus descomposiciones internas están especificados. Se considera  $t_{on}$  como la suma de  $t_{d(enc)}$  y  $t_{c(enc)}$  y  $t_{off}$  como la suma de  $t_{d(apag)}$  y  $t_{c(apag)}$ , según la nomenclatura de la figura 1.7. Con esto, se calcula la potencia disipada en conmutación.

$$P_{comm_{MOSFET}} = \frac{1}{2} \cdot V_{in} \cdot I_{DS} \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot f_{sw} \quad (1.4)$$

La potencia disipada total por el transistor es igual a 2,37 W. La potencia de disipación máxima es mayor que la disipada. No es necesaria la implementación de un radiador.

## Diodo

El diodo que se ha seleccionado para este proyecto es un diodo Schottky del modelo RB228T150HZ del fabricante *Rohm* que es lo suficientemente rápido para conmutar a la frecuencia de conmutación y que soporta hasta 30 A entre ánodo y cátodo. Este componente tendrá una caída de tensión de aproximadamente 0,88 V en conducción.

## Condensador

En el anexo .2.2, se establece una capacitancia de 4,4 mF, donde circulará una corriente de 2 A y una tensión de 100 V. Se emplearán dos condensadores B43544B2228M0 de *TDK* en paralelo, cada uno con una capacitancia de 2,2 mF, una ESR de 60 mΩ y soporta una tensión de hasta 200 V entre sus bornes. La capacitancia total será de 4,4 mF y la ESR se reducirá a 30 mΩ. Como alternativa, se considera el condensador E36D161HPN472MAB7M del fabricante *UnitedChemi – Cont*, con una capacitancia de 4,7 mF y una ESR de 36,7 mΩ.

Se optará por la configuración en paralelo de los condensadores B43544B2228M0 para disminuir la resistencia serie equivalente del condensador.

## Resistencia de carga

En el anexo .2.2, se ha definido una resistencia de carga de un valor de 50 Ω. Se implementará la resistencia bobinada HS250 50R F del fabricante *Ohmite*.

## Conector doble banana hembra

Para conectar la resistencia de carga y la señal de entrada de la red eléctrica a la placa de circuito impreso se usarán el modelo de conectores dobles hembra banana BU-P2269 del fabricante *Muller*.

## Punto de prueba PCB

En la placa de circuito impreso se implementarán distintos puntos de prueba con el objetivo de que el alumno pueda observar las señales más significativas del filtro activo mediante el

osciloscopio. Estos puntos de prueba serán del modelo 1033 del fabricante *Keystone Electronics*.

### 1.6.3 Alimentación

#### Convertidor DC/DC de $24V_{RMS}$ a 15 V

El convertidor (referido como U1 en el plano de la etapa de alimentación) que transformará la señal de entrada de 24 V eficaces (llamada  $24V_{rms\_1}$  y  $24V_{rms\_2}$  en el plano número 4) a 15 V de corriente continua será el modelo R-78C15-1.0 del fabricante *Recom* que asimila señales de entrada entre 18 V y 42 V y suministra una salida de 15 V y una corriente de salida de 1 A.

Las conexiones realizadas a la entrada de este componente son las sugeridas en la ficha técnica según la normativa EN55032. A la salida, se recomienda conectar un diodo Zener de 17 V de tensión zener, se usará el modelo 1N5247 del fabricante *Vishay*.

#### Convertidor DC/DC(15-5 V)

El convertidor (referido como U2 en el plano de la etapa de alimentación) elegido para transformar los 15 V a 5 V de corriente continua es el modelo  $\mu A7805$  del fabricante *Texas Instruments* que asimila tensiones de entrada de 7 a 25 V suministrando una salida de 5 V como valor típico y una corriente de salida de 1,5 A.

Se han conectado tanto condensadores como resistencias a la salida del componente con el fin de una mayor seguridad y estabilidad de la señal de salida.

#### Convertidor DC/DC Aislado

Para una conversión aislada de la tensión de 5 V referente a la masa llamada GND a una tensión de este mismo valor pero referente a GND\_ISO se usará el convertidor aislado MEE1S0505SC del fabricante *Murata Power Solutions*, nombrado como PS1 en los planos.

### 1.6.4 Driver

El driver que se implementará en la placa de circuito impreso será el modelo IR2110 del fabricante *Infineon Technologies*. Este componente presenta el mismo valor de tensión de salida que su alimentación, entre 10 y 20 V. En este caso se alimentará a 15 V.

Las conexiones realizadas en este componente son las sugeridas en la ficha técnica. El objetivo de los condensadores será la estabilidad de la señal y el de la resistencia la limitación de la corriente de entrada al MOSFET. Tanto el pin de alimentación como el pin de alimentación lógica se conectará a la tensión de 15 V tal y como se indica en el plano 4.

### 1.6.5 Instrumentación

En esta sección se explicarán los componentes referidos en el plano 4.

## Amplificador operacional

El amplificador operacional seleccionado para este proyecto es el modelo TL972 del fabricante *Texas Instruments*. Este componente es de tipo *rail to rail*, es decir, no requiere una tensión de alimentación negativa para su correcto funcionamiento, lo que simplifica el diseño de la etapa de alimentación. Su tensión de alimentación (la diferencia entre el valor de la señal en el pin de alimentación positivo y negativo) puede variar entre 2,7 V y 15 V. Aunque se dispone de señales de 5 V y 15 V, se opta por utilizar una tensión de 5 V para evitar trabajar con los valores máximos.

## Amplificador de instrumentación

El amplificador de instrumentación elegido para la etapa del sensado de la corriente que circula en la bobina es el modelo INA188 del fabricante *Texas Instruments*. Este dispositivo es de tipo *rail to rail* y su alimentación será de 5 V en el pin de tensión de alimentación positiva y el pin de alimentación negativa se conectará a masa, aunque admita tensiones de alimentación de hasta 20 V.

## Diodo Zener

Los diodos Zener escogidos para conectarse a la salida del sensado serán el modelo 1N5221 del fabricante *Vishay*. La tensión Zener de este componente es igual a 3 V.

### 1.6.6 Control

En esta subsección se expondrán los distintos componentes elegidos para la etapa de control del filtro activo.

## Microcontrolador

El microcontrolador seleccionado para realizar el control del convertidor y las lecturas de las medidas mencionadas anteriormente será el TMS320F228027 y se implementará mediante la placa de desarrollo DSP F28027. Estas lecturas se llevarán a cabo a través del convertidor ADC integrado en el microcontrolador, el cual consta de 16 canales multiplexados de 12 bits con un tiempo de adquisición de 12.5 MSPS y admite tensiones de entrada entre 0 y 3 V.

## Receptáculos para PCB

Los pines seleccionados en el *pinout* del plano número 4 deben conectarse de la placa al microcontrolador mediante un receptáculo. El conector seleccionado según la disposición de pines del microcontrolador es de 2 columnas de 10 pines en cada una separados a una décima de pulgada y será el modelo 10129381-940004BLF del fabricante *Amphenol*.

### 1.6.7 Detección del paso por cero

Para detectar el cruce por cero de la señal de entrada y transmitirlo al microcontrolador, emplearemos la señal senoidal de entrada de 24 V eficaces. El LM1815 detecta el momento

en el que una señal de entrada cruza por cero, es decir, pasa de ser positiva a negativa o viceversa.

El LM1815 puede manejar tensiones de entrada de hasta 460 mV pico a pico. Por esta razón, se implementa un puente de resistencias en el circuito de adaptación de la señal que está explicado en el anexo .2.4. Además, se requiere aislar la tensión de entrada al LM1815 con respecto a la señal que realmente deseamos detectar. Por lo tanto, se conecta el amplificador operacional de aislamiento ACPL-7900-500E del fabricante *Avago Technologies*. Las conexiones pertinentes de este componente se basan en su ficha técnica. A su entrada, después del puente de resistencias, se conecta un filtro paso bajo RC para atenuar las señales en la frecuencia de conmutación.

Aunque la detección del paso por cero también podría haberse implementado mediante un comparador de ventana u optoacopladores, la solución óptima para esta aplicación es el circuito integrado explicado anteriormente, ya que se dispone de la fuente de alimentación necesaria y su ajuste es más preciso.

## 1.7 Simulación

En este apartado se explicará el proceso de simulación realizado con el fin de verificar el diseño del presente proyecto.

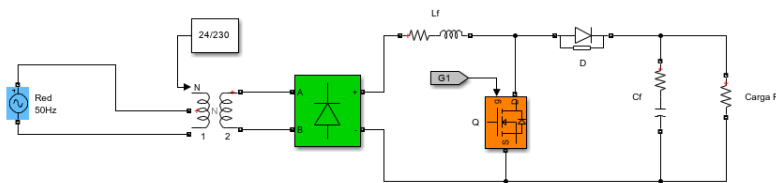
### 1.7.1 Herramientas utilizadas

#### Software de simulación

El *software* de simulación utilizado ha sido MATLAB-Simulink. Este ha permitido la completa verificación del diseño gracias a la librería *PowerElectronics*, que contiene los elementos y componentes necesarios para la implementación del filtro activo diseñado.

#### Circuito Montado

El circuito que se ha implementado en MATLAB-Simulink es el que se presenta en la figura 1.8.



**Figura 1.8:** Circuito del filtro activo con alto factor de potencia en software MATLAB-Simulink.

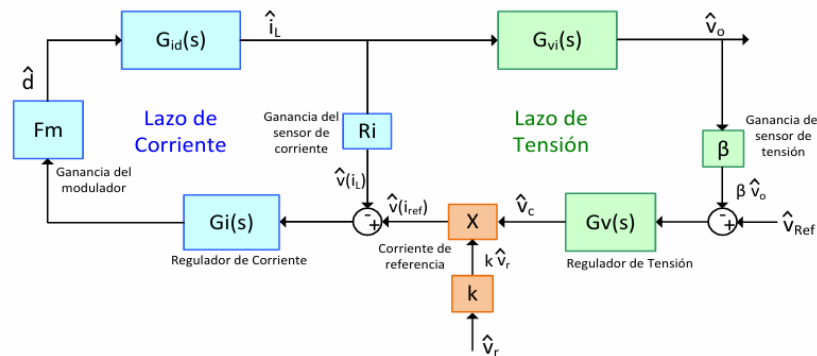
En la figura 1.8 se observa los elementos que componen el filtro:

- **Fuente de corriente alterna:** Esta fuente representa la tensión de red, una señal monofásica senoidal de 230 V eficaces con una frecuencia de 50 Hz.
- **Transformador:** Este componente transforma la tensión de red en una señal senoidal de 24 V eficaces. La relación de transformadoción de este elemento es igual al cociente entre  $24 V_{\text{RMS}}$  (el valor de la tensión eficaz de la salida del transformador) y  $230 V_{\text{RMS}}$  (el valor de la tensión eficaz de la señal de entrada al tranformador).
- **Rectificador:** El elemento de color verde representa un rectificador de doble onda de cuatro diodos. Se configura la caída de tensión de los diodos nula.

- **Bobina:** El valor de la bobina es de  $848.89 \mu\text{H}$ , como se calcula en el anexo .2.2 y un valor de la resistencia en serie con la inductancia  $0.85\text{m}\Omega$ .
- **Transistor:** Este componente de color naranja representa un MOSFET con un valor de resistencia ON de  $75\text{m}\Omega$ .
- **Diodo:** El diodo es ideal, no presenta caída de tensión en conducción.
- **Condensador:** El condensador del filtro de salida del convertidor Boost se ha fijado en  $4.7 \text{ mF}$ , como se indica en el anexo .2.2 y la resistencia en serie del componente  $36,7 \text{ m}\Omega$ .
- **Resistencia de carga:** El valor de la resistencia de carga se ha fijado según los cálculos del anexo .2.2,  $50\Omega$ .

## 1.7.2 Control

El control diseñado para el presente proyecto sigue el diagrama de bloques del esquema de control que se presenta en la figura 1.9.



**Figura 1.9:** Diagrama de bloques del esquema de control.

En la figura 1.9 se observa las diferentes funciones de transferencia y señales del control por tensión y por corriente.

### Lazo de corriente

En primer lugar, se diseñará el control del lazo de corriente, ya que debe de ser más rápido que el de tensión. Como se observa en la figura 1.9 el lazo interno, el de corriente, consta de diferentes partes.

- $G_{id}(s)$ : representa la transferencia del lazo de corriente, es decir, funciona para mantener la corriente de un valor de referencia dado, en este caso la variación de corriente del inductor ( $\hat{i}_L$ ).

- $F_m$ : es la ganancia del modulador, controla la modulación de la señal de referencia de corriente y se utiliza para ajustar la señal de entrada del sistema, en este caso el ciclo de trabajo ( $\hat{d}$ ).
- $R_i$ : es la ganancia del sensor de corriente, en este caso la resistencia shunt de  $2 \text{ m}\Omega$ , transforma la corriente real medida a una señal adecuada para su comparación y control asegurándose que la corriente medida ( $\hat{v}(i_L)$ ) sea proporcional a la corriente real del inductor.
- $G_i(s)$ : es el regulador de corriente, compara la corriente deseada con la medida y ajusta la señal de control para mantener la corriente a su valor de referencia ( $\hat{i}_{ref}$ ).

Considerando que la resistencia de carga es mucho más grande que la resistencia equivalente en serie del condensador:

$$G_{id} = \left. \frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} \right|_{\hat{v}_i=0} \rightarrow G_{id} = \frac{\frac{2V_i}{(1-D)LCR} \left(1 + \frac{RC}{2}\omega j\right)}{(\omega j)^2 + \left(\frac{1}{RC} + \frac{R_c(1-D)^2}{L}\right)\omega j + \frac{(1-D)^2}{LC}} \quad (1.5)$$

Sabiendo que la ganancia del lazo de corriente en lazo abierto tiene la siguiente expresión:

$$T_{iLC}(s) = F_m \cdot R_i \cdot G_{id}(s) \cdot G_i(s) \quad (1.6)$$

Se diseñará el regulador  $G_i$  mediante el método K de Venables de tipo III con una frecuencia de cruce que debe de ser inferior a la quinta parte de la frecuencia de conmutación, se fijará en 10 kHz. La expresión del regulador de corriente en el dominio de Laplace será la siguiente:

$$G_i(s) = \frac{0,08006s^2 + 1,2s + 4}{6,791 \times 10^{-7}s^3 + 7,343 \times 10^{-6}s^2 + 0,01154s + 0,0576} \quad (1.7)$$

## Lazo de tensión

En segundo lugar, se diseñará el control del lazo de tensión. En la figura 1.9 se visualiza las diferentes funciones y señales que forman parte del lazo externo, el lazo de tensión.

- $G_{vi}(s)$ : representa la transferencia del lazo de tensión y se encarga de controlar y asegurar que la tensión de salida siga al referencia deseada ( $\hat{v}_{ref}$ ).
- $\beta$ : es la ganancia del sensor de tensión, ajusta la tensión de salida medida a un nivel adecuado para su procesamiento, es decir, transforma la tensión real en  $\beta\hat{v}_o$ .
- $G_v(s)$ : es el regulador de tensión, genera un valor de control para mantener la tensión de salida en su referencia ( $V_{ref}$ ) al comparar estas dos señales.

El diseño es similar al explicado en el apartado 1.7.2. A continuación, se presentan las ecuaciones pertinentes al diseño del control por tensión.

$$G_{vi}(s) = \frac{-4,073 \times 10^{-8}s^2 - 0,0007103s + 2,88}{0,04802s + 0,48} \quad (1.8)$$

$$G_v(s) = \frac{6204s + 1,742 \times 10^5}{28,07s^2 + 3948s} \quad (1.9)$$

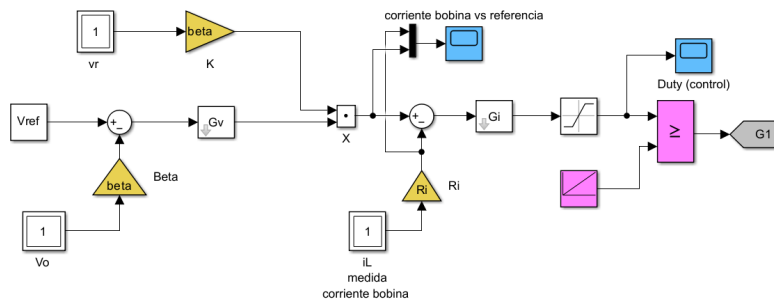
### 1.7.3 Modo Continuo

#### Descripción del Modo Continuo

Para iniciar la simulación del proyecto, el primer paso consiste en diseñar el control en modo continuo. Este modo de operación se caracteriza por ser una simulación ideal en la que se asume que el microcontrolador realiza lecturas constantes de las medidas de tensión y corriente, las cuales se retroalimentan al sistema. Además, se considera que la corrección del error se lleva a cabo de manera instantánea, sin interrupciones ni demoras, proporcionando un escenario idealizado para evaluar el rendimiento del filtro activo. Para esto, las ecuaciones de la etapa de control se representarán en el dominio de Laplace.

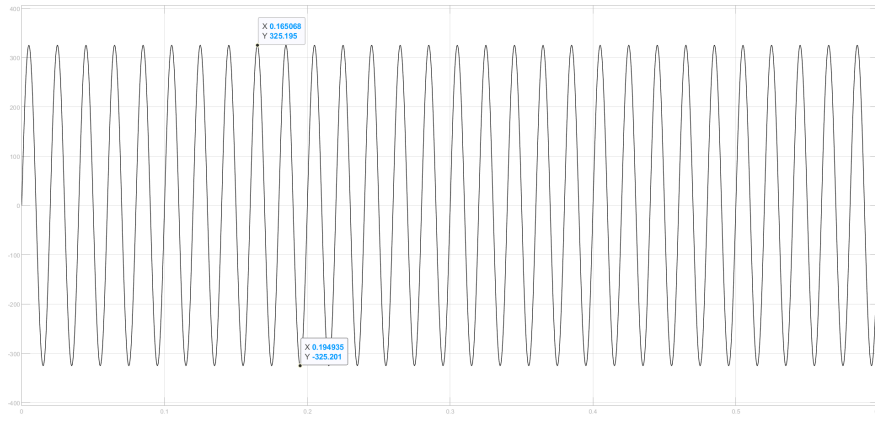
#### Resultados de la Simulación del Modo Continuo

El diagrama de bloques que se ha implementado en Simulink es el que se muestra en la figura 1.10, donde  $V_{ref}$  se ha fijado en 0,75 V.



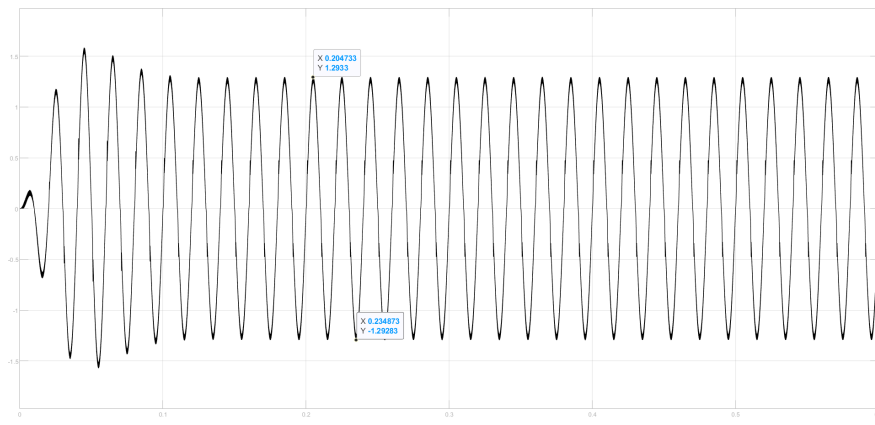
**Figura 1.10:** Diagrama de bloques del diagrama de control en Simulink en modo continuo [2].

La entrada corresponde a la tensión de red monofásica de 230 V eficaces y 50 Hz, como se observa en la figura 1.11.



**Figura 1.11:** Gràfica de Simulink de la tensió d'entrada.

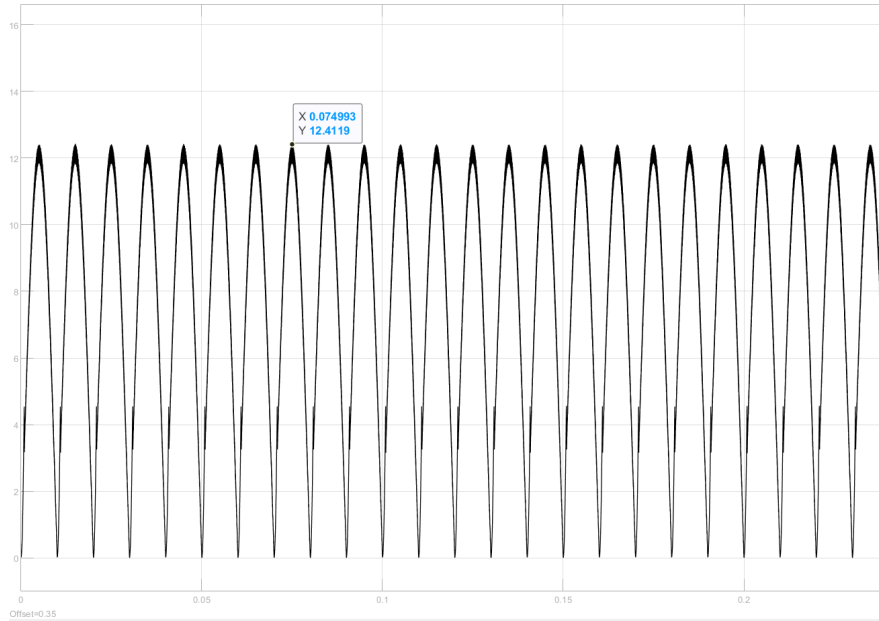
La corrent de red se visualiza en la figura 1.12.



**Figura 1.12:** Gràfica de Simulink de la corrent d'entrada.

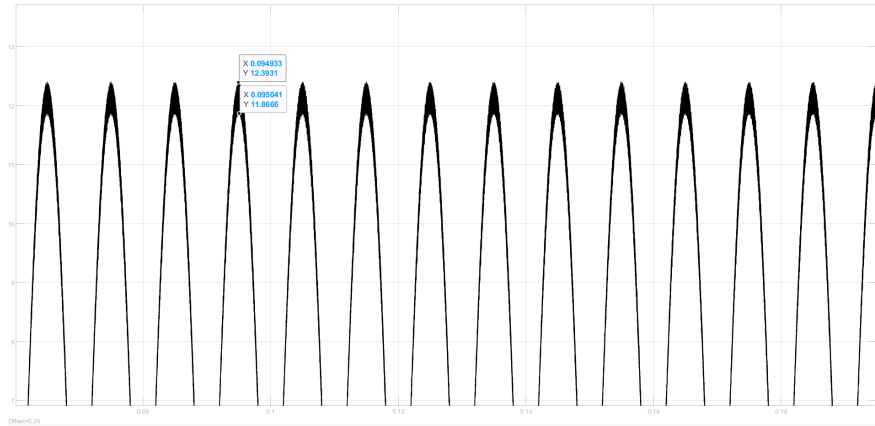
La tensió y corrent de entrada de red son señales válidas para la aplicación.

La corrent que circula per la bobina se muestra en la Figura 1.13. La señal revela un valor de corrent de pico de aproximadament 12,4 A. En comparación, los cálculos teóricos predicen una corrent de pico de 11,78 A para la bobina. Esta diferencia entre los resultados de la simulación y los valores teóricos está dentro del rango aceptable de discrepancia.



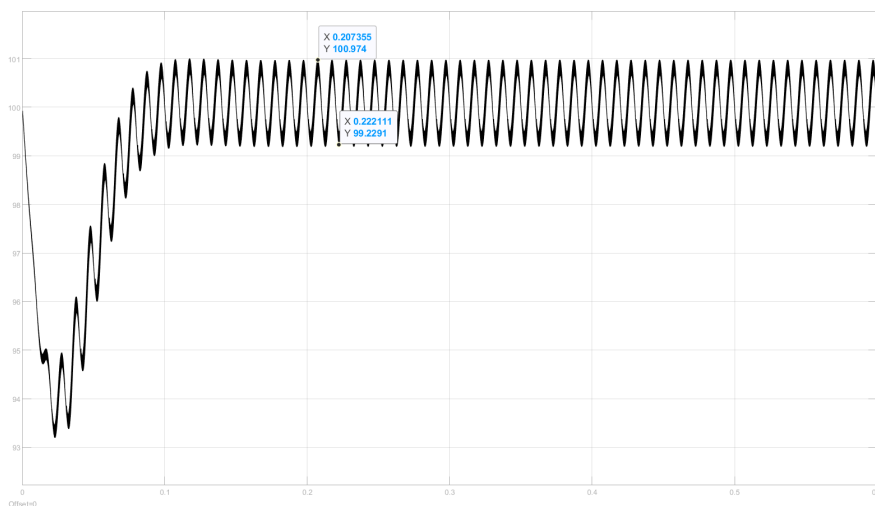
**Figura 1.13:** Gráfica de Simulink de la corriente que circula por la bobina en modo continuo.

En la figura 1.14 se muestra que el rizado de la corriente que circula por la bobina es igual a 0,5 A, menor que el 10 % del valor máximo que se detalla en las especificaciones.



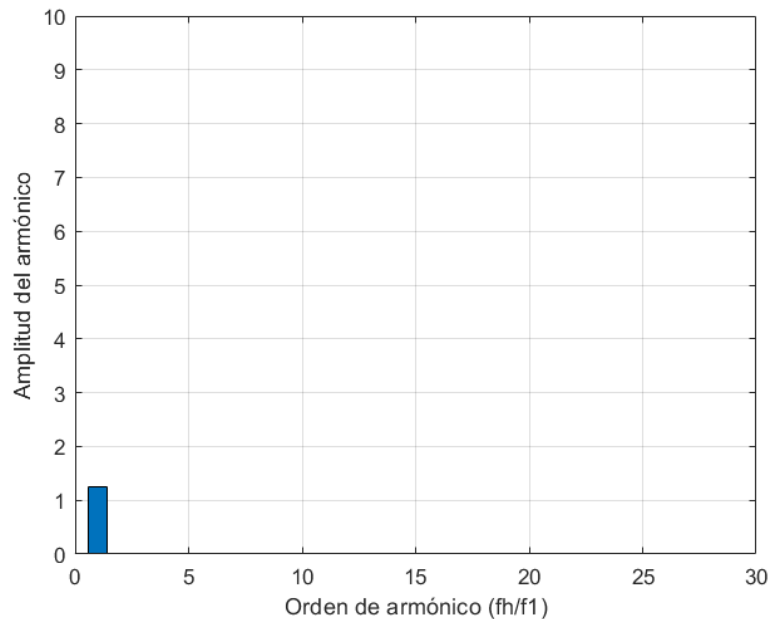
**Figura 1.14:** Gráfica de Simulink de la corriente que circula por la bobina en modo continuo.

Finalmente, como se muestra en la Figura 1.15, la tensión de salida obtenida es aproximadamente 100 V en valor medio, con un rizado de alrededor de 1,7 V. Este rizado es inferior al 5% el valor máximo detallado en las especificaciones.



**Figura 1.15:** Gráfica de Simulink de la tensión de salida en modo continuo.

La señal de salida queda libre de armónicos excepto en la frecuencia fundamental, 50 Hz como se observa en la figura 1.16.



**Figura 1.16:** Armónicos de la señal de salida en modo continuo.

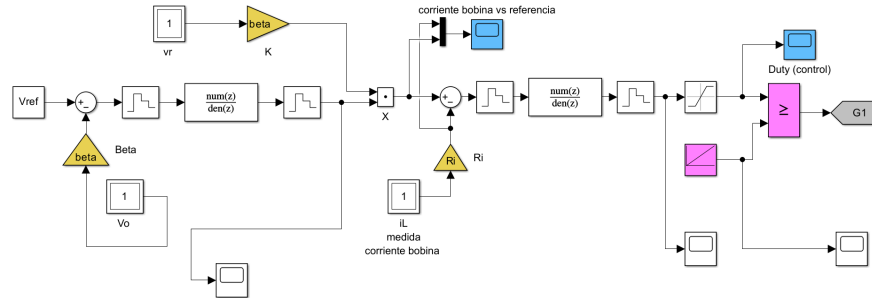
### 1.7.4 Modo Discreto

La segunda fase de la etapa de simulación aborda la discretización de las expresiones de control determinadas en la sección 1.7.2.

#### Descripción del Modo Discreto

En el contexto del modo discreto, se introduce un intervalo de tiempo de muestreo, lo que implica que el microcontrolador no realiza mediciones y correcciones de error en la retroalimentación de manera continua. En lugar de ello, en cada intervalo de muestreo, el microcontrolador captura los valores de tensión de entrada y salida, y corrige el error de manera iterativa. La frecuencia de muestreo debe de ser como mínimo el doble de la frecuencia de conmutación para evitar el *aliasing* según el teorema de Nyquist-Shannon. Por ello, se fija la frecuencia de muestreo en 100 kHz para la simulación en modo discreto.

En este modo las ecuaciones ya no serán en el dominio de Laplace, sino que se discretizarán mediante el bloque de MATLAB-Simulink llamado Zero-Order Hold.



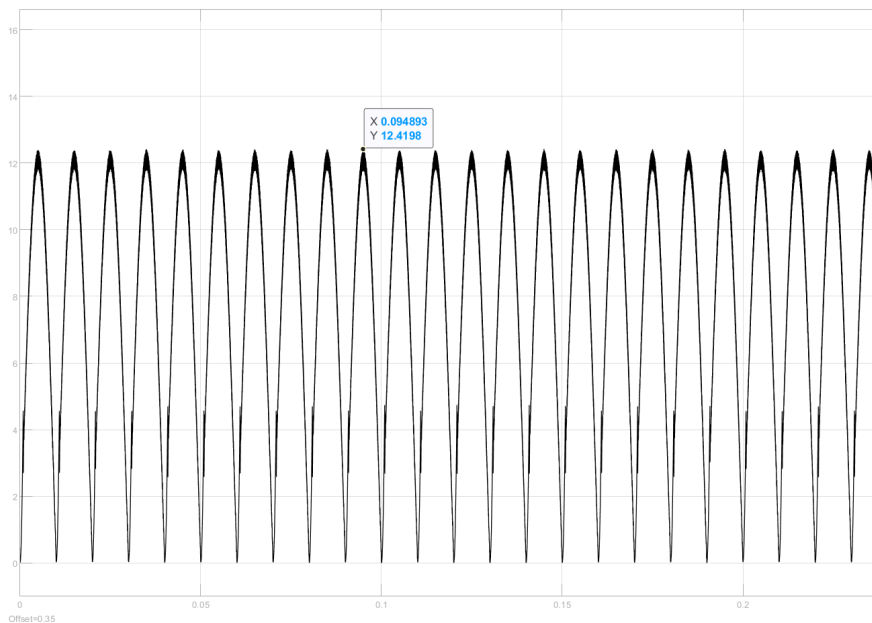
**Figura 1.17:** Diagrama de bloques del control en MATLAB-Simulink en modo discreto.

En la figura 1.17 se muestra el diagrama de bloques del control en modo discreto implementado.

### Resultados de la Simulación del Modo Discreto

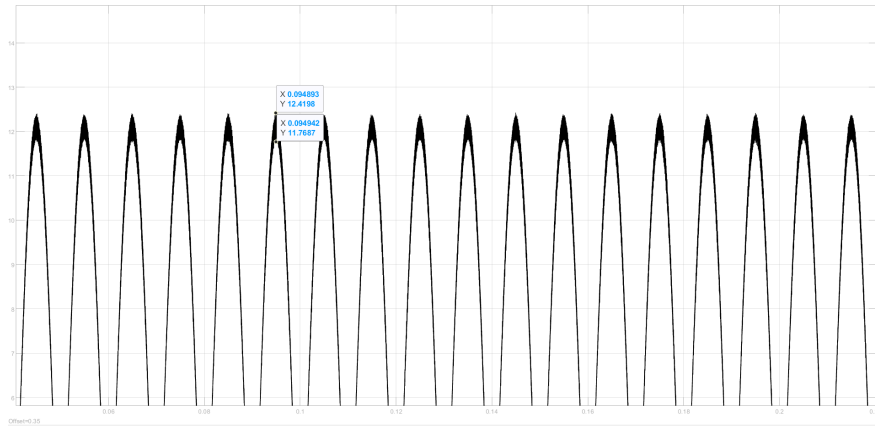
A continuación se presentan las señales de los resultados de la simulación en modo discreto.

En la Figura 1.18 se muestra la corriente que circula por la bobina, con un valor pico aproximado de 12,4 A. El valor pico teórico de la corriente en la bobina es de 11,78 A, esta diferencia se considera aceptable.



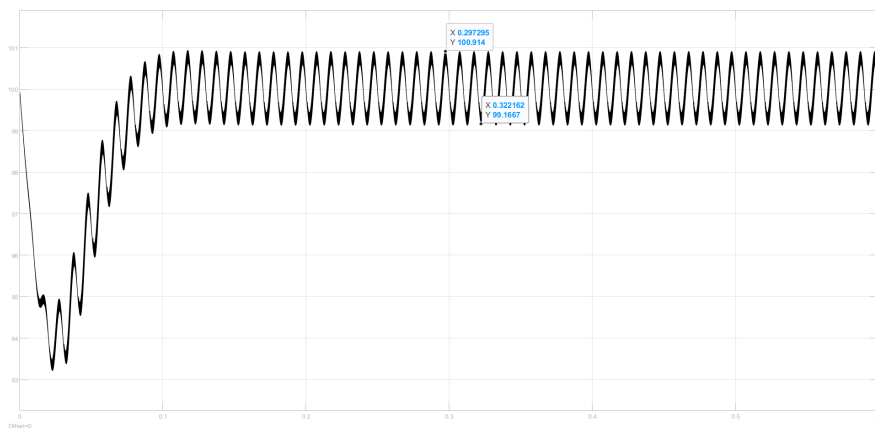
**Figura 1.18:** Señal de la corriente por la bobina en modo discreto.

En la figura 1.19 se muestra que el rizado de la corriente que circula por la bobina es igual a 0,64 A, menor que el 10 % del valor máximo que se detalla en las especificaciones.



**Figura 1.19:** Señal de la corriente por la bobina en modo discreto.

En la figura 1.20 se muestra la tensión de salida del filtro activo en modo discreto, cuyo valor medio es de aproximadamente 100 V. El rizado de esta tensión es de aproximadamente 1,73 V y queda dentro del 5 % del valor máximo que se detalla en las especificaciones.



**Figura 1.20:** Señal de la tensión de salida en modo discreto.

### 1.7.5 Comparación entre Modo Continuo y Modo Discreto

En la tabla siguiente se reflejan los valores obtenidos en cada modo de simulación.

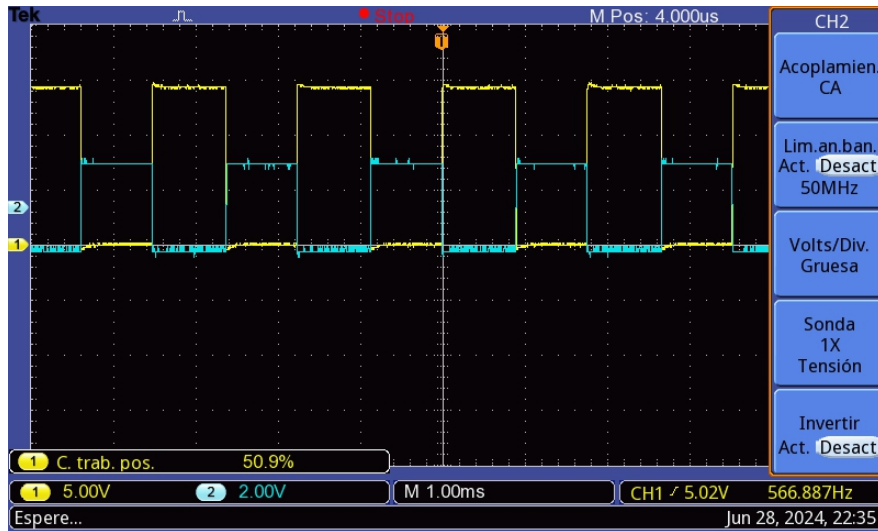
**Tabla 1.3:** Valores de la simulación en modo continuo y discreto.

| Valores                                   | Modo continuo | Modo discreto |
|---|---------------|---------------|
| <b>Factor de potencia</b>                 | 0,9997        | 0,9996        |
| <b>Rizado de la tensión de salida (V)</b> | 1,6           | 1,68          |
| <b>Potencia de salida (W)</b>             | 203,5         | 203,2         |

Como se observa en la tabla 1.3, los valores de la simulación en modo discreto, que es la que realmente se implementará mediante el microcontrolador, son los esperados.

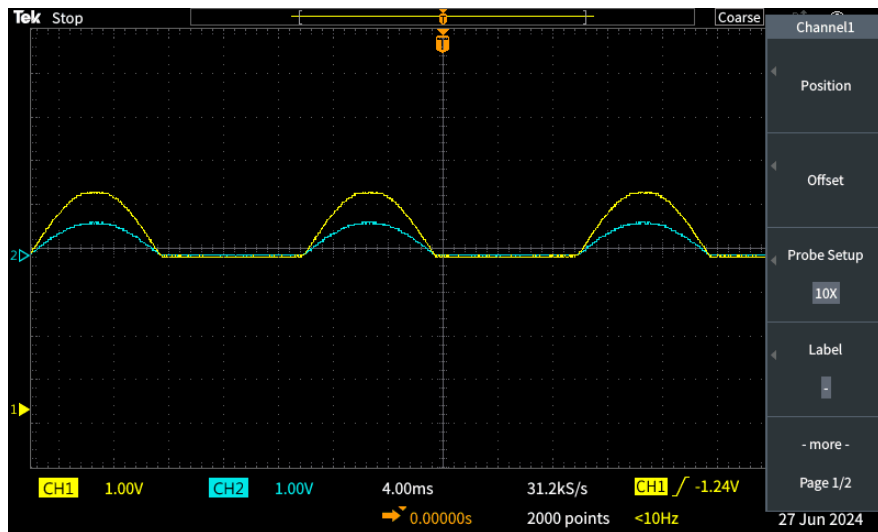
## 1.8 Verificación

En esta sección se expondran las señales obtenidas en el osciloscopio del montaje de verificación de diseño del filtro activo con un alto factor de potencia.



**Figura 1.21:** Pulsos MOSFET y conducción de la carga.

En la figura 1.21 se observa los pulsos de entrada al driver (color amarillo) y la caída de tensión en la resistencia de carga conectada entre drenador y surtidor del MOSFET (color azul), se verifica que el transistor si que conduce y que el driver le entrega pulsos de valor de 15 V necesarios para la activación del MOSFET.

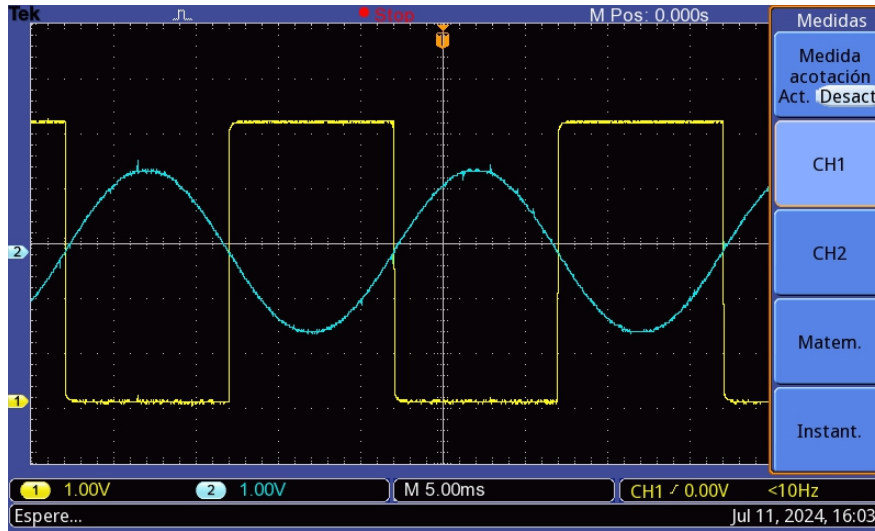


**Figura 1.22:** Pulsos MOSFET y conducción de la carga.

En la figura 1.22 se observa, en color azul, la señal de entrada al microcontrolador para el sentido de la señal de entrada rectificada ( $V_r$ ). La señal que se contempla en color amarillo es la de entrada a la etapa de instrumentación a continuación del puente de resistencias. Cabe

destacar que la señal implementada no asciende de 3 V, ya que la ganancia del filtro de la etapa de instrumentación es la adecuada, así pues, el microcontrolador podrá asimilarla sin perder información ni quemarse.

Es relevante mencionar que en esta señal rectificada solo se aprecia un semiperiodo porque las pruebas se realizaron sin carga. La corriente es tan baja que no es suficiente para activar los diodos.



**Figura 1.23:** Gráfica detección paso por cero.

En la figura 1.23 se observa la señal de entrada al microcontrolador para la detección del paso por cero (color amarillo) de la señal senoidal de entrada de 50 Hz (color azul).

## 1.9 Diseño PCB

Para el diseño de la placa de circuito impreso, se deben considerar varios aspectos importantes, como la separación entre las pistas y su ancho. Ignorar estos factores podría provocar arcos de voltaje entre pistas muy cercanas o daños en pistas estrechas debido a la incapacidad de soportar la corriente que las atraviesa. Utilizar diferentes anchos de pista y espaciamientos según la sección del circuito ayuda a prevenir estos problemas.

Dado que el diseño utilizará un gran número de componentes, se emplearán tanto la capa superior como la inferior de la placa para las conexiones, aunque principalmente se utilizará la inferior, dejando la superior para los componentes de tipo agujero pasante, que son todos en excepción de dos. Esto proporciona un diseño más estable y con menos ruido.

Según la normativa considerada nombrada en el apartado 1.3.3, el ancho de las pistas variará según las corrientes que pasen por ellas, el espesor del cobre de la misma y las condiciones de temperatura. En la etapa de potencia se considera una corriente máxima de 12 A en las otras etapas una corriente máxima de 1,5 A. El cobre de la placa de circuito impreso será de 1,5 oz/ft<sup>2</sup> y se estima 25 °C como temperatura ambiente y un incremento de temperatura de hasta 10 °C. Según la normativa IPC-2221, las pistas deben de tener una anchura mínima de 243 mil por las que circulan corrientes de hasta 12 A y 13,8 mil para corrientes de 1,5 A. En los anexos .2.4 se contemplan los cálculos pertinentes.

Asimismo, se han considerado criterios específicos para facilitar el montaje y las pruebas del convertidor de potencia. Para el montaje, se ha minimizado el número de vías entre las dos capas del diseño. En cuanto a las pruebas, se han añadido múltiples puntos de prueba (test points) para facilitar la medición de tensiones en diferentes puntos del convertidor, permitiendo un uso sencillo de las sondas de osciloscopio.

Para el diseño del esquemático y de la PCB se ha utilizado el software KiCad 8.0. En las figuras 1.24, 1.25 y 1.26 se pueden observar las capas superior e inferior de la PCB diseñada y diferentes vistas de la misma.

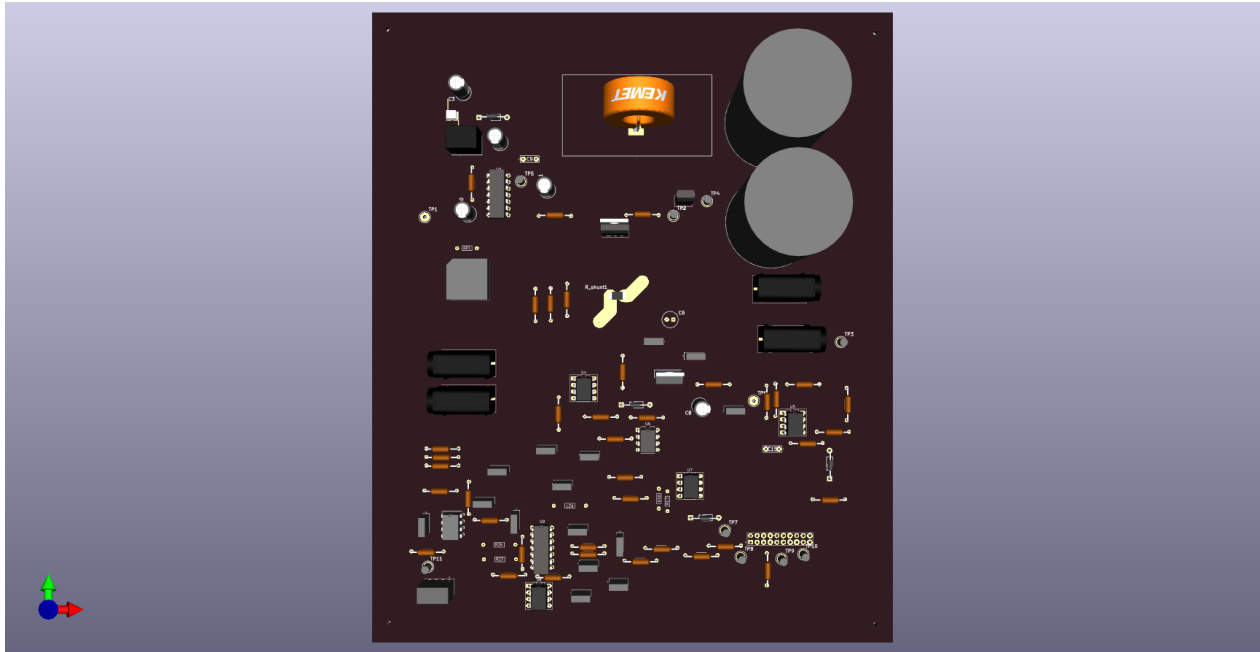


Figura 1.24: Alzado PCB.

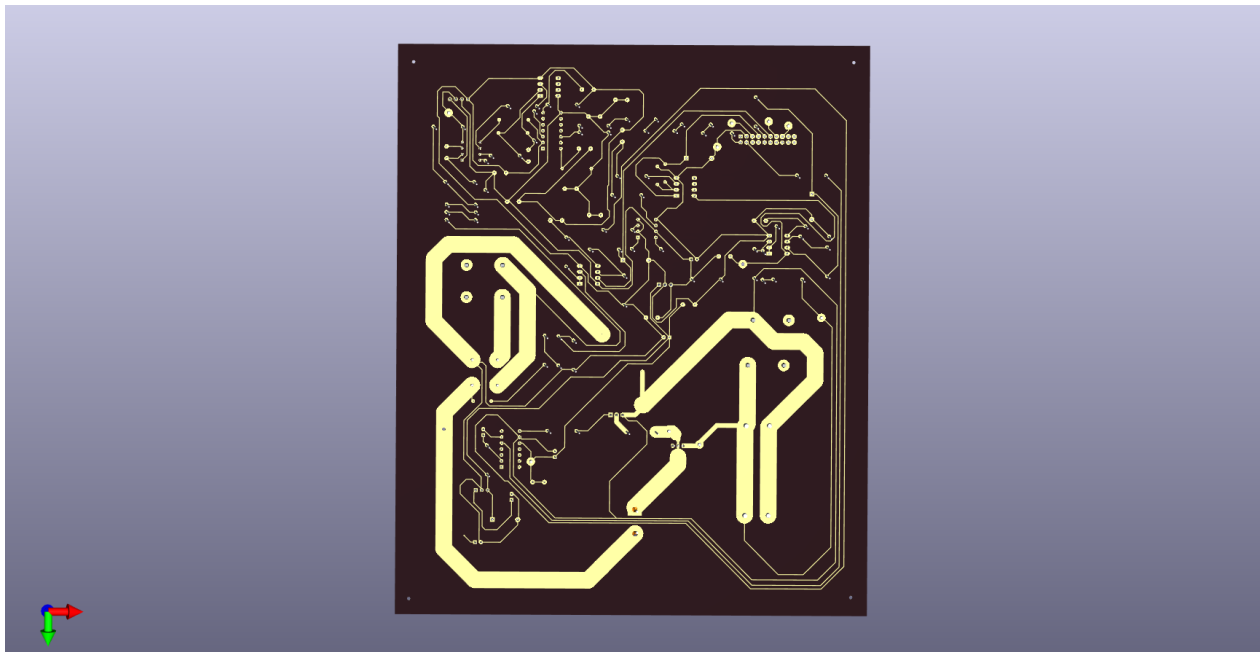
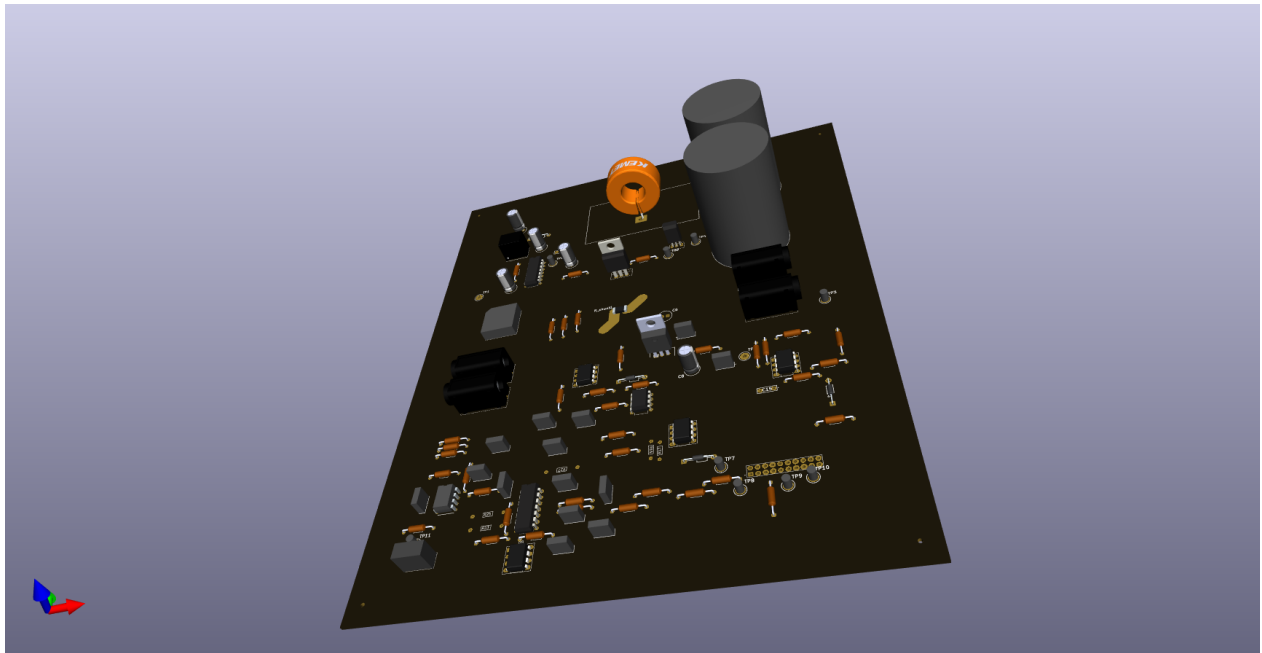


Figura 1.25: Planta PCB.



**Figura 1.26:** Vista PCB.

# Capítulo 2

## Planos

En este capítulo se adjuntarán los planos referentes al proyecto del prototipo de un filtro activo con alto factor de potencia.

Potencia



Alimentación



Driver



Instrumenación





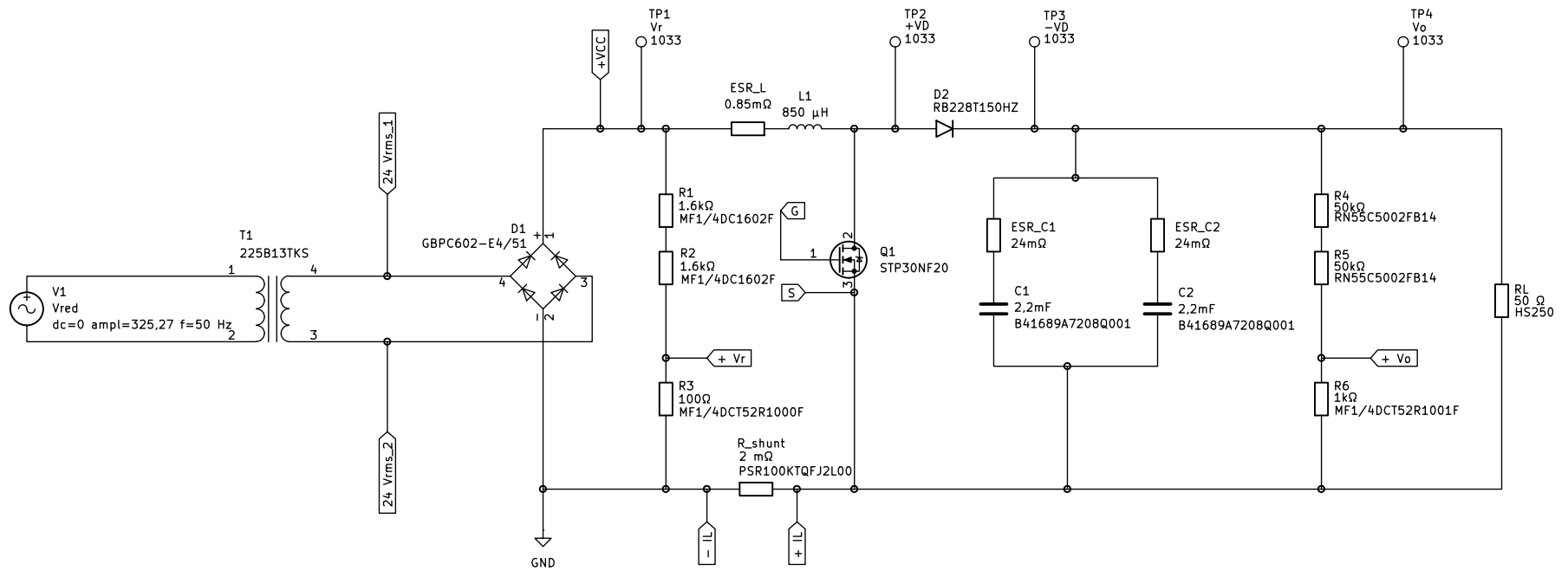
Control





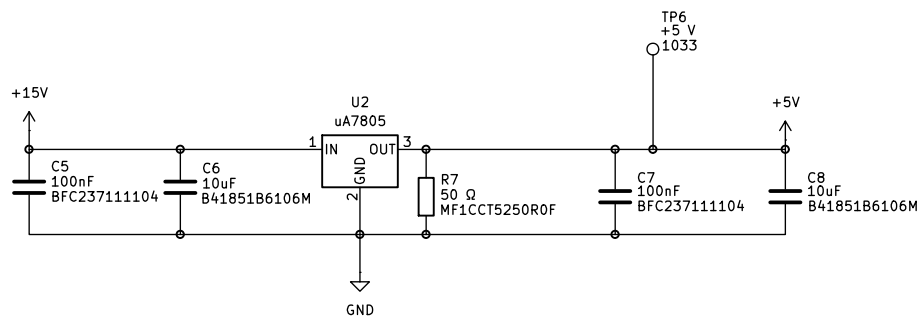
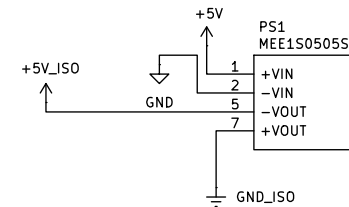
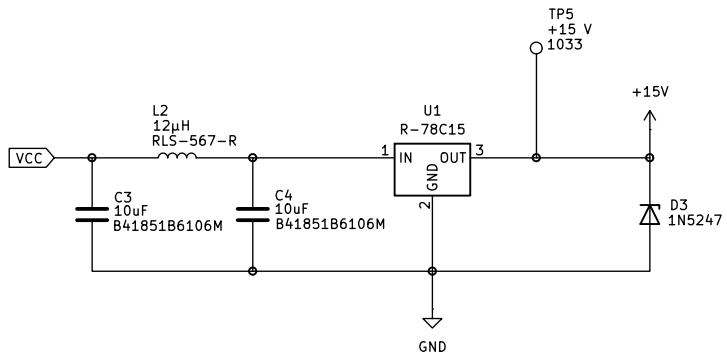
Detección de paso por cero





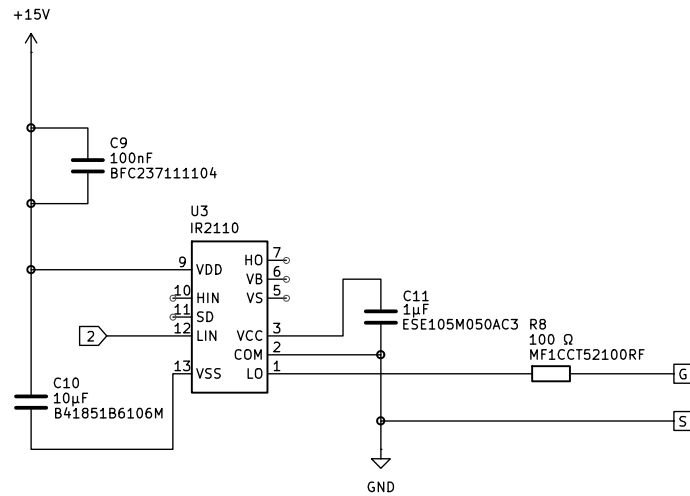
|                                  |  |  |                    |
|----------------------------------|--|--|--------------------|
| Autor<br><b>MARTA<br/>CABEDO</b> | Título proyecto<br><b>FILTRO ACTIVO CON UN ALTO FACTOR DE POTENCIA</b> | <br>ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial     |                    |
| ESCALA                           | Denominación del plano<br><b>ETAPAS</b>                                | <br>UNIVERSITAT<br>POLITÈCNICA<br>DE VALÈNCIA | Número<br><b>1</b> |





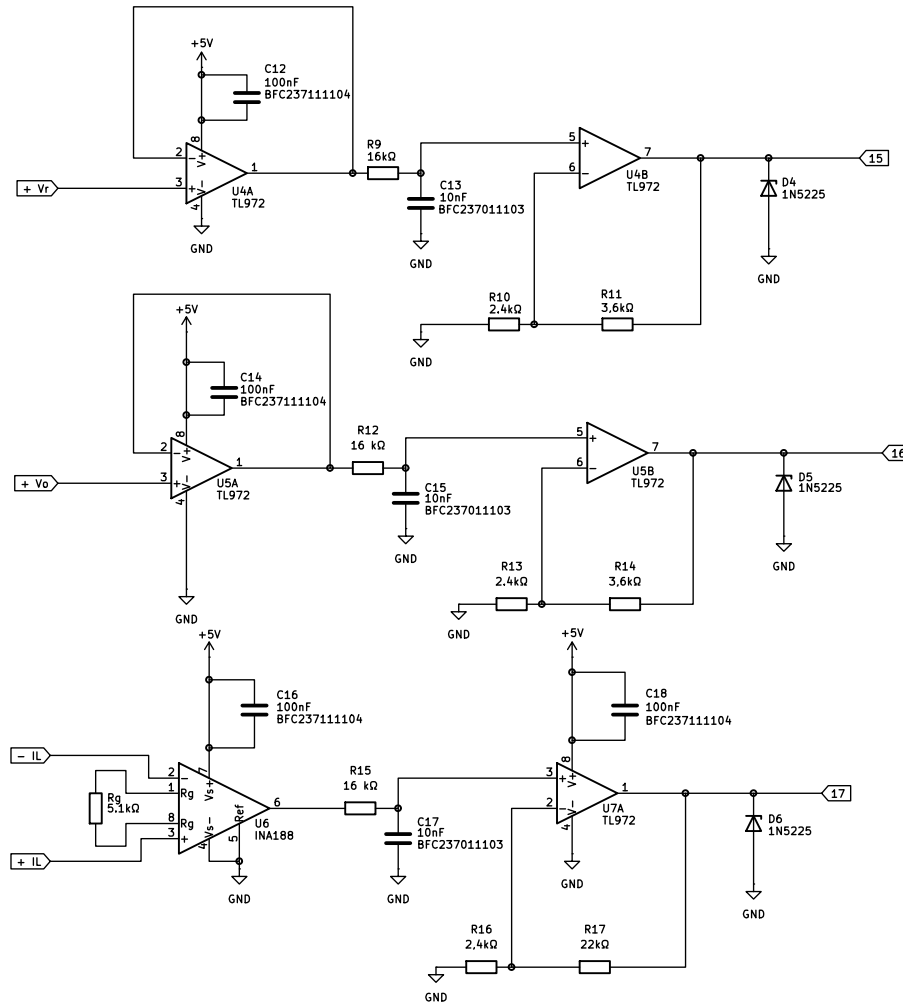
|              |  |  |                 |
|--------------|--|--|-----------------|
| MARTA CABEDO | FILTRO ACTIVO CON UN ALTO FACTOR DE POTENCIA | <br>ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial |                 |
| ESCALA       | Denominación del plano<br><br>POTENCIA       | <br>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA   | Número<br><br>2 |



|                              |  |  |                    |
|------------------------------|--|--|--------------------|
| Autor<br><b>MARTA CABEDO</b> | Título proyecto<br><b>FILTRO ACTIVO CON UN ALTO FACTOR DE POTENCIA</b> | <br>ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial |                    |
| ESCALA                       | Denominación del plano<br><b>ALIMETANCIÓN</b>                          | <br>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA   | Número<br><b>3</b> |





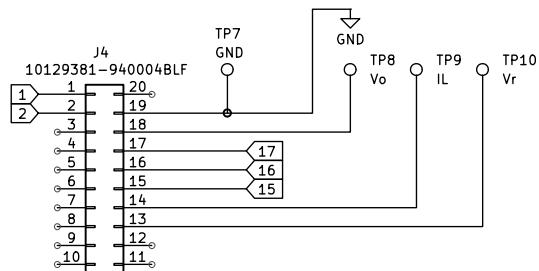
|                              |  |  |                    |
|------------------------------|--|--|--------------------|
| Autor<br><b>MARTA CABEDO</b> | Título proyecto<br><b>FILTRO ACTIVO CON UN ALTO FACTOR DE POTENCIA</b> | <br>ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial |                    |
| ESCALA                       | Denominación del plano<br><b>DRIVER</b>                                | <br>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA   | Número<br><b>4</b> |





MM

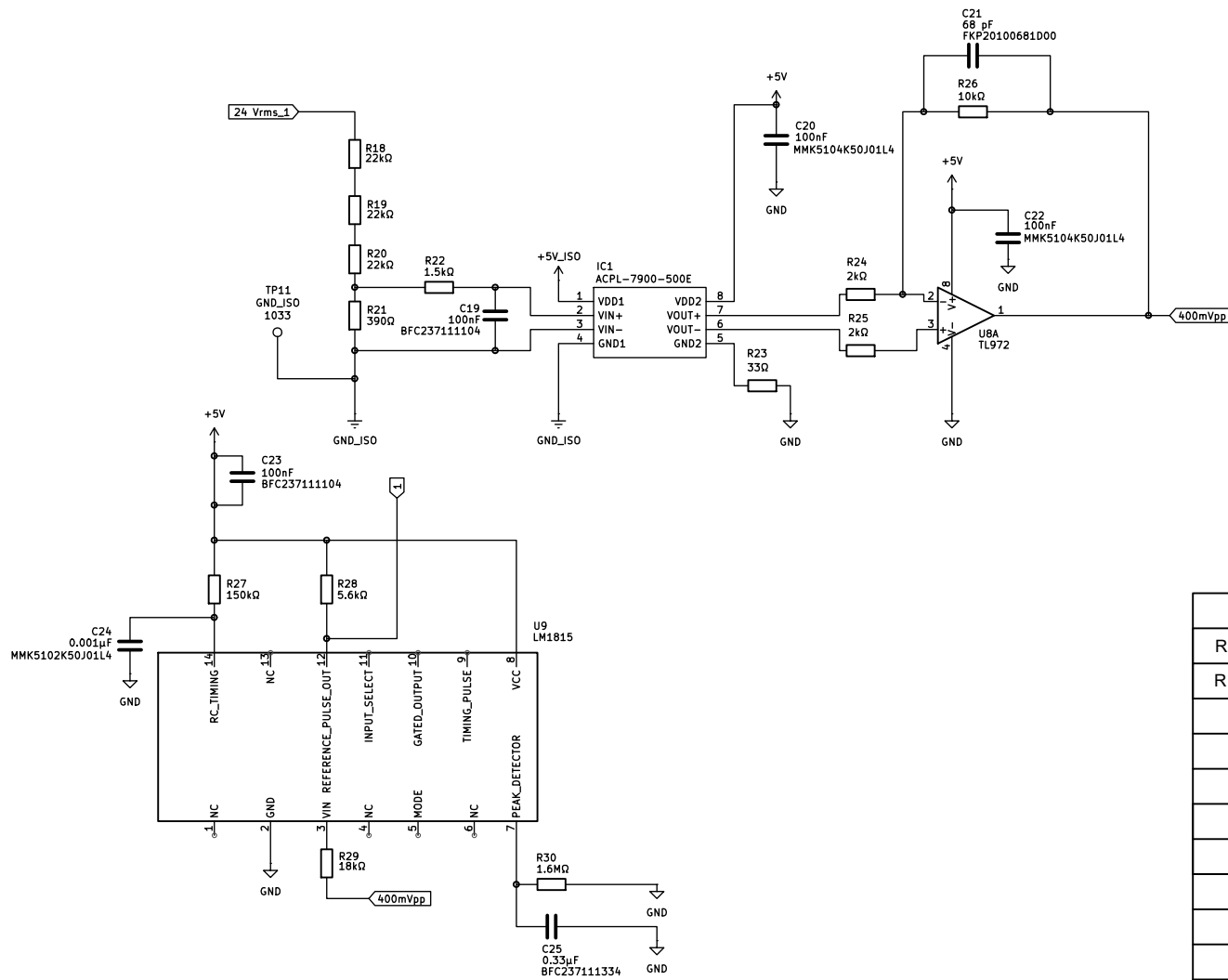
| RESISTENCIAS  |        |               |
|---------------|--------|---------------|
| RESISTENCIA   | VALOR  | REFERENCIA    |
| R9, R12, R15  | 16 kΩ  | RN55C1602FB14 |
| R10, R13, R16 | 2,4 kΩ | RN55C2401FB14 |
| R11, R14      | 3,6 kΩ | RN55C3601FB14 |
| Rg            | 5,1 kΩ | RN55C5102FB14 |
| R17           | 22 kΩ  | RN55C2202FB14 |

|                              |  |  |                    |
|------------------------------|--|--|--------------------|
| Autor<br><b>MARTA CABEDO</b> | Título proyecto<br><b>FILTRO ACTIVO CON UN ALTO FACTOR DE POTENCIA</b> | <br>ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial |                    |
| ESCALA                       | Denominación del plano<br><b>INSTRUMENTACIÓN</b>                       | <br>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA   | Número<br><b>5</b> |





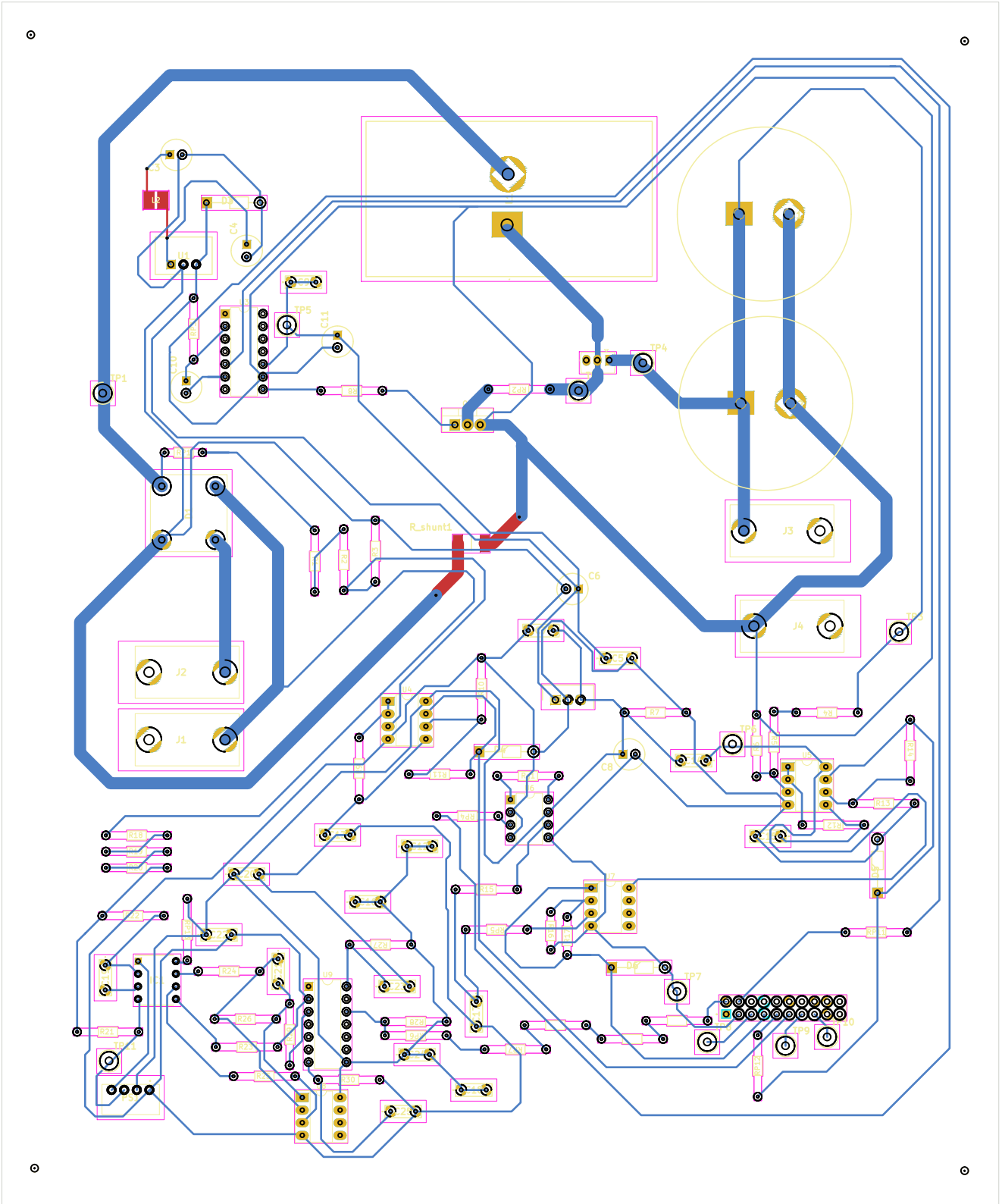
| PINOUT         |                |         |
|----------------|----------------|---------|
| SEÑAL          | ENTRADA/SALIDA | PIN     |
| $V_r$          | ENTRADA        | ADCINA0 |
| $V_o$          | ENTRADA        | ADCINA1 |
| $I_L$          | ENTRADA        | ADCINA3 |
| CONTROL MOSFET | SALIDA         | GPIO0   |
| PASOS POR CERO | ENTRADA        | GPIO1   |



|                              |  |  |                    |
|------------------------------|--|--|--------------------|
| Autor<br><b>MARTA CABEDO</b> | Título proyecto<br><b>FILTRO ACTIVO CON UN ALTO FACTOR DE POTENCIA</b> | <br>ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial |                    |
| ESCALA                       | Denominación del plano<br><b>ETAPA DE CONTROL</b>                      | <br>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA   | Número<br><b>6</b> |



| RESISTENCIAS  |        |                 |
|---------------|--------|-----------------|
| RESISTENCIA   | VALOR  | REFERENCIA      |
| R18, R19, R20 | 22 kΩ  | RN50E2201FB14   |
| R21           | 390 Ω  | RN50E390RFB14   |
| R22           | 1,5 kΩ | RN50E1502FB14   |
| R23           | 33 Ω   | RN55C33R0FB14   |
| R24, R25      | 2 kΩ   | MF1CCT526A2001F |
| R26           | 10 kΩ  | MF1CCT526A1002F |
| R27           | 150 kΩ | MF1CCT526A1503F |
| R28           | 5,6 kΩ | MF1CCT526A5602F |
| R29           | 18 kΩ  | MF1CCT526A1802F |
| R30           | 1,6 MΩ | MF1CCT526A1604F |

|                              |  |   |                    |
|------------------------------|--|---|--------------------|
| Autor<br><b>MARTA CABEDO</b> | Título proyecto<br><b>FILTRO ACTIVO CON UN ALTO FACTOR DE POTENCIA</b> | <br><b>ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial</b> |                    |
| ESCALA                       | Denominación del plano<br><b>DETECCIÓN DEL PASO POR CERO</b>           | <br><b>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</b>   | Número<br><b>7</b> |



|                                      |  |   |                          |
|--------------------------------------|--|---|--------------------------|
| <p>Autor<br/><b>MARTA CABEDO</b></p> | <p>Título proyecto<br/><b>FILTRO ACTIVO CON UN ALTO FACTOR DE POTENCIA</b></p>     | <br><b>ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial</b> |                          |
| <p>ESCALA<br/><br/>1:1</p>           | <p>Denominación del plano<br/><br/><b>CONEXIONES PLACA DE CIRCUITO IMPRESO</b></p> | <br><b>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</b>   | <p>Número<br/><br/>8</p> |



# Capítulo 3

## Pliego de Condiciones

En el presente capítulo se expone el pliego de condiciones del proyecto prototipo de un filtro activo con un factor de potencia alto.

## 3.1 Descripción

Este proyecto se centra en el diseño e implementación de un filtro activo de alto factor de potencia con una potencia de salida de 200 W, montado en una PCB. El objetivo es que los alumnos del Máster Universitario de Sistemas Electrónicos Industriales aprendan a mejorar la eficiencia energética y la calidad de la potencia en sistemas eléctricos mediante una clase práctica utilizando esta placa de circuito impreso. Se trata de un proyecto constructivo que incluye tanto el diseño del filtro como su integración en una placa de circuito impreso. El desarrollo de este proyecto se realiza en conformidad con las normativas vigentes, asegurando el cumplimiento de los estándares técnicos y de seguridad.

## 3.2 Lista de materiales

En la presente sección se enumerarán todos los componentes que forman parte del proyecto y que se deberán de soldar en la placa de circuito impreso según el plano número 7.

### 3.2.1 Componentes pasivos

A continuación se expone una tabla con las diferentes resistencias, condensadores e inductancias que se implementarán en la placa de circuito impreso con la referencia del fabricante, su valor y la referencia en los planos que se encuentra en el capítulo 2.

**Tabla 3.1:** Lista de materiales de los componentes pasivos.

| Nº de resistencia                                  | Valor          | Referencia      |
|--|----------------|-----------------|
| L2   | 12 $\mu$ H     | RLS-567-R       |
| R1, R2   | 1,6k $\Omega$  | MF1/4DC1601F    |
| R3, R6   | 100 $\Omega$   | MF1/4DC20R0F    |
| R3, R4   | 50 k $\Omega$  | RN55C5002FB14   |
| R7   | 50 $\Omega$    | MF1CCT5250R0F   |
| R8   | 100 $\Omega$   | MF1CCT52100RF   |
| R9, R12, R15                                       | 16 k $\Omega$  | RN55C1602FB14   |
| R10, R13, R16                                      | 2,4 k $\Omega$ | RN55C2401FB14   |
| R11, R14   | 3.6 k $\Omega$ | RN55C3601FB14   |
| R17, R18, R19, R20                                 | 22 k $\Omega$  | RN55C2202FB14   |
| R21  | 390 $\Omega$   | RN55C3900FB14   |
| R22  | 1,5 k $\Omega$ | RN55C1501FB14   |
| R23  | 33 $\Omega$    | RN55C33R0FB14   |
| R24, R25   | 2 k $\Omega$   | RN55C2001FB14   |
| R26  | 10 k $\Omega$  | RN55C1002FB14   |
| R27  | 150 k $\Omega$ | RN55C1503FB14   |
| R28  | 5,6 k $\Omega$ | RN55C5601FB14   |
| R29  | 18 k $\Omega$  | RN55C1802FB14   |
| R30  | 1,6 M $\Omega$ | RN55C1604FB14   |
| Rg   | 5,1 k $\Omega$ | RN55C5102FB14   |
| RL   | 50 $\Omega$    | HS250 50R F     |
| R_shunt  | 2 m $\Omega$   | PSR100KTQFJ2L00 |
| RP1-RP13   | 0 $\Omega$     | MFR-25FRF52-0R  |
| C1, C2   | 2,2 mF         | MAL215752222E3  |
| C3, C4, C6, C8, C10                                | 10 $\mu$ F     | B43851K2106M000 |
| C5, C7, C9, C12, C14, C16, C18, C19, C20, C22, C23 | 100 nF         | BFC237165104    |
| C25  | 0,33 $\mu$ F   | BFC237111334    |
| C21  | 68 pF          | FKP20100681D00  |
| C24  | 0,001 $\mu$ F  | MMK5102K50J01L4 |
| C13, C15, C17                                      | 10 nF          | MMK5102K50J01L4 |
| C11  | 1 $\mu$ F      | ESE105M050AC3   |

Cabe destacar que las resistencias, en excepción de la resistencia *shunt* y la de carga, deberán de ser de una tolerancia de 1% y que sean capaces de asimilar como mínimo 1/10 W de potencia.

### 3.2.2 Rectificador y diodos

A continuación se expone una tabla con los diferentes diodos y rectificador que se implementarán en la placa de circuito impreso con la referencia del fabricante y la referencia en el plano que se encuentra en el capítulo 2.

**Tabla 3.2:** Lista de materiales de los diodos y rectificador.

| Nº de diodo | Referencia    |
|-------------|---------------|
| D1          | GBPC602-E4/51 |
| D2          | RB228T150HZ   |
| D3          | 1N5247        |
| D4, D5, D6  | 1N5225        |

### 3.2.3 Circuitos integrados

A continuación se expone una tabla con los diferentes circuitos integrados que se implementarán en la placa de circuito impreso con la referencia del fabricante y la referencia en el plano que se encuentra en el capítulo 2.

**Tabla 3.3:** Lista de materiales de los circuitos integrados.

| Referencia en el plano | Referencia del fabricante |
|------------------------|---------------------------|
| U3                     | IR2110                    |
| U4, U5, U7, U8         | TL972                     |
| U6                     | INA188                    |
| IC1                    | ACPL-7900-500E            |
| U9                     | LM1815                    |

### 3.2.4 Convertidores y transformador

A continuación se expone una tabla con los diferentes convertidores y el transformador que se implementarán en la placa de circuito impreso con la referencia del fabricante y la referencia en el plano que se encuentra en el capítulo 2.

**Tabla 3.4:** Lista de materiales de los convertidores y transformador.

| Referencia en el plano | Referencia del fabricante |
|------------------------|---------------------------|
| U1                     | R-78C15                   |
| U2                     | $\mu$ A7805               |
| PS1                    | MEE1S0505SC               |

El transformador se conectará mediante los conectores banana J1 y J2. Será el modelo 225F13TKS o una alternativa que transforme la tensión de red de 230 V eficaces a 24 V eficaces.

### 3.2.5 Conectores y puntos de prueba

A continuación se expone una tabla con los diferentes conectores y puntos de prueba que se implementarán en la placa de circuito impreso con la referencia del fabricante y la referencia en el plano que se encuentra en el capítulo 2.

**Tabla 3.5:** Lista de materiales de los conectores y puntos de prueba.

| Referencia en el plano | Referencia del fabricante |
|------------------------|---------------------------|
| J1, J2, J3, J4         | 571-0100                  |
| J5                     | 10129381-940004BLF        |
| TP1-TP11               | 1033                      |

Mediante el conector J5 se conectará la placa de desarrollo elegida: DSP F28027.

### 3.2.6 Transistor

El transistor elegido para el proyecto es el MOSFET STP30NF20. Como alternativa se deberá usar un MOSFET que soporte como mínimo 15 A y 120 V entre drenador y surtidor. Además, deberá tener una resistencia ON de valor de 75 m $\Omega$ .

## 3.3 Montaje

El montaje de la placa de circuito impreso presente consiste en la soldadura de los distintos componentes de la tabla de componentes de la sección 3.2. Estos componentes se deberán soldar a la placa de circuito impreso según el plano número 8.

### 3.3.1 Soldaduras

Se utilizarán materiales de soldadura que cumplan con las especificaciones de la normativa IPC-2221 para garantizar una conductividad adecuada y prevenir la corrosión. Asimismo, se preferirán aleaciones de soldadura sin plomo (Pb-free) para cumplir con las regulaciones ambientales.

Las soldaduras deberán ser uniformes y lisas, asegurando una buena adhesión tanto al componente como a la PCB. La normativa IPC-2221 establece criterios de aceptación para las soldaduras, tales como la ausencia de porosidades, inclusiones y una correcta formación de las juntas.

Será imprescindible implementar controles de proceso durante la soldadura para mantener la consistencia y calidad de las juntas. Se llevarán a cabo inspecciones visuales y, cuando sea necesario, se utilizarán técnicas de inspección por rayos X para verificar la integridad de las soldaduras.

Se seguirán procedimientos diseñados para minimizar el riesgo de daños a la PCB y a los componentes durante el retrabajo. La norma IPC-2221 ofrecerá directrices para el retrabajo y la reparación de soldaduras defectuosas, incluyendo las técnicas y herramientas recomendadas.

Las operaciones de montaje y soldadura se realizarán en ambientes controlados para evitar la contaminación y asegurar la calidad del ensamblaje. Las condiciones de humedad y temperatura serán monitorizadas y controladas durante el proceso de soldadura.

La gestión térmica será esencial para evitar el sobrecalentamiento de componentes y pistas

durante el montaje y la soldadura. Se emplearán perfiles térmicos adecuados y herramientas de disipación de calor cuando sea necesario.

### **Soldaduras de componentes tipo agujero pasante**

Para efectuar una correcta soldadura de los componentes de tipo agujero pasante se seguirán unas pautas de fiabilidad y seguridad.

Primero, los componentes se insertarán en los agujeros designados en la PCB, asegurándose de que los pines pasen completamente a través de los agujeros. Luego, se colocará la PCB en una máquina de soldadura por ola, donde una ola de soldadura fundida cubrirá los pines sobresalientes en la parte inferior de la PCB.

Alternativamente, se puede realizar la soldadura manualmente con un soldador y alambre de soldadura, aplicando calor y soldadura a cada pin hasta que se forme una junta de soldadura adecuada.

Finalmente, se revisará cada junta de soldadura para asegurar que esté bien formada, sin inclusiones o porosidades, y que haya una buena conexión eléctrica y mecánica.

### **Soldaduras de componentes tipo SMD**

Para los componentes SMD (R\_shunt y L2), el proceso de soldadura será diferente.

Se aplicará una pasta de soldadura en los pads de la PCB donde se colocarán los componentes SMD. Esta pasta consiste en pequeñas partículas de soldadura suspendidas en un flujo adhesivo. Luego, los componentes SMD se colocarán sobre la pasta de soldadura, utilizando una máquina de colocación automática o manualmente con pinzas, asegurándose de que estén correctamente alineados con los pads.

Posteriormente, la PCB se pasará por un horno de reflujo, donde se calentará de manera controlada para fundir la pasta de soldadura. La soldadura se fundirá y se unirá a los pads y a los terminales de los componentes, formando juntas de soldadura seguras y confiables. Finalmente, se llevará a cabo una inspección visual para asegurar que las juntas de soldadura sean uniformes y que los componentes estén bien adheridos. En caso necesario, se utilizarán técnicas de inspección por rayos X para verificar la integridad de las soldaduras.

# Capítulo 4

## Presupuesto

En le presente capítulo se expondrá el presupuesto tanto de los materiales como del diseño del proyecto en cuestión.

## 4.1 Cuadro de precios unitarios

En esta sección se expondrán los precios de cada material que compone el diseño, de las herramientas que lo han hecho posible y las horas de trabajo que este proyecto conlleva.

| Ref.              | Ud. | Descripción                    | Precio  |
|-------------------|-----|--------------------------------|---------|
| <u>Materiales</u> |     |                                |         |
| m1                | ud. | Resistencia 0 $\Omega$         | 0,07 €  |
| m2                | ud. | Resistencia 33 $\Omega$        | 0,65 €  |
| m3                | ud. | Resistencia 50 $\Omega$        | 0,21 €  |
| m4                | ud. | Resistencia 100 $\Omega$       | 0,12 €  |
| m5                | ud. | Resistencia 390 $\Omega$       | 0,61 €  |
| m6                | ud. | Resistencia 1 k $\Omega$       | 0,14 €  |
| m7                | ud. | Resistencia 1,5 k $\Omega$     | 0,15 €  |
| m8                | ud. | Resistencia 1,6 k $\Omega$     | 0,23 €  |
| m9                | ud. | Resistencia 2 k $\Omega$       | 0,54 €  |
| m10               | ud. | Resistencia 2,4 k $\Omega$     | 0,34 €  |
| m11               | ud. | Resistencia 3,6 k $\Omega$     | 0,68 €  |
| m12               | ud. | Resistencia 5,6 k $\Omega$     | 0,21 €  |
| m13               | ud. | Resistencia 10 k $\Omega$      | 0,92 €  |
| m14               | ud. | Resistencia 16 k $\Omega$      | 0,21 €  |
| m15               | ud. | Resistencia 18 k $\Omega$      | 0,30 €  |
| m16               | ud. | Resistencia 22k $\Omega$       | 0,98 €  |
| m17               | ud. | Resistencia 50 k $\Omega$      | 0,68 €  |
| m18               | ud. | Resistencia 150 k $\Omega$     | 0,50 €  |
| m19               | ud. | Resistencia 1,6 M $\Omega$     | 0,21 €  |
| m20               | ud. | Resistencia shunt 2 m $\Omega$ | 1,63 €  |
| m21               | ud. | Resistencia de carga           | 54,64 € |
| m22               | ud. | Condensador 68pF               | 0,68 €  |
| m23               | ud. | Condensador 100 pF             | 0,53 €  |
| m24               | ud. | Condensador 330 pF             | 1,05 €  |
| m25               | ud. | Condensador 1 nF               | 0,39 €  |
| m26               | ud. | Condensador 10 nF              | 0,53 €  |
| m27               | ud. | Condensador 100 nF             | 0,44 €  |
| m28               | ud. | Condensador 1000 nF            | 0,17 €  |

| Ref.                       | Ud. | Descripción                                    | Precio   |
|----------------------------|-----|--|----------|
| <u>Materiales</u>          |     |  |          |
| m29                        | ud. | Condensador 10000 nF                           | 0,53 €   |
| m30                        | ud. | Condensador 2,2 mF                             | 14,29 €  |
| m31                        | ud. | Diodo Zener 1N5225                             | 0,19 €   |
| m32                        | ud. | Diodo Zener 1N5247                             | 0,19 €   |
| m33                        | ud. | Diodo Schottky RB228T150HZ                     | 2,13 €   |
| m34                        | ud. | Bobina 12 uH                                   | 2,30 €   |
| m35                        | ud. | Transformador 225B13TKS de Tecnotrafo          | 49,79 €  |
| m36                        | ud. | Rectificador RB228Y150HZ                       | 0,69 €   |
| m37                        | ud. | MOSFET STP30NF20                               | 2,14 €   |
| m38                        | ud. | Amplificador operacional TL972                 | 0,67 €   |
| m39                        | ud. | Amplificador de instrumentación INA188         | 5,79 €   |
| m40                        | ud. | Convertidor DC/DC R-78C15-1.0                  | 11,69 €  |
| m41                        | ud. | Convertidor DC/DC $\mu$ 7805                   | 0,88 €   |
| m45                        | ud. | Convertidor DC/DC aislado MEE1S0505SC          | 7,87 €   |
| m42                        | ud. | LM1815   | 5,55 €   |
| m43                        | ud. | ACLP-7900-500E                                 | 4,63 €   |
| m44                        | ud. | LAUNCHXL-F28027 de Texas Instruments           | 43,40 €  |
| m45                        | ud. | Driver IR2110PbF                               | 4,07 €   |
| m46                        | ud. | Circuito integrado LM1815 de Texas Instruments | 3,45 €   |
| m47                        | ud. | Receptáculo 02x10                              | 0,80 €   |
| m48                        | ud. | Conector banana                                | 1,44 €   |
| m49                        | ud. | Punto de prueba                                | 0,17 €   |
| m50                        | ud. | Montaje de PCB                                 | 30,00 €  |
| <u>Licencias programas</u> |     |  |          |
| l1                         | a.  | Licencia anual MATLABSimulink de MathWorks     | 262,00 € |
| l2                         | a.  | Licencia libre KiCAD 8.0                       | 0,00 €   |
| <u>Mano de obra</u>        |     |  |          |
| h1                         | h.  | Ingeniero electrónico                          | 15,00 €  |

## 4.2 Precios descompuestos

A continuación, se expone las tablas de los precios descompuestos de la fabricación y el diseño del proyecto.

| Ref                                       | Ud  | Descripción  | Precio   | Cantidad | Total            |
|---|-----|--|----------|----------|------------------|
| d1  | ud. | Diseño del filtro activo con un factor de potencia eficiente |          |          |                  |
| h1  | h.  | Ingeniero electrónico  | 15,00 €  | 300      | 4500,00 €        |
| l1  | a.  | Licencia anual MATLABSimulink de MathWorks                   | 262,00 € | 1        | 262,00 €         |
| l2  | a.  | Licencia libre KiCAD 8.0                                     | 0,00 €   | 1        | 0,00 €           |
|   | %   | M.A. sobre costes directos                                   | 2 %      | 4762 €   | 95,24 €          |
| <b>Total precio de ejecución material</b> |     |  |          |          | <b>4857,24 €</b> |

| Ref                                       | Ud  | Descripción  | Precio  | Cantidad | Total          |
|---|-----|--|---------|----------|----------------|
| d2  | ud. | Etapa de potencia del dispositivo electrónico donde se encuentra el transformador de la señal de la red eléctrica de entrada, la bobina, la resistencia de carga y sus conectores correspondientes |         |          |                |
| m1  | ud. | Resistencia 0 $\Omega$   | 0,07 €  | 1        | 0,07 €         |
| m21                                       | ud. | Resistencia de carga   | 54,64 € | 1        | 54,64 €        |
| m28                                       | ud. | MOSFET STP30NF20   | 2,14 €  | 1        | 2,14 €         |
| m30                                       | ud. | Condensador 2,2 mF   | 14,29 € | 2        | 28,58 €        |
| m33                                       | ud. | Diodo Schotty RB228T150HZ  | 2,13 €  | 1        | 2,13 €         |
| m35                                       | ud. | Transformador 225B13TKS de Tecnotrafo  | 49,79 € | 1        | 49,79 €        |
| m36                                       | ud. | Rectificador RB228Y150HZ   | 0,69 €  | 1        | 0,69 €         |
| m49                                       | ud. | Conector banana  | 1,44 €  | 4        | 5,76 €         |
| m50                                       | ud. | Punto de prueba  | 0,17 €  | 4        | 0,68 €         |
|   | %   | M.A. sobre costes directos   | 2 %     | 120,64 € | 2,41 €         |
| <b>Total precio de ejecución material</b> |     |  |         |          | <b>90,52 €</b> |

| Ref                                       | Ud  | Descripción                         | Precio | Cantidad | Total         |
|---|-----|-------------------------------------|--------|----------|---------------|
| d3  | ud. | Driver y sus conexiones pertinentes |        |          |               |
| m1  | ud. | Resistencia 0                       | 0,07 € | 1        | 0,07 €        |
| m4  | ud. | Resistencia 100                     | 0,12 € | 1        | 0,12 €        |
| m27                                       | ud. | Condensador 100 nF                  | 0,44 € | 1        | 0,44 €        |
| m28                                       | ud. | Condensador 1 µF                    | 0,17 € | 1        | 0,17 €        |
| m29                                       | ud. | Condensador 10 µF                   | 0,53 € | 1        | 0,53 €        |
| m46                                       | ud. | Driver IR2110PbF                    | 4,07 € | 1        | 4,07 €        |
|   | %   | M.A. sobre costes directos          | 2%     | 5,40 €   | 0,11 €        |
| <b>Total precio de ejecución material</b> |     |                                     |        |          | <b>5,50 €</b> |

| Ref                                       | Ud  | Descripción   | Precio  | Cantidad | Total          |
|---|-----|---|---------|----------|----------------|
| d4  | ud. | Etapa de alimentación del dispositivo electrónico, donde se encuentran los diferentes convertidores usados y los componentes conectados a ellos |         |          |                |
| m3  | ud. | Resistencia 50  | 0,21 €  | 1        | 0,21 €         |
| m27                                       | ud. | Condensador 100 nF  | 0,44 €  | 2        | 0,88 €         |
| m29                                       | ud. | Condensador 10 µF   | 0,53 €  | 4        | 2,12 €         |
| m32                                       | ud. | Diodo Zener 1N5247  | 0,19 €  | 1        | 0,19 €         |
| m40                                       | ud. | Convertidor DC/DC R-78C15-1.0   | 11,69 € | 1        | 11,69 €        |
| m41                                       | ud. | Convertidor DC/DC µ7805   | 0,88 €  | 1        | 0,88 €         |
| m42                                       | ud. | Convertidor DC/DC aislado MEE1S0505SC   | 7,87 €  | 1        | 7,87 €         |
| m50                                       | ud. | Punto de prueba   | 0,17 €  | 2        | 0,34 €         |
|   | %   | M.A. sobre costes directos  | 2%      | 24,18 €  | 0,48 €         |
| <b>Total precio de ejecución material</b> |     |   |         |          | <b>24,66 €</b> |

| Ref                                       | Ud  | Descripción   | Precio | Cantidad | Total          |
|---|-----|---|--------|----------|----------------|
| d5  | ud. | Etapa de instrumentación del dispositivo electrónico donde se encuentra el sensado de la tensión de entrada, de la corriente en la bobina y de la tensión de salida |        |          |                |
| m1  | ud. | Resistencia 0 $\Omega$  | 0,07   | 2        | 0,13 €         |
| m4  | ud. | Resistencia 100 $\Omega$  | 0,12 € | 1        | 0,12 €         |
| m6  | ud. | Resistencia 1 k $\Omega$  | 0,14 € | 1        | 0,14 €         |
| m8  | ud. | Resistencia 1.6 k $\Omega$  | 0,23 € | 2        | 0,46 €         |
| m10                                       | ud. | Resistencia 2.4 k $\Omega$  | 0,34 € | 3        | 1,02 €         |
| m11                                       | ud. | Resistencia 3.6 k $\Omega$  | 0,68 € | 2        | 1,36 €         |
| m14                                       | ud. | Resistencia 16 k $\Omega$   | 0,21 € | 1        | 0,21 €         |
| m16                                       | ud. | Resistencia 22 k $\Omega$   | 0,98 € | 1        | 0,98 €         |
| m17                                       | ud. | Resistencia 50 k $\Omega$   | 0,68 € | 2        | 1,36 €         |
| m20                                       | ud. | Resistencia shunt 2 m $\Omega$  | 1,63 € | 1        | 1,63 €         |
| m26                                       | ud. | Condensador 10 nF   | 0,53 € | 3        | 1,59 €         |
| m30                                       | ud. | Condensador 100 nF  | 0,44 € | 4        | 1,76 €         |
| m34                                       | ud. | Diodo Zener 1N5225  | 0,19 € | 3        | 0,57 €         |
| m38                                       | ud. | Amplificador operacional TL972  | 0,67 € | 3        | 2,01 €         |
| m39                                       | ud. | Amplificador de instrumentación INA188  | 5,79 € | 1        | 5,79 €         |
|   | %   | M.A. sobre costes directos  | 2 %    | 19,55 €  | 0,39 €         |
| <b>Total precio de ejecución material</b> |     |   |        |          | <b>19,95 €</b> |

| Ref                                       | Ud  | Descripción  | Precio  | Cantidad | Total          |
|---|-----|--|---------|----------|----------------|
| d6  | ud. | Etapa de control del dispositivo electrónico donde se encuentra el micro-controlador y los conectores hembra de la placa de circuito impreso |         |          |                |
| m1  | ud. | Resistencia 0 $\Omega$   | 0,07    | 7        | 0,47 €         |
| m45                                       | ud. | LAUNCHXL-F28027 de Texas Instruments   | 43,40 € | 1        | 43,40 €        |
| m48                                       | ud. | Receptáculo 02x10  | 0,80 €  | 2        | 1,60 €         |
| m50                                       | ud. | Punto de prueba  | 0,17 €  | 4        | 0,68 €         |
|   | %   | M.A. sobre costes directos   | 2 %     | 46,15 €  | 0,92 €         |
| <b>Total precio de ejecución material</b> |     |  |         |          | <b>46,60 €</b> |

| Ref                                       | Ud  | Descripción  | Precio | Cantidad | Total          |
|---|-----|--|--------|----------|----------------|
| d7  | ud. | Etapa de la detección del cruce por cero, incluyendo el circuito integrado para este fin y la adaptación de la señal de la entrada de este |        |          |                |
| m1  | ud. | Resistencia 0 $\Omega$   | 0,07 € | 1        | 0,07 €         |
| m2  | ud. | Resistencia 33 $\Omega$  | 0,65 € | 2        | 1,35 €         |
| m5  | ud. | Resistencia 390 $\Omega$   | 0,61 € | 1        | 0,61 €         |
| m9  | ud. | Resistencia 2 k $\Omega$   | 0,54 € | 2        | 1,08 €         |
| m12                                       | ud. | Resistencia 5.6 k $\Omega$   | 0,21 € | 1        | 0,21 €         |
| m13                                       | ud. | Resistencia 10 k $\Omega$  | 0,92 € | 1        | 0,92 €         |
| m16                                       | ud. | Resistencia 22 k $\Omega$  | 0,98 € | 3        | 2,94 €         |
| m18                                       | ud. | Resistencia 150 k $\Omega$   | 0,50 € | 1        | 0,50 €         |
| m19                                       | ud. | Resistencia 1.6 M $\Omega$   | 0,21 € | 1        | 0,21 €         |
| m22                                       | ud. | Condensador 68pF   | 0,68 € | 1        | 0,68 €         |
| m24                                       | ud. | Condensador 330 pF   | 1,05 € | 1        | 1,05 €         |
| m25                                       | ud. | Condensador 1000 pF  | 0,39 € | 1        | 0,39 €         |
| m27                                       | ud. | Condensador 100 nF   | 0,44 € | 4        | 1,76 €         |
| m38                                       | ud. | Amplificador operacional TL972   | 0,67 € | 1        | 0,67 €         |
| m47                                       | ud. | ACLP-7900-500E   | 4,63 € | 1        | 4,63 €         |
| m44                                       | ud. | Circuito integrado LM1815 de Texas Instruments   | 3,45 € | 1        | 3,45 €         |
| m50                                       | ud. | Punto de prueba  | 0,17 € | 1        | 0,17 €         |
|   | %   | M.A. sobre costes directos   | 2%     | 20,94 €  | 0,42 €         |
| <b>Total precio de ejecución material</b> |     |  |        |          | <b>21,11 €</b> |

| Ref                                       | Ud  | Descripción  | Precio  | Cantidad | Total          |
|---|-----|--|---------|----------|----------------|
| d8  | ud. | Fabricación de la placa de circuito impreso, incluyendo el material necesario para el mismo. |         |          |                |
| m54                                       | ud. | Montaje de PCB   | 30,00 € | 1        | 30,00 €        |
|   | %   | M.A. sobre costes directos   | 2%      | 30,00 €  | 0,60 €         |
| <b>Total precio de ejecución material</b> |     |  |         |          | <b>30,60 €</b> |

## 4.3 Cuadro de mediciones

En esta sección se presenta el cuadro de mediciones del proyecto.

| <b>CAPÍTULO 1:DISEÑO</b>    |           |  |             |
|-----------------------------|-----------|--|-------------|
| <b>Ref</b>                  | <b>Ud</b> | <b>Descripción</b>   | <b>Cant</b> |
| d1                          | ud.       | Diseño del filtro activo con un factor de potencia eficiente   | 1           |
| <b>CAPÍTULO 2: HARDWARE</b> |           |  |             |
| <b>Ref</b>                  | <b>Ud</b> | <b>Descripción</b>   | <b>Cant</b> |
| d2                          | ud.       | Etapa de potencia del dispositivo electrónico donde se encuentra el transformador de la señal de la red eléctrica de entrada, la bobina, la resistencia de carga y sus conectores correspondientes | 1           |
| d4                          | ud.       | Etapa de alimentación del dispositivo electrónico, donde se encuentran los diferentes convertidores usados y los componentes conectados a ellos  | 1           |
| d5                          | ud.       | Etapa de instrumentación del dispositivo electrónico donde se encuentra el sensado de la tensión de entrada, de la corriente en la bobina y de la tensión de salida                                | 1           |
| d6                          | ud.       | Etapa de control del dispositivo electrónico donde se encuentra el microcontrolador y los conectores hembra de la placa de circuito impreso.   | 1           |
| d7                          | ud.       | Etapa de la detección del cruce por cero, incluyendo el circuito integrado para este fin y la adaptación de la señal de la entrada de este.  | 1           |
| d8                          | ud.       | Fabricación de la placa de circuito impreso, incluyendo el material necesario para el mismo.   | 1           |

## 4.4 Presupuesto de ejecución del material

En la presente sección se expone el presupuesto de ejecución de los materiales del proyecto.

| CAPÍTULO 1: DISEÑO   |     |  |                     |       |                   |
|----------------------|-----|--|---------------------|-------|-------------------|
| Ref                  | Ud  | Descripción  | Precio              | Cant. | Total             |
| d1                   | ud. | Diseño del filtro activo con un factor de potencia eficiente   | 4.857,24 €          | 1     | 4.857,24 €        |
| CAPÍTULO 2: HARDWARE |     |  |                     |       |                   |
| Ref                  | Ud  | Descripción  | Precio              | Cant. | Total             |
| d2                   | ud. | Etapa de potencia del dispositivo electrónico donde se encuentra el transformador de la señal de la red eléctrica de entrada, la bobina, la resistencia de carga y sus conectores correspondientes | 66,20 €             | 1     | 90,52 €           |
| d3                   | ud. | Driver y sus conexiones pertinentes  | 5,50 €              | 1     | 5,50 €            |
| d4                   | ud. | Etapa de alimentación del dispositivo electrónico, donde se encuentran los diferentes convertidores usados y los componentes conectados a ellos  | 24,66 €             | 1     | 24,66 €           |
| d5                   | ud. | Etapa de instrumentación del dispositivo electrónico donde se encuentra el sensado de la tensión de entrada, de la corriente en la bobina y de la tensión de salida                                | 19,95 €             | 1     | 19,95 €           |
| d6                   | ud. | Etapa de control del dispositivo electrónico donde se encuentra el microcontrolador y los conectores hembra de la placa de circuito impreso  | 46,60 €             | 1     | 46,60 €           |
| d7                   | ud. | Etapa de la detección del cruce por cero, incluyendo el circuito integrado para este fin y la adaptación de la señal de la entrada de este   | 21,36 €             | 1     | 21,36 €           |
| d8                   | ud. | Fabricación de la placa de circuito impreso, incluyendo el material necesario para el mismo  | 30,60 €             | 1     | 30,60 €           |
|                      |     |  | <b>Total p.e.m.</b> |       | <b>5.096,43 €</b> |

Asciende el presupuesto de ejecución de materiales por contrata a la expresada cantidad de  
CINCO MIL NOVENTA Y SEIS EUROS CON CUARENTA Y TRES CÉNTIMOS.

## 4.5 Resumen del presupuesto

En esta sección se expone el resumen del presupuesto dle proyecto.

| <b>Resumen</b>  |                  |                   |
|---|------------------|-------------------|
| <b>Capítulos</b>  | <b>Contenido</b> | <b>Importe</b>    |
| Capítulo 1  | Diseño           | 4857,24 €         |
| Capítulo 2  | Software         | 239,19 €          |
| <b>Presupuesto ejecución material</b>   |                  | <b>5.096,43 €</b> |
| <b>Gasto general</b>  |                  |                   |
| 13% de gastos generales   |                  | 662,54 €          |
| 6% de margen de beneficio   |                  | 305,79 €          |
| Suma parcial  |                  | 968,32 €          |
| 21% IVA   |                  | 203,35 €          |
| <b>Total ejecución del material</b>   |                  | <b>1.171,67 €</b> |
| <b>Honorarios proyecto</b>  |                  |                   |
| 5% Presupuesto de ejecución material  |                  | 254,82 €          |
| 21% IVA sobre honorarios proyecto   |                  | 53,51 €           |
| <b>Total honorarios proyecto</b>  |                  | <b>308,33 €</b>   |
| <b>Total presupuesto general</b>  |                  | <b>6.576,44 €</b> |
| Asciede el presupuesto de ejecución por contrata a la expresada cantidad de SEIS MIL QUINIENTOS SETENTA Y SEIS EUROS CON CUARENTA Y CUATRO CÉNTIMOS |                  |                   |



# Bibliografía

- [1] , . Filtros activos. <https://www.diram.com/filtros-activos>. Accedido el 4 de mayo de 2024.
- [2] , . UPV. <https://www.upv.es/visor/media/6f6bae00-ffcb-11e5-ba8d-49a13453a3f6/c>. Accedido el 30 de mayo de 2024.
- [3] Arcila, J.D., 2010. Armónicos en sistemas eléctricos. Ieb Sa , 1–26.
- [4] Astudillo-Mora, L., Vázquez-Vega, A., Rojas-Serrano, J., 2016. Implementación de un filtro pasivo para compensación armónica y corrección del factor de potencia. Científica 20, 3–11.
- [5] Basso, T.S., DeBlasio, R., 2004. Ieee 1547 series of standards: interconnection issues. IEEE Transactions on Power Electronics 19, 1159–1162.
- [6] Bayón Sandoval, A., 2014. Diseño e implementación de un corrector de factor de potencia. B.S. thesis.
- [7] De Jarmy Villarreal, P., Villarreal, P.D.J., . Factor de potencia .
- [8] Desarrollo, I.N.P.E.F.Y.E., . ¿qué es la agenda 2030 para el desarrollo sostenible? URL: <https://www.gob.mx/inafed/articulos/que-es-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible>. accedido el 5 de febrero de 2024.
- [9] Espeita, J.A., 2020. Qué son los ODS y por qué debes conocerlos - EKO-MODO. URL: <https://www.ekomodo.eus/blog/empresas-por-un-mundo-mejor/que-son-los-ods-y-por-que-son-tan-importantes/>. accedido el 5 de febrero de 2024.
- [10] del Estado, J., . Real decreto 842/2002, de 2 de agosto. BOE 18.
- [11] Industries, I.A.C.E., 2012. Ipc-2221a: Generic standard on printed board design. URL: [https://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT\\_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A\(L\).pdf](https://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A(L).pdf). accedido el 25 de abril de 2024.
- [12] Industries, I.A.C.E., 2019. Ipc-6012d: Especificación de desempeño y calificación para placas de circuito impreso rígidas. URL: <https://www.ipc.org/TOC/6012D-SP.pdf>. accedido el 25 de abril de 2024.

- [13] Mohan, N., ROBBINS, W., UNDELAND, T., 2009. Electrónica de potencia. Mc Graw Hill.
- [14] Monteso Fernández, S., 2015. Convertidor conmutado para corrección del factor de potencia mediante FPGA. B.s. thesis. Nombre de la universidad.
- [15] Moran, M., 2016. La agenda para el. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>. Accedido el 5 de abril de 2024.
- [16] Rashid, M.H., 2004. Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones. Pearson Educación.
- [17] Reategui Arévalo, A.E., . Uso de condensadores en serie en líneas de transmisión de potencia y su efecto en el estado estable .
- [18] Turmero, P., 2015. Corrección del factor de potencia. URL: <https://www.monografias.com/trabajos104/correccion-del-factor-potencia/correccion-del-factor-potencia>. accedido el 27 de mayo de 2024.

# Anexos

## .1 Fichas técnicas

En el presente anexo se adjuntarán los enlaces de acceso a las fichas técnicas de los componentes electrónicos que forman parte del proyecto.

### .1.1 Elementos pasivos

Las fichas técnicas de las resistencias de este proyecto, en excepción de la resistencia *shunt* y la resistencia de carga, pueden encontrarse en los siguientes enlaces:

- [Ficha técnica HS250 50R F.](#)
- [Ficha técnica resistencias del modelo MF y RK.](#)
- [Ficha técnica resistencias del modelo MFR.](#)
- [Ficha técnica resistencias del modelo CMF.](#)

Las fichas técnicas de los condensadores que forman parte de este proyecto pueden encontrarse en los siguientes enlaces:

- [Ficha técnica condensador MAL215752222E3.](#)
- [Ficha técnica condensadores modelo MMK .](#)
- [Ficha técnica condensadores modelo MKT371.](#)
- [Ficha técnica condensadores del modelo ESE.](#)
- [Ficha técnica condensadores del modelo B41851.](#)
- [Ficha técnica condensadores del modelo MC0805N101J101A2.54MM.](#)

### .1.2 Rectificador y diodos

Se presenta a continuación [el enlace a la ficha técnica del modelo del rectificador elegido.](#)

Se presenta a continuación los enlaces a las fichas técnicas correspondientes a los diodos que formarán parte del proyecto.

- [Ficha técnica diodos Zener 1N5221 y 1N5247.](#)

- [Ficha técnica diodo Schottky RB228T15OHZ.](#)

### **.1.3 Circuitos integrados**

Se presenta a continuación los enlaces a las fichas técnicas correspondientes a los circuito sintegrados que forman parte de este proyecto.

- [Ficha técnica driver IR2110.](#)
- [Ficha técnica amplificador operacional TL972.](#)
- [Ficha técnica amplificador de instrumentación INA188.](#)
- [Ficha técnica LM1815.](#)
- [Ficha técnica ACPL-7900-500E.](#)

### **.1.4 Convertidores y transformador**

Se presenta a continuación [el enlace a la ficha técnica del modelo del transformador elegido.](#)

Se presenta a continuación los enlaces a las fichas técnicas correspondientes a los convertidores que se han elegido para la etapa de alimentación del proyecto.

- [Ficha técnica R-78C15-1.0.](#)
- [Ficha técnica  \$\mu\$ A7805.](#)
- [Ficha técnica MEE1S0505SC.](#)

### **.1.5 Conectores y puntos de prueba**

Se presenta a continuación los enlaces a las fichas técnicas correspondientes a

### **.1.6 Transistor**

La ficha técnica del transistor elegido para el proyecto puede encontrarse en el siguiente enlace: [Ficha técnica MOSFET STP30NF20.](#)

### **.1.7 Conector banana hembra**

Se presenta a continuación el enlace a la ficha técnica correspondiente al [conector banana hembra](#) usado para conectar la señal de entrada y la resistencia de carga al circuito.

### **.1.8 Microcontrolador**

Se presenta a continuación el enlace a la ficha técnica del microcontrolador elegido: [Ficha técnica TMS320F2802x.](#)

## **.1.9 Receptáculo para PCB**

Se presenta a continuación [el enlace a la ficha técnica correspondiente al conector](#) de que hará posible la comunicación entre la placa de circuito impreso y la placa de desarrollo escogida.

## **.1.10 Punto de prueba para PCB**

Se presenta a continuación [el enlace a la ficha técnica correspondiente al punto de prueba](#) ficha técnica correspondiente al punto de prueba elegido para poder testear distintas señales del sistema diseñado.

## .2 Cálculos

### .2.1 Ciclo de trabajo

El ciclo de trabajo del convertidor Boost se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$D = \frac{V_o - V_{in}}{V_o} = 0,76 \quad (1)$$

### .2.2 Cálculos de diseño

#### Resistencia de carga

Las especificaciones del proyecto determinan la potencia y la tensión de salida.

$$R_L = \frac{V_o^2}{P_o} = 50 \Omega \quad (2)$$

#### Bobina

El valor de la inductancia a utilizar se determinará de manera que se trabaje en modo de conducción continua y con el objetivo de que se cumplan las especificaciones. El valor máximo de la corriente por la bobina será:

$$I_{L_{\max}} = \frac{P}{V_{s_{\text{RMS}}}} \sqrt{2} = 11,78 \text{ A} \quad (3)$$

Sabiendo que la función de transferencia a lo largo del tiempo del convertidor Boost es:

$$M(d(t)) = \frac{V_o}{v_r(t)} = \frac{1}{1 - d(t)} \quad (4)$$

Obtenemos la expresión del ciclo de trabajo en función del tiempo.

$$d(t) = 1 - \frac{v_r(t)}{V_o} \quad (5)$$

Además, para que se trabaje en conducción continua se debe de cumplir que el rizado en la bobina será menor que el doble de la corriente media en la bobina. Estos parámetros tienen las siguientes expresiones:

$$\Delta i_r = \frac{v_r(t)}{L} \cdot d(t) \cdot T_{sw} \quad (6)$$

$$i_{r_{AV}} = \frac{v_r(t)}{R_e} \quad (7)$$

Entonces:

$$\Delta i_r < 2i_{rAV} \quad (\text{Conducción continua}) \longrightarrow \frac{v_r(t)}{L} \cdot d(t) \cdot T_{sw} < 2 \cdot \frac{v_r(t)}{R_e} \quad (8)$$

Para el valor mínimo de  $R_e$  que asegura la conducción continua:

$$R_e < \frac{2L}{T_{sw}} \left(1 - \frac{V_m}{V_o}\right) \quad (9)$$

Para el valor máximo de  $R_e$ :

$$R_e < \frac{2L}{T_{sw}} \quad (10)$$

La resistencia equivalente del rectificador expresada en función de la potencia:

$$R_e = \frac{V_m^2}{2P} \quad (11)$$

El valor mínimo de la inductancia para asegurar la conducción continua:

$$L_{\min} > \frac{V_m^2}{P \cdot f_{sw}} D(1 - D) \quad (12)$$

Para el cálculo del valor de la inductancia a partir de la expresión del rizado en la bobina:

$$\Delta I_L = \frac{V_o}{L \cdot f_{sw}} D(1 - D) \quad (13)$$

Y finalmente, el valor calculado para la inductancia:

$$L = \frac{V_o}{\Delta I_L \cdot f_{sw}} D(1 - D) = 848,89 \mu H \quad (14)$$

Es importante destacar que este valor de diseño se basa en un ciclo de trabajo del 50% ya que el rizado de la corriente en la bobina es máximo.

## Condensador

A partir de la demostración Erickson y sabiendo que la potencia aplicada al condensador es la diferencia entre la potencia del rectificador y la potencia de salida a través del tiempo podemos expresar el rizado de la tensión en el condensador. Además, se sabe que el valor de este rizado es muy pequeño respecto al valor de la tensión de salida.

$$\Delta V_C \approx \frac{P}{\omega \cdot V_o \cdot C} \quad (15)$$

Entonces, el valor de la capacitancia es igual a:

$$C = \frac{P}{\omega \cdot V_o \cdot \Delta V_C} \longrightarrow C = 4mF \quad (16)$$

## .2.3 Microcontrolador

Con el objetivo de que el microcontrolador pueda leer las señales sin que las interferencias le afecten se deberá amplificar las señales medidas. Como el DSP28027 tiene un módulo ADC de 16 canales de 12 bits con un rango de 0 a 3 V, su resolución será igual a:

$$\text{Resolución } CAD_{\text{DSP28027}} = \frac{3}{2^{12} - 1} = 0,733 \frac{\text{mV}}{\text{bit}} \quad (17)$$

Escogeremos un filtro con una ganancia suficiente para que el valor máximo de cada sentido (100 V para la tensión de salida, 33,94 V para la tensión de entrada y 12 A para la corriente por la bobina) se convierta en un valor de tensión de entrada al microcontrolador de aproximadamente 2,5 V.

## .2.4 Puentes de resistencias y filtros

En este apartado se explicará y calculará los circuitos de adaptación de las señales de sensado y de la señal de entrada al circuito integrado LM1815. Estos circuitos de adaptación consisten en un puente de resistencias y un filtro paso bajo.

### Sensado de la tensión de entrada rectificada ( $V_r$ )

Para un sensado correcto de las señales se deben implementar puentes de resistencias para disminuir el valor de tensión y corriente de las señales. a medir para que los circuitos integrados puedan asimilarlas. En paralelo al rectificador de doble onda se conectan tres resistencias: dos resistencias de valor 1,6 k $\Omega$  y la última de 100  $\Omega$ . La medida se realizará en la última resistencia. La caída de tensión de esta estará entre un rango máximo y mínimo ya que, según las especificaciones la tensión de red puede variar un 10 % su valor, además, las resistencias presentan una tolerancia del 1 %:

$$V_{sr_{max}} = V_{in_{max}} \cdot \frac{R_{s0}(1 + \alpha)}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^3(1 - \alpha) + R_{s0}(1 + \alpha)} = 1,15 \text{ V} \quad (18)$$

$$V_{sr_{min}} = V_{in_{min}} \cdot \frac{R_{s0}(1 - \alpha)}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^3(1 + \alpha) + R_{s0}(1 - \alpha)} = 0,91 \text{ V} \quad (19)$$

A partir de las ecuaciones 18 y 19 se deduce que la entrada al amplificador operacional del sensado de  $V_r$  oscila entre 1,12 V y 0,88 V. El conversor analógico-digital del microcontrolador tiene un rango de 0 a 3 V, y para no perder información, es necesario amplificar esta señal. Hemos fijado un valor máximo de entrada al dispositivo de 2,5 V. Para lograr este valor, se diseña un filtro paso bajo que no solo amplifica la señal, sino que también atenúa la frecuencia de conmutación para eliminar el interferencias.

$$G_{V_r} = \frac{2,5}{1,15} = 2,17 \text{ V/V} \quad (20)$$

Se fija el valor de la ganancia del filtro paso bajo inversor de primer orden 2,5 V/V y una frecuencia de corte de 1 kHz.

### Sensado de la tensión de salida ( $V_o$ )

En el sensado de la tensión de salida ocurre igual que en el sensado de la señal de entrada explicado en el apartado .2.4. Se conectan tres resistencias en paralelo a esta tensión, dos de valor 50 k $\Omega$  y la última de valor 1 k $\Omega$ . El valor máximo y mínimo de entrada al buffer son los siguientes.

$$V_{so_{\max}} = V_{o_{\max}} \frac{R_{s0}(1 + \alpha)}{2 \cdot 50 \cdot 10^3(1 - \alpha) + R_{s0}(1 + \alpha)} = 1,07 \text{ V} \quad (21)$$

$$V_{so_{\min}} = V_{o_{\min}} \frac{R_{s0}(1 - \alpha)}{2 \cdot 50 \cdot 10^3(1 + \alpha) + R_{s0}(1 - \alpha)} = 0,93 \text{ V} \quad (22)$$

A partir de estos valores se calcula la ganancia que presentará el filtro paso bajo para una tensión máxima de salida de 2,5 V.

$$G_{V_o} = \frac{2,5}{1,07} = 2,34 \text{ V/V} \quad (23)$$

Se fija el valor de la ganancia del filtro paso bajo inversor de primer orden 2,5 V/V y una frecuencia de corte de 1 kHz.

### Sensado de la corriente en la bobina ( $I_L$ )

El sensado de esta medida es distinto a los anteriores, ya que se trata de un valor de corriente y no de tensión. No se necesita de un puente de resistencias, el valor de la corriente se mide mediante la caída de tensión de la resistencia *shunt*, no obstante, el valor también variará.

$$V_{sIL_{\max}} = I \cdot R_{shunt}(1 + \alpha) = 24,24 \text{ mV} \quad (24)$$

$$V_{sIL_{\min}} = I \cdot R_{shunt}(1 - \alpha) = 23,76 \text{ mV} \quad (25)$$

A continuación, con este valor se calculará la ganancia que se necesita amplificar mediante el amplificador de instrumentación y el filtro paso bajo.

$$G_{IL} = \frac{2,5}{24,24 \cdot 10^{-3}} = 103,135 \text{ /V} \quad (26)$$

Se escoge una ganancia total de valor 110 V/V; 10 V/V para el filtro paso bajo inversor, que será de primer orden con una frecuencia de corte de 1 kHz, y una ganancia de valor 11 V/V para el amplificador de instrumentación, la ganancia total será el producto de las dos. Según la ficha técnica del amplificador de instrumentación, la ganancia del mismo dependerá de la resistencia ( $R_g$ ).

$$G_{AD} = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_g} \Rightarrow R_g = 5 \text{ k}\Omega \quad (27)$$

En este proyecto se usarán resistencias de la serie E24, así que  $R_g$  tendrá un valor de 5,1 k $\Omega$  y la ganancia del amplificador de instrumentación será igual a 10,8 V/V.

## Puente de resistencias y filtro de la detección del paso por cero

Según la ficha técnica del circuito integrado LM1815, las señales de entrada mayores a  $\pm 230\text{mV}$  (es decir,  $460\text{mVpp}$ ) harán que el umbral de armado sea del 80 % del voltaje pico de entrada. Un condensador de detector de picos en el pin 7 del dispositivo almacena un valor relativo a los picos de entrada positivos para establecer el umbral de armado. Las señales de entrada deben superar este umbral en dirección positiva para armar el detector de cruce por cero, el cual puede ser disparado por un cruce por cero en dirección negativa.

Aunque el valor máximo admitido por este circuito integrado sea  $460\text{mVpp}$ , se fija una tensión de entrada al LM1815 de  $400\text{mVpp}$  y una corriente de aproximadamente  $1\text{mA}$ . Para ello, se implementa un puente de cuatro resistencias: las tres primeras de valor  $22\text{k}\Omega$  y la última de valor  $390\Omega$ . Como en los casos anteriores, la entrada al circuito integrado es la caída de tensión en esta última resistencia y también se tiene en cuenta la variación del 10 % de la señal de entrada y las tolerancias de las resistencias, 1 %.

$$V_{sLM1815_{max}} = V_{in_{max}} \cdot \frac{R_{s0}(1 + \alpha)}{3 \cdot 22 \cdot 10^3(1 - \alpha) + R_{s0}(1 + \alpha)} = 447,45\text{mVpp} \quad (28)$$

$$V_{sLM1815_{min}} = V_{in_{min}} \cdot \frac{R_{s0}(1 - \alpha)}{3 \cdot 22 \cdot 10^3(1 + \alpha) + R_{s0}(1 - \alpha)} = 351,82\text{mVpp} \quad (29)$$

Como ya se ha explicado en el apartado 1.6.7, esta señal necesita de un aislamiento para su correcto funcionamiento y se usa el dispositivo ACLP 7900-500E para ello. En la ficha técnica de este amplificador operacional de aislamiento se recomienda conectar a su entrada un filtro antialiasing RC, cuyos componentes tendrán un valor de resistencia de  $1,5\text{k}\Omega$  y un valor de capacitancia de  $100\text{nF}$ . Este filtro paso bajo presenta una frecuencia de corte de  $1\text{kHz}$  y atenuará las interferencias en la frecuencia de conmutación,  $50\text{kHz}$ .

A la salida del ACLP 7900-500E también se sugiere implementar un circuito diferencial para un uso óptimo del dispositivo.

## Ancho de las pistas de la placa de circuito impreso

La normativa sobre placas de circuito impreso IPC-2221 determina las características que debe tener la PCB para facilitar la interacción entre fabricantes y compradores y mejorar los productos.

El ancho de las pistas que debe tener la placa de circuito impreso se determina de la siguiente manera [?].

$$\text{Area}[\text{mils}^2] = \left( \frac{\text{Corriente}[\text{A}]}{k \cdot (\text{Incremento de temperatura}[\text{°C}])^b} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (30)$$

$$\text{Ancho de la pista}[\text{mils}] = \frac{\text{Area}[\text{mils}^2]}{\text{Ancho del cobre}[\text{oz}] \cdot 1,378[\text{mils}/\text{oz}]} \quad (31)$$

Como en este caso la única capa que existe es externa las constantes  $k$ ,  $b$  y  $c$  son igual a  $0,048$ ,  $0,44$  y  $0,725$  respectivamente.

Se considera un ancho del cobre de  $1,5 \text{ oz/ft}^2$  y un incremento de temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  y se obtiene una anchura de pista de 243 mil (6,17 mm) para 12 A y 13,8 mil (0,35 mm) para 1,5 A.

### .3 Potencias consumidas por las resistencias

En el anexo presente se expondrán las potencias consumidas por cada resistencia del circuito. Quedan excluidas de este anexo la resistencia *shunt* y la resistencia de carga.

**Tabla 1:** Potencias consumidas por las resistencias.

| Número de resistencia | Valor ( $\Omega$ ) | Potencia consumida (mW) |
|-----------------------|--------------------|-------------------------|
| R1, R2                | 1,6k               | 82,5                    |
| R3                    | 100                | 10                      |
| R4, R5                | 50 k               | 49,5                    |
| R6                    | 1k                 | 100                     |
| R7                    | 50                 | 0,5                     |
| R8                    | 100                | 0,001                   |
| R9                    | 16 k               | 0,000055                |
| R10                   | 2,4k               | 0,00024                 |
| R11                   | 3,6k               | 0,00036                 |
| R12                   | 16k                | 0,000437                |
| R13                   | 2,4k               | 0,00024                 |
| R14                   | 3,6k               | 0,00036                 |
| R15                   | 16k                | 0,0043                  |
| R16                   | 2,4k               | 0,00024                 |
| R17                   | 22k                | 0,118                   |
| R18, R19, R20         | 22k                | 22                      |
| R21                   | 390                | 1,64                    |
| R22                   | 1,5k               | Despreciable            |
| R23                   | 33                 | Despreciable            |
| R24, R25              | 2k                 | Despreciable            |
| R26                   | 10k                | 0,017                   |
| R27                   | 150k               | Despreciable            |
| R28                   | 5,6k               | 16                      |
| R29                   | 18k                | 0,0089                  |
| R30                   | 1,6 M              | Despreciable            |

La potencia de disipación máxima de las resistencias elegidas para el diseño es de  $1/10 \text{ W}$ . Como se observa en la tabla 1 ninguna potencia calculada asciende de este valor.

## .4 ODS

En el presente anexo se presentará una breve introducción de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y se relacionarán con el proyecto presente.

### .4.1 Introducción

En primer lugar, se introducirán los conceptos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Agenda 2030.

#### Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son metas globales que abordan los retos más desafiantes del planeta. Fueron establecidos por las Naciones Unidas y buscan poner fin a la pobreza, proteger al planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo [15]. Hay 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible son interdependientes y se apoyan mutuamente y son los siguientes:

1. Fin de la pobreza.
2. Hambre cero.
3. Salud y bienestar
4. Educación de calidad.
5. Igualdad de género.
6. Agua limpia y saneamiento.
7. Energía asequible y no contaminante.
8. Trabajo decente y crecimiento económico.
9. Industria, innovación e infraestructura.
10. Reducción de las desigualdades.
11. Ciudades y comunidades sostenibles.
12. Producción y consumo responsables.
13. Acción por el clima.
14. Vida submarina.
15. Vida de ecosistemas terrestres.
16. Paz, justicia e instituciones sólidas.
17. Alianzas para lograr los objetivos.



Figura 1: ODS [9].

## Agenda 2030

La Agenda 2030 es un plan de acción global que dirigirá las decisiones de los gobiernos y la sociedad. Fue aprobada en 2015 por los Estados Miembros de las Naciones Unidas. La Agenda 2030 contiene las 17 ODS explicadas anteriormente y se centra en tres temas principales: la economía, el desarrollo social y el medio ambiente. Este plan de acción debe cumplirse para el año 2030, es un compromiso global para construir un futuro más sostenible y equitativo [8].

### 4.2 Descripción de las ODS relevantes

En segundo lugar, se detallarán y explicarán los Objetivos de Desarrollo Sostenible más relevantes en este proyecto.

#### Educación de calidad

El ODS número 4, Educación de Calidad, se centra en impulsar oportunidades de aprendizaje para todos. Esta educación deberá ser inclusiva, equitativa y de calidad.

El fin del analfabetismo, la mejora de la calidad de la enseñanza, la inclusión de las personas vulnerables, la expansión del mensaje de los ODS y el acceso universal a la educación son algunos de los principales elementos en los que se centra este Objetivo de Desarrollo Sostenible.

El ODS de la Educación de calidad está directamente relacionada con el presente proyecto, ya que el objetivo del diseño de la placa de circuito impreso es totalmente educativo.

#### Energía Asequible y No Contaminante

El objetivo del ODS número 7, Energía Asequible y No Contaminante, es mejorar las condiciones de vida de las personas mediante una energía asequible, segura y moderna. Se busca un acceso universal a servicios energéticos, una transición energética sostenible y un uso

de energías renovables. Los filtros activos son necesarios en las áreas donde la infraestructura eléctrica es deficiente o inestable, ya que contribuyen a mejorar la calidad de la energía eléctrica, y donde se promueve energías renovables, ya que garantiza la entrega limpia y eficiente de este tipo de energía. Además, estos filtros reducen los armónicos de la red eléctrica causantes de la contaminación electromagnética. Esto provoca un aumento de la eficiencia energética.

### **Ciudades y comunidades sostenibles**

Uno de los aspectos fundamentales de la ODS número 11 es la eficiencia energética y la calidad de la energía. Un factor de potencia elevado conlleva la disminución de la contaminación eléctrica y la optimización en la utilización de la energía. Por lo tanto, este proyecto contribuye directamente al logro de este Objetivo de Desarrollo Sostenible.

**Tabla 2:** ODS relevantes.

|   | Nada apreciable | Poco apreciable | Apreciable | Muy apreciable |
|---|-----------------|-----------------|------------|----------------|
| Fin de la pobreza                       | X               |                 |            |                |
| Hambre cero                             | X               |                 |            |                |
| Salud y bienestar                       |                 |                 | X          |                |
| Educación de calidad                    |                 |                 |            | X              |
| Igualdad de género                      | X               |                 |            |                |
| Agua limpia y saneamiento               | X               |                 |            |                |
| Energía asequible y no contaminante     |                 |                 |            | X              |
| Trabajo decente y crecimiento económico |                 | X               |            |                |
| Industria, innovación e infraestructura |                 |                 | X          |                |
| Reducción de las desigualdades          | X               |                 |            |                |
| Ciudades y comunidades sostenibles      |                 |                 |            | X              |
| Producción y consumo responsables       |                 | X               |            |                |
| Acción por el clima                     |                 |                 | X          |                |
| Vida submarina                          | X               |                 |            |                |
| Vida de ecosistemas terrestres          | X               |                 |            |                |
| Paz, justicia e instalaciones sólidas   | X               |                 |            |                |
| Alianzas para lograr los objetivos      |                 |                 | X          |                |