



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y PRUEBA DE UN CONVERTIDOR  
ELEVADOR Y SU CONTROL PARA POSTERIOR  
FABRICACIÓN DE UN CONVERTIDOR DE  
POTENCIA CC – CC (ELEVADOR + REDUCTOR).

Autor: Javier Martín de San Pablo del Castillo

Director: Aurelio García Cerrada

Madrid

Julio de 2022



I, hereby, declare that I am the only author of the project report with title:

DISEÑO Y PRUEBA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR Y SU CONTROL PARA POSTERIOR FABRICACIÓN DE UN CONVERTIDOR DE POTENCIA CC – CC (ELEVADOR + REDUCTOR).

which has been submitted to ICAI Engineering School of Universidad Pontificia

Comillas in the academic year 2021-22. This project is original, has not been submitted before for any other purpose and has not been copied from any other source either fully or partially. All information sources used have been rightly acknowledged.

Fdo.: JAVIER MARTÍN DE SAN PABLO DEL CASTILLO      Date: 11/07/2022

I authorize the submission of this project

PROJECT SUPERVISOR



Fdo.: Aurelio García Cerrada



Date: 11/07/2022





# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y PRUEBA DE UN CONVERTIDOR  
ELEVADOR Y SU CONTROL PARA POSTERIOR  
FABRICACIÓN DE UN CONVERTIDOR DE  
POTENCIA CC – CC (ELEVADOR + REDUCTOR).

Autor: Javier Martín de San Pablo del Castillo

Director: Aurelio García Cerrada

Madrid

Julio de 2022



# Agradecimientos

Primero de todo, me gustaría dedicar un breve párrafo en agradecimiento a todas las personas que me han ayudado en la elaboración de este Trabajo Fin de Grado.

El primero de ellos, mi compañero Fernando Martínez – Cattáneo, con quien he tenido el placer de trabajar codo con codo en este proyecto.

Mis más sinceros agradecimientos también a Aurelio García Cerrada y la Universidad Pontificia Comillas, quienes han dirigido este trabajo.

Por último y no menos importante, agradecer a la University of Michigan y al Professor Al-Thaddeus Avestruz por la oportunidad para realizar este proyecto. Así mismo, agradecer a todos mis compañeros de la University of Michigan por su apoyo y ayuda en momentos puntuales.



# **DISEÑO Y PRUEBA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR Y SU CONTROL PARA POSTERIOR FABRICACIÓN DE UN CONVERTIDOR DE POTENCIA CC – CC (ELEVADOR + REDUCTOR).**

**Autor: Martín de San Pablo del Castillo, Javier.**

Director: García Cerrada, Aurelio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas y University of Michigan.

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

En este proyecto se diseñará y probará un convertidor elevador para su posterior inclusión en un convertidor de potencia CC – CC (elevador + reductor) con el fin de permitir la regulación lumínica de un LED. Se ha logrado alcanzar los objetivos del proyecto, cumpliendo con todas las especificaciones impuestas.

### **1. Introducción**

Hoy en día, la electricidad juega un papel fundamental en nuestras vidas. Sirviendo de motivación para la realización durante las últimas décadas de numerosos proyectos y trabajos que investigan sus cualidades y formas de implementación en nuestra sociedad.

¿Y cómo se habilita el uso de la energía eléctrica para todo el mundo? La respuesta, los convertidores de potencia. Estos convertidores permiten modificar el valor de magnitudes eléctricas como tensiones y corrientes para facilitar su uso en el día a día.

La utilidad de estos convertidores es la razón por la cual se ha decidido centrar este Trabajo de Fin de Grado en sus aplicaciones, y más concretamente, en el diseño y producción de un convertidor CC – CC que permita la regulación lumínica de un LED.

### **2. Definición del proyecto**

Como se ha comentado anteriormente, el proyecto se centrará en el diseño y fabricación de un convertidor elevador para la posterior fabricación de un convertidor de potencia CC – CC que habilite la regulación lumínica de un LED.

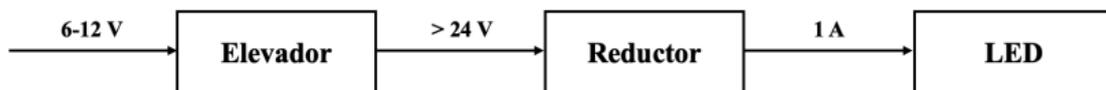
Para este objetivo el proyecto se dividirá en cuatro fases diferenciadas:

- a. Se realizará un diseño teórico del convertidor elevador y su control asociado en base a las especificaciones impuestas para el proyecto.
- b. Una vez se compruebe el correcto funcionamiento de ambos convertidores se procederá al diseño de la placa de circuito impreso usando Altium [1]. Cuando se finalice su diseño, se encargará la placa junto a los componentes de ésta.
- c. Cuando se reciba la PCB (Printed Circuit Board [2]) se realizará el montaje y comprobación del funcionamiento de los componentes y la placa.
- d. En esta última parte se determinará el éxito y calidad del proyecto mediante la realización de pruebas sobre el circuito completo. Se comprobará que se cumplen todos los requisitos impuestos.

Por otro lado, el convertidor elevador debe cumplir dos especificaciones. La primera de ellas, la tensión a la salida del convertidor elevador debe ser siempre mayor o igual a 24V. La segunda, el rizado de la tensión a la salida del convertidor elevador debe ser siempre menor del 10%.

### 3. Descripción del modelo

El modelo que se empleará para la realización del convertidor CC – CC y su conexión al LED se muestra en la Figura 1. Además, se pueden apreciar las especificaciones generales del circuito.



*Figura 1. Diagrama de bloques general*

En las siguientes secciones se muestran los resultados que garantizan el cumplimiento de las especificaciones.

### 4. Resultados

Tras el diseño y montaje del convertidor elevador se procede a la toma y análisis de resultados. En la Figura 2 se muestran los resultados finales del convertidor elevador.



Figura 2. Tensión de salida del Elevador (Izq:  $V_{in} = 6V$ , Dcha:  $V_{in} = 12V$ )

De la Figura 2 se extraen lo siguientes datos acerca del convertidor elevador:

- Para una tensión de entrada de 6V: Se logra una tensión de salida = 25,535V, y una tensión de rizado = 1,926V (7,54%).
- Para una tensión de entrada de 12V: Se logra una tensión de salida = 30,570V, y una tensión de rizado = 0,493V (1,61%).

## 5. Conclusiones

Como conclusión, de los datos recopilados en la anterior sección se puede afirmar que el convertidor elevador cumple con las especificaciones de diseño. La tensión de salida se encuentra siempre por encima de los 24V especificados, y la tensión de rizado se mantiene siempre por debajo del 10% hasta en el caso más desfavorable.

Por tanto, se puede concluir que el diseño del convertidor elevador y su montaje ha sido un éxito, demostrándose así en los resultados obtenidos.

## 6. Referencias

- [1] Altium. “Fácil, Potente y Moderno. El sistema de diseño de PCB más reconocido del mundo”. Altium Designer, 2005. Última consulta 27/06/2022. <https://www.altium.com/es/altium-designer/>
- [2] Advanced Circuits. “Standard & Custom Printed Circuit Boards”. Advanced Circuits Products, 2015. Última consulta 28/06/2022. <https://www.4pcb.com/pcb-manufacturing-custom-standard.html>

# **DESIGN AND TEST OF A BOOST CONVERTER AND ITS CONTROL FOR THE SUBSEQUENT MANUFACTURE OF A DC-DC POWER CONVERTER (BOOST + BUCK).**

**Author: Martín de San Pablo del Castillo, Javier.**

Director: García Cerrada, Aurelio.

Collaborating Institution: ICAI - Universidad Pontificia Comillas and University of Michigan.

## **PROJECT SUMMARY**

In this project a boost converter will be designed and tested for its later inclusion in a DC-DC power converter (boost + buck) in order to allow the dimming of a LED. The objectives of the project have been achieved, meeting all the required specifications.

### **1. Introduction**

Nowadays, electricity plays a fundamental role in our lives. During the last decades, it has been the motivation for the realization of numerous projects and works that investigate its qualities and ways of implementation in our society.

And how do we enable the use of electrical energy for everyone? The answer, power converters. These converters make it possible to modify the value of electrical quantities such as voltages and currents to facilitate their use in everyday life.

The usefulness of these converters is the reason why it has been decided to focus this Final Degree Project on their applications, and more specifically, on the design and production of a DC-DC converter that allows the light regulation of a LED.

### **2. Definition of the project**

As mentioned above, the project will focus on the design and manufacture of a boost converter for the subsequent manufacture of a DC - DC power converter that enables the dimming of a LED.

For this objective the project will be divided into four distinct phases:

- a. A theoretical design of the boost converter and its associated control will be carried out based on the specifications imposed for the project.
- b. Once the correct operation of both converters is verified, the printed circuit board will be designed using Altium [3]. When the design is completed, the board will be ordered together with its components.
- c. When the PCB (Printed Circuit Board [4]) is received, the components and the board will be assembled and tested.
- d. In this last part the success and quality of the project will be determined by performing tests on the complete circuit. It will be verified that all the imposed requirements are fulfilled.

On the other hand, the boost converter must meet two specifications. First, the output voltage of the boost converter must always be greater than or equal to 24V. Second, the ripple of the boost converter output voltage must always be less than 10%.

### 3. Description of the model

The model that will be used for the realization of the DC-DC converter and its connection to the LED is shown in Figure 1.



*Figure 1. General Block Diagram*

The following sections show the results that ensure compliance with the specifications.

### 4. Results

After the design and assembly of the boost converter, the results are taken and analyzed. Figure 2 shows the final results of the boost converter.

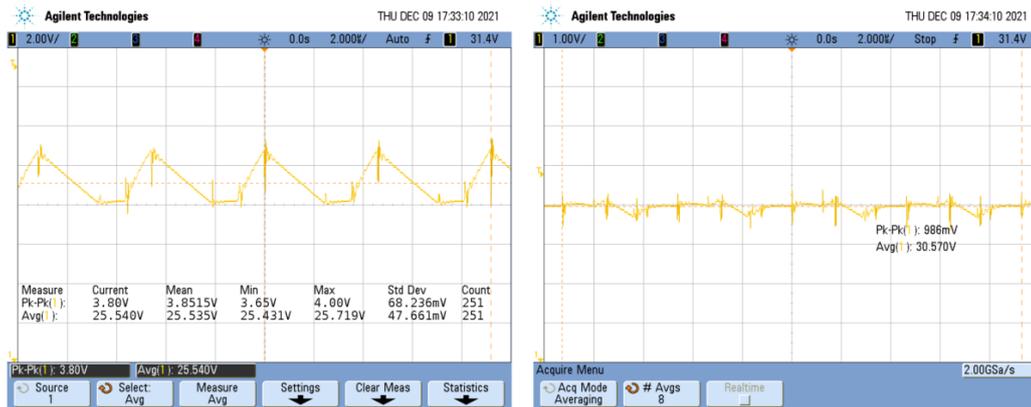


Figure 2. Booster output voltage (Left:  $V_{in} = 6V$ , Right:  $V_{in} = 12V$ )

The following data about the boost converter is extracted from Figure 2:

- For an input voltage of 6V: We obtain an output voltage = 25.535V and a ripple voltage = 1.926V (7.54%).
- For an input voltage of 12V: We obtain an output voltage = 30.570V and a ripple voltage = 0.493V (1.61%).

## 5. Conclusions

In conclusion, from the data collected in the previous section it can be stated that the boost converter meets the design specifications. It has an output voltage that is always above the specified 24V, and the ripple voltage is always kept below 10% even in the most unfavorable case.

Therefore, it can be concluded that the design of the boost converter and its assembly has been a success, as demonstrated by the results obtained.

## 6. References

- [3] Altium. “Fácil, Potente y Moderno. El sistema de diseño de PCB más reconocido del mundo”. Altium Designer, 2005. Last search 27/06/2022. <https://www.altium.com/es/altium-designer/>
- [4] Advanced Circuits. “Standard & Custom Printed Circuit Boards”. Advanced Circuits Products, 2015. Last search 28/06/2022. <https://www.4pcb.com/pcb-manufacturing-custom-standard.html>

## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 La Electricidad .....	1
1.2 La Iluminación LED.....	2
1.2.1 Historia de los LED.....	2
1.2.2 La Electrónica de Potencia .....	3
<b>Capítulo 2. Estado de la Cuestión .....</b>	<b>4</b>
2.1 Funcionamiento de los LED .....	4
2.2 Los Convertidores de Potencia.....	6
2.3 Motivación del Proyecto .....	7
<b>Capítulo 3. Objetivos Para el Desarrollo Sostenible .....</b>	<b>9</b>
<b>Capítulo 4. Definición del Trabajo .....</b>	<b>11</b>
4.1 Objetivos .....	11
4.1.1 Especificaciones del Diseño .....	12
4.1.2 Planteamiento del Diseño.....	13
4.2 Metodología.....	14
4.3 Planificación.....	15
<b>Capítulo 5. Descripción de las Tecnologías.....</b>	<b>16</b>
<b>Capítulo 6. Diseño del Sistema.....</b>	<b>17</b>
6.1 Introducción a los Convertidores CC – CC.....	17
6.2 Convertidor Elevador .....	19
6.2.1 Fabricación del Inductor.....	22
6.3 Selección de los Componentes .....	25
6.3.1 Cálculos del Diodo.....	25
6.3.2 Cálculos del MOSFET.....	26
6.3.3 Cálculo del Rendimiento .....	27
6.4 Controlador Feedforward .....	27
<b>Capítulo 7. Simulaciones del Modelo Desarrollado.....</b>	<b>30</b>

7.1	Primer Punto Crítico. $V_g = 6V$ y $D = 0,75$ .....	31
7.1.1	Tensión de entrada $6V < V_g < 12V$ .....	33
7.1.2	Tensión de salida $V_{out,elevador} \geq 24V$ .....	34
7.1.3	Rizado de la tensión de salida $\Delta V_{out,elevador} < 10\%$ .....	34
7.1.4	Rizado de la corriente de la bobina $\Delta I_L < 10\%$ .....	34
7.2	Segundo Punto Crítico. $V_g = 12V$ y $D = 0,5$ .....	35
7.2.1	Tensión de entrada $6V < V_g < 12V$ .....	36
7.2.2	Tensión de salida $V_{out,elevador} \geq 24V$ .....	37
7.2.3	Rizado de la tensión de salida $\Delta V_{out,elevador} < 10\%$ .....	37
7.2.4	Rizado de la corriente de la bobina $\Delta I_L < 10\%$ .....	37
7.3	Resultados de la Simulación.....	38
<b>Capítulo 8. Proceso de Fabricación.....</b>		<b>39</b>
8.1	Plano de Diseño de la Placa Base.....	39
8.1.1	Convertidor Reductor.....	39
8.1.2	Controlador de Corriente Promedio de Lazo Cerrado.....	41
8.1.3	Circuito Temporizador.....	42
8.1.4	Circuito Amortiguador RC.....	44
8.1.5	Componentes de la Placa.....	44
8.1.6	Diseño Final.....	47
8.2	Proceso de Montaje.....	49
<b>Capítulo 9. Fase Experimental y Resultados.....</b>		<b>51</b>
9.1	Circuito Temporizador.....	51
9.2	Convertidor Elevador.....	52
9.3	Convertidor Reductor.....	53
9.4	PCB en Funcionamiento.....	55
9.4.1	Tensión de Entrada del Elevador.....	55
9.4.2	Resultados del Elevador.....	56
9.4.3	Resultados del Reductor.....	59
9.4.4	Eficiencia.....	60
9.4.5	Atenuación del LED.....	63
9.4.6	Densidad de Potencia.....	66
9.4.7	Resultados Obtenidos.....	67

<i>Capítulo 10. Cálculo de Costes.....</i>	<i>69</i>
<i>Capítulo 11. Conclusiones y Trabajos Futuros.....</i>	<i>71</i>
<i>Capítulo 12. Bibliografía.....</i>	<i>73</i>
<i>Anexo I. Ficha de Datos del LED XLAMP CXA1512 .....</i>	<i>75</i>
<i>Anexo II. Ficha de Datos del Núcleo del Inductor T106-26.....</i>	<i>77</i>
<i>Anexo III. Ficha de Datos del Diodo MBR1045.....</i>	<i>78</i>
<i>Anexo IV. Ficha de Datos del MOSFET IPP040N06N.....</i>	<i>79</i>
<i>Anexo V. Esquemáticos del Convertidor .....</i>	<i>80</i>
<i>Anexo VI. BOM.....</i>	<i>85</i>
<i>Anexo VII. Análisis de Inversión.....</i>	<i>87</i>
<i>Anexo VIII. Ficha de Datos del Diodo 1N4148 .....</i>	<i>88</i>
<i>Anexo IX. Ficha de Datos del Transistor PNP 2N3906.....</i>	<i>89</i>
<i>Anexo X. Otros Componentes Consultados.....</i>	<i>90</i>
<i>Anexo XI. Reflexión Acerca del Alineamiento del Proyecto con los ODS.....</i>	<i>92</i>

## Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de bloques general .....	10
Figura 2. Tensión de salida del Elevador (Izq: $V_{in} = 6V$ , Dcha: $V_{in} = 12V$ ) .....	11
Figura 3. Diseño de un diodo LED [9].....	4
Figura 4. Funcionamiento esquemático de un diodo LED [9] .....	5
Figura 5. Diagrama de bloques general .....	11
Figura 6. Diagrama de bloques detallado .....	14
Figura 7. Cronograma de Trabajo .....	15
Figura 8. Diseño de un convertidor elevador.....	17
Figura 9. Diseño del Circuito de Control del Convertidor Elevador .....	28
Figura 10. Diseño en PLECS del Convertidor Elevador - Reductor.....	30
Figura 11. Diseño en PLECS del Convertidor Elevador y su Control .....	31
Figura 12. Simulaciones del Convertidor Elevador para $V_g = 6V$ y $D = 0,75$ (Superior: Boost Inductor Current, Central: Boost Input Voltage, Inferior: Boost Output Voltage).....	32
Figura 13. Simulaciones del Convertidor Elevador para $V_g = 12V$ y $D = 0,5$ (Superior: Boost Inductor Current, Central: Boost Input Voltage, Inferior: Boost Output Voltage).....	35
Figura 14. Convertidor Reductor con Conexión al Control.....	39
Figura 15. Circuito del Controlador de Corriente.....	41
Figura 16. Diseño del Circuito Temporizador.....	43
Figura 17. Diseño del Amortiguador RC .....	44
Figura 18. Modelo en Altium de la PCB .....	48
Figura 19. Salida del Circuito Temporizador.....	51
Figura 20. Prueba independiente del Elevador (Verde: $i_{ind}$ (A), Amarillo: $V_{out,boost}$ (V)).....	53
Figura 21. Prueba independiente del Reductor (Verde: $i_{ind}$ (A), Amarillo: Canal del Osciloscopio desconectado) .....	54
Figura 22. Tensión de Entrada del Elevador (Izq: $V_{in} = 6,83V$ , Dcha: $V_{in} = 13,0 V$ ).....	55
Figura 23. $V_{out}$ del elevador a 12V .....	56
Figura 24. Tensión de salida del Elevador (Izq: $V_{in} = 6V$ , Dcha: $V_{in} = 12V$ ) .....	57
Figura 25. Tensión de Salida del Convertidor Elevador frente a tensión de entrada.....	58
Figura 26. Corriente a través de la bobina del elevador (Izq: $V_{in} = 6V$ , Dcha: $V_{in} = 12V$ ) .....	59
Figura 27. Corriente a través del LED (Izq: $V_{in} = 6V$ , Dcha: $V_{in} = 12V$ ).....	60

<i>Figura 28. Señales de Salida a 12V (Amarillo: Vled, Verde: Iled, Rojo: PWM) .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 29. Rendimiento frente a tensión de entrada.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 30. 10-100% atenuación del LED, potencia v eficiencia .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 31. Respuesta a Escalón de Referencia a máxima potencia (12V) (Amarillo: referencia, Verde: respuesta, corriente que circula a través del LED).....</i>	<i>66</i>

## *Índice de ilustraciones*

<i>Ilustración 1. Representación de los componentes SMD y PTH [17]</i>	46
<i>Ilustración 2. PCB ensamblada (Rojo: Convertidor Elevador, Amarillo: Convertidor Reductor, Azul: Controlador Feedforward, Verde: Controlador de Corriente, Rosa: Circuito Temporizador)</i>	49

## *Índice de tablas*

<i>Tabla 1. Tipos de núcleos para el diseño del inductor .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2. Resultados de la Simulación del Convertidor Elevador para <math>V_g = 6V</math> y <math>D = 0,75</math> .....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 3. Resultados de la Simulación del Convertidor Elevador para <math>V_g = 12V</math> y <math>D = 0,5</math> .....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 4. Tensión de Salida del Convertidor Elevador.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 5. Medidas de Eficiencia .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 6. Medidas durante la atenuación.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 7. Resultados del convertidor reductor-elevador.....</i>	<i>67</i>

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

### ***1.1 LA ELECTRICIDAD***

Cientos de miles de años de evolución han sido necesarios para que el ser humano alcance el dominio actual que tiene sobre la energía que nos rodea. Desde el control del fuego hasta la Revolución Industrial, pasando por la utilización de las energías más simples como el viento, el hombre ha ido adquiriendo conocimientos y herramientas que le permitirían controlar el mundo a su alrededor.

Tras estos avances del ser humano, le llegaría el turno al más importante de todos ellos, la electricidad. A tal punto ha llegado la relevancia de la energía eléctrica que hoy en día sería inconcebible la vida sin ella. Todos los aparatos y nuevas tecnologías que nos ayudan en nuestro día a día usan electricidad: móviles, neveras, televisiones, lavadoras... tal es nuestro nivel de dependencia de la electricidad que la falta de ésta implicaría una involución de la raza humana.

La electricidad tiene una infinidad de usos en nuestro día a día, siendo uno de estos la generación de luz a través de energía eléctrica. Algunos de los métodos más tradicionales para la generación de luz son el calentamiento de un filamento metálico por efecto Joule [5] o la fluorescencia producida por determinados metales ante una descarga eléctrica [6]. Sin embargo, el futuro de la iluminación no pasa por ninguno de estos métodos más tradicionales, si no que dicho futuro se encuentra en la iluminación LED.

## ***1.2 LA ILUMINACIÓN LED***

### **1.2.1 HISTORIA DE LOS LED**

La iluminación LED ha supuesto un gran avance respecto a los métodos de iluminación más tradicionales como son las lámparas fluorescentes o las bombillas incandescentes. Esto se debe a sus múltiples beneficios como son la eficiencia, la duración o el hecho de que son tecnologías mucho más favorables para el medioambiente. Estos beneficios serán comentados más en profundidad en la sección 2.3.

Sin embargo, hay ciertos factores que no han hecho posible la implementación de la tecnología LED con anterioridad. El primero de ellos, la fabricación del primer LED en el espectro visible no se produjo hasta el año 1962, año en el que el ingeniero norteamericano Nick Holonyak logró fabricar el primer LED de color rojo de forma eficiente [7].

Otro de los impedimentos para la implementación de la tecnología LED fue la creación de luz blanca. Como se comentará más en detalle en la sección 2.1, los diodos LED cuentan con semiconductores y el color de la luz que emiten varía en función del material de elaboración de dicho semiconductor. Antes del año 1994 se habían conseguido diseñar y fabricar LED de colores rojos, amarillos o verdes. Sin embargo, aunque consumían menos electricidad que las bombillas incandescentes empleadas en la época, no podían sustituirlas debido a la complejidad para obtener luz blanca.

Fue en el año 1994 cuando Shuji Nakamura, Isamu Akasaki e Hiroshi Amano crearon el primer LED azul eficiente [8], el cual al combinarlo con un LED amarillo crea luz blanca a la percepción del ojo humano. Tal fue la relevancia de este descubrimiento, que los investigadores de este proyecto fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 2014.

Por último, también era necesaria la realización de grandes avances técnicos para poder implementar esta tecnología de forma eficiente. Como se comenta en las secciones 1.2.2 y 2.2, el estudio de la electrónica de potencia, y más en detalle, de los convertidores de

potencia, era necesario de cara a la implementación de la iluminación LED en nuestro día a día.

### **1.2.2 LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA**

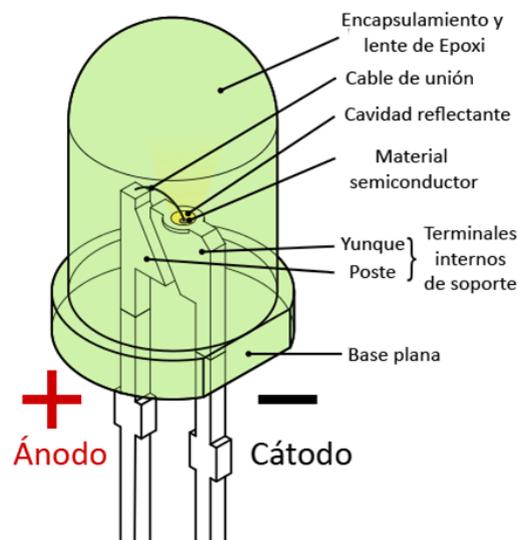
La electrónica de potencia es un campo de estudio que ha adquirido una gran relevancia en la sociedad actual, ya que gracias a ella podemos controlar la electricidad. Esta parte de la electrónica es la encargada de controlar y convertir la energía eléctrica en voltajes y corrientes deseados, habilitando así altas tensiones provenientes de centrales eléctricas para el uso cotidiano del consumidor, controlando la velocidad y el funcionamiento de máquinas eléctricas o transformando la corriente de alterna a continua y viceversa.

A su vez, la electrónica de potencia estudia el uso de convertidores de potencia, quienes se encargan, entre muchas otras, de las funciones anteriormente mencionadas. Como ya se había comentado en la sección anterior, una de las aplicaciones de estos convertidores es la regulación lumínica de un LED. Esta aplicación es de gran utilidad en la sociedad actual debido a las numerosas ventajas de los LED respecto a los métodos de iluminación más tradicionales. Por ello, el diseño y la puesta en marcha de un convertidor de potencia CC – CC para la regulación lumínica de un LED será el objeto de estudio de este Trabajo de Fin de Grado.

## Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

### 2.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS LED

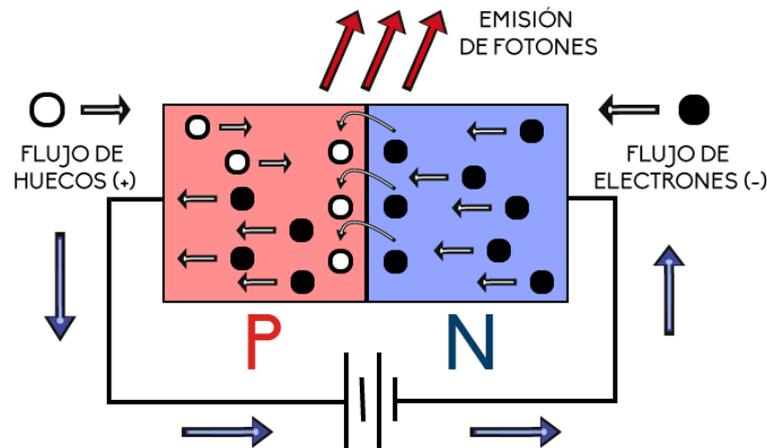
Para llevar a cabo el correcto funcionamiento de un LED primero se debe entender el diseño de un LED (véase Figura 3).



*Figura 3. Diseño de un diodo LED [9]*

De este diseño cabe destacar el semiconductor, ya que dependiendo del material del que esté elaborado la luz de los diodos LED variará de un color a otro.

Una vez visto el diseño de un LED, se pasa a explicar el funcionamiento interno del mismo. En la Figura 4 se muestra el proceso que se está llevando a cabo en el interior del semiconductor del LED a la hora de emitir fotones.



*Figura 4. Funcionamiento esquemático de un diodo LED [9]*

Como se observa en la Figura 4, se debe conectar una fuente de alimentación entre el ánodo y el cátodo del diodo LED. Esto provocará un flujo de electrones a través del LED, lo cual implicará la circulación de corriente eléctrica en el semiconductor.

La recombinación entre electrones y huecos da lugar a una pérdida de energía en los electrones. Dicha energía no se puede perder sin más, si no que se ve materializada en la emisión de fotones.

Por último, esta emisión de fotones varía dependiendo del material del que está fabricado el semiconductor, haciendo que varíe el color de la luz que percibe el ojo humano. Algunos de los materiales más típicos son nitruro de galio para los LED de color azul o arseniuro de galio para los LED de color rojo.

El funcionamiento de los LED es sencillo, sin embargo, se ha de trabajar con ellos a corrientes y tensiones específicas para no dañarlos, no pudiendo conectarse directamente a la red eléctrica en la mayoría de los casos. Es por ello que es necesario la implementación de los ya comentados convertidores de potencia, quienes se encargarán de transformar las corrientes y tensiones de la red en los parámetros deseados para habilitar el correcto funcionamiento de la tecnología LED.

## **2.2 LOS CONVERTIDORES DE POTENCIA**

Como se ha comentado anteriormente, la electrónica de potencia es un campo de estudio en auge debido al vital rol que juega en la sociedad, empleada actualmente en los sectores residencial, aeroespacial, industrial o militar entre otros muchos, siendo los convertidores de electrónica de potencia una de las principales características de este campo.

Dichos convertidores son los encargados de recibir y controlar una magnitud eléctrica entrante como puede ser una tensión, intensidad o frecuencia de entrada, y transformarla en la tensión, intensidad o frecuencia de salida deseada para su uso.

La forma más común de clasificar los convertidores de potencia es según el tipo de corriente eléctrica que los alimenta y la corriente que se obtiene a la salida. Estas corrientes pueden ser de corriente continua (CC) o de corriente alterna (CA). La necesidad de tener que modificar los diferentes tipos de corriente o cambiar la magnitud de alguna variable eléctrica obligó a la sociedad a desarrollar diferentes convertidores de potencia. A lo largo de este proyecto se empleará un convertidor CC – CC o Regulador CC.

Los convertidores de potencia CC – CC son aquellos convertidores que modifican la tensión de una fuente de corriente continua (CC). Los convertidores más comunes son los conmutados, los cuales almacenan la energía entrante periódicamente para su posterior liberación en la salida, logrando su fin de cambiar la tensión. Dicho almacenamiento puede realizarse empleando dispositivos de almacenamiento de campo magnético (como inductores o transformadores) o mediante el uso de dispositivos de almacenamiento de campo eléctrico (condensadores). Con el fin de realizar la conmutación anteriormente mencionada se incluyen en los circuitos dispositivos semiconductores de potencia empleados como interruptores. Estos semiconductores pueden ser diodos, transistores, etc.

Los convertidores CC – CC conmutados se pueden clasificar según los niveles de tensión a la entrada y a la salida, teniendo cada uno de ellos aplicaciones diferentes.

El objeto de estudio de este trabajo será la realización de un convertidor reductor – elevador, el cual permite convertir la tensión de entrada en una tensión de salida menor o mayor según se desee. Más concretamente se trabajará con la parte elevadora, y su aplicación para el correcto funcionamiento y regulación de la intensidad lumínica de un LED.

En la sección 2.3 se comentarán los múltiples beneficios de esta aplicación de los convertidores CC – CC frente a los métodos tradicionalmente empleados. Tal es la repercusión de esta tecnología en el mundo actual que ya se empiezan a realizar numerosos estudios y proyectos a escala nacional que podrían cambiar nuestro día a día radicalmente.

Uno de los proyectos más prometedores se está llevando a cabo ahora en España y pretende lograr la implementación de la tecnología LED a nivel nacional [10]. El revolucionario proyecto destaca la importancia de la tecnología desarrollada en este trabajo y su utilidad.

### **2.3 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO**

Las aplicaciones de la electrónica de potencia en nuestro día a día y el uso de los convertidores CC – CC a nivel mundial son el principal motivo por el cual decidí realizar este Trabajo de Fin de Grado. El fin principal es ayudar en el desarrollo de la tecnología de dichos convertidores así como buscar su implementación en las partes menos desarrolladas del mundo, brindándoles un gran avance tecnológico y un gran salto de calidad de vida.

Como se avanzó anteriormente, la aplicación de los convertidores que se trata en este proyecto es la iluminación LED. Los LED se están convirtiendo en el método de iluminación más empleado debido a sus múltiples beneficios frente a métodos tradicionales como las CFL (lámparas fluorescentes compactas) o las bombillas incandescentes.

La primera de estas ventajas, y quizás la más importante, es su duración y eficiencia con el paso del tiempo. Por poner en perspectiva el gran cambio que supuso la tecnología LED, las bombillas de bajo consumo ya fueron un gran avance, superando las 15.000 horas de vida útil. Sin embargo, los LED han conseguido una duración media de 50.000 horas, esto equivale a tenerlas encendidas ininterrumpidamente durante 5 años.

Pero este no es su único beneficio, las lámparas LED consumen de un 80 a un 90% menos de energía que las bombillas y lámparas halógenas. Otra ventaja de esta tecnología es la velocidad, pues las lámparas LED no tardan tiempo en encenderse mientras que las CFL sí.

Por último, una de las mayores ventajas de la iluminación LED es su impacto medioambiental. Se trata de una iluminación mucho más ecológica ya que, al contrario que las bombillas fluorescentes, los LED no contienen mercurio, lo cual facilita su reciclaje y la convierte en una iluminación más respetuosa con el medio ambiente.

En conclusión, ayudar a la sociedad a desarrollar tecnologías eficientes y menos dañinas para el medioambiente es la principal razón por la cual escogí este Trabajo de Fin de Grado.

## **Capítulo 3. OBJETIVOS PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

Con el fin de hacer del mundo un lugar mejor para todos, la Naciones Unidas adoptaron en 2015 los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). La función de las ODS es proteger el planeta, poner fin a la pobreza y garantizar la paz y prosperidad de todas las personas para el año 2030, detallado así en la Asamblea General de las Naciones Unidas de septiembre de 2015 [11]. Por estas razones, nuestro proyecto se alineará en lo posible con dichos objetivos, sumándose a la causa y tratando de convertir el planeta en un lugar mejor para todos.

- *ODS N°7: Energía Asequible y No Contaminante.* Esta ODS tiene 3 objetivos principales, siendo éstos poder garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, aumentar la proporción de energías renovables empleadas y mejorar la eficiencia energética.

El proyecto cumple con estos objetivos, ya que como se ha comentado anteriormente, este Trabajo de Fin de Grado se centra en el diseño de un convertidor de potencia para el funcionamiento de un LED, empleando energía eléctrica y explotando los múltiples beneficios de los LED frente a las fuentes de iluminación más tradicionales. Dichos beneficios han sido comentados en el Capítulo 2. Entre ellos se incluye el menor coste de la tecnología LED, la mayor eficiencia de dicha tecnología y el beneficio de tener un mejor impacto medioambiental.

- *ODS N°12: Producción y Consumos Responsables.* Esta ODS se centra en lograr un crecimiento económico y un desarrollo sostenible a través de una reducción de la huella ecológica, disminuyendo la generación de desechos.

Este mismo tema ha sido tratado en este proyecto en el Capítulo 2. En él se han comentado los beneficios medioambientales de la tecnología empleada en este trabajo, en particular la tecnología LED. Al contrario que las bombillas fluorescentes,

los LED no contienen mercurio, facilitando el reciclaje y uso de éstos, convirtiéndolos en una tecnología más respetuosa con el medioambiente, y habilitando así una tecnología que fomenta la producción y el consumo responsable de energía.

Para concluir con los objetivos para el desarrollo sostenible, en el Anexo XI. Reflexión Acerca del Alineamiento del Proyecto con los ODS se incluye, como su propio nombre indica, una reflexión acerca del alineamiento del proyecto con estos objetivos. En él se analiza el futuro de esta tecnología en nuestra sociedad, destacando la especial relevancia que adquieren las tecnologías sostenibles en el mundo actual dada la situación crítica en la que nos encontramos.

## Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

### 4.1 OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es el diseño y fabricación de un convertidor de potencia CC – CC para controlar la corriente a través de un LED (Cree XLamp CXA1512 LED). Este proyecto se realiza en respuesta a la solicitud de dicho convertidor, por lo que existirán especificaciones externas impuestas por el solicitante.

Durante este proyecto se seguirá detalladamente cada uno de los pasos desde el diseño hasta la puesta en marcha del convertidor para hacer ver al lector los beneficios de la implementación de dicho circuito en tareas cotidianas.

Con el fin de poder estructurar el trabajo y ser más eficiente a la hora de realizarlo, garantizando así una mayor tasa de éxito, se ha dividido el proyecto en subcircuitos más sencillos. De esta forma, se podrá diseñar y analizar por separado cada uno de los subcircuitos para su posterior puesta en común, formando así el circuito final.

Las dos partes principales del convertidor de potencia son el convertidor elevador y el convertidor reductor, véase la Figura 5. Como se ha comentado anteriormente, cada subcircuito se diseñará por separado buscando cumplir todas las especificaciones que se detallarán más adelante en este trabajo. Una vez obtenidos unos parámetros que cumplan dichas especificaciones se simularán los subcircuitos para comprobar los resultados, tanto por separado como en conjunto. Estos pasos se realizarán todas las veces necesarias hasta completar las especificaciones.



*Figura 5. Diagrama de bloques general*

Finalmente, una vez terminadas con éxito las simulaciones, se procederá al encargo de una placa de circuito impreso para el diseño de un modelo real. En ella se ensamblará el circuito completo, juntando todos los subcircuitos anteriormente simulados. Una vez finalizado el montaje dará comienzo a la fase experimental. En esta última parte se comprobará que se cumplen las especificaciones iniciales del proyecto y se medirá el éxito de éste obteniendo las prestaciones del convertidor.

#### **4.1.1 ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO**

Como se venía comentando, existen algunas especificaciones que el convertidor debe cumplir para asegurar el correcto funcionamiento del circuito y del LED, además de ciertas especificaciones extras encargadas en la solicitud del diseño.

Para empezar, con el encargo de este proyecto se incluía la ficha de datos del LED (ver Anexo I. Ficha de Datos del LED). Siguiendo con los parámetros del circuito, el convertidor de potencia CC – CC (elevador - reductor) tendrá una salida de 1A y la tensión a la entrada variará entre 6 – 12Vcc para la carga del LED. Por otro lado, también se deben satisfacer los siguientes requisitos:

- Especificaciones Generales
  - Frecuencia de conmutación  $f_s > 200$  kHz
  - Eficiencia del sistema a máxima potencia  $> 85\%$
  - Posibilidad de atenuación entre un 10 - 100%
  
- Especificaciones del Convertidor Elevador
  - Tensión de entrada  $V_g: 6V < V_g < 12V$
  - Tensión de salida  $V_{out,elevador} \geq 24V$
  - Rizado de la tensión de salida  $\Delta V_{out,elevador} < 10\%$
  
- Especificaciones del Convertidor Reductor
  - Tensión de entrada  $V_{in,reductor} \geq 24V$
  - Corriente de salida  $I_{out,reductor} \leq 1A$

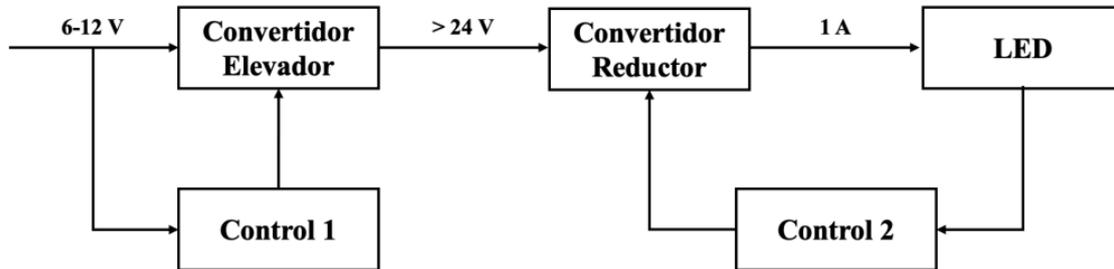
- Rizado de la corriente de salida  $\Delta I_{\text{out,reductor}} < 5\%$
  
- Tamaño máximo de la placa: 60 pulgadas cuadradas

#### **4.1.2 PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO**

Siguiendo las especificaciones mencionadas, el circuito completo convertidor elevador – reductor sigue el modelo mostrado anteriormente en la Figura 5. Sin embargo, dada la gran carga de trabajo y la complejidad de realizar ambos convertidores por separado, este Trabajo de Fin de Grado se centrará solamente en el estudio del convertidor elevador. El convertidor reductor será elaborado por mi compañero Fernando Martínez – Cattáneo, por lo que su estudio queda fuera del alcance de este trabajo.

Una vez cuente con los dos convertidores terminados procederé a la puesta en marcha de ambos convertidores en conjunto. Con el convertidor CC – CC (elevador – reductor) en funcionamiento se procederá a realizar los ensayos correspondientes previos a la entrega como producto finalizado.

Analizando en mayor profundidad el funcionamiento del circuito observamos que la función principal del convertidor elevador será proporcionar una tensión mayor de 24V para el rango de tensiones de entrada proporcionados. Para cumplir esta función será necesaria la incorporación de un circuito de control que modifique el ciclo de trabajo del convertidor elevador. Se puede ver el esquema más en detalle en la Figura 6. En ella también se ilustra la necesidad de implementar un circuito de control en el convertidor reductor, este control cumplirá la función de modificar el ciclo de trabajo del convertidor para lograr mantener una corriente de salida constante de 1A para cualquier tensión de entrada superior a 24V, dicha intensidad será la que alimente al LED.



*Figura 6. Diagrama de bloques detallado*

En conclusión, este Trabajo de Fin de Grado se centrará en el diseño del convertidor elevador y su control asociado.

## **4.2 METODOLOGÍA**

Para asegurar la calidad y el resultado del proyecto, además de mantener un trabajo ordenado y eficiente, se ha decidido dividir el proyecto en cuatro secciones diferenciadas, con sus respectivos tiempos de realización, como se muestra en el cronograma (Figura 7). Dichas secciones son:

1. *Diseño teórico del convertidor elevador y su control asociado.* A lo largo de esta sección se llevará a cabo un estudio teórico sobre el control CC – CC solicitado junto con sus especificaciones. Se estudiarán, calcularán y seleccionarán los valores de los distintos parámetros utilizados en el convertidor.
2. *Diseño de la placa de circuito impreso.* Una vez se hayan finalizado ambos convertidores, se procederá a juntarlos en un diseño común. Para ello se diseñará la placa de circuito impreso, sobre la cual se montará el circuito completo más adelante. Cuando se finalice su diseño, se encargará la placa junto a los componentes de ésta.
3. *Montaje.* Ya con la PCB (Printed Circuit Board) recibida junto con los componentes encargados, se procederá a la comprobación del funcionamiento y montaje de dichos componentes sobre la placa según el diseño de la sección anterior.



## **Capítulo 5. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS**

Con el fin de poder realizar el proyecto de la mejor manera posible, se han empleado varios recursos externos durante las diferentes fases del trabajo, anteriormente mencionadas en la sección 4.2.

Para la primera fase del proyecto, *Diseño teórico del convertidor elevador y su control asociado*, nos ayudaremos del software PLECS. Esta herramienta desarrollada por Plexim en 2002 se centra, como indican sus siglas en inglés (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation, PLECS) en ayudar al usuario a realizar simulaciones de circuitos eléctricos. Está especialmente diseñada para la electrónica de potencia, pero se puede utilizar para cualquier red eléctrica. PLECS ofrece la posibilidad de modelar controles y diferentes dominios físicos dentro de un circuito, por lo que se usará para diseñar y simular el convertidor elevador y su control modificando sus parámetros para ajustarlos a los requisitos pedidos [12].

Durante la segunda fase del proyecto, *Diseño de la placa de circuito impreso*, se hará uso de Altium Designer para trabajar los esquemáticos y diseñar la PCB. Esta es una de las fases más importantes del proyecto, pues un diseño correcto ahorrará mucho tiempo de montaje en la siguiente fase. Cabe comentar que un error en esta fase del trabajo podría significar el malfuncionamiento del circuito final. Altium Designer es un paquete de software cuya función principal es el diseño electrónico de placas de circuito impreso o PCB. Este software fue desarrollado por la empresa australiana Altium Limited en 2005 [13].

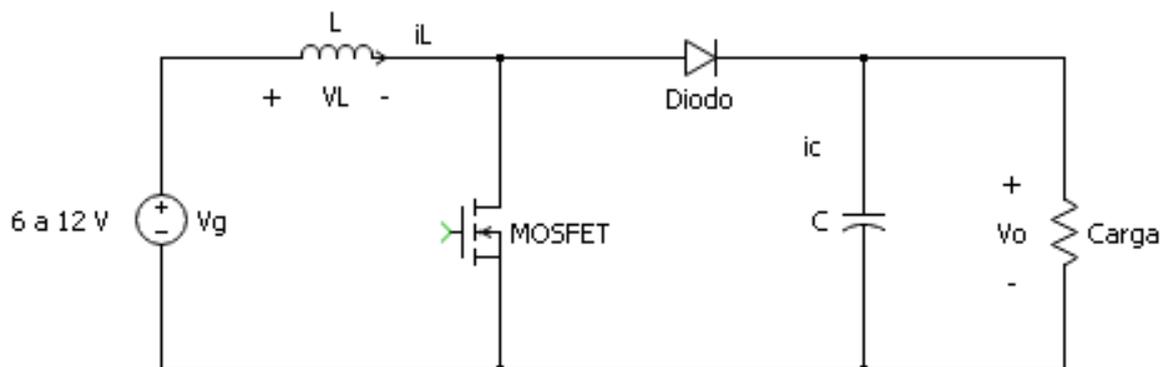
Por último, se encargará la placa BareBone, ofrecida por la compañía Advanced Circuits. Se ha decidido emplear esta placa ya que, a diferencia de otro tipo de PCBs que tardan varias semanas en fabricarse y entregarse, las placas BareBone permiten la fabricación y distribución de éstas en tan solo unos días. Esto se debe a que carecen de máscara de soldadura, serigrafía y cortes internos, convirtiéndolas en placas idóneas para este tipo de proyectos y prototipos [14].

## Capítulo 6. DISEÑO DEL SISTEMA

### 6.1 INTRODUCCIÓN A LOS CONVERTIDORES CC – CC

La principal función de los convertidores CC - CC es regular las tensiones y corrientes de entrada para obtener los valores de salida deseados. Este objetivo es logrado mediante la regulación del ciclo de trabajo (D), el cual puede definirse como el porcentaje de tiempo en el que una carga o circuito se encuentra en estado encendido (On-state en inglés).

Cada tipo de convertidor cuenta con elementos diferentes que conforman el circuito y hacen que el cálculo del ciclo de trabajo sea diferente. El convertidor elevador cuenta con una bobina y un condensador, además de dos interruptores semiconductores, que son un diodo y un transistor MOSFET (véase Figura 8).



*Figura 8. Diseño de un convertidor elevador*

Consideraremos dos posibles estados del circuito dependiendo de si el interruptor (representado en la Figura 8 como ‘MOSFET’ se encuentra cerrado o abierto).

- Si el interruptor se encuentra cerrado toda la corriente circula a través de él, haciendo que la bobina  $L$  almacene energía de la fuente mientras que el condensador  $C$  alimenta la carga.

- Por el contrario, si el interruptor se encuentra abierto toda la corriente circula a través del diodo, dividiéndose posteriormente entre el condensador (cargándolo por completo) y la carga.

Si realizamos un análisis de ambos estados, podremos obtener la ecuación por la que se rige el ciclo de trabajo en los convertidores elevadores (véase Ecuación 1).

Tanto la Ecuación 1 como la Ecuación 2 se encuentran detalladas y definidas en numerosos libros de electrónica de potencia.[15] Sin embargo, para entrar más en detalle, en este Trabajo de Fin de Grado se incluye en los siguientes párrafos la explicación del método de obtención de dichas fórmulas.

$$\text{Ecuación 1} \quad D = \frac{RI_L - V_o}{RI_L}$$

En la Ecuación 1 se obtiene el valor del ciclo de trabajo necesario para obtener la tensión de salida  $V_o$  deseada a través de la corriente de entrada  $I_L$  y el valor de la resistencia  $R$ .

Si lo que queremos es relacionar la tensión de salida con la tensión de entrada emplearemos la Ecuación 2.

$$\text{Ecuación 2} \quad D = \frac{V_o - V_G}{V_o}$$

Como se ha comentado anteriormente, estas ecuaciones se obtienen tras analizar los dos estados del circuito. A continuación se explica más en detalle la obtención de la Ecuación 2.

Primero analizamos el circuito cuando el MOSFET está cerrado. Toda la corriente fluye a través de este, dando lugar a la Ecuación 3.

$$\text{Ecuación 3} \quad V_L = V_G$$

Si hacemos lo propio cuando el MOSFET se encuentra abierto. Toda la corriente circula por el diodo, dando lugar a la Ecuación 4.

$$\text{Ecuación 4} \quad V_L = V_G - V_O$$

El próximo paso es analizar el valor medio de  $V_L$  a lo largo del tiempo. El valor medio de la corriente  $i_L$  que fluye a través de la bobina es constante, por lo que si analizamos la Ecuación 5, observaremos que el valor medio de la tensión  $V_L$  a lo largo del tiempo es 0.

$$\text{Ecuación 5} \quad V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

Por tanto, si denominamos  $D$  al porcentaje de tiempo que el MOSFET se mantiene encendido, también conocido como ciclo de trabajo, obtenemos la Ecuación 6.

$$\text{Ecuación 6} \quad V_L = DV_G + (1 - D)(V_G - V_O) = 0$$

Despejando la Ecuación 6 se obtiene la Ecuación 2, la cual es de vital importancia para este proyecto.

## **6.2 CONVERTIDOR ELEVADOR**

El convertidor elevador debe diseñarse de forma que se garantice el cumplimiento de todas las especificaciones indicadas en la sección 4.1.1:

- Frecuencia de conmutación  $f_s > 200$  kHz
- Tensión de entrada  $V_g$ :  $6V < V_g < 12V$
- Tensión de salida  $V_{out,elevador} \geq 24V$
- Rizado de la tensión de salida  $\Delta V_{out,elevador} < 10\%$

Para elegir los componentes que conformarán el circuito, diseñaremos el convertidor elevador teniendo en cuenta los siguientes valores:

- Frecuencia de conmutación  $f_s = 200$  kHz
- Tensión de entrada  $V_g$ :  $6V < V_g < 12V$
- Tensión de salida  $V_{out,elevador} = 24V$

- Rizado de la tensión de salida  $\Delta V_{\text{out,elevador}} < 5\%$
- Rizado de la corriente de la bobina  $\Delta I_L < 10\%$

Como se ha podido observar, se ha decidido aumentar la restricción del rizado de la tensión de salida con el fin de facilitar la implementación y utilización del controlador de corriente correspondiente al convertidor reductor. Así mismo, como especificación extra he decidido que el rizado de la corriente de la bobina no debe ser mayor del 10% de la componente continua.

Lo primero que necesitamos es saber los rangos de valores del ciclo de trabajo  $D$  para así poder calcular el valor de los componentes del circuito. Aplicando la Ecuación 2 obtenemos el rango de valores de  $D$ , calculados en función de los valores de las tensiones de entrada y salida. Obteniendo así  $D = [0,5; 0,75]$ .

Cabe destacar que diseñaremos el convertidor elevador de forma que la corriente máxima a la salida sea de 1A. Este valor ha sido elegido de forma que nunca se supere el valor de la corriente que ha de circular a través del LED, asegurando el correcto funcionamiento de este en todo momento. Si dividimos la tensión de salida  $V_o$  entre la corriente de salida máxima obtendremos el valor límite de la resistencia  $R$ . Siendo este  $R = 24\Omega$ . Dicha resistencia es un valor ficticio, puesto que no forma parte del circuito final. Sin embargo, conocer este valor es necesario de cara al diseño aislado del convertidor elevador.

Siguiendo el procedimiento anteriormente mencionado en la sección 6.1 obtenemos las ecuaciones necesarias para calcular la corriente que circula por el inductor  $I_L$  y su rizado  $\Delta I_L$ . Obteniendo así una ecuación que las relacione ambas (véase Ecuación 9).

Cabe destacar que las siguientes ecuaciones se encuentran en el libro *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, escrito por Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins. [15] Sin embargo, también se pueden analizar y obtener dichas ecuaciones siguiendo el modelo de análisis comentado en la sección 6.1.

$$\text{Ecuación 7} \quad I_L = \frac{V_o}{R(1-D)}$$

$$\text{Ecuación 8} \quad \Delta I_L = \frac{D(1-D)V_O}{2Lf_S}$$

$$\text{Ecuación 9} \quad \frac{\Delta I_L}{I_L} = \frac{R(1-D)^2 D}{2Lf_S}$$

De esta forma ya contamos con todas las herramientas para hallar el valor mínimo de  $L$ . Para encontrarlo diseñaremos para el peor caso, este es el caso con el que obtendríamos mayor rizado en la corriente del inductor. Por lo tanto, los valores con los que se llega a este caso límite son el mínimo valor de  $D$  ( $D = 0,5$ ), el valor de  $R = 24\Omega$  y el valor de  $\Delta I_L = 10\% I_L$ .

El diseño del circuito nos proporciona el siguiente valor:  $L \geq 75\mu\text{H}$ .

Similar a lo anteriormente realizado para la corriente, se procede a seguir los mismos pasos para la tensión de salida del convertidor elevador. Obteniendo una ecuación que relacione la tensión de salida con su rizado (véase Ecuación 10).

$$\text{Ecuación 10} \quad \frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{D}{RCf_S}$$

Diseñando nuevamente para el peor caso posible, es decir, aquél en el que el rizado de la tensión de salida es mayor, se obtiene el valor mínimo del condensador  $C$  que garantiza el rizado deseado. Dicho rizado ha de ser menor del 5% de la tensión  $V_O$ , y para ello usaremos el mayor valor posible del ciclo de trabajo. Obteniendo así  $C \geq 3.125\mu\text{F}$ .

Hay que tener en cuenta la repercusión que tiene la elección de la inductancia y el condensador. Por ejemplo, si elegimos un inductor de mayor valor, todo el convertidor sería más lento y menos eficiente, pero el rizado de la corriente sería menor. Al mismo tiempo, necesitamos un condensador con un valor grande para reducir el rizado de la tensión de salida, facilitando así la implementación del convertidor reductor.

Por todo lo mencionado anteriormente y teniendo en cuenta que se elegirá un valor estandarizado del condensador para facilitar su compra, se elige para el circuito un condensador de valor  $C = 10\mu\text{F}$ . Para el inductor, el cual se fabricará a mano, se elige un inductor de  $L = 150\mu\text{H}$  por ser el doble del valor requerido por las especificaciones.

Cabe destacar que se han elegido estos valores de forma que se reducen ambos rizados más de lo necesario en este momento. Sin embargo, gracias a esta medida de precaución, se garantiza el cumplimiento de las especificaciones aun cuando se conecte el convertidor de potencia CC – CC en su totalidad.

### **6.2.1 FABRICACIÓN DEL INDUCTOR**

Como se ha comentado anteriormente, el inductor se diseñará a mano, por lo que se necesita elegir el núcleo de éste. Como se comentó en la sección 4.1.1 la eficiencia del convertidor elevador debe ser mayor del 85%. Para dar margen a errores y otras posibles pérdidas, imponemos que las pérdidas totales sean menores del 5% de la potencia de salida máxima. En estas pérdidas se incluyen las pérdidas de ambos semiconductores (diodo y transistor) y del inductor.

La tensión de salida se encuentra especificada en 24V. Por otro lado, como se ha comentado en esta sección, la corriente de salida máxima es 1A. Dando lugar a una potencia máxima de salida de 24W. Teniendo en cuenta esto, las pérdidas totales no deben ser mayores de  $P_{loss} = 5\% \times P_{out,max} = 1,2W$ .

Como medida preventiva para garantizar que no se sobrepase el valor máximo de pérdidas permitidas en el circuito, se ha especificado que tanto el inductor, como el diodo y el transistor tendrán como máximo un tercio de las pérdidas totales, es decir, 0,4W.

Para seguir con la elección del núcleo necesitamos ciertos parámetros como son:

- Resistividad del cable  $\rho$ . Se utilizarán cables de cobre, cuya resistividad es de  $1,724\mu\Omega\text{-cm}$ .
- Corriente máxima que circula a través de la bobina  $I_{L,max}$ . Empleando la Ecuación 7, se obtiene una  $I_L = 4A$ . Añadiéndole un 10% de rizado máximo, la corriente máxima posible es  $I_{L,max} = 4,4A$ .
- Valor de la inductancia  $L$ . Valor elegido anteriormente de  $L = 150\mu H$ .

- Resistencia del bobinado  $R$ . Diseñado para los valores especificados anteriormente, el valor de la resistencia es  $R = 80\text{m}\Omega$ .
- Factor de llenado  $K_U$ . Especificado por los métodos de construcción del inductor en  $K_U = 0,2$ .
- Densidad de flujo máxima  $B_{max}$ . Especificada en  $B_{max} = 0,25\text{T}$ .

Todos los parámetros anteriores son necesarios para poder calcular el tamaño del núcleo del inductor, como se puede ver en la Ecuación 11. De esta forma se elegirá un núcleo de entre todas las opciones posibles.

$$\text{Ecuación 11} \quad K_G = \frac{A_C^2 W_A}{MLT} \geq \frac{\rho L^2 I_{max}^2}{B_{max}^2 R K_U} 10^8 \text{ [cm}^5\text{]}$$

Aplicando los valores anteriormente señalados obtenemos un valor de  $K_G = 0,07515\text{cm}^5$ . Sin embargo, diseñaremos para temperaturas altas ya que se quiere que la placa funcione correctamente en las temperaturas más elevadas que podría alcanzar cuando funcione por un largo periodo de tiempo. El valor de la resistividad del cobre para una temperatura de  $100^\circ\text{C}$  es de  $\rho = 2,3\mu\Omega\text{-cm}$ . Por tanto, en  $T = 100^\circ\text{C}$ , el tamaño del núcleo debe ser  $K_G \geq 0,1002\text{cm}^5$ .

Al aceptar realizar este trabajo se nos permitía trabajar con seis tipos diferentes de núcleos para el inductor, todos ellos extraídos de la página *Micrometals*. Sus características se incluyen en la Tabla 1.

<i>Tipo</i>	$A_C$	$W_A$	$MLT$	$K_G$
T50-18	0,112	0,406	2,03	0,00251
T68-18	0,179	0,621	2,43	0,00819
T90-26	0,395	1,42	3,70	0,0599
T106-18	0,659	1,53	4,39	0,151
T106-26	0,659	1,53	4,39	0,151
T131-26	0,885	1,95	4,91	0,311

*Tabla 1. Tipos de núcleos para el diseño del inductor*

El formato TXX-XX de la página de *Micrometals* habla sobre la geometría y el material del núcleo. El primer número indica la geometría, cuanto mayor sea este número, mayor su área y, por tanto, mayor  $K_G$ . Mientras que cuanto mayor sea el segundo número, mayor será el valor de la inductancia  $L$  dadas el mismo número de vueltas.

Observando la Tabla 1 nos damos cuenta de que los núcleos que se ajustan al valor deseado son el T106-18 y el T106-26. En conclusión, se escoge el núcleo **T106-26** debido a que se ajusta mejor a los requisitos porque es capaz de proporcionar el valor de inductancia requerido a la par que mantener las pérdidas de potencia relativamente bajas.

La ficha de datos de este núcleo se incluye más en detalle en el Anexo II. Ficha de Datos del Núcleo del Inductor.

## 6.3 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES

Para la selección del diodo y el MOSFET se tendrán en cuenta las pérdidas por conmutación y conducción. Las pérdidas de cada semiconductor, como se estipula en la sección 6.2.1, no deben ser mayores de 0,4W.

Para el estudio de los semiconductores se escogerán dos diodos y dos MOSFETs que se adecúen a las necesidades del circuito y se compararán entre ellos para elegir el más conveniente. Los componentes se obtendrán de la página *Micrometals*, anteriormente mencionada en la sección 6.2.1.

Se elige comparar los diodos MBR1045 y MBR735, además de los MOSFETs STP130N6F7 y IPP040N06N. Estos semiconductores de alta frecuencia serán objeto de estudio debido a su cumplimiento de los requisitos de velocidad de conmutación y resistencia  $R_{ON}$ . Ambos valores son relativamente bajos y aceptables para este proyecto. Así mismo, ambos MOSFETs pueden operar correctamente bajo tensiones reversas muy altas, permitiendo trabajar a 60V.

### 6.3.1 CÁLCULOS DEL DIODO

El objetivo principal de este análisis es escoger el diodo, mostrado en la Figura 8 como “Diodo”, que logre minimizar las pérdidas totales, incluyendo las pérdidas por conmutación y las pérdidas por conducción.

$$\text{Ecuación 12} \quad P_{conm,diodo} = (W_{Carga} + W_{OFF})f_S = (V_{OFF}I_{ON,avg}t_r + Q_rV_G)$$

Del circuito del convertidor elevador obtenemos los siguientes valores:

$$I_{ON,avg} = I_{L,max} = 4A; V_{OFF} = V_O = 24V; V_G = 12V.$$

De la ficha de datos del diodo MBR1045 del Anexo III. Ficha de Datos del Diodo MBR1045 obtenemos los siguientes valores:

$$t_r = 1.8ns; Q_r = 5nC.$$

Por lo tanto, con los parámetros estipulados y aplicando la Ecuación 12, el diodo MBR1045 tendría unas pérdidas por conmutación  $P_{comm,diodo} = 0,045W$ . Así mismo, el diodo MBR735 tiene unas pérdidas por conmutación muy similares,  $P_{comm,diodo} = 0,040W$ .

Por el contrario, al calcular las pérdidas por conducción aplicando la Ecuación 13, se puede observar una diferencia notable entre ambos diodos.

$$\text{Ecuación 13} \quad P_{COND} = I_{avg}V_{forward}$$

Para el diodo MBR1045 las pérdidas por conducción son  $P_{COND} = 1,5W$ . Mientras que el diodo MBR735 tiene unas pérdidas de  $P_{COND} = 2W$ .

Teniendo en cuenta la suma de ambas pérdidas, se escoge el diodo **MBR1045** para su implementación en el circuito de la Figura 8 por su mejor rendimiento en el convertidor.

### 6.3.2 CÁLCULOS DEL MOSFET

El objetivo principal de este análisis es escoger el MOSFET, mostrado en la Figura 8 como “MOSFET”, que logre minimizar las pérdidas totales, incluyendo las pérdidas por conmutación y las pérdidas por conducción.

$$\text{Ecuación 14} \quad P_{comm,trans} = (W_{ON} + W_{OFF})f_S = \frac{1}{2}V_{OFF}I_{on,avg}(t_{OFF} + t_{ON})f_S$$

Del circuito del convertidor elevador obtenemos los siguientes valores.

$$I_{ON,avg} = 4A; V_{OFF} = 12V.$$

De la ficha de datos del transistor STP130N6F7 obtenemos los siguientes valores:

$$t_{ON} = 44ns; t_{OFF} = 24ns; R_{ON} = 0,04\Omega.$$

Mientras que de la ficha de datos del transistor IPP040N06N del Anexo IV. Ficha de Datos del MOSFET IPP040N06N, obtenemos los siguientes:

$$t_{ON} = 16ns; t_{OFF} = 9ns; R_{ON} = 0,03\Omega.$$

Por lo tanto, con los parámetros estipulados y aplicando la Ecuación 14, el transistor STP130N6F7 tendría unas pérdidas por conmutación  $P_{comm,diodo} = 0,33W$ . Por otro lado, el transistor IPP040N06N tiene unas pérdidas por conmutación menores,  $P_{comm,diodo} = 0,12W$ .

Así mismo, al calcular las pérdidas por conducción aplicando la Ecuación 15, se puede observar una diferencia notable entre ambos transistores.

$$\text{Ecuación 15} \quad P_{COND} = I_{RMS}^2 V_{ON}$$

Para el transistor STP130N6F7 las pérdidas por conducción son  $P_{COND} = 0,6W$ . Mientras que el transistor IPP040N06N tiene unas pérdidas de  $P_{COND} = 0,4W$ .

Teniendo en cuenta la suma de ambas pérdidas, se escoge el transistor **IPP040N06N** para su implementación en el circuito de la Figura 8 por su mejor rendimiento en el convertidor.

### 6.3.3 CÁLCULO DEL RENDIMIENTO

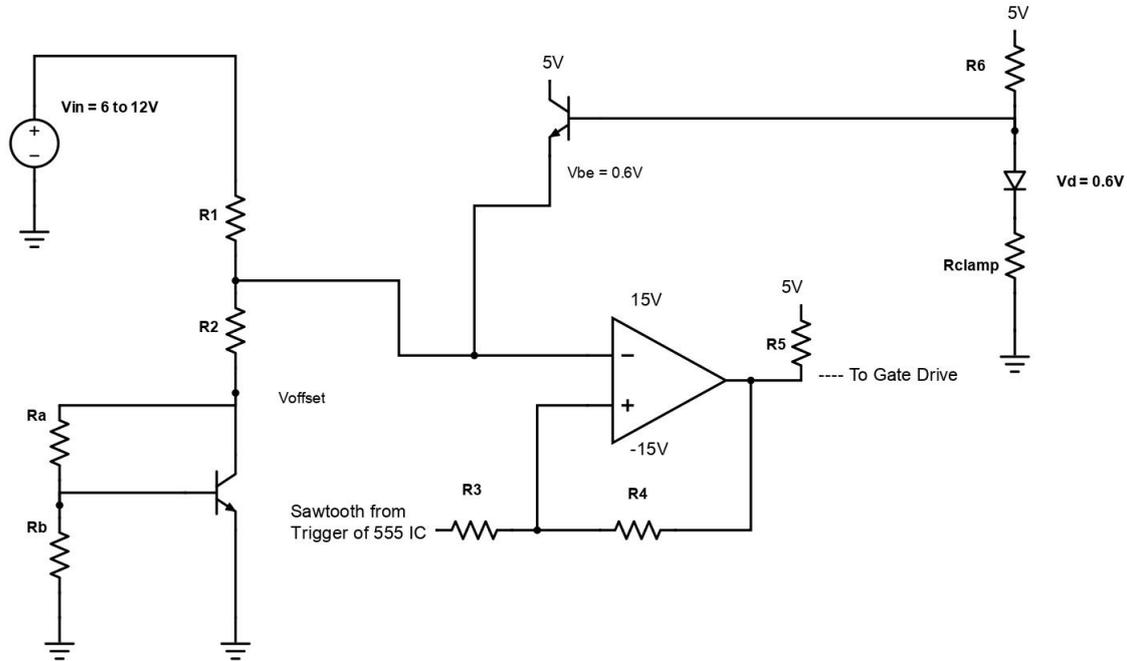
Para calcular el rendimiento del convertidor elevador, tomaremos el peor caso posible. Para ello emplearemos la Ecuación 16, en ella incluiremos las pérdidas en el diodo, en el MOSFET y en el cobre del inductor.

$$\text{Ecuación 16} \quad \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{diodo} - P_{mosfet} - P_{inductor}}{P_{in}}$$

Empleando los valores anteriormente calculados y elegidos en este capítulo, y actuando bajo las peores condiciones de rendimiento posible, obtenemos un rendimiento del 91,47%.

## 6.4 CONTROLADOR FEEDFORWARD

Para que el convertidor elevador pueda cumplimentar su función de proporcionar la tensión de salida deseada para el rango de tensiones de entrada proporcionados, será necesario implementar un circuito de control que modifique el ciclo de trabajo del convertidor. Dicho circuito de control está representado en la Figura 9.



*Figura 9. Diseño del Circuito de Control del Convertidor Elevador*

En el circuito de control, el ciclo de trabajo y la tensión  $V_-$  están relacionadas entre sí por múltiples parámetros. Uno de estos parámetros es la onda diente de sierra (Sawtooth en inglés) que empleamos en el circuito. La tensión de dicha onda varía de 0 a  $\frac{2}{3} V_{CC}$ , siendo  $V_{CC}$  igual a la tensión de 5V mostrada en la Figura 9.

$$\text{Ecuación 17} \quad \frac{2}{3} V_{CC} - \frac{2}{3} V_{CC} D = V_-$$

La relación entre el ciclo de trabajo y la tensión  $V_-$ , siendo  $V_-$  la tensión en la entrada negativa del comparador, viene regida por la Ecuación 17, la cual nos otorga un rango de valores de  $V_-$  para las distintas tensiones de entrada.

Cuando  $D = 0,5$  y  $V_{in} = 12V$  obtenemos:  $V_- = 1,667V$ .

Así mismo, cuando  $D = 0,75$  y  $V_{in} = 6V$  obtenemos:  $V_- = 0,833V$ .

Por otro lado, también podemos obtener una ecuación que relacione las tensiones  $V_-$ ,  $V_{in}$  y  $V_{offset}$ .

$$\text{Ecuación 18} \quad V_- = \frac{R_2}{R_1+R_2} V_{in} + \frac{R_1}{R_1+R_2} V_{off}$$

Nuevamente, diseñaremos los parámetros del circuito para obtener los valores deseados. Para empezar, estableceremos un valor de offset aproximadamente igual a cero,  $V_{\text{offset}} \approx 0$ , de esta forma, no será necesario implementar el circuito de offset ni sus resistencias  $R_a$  y  $R_b$  para garantizar el control de la tensión de offset.

Tras analizar la Ecuación 18, obtenemos una relación entre  $R_1$  y  $R_2$ . Por otro lado, para cumplir dicha relación, se escogerán valores estándar de las resistencias, que serán  $R_1 = 5,6\text{k}\Omega$  y  $R_2 = 900\Omega$ .

Se establece una resistencia pull-up para poder elevar la tensión de salida y se le da el valor estándar de  $R_5 = 2,2\text{k}\Omega$ . Junto con ella se seleccionan los valores de  $R_3 = 1\text{k}\Omega$  y  $R_4 = 100\text{k}\Omega$ .

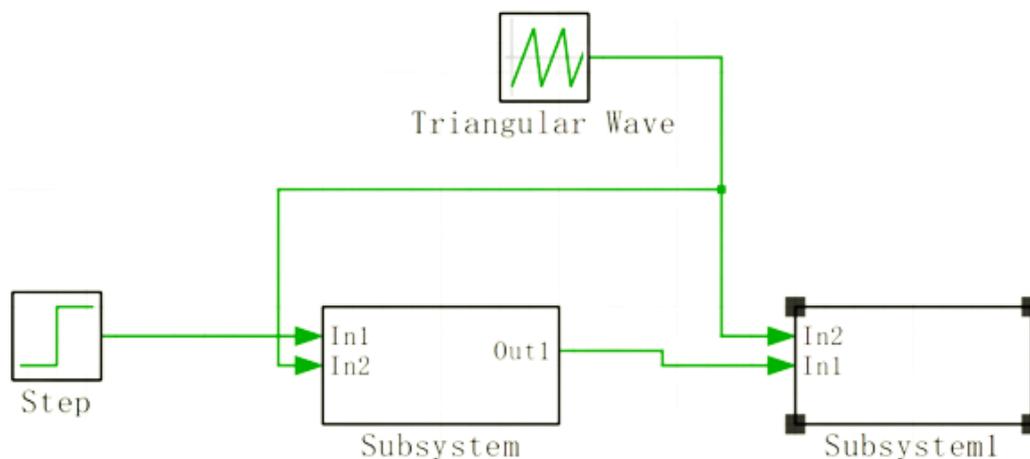
Finalmente, y con el fin de asegurar el correcto funcionamiento de todos los parámetros del circuito a la par que facilitar la elección de valores estándar para las resistencias, se escoge el valor de la resistencia  $R_6 = 10\text{k}\Omega$  y  $R_{\text{clamp}} = 2,2\text{k}\Omega$ .

## Capítulo 7. SIMULACIONES DEL MODELO

### DESARROLLADO

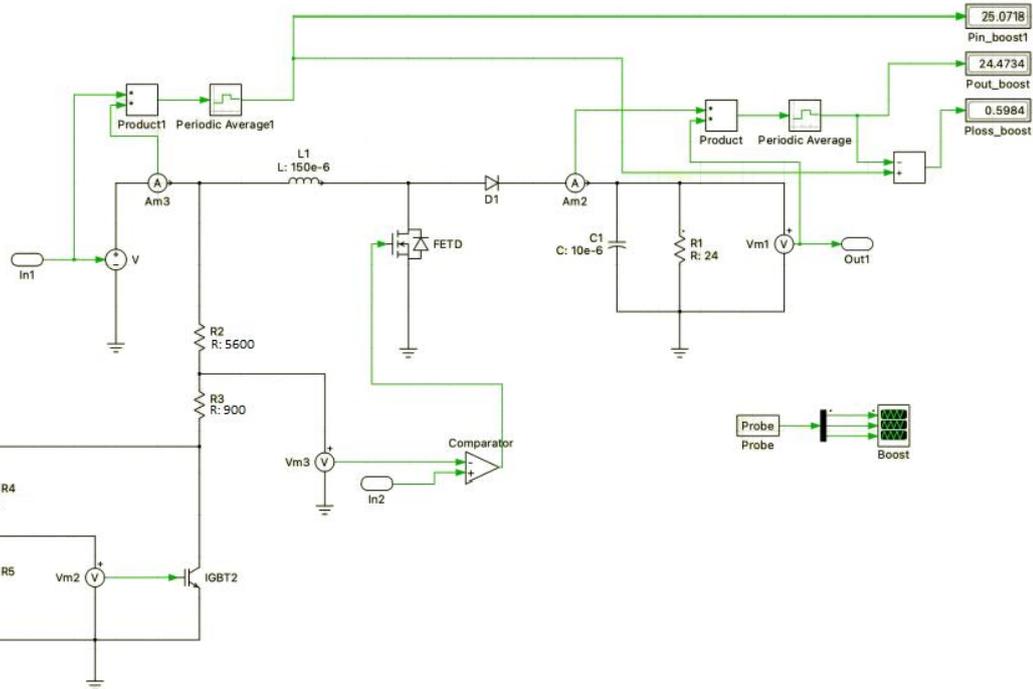
En este capítulo, analizaremos y comprobaremos los parámetros escogidos para los circuitos en el Capítulo 6. Para ello, se utilizará la herramienta PLECS, descrita en el Capítulo 5. A través de ella, se diseñarán ambos convertidores por separado y se comprobará que se cumplen las especificaciones de diseño.

Por otro lado, se puede observar la Figura 10, en ella se representa la unión de ambos convertidores, el convertidor elevador con el nombre Subsystem y el convertidor reductor nombrado Subsystem1.



*Figura 10. Diseño en PLECS del Convertidor Elevador - Reductor*

Se ha añadido una función Step para generar una función que variará de 6 a 12V, simulando de esta forma el rango de tensiones de entrada que tendrá el circuito.



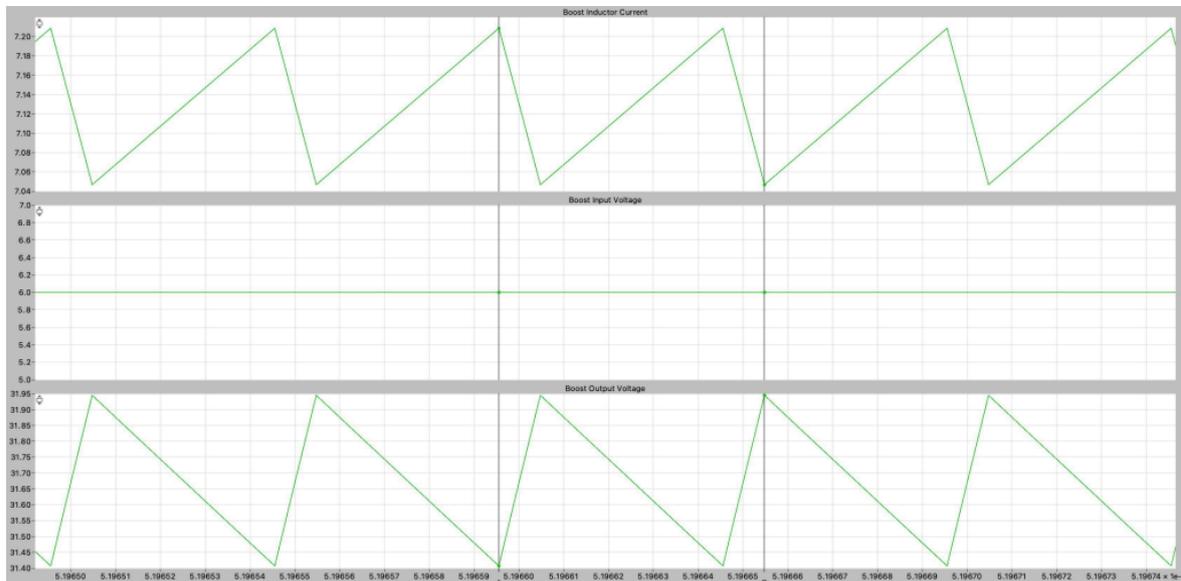
*Figura 11. Diseño en PLECS del Convertidor Elevador y su Control*

En la Figura 11 se puede observar en detalle el diseño del convertidor elevador junto con su control. Este diseño tiene la precisión y los detalles suficientes para realizar correctamente, en base a los criterios del proyecto, las simulaciones del modelo anteriormente desarrollado.

A través de este modelo realizaremos simulaciones para medir y comprobar que el modelo desarrollado sigue las especificaciones en los puntos más críticos.

### **7.1 PRIMER PUNTO CRÍTICO. $V_g = 6V$ Y $D = 0,75$**

Primero, simularemos el modelo para una tensión de entrada  $V_g = 6V$  y un ciclo de trabajo  $D = 0,75$ . Obtendremos simulaciones de la corriente que circula por la bobina en amperios, la tensión de entrada y la tensión de salida del convertidor en voltios, además de datos significativos de estas simulaciones.



*Figura 12. Simulaciones del Convertidor Elevador para  $V_g = 6V$  y  $D = 0,75$  (Superior: Boost Inductor Current, Central: Boost Input Voltage, Inferior: Boost Output Voltage)*

Para obtener datos de las simulaciones se han añadido dos cursores en puntos máximos y mínimos de las gráficas de la Figura 12 (representados en dicha figura como líneas grises). Dichos cursores proporcionan los datos mostrados a continuación en la Tabla 2 para cada una de las tres gráficas obtenidas de las simulaciones de la Figura 12.

Como aclaración, en la Tabla 2 se muestran los datos que proporcionan los cursores añadidos en la Figura 12. Estos cursores nos proporcionan datos sobre el tiempo, la corriente en la bobina, la tensión de entrada y la tensión de salida del convertidor elevador (mostrados en las filas de la Tabla 2). Cada cursor nos ofrece datos sobre el punto exacto en el que se encuentran posicionados (*Cursor 1* y *Cursor 2*), la diferencia entre ambos (*Delta*), el valor máximo (*Max*) y el valor medio (*Media*) (mostrados en las columnas de la Tabla 2).

	<i>Cursor 1</i>	<i>Cursor 2</i>	<i>Delta</i>	<i>Max</i>	<i>Media</i>
Tiempo	0,51966	0,519555	5,92e-06	-	-
Boost Inductor Current ( <i>gráfica superior</i> )	7,20867	7,04667	0,162	7,20867	7,12775
Boost Input Voltage ( <i>gráfica central</i> )	6	6	0	6	6
Boost Output Voltage ( <i>gráfica inferior</i> )	31,4071	31,9448	-0,537713	31,9448	31,676

*Tabla 2. Resultados de la Simulación del Convertidor Elevador para  $V_g = 6V$  y  $D = 0,75$*

Los datos de la Tabla 2 deben cumplir las especificaciones mencionadas en la sección 4.1.1 para las cuales hemos diseñado los parámetros del circuito.

### **7.1.1 TENSIÓN DE ENTRADA $6V < V_g < 12V$**

El valor de la tensión de entrada es un valor fijo en la simulación, siendo éste una tensión CC sin rizado cuyo valor es elegido previo a la simulación, como se puede ver en la Tabla 2, donde vemos que se mantiene un valor de 6V constante entre los dos cursores. Para analizar este primer punto crítico, se fijó la tensión de entrada en 6V.

La comprobación de dicho valor se encuentra en la Tabla 2, en la cual hay una fila que refleja el valor de la tensión de entrada en voltios. Se puede observar que el valor de dicha tensión se mantiene en  $V_g = 6V$ .

### 7.1.2 TENSIÓN DE SALIDA $V_{OUT,ELEVADOR} \geq 24V$

Si observamos la Figura 12 nos daremos cuenta de que, debido a la inclusión de componentes como condensadores y bobinas en nuestro diseño, la tensión de salida se ve afectada, dando lugar a una tensión de rizado en la misma. Dicha tensión de rizado se encuentra representada en la columna Delta de la Tabla 2 y será analizada en la siguiente sección.

Sin embargo, a pesar de la existencia de dicha tensión de rizado, la tensión de salida se mantiene en todo momento por encima del valor mínimo de 24V exigido en las especificaciones. Teniendo dicha tensión de salida un valor máximo de 31,9448V y un valor mínimo de 31,4071V, dando lugar a un valor medio de  $V_g = 31,676V$ .

### 7.1.3 RIZADO DE LA TENSIÓN DE SALIDA $\Delta V_{OUT,ELEVADOR} < 10\%$

A lo largo de este proyecto se empleará la Ecuación 19 como base para el cálculo de tensiones y corrientes de rizado, considerando el rizado como la componente alterna existente desde el punto máximo hasta el punto medio de una magnitud.

$$\text{Ecuación 19} \quad \Delta V_{OUT,ELEVADOR} = \frac{\Delta V_{out}}{V_{out}} * 100 = \frac{V_{out,Max} - V_{out,media}}{V_{out,media}} * 100$$

Por tanto, si incluimos los datos de la Tabla 2 en la Ecuación 19, obtenemos un rizado de la tensión de salida igual al 0,85%.

Dicho resultado es más de 10 veces menor del resultado máximo posible indicado en las especificaciones. Esto es debido a la precaución y las medidas que adoptamos en el Capítulo 6. Dando como resultado una tensión de rizado apropiada para habilitar y facilitar el trabajo de inclusión del convertidor reductor a este convertidor.

### 7.1.4 RIZADO DE LA CORRIENTE DE LA BOBINA $\Delta I_L < 10\%$

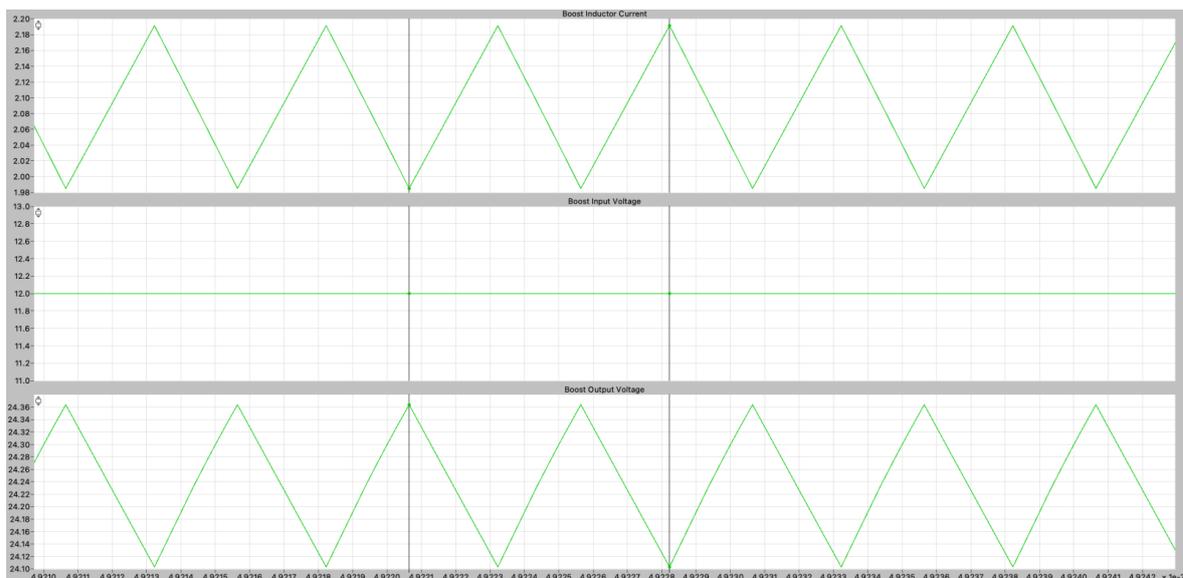
Siguiendo con lo establecido en la anterior sección, el rizado de la corriente de la bobina se medirá conforme a la Ecuación 20.

$$\text{Ecuación 20} \quad \Delta I_{L,ELEVADOR} = \frac{\Delta I_L}{I_L} * 100 = \frac{I_{L,Max} - I_{L,media}}{I_{L,media}} * 100$$

Por tanto, si incluimos los datos de la Tabla 2 en la Ecuación 20, obtenemos un rizado de la corriente de la bobina igual al 1,14%. Cumpliendo con creces el requisito establecido de estar por debajo del 10%, llegando a ser casi 10 veces menor que el valor máximo posible.

## 7.2 SEGUNDO PUNTO CRÍTICO. $V_G = 12V$ Y $D = 0,5$

Nuevamente, simularemos el modelo para una tensión de entrada  $V_g = 12V$  y un ciclo de trabajo  $D = 0,5$ . Obtendremos simulaciones de la corriente que circula por la bobina en amperios, la tensión de entrada y la tensión de salida del convertidor en voltios, además de datos significativos de estas simulaciones.



*Figura 13. Simulaciones del Convertidor Elevador para  $V_g = 12V$  y  $D = 0,5$  (Superior: Boost Inductor Current, Central: Boost Input Voltage, Inferior: Boost Output Voltage)*

Como ya se hizo en la sección 7.1, se han añadido dos cursores en puntos máximos y mínimos de las gráficas para reflejar los datos y cálculos mostrados a continuación en la Tabla 3 para cada una de las tres gráficas obtenidas de la simulación de la Figura 13.

Para desarrollar la Tabla 3 se ha seguido el mismo proceso descrito anteriormente en la sección 7.1.

	<i>Cursor 1</i>	<i>Cursor 2</i>	<i>Delta</i>	<i>Max</i>	<i>Media</i>
Tiempo	0,0492206	0,0492282	7,58e-06	-	-
Boost Inductor Current (gráfica superior)	1,98498	2,1914	-0,20642	2,1914	2,08829
Boost Input Voltage (gráfica central)	12	12	0	12	12
Boost Output Voltage (gráfica inferior)	24,3638	24,1031	0,260759	24,3638	24,2345

*Tabla 3. Resultados de la Simulación del Convertidor Elevador para  $V_g = 12V$  y  $D = 0,5$*

Los datos de la Tabla 3 deben cumplir las especificaciones mencionadas en la sección 4.1.1 para las cuales hemos diseñado los parámetros del circuito.

### 7.2.1 TENSIÓN DE ENTRADA $6V < V_g < 12V$

Como ya se vio en la anterior sección, el valor de la tensión de entrada es un valor fijo en la simulación, siendo éste una tensión CC sin rizado cuyo valor es elegido previo a la simulación, como se puede ver en la Figura 13. Para analizar este primer punto crítico, se fijó la tensión de entrada en 12V.

La comprobación de dicho valor se encuentra en la Tabla 3, en la cual hay una fila que refleja el valor de la tensión de entrada en voltios. Se puede observar que el valor de dicha tensión se mantiene en  $V_g = 12V$ .

### **7.2.2 TENSION DE SALIDA $V_{OUT,ELEVADOR} \geq 24V$**

Si observamos la Figura 13 nos daremos cuenta de que, debido a la inclusión de componentes como condensadores y bobinas en nuestro diseño, la tensión de salida se ve afectada, dando lugar a una tensión de rizado en la misma. Dicha tensión de rizado se encuentra representada en la columna Delta de la Tabla 3 y será analizada en la siguiente sección.

Sin embargo, a pesar de la existencia de dicha tensión de rizado, la tensión de salida se mantiene en todo momento por encima del valor mínimo de 24V exigido en las especificaciones. Teniendo dicha tensión de salida un valor máximo de 24,3638V y un valor mínimo de 24,1031V, dando lugar a un valor medio de  $V_g = 24,2345$ , cumpliendo así el tener una tensión de salida mayor de 24V en el punto crítico más desfavorable para nuestro circuito.

### **7.2.3 RIZADO DE LA TENSION DE SALIDA $\Delta V_{OUT,ELEVADOR} < 10\%$**

Continuando con la Ecuación 19, calculamos, incluyendo los datos de la Tabla 3, el rizado de la tensión de salida y el resultado es 0,53%.

Dicho resultado es casi 20 veces menor del resultado máximo posible indicado en las especificaciones. Esto es debido a la precaución y las medidas que adoptamos en el Capítulo 6. Dando como resultado una tensión de rizado apropiada para habilitar y facilitar el trabajo de inclusión del convertidor reductor a este convertidor.

### **7.2.4 RIZADO DE LA CORRIENTE DE LA BOBINA $\Delta I_L < 10\%$**

Siguiendo con lo establecido en la anterior sección, el rizado de la corriente de la bobina se medirá conforme a la Ecuación 20.

Por tanto, si incluimos los datos de la Tabla 3 en la Ecuación 20, obtenemos un rizado de la corriente de la bobina igual al 4,94%. Cumpliendo el requisito establecido de estar por debajo del 10%.

### **7.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN**

A la vista de los resultados analizados en las secciones anteriores se puede concluir que se ha asegurado el correcto funcionamiento del convertidor elevador mediante el análisis y la acertada elección de los componentes de dicho convertidor.

Cabe destacar que dichos resultados cumplen los requisitos previos con garantías, dejando margen para posibles errores y comportamientos anómalas del circuito real debidos a la inclusión del convertidor reductor en el convertidor elevador.

## Capítulo 8. PROCESO DE FABRICACIÓN

El siguiente paso es el diseño del circuito, por separado y en conjunto, en Altium Designer. Este capítulo del trabajo se dedicará a trabajar los esquemáticos y diseñar la PCB. Es necesario incluir los demás circuitos para que el convertidor funcione, es por ello, que cuento con la ayuda de mi compañero Fernando Martínez – Cattáneo, quien ha trabajado en el convertidor reductor y su control.

### 8.1 PLANO DE DISEÑO DE LA PLACA BASE

#### 8.1.1 CONVERTIDOR REDUCTOR

El convertidor reductor cuenta, al igual que el convertidor elevador, con una bobina y un condensador, además de dos interruptores semiconductores, que son un diodo y un transistor MOSFET (véase Figura 14).

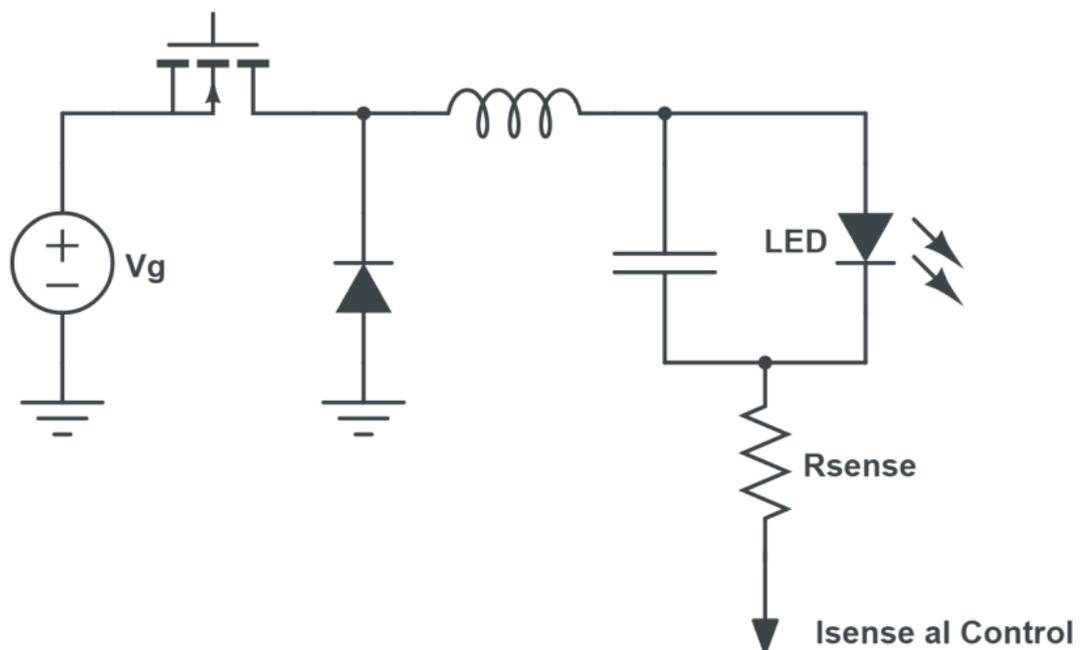


Figura 14. Convertidor Reductor con Conexión al Control

Además, como se ve en la Figura 14, el convertidor reductor se encuentra directamente conectado al LED, por lo que habrá que tener en cuenta las especificaciones del fichero del LED (ver Anexo I. Ficha de Datos del LED) a la hora de diseñar este circuito con el fin de asegurar su correcto funcionamiento.

Así mismo, en la Figura 14, se puede observar la conexión del convertidor reductor al control por medio de una resistencia *R<sub>sense</sub>*.

Para analizar el convertidor reductor, se consideran dos posibles estados del circuito dependiendo de si el interruptor (representado en la Figura 14 como un MOSFET) se encuentra cerrado o abierto.

- Si el interruptor se encuentra cerrado toda la corriente circula a través de la bobina, dividiéndose posteriormente entre el condensador (cargándolo por completo) y la carga.
- Por el contrario, es el condensador previamente cargado quien alimenta la carga, manteniendo así en todo momento la tensión de salida deseada.

Si realizamos un análisis de ambos estados, podremos obtener la ecuación por la que se rige el ciclo de trabajo en los convertidores elevadores (véase Ecuación 21).

$$\text{Ecuación 21} \quad D = \frac{V_O}{V_G} = \frac{I_G}{I_O}$$

En la Ecuación 21 se obtiene el valor del ciclo de trabajo necesario para obtener la intensidad de salida  $I_o$  deseada a través de la corriente de entrada al convertidor reductor  $I_G$ .

A través de la Ecuación 21 y los cálculos y valores de salida obtenidos del convertidor elevador, además de las especificaciones previamente detalladas en la sección 4.1.1, se ha obtenido los valores de los parámetros del circuito y se ha elegido los componentes.

Como condensador se ha escogido el valor **C = 0,1μF**.

Como inductor se ha escogido el valor **L = 200μH**.

Como diodo se ha escogido el **Diodo MBR1045**.

Finalmente, como MOSFET se ha escogido el **MOSFET IPP040N06N**.

### 8.1.2 CONTROLADOR DE CORRIENTE PROMEDIO DE LAZO CERRADO

Con el fin de que el convertidor reductor pueda cumplimentar su función de proporcionar la corriente de salida deseada para el rango de tensiones de entrada proporcionados, será necesario implementar un circuito de control que modifique el ciclo de trabajo del convertidor. Dicho circuito de control está representado en la Figura 15.

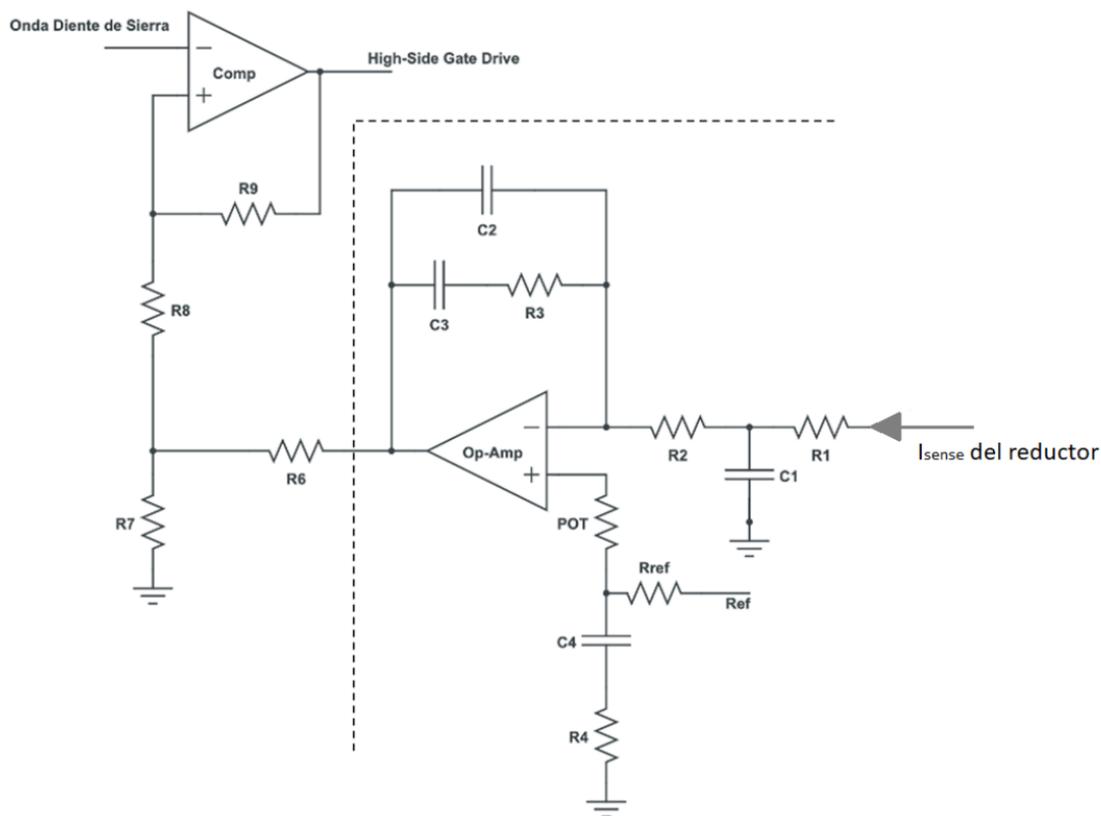


Figura 15. Circuito del Controlador de Corriente

Este controlador de corriente cumple la función de activar el convertidor reductor al cual se encuentra conectado, y mandarle la señal necesaria para modificar su ciclo de trabajo con el fin de mantener siempre la corriente de salida  $I_{\text{sense}}$  deseada.

La elección de un control proporcional integral (PI) para la realización del controlador de corriente se justifica por el hecho de que ofrece ciertas ventajas que el control proporcional (P), proporcional diferencial (PD) y proporcional integral – diferencial (PID) no ofrecen. Así mismo, las desventajas son despreciables.

Para empezar, la gran ventaja del control PI frente a los controles P y PD es la capacidad de anular el error de seguimiento para referencias y perturbaciones constantes, ventaja que los controles P y PD no pueden garantizar. Mediante la anulación de este error se asegura que se obtenga siempre la señal deseada.

La gran ventaja que posee frente al control PID es que el PI es más sencillo de elaborar. Por último, la desventaja del control PI es la velocidad de actuación, siendo el PI un control lento. Sin embargo, durante el diseño se compensará este pequeño defecto.

En conclusión, el control PI es el mejor para este proyecto por sus múltiples beneficios y sus pocos inconvenientes. Por lo que se elegirán los componentes adecuados para asegurar el correcto funcionamiento del circuito en base a un controlador de corriente PI (véase Figura 15).

Tras realizar un estudio sobre el controlador y analizar las funciones que ha de completar se han determinado los valores de este circuito controlador.

$$R_1 = R_{ref} = 330 \Omega \quad R_2 = 5,1 \text{ k}\Omega \quad R_3 = R_4 = 51 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 10 \text{ nF} \quad C_2 = 1 \text{ pF} \quad C_3 = C_4 = 0,1 \text{ nF}$$

### 8.1.3 CIRCUITO TEMPORIZADOR

Se va a trabajar con un circuito temporizador el cual generará la onda de dientes de sierra que se empleará para alimentar los circuitos controladores a lo largo del proyecto (véase Figura 16).

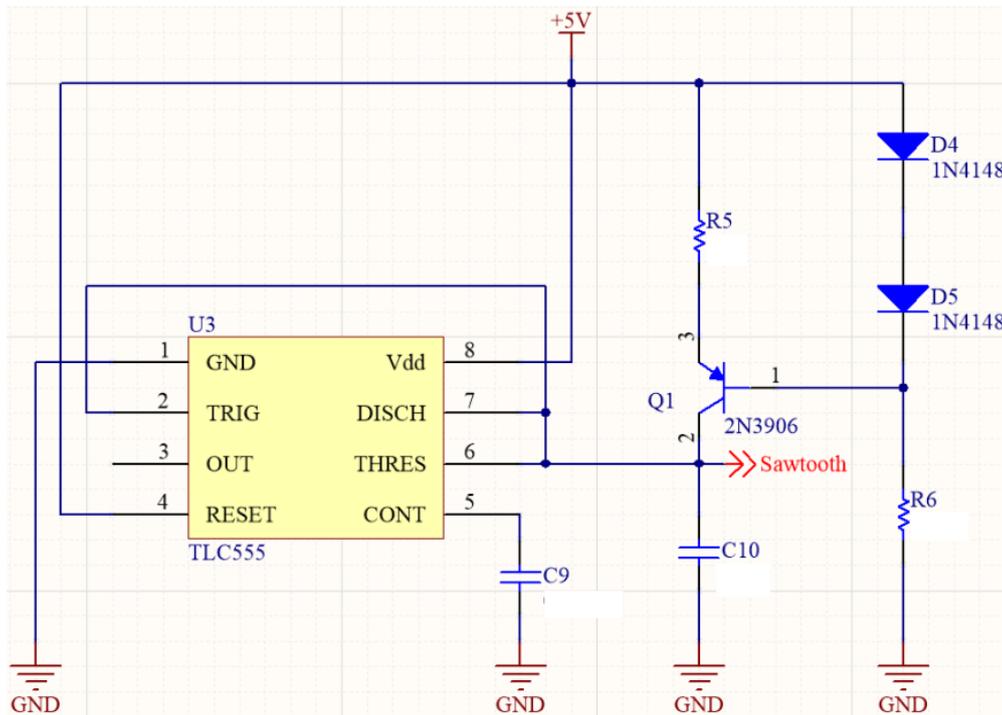


Figura 16. Diseño del Circuito Temporizador

Para el diseño del circuito temporizador se asume que la corriente que circula por el transistor  $I_3$  es aproximadamente igual a la de su salida  $I_2$ , dando lugar a la Ecuación 22.

$$\text{Ecuación 22 } I_C \approx I_E = \frac{V_{CC} - V_E}{R_5} = \frac{0,6}{R_5}$$

La fórmula de la frecuencia viene dada por la Ecuación 23.

$$\text{Ecuación 23 } f = \frac{I_C}{C_{10} V_{p-p}}$$

Con la ayuda de estas ecuaciones se diseña el circuito temporizador teniendo en cuenta especificaciones impuestas:

Se escoge un valor para  $R_5 = 300 \Omega$ . De esta forma, se obtiene un valor para  $C_{10} = 3,33 \text{ nF}$ .

Una vez obtenidos estos valores, se diseña para unos valores estándar de  $R_6 = 2 \text{ k}\Omega$  y  $C_9 = 10 \mu\text{F}$ .

### 8.1.4 CIRCUITO AMORTIGUADOR RC

La salida del convertidor elevador trae consigo mucha oscilación en la señal de tensión. En gran parte, esto es debido a la tensión de rizado y a las inductancias y capacitancias de los componentes semiconductores. La razón para diseñar un amortiguador RC es el deseo de atenuar esta oscilación (véase la Figura 17).

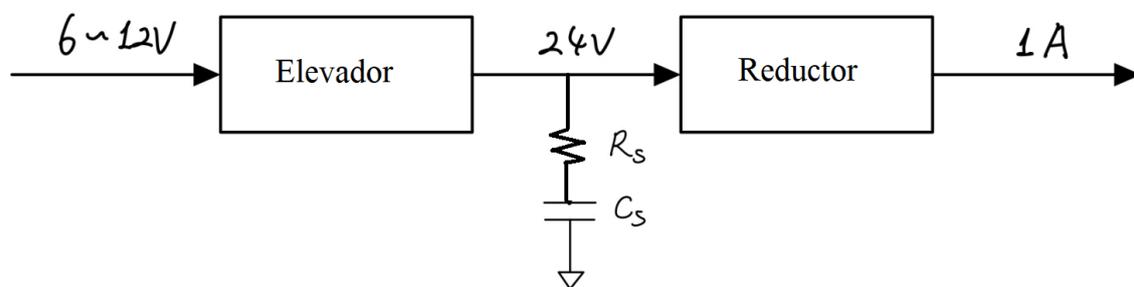


Figura 17. Diseño del Amortiguador RC

Para empezar, se simula la conexión de ambos convertidores y se observa que la frecuencia de oscilación se encuentra en el orden de los MHz. Por lo que se diseñará el amortiguador RC en consecuencia.

Primero, se escoge el valor del condensador  $C_s = 100 \mu\text{F}$ , ya que este valor es 10 veces mayor que el valor del condensador del convertidor elevador, gracias a lo cual se espera una amortiguación de las oscilaciones a la mitad.

A continuación, se calculará la parte real de la impedancia total. Se obtiene una impedancia del convertidor reductor de aproximadamente  $10 \Omega$ , por lo que una resistencia  $R_s = 1 \Omega$  será el valor escogido para el diseño.

### 8.1.5 COMPONENTES DE LA PLACA

El diseño de la placa base es un proceso largo y minucioso, se debe estudiar con detalle el diseño de la placa antes del encargo de ésta. La placa debe ser lo más perfecta posible para

evitarnos posible errores y complicaciones futuras que puedan desencadenar un cúmulo de fallos que imposibiliten trabajar con nuestra PCB.

Es por ello por lo que antes de encargarla, se han de tener en cuenta múltiples factores como el posicionamiento de los diferentes circuitos para tratar de asegurar el menor número de cruces y jumpers entre trazas, el ancho de las trazas o el tipo de componentes que se van a utilizar.

#### ***8.1.5.1 Posicionamiento, Cruces y Jumpers***

Lo primero que se ha de tener en cuenta es que uno de los requisitos de esta placa es que tanto los circuitos como las conexiones deben encontrarse en la parte superior de la placa, es decir, la parte inferior de la placa queda deshabilitada. Esta condición sumada a la especificación de la sección 4.1.1 por la cual se limita el tamaño de la placa base a 60 pulgadas cuadradas, hace que el posicionamiento de los circuitos tenga especial importancia. Además del deseo de minimizar los cruces entre trazas y el uso de jumpers para esquivar dichos cruces (véase la Ilustración 2 para tener una imagen del final deseado).

A la hora de realizar el posicionamiento de los circuitos en la PCB tenemos en cuenta los siguientes puntos, en orden de prioridad:

1. Es conveniente que ambos circuitos controladores se encuentren cerca del circuito temporizador, pues éste está conectado a ambos.
2. Es conveniente que cada circuito controlador se halle lo más cerca posible de su circuito convertidor correspondiente.
3. Es conveniente que haya el menor número de cruces entre trazas.
4. Es conveniente que ambos circuitos convertidores se encuentren lo más cerca posible de los bordes de la placa, para facilitar su conexionado a las diferentes máquinas de alimentación y medición.

Si se desea se puede ver el resultado final en la Ilustración 2.

### ***8.1.5.2 Ancho de las Trazas***

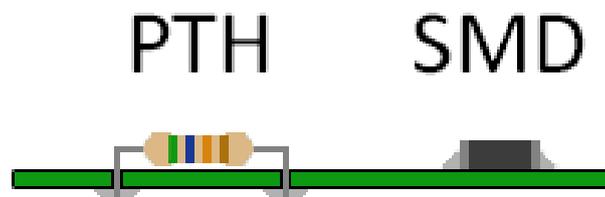
El ancho de la traza es un factor crucial a la hora de diseñar una PCB, se le debe asignar el ancho conveniente a cada traza para evitar que las altas temperaturas las dañen y provoquen un funcionamiento incorrecto del circuito.

La corriente que circula a través de las trazas eleva su temperatura, ésta es la razón por la cual se diseñará el ancho de traza para el máximo de carga, garantizando el buen funcionamiento y evitando que las altas temperaturas quemen el rastro o destruyan el laminado de la PCB.

Existen múltiples formas de calcular el ancho de traza necesario. Yo utilicé la calculadora de ancho de trazas de PCB perteneciente a Advanced Circuits, ya que también empleamos sus programas y recursos para desarrollar la PCB (véase [16]).

### ***8.1.5.3 Elección del Tipo de Componentes***

Se cuenta con dos opciones a la hora de elegir el tipo de componente con el que se va a trabajar. La primera de ellas, los componentes THT o Through – Hole Technology, traducido al español como tecnología de agujero pasante, también llamados PTH o Plated – Through Holes. Para implementar estos componentes es necesario crear agujeros en la placa a través de los cuales se colocan los componentes. La segunda opción son los componentes SMD o Surface – Mount Device, traducido al español como dispositivo de montaje en superficie. Dichos componentes, como su propio nombre indica, pueden ser montados sobre la propia superficie de la placa (véase Ilustración 1).



*Ilustración 1. Representación de los componentes SMD y PTH [17]*

Cada tipo de componente cuenta con ventajas y desventajas. Respecto a los componentes THT, se sabe que estos componentes tienen una mayor tolerancia al calor, por lo que, al contrario que los SMD, no llegan a dañarse y fallar tan fácilmente si son expuestos a altas temperaturas durante un largo periodo de tiempo. Sin embargo, en este trabajo no se necesitará trabajar a excesivamente altas temperaturas ni durante largos periodos de tiempo.

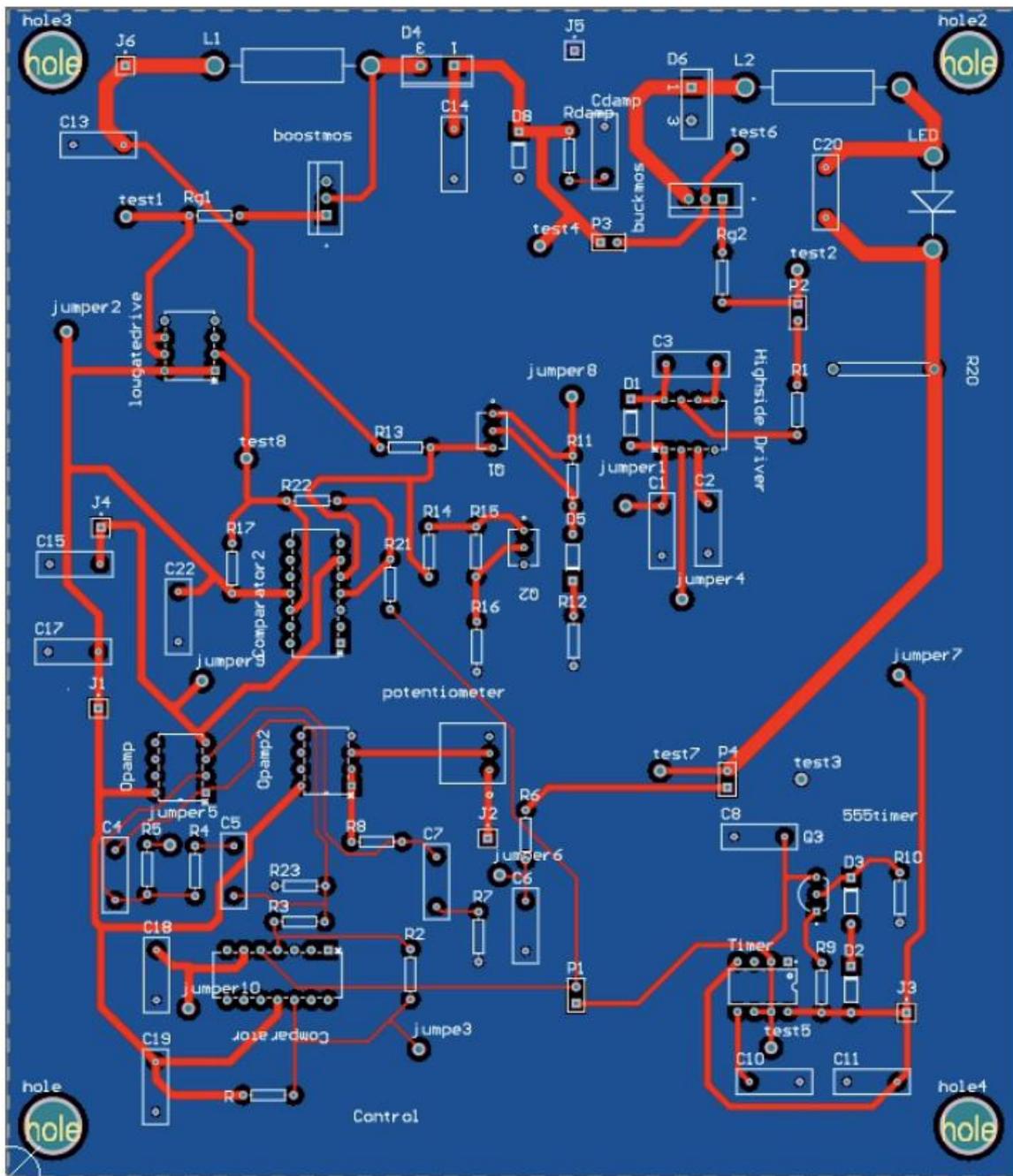
La gran ventaja de los componentes SMD, razón por la cual están poco a poco reemplazando a los componentes THT, es su facilidad para la producción en masa. Debido a su reducido tamaño, su bajo consumo energético y su reducido coste a la hora de realizar una producción masiva. Véase el Anexo VI. BOM para comprobar los costes de la producción de cada una de las placas dependiendo de los componentes elegidos. Estos costes se analizarán más en detalle en el Capítulo 10.

Tras analizar los costes se observa que, a pesar de que los componentes SMD abaratan la producción en masa, el coste de realizar una sola placa resulta menor con componentes THT.

Sin embargo, el principal motivo por el cual se decide realizar la placa con componentes **THT** es que estos componentes son más fáciles de testear y soldar manualmente, empleando para este fin la parte inferior, la cual se eligió previamente dejar libre de circuitos.

### **8.1.6 DISEÑO FINAL**

Una vez se ha elegido el posicionamiento de cada uno de los circuitos minimizando así los cruces y jumpers, calculado el ancho de las trazas de la PCB y elegido el tipo de componentes, se procede a realizar el modelo final ayudándonos de Altium Designer. Véase el resultado en la Figura 18.

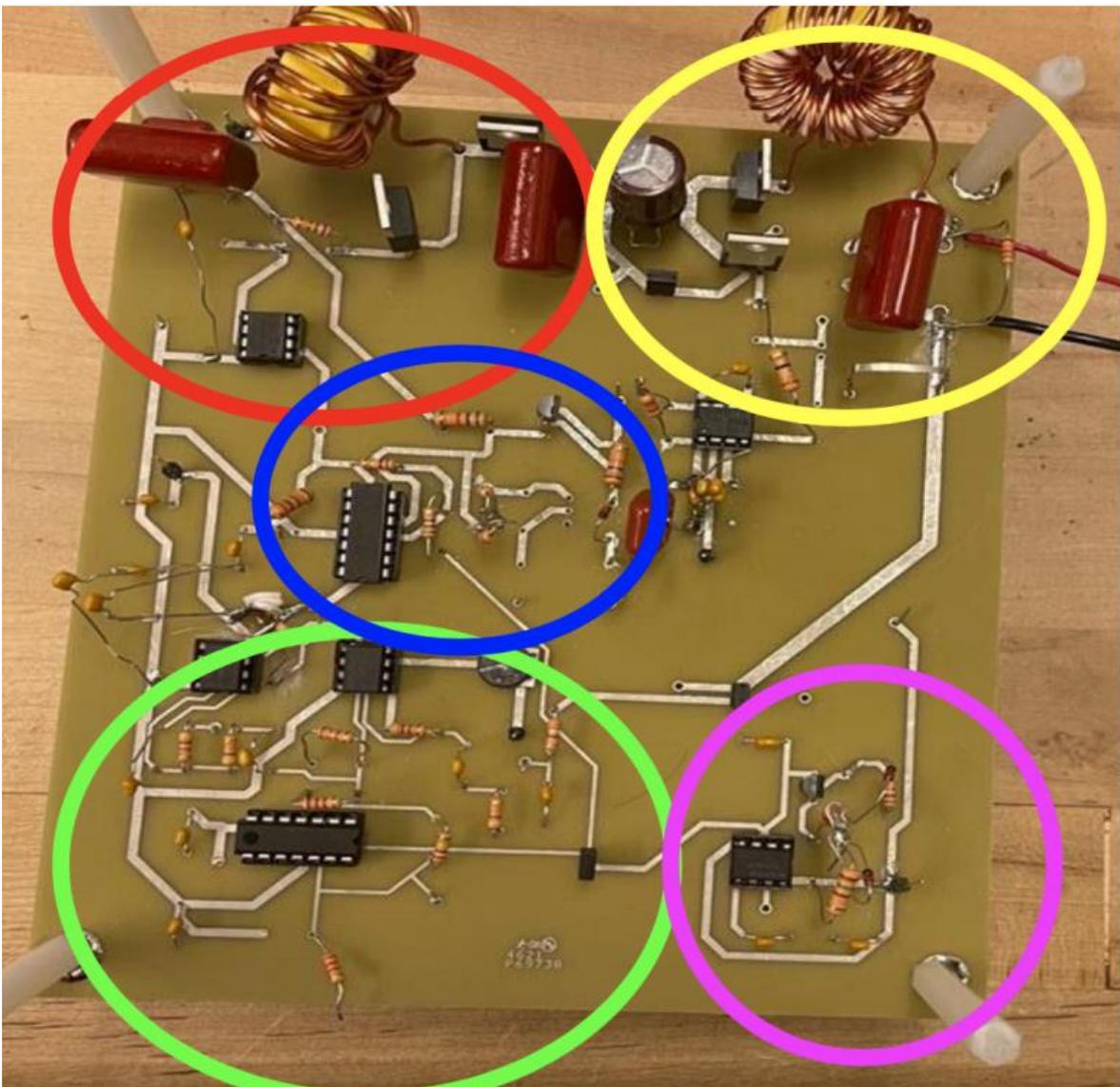


*Figura 18. Modelo en Altium de la PCB*

Esta es la placa que se manda fabricar. Por último, con el fin de poder regular la atenuación del LED en un rango entre el 10 y el 100%, se ha implementado un operacional adicional junto con un potenciómetro. Este cambio se refleja en el Anexo V. Esquemáticos del Convertidor.

## 8.2 PROCESO DE MONTAJE

Una vez se reciben todos los componentes, se ensamblan sobre la placa y se realizan pruebas sobre cada circuito individualmente con el fin de asegurar su correcto funcionamiento. Dichas medidas y gráficas se muestran en el Capítulo 9. La placa ensamblada y lista para funcionar se muestra en la siguiente imagen (véase Ilustración 2).



*Ilustración 2. PCB ensamblada (Rojo: Convertidor Elevador, Amarillo: Convertidor Reductor, Azul: Controlador Feedforward, Verde: Controlador de Corriente, Rosa: Circuito Temporizador)*

Como aclaración, en rojo se muestra el circuito del convertidor elevador. A su lado se encuentra el control feedforward, en azul. En amarillo, se muestra el circuito del convertidor reductor. En verde se muestra el controlador de corriente de lazo cerrado asociado al convertidor reductor. Y junto a ambos circuitos controladores, en rosa se muestra el circuito temporizador.

## Capítulo 9. FASE EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

### 9.1 CIRCUITO TEMPORIZADOR

En primer lugar, se comprueba el correcto funcionamiento del circuito temporizador. Este circuito es importante pues genera la onda dientes de sierra, llamada así por la forma que tiene (ver Figura 19).

Este circuito es alimentado con una señal de 5V, la siguiente figura representa la señal de salida del mismo.

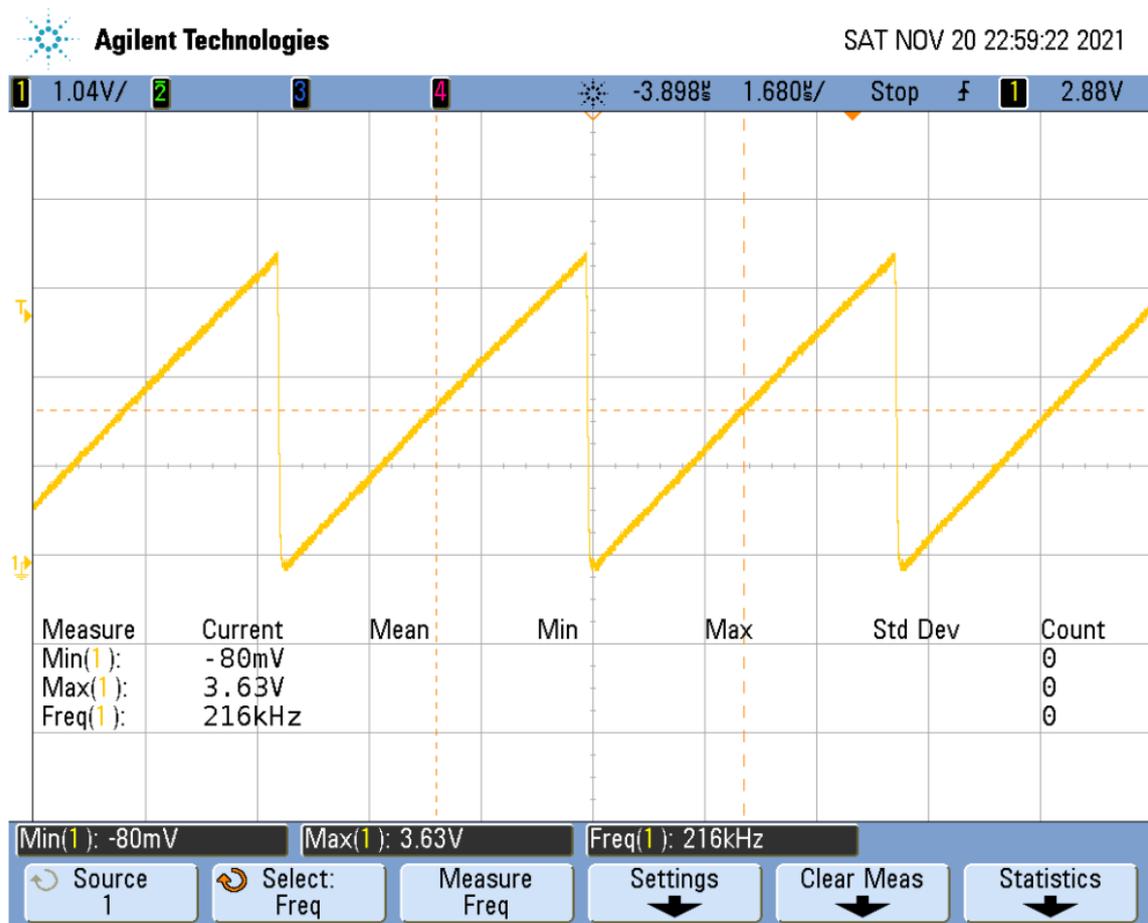


Figura 19. Salida del Circuito Temporizador

Como se puede observar en la Figura 19, se obtiene una señal de dientes de sierra con un valor de tensión pico - pico de 3,55V. Así mismo, se puede ver que la frecuencia obtenida es de 216kHz, siendo esta mayor que 200kHz. De esta forma, se comprueba que se obtiene un resultado en base a los valores para los cuales se había diseñado, cumpliendo todas las especificaciones impuestas en la sección 4.1.1.

Una vez asegurado el buen funcionamiento del circuito temporizador se procede a probar, de manera independiente, los circuitos convertidores.

## **9.2 CONVERTIDOR ELEVADOR**

La primera prueba que se va a realizar es la del convertidor elevador aislado, es decir, sin su control asociado. Para ello, es necesario introducir una señal artificial para activar el MOSFET. Esta señal será una PWM o Pulse Width Modulation, modulación por ancho de pulso en español, con un ciclo de trabajo de 0,5. Además, se introduce una tensión de entrada de 12V.

Sin embargo, al estudiar el convertidor elevador aislado es necesario conectar una carga a la salida de dicho convertidor para poder realizar la prueba y tomar medidas. Finalmente, se observa que la salida es superior a los 24V requeridos por las especificaciones.

El siguiente paso consiste en desacoplar la señal PWM e instalar el control feedforward en su lugar. Los cambios que hay tener en cuenta en este proceso son alimentar la placa con  $\pm 15V$  para hacer funcionar los operacionales y conectar la salida del circuito temporizador al comparador. Se procede a comprobar el funcionamiento del subcircuito elevador.

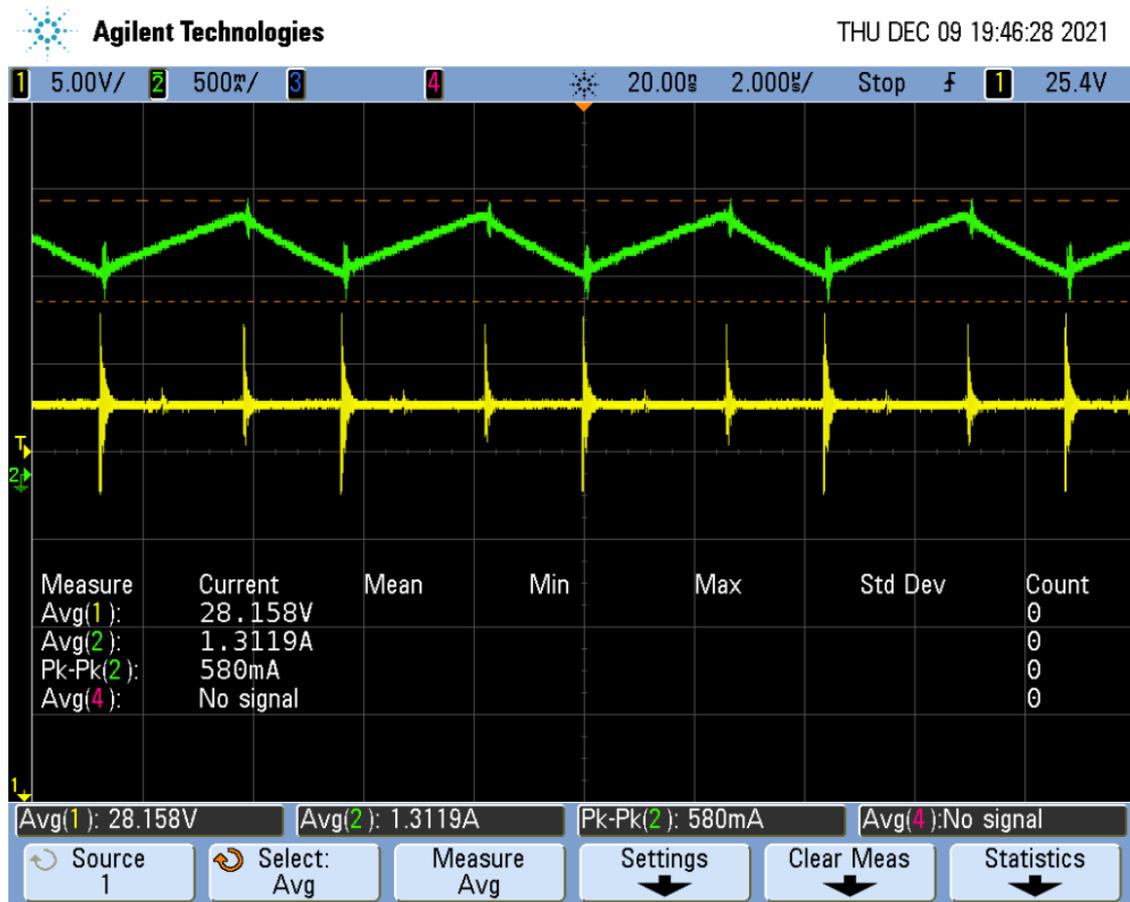


Figura 20. Prueba independiente del Elevador (Verde:  $I_{ind}$  (A), Amarillo:  $V_{out,boost}$  (V))

En la Figura 20 se muestran los resultados. El objetivo de las primeras secciones de este capítulo es justificar la correcta elección de los componentes midiendo las tensiones e intensidades de salida, las tensiones de rizado se calcularán más adelante con el circuito completamente montado.

En este caso, se puede observar que la tensión de salida es 28,158V, siendo mayor de los 24V especificados y permitiendo conectar el subcircuito reductor.

### 9.3 CONVERTIDOR REDUCTOR

Nuevamente, se repite el mismo proceso realizado para el convertidor elevador ahora en el reductor. Para ello, se prueba en primer lugar el convertidor reductor aislado, añadiendo una

señal PWM y una carga simulada a la salida como se comentó en la sección 9.2. Así mismo, se le añade una tensión de entrada de 26V. Se mide la corriente que circula a través de la bobina. Al resultar positiva esta prueba y otorgar los resultados esperados, se procede a conectar el controlador de corriente, sustituyendo la señal PWM. En la Figura 21 se muestran los resultados.

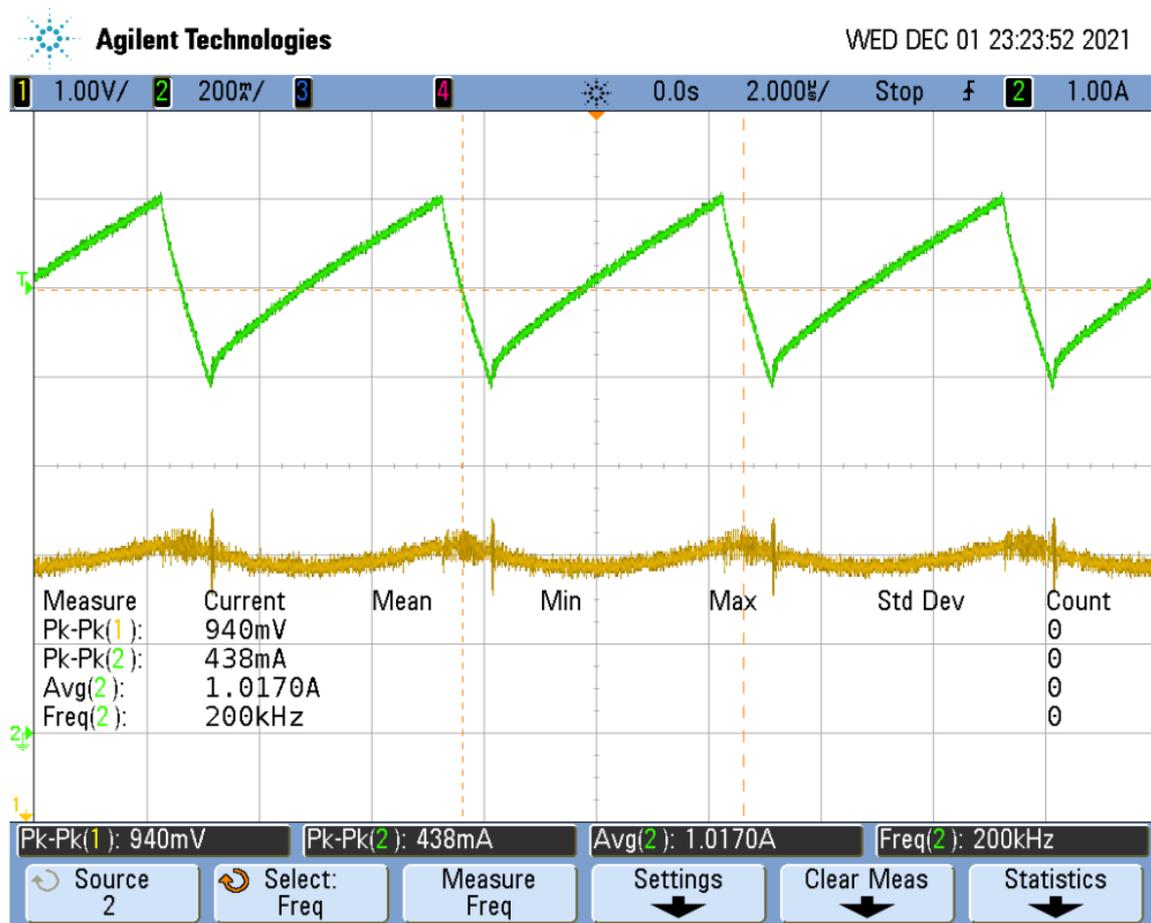


Figura 21. Prueba independiente del Reductor (Verde:  $I_{ind}$  (A), Amarillo: Canal del Osciloscopio desconectado)

Como se puede observar, la corriente que circula a través de la bobina es de 1,017A. Este valor es aceptable ya que es aproximadamente igual al valor especificado de 1A. Cabe destacar que aún no se ha conectado el controlador de corriente, el cual estabilizará los resultados. Por lo tanto, se concluye que el subcircuito reductor funciona según lo establecido.

## 9.4 PCB EN FUNCIONAMIENTO

En esta sección se analizan los resultados finales del proyecto. Para ello, se ensamblarán todos los subcircuitos, conectando el circuito elevador al reductor mediante el amortiguador RC formando el convertidor CC – CC, y se conectará el circuito completo por primera vez al LED para comprobar su funcionamiento.

Por consiguiente, las únicas conexiones externas que se mantienen en el circuito son la conexión a la fuente de tensión variable 6 - 12V, para la tensión de entrada al circuito, y las conexiones para alimentar los componentes.

### 9.4.1 TENSIÓN DE ENTRADA DEL ELEVADOR

A continuación, se realiza una comprobación del correcto funcionamiento de la tensión de entrada del elevador. Al observar la Figura 22, se aprecia que la fuente no es perfecta, por lo que se anota el valor de la tensión de rizado de la misma.

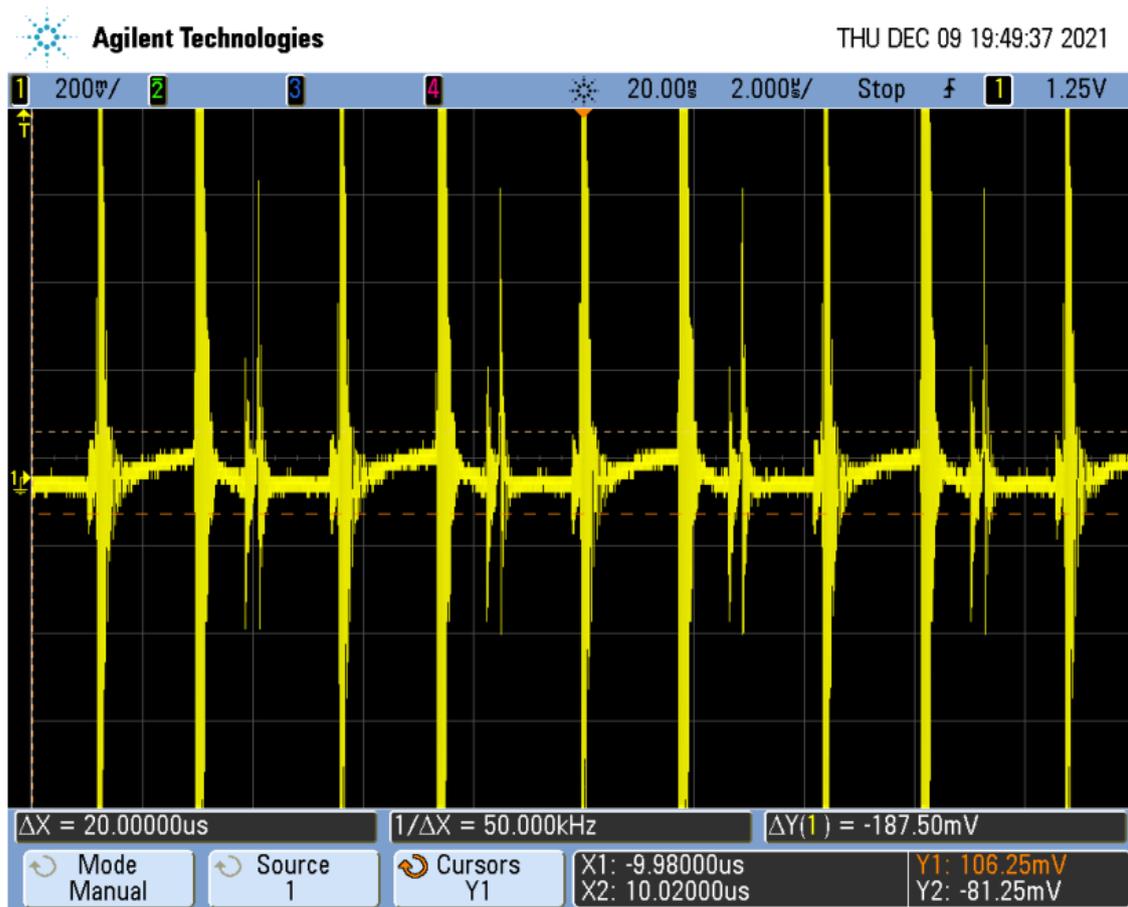
Por otro lado, se decide implementar una serie de condensadores de derivación en la entrada, eliminando las componentes armónicas de la misma. De esta forma, se consigue una señal continua sin perturbaciones.



Figura 22. Tensión de Entrada del Elevador ( $I_{zq}$ :  $V_{in} = 6,83V$ ,  $D_{cha}$ :  $V_{in} = 13,0 V$ )

## 9.4.2 RESULTADOS DEL ELEVADOR

En el circuito elevador, se quiere analizar tanto la tensión de salida como su rizado, teniendo en cuenta que no se sobrepasen los límites de corriente en la bobina ni su rizado. Se realiza una primera medición de la tensión de salida (véase la Figura 23).



*Figura 23. Vout del elevador a 12V*

Se quiere obtener valores para las tensiones límite de entrada. Además, se procede a eliminar el ruido de esta señal para medir los valores con más claridad y seguridad. Se obtiene la Figura 24.

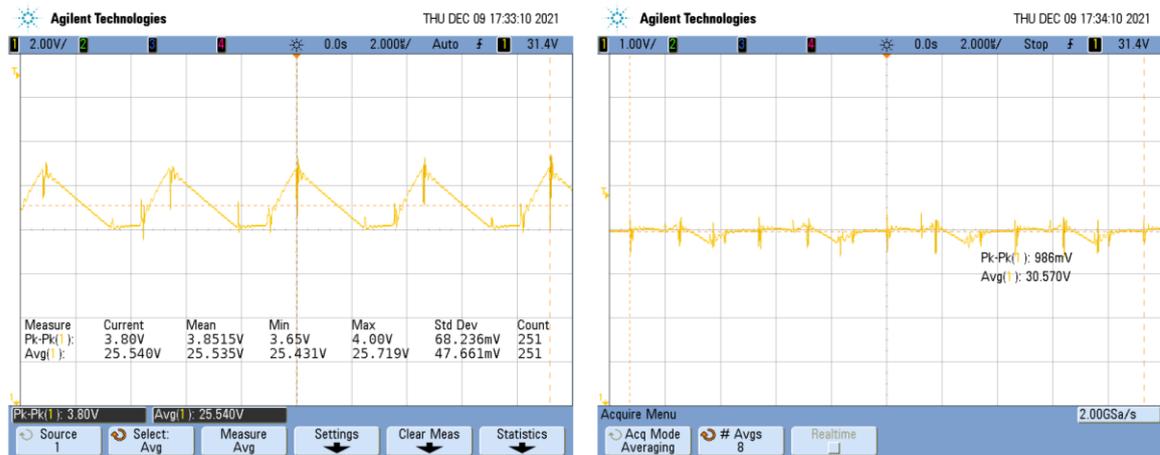


Figura 24. Tensión de salida del Elevador (Izq:  $V_{in} = 6V$ , Dcha:  $V_{in} = 12V$ )

De la Figura 24 se extraen lo siguientes datos acerca del convertidor elevador:

- Tensión de entrada 6V:
  - Tensión de salida = 25,535V
  - Tensión de rizado = 1,926V (7,54%)
- Tensión de entrada 12V:
  - Tensión de salida = 30,570V
  - Tensión de rizado = 0,493V (1,61%)

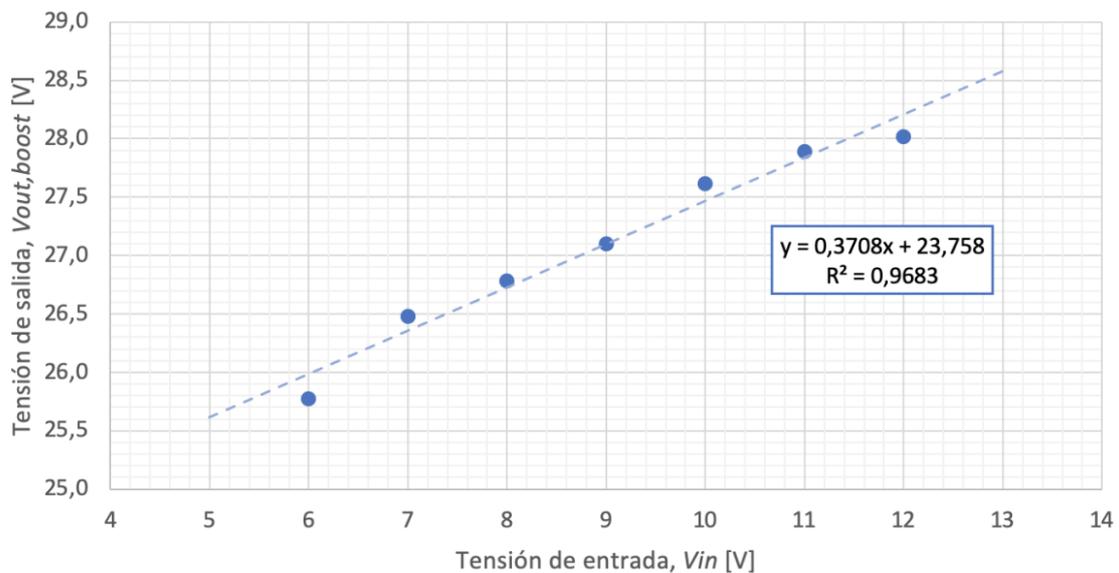
De estos datos se puede concluir que el convertidor elevador cumple con las especificaciones de diseño. Se tiene una tensión que oscila entre 25,5 y 31V, por lo que siempre se encuentra por encima de los 24V, y la tensión de rizado se mantiene siempre por debajo del 10% hasta en el caso más desfavorable.

A continuación, se pretende analizar la variación de la tensión de salida del convertidor elevador, medida con un voltímetro, para el rango de valores la tensión de entrada 6 – 12V. Los datos se recogen en la Tabla 4, mientras que en la Figura 25 se muestra una gráfica del comportamiento de la tensión de salida en base a la tensión de entrada.

$V_{in} [V]$	$V_{out,boost} [V]$
6	25,773
7	26,482
8	26,783
9	27,102
10	27,617
11	27,890
12	28,017

*Tabla 4. Tensión de Salida del Convertidor Elevador*

**Salida del convertidor Boost frente a tensión de entrada**



*Figura 25. Tensión de Salida del Convertidor Elevador frente a tensión de entrada*

Como se mencionaba al comienzo de esta sección, también se medirá y asegurará que la corriente que circula a través de la bobina sea la adecuada (véase Figura 26).

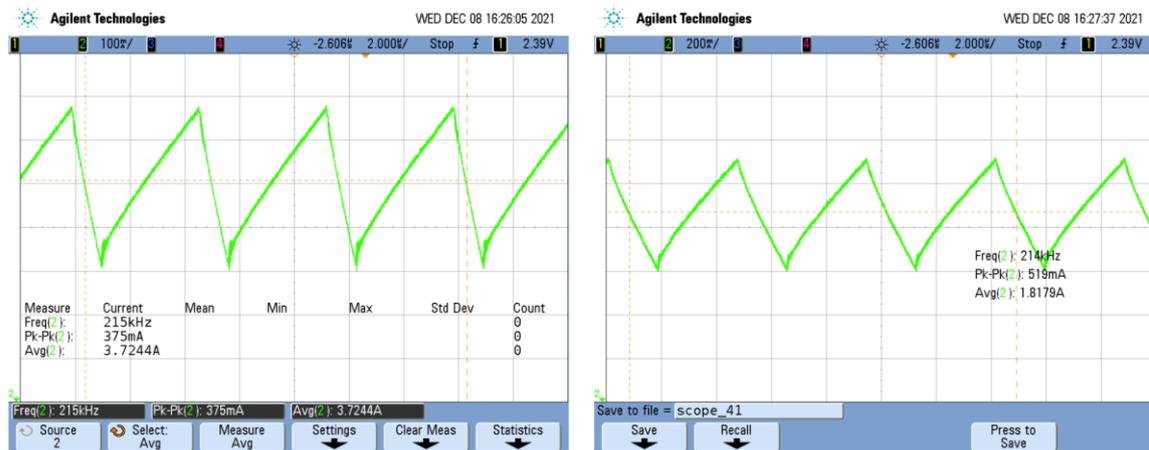


Figura 26. Corriente a través de la bobina del elevador ( $I_{zq}$ :  $V_{in} = 6V$ ,  $D_{cha}$ :  $V_{in} = 12V$ )

En la Figura 26 se puede observar la gran variación de corriente que hay dependiendo de la tensión de entrada aplicada, siendo el máximo aproximadamente 3,7A. Es importante comprobar la corriente que circula en la bobina puesto que una gran cantidad de amperios provocará una subida en la temperatura, lo cual implica un menor rendimiento del circuito.

Por otro lado, en la Figura 26 se puede observar que la frecuencia se mantiene siempre por encima de los 200kHz especificados.

Cabe resaltar que, aunque esta parte del circuito completo es la diseñada en este Trabajo de Fin de Grado, no funcionaría correctamente sin la parte complementaria diseñada por mi compañero, cuyos resultados se analizan más adelante.

### 9.4.3 RESULTADOS DEL REDUCTOR

En el caso del convertidor reductor, el parámetro que se debe estudiar es la corriente que circula a través del LED y su rizado. Como resultado de este estudio se obtiene la Figura 27.

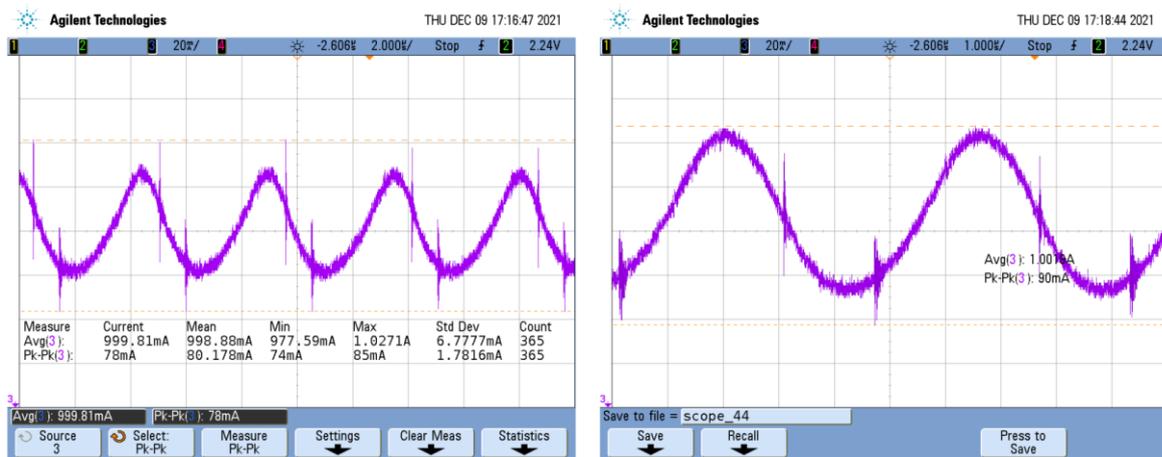


Figura 27. Corriente a través del LED ( $I_{zq}$ :  $V_{in} = 6V$ ,  $D_{cha}$ :  $V_{in} = 12V$ )

De la Figura 27 se extraen los siguientes datos acerca del convertidor reductor:

- Tensión de entrada 6V:
  - Intensidad en el LED = 1,000A
  - Intensidad de rizado = 0,039A (3,90%)
- Tensión de entrada 12V:
  - Intensidad en el LED = 1,002A
  - Intensidad de rizado = 0,045A (4,49%)

Analizando los resultados obtenidos, se observa que se cumplen las especificaciones de la sección 4.1.1. Esto se debe a que la corriente que circula a través del LED se mantiene entorno a 1A y el rizado de ésta no supera el 5% en ningún caso posible.

#### 9.4.4 EFICIENCIA

En esta sección se estudiará la totalidad del circuito, mostrando cálculos y medidas relacionados con el convertidor de potencia.

Para comprobar la eficacia del convertidor, se estudiará para el rango completo de funcionamiento, es decir, desde 6V hasta 12V de tensión de entrada. Se tomarán medidas de la tensión y la corriente tanto a la entrada como a la salida del circuito. De este modo, se

calculará la potencia como  $P = VI$ . Y, por tanto, la eficiencia seguirá lo establecido en la Ecuación 24.

$$\text{Ecuación 24} \quad \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out}I_{out}}{V_{in}I_{in}}$$

Cabe remarcar la forma en la que tomaremos las cuatro medidas:

- La corriente de entrada se medirá con un amperímetro en serie con la bobina.
- La tensión de entrada se asume la que ofrece la fuente.
- La corriente de salida se medirá con un amperímetro en serie con el LED.
- La tensión de salida se mide con un voltímetro en paralelo al LED.

Se ha escogido realizar las medidas con polímetro puesto que ofrecen una precisión mucho mayor a la hora de tomar medidas que la que ofrece tomar la medida con osciloscopio. Sin embargo, en la Figura 28 se recoge una muestra de las señales de salida medidas con osciloscopio.

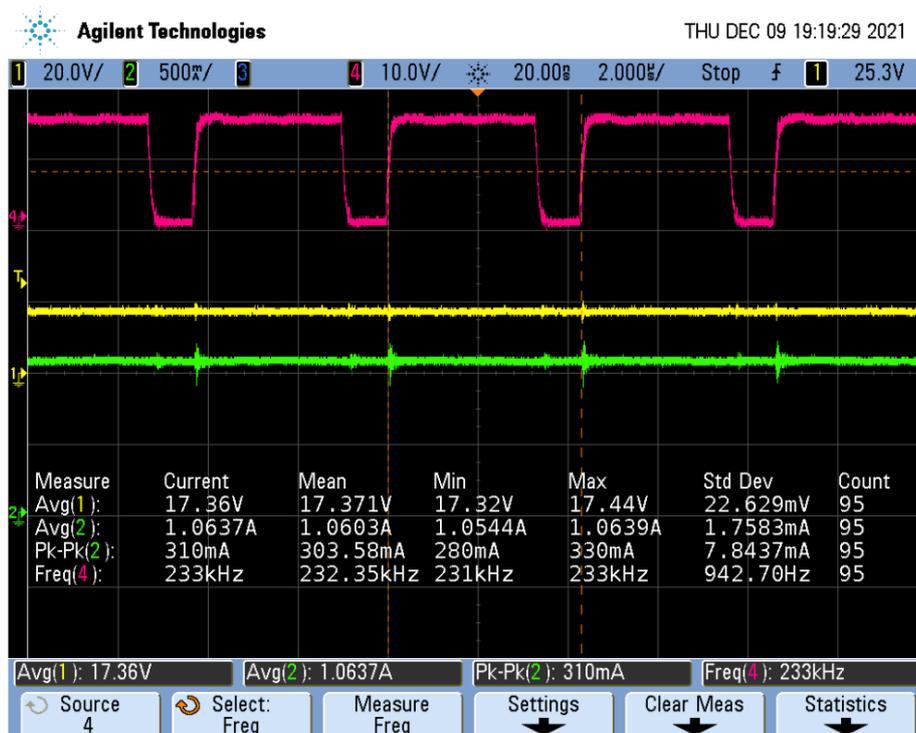


Figura 28. Señales de Salida a 12V (Amarillo: Vled, Verde: Iled, Rojo: PWM)

Posteriormente, se realiza un barrido para recopilar los datos necesarios para el cálculo de la eficiencia, dichos datos se incluyen en la Tabla 5.

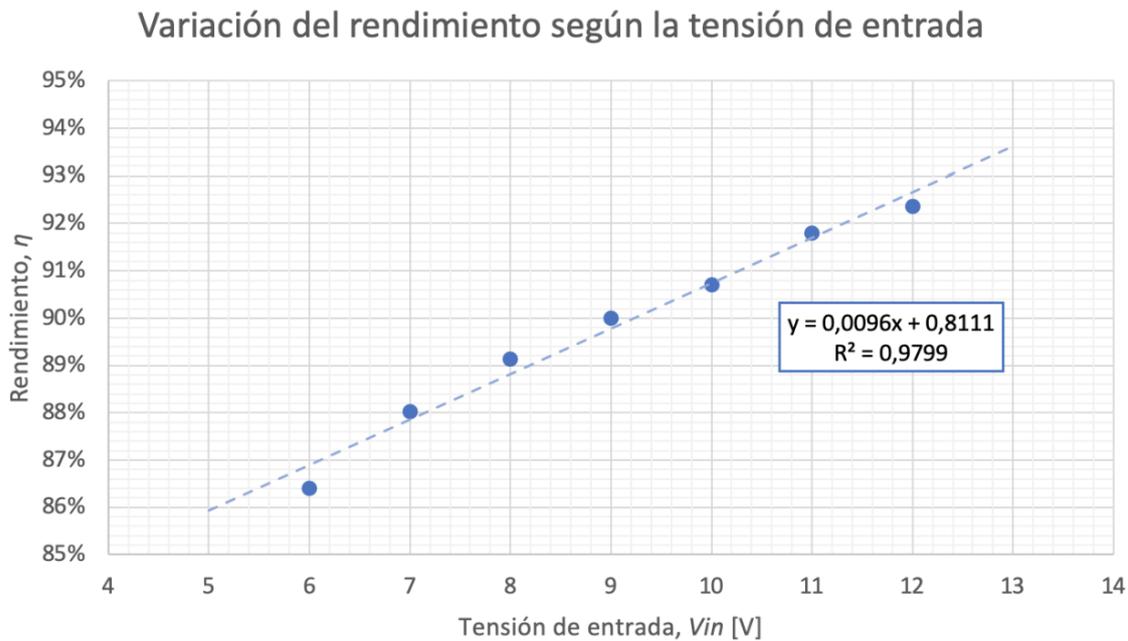
$V_{in}$ [V]	$I_{in}$ [A]	$P_{in}$ [W]	$V_{out}$ [V]	$I_{out}$ [A]	$P_{out}$ [W]	$\eta$	$F_s$ [kHz]
6	3,5621	21,37	17,361	1,0637	18,47	86,40%	233
7	2,9513	20,66	17,396	1,0454	18,19	88,93%	230
8	2,5256	20,21	17,263	1,0437	18,02	89,14%	229
9	2,2516	20,26	17,280	1,0555	18,24	90,01%	229
10	2,0070	20,07	17,316	1,0512	18,20	90,70%	229
11	1,8058	19,86	17,318	1,0529	18,23	91,80%	229
12	1,6536	19,84	17,234	1,0634	18,33	92,36%	228

*Tabla 5. Medidas de Eficiencia*

De los datos de la Tabla 5 se obtienen resultados que confirman el buen funcionamiento del convertidor de potencia. Primero de todo, la frecuencia se encuentra por encima de los 200kHz en todo momento, cumpliendo con las especificaciones. Por otro lado, la corriente que circula a través del LED se encuentra dentro de los límites marcados por las especificaciones y el fichero de datos correspondiente a este componente, siendo aproximadamente 1A para todo el rango de tensiones de entrada.

Como conclusiones de la Tabla 5 cabe destacar el hecho de que la eficiencia tiende a aumentar con el aumento de la tensión de entrada. La explicación se encuentra en la corriente de entrada, la cual disminuye a medida que aumenta la tensión de entrada, dando lugar a una reducción en las pérdidas por conducción en el MOSFET y, más significativamente, en el diodo del convertidor elevador.

A continuación, se muestra una gráfica para observar más claramente la relación entre la tensión de entrada y el rendimiento (véase la Figura 29).



*Figura 29. Rendimiento frente a tensión de entrada*

En la Figura 29 se comprueba que se cumple la especificación de mantenerse siempre por encima del 85% de eficiencia, ya que se obtiene un mínimo de 86,40% para la tensión de entrada de 6V.

Este rendimiento puede disminuir si se trabaja con el convertidor durante un largo periodo de tiempo, ya que como se comentó en la sección 8.1.5, los componentes pueden llegar a verse afectados si se exponen a altas temperaturas durante mucho tiempo, disminuyendo su eficiencia.

#### **9.4.5 ATENUACIÓN DEL LED**

Finalmente, se decide añadir al diseño la posibilidad de regular la potencia del LED. Haciendo posible la regulación del brillo del LED, pudiendo variar como se desee la potencia de salida entre un 10% y un 100% de su capacidad máxima.

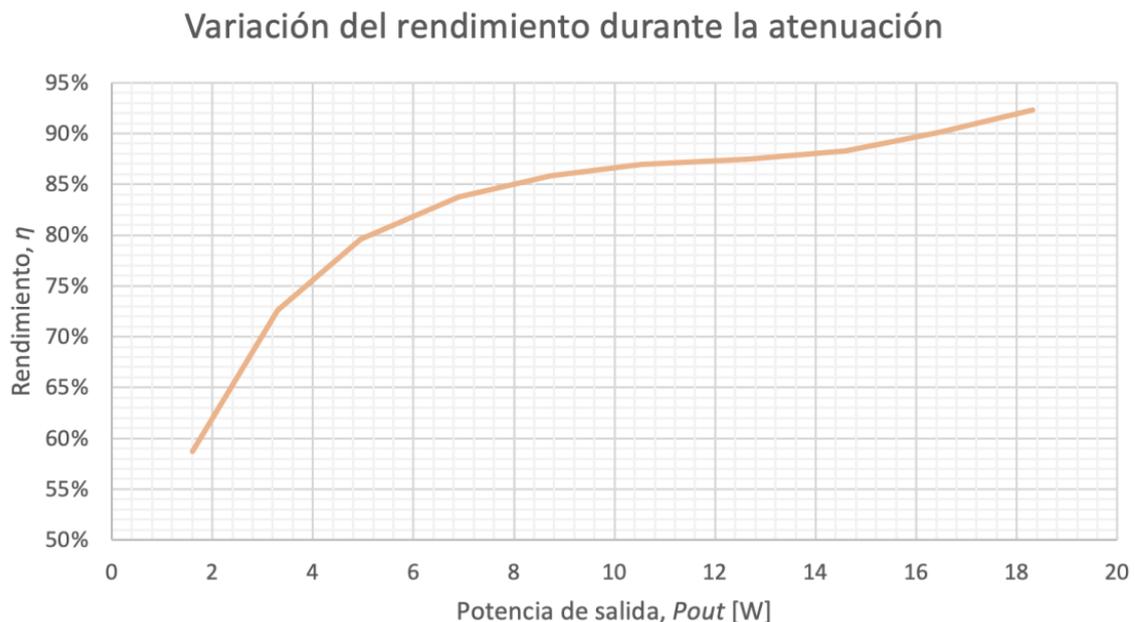
Este cambio se ha realizado incluyendo en el controlador de corriente un módulo que modifica la corriente de salida en el LED para conseguir una mayor o menor luminosidad. Dicho cambio se ha logrado añadiendo un potenciómetro conectado a un operacional que son capaces de modificar la señal de referencia del controlador. De esta forma se logra modificar el ciclo de trabajo del MOSFET y variar la corriente del convertidor reductor.

Como prueba del correcto funcionamiento de la atenuación del LED, se inicia el convertidor a máxima potencia y se regula la corriente a través del potenciómetro, tomando datos a lo largo del experimento. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

$V_{in}$ [V]	$I_{in}$ [A]	$P_{in}$ [W]	$V_{out}$ [V]	$I_{out}$ [A]	$P_{out}$ [W]	$\eta$
12,00	1,6527	19,83	18,410	0,9947	18,31	92,34%
12,00	1,5193	18,23	18,317	0,8967	16,42	90,09%
12,00	1,3783	16,54	18,072	0,8080	14,60	88,29%
12,00	1,2078	14,49	17,969	0,7053	12,67	87,44%
12,00	1,0105	12,13	17,745	0,5940	10,54	86,93%
12,00	0,8473	10,17	17,483	0,4993	8,73	85,85%
12,00	0,6872	8,25	17,189	0,4017	6,90	83,73%
12,00	0,5177	6,21	16,832	0,2937	4,94	79,58%
12,00	0,3787	4,54	16,484	0,2001	3,30	72,58%
12,00	0,2284	2,74	16,311	0,0986	1,61	58,68%

*Tabla 6. Medidas durante la atenuación*

Como se observa en los resultados de la Tabla 6, el rendimiento decrece con la disminución de la potencia de salida. Se produce un decrecimiento muy marcado al pasar la marca de los 5W de potencia de salida. Una vez se obtiene menos potencia que este punto crítico, el rendimiento decae a una velocidad mayor. Dicho análisis se ve reflejado en la Figura 30, en ella se representa el rendimiento del convertidor elevador – reductor frente a la potencia de salida. Así mismo, se observa cómo, al no estar previamente planeado el hecho de implementar la atenuación del LED, la eficiencia del convertidor disminuye mucho con respecto a la especificación de rendimiento.



*Figura 30. 10-100% atenuación del LED, potencia v eficiencia*

Como análisis adicional, se decide comprobar la velocidad de respuesta del diseño. Para ello, se analizará la respuesta del circuito, más en concreto, la corriente que circula a través del LED, ante un escalón de referencia (véase Figura 31).

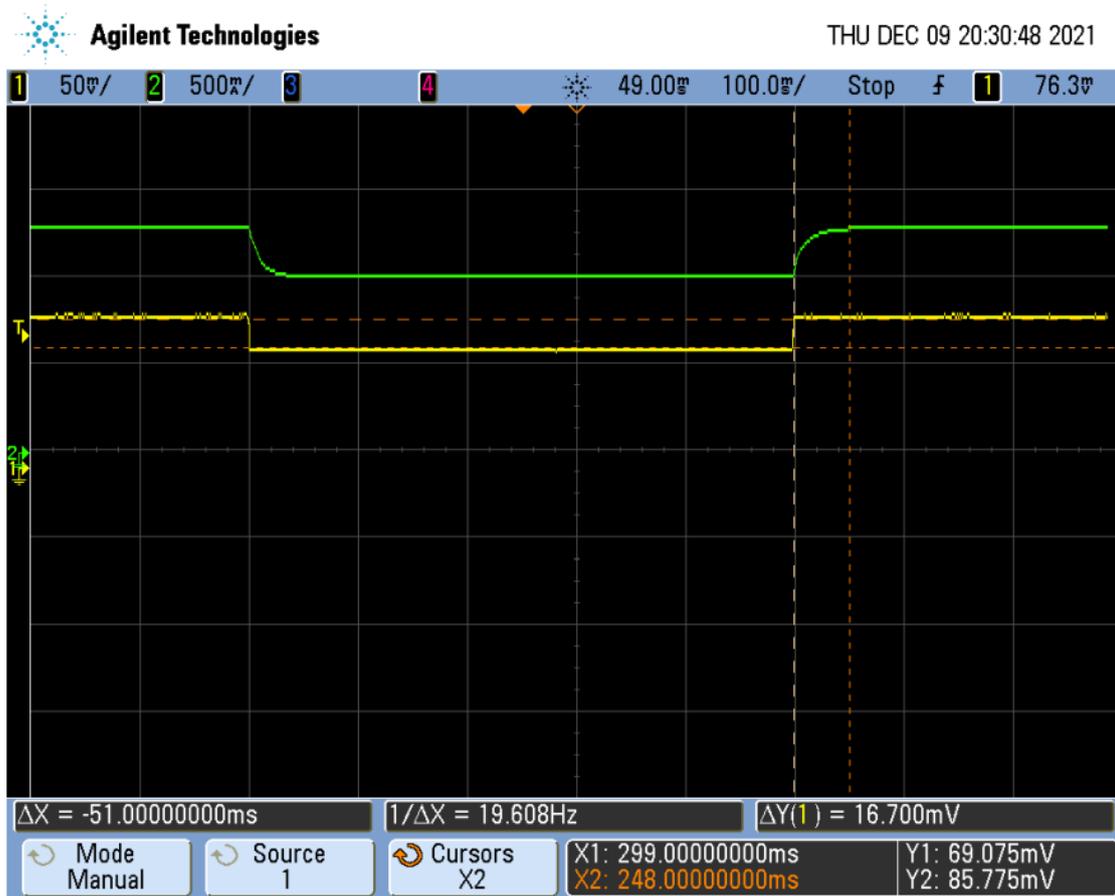


Figura 31. Respuesta a Escalón de Referencia a máxima potencia (12V) (Amarillo: referencia, Verde: respuesta, corriente que circula a través del LED)

Analizando la Figura 31, se observa que el tiempo de alcance de la corriente que circula a través del LED frente al escalón de referencia es de 51ms, representado en la Figura 31 con  $\Delta X$ . Esto hace que los cambios en la intensidad lumínica del LED se perciban como un cambio continuo al ojo humano y no dé la sensación de un cambio brusco.

#### 9.4.6 DENSIDAD DE POTENCIA

Para concluir, se decide medir la densidad de potencia del convertidor. Para ello, se emplearán reglas y micrómetros con el fin de medir el volumen de cada uno de los componentes que forman el convertidor. Se obtiene un volumen de caja de condensadores e inductores total de 25,50 cm<sup>3</sup>.

Empleando el volumen medido, con la potencia de salida con el convertidor trabajando a máxima potencia de la Tabla 6 e incluyendo estos datos en la Ecuación 25, obtenemos una densidad de potencia de 0,718 W/cm<sup>3</sup>.

$$\text{Ecuación 25} \quad \text{Densidad de Potencia} = \frac{P_{out}}{V}$$

Este dato nos ofrece información sobre la cantidad de potencia que puede producir el convertidor en función de su tamaño. Por tanto, cuanto menor sea este número, mejor diseñado está el convertidor. Una forma de mejorar este dato es invertir más dinero en comprar componentes de un menor tamaño o con pérdidas menores.

#### **9.4.7 RESULTADOS OBTENIDOS**

En la Tabla 7 se recogen datos sobre el comportamiento del convertidor diseñado con respecto a las especificaciones impuestas.

<i>Especificaciones de Diseño</i>		<i>Resultados Logrados</i>
<i>Frecuencia de conmutación</i>	> 200 kHz	216 kHz
<i>Eficiencia máxima</i>	> 85%	92,36%
<i>Atenuación</i>	10-100%	10 – 100%
<i>Tensión de salida del elevador</i>	≥ 24V	≥ 25,5 V
<i>Rizado de la tensión de salida del elevador</i>	< 10%	< 7,4%
<i>Corriente a través del LED</i>	≤ 1 A	I <sub>max</sub> = 1,008 A
<i>Rizado de la corriente de salida</i>	< 5%	< 4,5%

*Tabla 7. Resultados del convertidor reductor-elevador*

En la Tabla 7 se observa como el convertidor cumple con todas las especificaciones impuestas. La corriente máxima del LED queda ligeramente por encima de la máxima permitida, sin embargo, y como se ha comentado en este valor se encuentra dentro del rango de error permitido (véase Anexo I. Ficha de Datos del LED).

## **Capítulo 10. CÁLCULO DE COSTES**

En este capítulo se calcularán los costes que tendría diseñar este convertidor para un proyecto a gran escala. Se realizará un análisis de la posible inversión de capital y se supondrá una duración del proyecto de diez años. La utilidad y futuros proyectos a los que podría dedicarse una producción de esta categoría se comentarán en el Capítulo 11.

A lo largo del trabajo, y más específicamente en la sección 8.1.5, se ha comentado el coste de producción que tendría la placa PCB. Más en concreto, estos costes de producción estaban directamente ligados a la elección de componentes. Durante el trabajo se decidió emplear componentes THT en lugar de componentes SMD por la facilidad de trabajar con estos componentes manualmente a la par que su menor coste de producción a la hora de fabricar una placa individual.

Sin embargo, como ya se avanzó en la sección 8.1.5.3, los componentes SMD son la elección correcta para la producción a gran escala. Esto se debe al hecho de que los costes de este tipo de componentes se reducen mucho al producirlos masivamente, además de que el tamaño de estos componentes y su disposición los hace los componentes perfectos para la producción masiva. Para reafirmar estos datos se ha realizado una lista de materiales tanto THT como SMD (véase Anexo VI. BOM).

Tras comprobar que la elección de los componentes SMD es la decisión económicamente acertada para la producción a gran escala, se procede a calcular los costes e ingresos totales de este proyecto. Para analizar la inversión se harán las siguientes suposiciones:

- Se suponen unos costes de producción de la placa uniformes, comprando los componentes necesarios para la fabricación de 1000 convertidores al año.
- Se establece un precio de venta basado en la competencia existente de 42 dólares por convertidor.

- Se suponen unas ventas el primer año de 475 convertidores y un incremento anual del 15% en las ventas a lo largo de los 10 años.
- Se supone un impuesto del 25%, igual en todos los años.
- Se supone un coste de desarrollo en el año 0 de 20.088 \$. Este coste se resume en el precio de llevar a cabo este Trabajo de Fin de Grado. El coste se podría dividir en 3 grupos de costes:
  - El coste de la mano de obra. Se ha de pagar a los desarrolladores del diseño.
  - El coste de la maquinaria. Se ha de pagar todos los instrumentos de medida, además de toda la maquinaria y horas de acceso al laboratorio.
  - El coste de fabricación y reparación. Se ha de pagar el desarrollo del modelo experimental además de los costes de reparación de posibles piezas dañificadas durante el proceso.
- Se supone una tasa de descuento del 7%. Dicha tasa de descuento se rige por la Ecuación 26.

$$\text{Ecuación 26} \quad \text{Valor Actual} = \frac{\text{Flujo Total Caja en el año } X}{(1+\text{Tasa de Descuento})^{\text{año } X}}$$

Tras analizar todos los datos y suposiciones hechas en este capítulo, se procede a calcular el valor actual neto y la tasa interna de retorno de la inversión. Para ello, se crea una tabla de análisis (véase Anexo VII. Análisis de Inversión). A partir de la cual se obtiene los siguientes resultados:

$$\text{VAN} = 29.667,91 \$$$

$$\text{TIR} = 15\%$$

En conclusión, teniendo en cuenta que el VAN es positivo, y que la tasa de descuento es del 7% mientras que el TIR es del 15%, se puede concluir que se trata de una inversión altamente recomendable.

## **Capítulo 11. CONCLUSIONES Y TRABAJOS**

### **FUTUROS**

Para finalizar este Trabajo de Fin de Grado me gustaría, antes de nada, agradecer de nuevo a mi compañero Fernando Martínez – Cattáneo por su buen trabajo y colaboración en la elaboración de este proyecto.

Por otro lado, quiero hacer hincapié en el hecho de que tanto todos los objetivos marcados como las especificaciones impuestas a lo largo del Capítulo 4. han sido cumplimentadas y logradas en su totalidad con éxito, obteniendo así unos resultados extraordinarios.

Así mismo, me gustaría que el lector no se olvidase de uno de los puntos clave de este proyecto, su utilidad. La tecnología LED es una técnica en auge por sus grandes beneficios, comentados en la sección 2.3, los cuales impulsan a grandes empresas y naciones a investigar su desarrollo e implementación en nuestra sociedad (véase [10]). Siendo esta la razón principal por la cual este Trabajo de Fin de Grado adquiere especial relevancia hoy en día.

A lo largo de la realización de este proyecto realicé investigaciones sobre posibles implementaciones de este trabajo a la vida real. Tras analizarlo detenidamente considero que una de las mejores formas de implementar este proyecto a gran escala es emplear los convertidores para la iluminación de nuevas ciudades ecológicamente sostenibles.

La creación de las llamadas ciudades verdes, es decir, ciudades ecológicamente sostenibles y favorables con el medioambiente, es un tópico de interés en los últimos años, siendo portada de numerosos periódicos y objeto de innumerables investigaciones. Estos convertidores, conectados a alguna fuente de energía renovable como puede ser un panel solar, permitirían accesibilidad de manera sostenible a fuentes de iluminación LED regulables. Dichas fuentes podrían utilizarse para iluminar desde las carreteras hasta los

hogares de la ciudad. Permitiendo de esta forma obtener y regular la intensidad lumínica de toda la ciudad.

Dicho estudio sería muy complejo, y queda lejos del alcance de este Trabajo de Fin de Grado, pero con los recursos suficientes sería un estupendo estudio para el futuro que podría tener un impacto global altamente beneficioso para el planeta.

Finalmente, a modo de conclusión de este Trabajo de Fin de Grado, me gustaría agradecer y recordar la importancia que han tenido mis compañeros y profesores de la Universidad Pontificia Comillas y la University of Michigan en la elaboración de este proyecto.

Por último, también quiero destacar el éxito del proyecto, uniendo las necesidades del mundo actual con las nuevas tecnologías y técnicas empleadas en este Trabajo de Fin de Grado.

## Capítulo 12. BIBLIOGRAFÍA

- [5] Generalitat Valenciana. “Tipos de lámparas”. Última consulta 29/06/2022. [http://cefire.edu.gva.es/pluginfile.php/199806/mod\\_resource/content/0/contenidos/009/luminotecnia/31\\_tipos\\_de\\_lmparas.html#:~:text=Se%20denomina%20l%C3%A1mpara%20incandescente%20al,el%20paso%20de%20corriente%20el%C3%A9ctrica.](http://cefire.edu.gva.es/pluginfile.php/199806/mod_resource/content/0/contenidos/009/luminotecnia/31_tipos_de_lmparas.html#:~:text=Se%20denomina%20l%C3%A1mpara%20incandescente%20al,el%20paso%20de%20corriente%20el%C3%A9ctrica.)
- [6] José Luis R. “Cómo funciona una bombilla”. ComoFunciona. Última consulta 29/06/2022. <https://como-funciona.co/una-bombilla/>
- [7] Endesa. “El verdadero origen de las bombillas LED”. Blog de endesa, 26 de noviembre de 2019. Última consulta 30/06/2022. <https://www.endesa.com/es/blog/blog-de-endesa/luz/led-origen-historia#:~:text=El%20primer%20LED%20tuvo%20que,su%20origen%20hasta%20la%20actualidad.>
- [8] The Royal Swedish Academy of Sciences. “EFICIENT BLUE LIGHT - EMITTING DIODES LEADING TO BRIGHT AND ENERGY – SAVING WHITE LIGHT SOURCES”. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2014, 7 de octubre de 2014. Última consulta 30/06/2022. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/advanced-physicsprize2014.pdf>
- [9] E. Vegas. “El LED, fuente de luz”. ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA, ROBÓTICA, 24 de enero de 2021. Última consulta 30/06/2022. <https://draco-robotic.com/el-led-fuente-de-luz/>
- [10] Anfalum. “ANFALUM IMPULSA UN MACRO PROYECTO TRACTOR PARA IMPULSAR LA INDUSTRIA DE LA ILUMINACIÓN”. Anfalum Noticias, 2 de febrero de 2021. Última consulta 22/06/2022. <https://www.anfalum.com/anfalum-impulsa-un-macro-proyecto-tractor-para-impulsar-la-industria-de-la-iluminacion/>
- [11] Naciones Unidas. “Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”. Asamblea General de las Naciones Unidas, 18 de septiembre de 2015. Última consulta 23/06/2022. <https://www.fundacioncarolina.es/wp-content/uploads/2019/06/ONU-Agenda-2030.pdf>
- [12] Plexim. “PLECS, The Simulation Platform for Power Electronic Systems”. Plexim Products, 2002. Última consulta 27/06/2022. <https://www.plexim.com/products/plecs>

- [13] Altium. “Fácil, Potente y Moderno. El sistema de diseño de PCB más reconocido del mundo”. Altium Designer, 2005. Última consulta 27/06/2022.  
<https://www.altium.com/es/altium-designer/>
- [14] Advanced Circuits. “Standard & Custom Printed Circuit Boards”. Advanced Circuits Products, 2015. Última consulta 28/06/2022. <https://www.4pcb.com/pcb-manufacturing-custom-standard.html>
- [15] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins. *POWER ELECTRONICS. Converters, Applications and Design*. 1989. Última consulta 02/03/2022.
- [16] Advanced Circuits. PCB Trace Width Calculator. Última consulta 27/03/2022.  
<https://www.4pcb.com/trace-width-calculator.html>
- [17] Luis Llamas. “Ventajas y desventajas de componentes PTH frente a SMD”. 21 de abril de 2020. Última consulta 29/06/2022. <https://www.luisllamas.es/ventajas-y-y-desventajas-de-componentes-ptf-frente-a-smd/>

# ANEXO I. FICHA DE DATOS DEL LED XLAMP

## CXA1512

PRODUCT FAMILY DATA SHEET

CREE LED

### XLamp® CXA1512 LED



#### PRODUCT DESCRIPTION

The XLamp® CXA1512 LED array expands Cree LED's family of high-flux, multi-die arrays in a smaller, easy-to-use platform. With XLamp LED lighting-class reliability, the CXA1512's small, uniform emitting surface enables both directional and non-directional lighting applications including lamp retrofit and luminaire designs. Available in 2-step, 3-step and 4-step color consistency, and featuring a 9-mm optical source, the CXA1512 brings new levels of flux and efficacy to this form factor.

The CX Family LED Design Guide provides basic information on the requirements to use the CXA1512 LED successfully in luminaire designs.

#### FEATURES

- Available in 4-step, 3-step and 2-step EasyWhite® bins at 2700 K, 3000 K, 3500 K, 4000 K & 5000 K CCT and 4-step EasyWhite bins at 5700 K & 6500 K CCT
- Available in ANSI white bins at 4000 K, 5000 K, 5700 K & 6500 K CCT
- Available in 70-, 80-, 90- and 93-minimum CRI options
- Forward voltage options: 18-V class & 36-V class
- 85 °C binning and characterization
- Maximum drive current: 1200 mA (18 V), 600 mA (36 V)
- 115° viewing angle, uniform chromaticity profile
- Top-side solder connections
- Thermocouple attach point
- NEMA SSL-3 2011 standard flux bins
- RoHS and REACH compliant
- UL® recognized component (E349212)

#### TABLE OF CONTENTS

Characteristics .....	2
Operating Limits .....	3
Flux Characteristics, EasyWhite® Order	
Codes and Bins - 18 V .....	4
Flux Characteristics, ANSI White Order	
Codes and Bins - 18 V .....	7
Flux Characteristics, EasyWhite® Order	
Codes and Bins - 36 V .....	8
Flux Characteristics, ANSI White Order	
Codes and Bins - 36 V .....	11
Relative Spectral Power Distribution .....	12
Electrical Characteristics .....	13
Relative Luminous Flux .....	14
Typical Spatial Distribution .....	16
Performance Groups - Brightness .....	16
Performance Groups - Chromaticity .....	17
EasyWhite® Bins Plotted on the 1931 CIE	
Color Space .....	20
ANSI White Bins Plotted on the 1931 CIE	
Color Space .....	20
Bin and Order Code Formats .....	21
Mechanical Dimensions .....	21
Thermal Design .....	22
Notes .....	24
Packaging .....	25



Cree LED / 4400 Silicon Drive / Durham, NC 27703 USA / +1.919.313.5330 / www.cree-led.com

© 2012-2021 Cree LED. The information in this document is subject to change without notice. Cree® and the Cree logo are registered trademarks, and the Cree LED logo is a trademark, of WolfSpeed, Inc. XLamp® and EasyWhite® are registered trademarks of Cree LED. UL® and the UL logo are registered trademarks of UL, LLC.

GLD-0955  
REV 12A  
1

XLAMP® CXA1512 LED



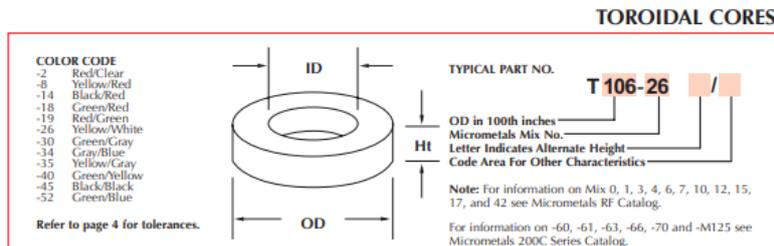
**CHARACTERISTICS**

Characteristics	Unit	Minimum	Typical	Maximum
Viewing angle (FWHM)	degrees		115	
ESD withstand voltage (HBM per Mil-Std-883D)	V			8000
DC forward current (18 V)	mA			1200*
DC forward current (36 V)	mA			600*
Reverse current (18 V, 36 V)	mA			0.1
Forward voltage (18 V, @ 700 mA, 85 °C)	V		18.2	
Forward voltage (18 V, @ 700 mA, 25 °C)	V			21
Forward voltage (36 V, @ 350 mA, 85 °C)	V		36.4	
Forward voltage (36 V, @ 350 mA, 25 °C)	V			42

\* Refer to the Operating Limits section.

Para más información consultar: <https://cree-led.com/media/documents/ds-CXA1512.pdf>

## ANEXO II. FICHA DE DATOS DEL NÚCLEO DEL INDUCTOR T106-26



MICROMETALS Part No.	A <sub>L</sub> nH/N <sup>2</sup>	MAGNETIC DIMENSIONS			ℓ cm	A cm <sup>2</sup>	V cm <sup>3</sup>
		OD in/mm	ID in/mm	Ht in/mm			
T90-8/90	30.0	.900/22.9	.550/14.0	.375/9.53	5.78	.395	2.28
T90-18	47.0						
T90-19	47.0						
T90-26	70.0						
T90-40	57.0						
T90-45	85.0						
T90-52	64.0						
T94-2	8.4	.942/23.9	.560/14.2	.312/7.92	5.97	.362	2.16
T94-8/90	25.0						
T94-14	10.0						
T94-18	42.0						
T94-19	42.0						
T94-26	60.0						
T94-40	49.0						
T94-45	76.0						
T94-52	57.0						
T95-26B	84.0	.942/23.9	.495/12.6	.375/9.53	5.72	.510	2.91
T95-52B	84.0						
T106-2	13.5	1.060/26.9	.570/14.5	.437/11.1	6.49	.659	4.28
T106-8/90	45.0						
T106-14	17.0						
T106-18	70.0						
T106-19	70.0						
T106-26	93.0						
T106-30	30.0						
T106-34	40.0						
T106-35	40.0						
T106-40	81.0						
T106-45	125.0						
T106-52	95.0						
T106-18A	49.0	1.060/26.9	.570/14.5	.312/7.92	6.49	.461	3.00
T106-26A	67.0						
T106-40A	58.0						
T106-52A	67.0						
T106-18B	91.0	1.060/26.9	.570/14.5	.575/14.6	6.49	.858	5.57
T106-19B	91.0						
T106-26B	124.0						
T106-40B	106.0						
T106-52B	124.0						
T124-26	58.0	1.245/31.6	.710/18.0	.280/7.11	7.75	.459	3.55
T130-2	11.0	1.300/33.0	.780/19.8	.437/11.1	8.28	.698	5.78
T130-8/90	35.0						
T130-14	14.0						
T130-18	58.0						
T130-19	58.0						

TEL (714) 970-9400  
FAX (714) 970-0400

MICROMETALS

Para más información consultar:

<https://www.tme.eu/Document/82fc93ef93d05a020041f9203a13131a/MICROMETALS-Tseries.pdf>

## ANEXO III. FICHA DE DATOS DEL DIODO MBR1045



**MBR10xx, MBRF10xx, MBRB10xx**  
Vishay General Semiconductor

**Schottky Barrier Rectifier**



TO-220AC  
MBR1045  
MBR1060

PIN 1  
PIN 2



ITO-220AC  
MBRF1045  
MBRF1060

PIN 1  
PIN 2



D<sup>2</sup>PAK (TO-263AB)  
K  
MBRB1045  
MBRB1060

PIN 1  
PIN 2  
HEATSINK

**DESIGN SUPPORT TOOLS** [click logo to get started](#)



PRIMARY CHARACTERISTICS	
$I_{F(AV)}$	10 A
$V_{RRM}$	45 V, 60 V
$I_{FSM}$	150 A
$V_F$	0.57 V, 0.70 V
$T_J \text{ max.}$	150 °C
Package	TO-220AC, ITO-220AC, D <sup>2</sup> PAK (TO-263AB)
Circuit configuration	Single

MAXIMUM RATINGS ( $T_C = 25\text{ °C}$ unless otherwise noted)				
PARAMETER	SYMBOL	MBR1045	MBR1060	UNIT
Maximum repetitive peak reverse voltage	$V_{RRM}$	45	60	V
Maximum average forward rectified current (fig. 1)	$I_{F(AV)}$	10		A
Peak forward surge current 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load	$I_{FSM}$	150		A
Peak repetitive reverse current at $t_p = 2.0\ \mu\text{s}$ , 1 kHz	$I_{RRM}$	1.0	0.5	A
Voltage rate of change (rated $V_R$ )	$dV/dt$	10 000		V/ $\mu\text{s}$
Operating junction and storage temperature range	$T_J$	-65 to +150		°C
	$T_{STG}$	-65 to +175		
Isolation voltage (ITO-220AC only) from terminal to heatsink $t = 1\ \text{min}$	$V_{AC}$	1500		V

**FEATURES**

- Power pack
- Low power loss, high efficiency
- Low forward voltage drop
- High forward surge capability
- High frequency operation
- Meets MSL level 1, per J-STD-020, LF maximum peak of 245 °C (for TO-263AB package)
- Solder bath temperature 275 °C maximum, 10 s, per JESD 22-B106 (for TO-220AC and ITO-220AC package)
- AEC-Q101 qualified available (for ITO-220AC and D<sup>2</sup>PAK (TO-263AB) package)
- Material categorization: for definitions of compliance please see [www.vishay.com/doc799912](http://www.vishay.com/doc799912)

**TYPICAL APPLICATIONS**

For use in low voltage, high frequency rectifier of switching mode power supplies, freewheeling diodes, DC/DC converters, and polarity protection application.

**MECHANICAL DATA**

**Case:** TO-220AC, ITO-220AC, D<sup>2</sup>PAK (TO-263AB)  
Molding compound meets UL 94 V-0 flammability rating  
Base P/N-E3 - RoHS-compliant, commercial grade  
Base P/NHE3\_X - RoHS-compliant, AEC-Q101 qualified ("\_X" denotes revision code, e.g. A, B, ...)  
**Terminals:** matte tin plated leads, solderable per J-STD-002 and JESD 22-B102  
E3 suffix meets JESD 201 class 1A whisker test, HE3 suffix meets JESD 201 class 2 whisker test  
**Polarity:** as marked  
**Mounting Torque:** 10 in-lbs maximum

Revision: 19-Sep-2018 1 Document Number: 88669  
For technical questions within your region: [DiodesAmericas@vishay.com](mailto:DiodesAmericas@vishay.com), [DiodesAsia@vishay.com](mailto:DiodesAsia@vishay.com), [DiodesEurope@vishay.com](mailto:DiodesEurope@vishay.com)  
THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT [www.vishay.com/doc791000](http://www.vishay.com/doc791000)

Para más información consultar: <https://www.vishay.com/docs/88669/mbr10xx.pdf>

# ANEXO IV. FICHA DE DATOS DEL MOSFET

## IPP040N06N



**IPP040N06N**

**OptiMOS™ Power-Transistor**

**Features**

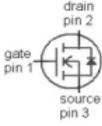
- Optimized for high performance SMPS, e.g. sync. rec.
- 100% avalanche tested
- Superior thermal resistance
- N-channel
- Qualified according to JEDEC<sup>1)</sup> for target applications
- Pb-free lead plating; RoHS compliant
- Halogen-free according to IEC61249-2-21

**Product Summary**

$V_{DS}$	60	V
$R_{DS(on),max}$	4.0	mΩ
$I_D$	80	A
$Q_{OSS}$	44	nC
$Q_G(0V..10V)$	38	nC

**RoHS**  **Halogen-Free**  **Pb-Free** 

**PG-TO220-3**

Type	Package	Marking
IPP040N06N	PG-TO220-3	040N06N

**Maximum ratings, at  $T_J=25\text{ °C}$ , unless otherwise specified**

Parameter	Symbol	Conditions	Value	Unit
Continuous drain current	$I_D$	$V_{GS}=10\text{ V}, T_C=25\text{ °C}$	80	A
		$V_{GS}=10\text{ V}, T_C=100\text{ °C}$	80	
		$V_{GS}=10\text{ V}, T_C=25\text{ °C}, R_{thJA}=50\text{K/W}$	20	
Pulsed drain current <sup>2)</sup>	$I_{D,pulse}$	$T_C=25\text{ °C}$	320	
Avalanche energy, single pulse <sup>3)</sup>	$E_{AS}$	$I_D=80\text{ A}, R_{GS}=25\text{ Ω}$	70	mJ
Gate source voltage	$V_{GS}$		±20	V

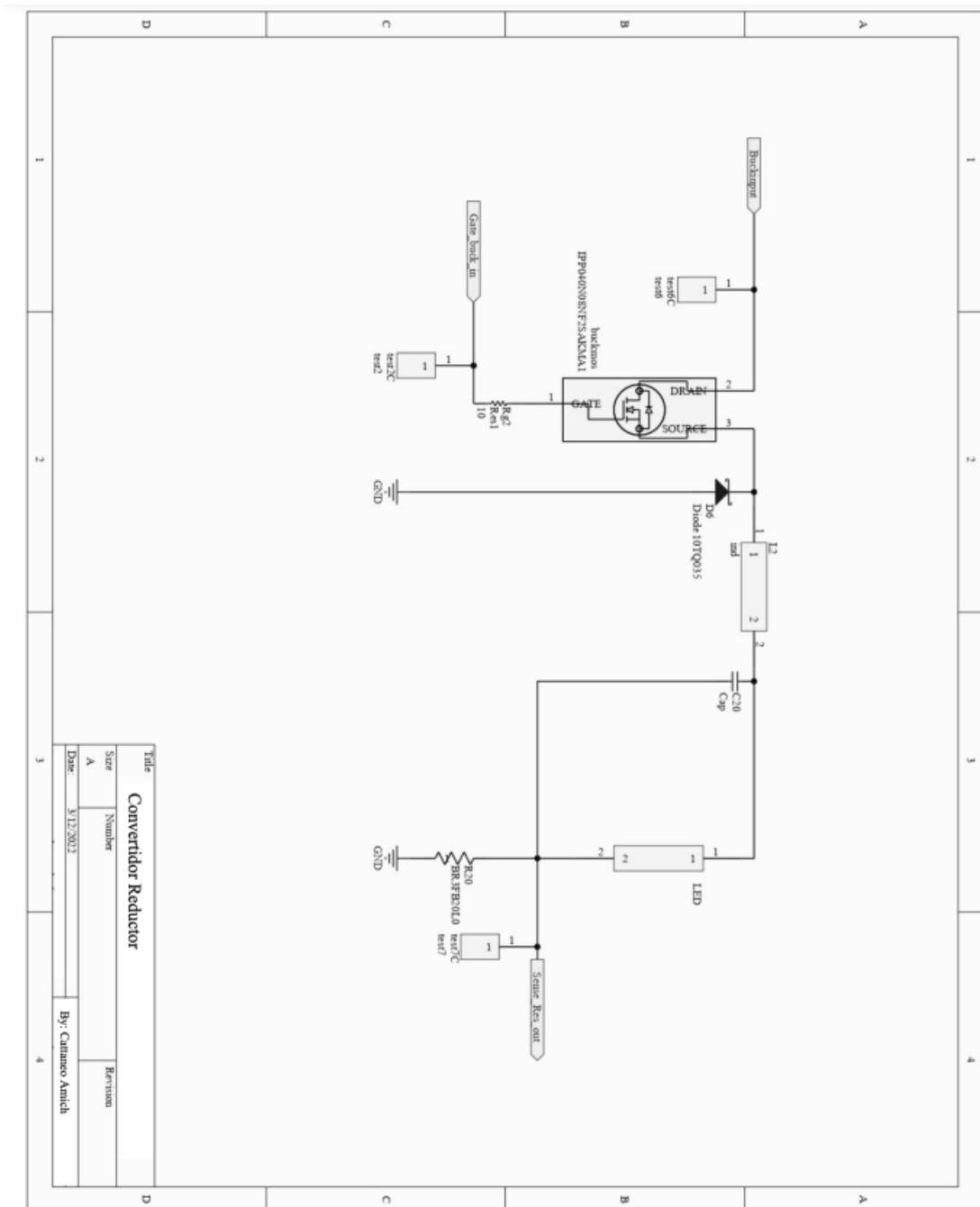
<sup>1)</sup> J-STD20 and JESD22  
<sup>2)</sup> See figure 3 for more detailed information  
<sup>3)</sup> See figure 13 for more detailed information  
<sup>4)</sup> Device on 40 mm x 40 mm x 1.5 mm epoxy PCB FR4 with 6 cm<sup>2</sup> (one layer, 70 μm thick) copper area for drain connection. PCB is vertical in still air.

Rev.2.2 page 1 2012-12-20

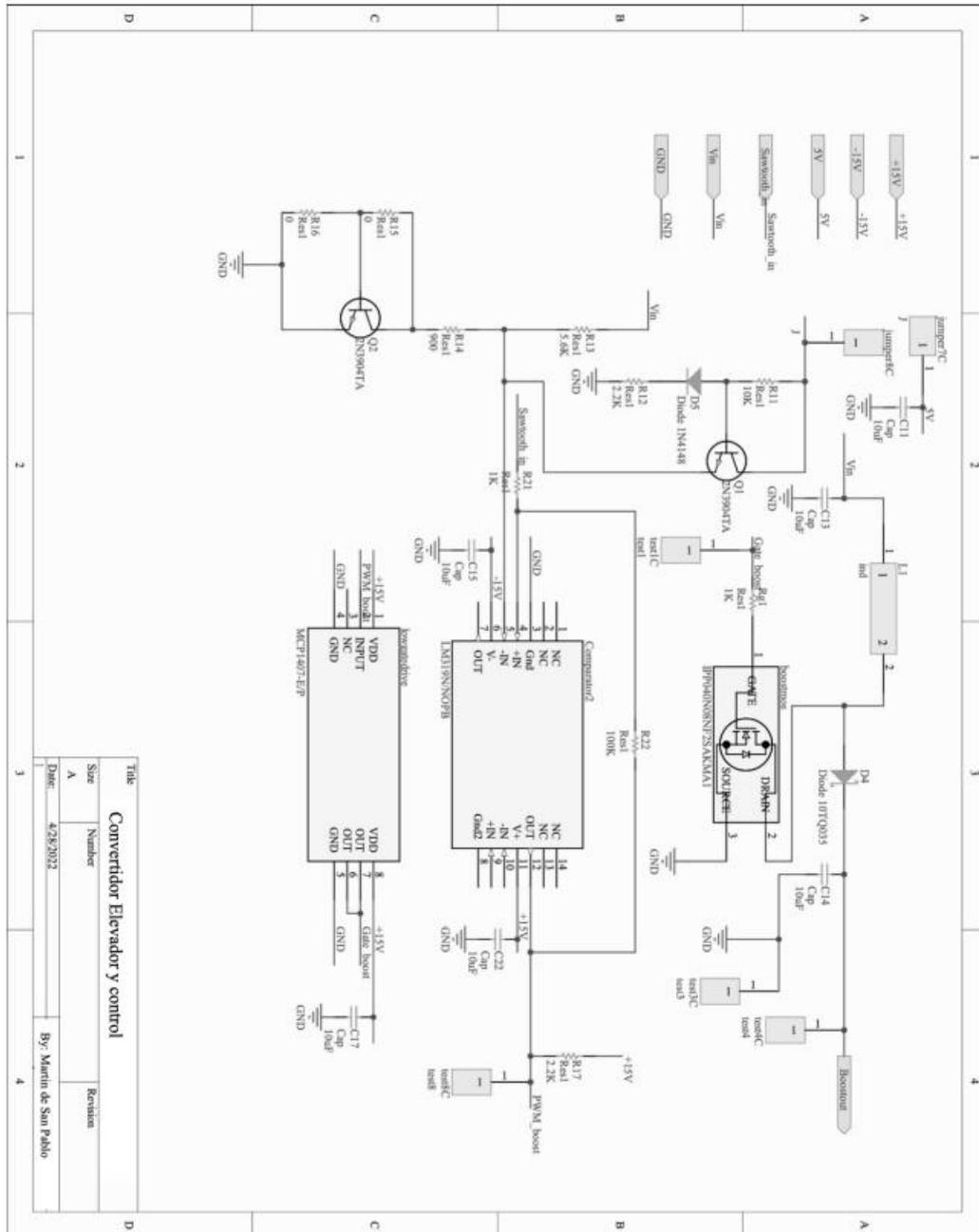
Para más información consultar: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPP040N06N-DS-v02\\_02-en.pdf?fileId=db3a30433727a44301372bbaa5ad4942](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPP040N06N-DS-v02_02-en.pdf?fileId=db3a30433727a44301372bbaa5ad4942)

## ANEXO V. ESQUEMÁTICOS DEL CONVERTIDOR

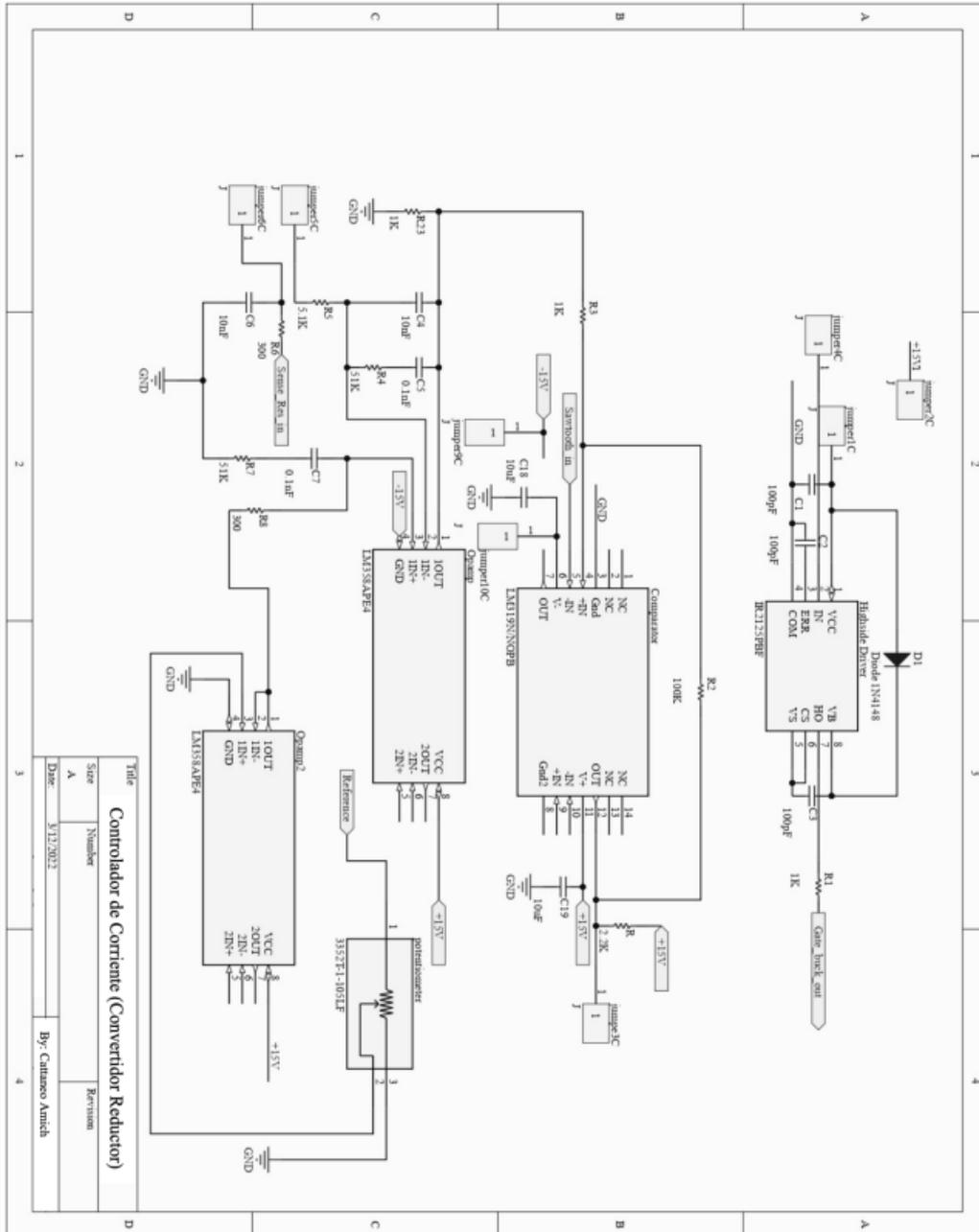
### Convertidor Reductor



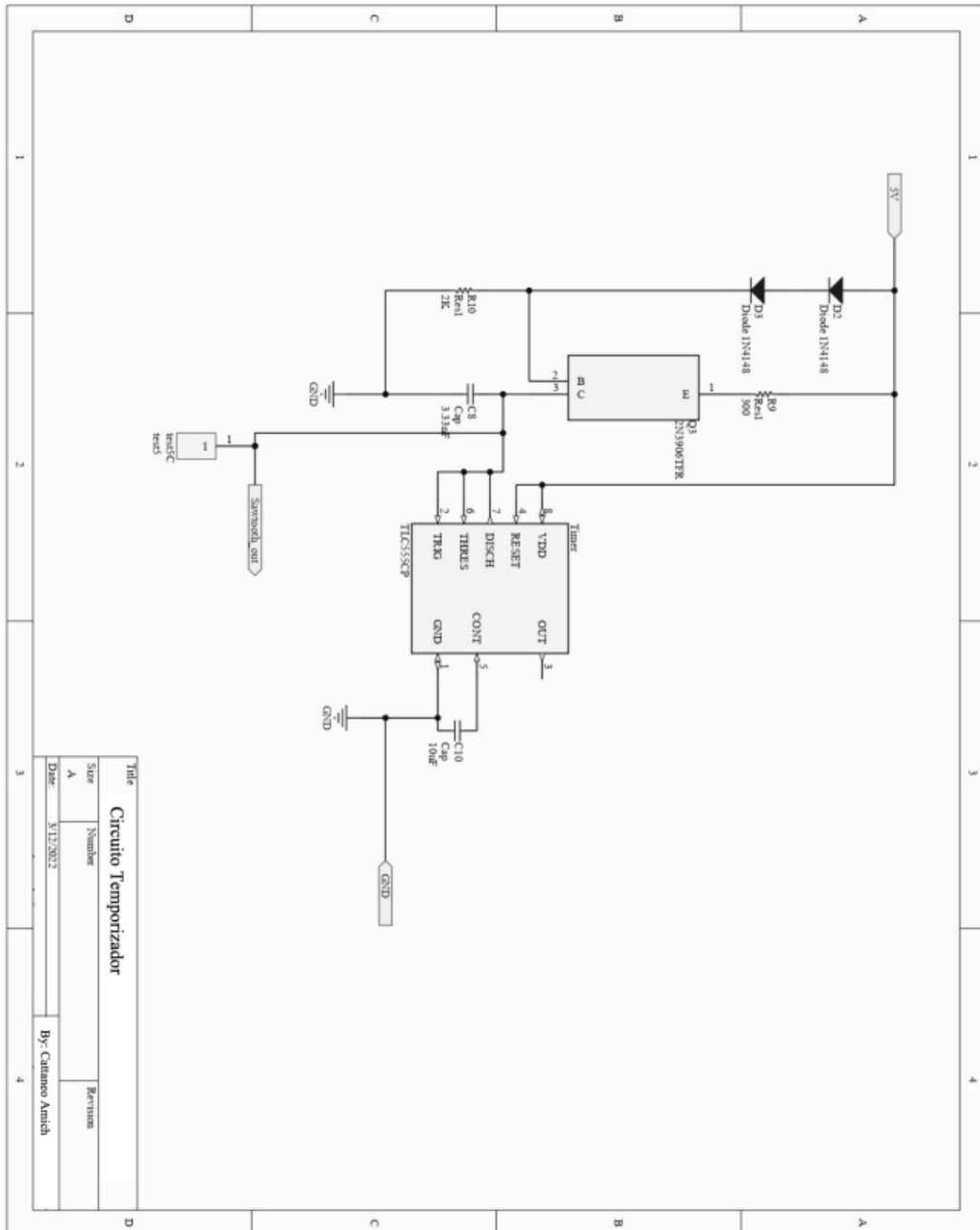
## Convertidor Elevador y su Control Asociado



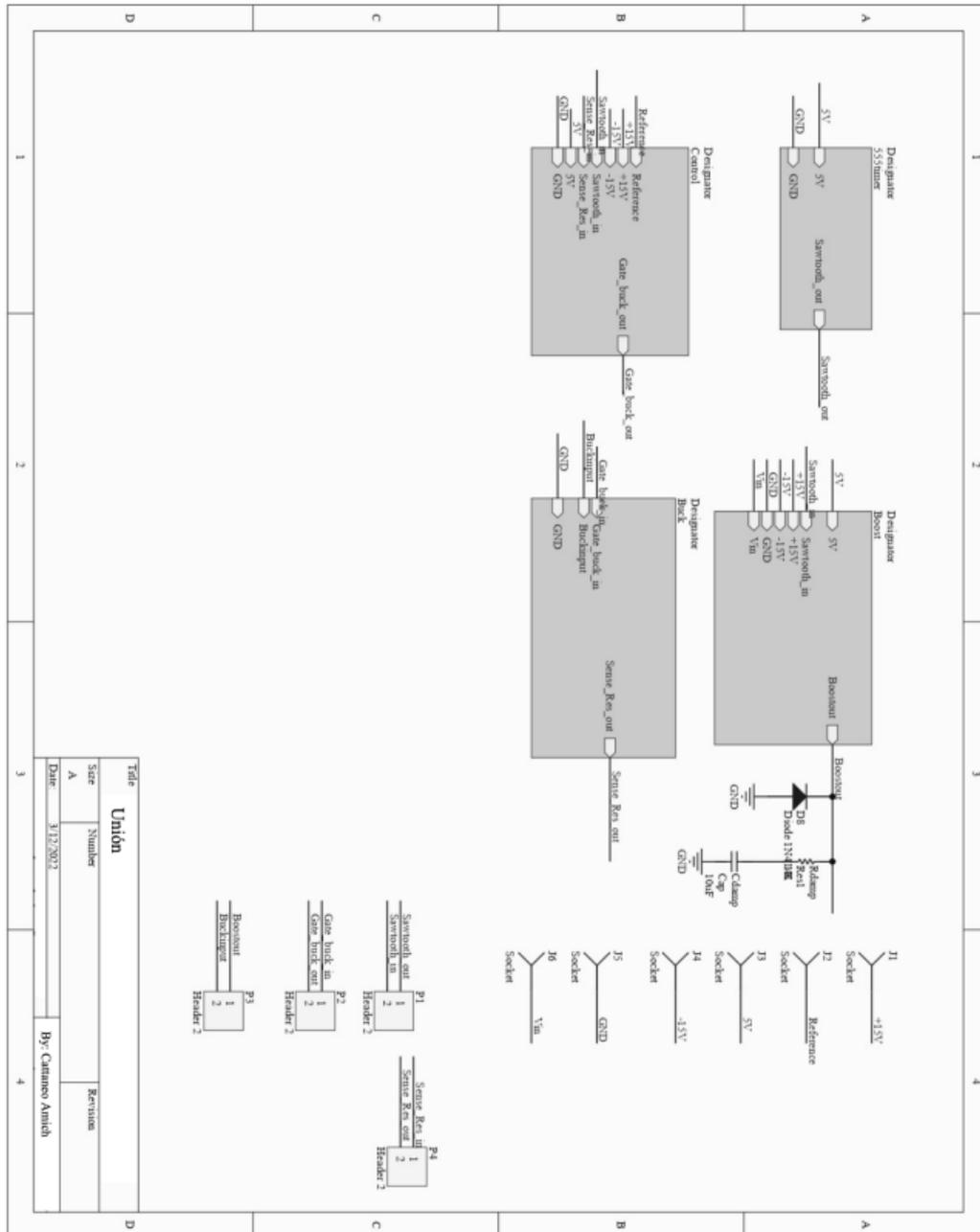
## Controlador de Corriente



## Circuito Temporizador



## Convertidor de Potencia



## ANEXO VI. BOM

### Listado de Materiales: Prototipo THT

Part No.	Part Title	Value	Type	Supplier	Quantity	Unit Price	x100 Converters	x1000 Converters	
BUCK	1	<a href="#">MBR1045</a>	Diode	Vishay	1	\$ 0,41	\$ 32,80	\$ 295,20	
	2	<a href="#">IPPO40N06NAKSA1</a>	Mosfet	Infineon	1	\$ 2,38	\$ 171,50	\$ 1.543,50	
	3	<a href="#">M39014/01-1593</a>	0.1uF	Capacitor	KYOCERA AVX	1	\$ 2,16	\$ 133,19	\$ 1.198,71
	4	T68-18 Core		Inductor	Reichelt	1	\$ 1,15	\$ 115,00	\$ 1.035,00
	5	BR3FBR100	0.1 Ohms	Resistor	Stackpole	1	\$ 0,88	\$ 56,25	\$ 506,25
	6	IR2125		HSGD	Infineon	1	\$ 2,07	\$ 165,60	\$ 1.490,40
BUCK CONTROLLER	7	<a href="#">LM358P</a>	IC - Opamp	TI	1	\$ 0,49	\$ 27,14	\$ 244,26	
	8	<a href="#">LM319N/NOPB</a>	IC - comp	TI	1	\$ 2,48	\$ 186,49	\$ 1.678,41	
	9	<a href="#">C323C103K3G5TA</a>	10uF	Capacitor	Kemet	5	\$ 0,16	\$ 32,45	\$ 292,03
	10	<a href="#">9001D0</a>	1pF	Capacitor	NTE	1	\$ 0,15	\$ 14,11	\$ 126,99
	11	<a href="#">CK45-B3AD101KYGNA</a>	100pF	Capacitor	TDK	5	\$ 0,41	\$ 43,05	\$ 387,45
	12	<a href="#">CF18JA330R</a>	330 Ohms	Resistor	Stackpole	2	\$ 0,01	\$ 1,00	\$ 9,00
	13	<a href="#">CCF551K00FKE36</a>	1 kOhms	Resistor	Vishay	3	\$ 0,15	\$ 7,05	\$ 63,45
	14	<a href="#">CCF072K20GKE36</a>	2.2 kOhms	Resistor	Vishay	1	\$ 0,02	\$ 2,35	\$ 21,15
	15	<a href="#">294-5_1K-RC</a>	5.1 kOhms	Resistor	TubeDepot	1	\$ 0,15	\$ 9,45	\$ 85,05
	16	<a href="#">294-51K-RC</a>	51 kOhms	Resistor	TubeDepot	2	\$ 0,15	\$ 18,90	\$ 170,10
	17	<a href="#">CCF07100KGKE36</a>	100 kOhms	Resistor	Vishay	1	\$ 0,12	\$ 2,35	\$ 21,15
TIMER	18	<a href="#">TLC555IP</a>	IC - timer	TI	1	\$ 0,93	\$ 64,85	\$ 583,65	
	19	<a href="#">1N4148</a>	Diode	NTE	2	\$ 0,12	\$ 18,96	\$ 170,64	
	20	<a href="#">VWSJT150R</a>	150 Ohms	Resistor	Stackpole	1	\$ 0,34	\$ 33,53	\$ 301,77
	21	<a href="#">CCF072K20GKE36</a>	2.2 kOhms	Resistor	Vishay	1	\$ 0,02	\$ 2,35	\$ 21,15
	22	<a href="#">C336C102JAG5TA</a>	1nF	Capacitor	Kemet	3	\$ 0,17	\$ 49,87	\$ 448,85
23	<a href="#">2N3906TFR</a>		Transistor BJT	Onsemi	1	\$ 0,07	\$ 6,95	\$ 62,55	
BOOST	24	<a href="#">MBR1045</a>	Diode	Vishay	1	\$ 0,41	\$ 32,80	\$ 295,20	
	25	<a href="#">IPPO40N06NAKSA1</a>	Mosfet	Infineon	1	\$ 2,38	\$ 171,50	\$ 1.543,50	
	26	<a href="#">GMC32X6S106K25NT</a>	10uF	Capacitor	CAL-CHIP	1	\$ 0,20	\$ 20,00	\$ 180,00
	27	T106-26 Core		Inductor	Micrometals	1	\$ 0,75	\$ 75,00	\$ 675,00
28	2EDF7275K		LSGD	Infineon	1	\$ 3,62	\$ 267,00	\$ 2.403,00	
BOOST CONTROLLER	29	<a href="#">MCP1407-E/P</a>	IC - comp	TI	1	\$ 1,47	\$ 135,00	\$ 1.215,00	
	30	<a href="#">GMC32X6S106K25NT</a>	10uF	Capacitor	CAL-CHIP	6	\$ 0,20	\$ 120,00	\$ 1.080,00
	31	<a href="#">RSF100JB-73-5K6</a>	5.6 kOhms	Resistor	Yageo	1	\$ 0,32	\$ 10,44	\$ 93,96
	32	<a href="#">43F900E</a>	900 Ohms	Resistor	Ohmite	1	\$ 1,66	\$ 106,81	\$ 961,29
	33	<a href="#">CCF072K20GKE36</a>	2.2 kOhms	Resistor	Vishay	2	\$ 0,20	\$ 13,46	\$ 121,14
	34	<a href="#">CCF551K00FKE36</a>	1 kOhms	Resistor	Vishay	1	\$ 0,15	\$ 2,35	\$ 21,15
	35	<a href="#">CFR100J10K</a>	10 kOhms	Resistor	TubeDepot	1	\$ 0,35	\$ 11,42	\$ 102,78
	36	<a href="#">CCF07100KGKE36</a>	100 kOhms	Resistor	Vishay	1	\$ 0,20	\$ 6,73	\$ 60,57
	37	<a href="#">Diode 1N4148</a>		Diode	Vishay	1	\$ 0,44	\$ 34,80	\$ 313,20
	38	<a href="#">SNT-100-YW-T</a>		Shunt Jumper	Samtec Inc	10	\$ 0,16	\$ 159,10	\$ 1.431,90
39	PCB		Placa	Advanced Circuits	1	\$ 13,18	\$ 1.255,00	\$ 10.542,00	
<b>TOTAL</b>						<b>\$ 40,68</b>	<b>\$ 3.616,60</b>	<b>\$ 31.796,40</b>	

Listado de Materiales: alternativa SMD

Part No.	Part Title	Value	Type	Supplier	Quantity	Unit Price	x100 Converters	x1000 Converters
BUCK	1	<a href="#">MBRD1045</a>	Diode	SMC	1	\$ 0,61	\$ 39,05	\$ 384,30
	2	<a href="#">XPN12006NCL1XHQ</a>	Mosfet	Toshiba	1	\$ 1,29	\$ 89,82	\$ 812,70
	3	<a href="#">C1206S104K5RACAUTO</a>	0.1uF Capacitor	Kemet	1	\$ 0,49	\$ 22,93	\$ 308,70
	4	B82464D6103M000	220uH Inductor	EPCOS	1	\$ 2,45	\$ 158,24	\$ 1.543,50
	5	BR3FBR100	0.1 Ohms Resistor	Stackpole	1	\$ 0,88	\$ 56,25	\$ 506,25
	6	IR2125	HSGD	Infineon	1	\$ 2,07	\$ 165,60	\$ 1.490,40
BUCK CONTROLLER	7	<a href="#">LM358PSR</a>	IC - Opamp	TI	1	\$ 0,43	\$ 27,60	\$ 270,90
	8	<a href="#">LM319AMX/NOPB</a>	IC - comp	TI	1	\$ 1,57	\$ 113,57	\$ 989,10
	9	<a href="#">CL10B103KB8WPJC</a>	10uF Capacitor	Samsung	5	\$ 0,11	\$ 19,15	\$ 346,50
	10	<a href="#">CGA3E2C0G2A010C080AA</a>	1pF Capacitor	TDK	1	\$ 0,19	\$ 6,32	\$ 119,70
	11	<a href="#">GMC10CG101F200NT</a>	100pF Capacitor	CAL-Chip	5	\$ 0,20	\$ 21,00	\$ 630,00
	12	<a href="#">RMC2512JT330R</a>	330 Ohms Resistor	Stackpole	2	\$ 0,30	\$ 19,78	\$ 378,00
	13	<a href="#">RQ73C2A1K0BTD</a>	1 kOhms Resistor	TE	3	\$ 0,19	\$ 21,70	\$ 359,10
	14	<a href="#">RK73H1JRTD2201F</a>	2.2 kOhms Resistor	KOA	1	\$ 0,04	\$ 4,20	\$ 25,20
	15	<a href="#">SDR03EZPJ512</a>	5.1 kOhms Resistor	Rohm	1	\$ 0,10	\$ 3,22	\$ 63,00
	16	<a href="#">ERJ-PA2F5102X</a>	51 kOhms Resistor	Panasonic	2	\$ 0,24	\$ 15,58	\$ 302,40
	17	<a href="#">RMC2512JT100K</a>	100 kOhms Resistor	Stackpole	1	\$ 0,10	\$ 1,90	\$ 63,00
TIMER	18	<a href="#">TLC555CPWR</a>	IC - timer	TI	1	\$ 0,85	\$ 57,12	\$ 535,50
	19	<a href="#">1N4148W</a>	Diode	SMC	2	\$ 0,14	\$ 13,84	\$ 176,40
	20	<a href="#">RMC2512JT150R</a>	150 Ohms Resistor	SMC	1	\$ 0,52	\$ 16,68	\$ 327,60
	21	<a href="#">RK73H1JRTD2201F</a>	2.2 kOhms Resistor	KOA	1	\$ 0,12	\$ 4,20	\$ 75,60
	22	<a href="#">0603B102K500SD</a>	1nF Capacitor	NextGen	3	\$ 0,02	\$ 4,95	\$ 37,80
	23	<a href="#">BC817-40-7-F</a>	Transistor BJT	Diodes Inc.	1	\$ 0,10	\$ 9,55	\$ 63,00
BOOST	24	<a href="#">MBRD1045</a>	Diode	SMC	1	\$ 0,61	\$ 39,05	\$ 384,30
	25	<a href="#">XPN12006NCL1XHQ</a>	Mosfet	Toshiba	1	\$ 1,29	\$ 89,82	\$ 812,70
	26	<a href="#">CL10B103KB8WPJC</a>	10uF Capacitor	Samsung	1	\$ 0,11	\$ 3,83	\$ 69,30
	27	T106-26 Core	Inductor	Micrometals	1	\$ 0,75	\$ 75,00	\$ 675,00
	28	2EDF7275K	LSGD	Infineon	1	\$ 3,62	\$ 267,00	\$ 2.403,00
BOOST CONTROLLER	29	<a href="#">LM319AMX/NOPB</a>	IC - comp	TI	1	\$ 1,57	\$ 113,57	\$ 989,10
	30	<a href="#">CL10B103KB8WPJC</a>	10uF Capacitor	Samsung	6	\$ 0,11	\$ 10,45	\$ 415,80
	31	<a href="#">RMC2512JT5K60</a>	5.6 kOhms Resistor	Stackpole	1	\$ 0,30	\$ 28,50	\$ 189,00
	32	<a href="#">HSA25900R</a>	900 Ohms Resistor	TE	1	\$ 0,85	\$ 63,75	\$ 535,50
	33	<a href="#">RK73H1JRTD2201F</a>	2.2 kOhms Resistor	KOA	2	\$ 0,12	\$ 4,20	\$ 151,20
	34	<a href="#">RQ73C2A1K0BTD</a>	1 kOhms Resistor	TE	1	\$ 0,17	\$ 7,23	\$ 107,10
	35	<a href="#">RMC2512JT10K0</a>	10 kOhms Resistor	Stackpole	1	\$ 0,30	\$ 9,89	\$ 189,00
	36	<a href="#">RMC2512JT100K</a>	100 kOhms Resistor	Stackpole	1	\$ 0,10	\$ 1,90	\$ 63,00
	37	<a href="#">MBRD1045</a>	Diode	SMC	1	\$ 0,61	\$ 39,05	\$ 384,30
38	PCB + Mount	Placa	Advanced Circuits	1	\$ 18,75	\$ 1.668,75	\$ 11.812,50	
<b>TOTAL</b>						<b>\$ 42,27</b>	<b>\$ 3.314,25</b>	<b>\$ 28.989,45</b>

## ANEXO VII. ANÁLISIS DE INVERSIÓN

	AÑO										
	\$0	\$1	\$2	\$3	\$4	\$5	\$6	\$7	\$8	\$9	\$10
Costes de Fabricación		-\$28.989	-\$28.989	-\$28.989	-\$28.989	-\$28.989	-\$28.989	-\$28.989	-\$28.989	-\$28.989	-\$28.989
Ingresos Anuales	\$19.950	\$22.943	\$26.384	\$30.341	\$34.893	\$40.127	\$46.146	\$53.067	\$61.028	\$70.182	
BAI		-\$9.039	-\$6.047	-\$2.606	\$1.352	\$5.903	\$11.137	\$17.156	\$24.078	\$32.038	\$41.192
Impuesto		\$2.260	\$1.512	\$651	-\$338	-\$1.476	-\$2.784	-\$4.289	-\$6.019	-\$8.010	-\$10.298
<b>CF Operativo</b>		-\$6.780	-\$4.535	-\$1.954	\$1.014	\$4.427	\$8.353	\$12.867	\$18.058	\$24.029	\$30.894
Inversiones	\$0	\$1	\$2	\$3	\$4	\$5	\$6	\$7	\$8	\$9	\$10
Costes de Desarrollo	-\$20.088										
<b>Flujo Total Caja</b>	-\$20.088	-\$6.780	-\$4.535	-\$1.954	\$1.014	\$4.427	\$8.353	\$12.867	\$18.058	\$24.029	\$30.894
Tasa Descuento	7%	1,07	1,14	1,23	1,31	1,40	1,50	1,61	1,72	1,84	1,97
<b>HOY</b>	-\$20.088	-\$6.336	-\$3.961	-\$1.595	\$774	\$3.157	\$5.566	\$12.867	\$10.510	\$13.070	\$15.705
Unidades Vendidas	-	475	546	628	722	831	955	1099	1264	1453	1671

**\$ 29.667,91 Valor Actual Neto**  
15% TIR

precio venta \$ 42,00

## ANEXO VIII. FICHA DE DATOS DEL DIODO 1N4148



**1N4148**

Vishay Semiconductors

### Small Signal Fast Switching Diodes



#### FEATURES

- Silicon epitaxial planar diode
- Electrically equivalent diodes: 1N4148 - 1N914
- Material categorization: for definitions of compliance please see [www.vishay.com/doc?99912](http://www.vishay.com/doc?99912)



**RoHS**  
COMPLIANT  
HALOGEN  
**FREE**

#### APPLICATIONS

- Extreme fast switches

**DESIGN SUPPORT TOOLS** click logo to get started



#### MECHANICAL DATA

**Case:** DO-35 (DO-204AH)

**Weight:** approx. 105 mg

**Cathode band color:** black

**Packaging codes / options:**

TR/10K per 13" reel (52 mm tape), 50K/box

TAP/10K per ammpack (52 mm tape), 50K/box

PARTS TABLE				
PART	ORDERING CODE	TYPE MARKING	CIRCUIT CONFIGURATION	REMARKS
1N4148	1N4148-TAP or 1N4148TR	V4148	Single	Tape and reel / ammpack

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T <sub>amb</sub> = 25 °C, unless otherwise specified)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Repetitive peak reverse voltage		V <sub>RRM</sub>	100	V
Reverse voltage		V <sub>R</sub>	75	V
Peak forward surge current	t <sub>p</sub> = 1 μs	I <sub>FSM</sub>	2	A
Repetitive peak forward current		I <sub>FRM</sub>	500	mA
Forward continuous current		I <sub>F</sub>	300	mA
Average forward current	V <sub>R</sub> = 0	I <sub>F(AV)</sub>	150	mA
Power dissipation	l = 4 mm, T <sub>L</sub> = 45 °C	P <sub>tot</sub>	440	mW
	l = 4 mm, T <sub>L</sub> ≤ 25 °C	P <sub>tot</sub>	500	mW

THERMAL CHARACTERISTICS (T <sub>amb</sub> = 25 °C, unless otherwise specified)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Thermal resistance junction to ambient air	l = 4 mm, T <sub>L</sub> = constant	R <sub>thJA</sub>	350	K/W
Junction temperature		T <sub>J</sub>	175	°C
Storage temperature range		T <sub>stg</sub>	-65 to +150	°C

Rev. 1.4, 06-Jul-17

1

Document Number: 81857

For technical questions within your region: [DiodesAmericas@vishay.com](mailto:DiodesAmericas@vishay.com), [DiodesAsia@vishay.com](mailto:DiodesAsia@vishay.com), [DiodesEurope@vishay.com](mailto:DiodesEurope@vishay.com)  
THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT  
ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT [www.vishay.com/doc?91000](http://www.vishay.com/doc?91000)

Para más información consultar: <https://www.vishay.com/docs/81857/1n4148.pdf>

# ANEXO IX. FICHA DE DATOS DEL TRANSISTOR PNP

## 2N3906



**2N3906**

### SMALL SIGNAL PNP TRANSISTOR

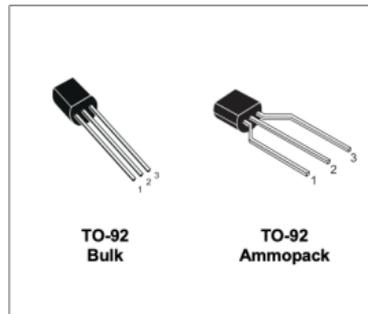
PRELIMINARY DATA

Ordering Code	Marking	Package / Shipment
2N3906	2N3906	TO-92 / Bulk
2N3906-AP	2N3906	TO-92 / Ammopack

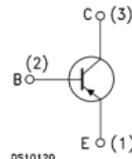
- SILICON EPITAXIAL PLANAR NPN TRANSISTOR
- TO-92 PACKAGE SUITABLE FOR THROUGH-HOLE PCB ASSEMBLY
- THE NPN COMPLEMENTARY TYPE IS 2N3904

#### APPLICATIONS

- WELL SUITABLE FOR TV AND HOME APPLIANCE EQUIPMENT
- SMALL LOAD SWITCH TRANSISTOR WITH HIGH GAIN AND LOW SATURATION VOLTAGE



#### INTERNAL SCHEMATIC DIAGRAM



#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_{CB0}$	Collector-Base Voltage ( $I_E = 0$ )	-60	V
$V_{CE0}$	Collector-Emitter Voltage ( $I_B = 0$ )	-40	V
$V_{EB0}$	Emitter-Base Voltage ( $I_C = 0$ )	-6	V
$I_C$	Collector Current	-200	mA
$P_{tot}$	Total Dissipation at $T_C = 25^\circ\text{C}$	625	mW
$T_{stg}$	Storage Temperature	-65 to 150	$^\circ\text{C}$
$T_J$	Max. Operating Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$

February 2003

1/5

Para más información consultar:

<https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/2N3906.pdf>

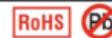
## ANEXO X. OTROS COMPONENTES CONSULTADOS

### Diodo MBR735



**MBR735/MBRB735**  
**MBR745/MBRB745**

Technical Data  
Data Sheet N0720, Rev. A



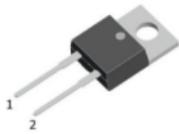
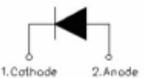
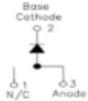
#### **MBR735/MBR745/MBRB735/MBRB745** **SCHOTTKY RECTIFIER**

##### Features

- 150°C T<sub>J</sub> operation
- High purity, high temperature epoxy encapsulation for enhanced mechanical strength and moisture resistance
- Low forward voltage drop
- High frequency operation
- Guard ring for enhanced ruggedness and long term reliability
- This is a Pb – Free Device
- All SMC parts are traceable to the wafer lot
- Additional testing can be offered upon request

##### Applications

- Switching power supply
- Redundant power subsystems
- Converters
- Free-Wheeling diodes
- Reverse battery protection

MBR...	MBRB...
	
	
TO-220AC	D <sup>2</sup> PAK

##### Maximum Ratings:

Characteristics	Symbol	Condition	Max.	Units
Peak Repetitive Reverse Voltage	V <sub>RRM</sub>	-	35	(MBR735)
Working Peak Reverse Voltage	V <sub>RWM</sub>	-	45	(MBR745)
DC Blocking Voltage	V <sub>R</sub>	-		V
Average Rectified Forward Current	I <sub>F (AV)</sub>	50% duty cycle @T <sub>C</sub> =131°C, rectangular wave form	7.5	A
Peak One Cycle Non-Repetitive Surge Current	I <sub>FSM</sub>	8.3ms, Half Sine pulse	150	A
Peak Repetitive Reverse Surge Current	I <sub>RRM</sub>	2.0 μ sec 1.0KHz	1.0	A

- China - Germany - Korea - Singapore - United States •
- <http://www.smc-diodes.com> - [sales@smc-diodes.com](mailto:sales@smc-diodes.com) •

Para más información consultar: <https://www.smc-diodes.com/propdf/MBR735-745%20MBRB735-745%20N0720%20REV.A.pdf>

## MOSFET STP130N6F7



### STP130N6F7

N-channel 60 V, 4.2 mΩ typ., 80 A STripFET™ F7  
Power MOSFET in a TO-220 package

Datasheet - production data

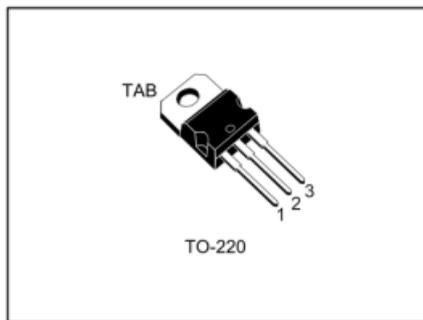
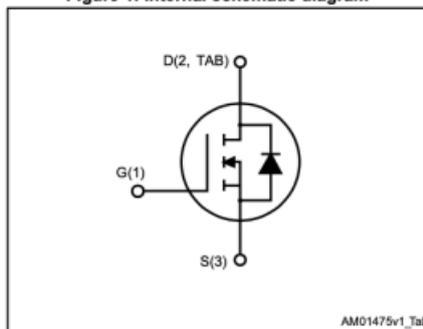


Figure 1: Internal schematic diagram



#### Features

Order code	V <sub>DS</sub>	R <sub>DS(on)</sub> max.	I <sub>D</sub>	P <sub>TOT</sub>
STP130N6F7	60 V	5.0 mΩ	80 A	160 W

- Among the lowest R<sub>DS(on)</sub> on the market
- Excellent figure of merit (FoM)
- Low C<sub>rss</sub>/C<sub>iss</sub> ratio for EMI immunity
- High avalanche ruggedness

#### Applications

- Switching applications

#### Description

This N-channel Power MOSFET utilizes STripFET™ F7 technology with an enhanced trench gate structure that results in very low on-state resistance, while also reducing internal capacitance and gate charge for faster and more efficient switching.

Table 1: Device summary

Order code	Marking	Package	Packing
STP130N6F7	130N6F7	TO-220	Tube

Para más información consultar: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stp130n6f7.pdf>

## **ANEXO XI. REFLEXIÓN ACERCA DEL ALINEAMIENTO DEL PROYECTO CON LOS ODS**

Con la realización de este apéndice se quiere dar a conocer la importancia de la iluminación LED para el medioambiente y su relación directa con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

La iluminación LED implica un gran paso adelante hacia un mundo más sostenible y favorable para el medioambiente. Esto es una de las principales ventajas de los LED, ya que, al contrario que las bombillas fluorescentes, los LED no contienen mercurio, lo cual facilita su reciclaje. Además, los LED tienen una duración mucho mayor y un consumo energético mucho menor, lo que hace que se fabriquen menos dispositivos. Todo esto convierte a los LED en una tecnología mucho más favorable para el medio ambiente.

Todos estos beneficios se alinean con los ODS números 7 y 12, como se ha visto en el Capítulo 3. Dichos ODS tienen tres objetivos principales:

1. Garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles. Objetivo que los LED cumplen, ya que al ser una tecnología mucho más barata y duradera se podría implementar en unos años a nivel mundial.
2. Aumentar la proporción de energías renovables empleadas. Objetivo que se cumple con la implementación de los LED por ser una tecnología reciclable. Además, se podrían llevar a cabo trabajos para implementar esta tecnología junto con energías renovables como paneles solares según se ha analizado en el Capítulo 11.
3. Mejorar la eficiencia energética. Este objetivo lo cumplen los LED, siendo la mejora de la eficiencia energética una de sus mayores virtudes como se ha visto en el Capítulo 2.

Por tanto, se observa cómo tanto la tecnología LED como este proyecto se alinean y cumplen con las pautas a seguir marcadas para ayudar al desarrollo sostenible de las nuevas tecnologías.

En conclusión, este proyecto es un indicador de que la tecnología LED es el método de iluminación del futuro, cumpliendo tanto con los requerimientos energéticos de la sociedad actual como con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.