

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeroespacial

Implementación de un sistema para pruebas
experimentales de convertidores electrónicos básicos
de potencia con aplicaciones en navegación aérea

Autor: Amador Martínez Rafiq

Tutor: Marta Laguna García

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Aeroespacial

**Implementación de un sistema para pruebas
experimentales de convertidores electrónicos
básicos de potencia con aplicaciones en navegación
aérea**

Autor:

Amador Martínez Rafiq

Tutor:

Marta Laguna García

Profesora titular

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Carrera: Implementación de un sistema para pruebas experimentales de convertidores electrónicos básicos de potencia con aplicaciones en navegación aérea

Autor: Amador Martínez Rafiq

Tutor: Marta Laguna García

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi padre, madre y hermana

A mi tutora

Agradecimientos

Gracias a todas las personas que me ayudaron a realizar este proyecto.

Gracias a mis padres por apoyarme en mis decisiones y ayudarme a hacerlo posible.

Gracias a la gente del lab., a Marta y a Fran por aguantarme y echarme una mano siempre que pudieron.

Gracias a Wally por mantenerme alejado de la hipotermia de las calles.

Y gracias a esa persona que me calmó, me animó y me entendió cuando hizo falta.

Amador Martínez Rafiq

Sevilla, 2019

Resumen

En varios entornos de la técnica se está avanzando hacia soluciones que empleen más sistemas eléctricos, incluido el sector de la aeronáutica. Dentro de estos avances encontramos un importante papel de la electrónica de potencia. Esta es una rama de la electrónica de la cual es complicado realizar prácticas en la universidad. Esto se debe a la peligrosidad de éstas por las elevadas tensiones y corrientes que se utilizan.

Con este proyecto lo que pretendemos es realizar desde cero unos equipos con los que poder realizar dichas prácticas de manera segura. En particular vamos a realizar los equipos necesarios para probar 3 convertidores DC-DC diferentes.

Teniendo en mente la idea de mantener unos niveles de seguridad aceptables se ha llevado a cabo tanto el hardware como el software necesario para poner en funcionamiento los convertidores comentados.

Como novedad encontramos el uso de equipo de la empresa llamada dSPACE, en concreto la DS5202. Este equipo nos permite desarrollar de manera muy rápida e intuitiva al proporcionarnos entradas, salidas y su propio software de interfaz.

Abstract

In various technical environments, progress is being made towards solutions that employ more electrical systems, including the aeronautics sector. Within these developments we find an important role for power electronics. This is a branch of electronics of which it is complicated to perform laboratory practices in the university. This is due to the danger of these by the high voltages and currents that are used.

With this project we intend to make from scratch some equipment with which to perform such practices safely. In particular, we are going to make the necessary equipment to test 3 different DC-DC converters.

Keeping the idea of maintaining acceptable safety levels in mind, we have carried out both the hardware and the software necessary to put the aforementioned converters into operation.

As a novelty we find the use of equipment from the company called dSPACE, specifically the DS5202. This equipment allows us to develop very quickly and intuitively by providing inputs, outputs and its own interface software.

Antecedentes

En este trabajo se ha utilizado material previamente realizados por otros compañeros. Fue una gran ventaja tener este esfuerzo ya realizado por mi compañero Fran, Francisco Javier González Rodríguez, y otras personas del departamento.

En cuanto al trabajo en sí, fue variado. Para empezar la parte de simulación e interfaz de dSPACE estaban comenzadas. Además de esto teníamos unos diseños iniciales de placas que contenían algunos de los componentes que pretendíamos utilizar y en las cuales nos apoyamos para realizar un correcto y eficiente diseño de las que usaremos en este trabajo.

Introducción

En este trabajo vamos a desarrollar un convertidor DC-DC, basado en 3 esquemas distintos: Buck, Boost y Buck-Boost¹. Se van a implementar de forma que cada componente sea modular e intercambiable, de modo que con un mismo conjunto de componentes se puedan probar y estudiar las 3 configuraciones distintas. Vamos a recurrir a distintas técnicas que incluye el diseño de PCBs (*Printed Circuit Boards*) por ordenador, la fabricación de estas mismas e incluso impresión en 3D, que abordaremos en las distintas secciones.

El diseño e interfaz están pensado en gran medida para ser muy intuitivos y fáciles de operar. Esto ayudará para una fácil comprensión de los distintos montajes y poder profundizar en su funcionamiento. Será de gran ayuda a la hora de realizar prácticas de Laboratorio sobre esta temática.

A su vez sirve para entender una tecnología cada vez más presente en todo el sector aeronáutico. Conforme pasan los años los aviones, UAVs (*Unmanned Aircraft Vehicles*) y demás vehículos aéreos van adquiriendo más sistemas eléctricos y, por lo tanto, más potencia eléctrica instalada. Todos estos cambios se han manifestado en una iniciativa presente llamada “MEA” (*More Electric Aircraft*).

Fue una iniciativa adoptada tanto por las grandes empresas del sector aeronáutico en cuanto a fabricación de aeronaves como por muchas de las empresas que le suministran equipos, software y soporte técnico. Lo que se pretende es optimizar el rendimiento de la aeronave, aumentar la fiabilidad de los suministros, reducir los costes de operación y de mantenimiento, al igual que las emisiones de gases.

Para conseguir aumentar la presencia de sistemas eléctricos sin llegar a sustituir los motores de combustión (por ahora), se sustituyen los equipos que utilizasen fuentes de energía tales como hidráulica, neumática y mecánica. Implementando actuadores electrohidrostáticos y sistemas de generación y conversión de energía.

Otra tendencia en el sector que está relacionada con el aumento de componentes eléctricos son los llamados “*Fly by wire*” y “*Power by wire*”. La primera de éstas consiste en que las órdenes, señales y actuaciones en las superficies de control y en los motores no es realizada mediante un enlace mecánico (un cable, una cadena, engranajes...), sino mediante bus de datos. Las acciones del piloto en la palanca son transmitidas a la computadora de control de vuelo y, mientras queden dentro de la envolvente de funcionamiento, esta las valida y las hace llegar a los actuadores hidráulicos. La segunda se trata de sustituir estos actuadores hidráulicos y sus correspondientes sistemas, bombas y válvulas, por sistemas electrohidráulicos como los previamente comentados.

Ejemplo 0–1. *Uno de los mejores ejemplos de esto es el A320 de Airbus, primer avión en implementar la tecnología “Fly by wire” y haciendo grandes avances a lo largo de sus actualizaciones y distintas versiones. Y en cuanto a “Power by wire” tenemos el A380, de Airbus también, que presenta este avance en parte debido a su gran tamaño.*

Una materialización de esta tendencia hacia aumentar los sistemas eléctricos también la podemos ver en otra de las grandes empresas como puede ser Boeing, en este caso una compañía americana. Se trata del Boeing 787, una aeronave en dar un gran paso hacia el MEA. En el B787 no encontramos sistema de sangrado de aire de los motores como tradicionalmente se ha hecho para el circuito neumático u otros usos secundarios. Ha sido sustituido por sistemas eléctricos, aumentando los requerimientos de potencia eléctrica de la aeronave. Así, ha sido rediseñada completamente la distribución del cableado, al igual que se ha aumentado considerablemente la potencia de los generadores, pasando de una potencia típica de unos 120kVA por motor (240kVA en total) a

¹ Buck es -----, Boost es cambio ----, Buck-Boost es -----

tener 2 generadores de 250kVA en cada motor del 787 (1000kVA en total).



Figura 0-1. A380

[Imagen de Flickr](#)

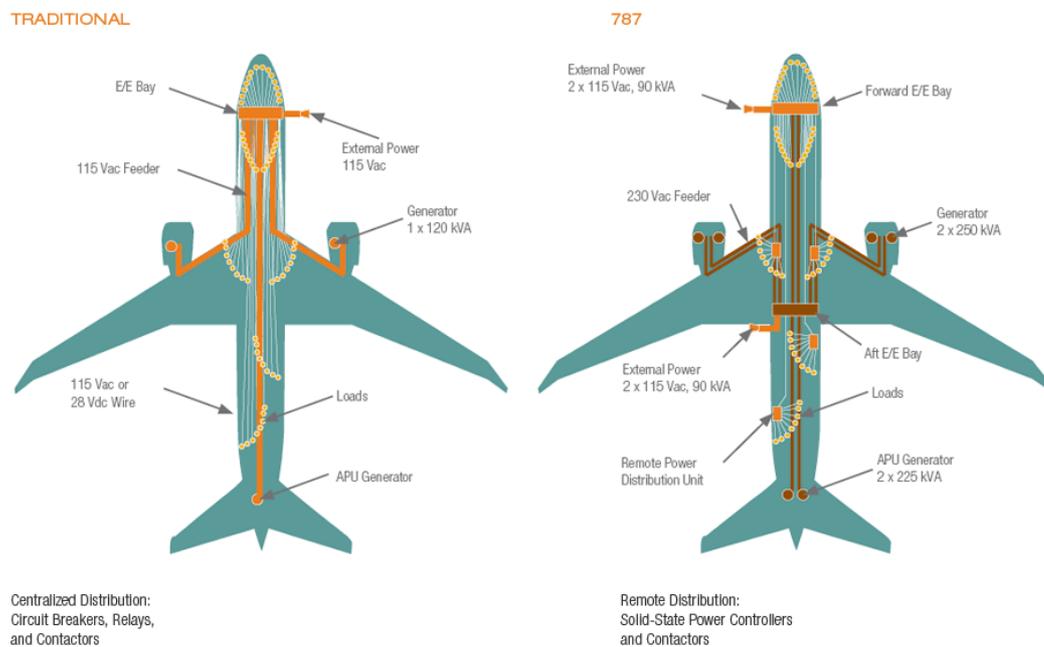


Figura 0-2. Innovación sistema eléctrico B787

[Imagen de Boeing](#)

Los voltajes más típicos y extendidos en la industria son de 115 VAC (*Voltage on Alternating Current*²) y 28

² Voltaje de corriente Alterna

VDC (*Voltage on Direct Current*³). Sin embargo, en este caso encontramos una instalación de 235 VAC y de ± 270 VDC. Esto provoca de nuevo un aumento en la necesidad de equipos de electrónica de potencia y por lo tanto de convertidores DC-DC como el que nos ocupa en nuestro caso.

³ Voltaje de corriente Continua

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Antecedentes	xv
Introducción	xvii
Índice	xxi
Índice de Tablas	xxiii
Índice de Figuras	xxv
Notación	xxxii
1 Nociones de electrónica	1
1.1 <i>Convertidores de potencia</i>	1
2 Descripción del Circuito	2
2.1 <i>Conocimientos previos</i>	2
2.2 <i>BOOST</i>	3
2.3 <i>BUCK</i>	5
2.4 <i>BUCK-BOOST</i>	6
2.5 <i>INTERRUPTOR</i>	7
3 Implementación	8
3.1 <i>Cálculo de los valores de los componentes</i>	8
3.2 <i>Diseño del circuito</i>	8
3.2.1 Resistencia	8
3.2.2 Condensador	9
3.2.3 Bobina	9
3.2.4 Diodo	10
3.2.5 MOSFET	11
3.2.6 Driver	12
3.2.7 Fibra óptica	13
3.2.8 Bloque de medidas	15
4 Realización de los circuitos impresos	18
4.1 <i>Circuitos Impresos</i>	18
4.1.1 Tipos de montaje	19
4.1.2 Conexiones verticales, Vías	21
4.2 <i>Métodos de Fabricación</i>	22
4.3 <i>Diseño</i>	23
4.3.1 Bloque de medidas	23
4.3.2 Placa del driver y Mosfet	27
4.4 <i>Fabricación y Testeo</i>	29
4.4.1 Resultados Placas	29

5	Plataformas de montaje	35
5.1	<i>Características comunes a todas las plataformas</i>	36
5.2	<i>Diseño de la caja para medidas</i>	38
5.3	<i>Diseño de la caja para la placa de disparos</i>	39
5.4	<i>Diseño de la caja para el diodo</i>	39
5.5	<i>Diseño de la caja para el condensador</i>	40
5.6	<i>Diseño de la caja para la bobina</i>	41
5.7	<i>Diseño de la caja para la resistencia</i>	42
5.8	<i>Diseño de las etiquetas</i>	43
6	Fabricación y montaje de los bloques	45
6.1	<i>Listado de herramientas utilizadas</i>	45
6.2	<i>Fabricación por impresión 3D</i>	45
6.3	<i>Montaje del bloque de medidas</i>	47
6.4	<i>Montaje del bloque para los disparos</i>	51
6.5	<i>Montaje del bloque para el diodo</i>	53
6.6	<i>Montaje del bloque para la bobina</i>	55
6.7	<i>Montaje del bloque para el condensador</i>	56
6.8	<i>Montaje del bloque para la resistencia</i>	57
6.8.1	<i>Pruebas de temperatura y pruebas destructivas</i>	58
6.8.2	<i>Montaje final</i>	62
6.9	<i>Montaje de los cables y su caja</i>	65
7	Pruebas previas	67
7.1	<i>Pruebas del bloque de medidas</i>	67
7.2	<i>Pruebas del bloque de disparos</i>	70
7.3	<i>Prueba del bloque de diodo</i>	71
8	Puesta en marcha	73
8.1	<i>Modelo de Simulink y programación</i>	73
8.2	<i>Interfaz para el usuario</i>	75
8.3	<i>Pruebas de la configuración de reductor (Buck)</i>	76
8.4	<i>Pruebas de la configuración de elevador (Boost)</i>	79
8.5	<i>Pruebas de la configuración Reductor-Elevador (Buck-Boost)</i>	83
9	Estudio económico	87
9.1	<i>Costes de impresión 3D</i>	87
10	Resultados y Trabajos futuros	89
10.1	<i>Resultados obtenidos</i>	89
10.2	<i>Trabajos futuros</i>	89
	Referencias	90
	Glosario	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3–1. Características claves	11
Tabla 3–2. Características del ISO5852S	12
Tabla 3–3. Configuración de los Pines, Emisor Tx	15
Tabla 3–4. Configuración de los Pines, Receptor Rx	15
Tabla 4–1. Componentes Medidor Voltaje	23
Tabla 4–2. Componentes Medidor Corriente	25
Tabla 4–3. Componentes Medidor Voltaje-Corriente	26
Tabla 4–4. Componentes Placa Driver	27
Tabla 6–1. Impresiones de la caja de medidas	47
Tabla 6–2. Elementos empleados	49
Tabla 6–3. Impresiones de la caja de medidas	51
Tabla 6–4. Elementos empleados	52
Tabla 6–5. Impresiones de la caja de medidas	53
Tabla 6–6. Elementos empleados	54
Tabla 6–7. Impresiones de la caja de medidas	55
Tabla 6–8. Elementos empleados	55
Tabla 6–9. Impresiones de la caja de medidas	56
Tabla 6–10. Elementos empleados	57
Tabla 6–11. Impresiones de la caja de medidas	65
Tabla 6–12. Impresiones de la caja de los cables en sus distintas partes	66
Tabla 9–1. Recopilación datos impresión en total	87
Tabla 9–2. Recopilación datos materiales p lacas y componentes	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 0-1. A380	xviii
Figura 0-2. Innovación sistema eléctrico B787	xviii
Figura 2-1 Ejemplos de distintas señales PWM Referencia	2
Figura 2-2 Diagrama eléctrico del circuito Boost.	3
Figura 2-3 Diagrama del circuito Boost en modo On	4
Figura 2-4 Diagrama del circuito Boost en modo Off	5
Figura 2-5 Diagrama eléctrico del circuito Buck	5
Figura 2-6 Diagrama del Buck en modo On y Off, respectivamente.	5
Figura 2-7 Diagrama eléctrico del circuito Buck-Boost	6
Figura 2-8 Diagrama del Buck-Boost en modo On y Off, respectivamente.	7
Figura 2-9 Esquema interruptor	7
Figura 3-1 Resistencia a utilizar vista superior	8
Figura 3-2 Resistencia a utilizar vista inferior	9
Figura 3-3 Condensador empleado	9
Figura 3-4 Bobina a emplear en el proyecto	10
Figura 3-5 Medición de la bobina.	10
Figura 3-6 MOSFET que se empleara para el montaje	11
Figura 3-7 Características de la salida	12
Figura 3-8 Driver ISO5852S	13
Figura 3-9 Salidas de Fibra óptica de la dSPACE	14
Figura 3-10 Receptor de fibra óptica que se utilizará	14
Figura 3-11 Emisor de fibra óptica que utilizaremos	14
Figura 3-12 Sensor de Voltaje, parte superior	15
Figura 3-13 Sensor de Voltaje, parte inferior	16
Figura 3-14 Sensor de corriente	17
Figura 4-1 Ejemplo de circuito impreso con algunos componentes, el material conductor en un verde más claro. https://pixabay.com/photos/canon-eos-ef-s-17-85-is-lens-1891685/	18
Figura 4-2 Ejemplo de placa multicapa, donde encontramos también vías. https://www.sdy-pcb.com/news/company/multilayer-pcb-layer-stackup.html	18
Figura 4-3 Esquema montaje Through Hole, https://resources.altium.com/pcb-design-blog/why-use-through-hole-technology-in-pcb-design	19
Figura 4-4 Ejemplo de componente pensado para tecnología <i>through hole</i> , en este caso un circuito integrado. https://pixabay.com/photos/integrated-circuit-electronics-421816/	19
Figura 4-5 Acabado final de componentes <i>through hole</i> , terminales de conexión al otro lado, una vez soldados. https://pixabay.com/photos/cyber-security-network-internet-2366908/	19

Figura 4-6 diagrama del montaje de un componente SMD, https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/surface-mount-technology-smd-smt/what-is-smt-primer-tutorial.php	20
Figura 4-7 Comparación de condensadores SMD a la izquierda y 2 THM a la derecha https://en.wikipedia.org/wiki/File:Photo-SMDCapacitors.jpg	20
Figura 4-8 Ejemplo de componentes SMD ya montados, incluyendo un circuito integrado https://pixabay.com/photos/pcb-printed-circuit-board-4002378/	21
Figura 4-9 Tipos de vías en un PCB, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Via_Types.svg	21
Figura 4-10 Diagrama del proceso de fotograbado, siendo nuestro caso https://en.wikipedia.org/wiki/File:Photoresist_of_Photolithography.png	22
Figura 4-11 Esquemático del sensor de voltaje	24
Figura 4-12 Placa del sensor de Voltaje, con todas las pistas colocadas y los orificios de montaje	24
Figura 4-13 Principales elementos señalados del sensor de voltaje	24
Figura 4-14 Esquemático Corriente	25
Figura 4-15 Placa Corriente	25
Figura 4-16 Placa corriente explicada	26
Figura 4-17 Placa Múltiple	26
Figura 4-18 Esquema funcionamiento	27
Figura 4-19 Esquemático Driver	28
Figura 4-20 Placa del driver finalizada	29
Figura 4-21 Fitolito Placa de Medidas en papel vegetal	30
Figura 4-22 Placa de Medidas sin soldar	30
Figura 4-23 Placa de medidas con los componentes añadidos	30
Figura 4-24 Fitolito de la placa del driver, v1	31
Figura 4-25 Placa de Driver sin componentes, v1, Top	31
Figura 4-26 Placa de Driver sin componentes, v1, Bottom	31
Figura 4-27 Fitolito de la placa del driver, v2	32
Figura 4-28 Placa de Drivers sin componentes, v2, Top	32
Figura 4-29 Placa de Drivers sin componentes, v2, Bottom	32
Figura 4-30 Placa de Drivers con componentes, v2, Top	33
Figura 4-31 Placa de Drivers con componentes, v2, Bottom	33
Figura 4-32 Placa del Diodo, Top	33
Figura 4-33 Placa del Diodo, Bottom	34
Figura 5-1 Versión inicial del primer diseño	35
Figura 5-2 Segunda versión de la caja inicial	36
Figura 5-3 Conector mecánico y eléctrico	36
Figura 5-4 Detalle de Iniciales en una de las cajas	37
Figura 5-5 Detalle del patrón utilizado para la ventilación (1)	37
Figura 5-6 Detalle del patrón utilizado para la ventilación (2)	37
Figura 5-7 Detalle visto desde debajo de un ejemplo de abertura inferior	38
Figura 5-8 Vista general de la caja para medidas	38

Figura 5-9 Detalle conexiones banana	39
Figura 5-10 Vista general de la caja del driver	39
Figura 5-11 Vista general de la caja para el diodo	40
Figura 5-12 Vista general de la caja del condensador	40
Figura 5-13 Detalle de la señalización de polarización	41
Figura 5-14 Vista general caja de la bobina	41
Figura 5-15 Detalle de la parte inferior de la caja	42
Figura 5-16 Primera versión de la caja	42
Figura 5-17 Versión final de la caja	43
Figura 5-18 Etiqueta para las cajas de medidas	43
Figura 5-19 Etiqueta para la caja de disparos	44
Figura 5-20 Etiqueta para la caja de disparos, vista lateral	44
Figura 6-1 Impresora Prusa MK3	46
Figura 6-2 Impresora en proceso de imprimir la caja para la resistencia	46
Figura 6-3 Impresora en proceso de imprimir la caja para las medidas	47
Figura 6-4 Impresora realizando la caja de medidas	48
Figura 6-5 Caja de medidas impresa vista de frente	48
Figura 6-6 Caja de medidas impresa, vista lugar conectores	49
Figura 6-7 Bloque de medidas finalizado a falta de la tapa de policarbonato	50
Figura 6-8 Bloque de medidas finalizado, vista de frente	50
Figura 6-9 Bloque de medidas finalizado, vista de lateral	51
Figura 6-10 Bloque de medidas finalizada, vista inferior	51
Figura 6-11 Bloque de disparos finalizado, vista frontal	52
Figura 6-12 Bloque de disparos finalizado, vista lateral	52
Figura 6-13. Bloque de disparos finalizado, vista lateral	53
Figura 6-14. Bloque de disparos finalizado, vista en planta sin tapa	53
Figura 6-15. Bloque de diodo terminado, vista frontal	54
Figura 6-16. Bloque de diodo terminado, vista lateral	54
Figura 6-17. Bloque de diodo terminado, vista en planta	55
Figura 6-18. Bloque de bobina terminado, vista frontal	55
Figura 6-19. Bloque de bobina terminado, vista lateral	56
Figura 6-20. Bloque de bobina terminado, vista inferior de la sujeción	56
Figura 6-21 Bloque de condensador finalizado, vista frontal	57
Figura 6-22 Bloque de condensador finalizado, vista lateral	57
Figura 6-23 Imagen termográfica del bloque en planta durante la prueba a 25V	58
Figura 6-24 Imagen termográfica del bloque visto desde abajo durante la prueba a 25V	58
Figura 6-25 Imagen termográfica del bloque en planta durante la prueba a 50V	59
Figura 6-26 Imagen termográfica del bloque visto desde abajo durante la prueba a 50V	59
Figura 6-27 imagen termográfica del bloque en planta durante la prueba a 50V	60
Figura 6-28 Imagen termográfica del bloque en planta durante la prueba a 75V	60

Figura 6-29 Imagen termográfica del bloque en planta durante la prueba a 75V	61
Figura 6-30 Caja de la resistencia destruida por la temperatura alcanzada	61
Figura 6-31 Caja de la resistencia destruida por la temperatura alcanzada	62
Figura 6-32 Resistencia conectada a 100V tras 10 minutos	62
Figura 6-33 Diagrama para el montaje final de la resistencia	63
Figura 6-34 Vista en planta del bloque de la resistencia ya finalizado	63
Figura 6-35 Vista inferior del bloque de la resistencia ya finalizado	64
Figura 6-36 Vista lateral del bloque de la resistencia ya finalizado	64
Figura 6-37 Caja para el almacenamiento de los cables abierta	65
Figura 6-38 Caja para el almacenamiento de cables cerrada	65
Figura 7-1 Montaje realizado para la prueba del sensor de tensión.	67
Figura 7-2 Diagrama de conexión para la prueba de medición de voltaje	68
Figura 7-3 Placa M2C	68
Figura 7-4 Prueba del sensor de voltaje a 0V	68
Figura 7-5 Prueba del sensor de voltaje a 4V	69
Figura 7-6 Prueba del sensor de voltaje a 7V	69
Figura 7-7 Prueba del sensor de voltaje a 14V	69
Figura 7-8 DSP ya disponible en el laboratorio	70
Figura 7-9 Señal de disparo que llega a la placa	70
Figura 7-10 Señal de disparo a la salida del driver	71
Figura 7-11 Experimento para probar el funcionamiento del diodo	71
Figura 7-12 Resultado de la prueba funcionando como diodo	71
Figura 8-1 Modelo simulink utilizado en su nivel más alto.	73
Figura 8-2 Programación para establecer la condición de seguridad	74
Figura 8-3 Configuración de los bloques de entradas, ADC.	74
Figura 8-4 Extracto documentación del equipo	74
Figura 8-5 Interfaz de ControlDesk de la que se partía	75
Figura 8-6 Ejemplo de Interfaz una vez realizados los cambios.	75
Figura 8-7 Resultado del cambio de la referencia de duty=0 a 0.5	76
Figura 8-8 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio	77
Figura 8-9 Resultado del cambio de la referencia de duty=0.75 a Parado (<i>Stop</i>)	77
Figura 8-10 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio	77
Figura 8-11 Resultado del cambio de Parado a referencia de 5V	78
Figura 8-12 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio	78
Figura 8-13 Resultado del cambio de la referencia de 15V a Parado (<i>Stop</i>)	78
Figura 8-14 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio	79
Figura 8-15 Resultado del cambio de la referencia de duty=0 a 0.1	79
Figura 8-16 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio	80
Figura 8-17 Resultado del cambio de la referencia de duty=0.2 a 0.35	80
Figura 8-18 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio	80

Figura 8-19 Resultado del cambio de la referencia de 12V a 20V	81
Figura 8-20 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio	81
Figura 8-21 Resultado del cambio de la referencia de 25V a 35V	81
Figura 8-22 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio	82
Figura 8-23 Resultado del cambio de la referencia de 35V a 49V	82
Figura 8-24 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio	82
Figura 8-25 Resultado del cambio de la referencia de 49V a 50V y salto de emergencia	83
Figura 8-26 Resultado del cambio de la referencia de duty=0 a 0.1	83
Figura 8-27 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio y en permanente	84
Figura 8-28 Resultado del cambio de la referencia de duty=0.2 a 0.3	84
Figura 8-29 Resultado del cambio de la referencia de parado a 7V	84
Figura 8-30 Resultado del cambio de la referencia de 12V a 7V	85
Figura 8-31 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio	85
Figura 8-32 Resultado del cambio de la referencia de parado a 13V	85

Notación

A^*	Conjugado
c.t.p.	En casi todos los puntos
c.q.d.	Como queríamos demostrar
■	Como queríamos demostrar
e.o.c.	En cualquier otro caso
E	número e
Re	Parte real
Im	Parte imaginaria
Sen	Función seno
Tg	Función tangente
arctg	Función arco tangente
sen	Función seno
$\sin^x y$	Función seno de x elevado a y
$\cos^x y$	Función coseno de x elevado a y
Sa	Función sampling
sgn	Función signo
rect	Función rectángulo
Sinc	Función sinc
$\partial y \partial x$	Derivada parcial de y respecto
x°	Notación de grado, x grados.
$\Pr(A)$	Probabilidad del suceso A
SNR	Signal-to-noise ratio
MSE	Minimum square error
:	Tal que
<	Menor o igual
>	Mayor o igual
\	Backslash
\Leftrightarrow	Si y sólo si

1 NOCIONES DE ELECTRÓNICA

En este primer capítulo vamos a ver unas nociones básicas sobre algunos temas que vamos a ver en los capítulos siguientes.

1.1 Convertidores de potencia

En términos generales la electrónica de potencia se encarga de manejar y regular la cantidad de energía eléctrica suministrada a una carga. Normalmente suele ser la adaptación de una tensión e intensidad de entrada a los requerimientos que tenga la carga a su salida. La tecnología más ampliamente usada para realizar esta conversión es la electrónica de estado sólido con materiales semiconductores.

Esto se consigue gracias a los convertidores de potencia que se encargan de hacer esta tarea. En cuanto a una clasificación, podemos realizar la siguiente:

- Convertidor de AC a DC, también llamados rectificadores
- Convertidor de DC a AC, también llamados inversores
- Convertidor de AC a AC
- Convertidor de DC a DC

<https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/types-of-switching-dc-dc-converters>

2 DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO

En esta sección vamos a describir los distintos circuitos que vamos a tener en cuenta para este trabajo: Boost, Buck y Buck-Boost. Todas estas configuraciones presentan los mismos componentes: un interruptor (o un elemento que funcione como tal), una bobina, un condensador, un diodo y una prueba de carga que haría a modo de equipo al que los conectásemos.

2.1 Conocimientos previos

Antes de proceder con los siguientes puntos vamos a explicar algunos conceptos y términos los cuales serán necesarios para la comprensión de los próximos apartados.

El primero es una señal PWM (*Pulse-Width-Modulation*), una señal modulada que se basa en la variación de la relación entre el tiempo que está encendida y el tiempo que está apagada. A esta relación se la llama Duty Cycle, denominada y definida por:

$$D = \frac{t_{ON}}{T_s} \quad (1.1)$$

- t_{ON} : tiempo encendido (ver figura)
- T_s : Periodo de la señal ($=t_{ON} + t_{Off}$)

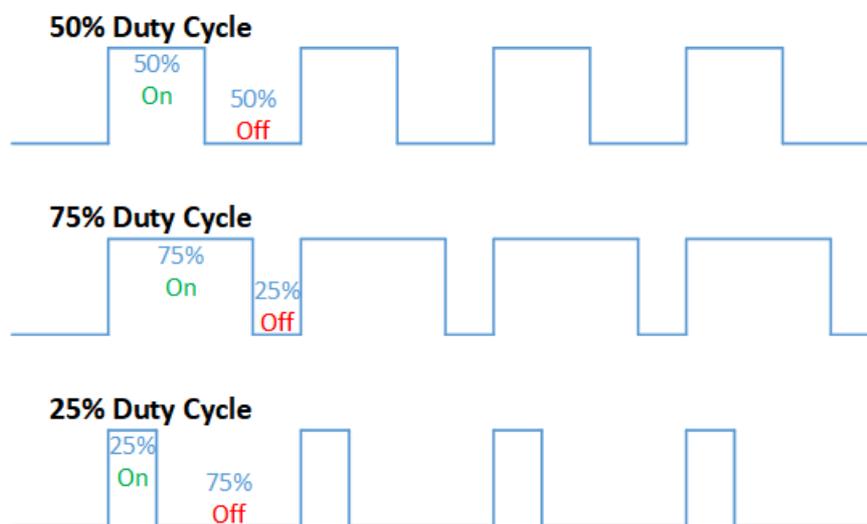


Figura 2-1 Ejemplos de distintas señales PWM [Referencia](#)

Como vemos por la definición y en la figura, cuanto mayor es D , mayor es el tiempo que está encendida la señal en un mismo periodo.

Es un tipo de modulación muy empleada en casi cualquier tipo de industria. Entre algunas de las aplicaciones podemos encontrar en la operación de Servos, haciendo que cada valor de D corresponda a una posición de este. También encontramos un amplio uso en el sector de telecomunicaciones, haciendo posible mandar datos asignando distintos valores de información a los distintos valores de D .

2.2 BOOST

Esta configuración sirve para obtener un voltaje igual o mayor a la salida, con la única pega de **disminuir la intensidad a la salida** debido a $P=U*I$. Es muy útil, por ejemplo, cuando tenemos baterías y necesitamos un voltaje mayor sin tener que hacer una agrupación de baterías muy grande, como puede ocurrir en el caso de los motores de un coche o un avión. Para la explicación de su funcionamiento nos vamos a ayudar de unos diagramas del circuito.

Este circuito tiene dos modos de funcionamiento: Modo Continuo y Modo Discontinuo. La diferencia de funcionamiento entre ellos es que en el modo discontinuo la corriente que pasa por la bobina llega a hacerse nula en algún momento. Esto se produce durante un periodo de conmutación del interruptor porque la bobina se descarga.

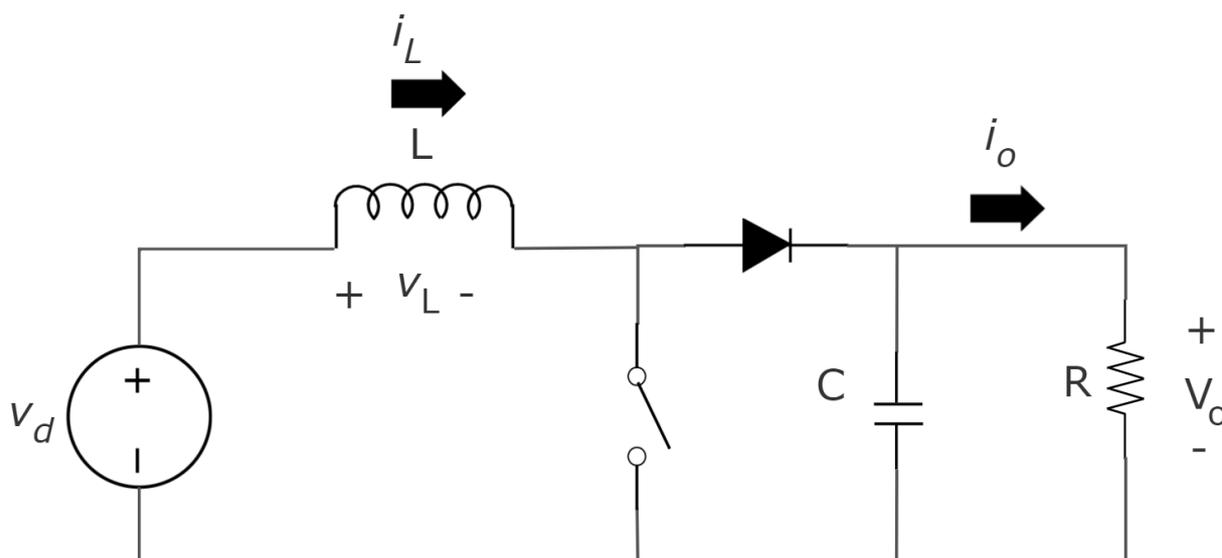


Figura 2-2 Diagrama eléctrico del circuito Boost.

Esto también provoca que cambie cómo se comporta el circuito y cambia la relación entre la tensión de entrada y la de salida.

Para obtener esta relación podemos observar los circuitos con el interruptor abierto y cerrado, al igual que el diagrama de los valores que toma la tensión en la bobina.

Como podemos ver la señal es periódica en el tiempo, se repite con el periodo de conmutación del interruptor, según la expresión $T_s = t_{on} + t_{off}$. La tensión de la bobina depende del estado del interruptor, lo que afecta también al estado del diodo. Observando los dos circuitos y aplicando ecuaciones de Kirchoff.

Integramos en el tiempo para un periodo de la señal

$$\int_0^{T_s} v_L dt = \int_0^{t_{on}} v_L dt + \int_{t_{on}}^{T_s} v_L dt = 0 \quad (1.2)$$

Esta integral es igual a 0 ya que las dos áreas de la señal, la del periodo ON y la del periodo OFF, son iguales. Esto viene asociado a que esta integral es igual al cambio total del flujo que pasa por la bobina. Debido a que es un proceso repetitivo en el tiempo, este cambio debe de ser nulo en un periodo completo de la señal.

De (1.2) y podemos obtener:

$$V_d t_{on} + (V_d - V_o) t_{off} = 0 \quad (1.3)$$

Dividiendo ambos términos por T_s reordenando la ecuación:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad (1.4)$$

Siendo:

- D = Duty cycle de la señal que conmuta el interruptor
- V_d = Tensión de entrada
- V_o = tensión en la carga
- T_s = periodo de la señal de conmutación
- L =inductancia de la bobina
- I_0 = corriente de la entrada

Obtenemos así la relación entre la tensión a la salida y a la entrada. Como podemos ver, asumiendo funcionamiento ideal de los componentes, solo depende de D .

Relación en continuo: $\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D}$

Relación en discontinuo: $\frac{V_o}{V_i} = \frac{1(V_i * T * D^2)}{2L * I_0}$

Como podemos ver, calcular el valor de salida de la tensión es más complicado si trabajamos en Modo Discontinuo, ya que además de requerir muchos más parámetros tiene otro inconveniente. Si no se controla la tensión V_0 en cada periodo de conmutación el circuito puede llegar a fallar de manera destructiva.

Para empezar, tenemos dos estados del circuito, cuando el interruptor está cerrado (Modo ON) y cuando el interruptor está abierto (Modo OFF).

Modo ON, primer ciclo: el interruptor está cerrado, creando un cortocircuito justo después de la bobina, y la corriente solo pasa por la bobina y por el interruptor antes de volver a la fuente. En este proceso en la bobina se almacena energía en el campo magnético mientras que en el resto del circuito no ocurre nada.

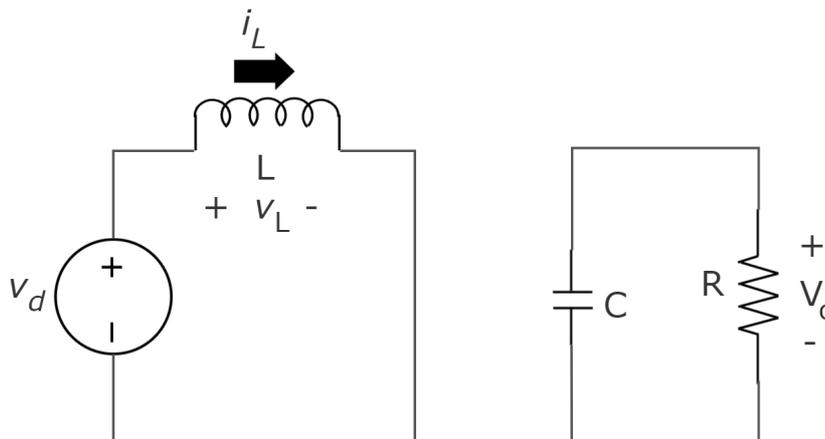


Figura 2-3 Diagrama del circuito Boost en modo On

Modo OFF: interruptor abierto. Al abrirse el interruptor se produce una disminución brusca en la corriente que pasa por la bobina lo que provoca que se origine un voltaje contrario al que teníamos en el estado anterior, debido a la propia naturaleza de la bobina de oponerse a los cambios repentinos de la corriente que la atraviesa. La corriente circula por la bobina y llega al resto del circuito haciendo que el diodo conduzca. El condensador se carga a la tensión $V_i + V_L$ a la misma vez que llega esa misma tensión a la carga. Estamos despreciando la pequeña caída de tensión del diodo cuando conduce.

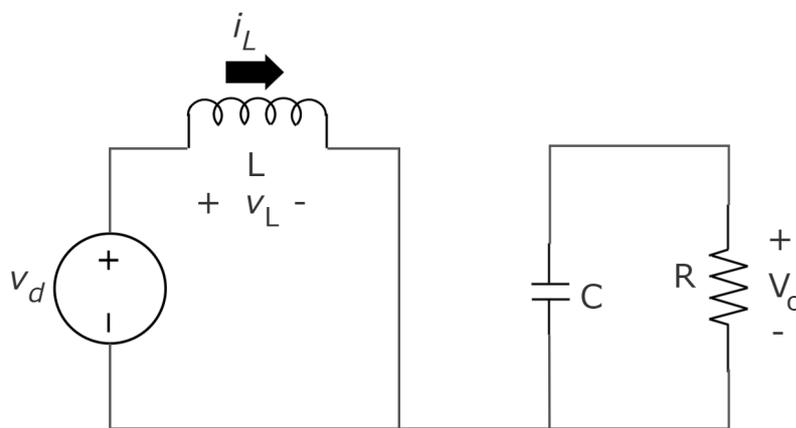


Figura 2-4 Diagrama del circuito Boost en modo Off

Modo ON, segundo ciclo y siguientes: en este paso, se vuelve a cerrar el interruptor. La bobina se vuelve a cargar de energía magnética. En la otra parte del circuito el condensador se había cargado y por lo tanto mantiene la carga a la tensión $V_i + V_L$, aunque va disminuyendo debido a que el condensador se va descargando. Esta disminución es pequeña ya que el periodo de tiempo que transcurre hasta que se vuelve a abrir el interruptor es corto en comparación con el que tarda en descargarse el condensador.

2.3 BUCK

El circuito Buck se trata de lo siguiente:

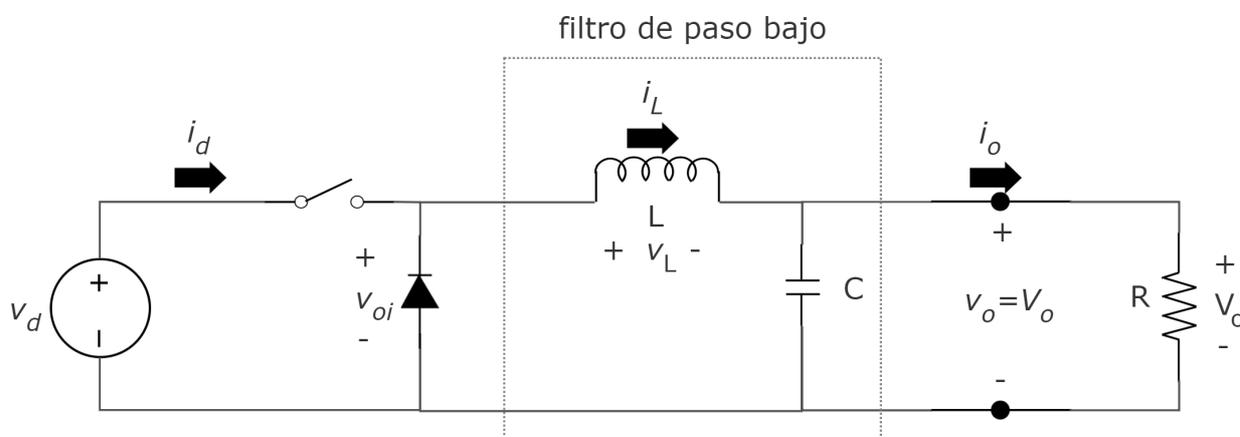


Figura 2-5 Diagrama eléctrico del circuito Buck

Como el circuito anterior vamos a estar operando en Modo Continuo, esto implica lo mismo, que la corriente en la bobina nunca se hace cero. Este modo es el que emplearemos, pero también presenta un Modo Discontinuo. Para ver su funcionamiento vamos a volver a estudiar los dos estados posibles del circuito.

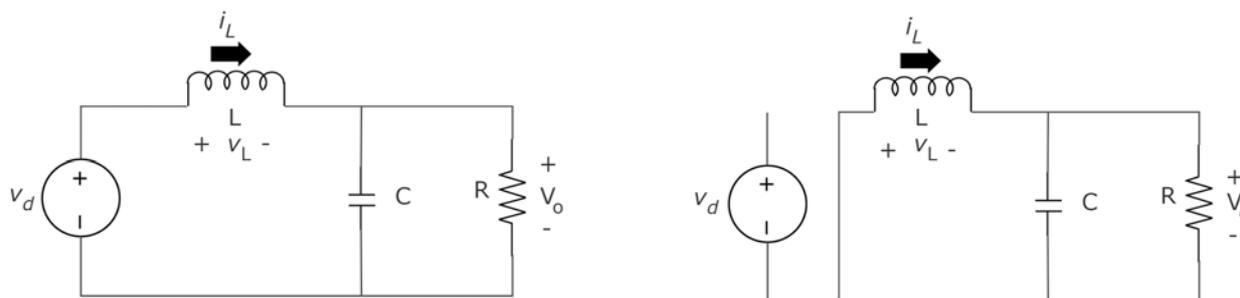


Figura 2-6 Diagrama del Buck en modo On y Off, respectivamente.

De nuevo tenemos (1.2) se cumple. Pero en este caso como podemos ver en la imagen anterior, en este caso de

la integral queda:

$$(V_d - V_o)t_{on} = V_o(T_s - t_{on}) \quad (1.5)$$

Reordenando de nuevo nos queda algo más intuitivo:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{t_{on}}{T_s} = D \text{ (duty cycle)} \quad (1.6)$$

De modo que la relación entre la salida entrada queda únicamente determinada por el *duty cycle* de la señal de conmutación.

2.4 BUCK-BOOST

La configuración Buck-Boost puede ser interesante cuando nos interese un amplio rango de valores de voltaje a la salida, ya que puede tanto aumentar como disminuir el valor absoluto de la tensión a la salida con respecto a la entrada. El valor absoluto es debido a que esta configuración invierte el voltaje de polaridad, obteniendo valores negativos de voltaje, ambos voltajes con respecto a la entrada.

Para conseguir esta configuración podemos conectar en serie un convertidor Buck y un Boost, suponiendo que ambos interruptores son accionados por la misma fuente o al menos el mismo duty cycle. Así, para obtener la relación salida/entrada solo tenemos que multiplicar las relaciones antes obtenidas, (1.4) (1.6) :

$$\frac{V_o}{V_d} = D \frac{1}{1-D} \quad (1.7)$$

Hay otra forma de conseguir el mismo resultado sin tener que duplicar los componentes, simplemente reordenando los componentes de nuevo de la siguiente forma:

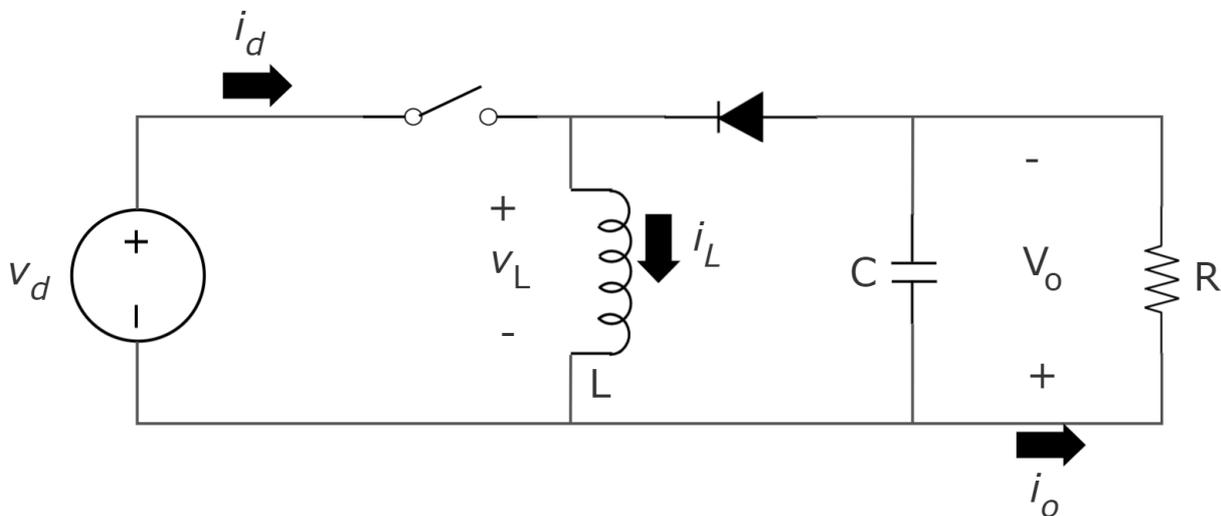


Figura 2-7 Diagrama eléctrico del circuito Buck-Boost

Cuando el interruptor está cerrado el diodo se encuentra en polarización inversa, separando el circuito en dos. En un lado la corriente de la fuente pasa a través de la bobina, cargándola. En el otro lado el condensador se descarga manteniendo así una corriente a través de la carga.

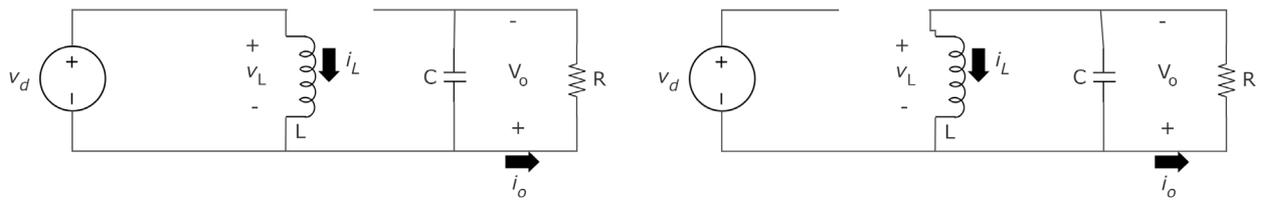


Figura 2-8 Diagrama del Buck-Boost en modo On y Off, respectivamente.

2.5 INTERRUPTOR

En nuestro caso concreto los componentes utilizados serán los mismo que los expuestos anteriormente (bobina, condensador, resistencia, diodo y fuente de alimentación). En cuanto al interruptor optaremos por un MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor) controlado por un driver y este a su vez por una señal PWM de disparo, generada por la dSPACE.

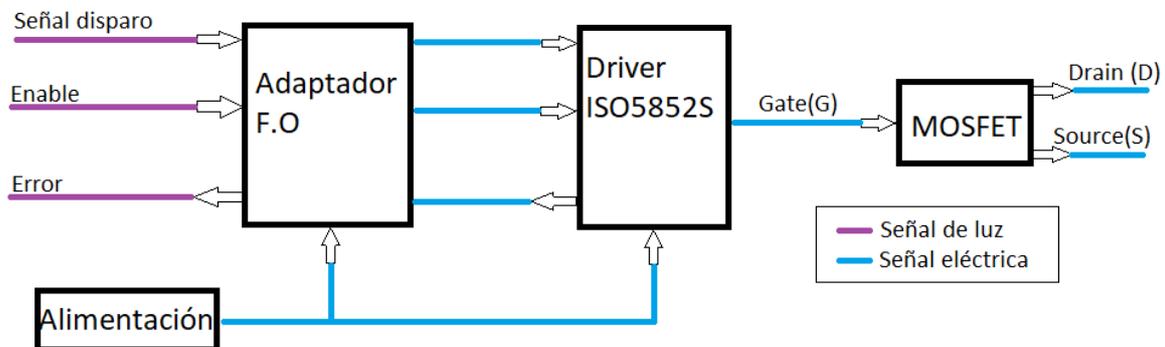


Figura 2-9 Esquema interruptor

El MOSFET lo explicaremos más detalladamente en la próxima sección, pero esencialmente hace las veces de interruptor cuando se le aplica una cierta tensión.

La función del driver es esencialmente adaptar nuestra señal de control PWM para que haga funcionar de manera correcta el driver, dando a su salida una señal equivalente, pero con mayor voltaje e intensidad.

3 IMPLEMENTACIÓN

En esta sección vamos a los componentes reales previamente comentados y sus características propias y más importantes.

3.1 Cálculo de los valores de los componentes

En nuestro caso estamos limitados por los componentes disponibles en el laboratorio, como valores iniciales vamos a tomar:

- $R = 47\Omega$
- $L = 2\text{mH}$
- $C = 1\text{mF}$

Una vez elegidos estos, solo nos queda ajustar la frecuencia de conmutación. El rizado depende inversamente de esta frecuencia (como podemos ver en la ecuación siguiente) por lo que tenemos que elegir la más alta que podamos teniendo en cuenta que estamos conmutando un MOSFET por lo que tampoco puede ser muy alta

$$\Delta I_L = \frac{\Delta V_o}{L} (1-D) \frac{1}{f_s} \quad (1.8)$$

Como valor de compromiso nos decidimos con 12.5kHz.

3.2 Diseño del circuito

Una vez tenemos descrito las distintas configuraciones que vamos a tener en cuenta es hora de pasar a ver los componentes en concreto que vamos a utilizar.

En esta sección para empezar vamos a hablar de los componentes básicos: resistencia, condensador y bobina. Posteriormente el diodo, el bloque que hace de interruptor y un bloque de medidas.

3.2.1 Resistencia

La Resistencia que vamos a utilizar es una que estaba disponible en el laboratorio. Se trata de una resistencia de 47 Ω y 300W de potencia como la de la siguiente imagen:



Figura 3-1 Resistencia a utilizar vista superior



Figura 3-2 Resistencia a utilizar vista inferior

Tiene un valor de 47Ω además de esto va a estar desarrollando una potencia, en el peor de los casos, de:

$$P = V * I = \frac{V^2}{R} \quad (1.9)$$

Sustituyendo valores, $\frac{(100)^2}{47} = 213W$.

Esta potencia es menor de la que pone el fabricante que puede soportar.

3.2.2 Condensador

El condensador estaba disponible en el laboratorio y se trataba de uno de tipo electrolítico de valor 1mF.



Figura 3-3 Condensador empleado

3.2.3 Bobina

En cuanto a la bobina ya había varias disponibles en el laboratorio. Para elegir entre todas ellas tomamos el criterio de poder utilizar la frecuencia más reducida posible, mantienen el resto de características. Así, escogimos la de mayor inductancia, 2mH. Esta, además, era la de menor tamaño.

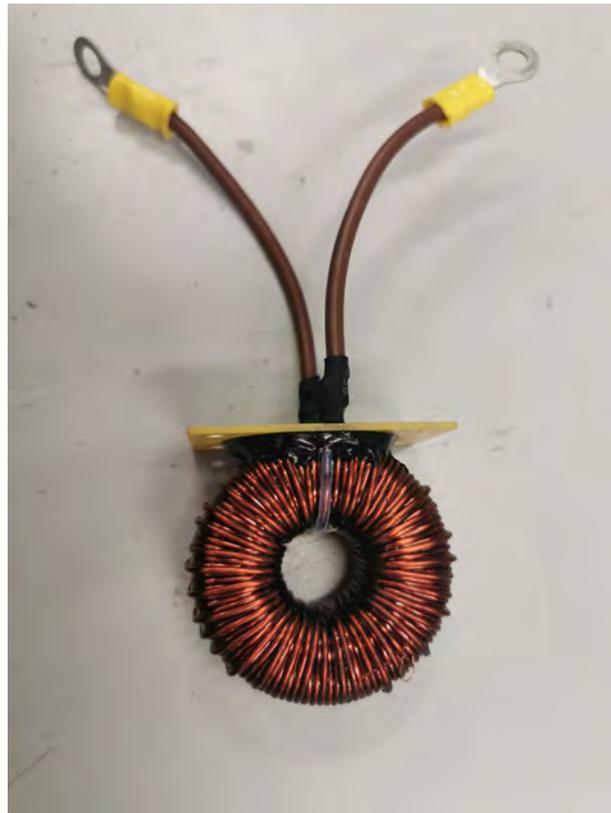


Figura 3-4 Bobina a emplear en el proyecto

Ya que era de fabricación personalizada, decidimos comprobar el valor de esta. Para ello utilizamos un medidor o puente LCR (inductancia, capacitancia y resistencia):

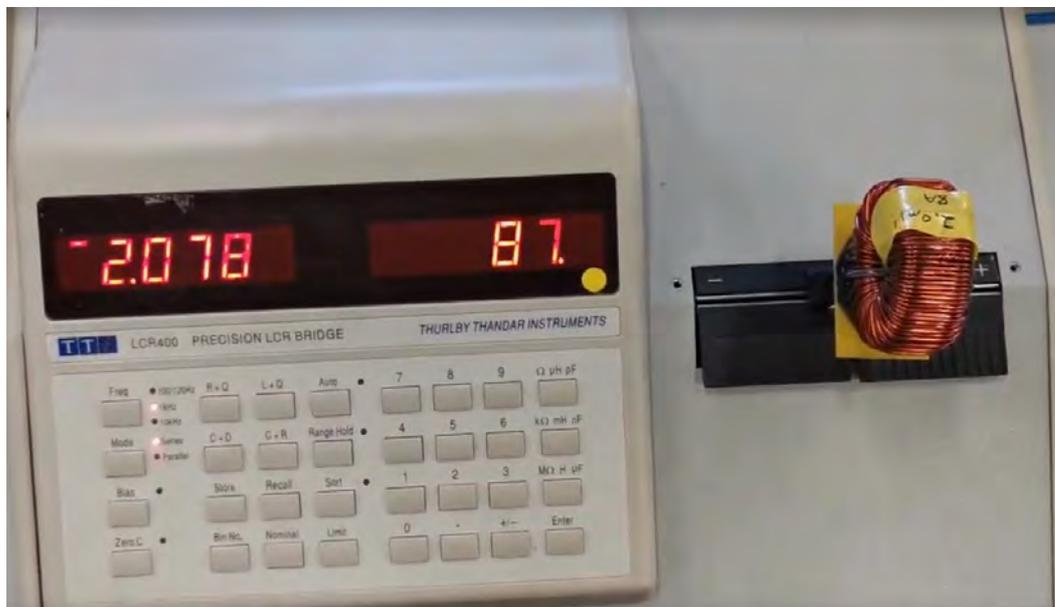


Figura 3-5 Medición de la bobina.

Como podemos ver a la izquierda son 2mH y a la derecha una resistencia de 87Ω a 1kHz y 242Ω a 10kHz.

3.2.4 Diodo

Para el diodo utilizaremos el que va incluido dentro del MOSFET ya que este comparado al resto que había disponibles este aguantará mucho mejor las velocidades de conmutación. Para asegurarnos su correcto funcionamiento y no dejar la puerta sin conectar a nada, vamos a unirla con la fuente a través de una resistencia de 10kΩ.

3.2.5 MOSFET

El MOSFET se trata de un transistor que cuenta con 3 terminales: puerta, fuente y drenador (Gate, Source y Drain, respectivamente). El funcionamiento es equivalente a un interruptor entre los terminales D y S que para cerrarlo ha de aplicarse una cierta diferencia de potencial entre G y S. Esto es: $V_{GS} > V_{th}$, donde el primero es la diferencia de potencial entre G y S y el segundo es un cierto parámetro característico de cada MOSFET y se trata de un límite que hay que superar para que se active. Cuando el MOSFET conduce por D y S se dice que está en Modo Saturación o Modo Activo.

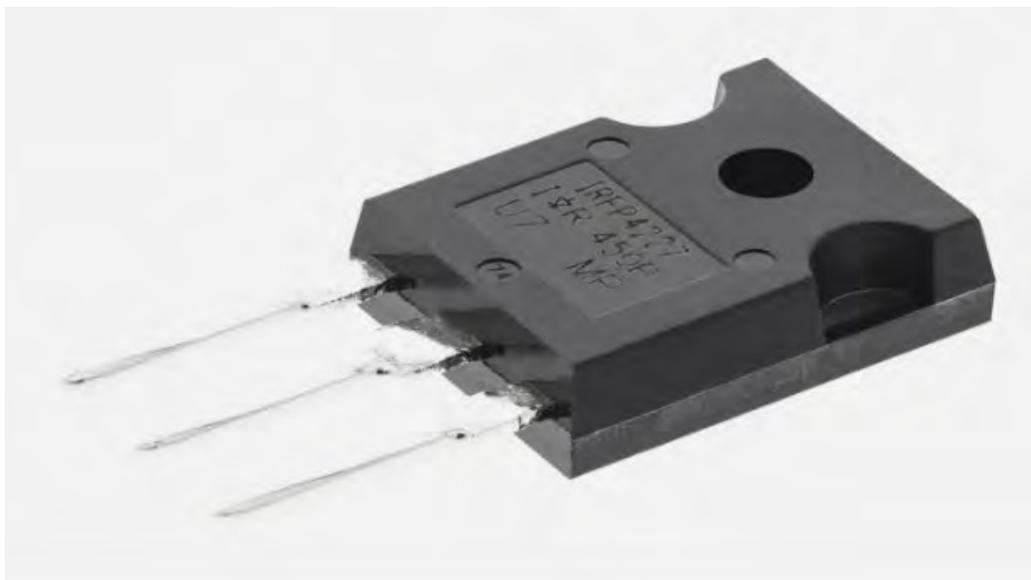


Figura 3-6 MOSFET que se empleara para el montaje

En cuanto al que utilizaremos en este proyecto se trata de un MOSFET de potencia, el IRFP4227PbF de Infineon. Se ha elegido este por adecuarse perfectamente a nuestras necesidades de voltaje y corriente. Otro de los motivos ha sido su previa utilización en proyectos similares en el departamento en aplicaciones de potencia como esta, por lo que se conocemos muy bien su comportamiento real y sus posibles fallos. Está caracterizado por:

Tabla 3-1. Características claves

Propiedad	Valor
V_{DS} max	200 V
V_{GS} max	± 30 V
I_{RP} max @ $T_C = 100^\circ C$	130 A
T_J max	175 °C

- 1) Tensión máxima entre D y S
- 2) Tensión máxima entre G y S
- 3) Corriente pico en ciclos
- 4) Temperatura máxima del material semiconductor (*junction temperature* en inglés)

En la siguiente imagen podemos observar la dependencia de la corriente del drenador (I_D , Eje Y en la imagen) y de la tensión entre Drenador y Fuente (V_{DS} , Eje X en la imagen) para distintos valores de V_{GS} . Se encuentra en escala logarítmica

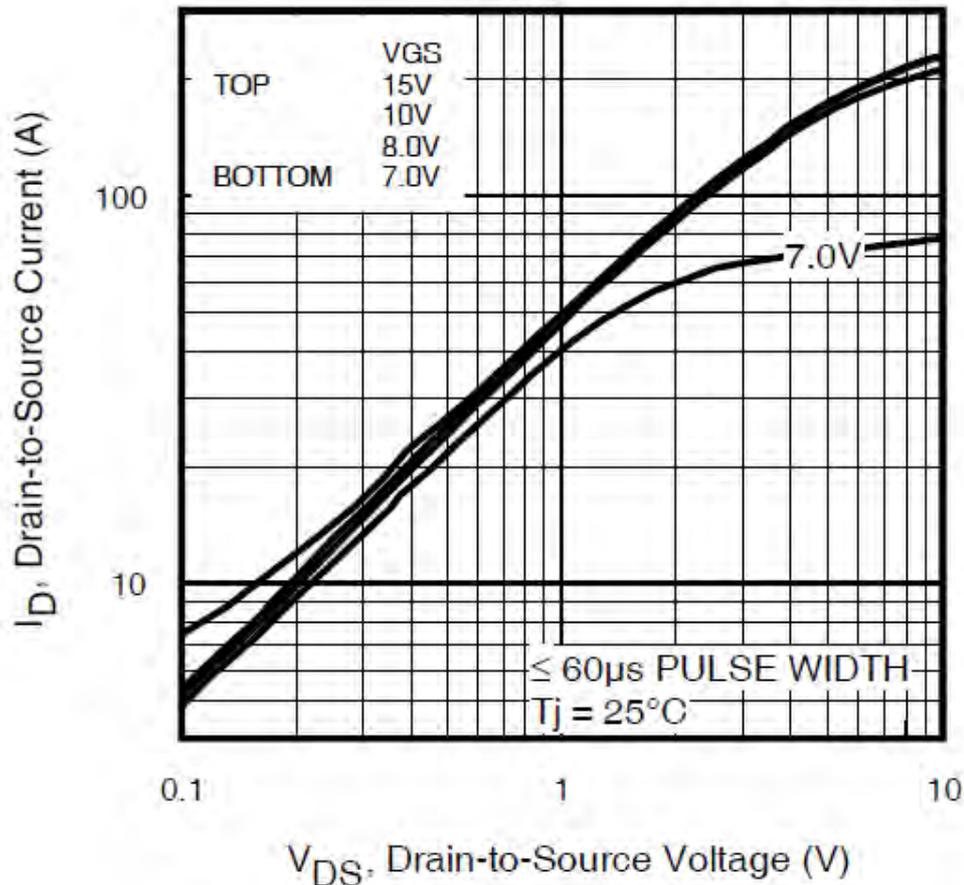


Figura 3-7 Características de la salida

Este MOSFET tiene un precio listado en Farnell (<https://es.farnell.com/>) de 4.01€comprando entre 1 y 10 uds.

https://es.farnell.com/infineon/irfp4227pbf/mosfet-n-200v-to-247/dp/1298553?ost=IRFP4227PbF&ddkey=https%3Aes-ES%2FEelement14_Spain%2Fsearch

3.2.6 Driver

El driver, o *gate driver*, se encarga de amplificar la señal de control que recibe un interruptor de potencia como un MOSFET de potencia o un IGBT.

Esta señal de control podría ser un PWM como la anteriormente explicada, o cualquier tipo de señal requerida para la clase de control que se quiera realizar. Estas señales normalmente vienen generadas por otros elementos como microcontroladores, circuitos integrados o lógicos o como en nuestro caso, por la dSPACE. Estas señales para controlar los interruptores de potencia tienen que estar en el rango de 10-15V y en cuanto a corrientes los requerimientos rondan los cientos de mA o incluso de amperios. Estos requisitos no los cumplen las salidas de los componentes anteriores, siendo mucho menores.

En nuestro trabajo vamos a utilizar el ISO5852S de *Texas Instruments*. Se trata de un driver para aplicaciones de potencia y controlar IGBTs o MOSFETs.

Tabla 3-2. Características del ISO5852S

Propiedad	Mín.	Típico	Máx.
Rango de la entrada	2.25 V		5.5 V
Rango de la salida	15 V		30 V
Temperatura de trabajo	-40 °C		125 °C
Tiempo de propagación		76 ns	110ns

Los MOSFET son utilizados en fuentes conmutadas de alimentación con frecuencia. En estas aplicaciones normalmente trabajan en la zona lineal, pero durante un corto circuito debido a cualquier tipo de problema, el régimen de funcionamiento pasa a ser el de saturación. La transición de lineal a saturación ocurre a una V_{DS} relativamente alta. La corriente del drenador sigue aumentando junto con un aumento de V_{DS} . Si esto se da, el MOSFET se destruirá antes de alcanzar el punto de transición.

Así, este driver incluye protección para este tipo de situaciones. Cuando se da, se inicia un proceso de lentamente ir apagando la salida. Por lentamente se entiende un tiempo de $2\mu s$. A la vez también se envía una señal a los pines de entradas y salidas, colocando el pin de FAULT a 0, activándolo. Este se mantiene y solo puede ser reseteado una vez se haya activado READY, a través de un pulso a nivel bajo en el pin RESET.



Figura 3-8 Driver ISO5852S

Visto esto, los pines realmente importantes van a ser:

- IN-: Se trata de una entrada. Será por la que realicemos el control con la señal PWM
- READY: Se trata de una entrada. Servirá para el arranque del convertidor
- /FAULT: Se trata de una salida. Nos proporcionará información sobre si ha habido algún fallo y hemos de parar la operación.
- /RESET: Se trata de una entrada. Útil cuando hayamos tenido un fallo y tengamos que proceder a reanudar el funcionamiento.

Todas estas señales serán llevadas desde la dSPACE a un circuito de adaptación y desde ahí hasta el circuito integrado del driver a través de fibra óptica.

Este tiene un precio listado en Farnell (<https://es.farnell.com/>) de 6.25€ comprando entre 1 y 10.

3.2.7 Fibra óptica

Para transmitir señales como las comentadas anteriormente, vamos a utilizar cables de fibra óptica. La salida de la dSPACE sigue siendo una señal eléctrica, pero se lleva a una placa de adaptación de señal de la cual ya su salida si es óptica. En el destino nos encontramos el problema contrario ya que hay que hacer la transformación inversa, de lumínica a eléctrica. Para controlar el driver hay que adaptar esa señal de óptica a señales eléctricas. En nuestro caso esto es completamente realizado por el conector para el cable que vamos a instalar en nuestra PCB. Se trata del HFBR 2521ETZ y del HFBR 1521ETZ de BROADCOM. El que comienza por 2 es el receptor y el otro es emisor.



Figura 3-9 Salidas de Fibra óptica de la dSPACE



Figura 3-10 Receptor de fibra óptica que se utilizará



Figura 3-11 Emisor de fibra óptica que utilizaremos

Esta tecnología ofrece muchas ventajas en aplicaciones de potencia debido a su velocidad y seguridad. Al trabajar con altos voltajes y amperajes, la manipulación de cables es peligrosa, sin embargo, con la Fibra óptica eliminamos gran parte de esos problemas al basarse en intensidad de luz.

La configuración de los pines de ambos es la siguiente:

Tabla 3–3. Configuración de los Pines, Emisor Tx

Nº Pin	Función
1	Datos
2	GND
3	No conectar
4	No conectar

Tabla 3–4. Configuración de los Pines, Receptor Rx

Nº Pin	Función
1	Vcc
2	No conectar
3	GND
4	Datos

El precio del 2521 (Rx) en RS (<https://es.rs-online.com/web/>) es de 11.79€IVA incluido.

<https://es.rs-online.com/web/p/receptores-de-fibra-optica/0446150/?sra=pmpn>

El precio del 1521 (Tx) en RS (<https://es.rs-online.com/web/>) es de 11.40€IVA incluido.

<https://es.rs-online.com/web/p/transmisores-de-fibra-optica/1711600/?sra=pmpn>

3.2.8 Bloque de medidas

Para hacer comprobaciones y medidas sobre el funcionamiento del convertidor vamos a crear un bloque para tomar medidas de voltaje e intensidad.

Los componentes utilizados serán: LV 25-P, para la medición de voltajes, y el LA 25-P, para la medición de intensidades. Ambos son fabricados por LEM USA Inc.

El LV se trata de un sensor basado en el efecto Hall, instalando una resistencia en serie en cada punto de medida, cuyo valor está a elección del usuario. El sensor tiene 5 pines 2 donde se conectan los puntos entre los que se quiere medir junto con las resistencias, otros 2 de alimentación del dispositivo y un último para la medida. El valor de la resistencia se selecciona según la medida que vayamos a tener ya que la diferencia de voltaje se traduce a intensidad por el pin de medida. Está diseñado para realizar medidas entre 10 y 500V.



Figura 3-12 Sensor de Voltaje, parte superior



Figura 3-13 Sensor de Voltaje, parte inferior

Hemos de seleccionar R1 de tal manera que al voltaje que vamos a medir circule una corriente por el primario de 10mA.

En cuanto a algunas de sus características que representan una gran ventaja encontramos:

- Excelente precisión: a valores nominales, $\pm 0.9\%$
- Pequeño tiempo de respuesta: escalón hasta el 90% de I_{PN} , $40\mu s$
- Buena linealidad: error por linealidad $< 0.2\%$

El LA utiliza también el efecto Hall, pero en este caso no es necesario conectar el cable por el que se quiere medir la corriente que pasa. Basta con introducir el cable por una ranura que tiene el sensor. Esta es una gran ventaja ya que no requerimos tener que cortar el cable y menos aún soldarlo. Además, presenta otras ventajas como el anterior en cuanto a:

- Excelente precisión: a valores nominales, $\pm 0.95\%$
- Pequeño tiempo de respuesta: escalón hasta el 90% de I_{PN} , $< 1\mu s$
- Buena linealidad: error por linealidad $< 0.15\%$

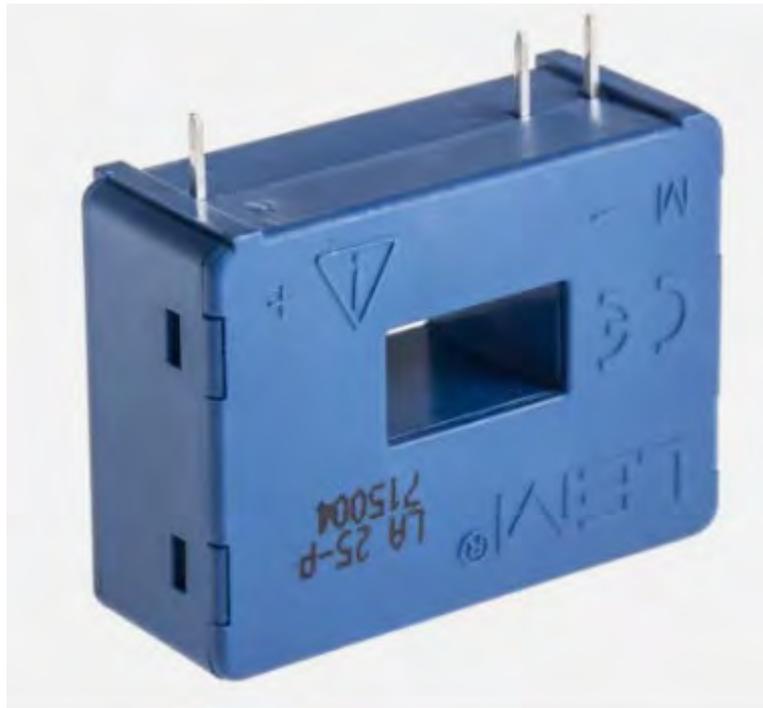


Figura 3-14 Sensor de corriente

Si se quiere una mejor medida, mejorando el acoplamiento magnético, debemos de dar unas cuantas vueltas al cable sobre la parte de arriba del sensor.

4 REALIZACIÓN DE LOS CIRCUITOS IMPRESOS

En este capítulo vamos a desarrollar el proceso completo hasta tener los circuitos impresos. Pasaremos por los distintos tipos de fabricación que existen junto con el que utilizaremos nosotros, el diseño de los propios circuitos impresos y por último su fabricación y testeo.

4.1 Circuitos Impresos

Las placas de circuitos impresos (en inglés *PCB, Printed Circuit Boards*) sirven para sujetar mecánicamente los componentes y para conectarlos eléctricamente a través de pistas o buses de material conductor. El resto de la placa que no requiere conexiones está construido en un material no conductor, normalmente láminas de papel o fibras de vidrio impregnadas de resina epoxi, fenólica o poliéster, dependiendo de la aplicación.

Las placas se distribuyen en capas, siendo las más sencillas de construir de 1 o 2 capas, ya que lo único que necesitamos una placa de sustrato (el material no conductor) y colocar los componentes y pistas sobre uno o ambos lados de la placa.

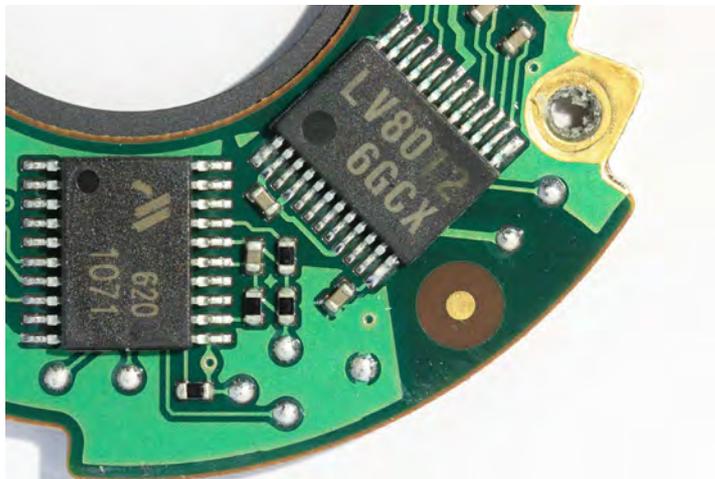


Figura 4-1 Ejemplo de circuito impreso con algunos componentes, el material conductor en un verde más claro. <https://pixabay.com/photos/canon-eos-ef-s-17-85-is-lens-1891685/>

Sin embargo, también existen circuitos impresos multicapa, los cuales intercalan en planos horizontales capas de sustrato y de pistas y componentes. Esta configuración da lugar a placas con muchas más posibilidades y un mayor nivel de complejidad alcanzables, todo esto manteniéndose en un formato muy compacto. También trae inconvenientes a la hora de la fabricación, ya que se requieren métodos más avanzados y maquinaria más especializada. Otros inconvenientes, pero en este caso de funcionamiento, son de compatibilidad electromagnética como pueden ser *cross talk* o ruido, los cuales se arreglan con diseño adecuado.

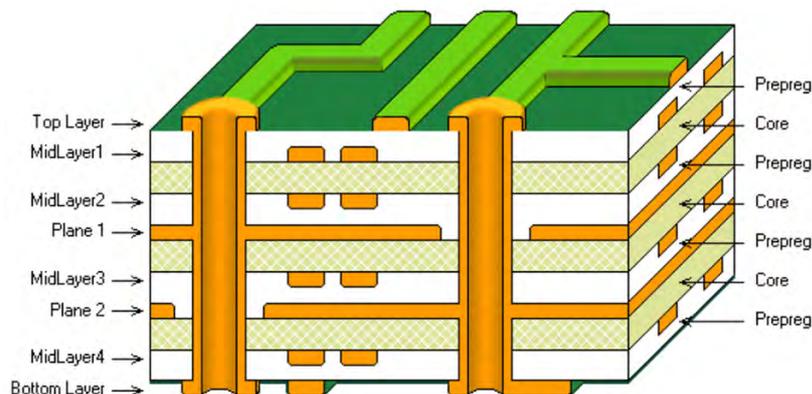


Figura 4-2 Ejemplo de placa multicapa, donde encontramos también vías. <https://www.sdy-pcb.com/news/company/multilayer-pcb-layer-stackup.html>

Una vez tenemos la placa formada por sustrato y por las pistas conductoras es hora de añadirle los componentes y las vías.

4.1.1 Tipos de montaje

Los componentes pueden estar en dos formatos de montaje: a través de orificio, *through hole mounting THM*, y montaje superficial. El primero de estos es el que se comenzó a realizar primero, se trata de realizar agujeros en la placa a través de los que se atraviesan los terminales de conexión del componente y se sueldan en el otro lado de la placa. Como en este diagrama:

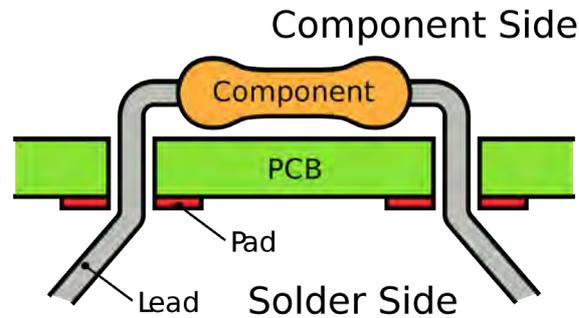


Figura 4-3 Esquema montaje Through Hole, <https://resources.altium.com/pcb-design-blog/why-use-through-hole-technology-in-pcb-design>

- *Lead*: Terminal de conexión.

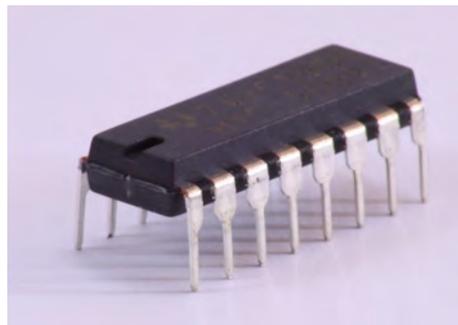


Figura 4-4 Ejemplo de componente pensado para tecnología *through hole*, en este caso un circuito integrado. <https://pixabay.com/photos/integrated-circuit-electronics-421816/>

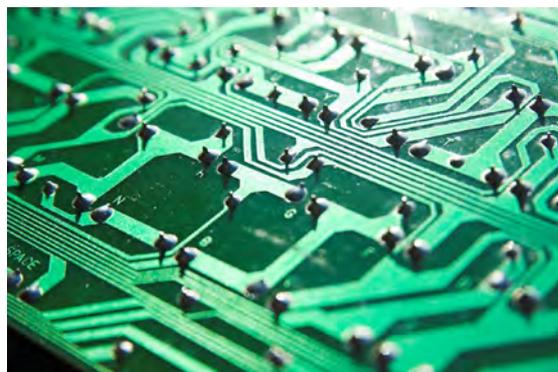


Figura 4-5 Acabado final de componentes *through hole*, terminales de conexión al otro lado, una vez soldados. <https://pixabay.com/photos/cyber-security-network-internet-2366908/>

En cuanto a ventajas de este tipo de montaje con respecto a montaje en superficie podemos ver:

- Un prototipado más fácil ya que los componentes se pueden montar en una placa de pruebas
- Conexiones mecánicas más resistentes.
- Ventajas cuando tenemos que disipar grandes cantidades de calor en situaciones que tengamos más potencia

En cuanto a inconvenientes

- Placas más costosas debido a que hay que taladrarlas.
- Diseños menos compactos
- El proceso de montaje es más complicado.

En segundo lugar, encontramos el montaje en superficie, *Surface Mounting, SMT*. En este las pistas de un mismo lado de la placa llegan hasta donde se debe colocar el componente y este simplemente se instala posándolo encima de los *pads* de conexión y soldándolo, ya sea con estaño en hilo o pasta. Para este tipo de montaje los componentes tienen un empaquetado especial cuyas siglas en inglés son *SMD, Surface mounting package*. Tienen los terminales de conexión a su alrededor o debajo suya.

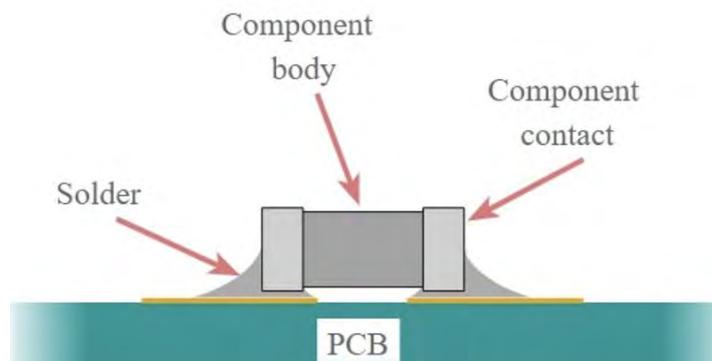


Figura 4-6 diagrama del montaje de un componente SMD, https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/surface-mount-technology-smd-smt/what-is-smt-primer-tutorial.php

- *Solder*: pasta para soldar o estaño.
- *Componente body*: cuerpo del componente
- *Component contact*: terminales del componente

Este empaquetado también suele ser mucho más pequeño que el mismo componente en THM, lo que junto con no tener que taladrar la placa, hace placas mucho más pequeñas con el mismo número de componentes o para el mismo tamaño de placa tenemos una mayor cantidad de componentes; o lo que es igual, conseguimos mayor densidad de elementos.



Figura 4-7 Comparación de condensadores SMD a la izquierda y 2 THM a la derecha <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Photo-SMDCapacitors.jpg>

Recapitulando tenemos de ventajas:

- Tamaño reducido, placas más densas
- Mayores velocidades alcanzables en cuanto a señales
- Montaje y fabricación más rápidos y baratos
- Ausencia de taladros, hace las placas más baratas

Por otro lado, algunos de los inconvenientes:

- Conexiones mecánicamente más débiles
- Menor capacidad de absorción de calor en aplicaciones de potencia



Figura 4-8 Ejemplo de componentes SMD ya montados, incluyendo un circuito integrado <https://pixabay.com/photos/pcb-printed-circuit-board-4002378/>

4.1.2 Conexiones verticales, Vías

Ya hemos cubierto conexiones en planos horizontales y el montaje de componentes, ahora nos queda ver cómo realizar conexiones verticales en placas de más de 1 capa. Algunas características que presentamos aquí son propias de placas multicapas de más de 2 capas.

Las vías se tratan de unos orificios los cuales tiene sus laterales cubiertos cobre y permiten la conexión entre pads de dos capas distintas. Encontramos 3 tipos de vías:

- Agujero pasante, *through hole*: conectan las dos capas más externas de la placa, atravesando la placa por completo. El número 1 en la siguiente imagen.
- Vía ciega, *blind via*: es una vía que comienza en una capa externa de la placa, pero conecta con una capa interna de la placa, siendo así visible solo desde uno de los lados externos de la placa. El número 2 en la siguiente imagen.
- Vía enterrada, *burried via*: conecta dos capas internas de la placa y no es visible desde el exterior. El número 3 en la siguiente imagen.

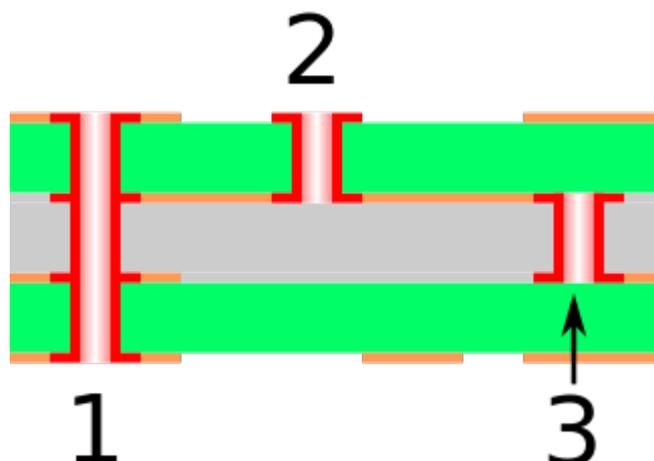


Figura 4-9 Tipos de vías en un PCB, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Via_Types.svg

El cobre suele añadir a los orificios mediante un proceso llamado galvanoplastia. Consta de aplicar una corriente eléctrica mientras la placa y un trozo de cobre están sumergidos en una solución salina, adhiriendo el cobre a la placa.

En las vías podemos encontrar 3 partes principales:

- El propio orificio vertical con material conductor.
- *Pad*: conexión de la vía con uno de los planos, componentes o pista.
- *Antipad*: espacio libre entre el orificio y un plano que no requiere conexión, aislándolo de ese plano.

4.2 Métodos de Fabricación

Para llegar a tener la placa con las pistas colocadas podemos seguir varios procedimientos. Los más comunes se basan en la substracción de material de una placa continua de cobre.

Una vez tenemos el diseño deseado ya listo, hemos de transferir ese diseño a la placa que todavía se trata de un plano continuo de cobre. Para esto tenemos varias maneras.

Cuando el volumen a producir es elevado, predominan dos técnicas. Para empezar, podemos utilizar impresión serigráfica con tinta que resiste el atacado del ácido posterior. Esta se utiliza cuando no precisamos de un gran detalle en el diseño. En segundo lugar, tenemos el fotograbado el cual utiliza una lámina fotosensible y una máscara con el diseño. Esto se somete a luz UV (ultravioleta) dejando así la lámina protectora que posteriormente permitirá que el diseño se quede grabado tras el atacado de ácido. Este método se utiliza cuando se requiere un gran nivel de detalle a la hora de realizar las placas.

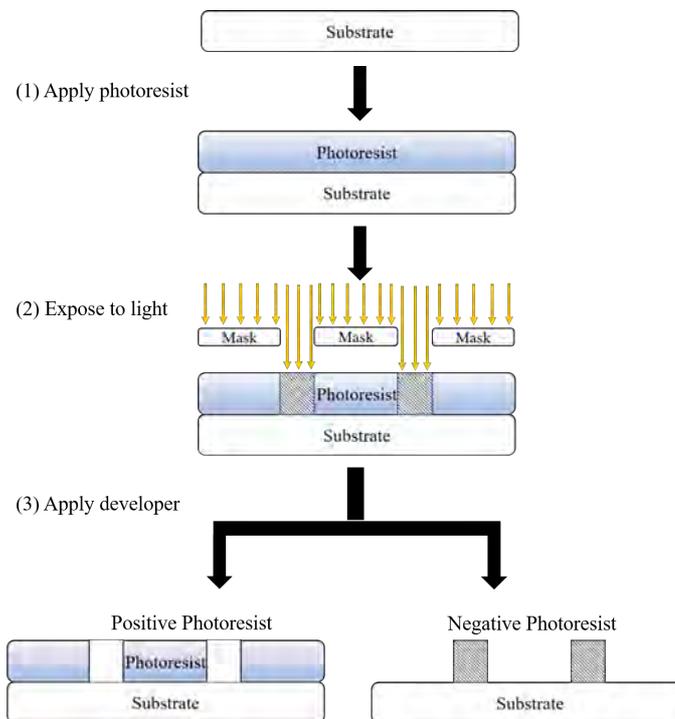


Figura 4-10 Diagrama del proceso de fotograbado, siendo nuestro caso https://en.wikipedia.org/wiki/File:Photoresist_of_Photolithography.png

Cuando sin embargo el volumen de producción es más reducido podemos recurrir a otros métodos. También podemos retirar el cobre de la placa mediante fresado. Se utilizan máquinas de control numérico, *CNC* (*numerical control*), como una fresa de 2 o 3 ejes que, usando brocas, van retirando material de placa. El proceso es previamente diseñado y cargado a la máquina. También tenemos un proceso muy similar pero que en vez de utilizar una broca se utiliza un láser. Estos procesos son utilizados principal mente para prototipado.

Una vez tenemos el diseño transferido a la placa con un material protector, se sumerge la placa en ácido. Los

ácidos más comúnmente utilizados son cloruro férrico o el sulfuro de amonio. El proceso de atacado del ácido puede ser lento, aunque hay maneras de acelerarlo un poco. Se pueden aplicar calor, agitarlo, inyectar aire para que se produzcan burbujas o incluso utilizar motores equipados con paletas para esparcir el ácido sobre la placa.

Las zonas en las que vamos a soldar componentes es necesario que se metalicen con oro, estaño o níquel, para mejorar la capacidad de soldarlo.

El siguiente paso es cubrir todas las partes que no se vayan a soldar con una capa protectora de epoxi. Este suele ser el tono verde, azul o negro que vemos en las placas.

En la placa también se puede imprimir con serigrafía algo así como una plantilla o leyenda. Esto nos ayuda a saber la orientación de componentes, el estado de los interruptores o incluso el valor de los componentes.

Por último, también existen métodos aditivos para la fabricación de placas. Se basan en añadir material donde es necesario en vez de retirar el que no es necesario. Para conseguir esto se añade una máscara que sensibiliza las partes que necesitan cobre. Esta máscara se adhiere a una placa de sólo sustrato y posteriormente se somete a galvanoplastia, añadiendo así cobre sólo en las partes sensibilizadas.

4.3 Diseño

Vamos a pasar a ver el diseño de las PCBs de nuestro trabajo. En nuestro caso los únicos componentes que estarán en circuito impreso serán el bloque de medida y el driver junto con el MOSFET.

Para el diseño de estas placas vamos a utilizar el programa EAGLE, de AUTODESK. Es un programa ampliamente utilizado en muchas industrias en las que están presente el diseño de circuitos impresos. En nuestro caso utilizaremos la versión de estudiante.

Se ha tenido en cuenta un criterio para todas las cajas que es intentar colocar todos los conectores hacia la izquierda para seguir alguna norma en cuanto a conexión.

4.3.1 Bloque de medidas

Como hemos comentado anteriormente utilizaremos el LV 25-P y el LA 25-P, junto con el requerimiento de la resistencia adicional en el LV 25-P.

Vamos a realizar 3 placas distintas, 2 en las que van los sensores por separado para que sean más versátiles y otra en la que van los dos sensores incorporados a una misma placa para conseguir que sean más compactos.

Los circuitos de estos son muy sencillos, incluiremos:

- El propio sensor
- Las resistencias correspondientes
- Pines de conexión para comprobar el correcto funcionamiento
- Un conector RJ-45 para conectarlo con la dSPACE
- Los terminales de conexión para los puntos de medida del voltaje

4.3.1.1 Sensor de Voltaje

Vamos a comenzar con la placa única con el sensor de voltaje.

Los componentes que incluye esta placa son:

Tabla 4–1. Componentes Medidor Voltaje

Componente	Nº necesarios
Sensor LV 25-P	1
Conector RJ11	1
Conector 3X1 MOLEX	1
Resistencias 22kΩ	2

El esquemático es el siguiente:

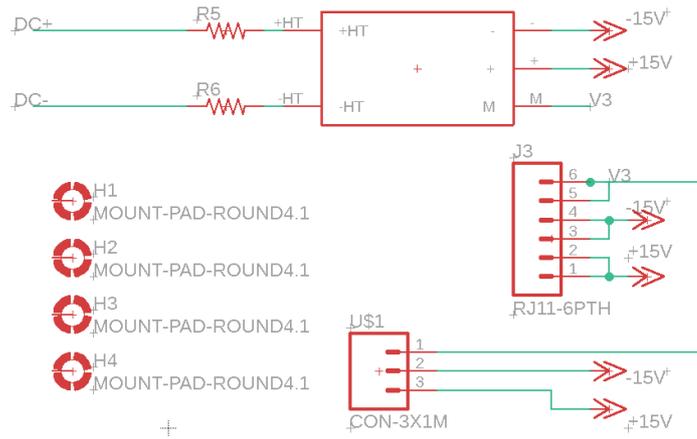


Figura 4-11 Esquemático del sensor de voltaje

Como podemos ver tenemos 4 orificios de montaje adicionales. En cuanto al RJ11, sus dos primeros pines son la alimentación positiva, el 3° y 4° son la alimentación negativa, y los dos últimos son la medida de voltaje en sí.

La placa de este sería la siguiente:

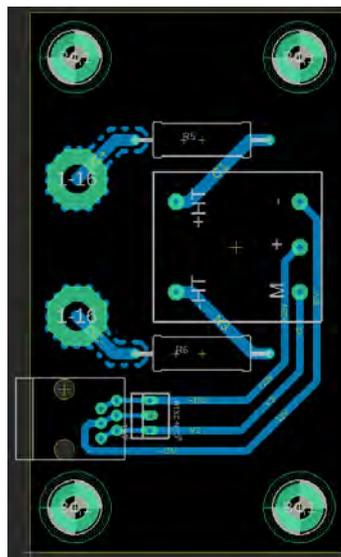


Figura 4-12 Placa del sensor de Voltaje, con todas las pistas colocadas y los orificios de montaje



Figura 4-13 Principales elementos señalados del sensor de voltaje

El tamaño de la placa en total es de 53x91mm y presenta pistas sólo en la capa inferior de ésta, estando todos los componentes en el lado superior.

Para las pistas encontramos 3 tamaños distintos dependiendo de su posición y conexión en la placa.

- Pistas de 76mil para el lado del sensor que toma la medida
- Pistas de 50mil para la conexión del sensor con los puertos
- Pistas de 32mil para la interconexión de los conectores RJ11 y MOLEX

4.3.1.2 Sensor de Corriente

En segundo lugar, tenemos el sensor de corriente. Este caso es aún más sencillo debido a que no hay que hacerle modificaciones al cable en el que vamos a realizar la medida, basta con darle unas vueltas alrededor del arco superior del sensor y ya está.

Los componentes de esta serán:

Tabla 4-2. Componentes Medidor Corriente

Componente	Nº necesarios
Sensor LA 25-P	1
Conector RJ11	1
Conector 3X1 MOLEX	1

En cuanto al esquemático será el siguiente:

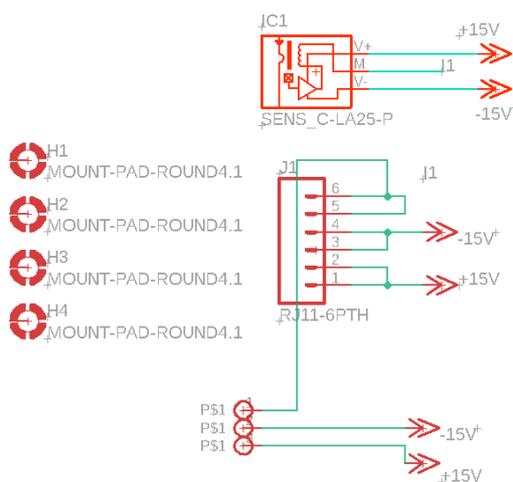


Figura 4-14 Esquemático Corriente

Y la placa con los componentes y las pistas ya colocadas:

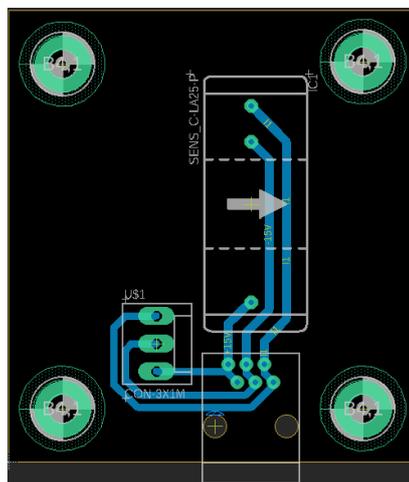


Figura 4-15 Placa Corriente

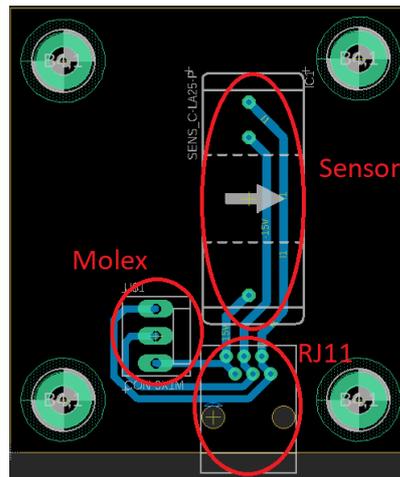


Figura 4-16 Placa corriente explicada

Esta placa es algo más pequeña, midiendo 60x60mm. Para las pistas tenemos dos tamaños distintos:

- Pistas de 50mil para la conexión del sensor con el MOLEX
- Pistas de 40mil para interconectar los conectores MOLEX y el del RJ11.

4.3.1.3 Combinación de Voltaje y Corriente

También hemos explorado la opción de incorporar los dos sensores con sus conectores independientes. Con esto conseguimos que sea algo más compacto que poner las otras dos placas una al lado de la otra. Sin embargo, si se estropea algo de una de ellas o hay que cambiar alguno de los componentes, es más fácil si las placas están por separado. La lista de componentes es la mismas que los anteriores, resumiéndose en:

Tabla 4-3. Componentes Medidor Voltaje-Corriente

Componente	Nº necesarios
Sensor LV 25-P	1
Conector RJ11	2
Sensor LA 25-P	1
Conector 3X1 MOLEX	2
Resistencias 22kΩ	2
Conectores Banana	4

El esquemático sería simplemente juntando los anteriores y la placa quedaría en formato vertical de esta manera:

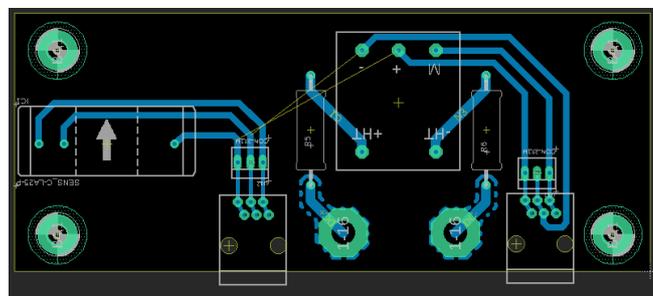


Figura 4-17 Placa Múltiple

Finalmente se ha optado por este diseño frente al de las placas por separado, debido a ser **más compacto** y por lo tanto **más fácil de implementar** a la hora de diseñar las cajas.

4.3.2 Placa del driver y Mosfet

La placa del interruptor incluye algunas más cosas. El funcionamiento general de esta placa lo presentamos en el siguiente esquema:

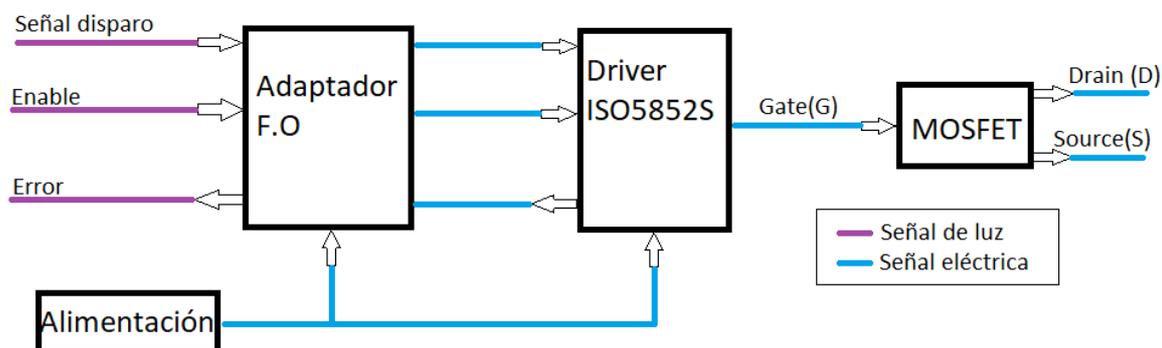


Figura 4-18 Esquema funcionamiento

Como podemos ver las señales que le vamos a mandar en forma de luz van a ser el *Disparo*, que regulará el funcionamiento del convertidor y el *Enable* que nos dirá cuando comenzar el funcionamiento. De salida tendrá la señal de *Error*, un posible error que se pueda dar en el circuito y que nos dirá cuando detener el funcionamiento del convertidor.

Además de estos bloques principales llevará las correspondientes resistencias, condensadores y diodos necesarios para el correcto funcionamiento del driver y de los adaptadores de fibra óptica.

En la siguiente lista reducida de componentes hemos omitido los valores de las resistencias y condensadores que son variados:

Tabla 4-4. Componentes Placa Driver

Componente	Nº necesarios
Driver ISO5852S	2
Cir. I. 7400T	1
Cir. I. 7414T	1
Con. FO HFBR 2624	2
Con. FO HFBR 16624	1
Diodo 1n4148	2
Diodo uf 4007	2
Diodo Zener	2
Resistencias	20
Condensadores	24
LEDs	7

El esquema general de la placa va a ser conectores de fibra óptica y la alimentación a un lado y las salidas del MOSFET al otro.

Una vez hecho esto pasamos a analizar el esquemático:

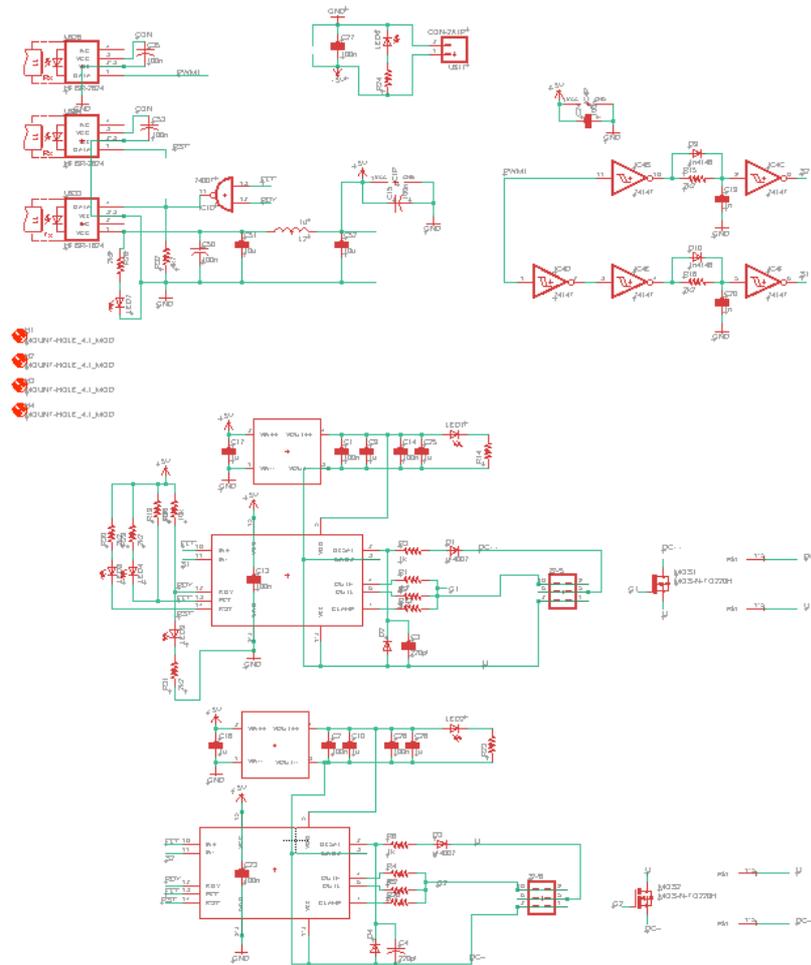


Figura 4-19 Esquemático Driver

Como podemos ver se observan 4 agrupaciones importantes.

- Los conectores de Fibra Óptica y sus condensadores. En la parte superior izquierda.
- La alimentación de toda la placa. Parte central arriba.
- Las puertas lógicas para obtener las señales. Parte superior derecha.
- Los drivers con sus MOSFET y los componentes de protección y adaptación de señal. Todo el bloque central.

En cuando a la placa una vez se han colocado las pistas en las posiciones necesarias y se han agrupado algo más los componentes, queda algo como esto:

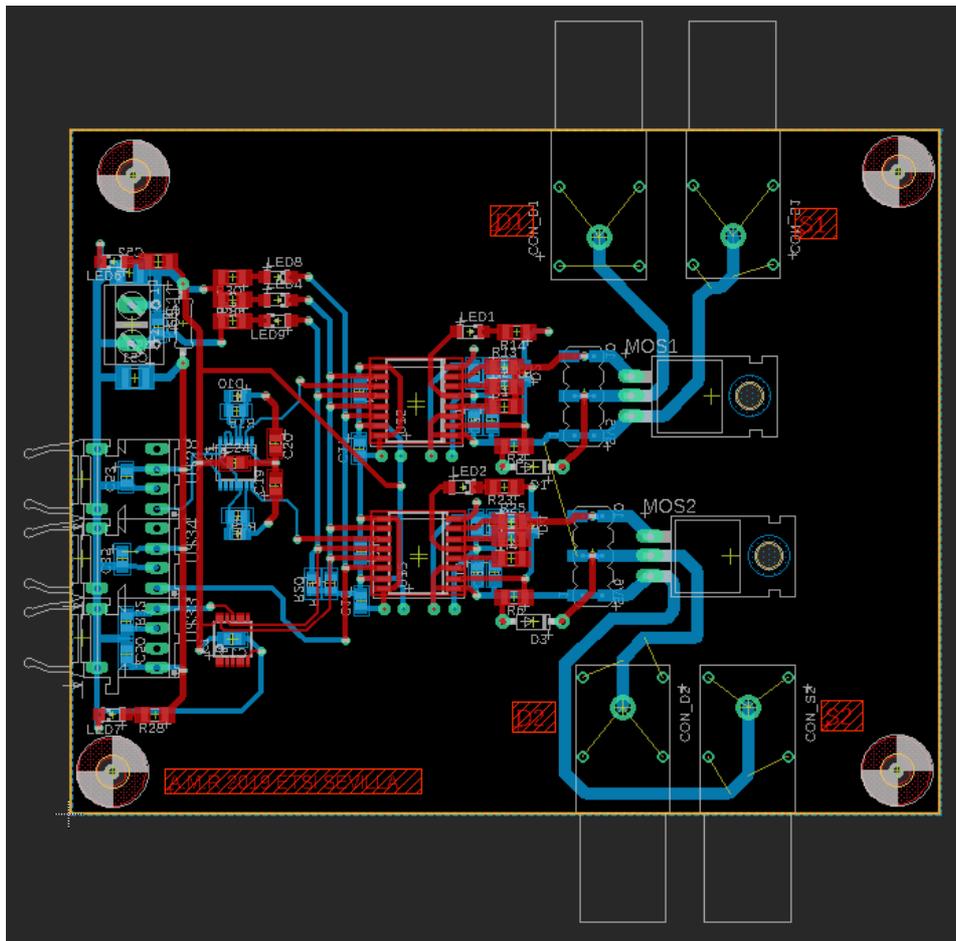


Figura 4-20 Placa del driver finalizada

Las resistencias y condensadores se han colocado y elegido según especificaciones propias de los fabricantes y de placas previamente realizadas.

4.4 Fabricación y Testeo

Estos diseños de placas han sido fabricados por nosotros en el laboratorio de potencia en la sala adecuado para esto.

El equipo utilizado para la fabricación ha sido el siguiente:

- Insoladora UV
- Líquido revelador
- Agua oxigenada
- Agua fuerte
- Agua corriente
- Acetona
- Placa PCB positiva a una cara o dos.
- Fotolito de la placa en cuestión.

4.4.1 Resultados Placas

Una vez tenemos los diseños válidos y los medios necesarios procedemos a su fabricación. Comenzamos con la placa de Medidas:

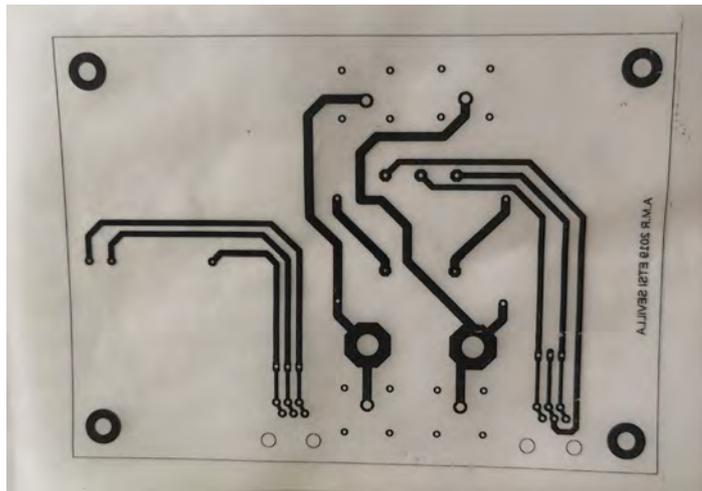


Figura 4-21 Fotolito Placa de Medidas en papel vegetal

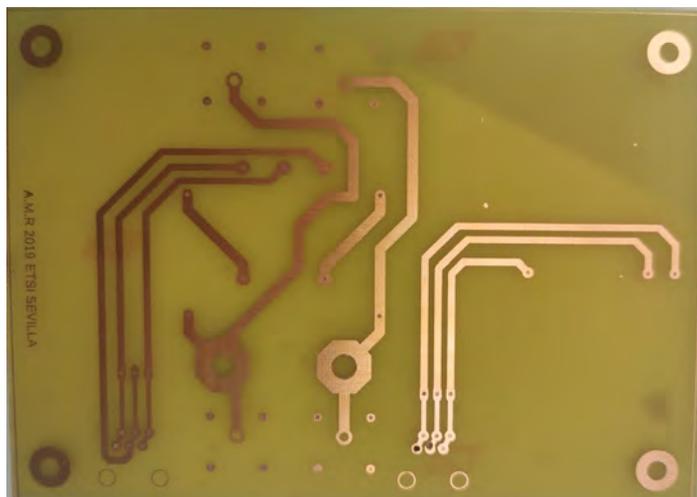


Figura 4-22 Placa de Medidas sin soldar

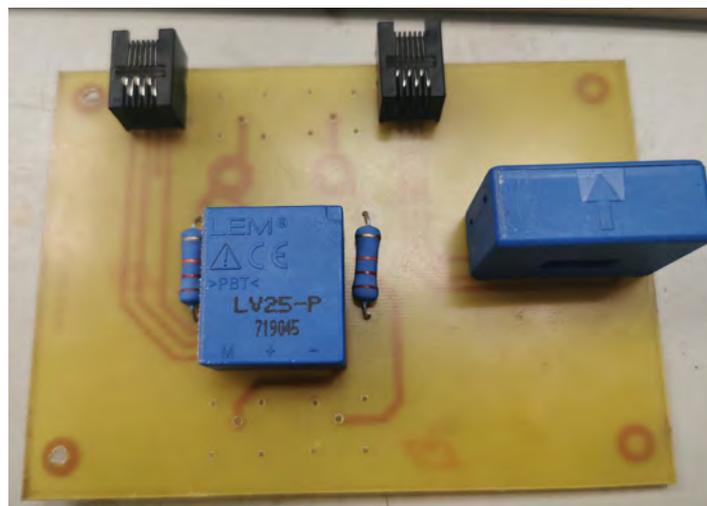


Figura 4-23 Placa de medidas con los componentes añadidos

A la placa de la foto anterior lo único que necesita para estar completa es realizar los taladros de montaje y colocar los conectores de banana. Este resultado final lo veremos en la sección posterior.

La siguiente placa que se fabricó fue la que aloja los drivers y MOSFETs. De esta placa se realizaron 2 versiones. Los cambios de la segunda con respecto a la primera fueron: añadir planos en ambos lados de la placa para una mayor facilidad en la fabricación con el ácido y facilidad a la hora de conexiones por tener un plano de tierra; la segunda fue aumentar el tamaño de algunas pistas y vías.

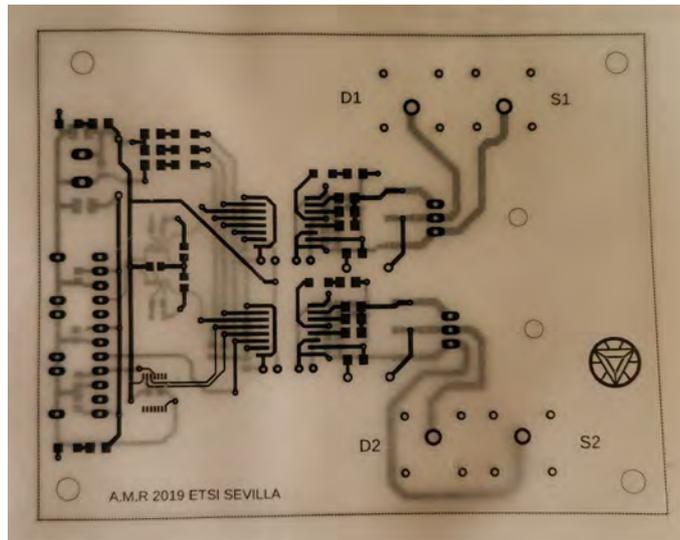


Figura 4-24 Fotolito de la placa del driver, v1

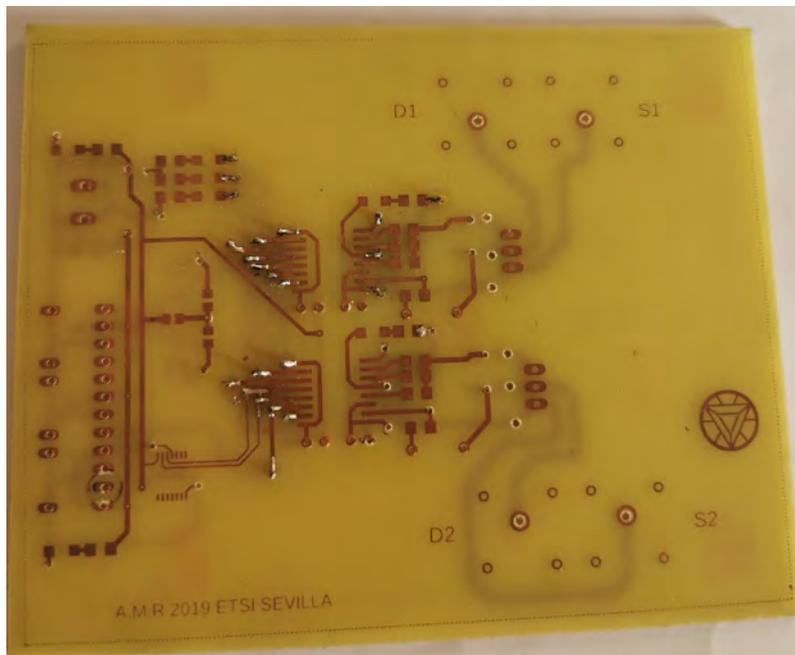


Figura 4-25 Placa de Driver sin componentes, v1, Top

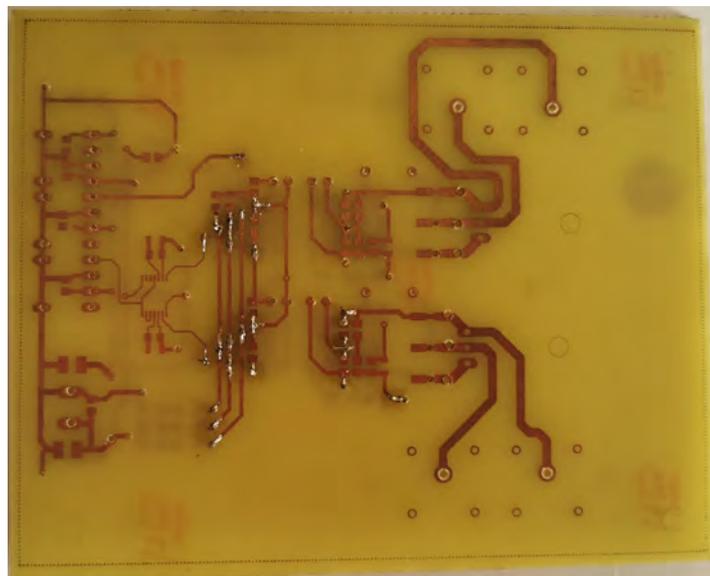


Figura 4-26 Placa de Driver sin componentes, v1, Bottom

Eso sería lo referente a la primera versión, en cuanto a la segunda y definitiva:

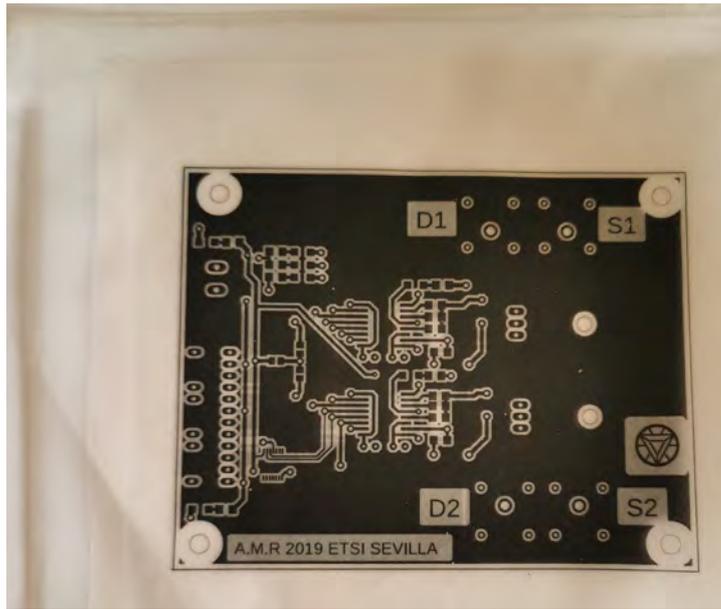


Figura 4-27 Fotolito de la placa del driver, v2

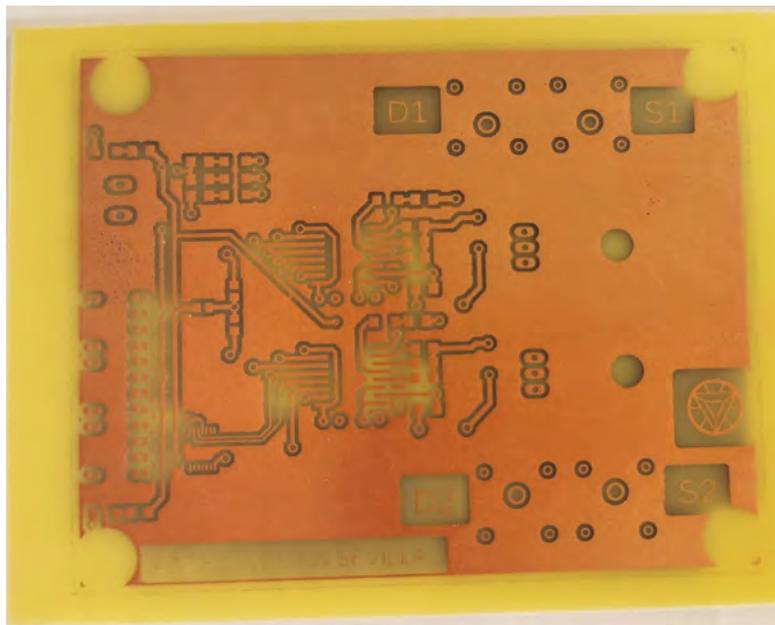


Figura 4-28 Placa de Drivers sin componentes, v2, Top

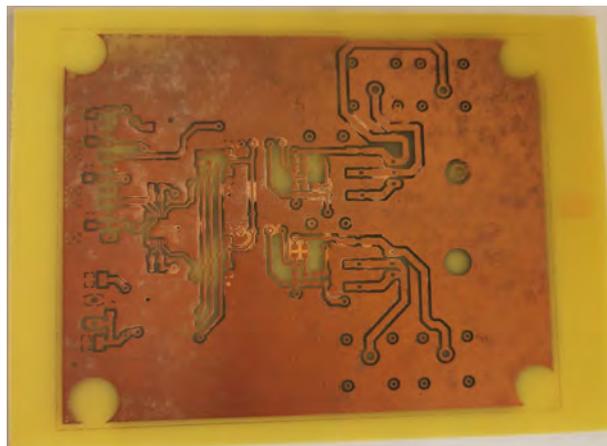


Figura 4-29 Placa de Drivers sin componentes, v2, Bottom

Una vez recortado los retos de placa sobrantes, haciendo los taladros necesarios y soldando los componentes que corresponden con el esquemático, la placa quedó como a continuación. Sólo hubo un problema en el diseño que fue la tierra de uno de los circuitos integrados, que quedó en una isla y desconectada del resto lo que nos ocasionó varios problemas. Esto lo arreglamos soldando un cable entre la isla y el resto de plano de tierra.

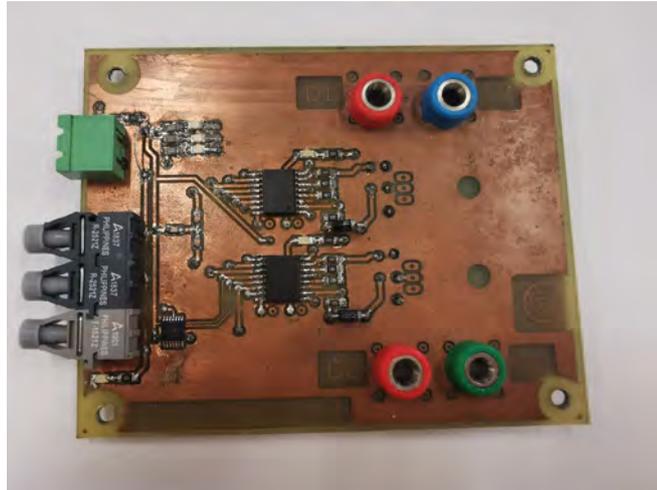


Figura 4-30 Placa de Drivers con componentes, v2, Top

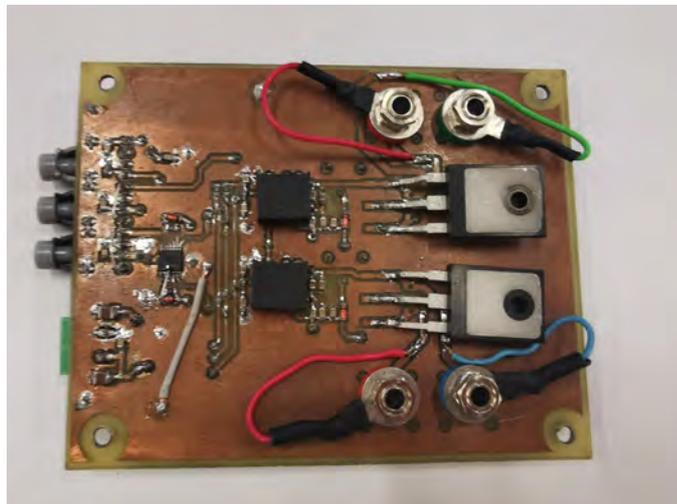


Figura 4-31 Placa de Drivers con componentes, v2, Bottom

Para la placa del Diodo tenemos lo siguiente con los componentes ya soldados a falta de los conectores:

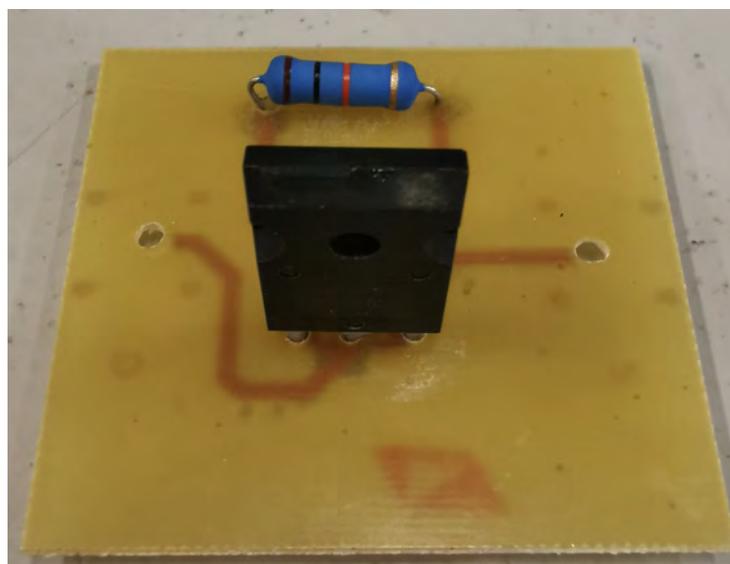


Figura 4-32 Placa del Diodo, Top

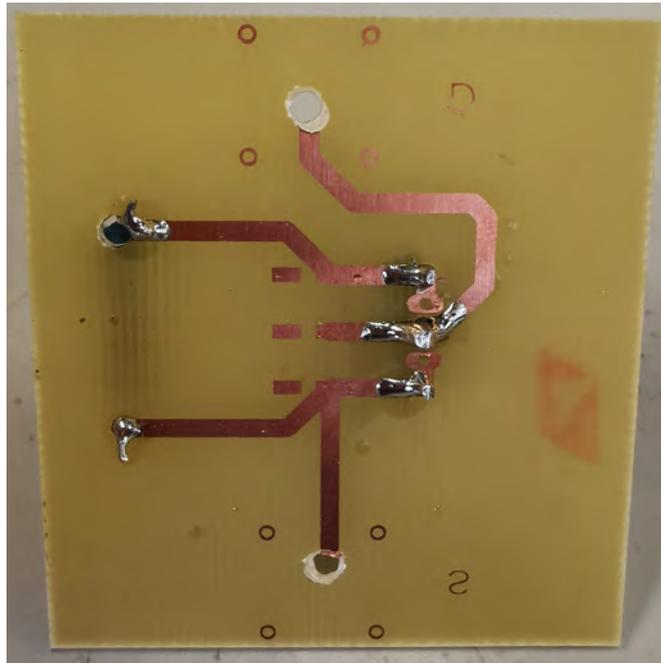


Figura 4-33 Placa del Diodo, Bottom

5 PLATAFORMAS DE MONTAJE

Se ha pretendido que todos los componentes sean montados sobre unas plataformas o sobre unas cajas, especialmente diseñadas para cada uno de los componentes. Esto viene del hecho de que este montaje se pretende que sea utilizado para alumnos de prácticas en clases de electrónica de potencia o similares y con estas cajas conseguiremos que el circuito sea más fácil de estudiar y más seguro. Esta será nuestra principal filosofía a la hora de diseñar las cajas. Además de esto se ha querido cuidar el aspecto en la medida de lo posible.

Cada una de las cajas ha sido pensada acorde con el componente que va a alojar. Además de esto, se ha intentado que el cambio entre los distintos tipos de convertidores sea lo más sencillo posible.

Una vez las cajas estén diseñadas se utilizará la tecnología de fabricación aditiva con impresión 3D para fabricarlas. Estos lo desarrollaremos más en profundidad en uno de los siguientes capítulos.

En primer lugar, se pensó un diseño en el que todas las cajas son muy similares y más robusto. Las cajas serían del mismo tamaño todas con un formato de etiqueta en la parte superior.

Para los componentes que requieran una mayor refrigeración se ha ideado un espacio completamente integrado en la caja para alojar un ventilador de 40x40mm. Ese ventilador se instalaría de forma que se extraiga el aire de la cavidad del componente.

Otra premisa era que los componentes se pudieran ver lo máximo posible. Así se pretendía que todas las cajas fueran tapadas con una placa de metacrilato como compromiso entre visibilidad y seguridad.

En cuanto al sistema de montaje se ha pensado en un sistema de taladros equiespaciados 1.5cm junto con unos tornillos metálicos o incluso impresos en 3D también.

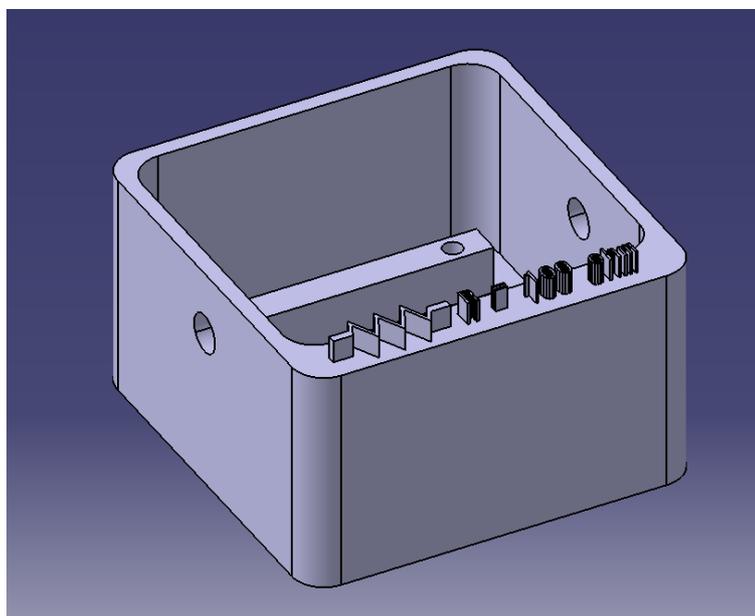


Figura 5-1 Versión inicial del primer diseño

Una vez se tenía este diseño, se procedió a su impresión a forma de prototipo y para poder realizar unas pruebas iniciales sobre este. La primera de las pruebas fue comprobar si aguantaba mecánicamente algo de peso. Tras esto y algunas consideraciones de temperatura se cambió a este segundo diseño:

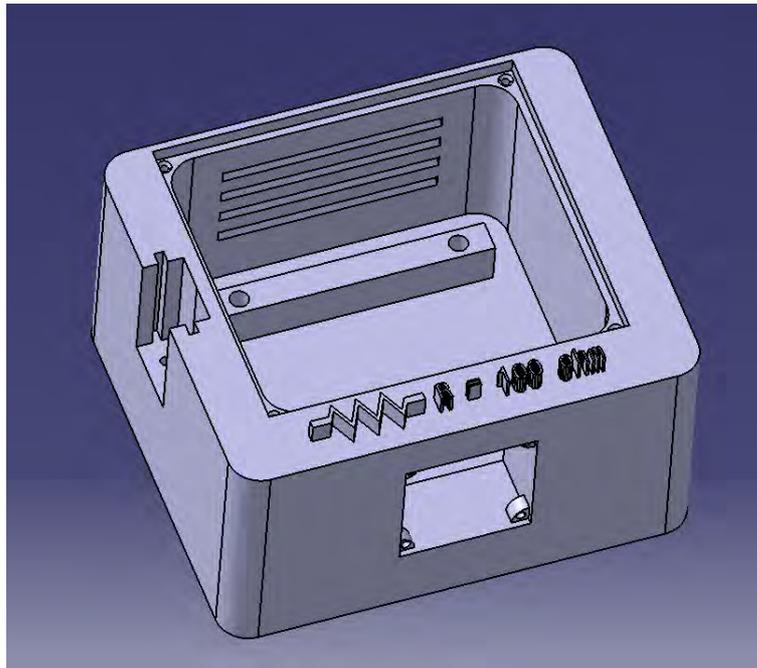


Figura 5-2 Segunda versión de la caja inicial

Como podemos ver se añadieron ranuras de ventilación al igual que un espacio adecuado para un ventilador que permitiría una ventilación activa. Además de esto las conexiones eléctricas se realizarían mediante un conector que adicionalmente sujetaría las cajas unidas entre sí. El conector es el siguiente:

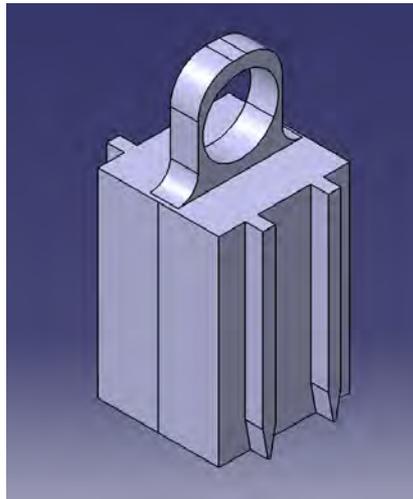


Figura 5-3 Conector mecánico y eléctrico

Finalmente, este diseño se consideró de lo más robusto y completo. Sería un diseño propio para un producto final, no tanto para la realización de unas prácticas por parte de los alumnos. De esta manera se ha optado por cajas mucho más abiertas y visibles, lo cual mejora la ventilación, y personalizadas para cada componente en particular.

5.1 Características comunes a todas las plataformas

Lo común a todas las cajas será las iniciales A.M.R. junto con el año de fabricación, 2019. De igual manera todas las cajas compartirán el mismo patrón para los orificios de ventilación, tratándose de hexágonos en los laterales de las cajas. En último lugar todas incluirán una abertura en la parte inferior para reducir el coste de fabricación relativo a tiempo y material, y también para ayudar de nuevo con la ventilación.

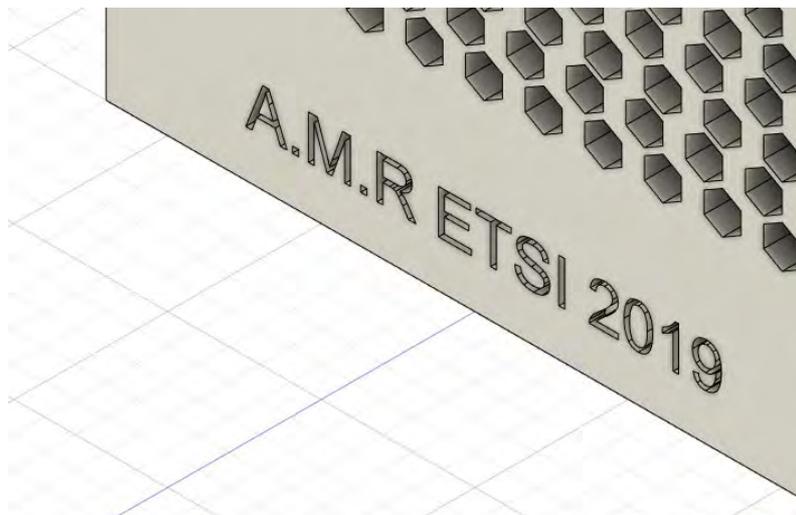


Figura 5-4 Detalle de Iniciales en una de las cajas

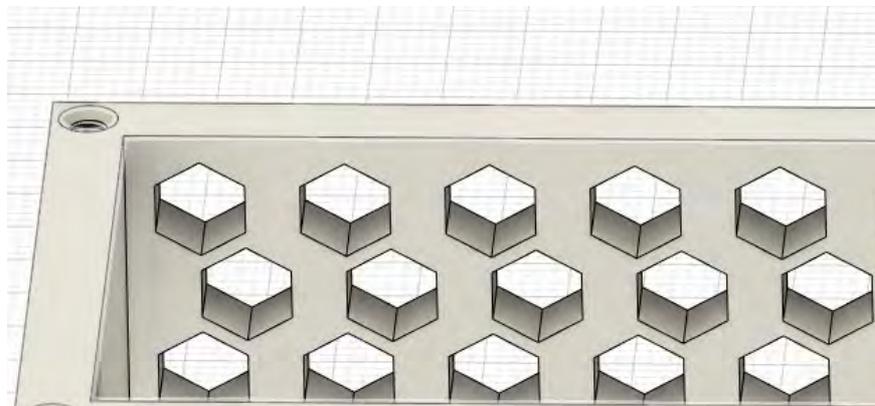


Figura 5-5 Detalle del patrón utilizado para la ventilación (1)

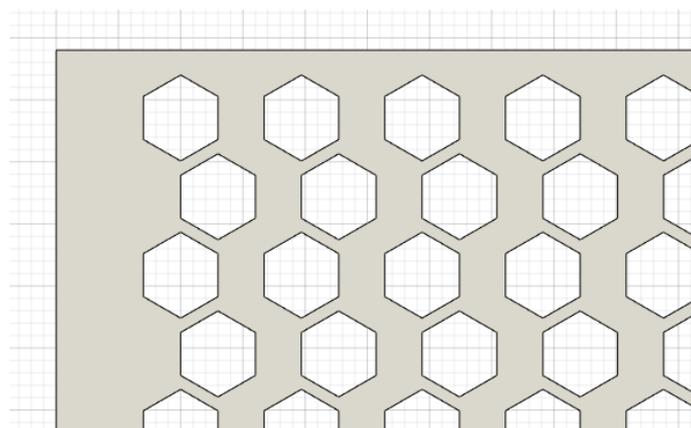


Figura 5-6 Detalle del patrón utilizado para la ventilación (2)

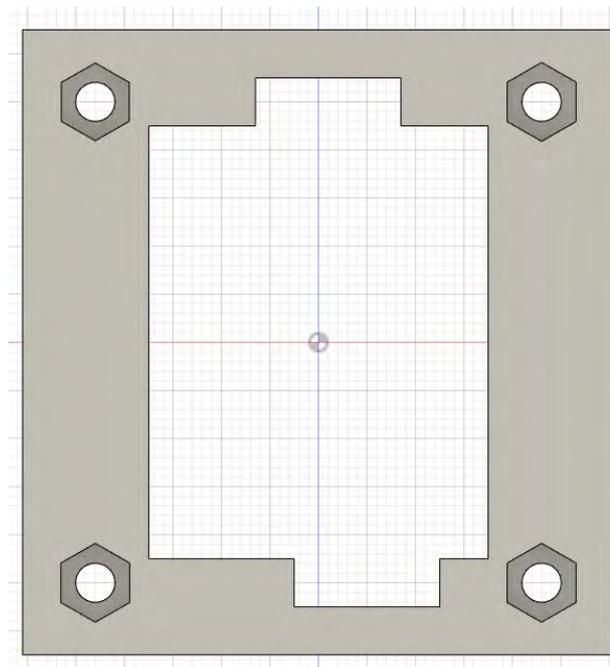


Figura 5-7 Detalle visto desde debajo de un ejemplo de abertura inferior

5.2 Diseño de la caja para medidas

En este caso el único requerimiento que tenemos es el mecánico, refiriéndonos a que aguante los esfuerzos mecánicos, y el de las conexiones de la propia placa que tienen que ser accesibles.

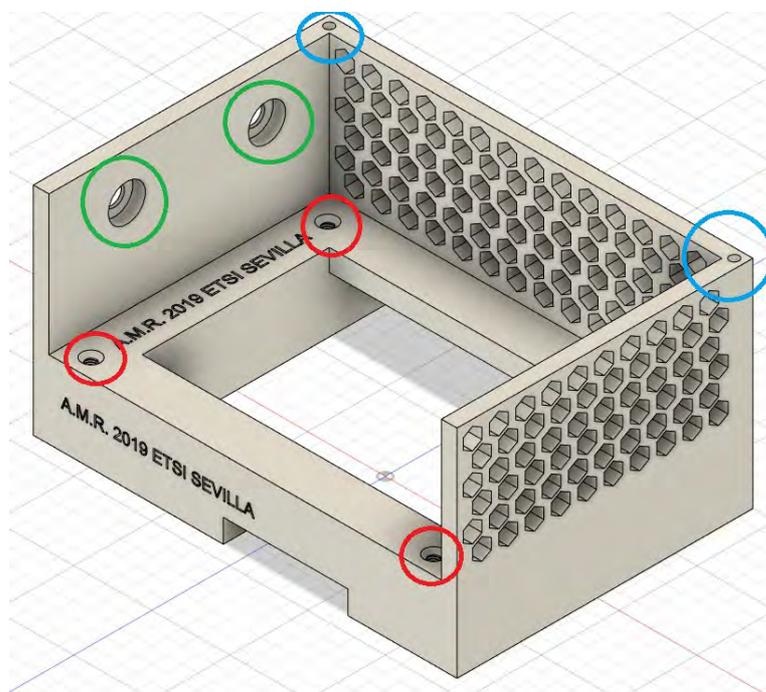


Figura 5-8 Vista general de la caja para medidas

Los distintos detalles de la caja están señalados en colores. En primer lugar y en azul tenemos los taladros para montar el policarbonato transparente que tapara la caja. En segundo lugar, en rojo tenemos los taladros para montar los soportes sobre los que irá montada la placa. En último lugar, en verde, tenemos los lugares en los que irán los conectores de banana a los que se conectarán los correspondientes cables para medir corrientes.

Los agujeros para estas conexiones las podemos ver mejor en la siguiente foto:

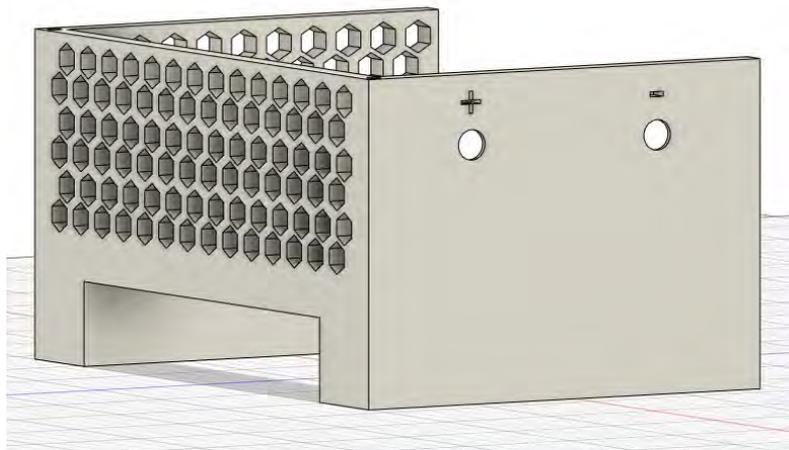


Figura 5-9 Detalle conexiones banana

5.3 Diseño de la caja para la placa de disparos

De nuevo para esta placa los únicos requerimientos eran que soportase la placa correspondiente y que las conexiones fueran accesibles:

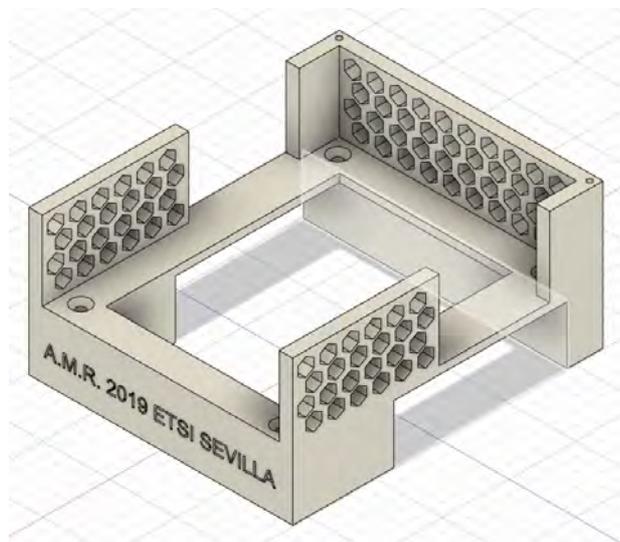


Figura 5-10 Vista general de la caja del driver

Aquí también tenemos los agujeros para el montaje tanto de la tapa como de los separadores que sujetaran la placa a la caja. Aparte de esto encontramos dos aberturas laterales para que sean accesibles los conectores banana de ambos drivers.

5.4 Diseño de la caja para el diodo

En este caso la caja deberá alojar la placa que contiene el MOSFET que hará las veces de diodo.

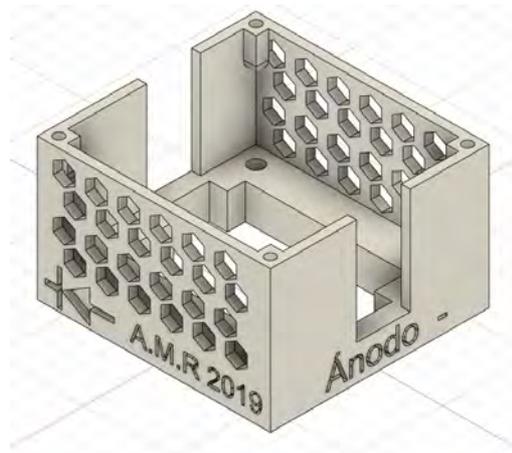


Figura 5-11 Vista general de la caja para el diodo

En esta caja hemos incluido el símbolo del diodo orientado de manera correcta al igual que un par de carteles con las palabras “Ánodo” y “Cátodo”, todo esto nos permitirá una conexión sencilla e intuitiva.

En esta caja para poder reducir el espesor de las paredes los agujeros de montaje de la tapa se hicieron sobre material en voladizo.

5.5 Diseño de la caja para el condensador

Esta caja simplemente tendrá que tener el condensador en su interior y un par de conectores hembra banana en sus laterales.

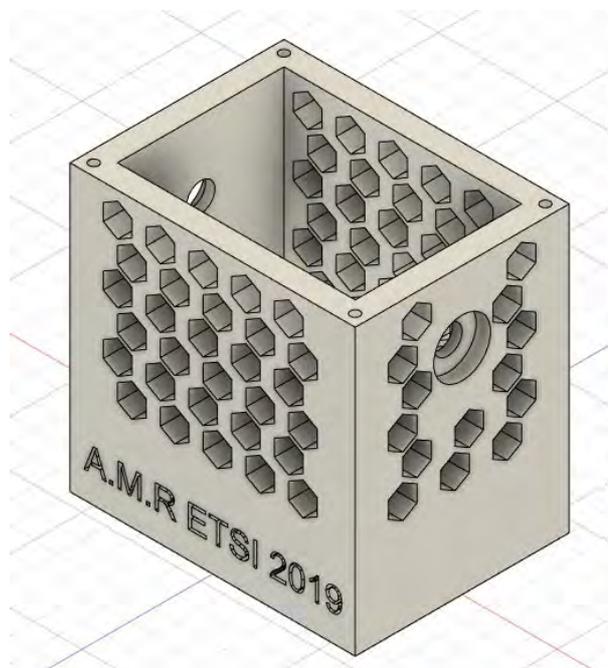


Figura 5-12 Vista general de la caja del condensador

Además de esto, tenemos que tener en cuenta que el condensador será electrolítico con el cual hay que tener mucho cuidado con la polaridad de conexión. Para esto se ha incluido una señal de atención en el lateral que se conectaría al polo negativo.

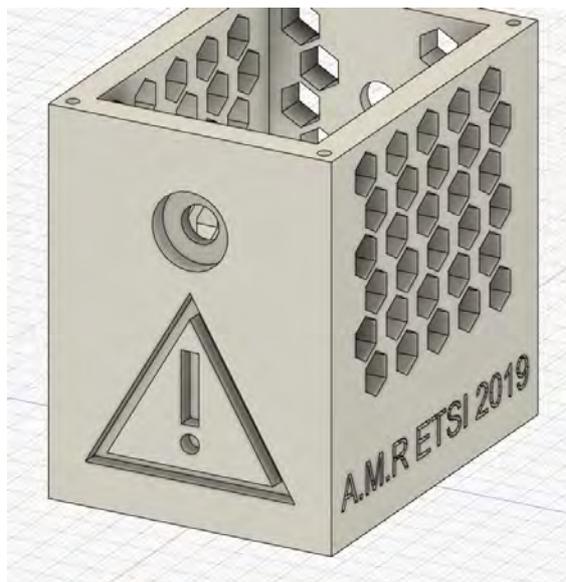


Figura 5-13 Detalle de la señalización de polarización

5.6 Diseño de la caja para la bobina

Esta caja no podía ser diseñada hasta que tuviéramos el componente concreto disponible, ya que este se hizo en particular para este proyecto. En esta caja también encontramos los dos puntos de conexiones banana, al igual que la placa sobre la que va pegada la bobina, está atornillada a la caja.



Figura 5-14 Vista general caja de la bobina

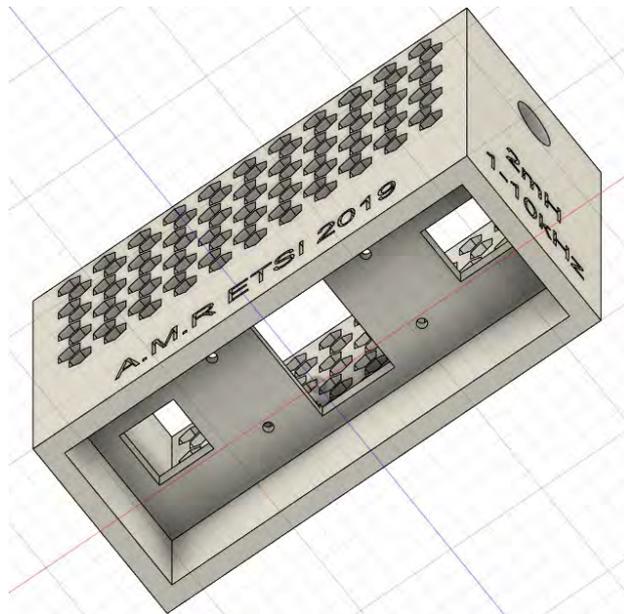


Figura 5-15 Detalle de la parte inferior de la caja

5.7 Diseño de la caja para la resistencia

En este caso encontramos varios problemas a la hora del diseño de esta caja. El primero y principal es que el componente a montar, la resistencia, dependiendo del tiempo y la tensión a la que se utilizara podía llegar a temperaturas bastante elevadas.

Debido a esto se llevaron a cabo varias versiones de la caja, el motivo de estos cambios los detallaremos más en el capítulo siguiente.

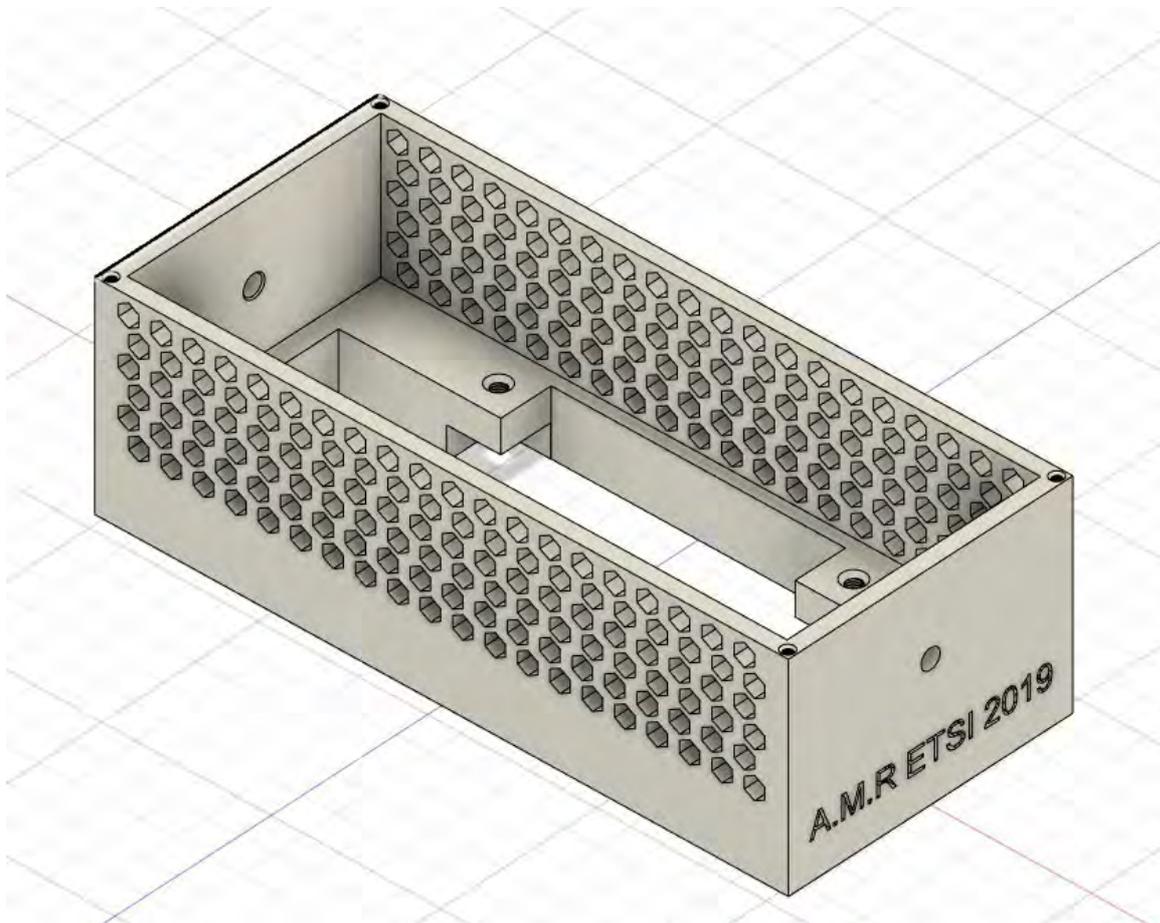


Figura 5-16 Primera versión de la caja

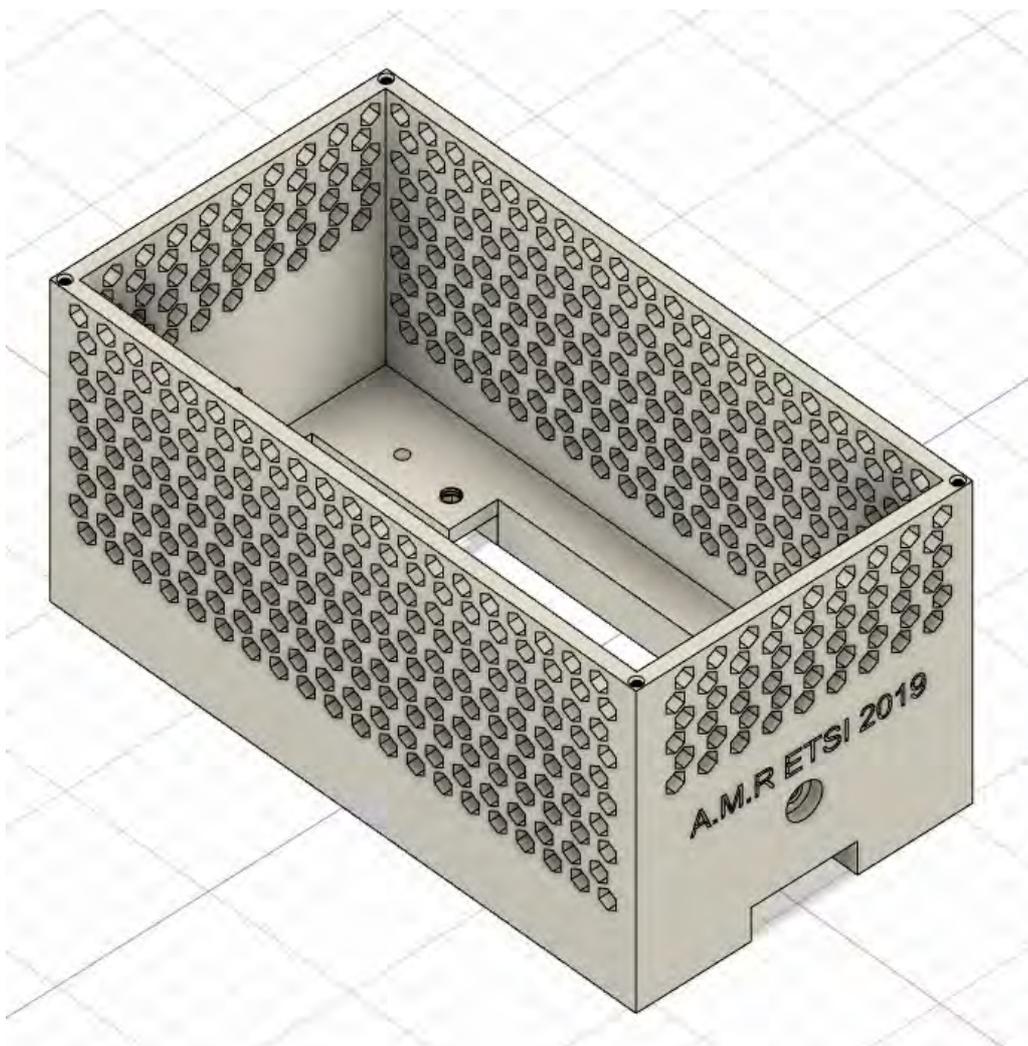


Figura 5-17 Versión final de la caja

5.8 Diseño de las etiquetas

Además de las etiquetas que ya van escritas en las propias cajas, se pensó añadir unas etiquetas montadas encima de las placas para facilitar más aún su comprensión por parte de los alumnos.

Así, tenemos dos etiquetas: una para la caja de medidas y otra para la caja del driver.

Aquí tenemos la de las medidas:

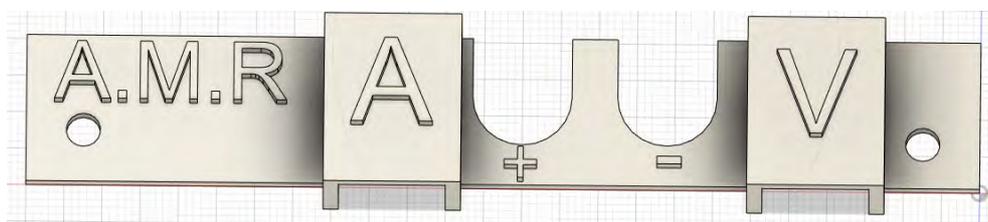


Figura 5-18 Etiqueta para las cajas de medidas

En esta hemos indicado cuales son los puertos de medida. Con una "A" el puerto de medida de corriente y con una "V" el de voltaje. Además de esto tenemos la polaridad para la medida de tensión.

Y la de los disparos:

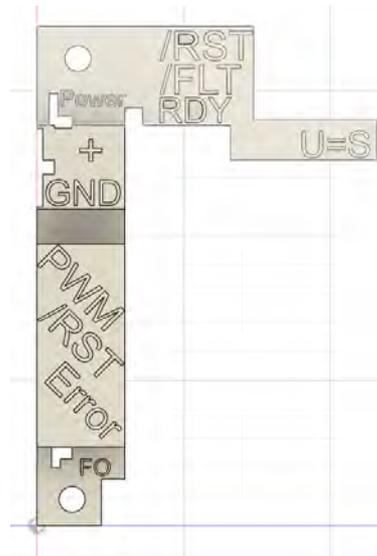


Figura 5-19 Etiqueta para la caja de disparos

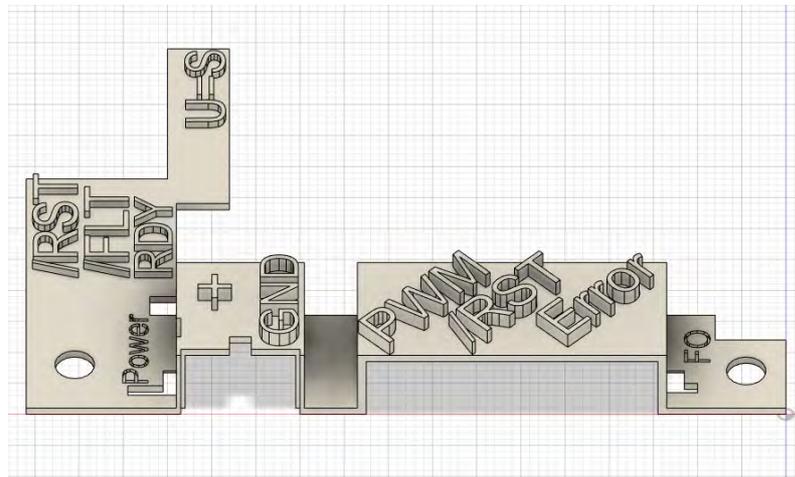


Figura 5-20 Etiqueta para la caja de disparos, vista lateral

Aquí hemos indicado de nuevo cual es cada uno de los puertos de conexión: “PWM” para la señal de disparos,” /RST” para el Enable y “Error” la señal de salida de error del driver. También tenemos la polaridad de la alimentación y unas etiquetas que indican el significado de ciertos leds, “/RST” el mismo comentado antes, “/FLT” similar al “Error” anterior y “RDY” que nos indica cuando los drivers están alimentados de manera correcta.

6 FABRICACIÓN Y MONTAJE DE LOS BLOQUES

En este apartado vamos a ver tanto las cajas una vez ya fabricadas tanto su ensamblaje con las placas o componentes pasivos correspondientes. Durante este capítulo y en adelante llamaremos “bloque” al conjunto de placa o componente más su caja correspondiente.

6.1 Listado de herramientas utilizadas

Antes de comenzar, debido a que se trata de un apartado técnico, vamos a hacer un repaso de las herramientas que se utilizarán para la fabricación y montaje de todos los bloques:

- Llaves Allen de distintas métricas (M3, M4, M5, M6)
- Destornilladores de estrella de varios tamaños
- Destornilladores planos de varios tamaños
- Destornillador Torx
- Alicates de corte
- Alicates estándar
- Alicates finos
- Tijeras
- Taladro manual
- Taladro vertical
- Brocas para madera de diámetros variados (M3, M4, M5, M6)
- Brocas para plástico de diámetros variados (M3, M4, M5, M6)
- Machos para roscar de distintas métricas (M3, M4, M5, M6)
- Llaves inglesas regulables
- Regla metálica
- Tornillo de banco
- Pistola de aire caliente
- Soldador
- Lija con mango
- Impresora 3D por tecnología de deposición

Con esto nos podemos hacer una idea de todo lo que se empleó a la hora de hacer el montaje final.

6.2 Fabricación por impresión 3D

Para fabricar todas las cajas comentadas en la sección anterior se ha utilizado una impresora 3D que utiliza la tecnología de deposición.

Se trata del modelo Prusa MK3 de Prusa Research:



Figura 6-1 Impresora Prusa MK3



Figura 6-2 Impresora en proceso de imprimir la caja para la resistencia



Figura 6-3 Impresora en proceso de imprimir la caja para las medidas

Todas las cajas se han impreso con la misma configuración y el mismo material. Se ha decidido imprimirlas en PLA debido a la facilidad para el rápido prototipado y su facilidad de suministro e impresión.

En impresión 3D encontramos 3 factores fundamentales los cuales podemos ir manejando para cambiar el comportamiento de la impresora:

- **Altura de capa:** este tamaño, medido normalmente medido en mm, nos indica el tamaño en vertical, o espesor, que tendrá cada capa de la impresión. Es algo así como la resolución con la que queremos que salga la pieza, más pequeña más resolución y por lo tanto mayor calidad de detalle y viceversa.
- **Temperatura del extrusor:** se trata a la temperatura que ponemos la boquilla por la que sale el plástico. Esta temperatura es un parámetro casi esencial del plástico que estemos utilizando en cuestión. Depende del punto de fusión y algún otro parámetro del plástico, así, una vez elegido el plástico este factor lo podemos dejar constante.
- **Temperatura de la cama caliente:** se trata de la temperatura a la cual ponemos la superficie sobre la que vamos a imprimir. Al calentar la superficie conseguimos una mayor adherencia del plástico a esta y por lo tanto menos posibilidades de que se despegue y que la impresión acabe en fallo. Al igual que el parámetro anterior, depende del plástico que vayamos a utilizar.

En nuestro caso los valores utilizados fueron:

- Altura de capa de 0.3 mm
- Temperatura del extrusor, 215 °C
- Temperatura de la cama caliente, 60 °C

6.3 Montaje del bloque de medidas

Una vez con el diseño de cada versión se llevó a la impresora la cual realiza el proceso fabricación al completo. Aquí tenemos los datos de las impresiones.

Tabla 6–1. Impresiones de la caja de medidas

Peso por unidad	Tiempo por impresión	Nº Intentos
120g	6h 45min	4

Aquí podemos ver la impresión un poco más avanzada de la impresión.

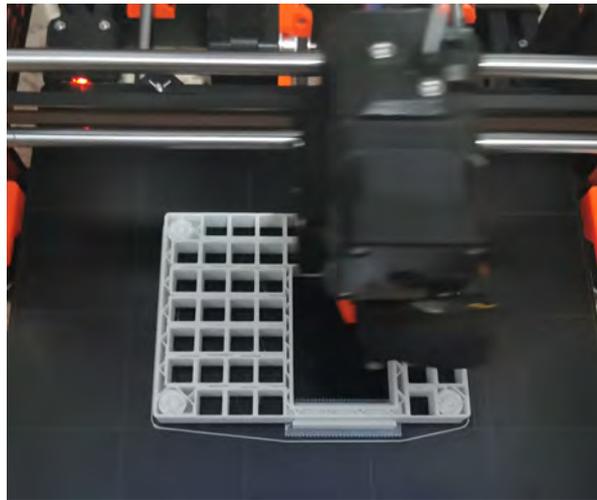


Figura 6-4 Impresora realizando la caja de medidas

La caja una vez finalizada y con los separadores atornillados queda así:



Figura 6-5 Caja de medidas impresa vista de frente



Figura 6-6 Caja de medidas impresa, vista lugar conectores

Estas las podemos comparar con los modelos realizados en el apartado anterior.

Una vez ya tenemos la placa con los componentes soldados y la versión definitiva de la caja podemos pasar a montarlos. Además, se utilizaron varios elementos adicionales:

Tabla 6-2. Elementos empleados

Elemento	Unidades utilizadas
Placa medidas completada	1
Caja medidas completada	1
Etiqueta conexiones	1
Separadores Nylon M4	4
Tornillos M3	2
Tornillos M4	4
Conectores Banana	2
Tapa policarbonato	1

Para este bloque tuvimos que colocarlo todo y atornillar los separadores, los conectores banana y los tornillos correspondientes. Aquí tenemos el resultado a falta de conectar el sensor de corriente.

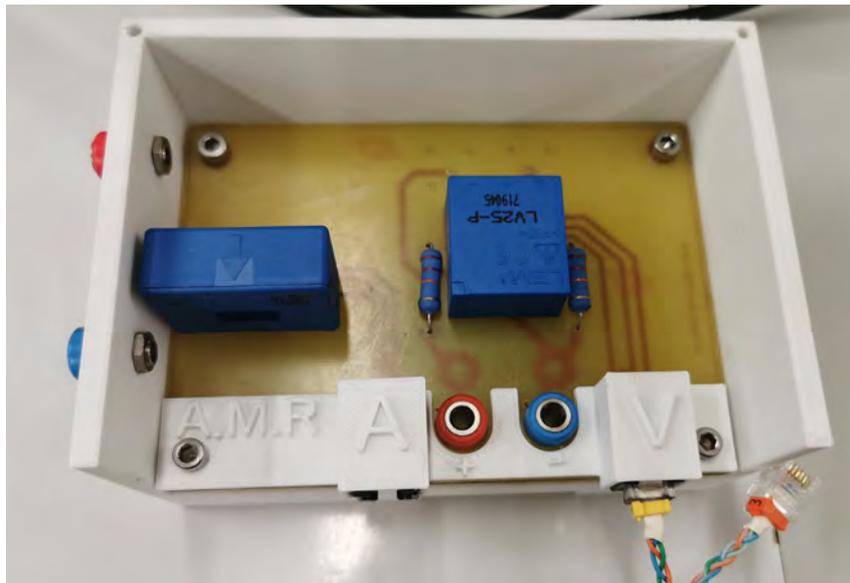


Figura 6-7 Bloque de medidas finalizado a falta de la tapa de policarbonato

Una vez se colocó las conexiones del sensor de corriente y la tapa, tenemos el modelo finalizado.

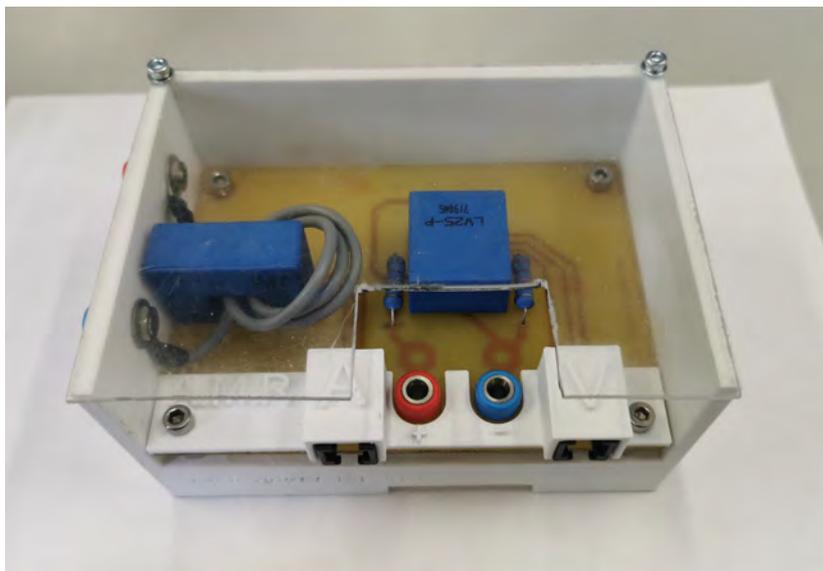


Figura 6-8 Bloque de medidas finalizado, vista de frente

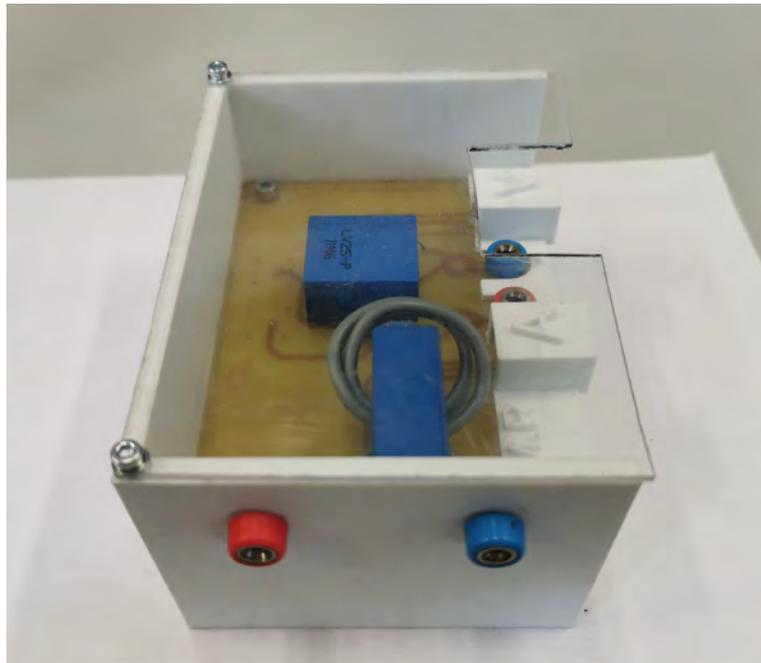


Figura 6-9 Bloque de medidas finalizado, vista de lateral

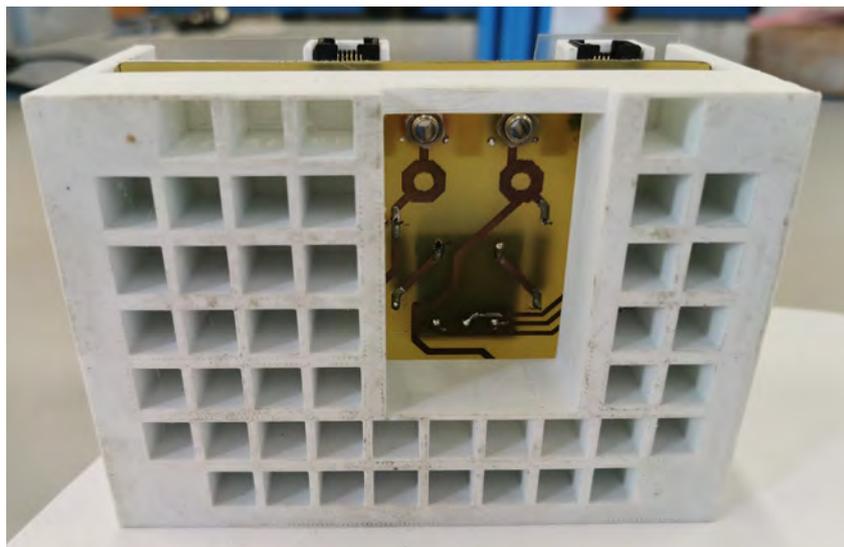


Figura 6-10 Bloque de medidas finalizada, vista inferior

6.4 Montaje del bloque para los disparos

Para el bloque de disparos el procedimiento fue muy similar en cuanto a fabricación y montaje, ya que se trataba de otra placa de circuito integrado a la cual había que realizar conexiones desde fuera.

Los datos de impresiones son los siguientes:

Tabla 6-3. Impresiones de la caja de medidas

Peso por unidad	Tiempo por impresión	Nº Intentos
80g	5h	3

Tabla 6-4. Elementos empleados

Elemento	Unidades utilizadas
Placa disparos completada	1
Caja disparos completada	1
Etiqueta conexiones	1
Separadores Nylon M4	4
Tornillos M3	2
Tornillos M4	4
Tapa policarbonato	1

Montado todo tendríamos la versión final a emplear



Figura 6-11 Bloque de disparos finalizado, vista frontal

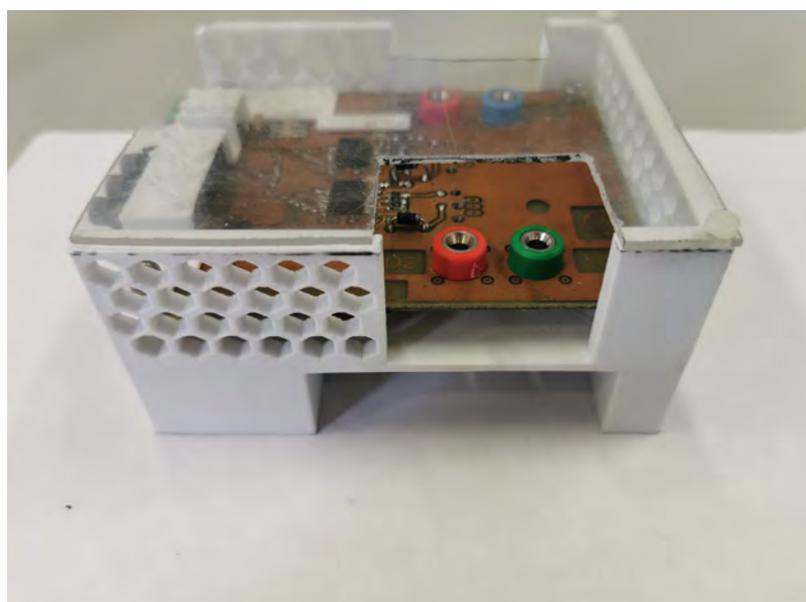


Figura 6-12 Bloque de disparos finalizado, vista lateral

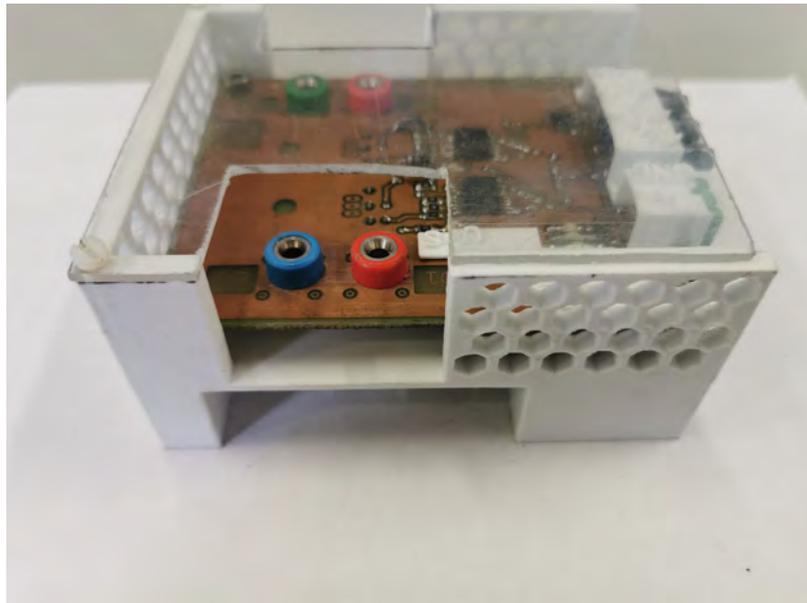


Figura 6-13. Bloque de disparos finalizado, vista lateral

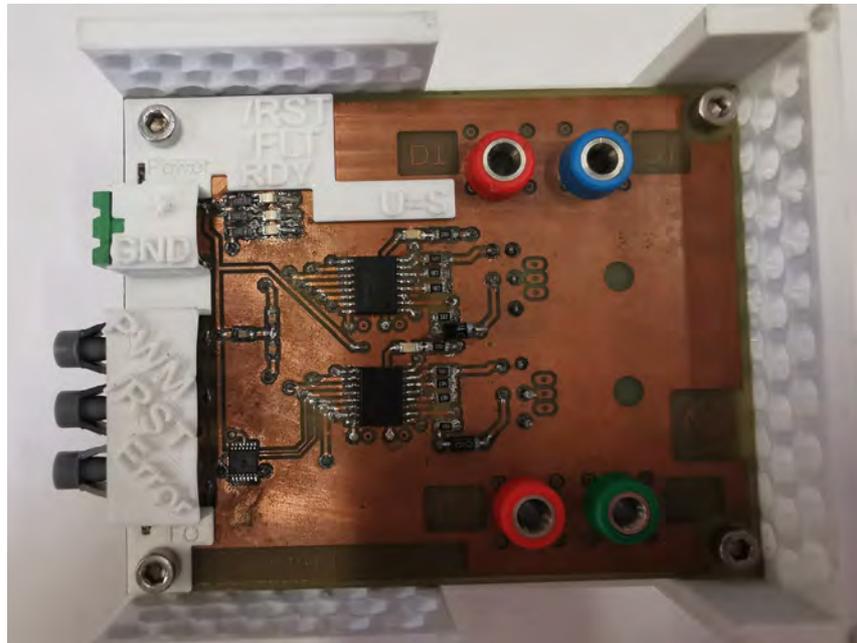


Figura 6-14. Bloque de disparos finalizado, vista en planta sin tapa

En esta última podemos ver cómo queda la etiqueta que nos da información acerca de la distribución de la placa.

6.5 Montaje del bloque para el diodo

Este caso es más sencillo ya que no tenemos etiqueta alguna por estar esta incluida en la caja.

Los datos de impresión son los siguientes:

Tabla 6-5. Impresiones de la caja de medidas

Peso por unidad	Tiempo por impresión	Nº Intentos
35g	2h 25min	3

Tabla 6-6. Elementos empleados

Elemento	Unidades utilizadas
Placa diodo completada	1
Caja diodo completada	1
Separadores Nylon M4	4
Tornillos M3	4
Tornillos M4	4
Tapa policarbonato	1

El bloque una vez terminado queda así:



Figura 6-15. Bloque de diodo terminado, vista frontal

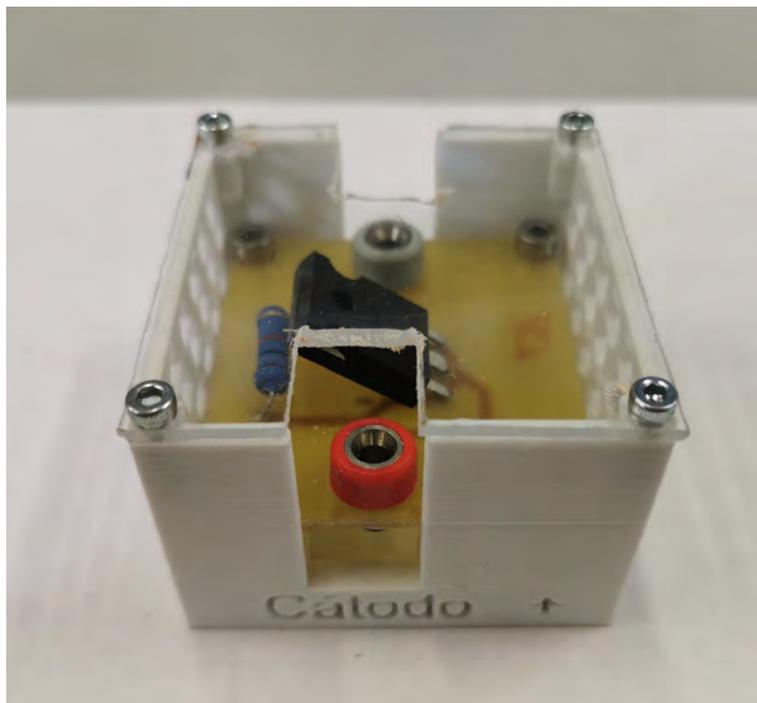


Figura 6-16. Bloque de diodo terminado, vista lateral

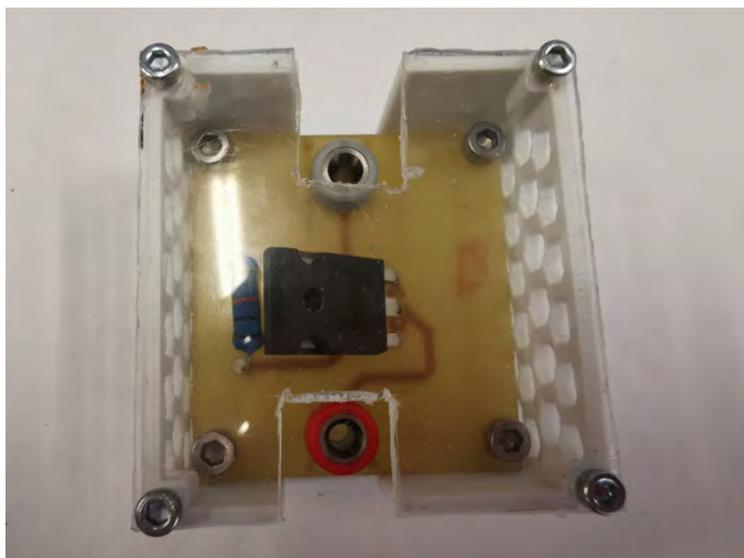


Figura 6-17. Bloque de diodo terminado, vista en planta

6.6 Montaje del bloque para la bobina

La bobina que teníamos disponible estaba montada sobre un trozo de placa el cual hemos taladrado y realizado la rosca para después atornillarla a la caja. Los datos de impresión son los siguientes:

Tabla 6-7. Impresiones de la caja de medidas

Peso por unidad	Tiempo por impresión	Nº Intentos
114g	7h 45min	1

Tabla 6-8. Elementos empleados

Elemento	Unidades utilizadas
Bobina taladrada	1
Caja bobina completada	1
Tornillos M3	4
Tuerca M3	4
Tapa policarbonato	1
Conectores banana	2



Figura 6-18. Bloque de bobina terminado, vista frontal



Figura 6-19. Bloque de bobina terminado, vista lateral



Figura 6-20. Bloque de bobina terminado, vista inferior de la sujeción

6.7 Montaje del bloque para el condensador

Este bloque junto con el siguiente de la resistencia, no tiene una placa la cual atornillar a la caja o a un separador por lo que el montaje será algo distinto.

Los datos de impresión son los siguientes:

Tabla 6-9. Impresiones de la caja de medidas

Peso por unidad	Tiempo por impresión	Nº Intentos
51g	3h 40min	2

Tabla 6–10. Elementos empleados

Elemento	Unidades utilizadas
Condensador	1
Caja condensador completada	1
Tornillos M3	4
Tornillos M4	4
Tapa policarbonato	1

Se decidió montar el condensador apoyado en una hendidura de su mismo diámetro y dejando los cables con una longitud tal que no diera lugar a que se moviera, ya que estos están atornillados a los conectores exteriores.



Figura 6-21 Bloque de condensador finalizado, vista frontal



Figura 6-22 Bloque de condensador finalizado, vista lateral

6.8 Montaje del bloque para la resistencia

Este bloque es el que más tiempo llevo realizar debido a las complicaciones por alta temperatura que nos encontrábamos. Esto se vio reflejado también en los varios diseños que tuvimos que hacer.

El requerimiento de esta caja es que pudiese aguantar entre 30-40 minutos una tensión razonable a la salida. Esta

tensión llegó a ser unos 70-80V. No podía ser accesible desde el exterior por el riesgo de quemadura.

6.8.1 Pruebas de temperatura y pruebas destructivas

Para tener una idea de las temperaturas reales que iba a alcanzar la resistencia hicimos varias pruebas para tomar imágenes y medidas de temperatura con una cámara termográfica.

Las pruebas consistían en la resistencia conectada a la fuente de alimentación y apoyada sobre un bloque de madera o sobre la primera versión de la caja. Todas estas pruebas fueron realizadas desde **condiciones iniciales**, es decir, con todo el montaje a temperatura ambiental.

El hecho de hacer las pruebas sobre una primera versión de la caja era que debido a que se quería comprobar experimentalmente cuánto podía aguantar el plástico elegido en este caso. Llegando a pruebas destructivas si se podía.

Comenzamos las pruebas con un voltaje reducido de 25V y tras 30 minutos estas fueron las medidas.

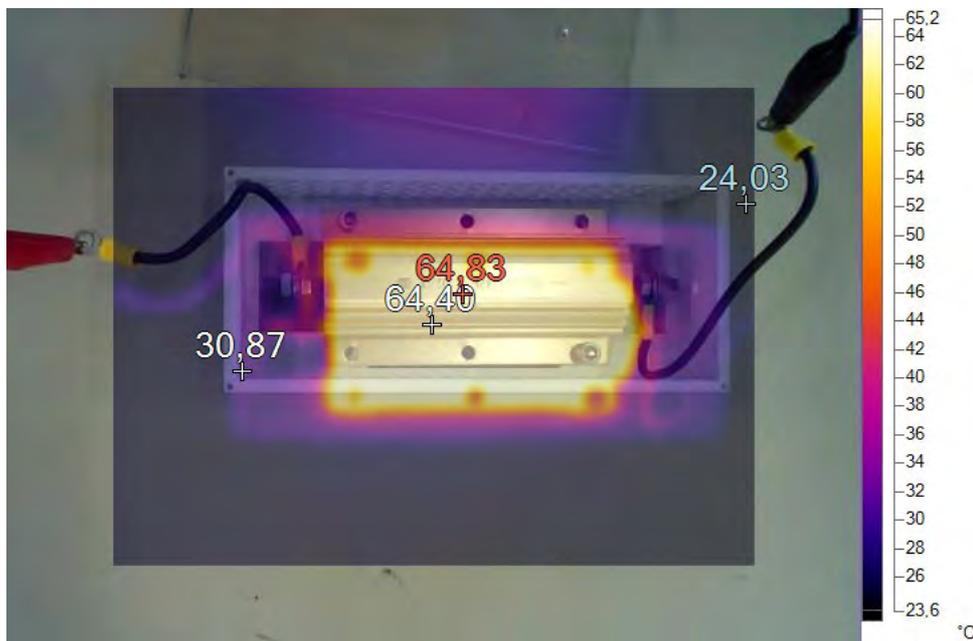


Figura 6-23 Imagen termográfica del bloque en planta durante la prueba a 25V



Figura 6-24 Imagen termográfica del bloque visto desde abajo durante la prueba a 25V

Como podemos observar en las imágenes, la caja aguanta en perfectas condiciones sin deformarse en un tiempo de margen razonable.

Pasamos a la prueba a 50V. Repetimos el mismo montaje desde condiciones iniciales.

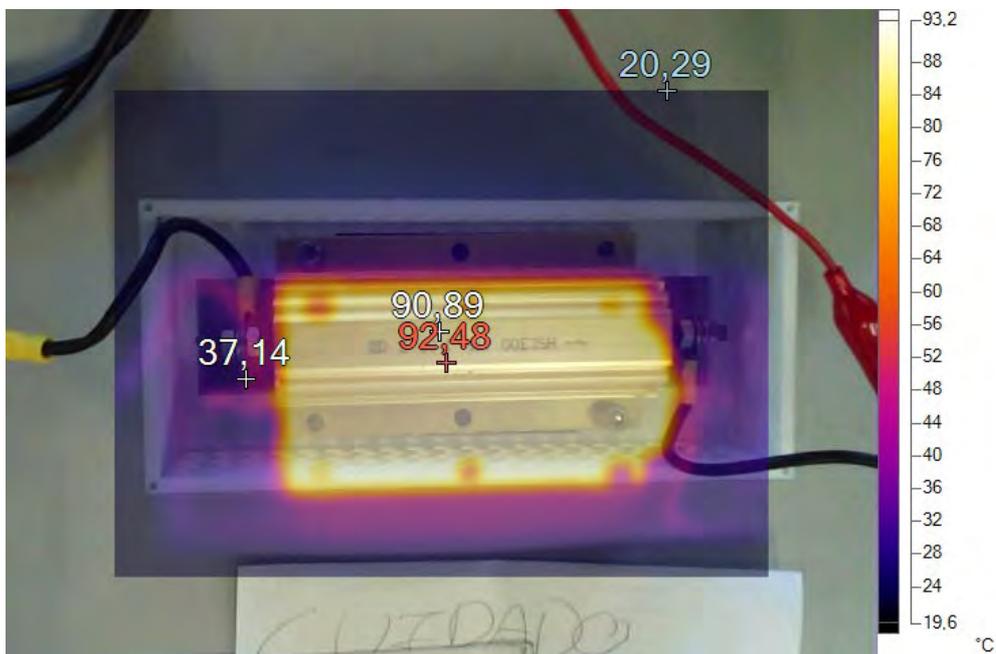


Figura 6-25 Imagen termográfica del bloque en planta durante la prueba a 50V

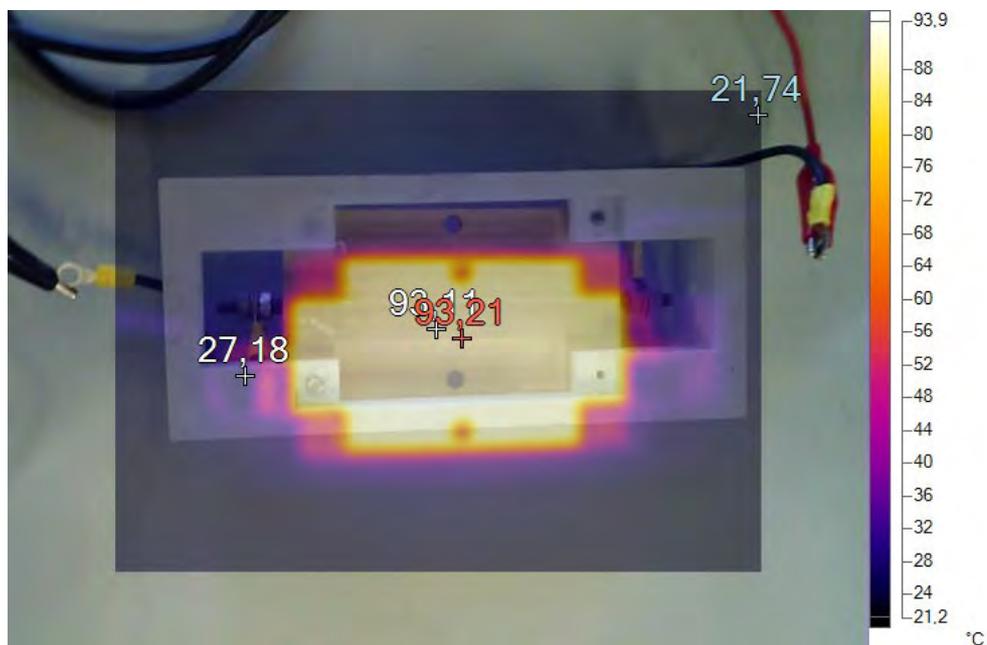


Figura 6-26 Imagen termográfica del bloque visto desde abajo durante la prueba a 50V

Las imágenes anteriores fueron tomadas tras 15 minutos de estar el montaje en funcionamiento. Como podemos ver la caja todavía aguanta, así que procedemos a esperar otros 15 minutos.

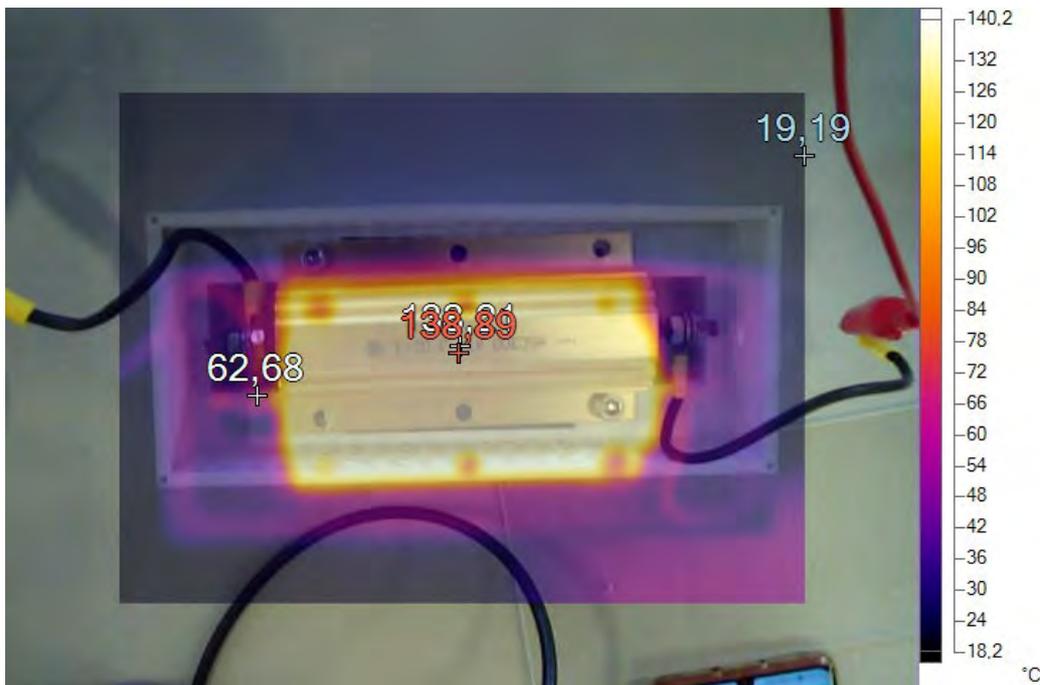


Figura 6-27 imagen termográfica del bloque en planta durante la prueba a 50V

Después de llevar 30 minutos conectado vemos que la tempera se empieza a acercar a la temperatura de fusión del plástico así que decidimos para la prueba, aunque el plástico aún aguanta consideramos que es un tiempo aceptable.

Seguimos subiendo el voltaje, esta vez hasta 75V. Repetimos la prueba.

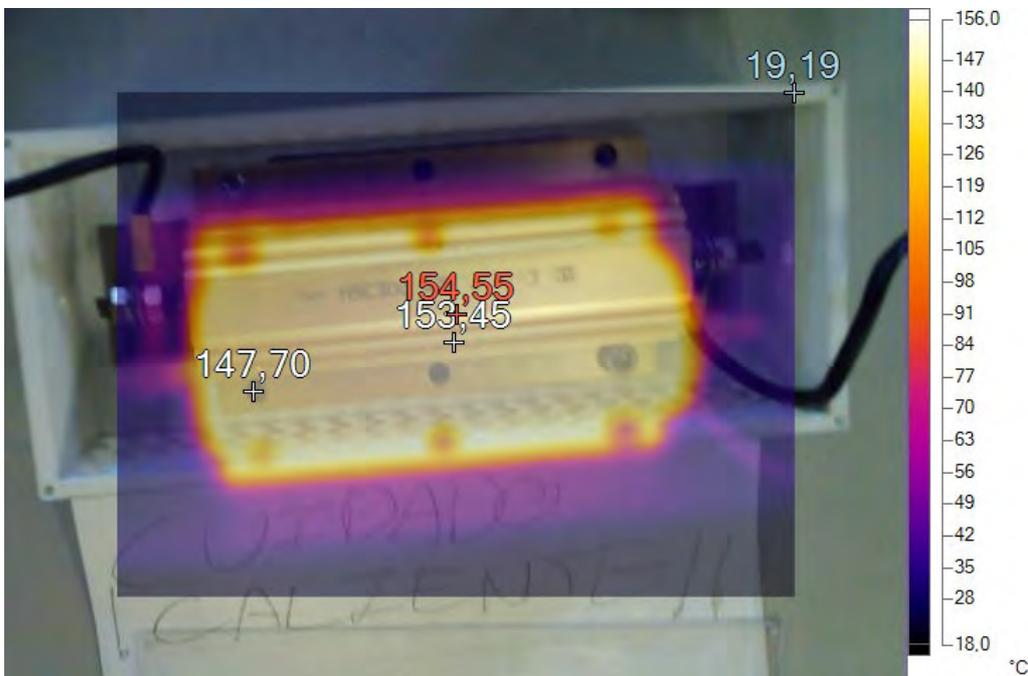


Figura 6-28 Imagen termográfica del bloque en planta durante la prueba a 75V

Aquí se realiza la imagen a los 10 min de estar conectada y cómo podemos ver a este voltaje la temperatura incrementa bastante rápido, llegando a los 155°C. Aun así, la dejamos conectada y bajo supervisión.

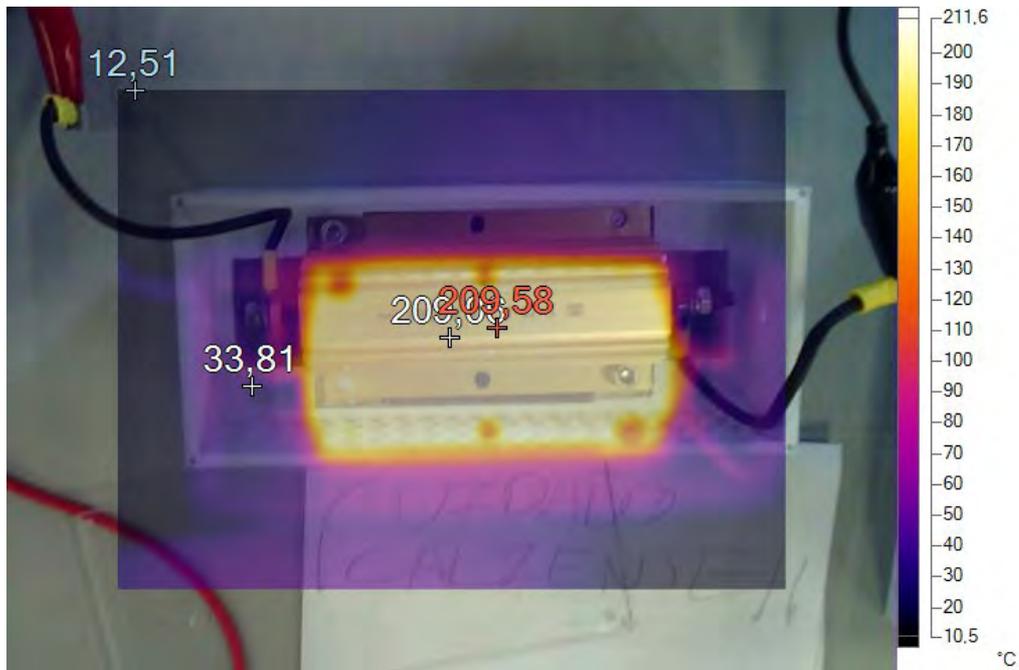


Figura 6-29 Imagen termográfica del bloque en planta durante la prueba a 75V

En esta imagen podemos ver cómo hemos llegado y sobrepasado la temperatura de fusión del plástico y hemos alcanzado 210°C, temperatura a la cual el plástico no mantiene su integridad mecánica y es fácilmente maleable.

En las siguientes fotos podemos observar cómo quedó la caja tras estas pruebas, especialmente tras esta última en la que se alcanzaron los 210°C.

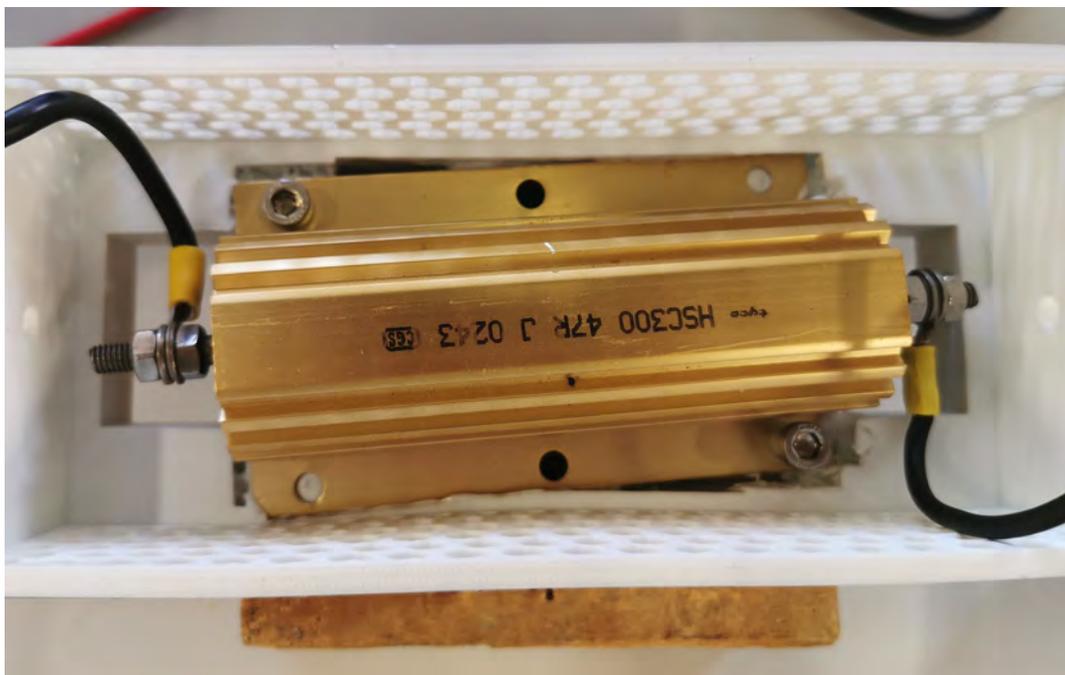


Figura 6-30 Caja de la resistencia destruida por la temperatura alcanzada

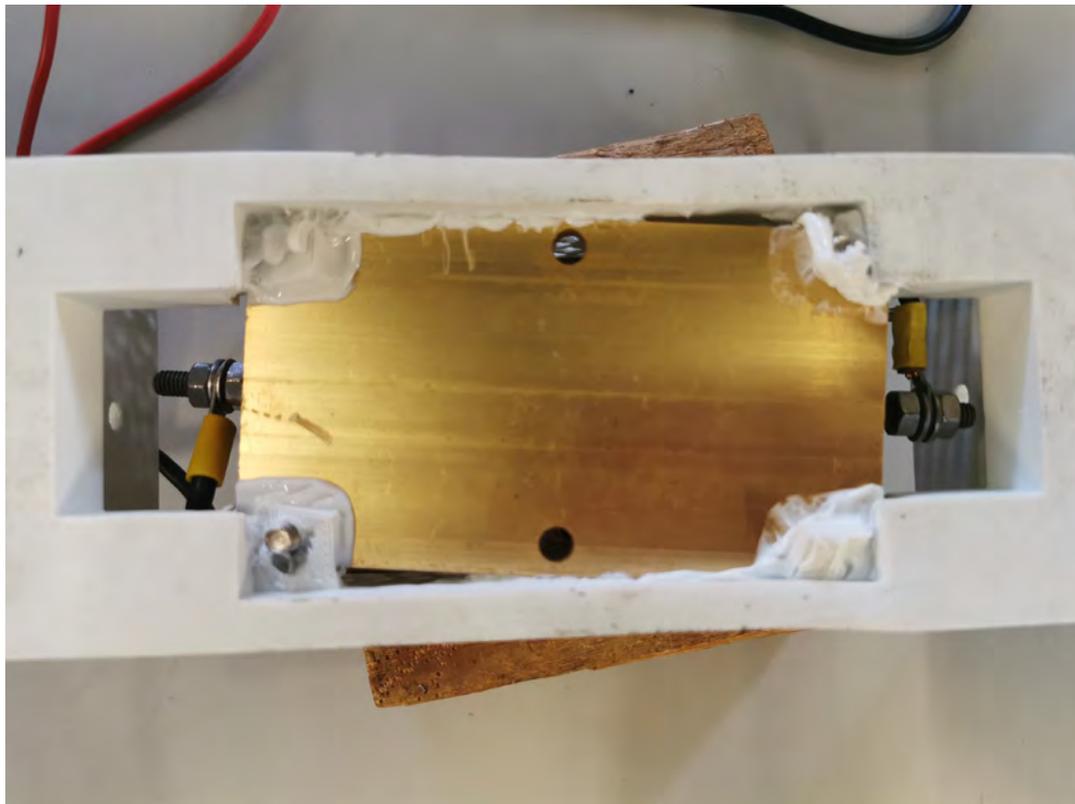


Figura 6-31 Caja de la resistencia destruida por la temperatura alcanzada

Visto esto, la resistencia no puede ir montada directamente a la caja si queremos tener estas condiciones de trabajo. En la próxima sección explicaremos la manera de montaje que se adoptó.

Como última prueba se conectó la resistencia a 100V para ver como de rápido podía llegar a calentarse la resistencia. Esta prueba se realizó una vez la caja había sido destruida por lo que se probó encima de un bloque de madera temporal. Tras 10 minutos esta fue la imagen:

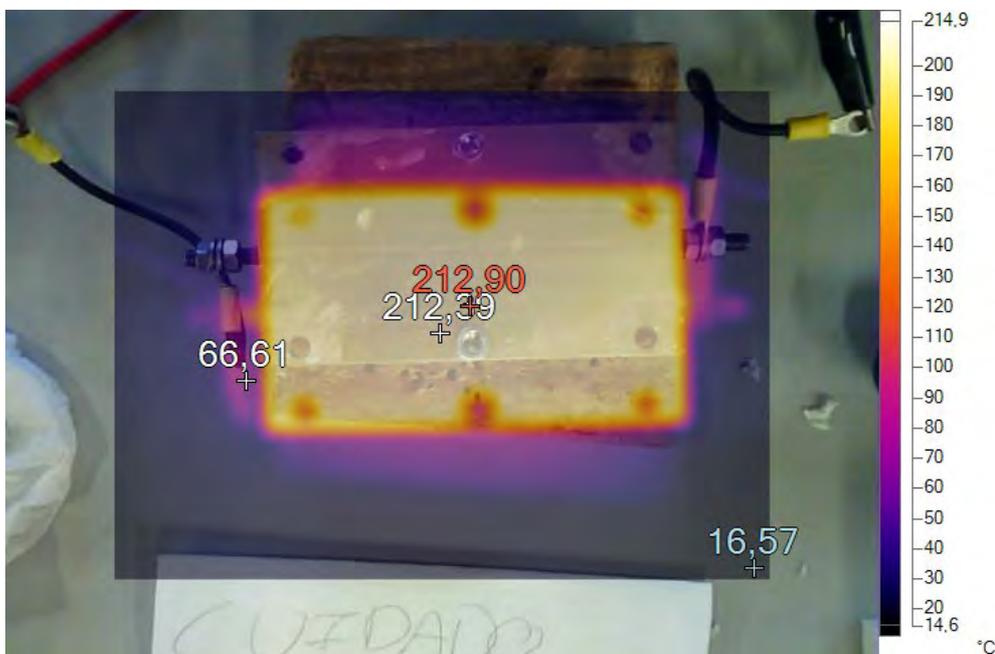


Figura 6-32 Resistencia conectada a 100V tras 10 minutos

6.8.2 Montaje final

Vistos los problemas de temperatura de la sección anterior se cambió la forma de montaje radicalmente.

Necesitábamos aislar la conexión de la resistencia con la caja. Para esto montamos la resistencia a un rectángulo

de silueta algo mayor a la resistencia y después esta madera fue la que se atornillo a la caja mediante unos tornillos distintos. Con esto eliminamos el camino de conducción de calor que eran los tornillos que conectaban la caja con la resistencia. Aquí abajo podemos ver un diagrama de dicha conexión.

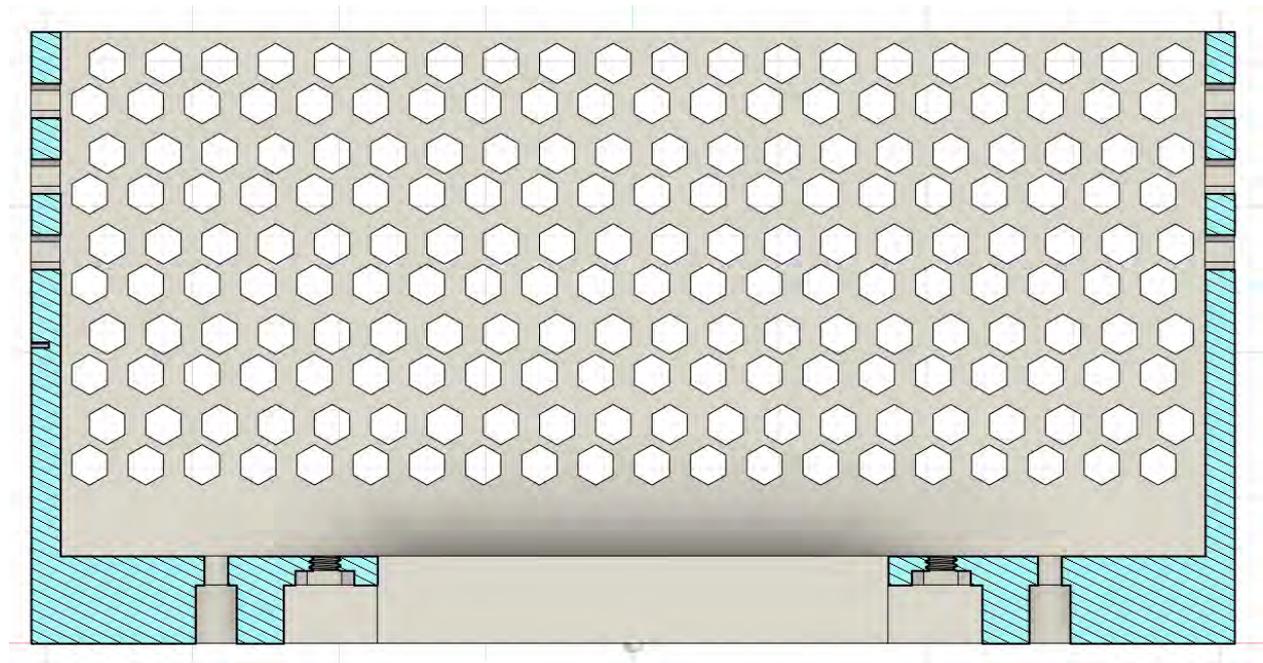


Figura 6-33 Diagrama para el montaje final de la resistencia

Y una vez ya montado y atornillado queda así.



Figura 6-34 Vista en planta del bloque de la resistencia ya finalizado

Como podemos ver la resistencia está sujeta a la madera mediante dos tornillos (señalados en verde) y a su vez la madera está sujeta a la caja mediante 3 tornillos (señalados en azul).

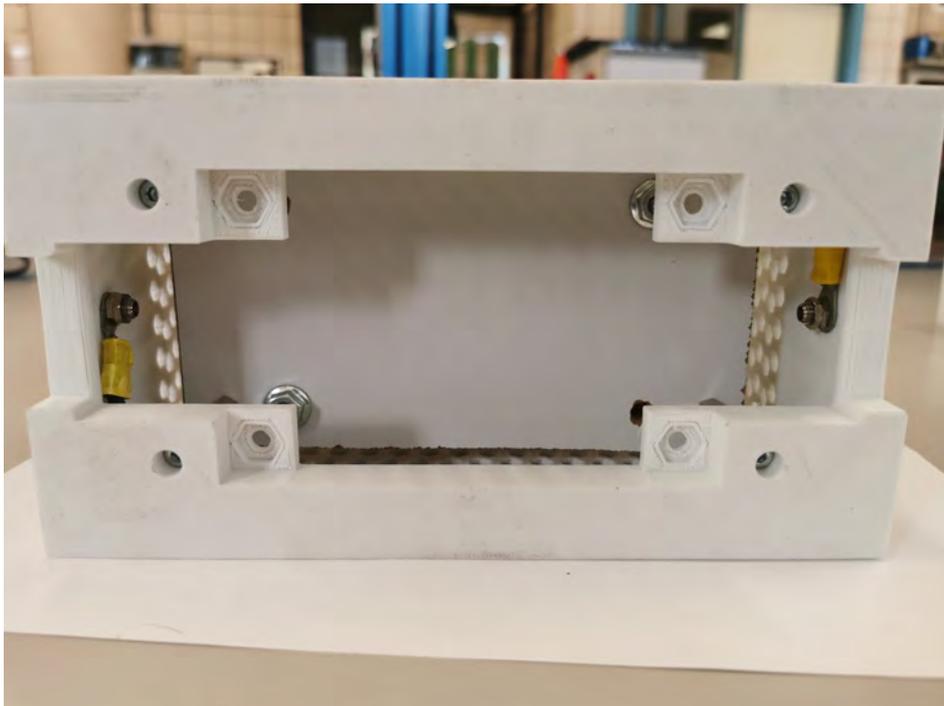


Figura 6-35 Vista inferior del bloque de la resistencia ya finalizado

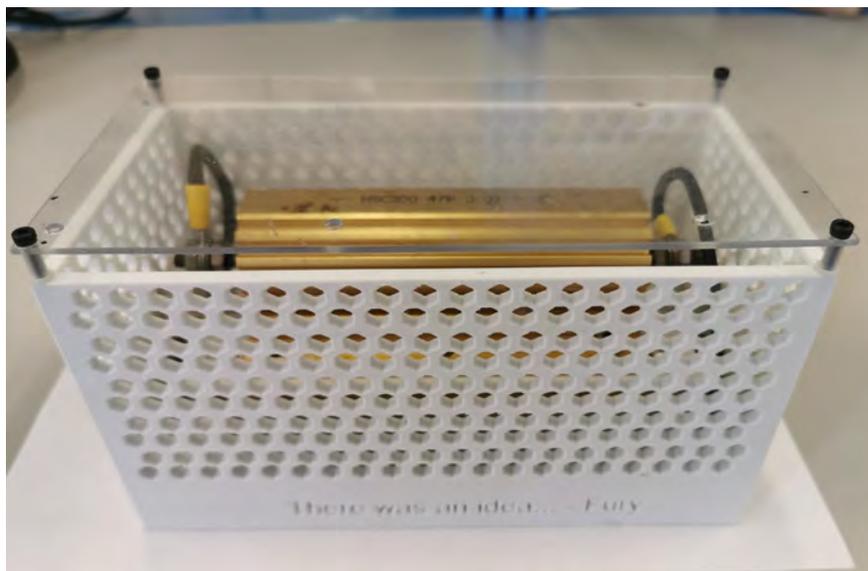


Figura 6-36 Vista lateral del bloque de la resistencia ya finalizado

Además de la forma de conexión podemos destacar que se aumentó el tamaño de la caja. Se aumentó 1cm el largo y en 4cm el ancho. Esto se hizo con el objetivo de tener un mayor volumen de aire para refrigerar al igual que para aumentar la distancia entre la resistencia y las paredes adyacentes.

A diferencia de las otras cajas, esta tapa se montó en un plano más elevado con respecto al plano superior de la caja, así, conseguimos una ranura adicional para refrigeración y salida de aire.

Los datos de la impresión son los siguientes:

Tabla 6–11. Impresiones de la caja de medidas

Peso por unidad	Tiempo por impresión	Nº Intentos
260g	17h 15min	3

6.9 Montaje de los cables y su caja

Para este proyecto, ya que se trata de algo para posteriormente ser utilizado por alumnos, intentamos hacerlo de la forma más limpia y ordenada posible. Para esto vamos a fabricar nuestros propios cables con conectores banana y de longitud reducida, 20 centímetros.

En cuanto a la caja no necesitábamos nada en particular y optamos por una caja con dos compartimentos y de apertura con un mecanismo.



Figura 6-37 Caja para el almacenamiento de los cables abierta

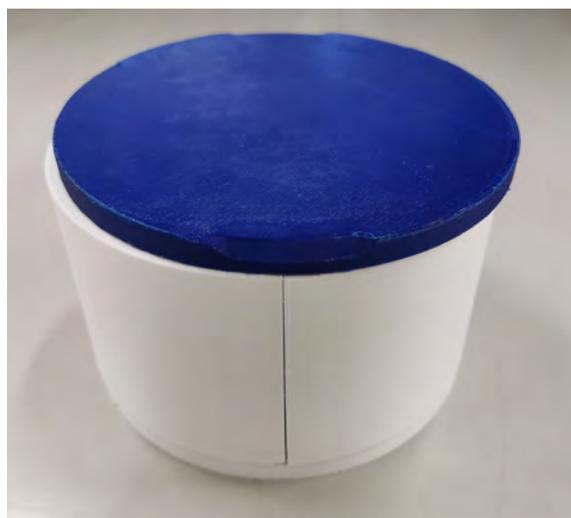


Figura 6-38 Caja para el almacenamiento de cables cerrada

El mecanismo de apertura funciona de tal manera que cuando giramos la tapa azul en un eje perpendicular a la mesa ambos compartimentos salen hacia fuera con un movimiento paralelo a la mesa.

Los datos de la impresión son los siguientes:

Tabla 6–12. Impresiones de la caja de los cables en sus distintas partes

Peso por unidad	Tiempo por impresión	Nº Intentos
70g	2h 50min	1
275g	12h	1
40g	2h	1
93g	4h30	1

7 PRUEBAS PREVIAS

En esta sección vamos a comentar las pruebas anteriores a poner alguno de los convertidores en marcha. Es necesario comprobar que estos bloques funcionen de manera adecuada cuando no están conectados a todo el conjunto para que una vez se conecte todo el proceso de comprobación de errores sea más rápido.

7.1 Pruebas del bloque de medidas

Para comprobar que funcionaba de manera correcta, conectamos el puerto de medida de voltaje a la fuente de alimentación directamente y de igual manera para el de corriente.

El sensor de medida se conectó a la placa de medidas M2C, el cual esencialmente nos adapta las medidas de los sensores hasta un conector BNC. Esta placa ya se encontraba disponible entre las herramientas para utilizar la dSPACE.

El montaje que se hizo fue este:

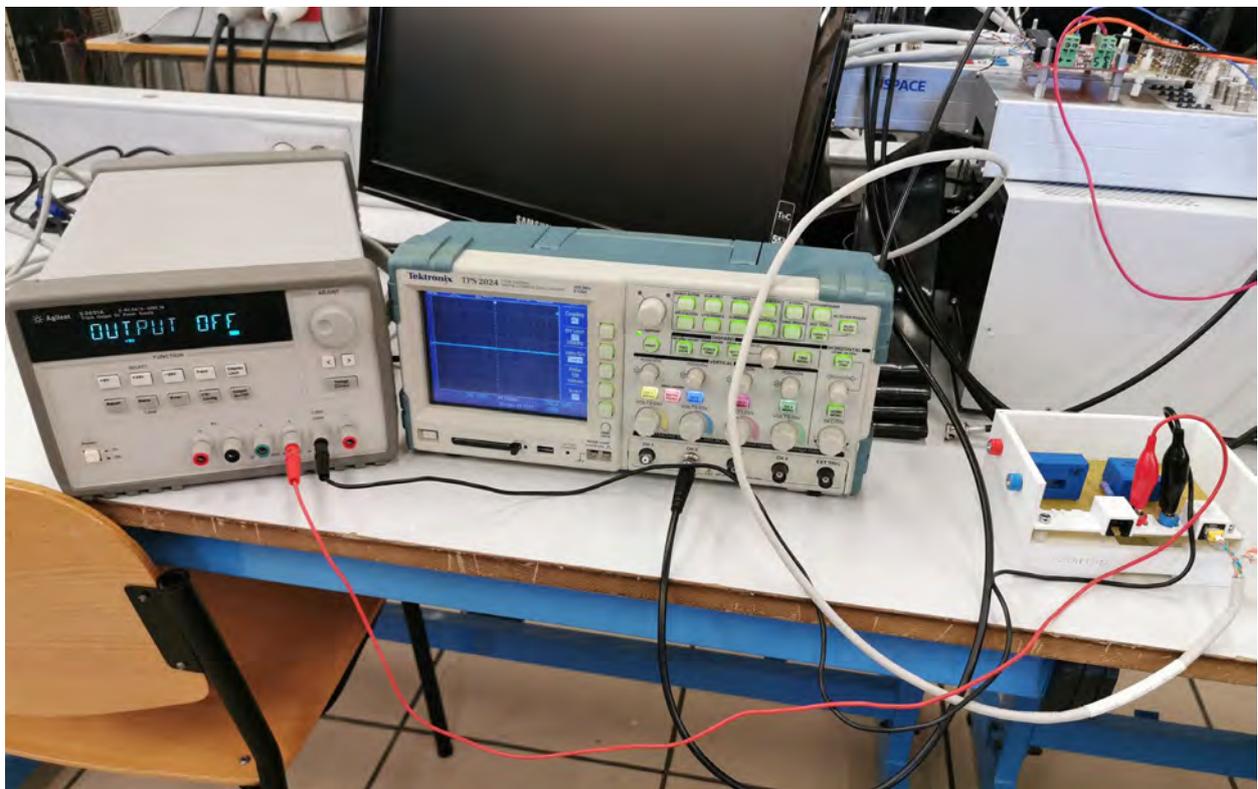


Figura 7-1 Montaje realizado para la prueba del sensor de tensión.

El esquema de conexión es el siguiente:

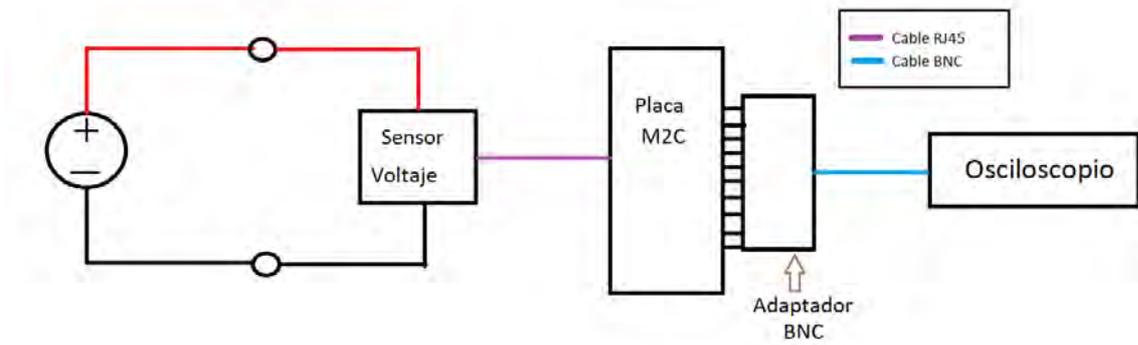


Figura 7-2 Diagrama de conexión para la prueba de medición de voltaje

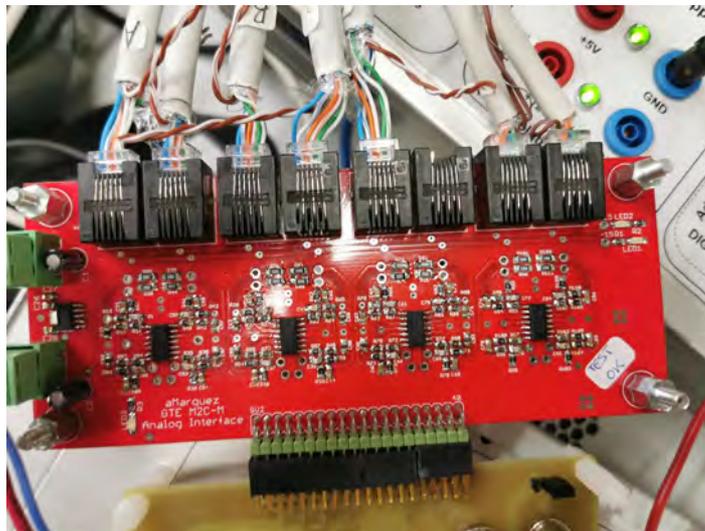


Figura 7-3 Placa M2C

En la parte superior tenemos las entradas que son las medidas, a la izquierda la alimentación de la placa. Aquí podemos ver un par de imágenes de las pruebas y el correcto funcionamiento del sensor. Las pruebas trataban de ver cómo iba cambiando la salida cuando cambiábamos las tensiones de medida.

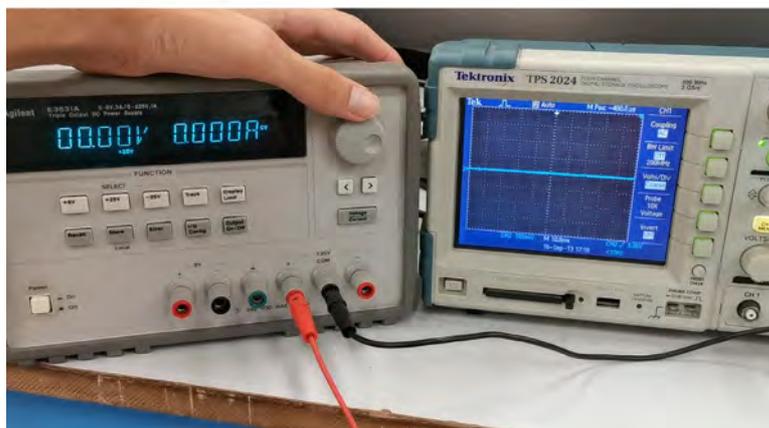


Figura 7-4 Prueba del sensor de voltaje a 0V

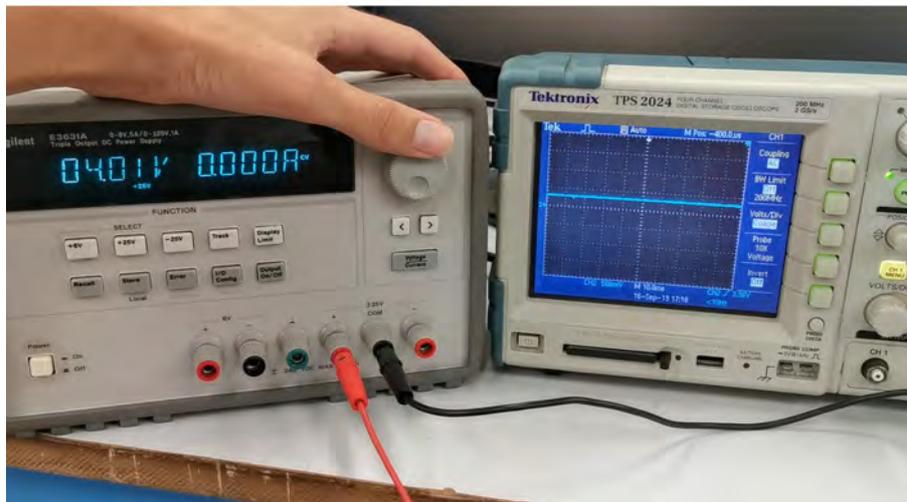


Figura 7-5 Prueba del sensor de voltaje a 4V

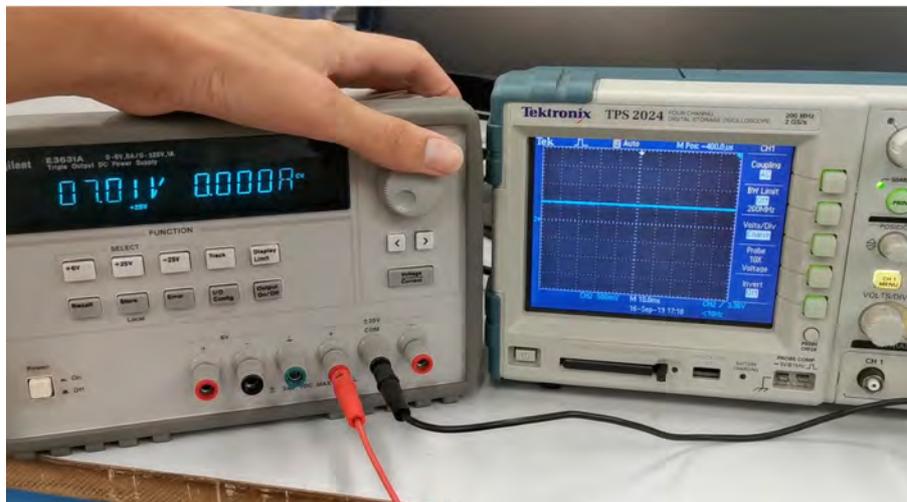


Figura 7-6 Prueba del sensor de voltaje a 7V

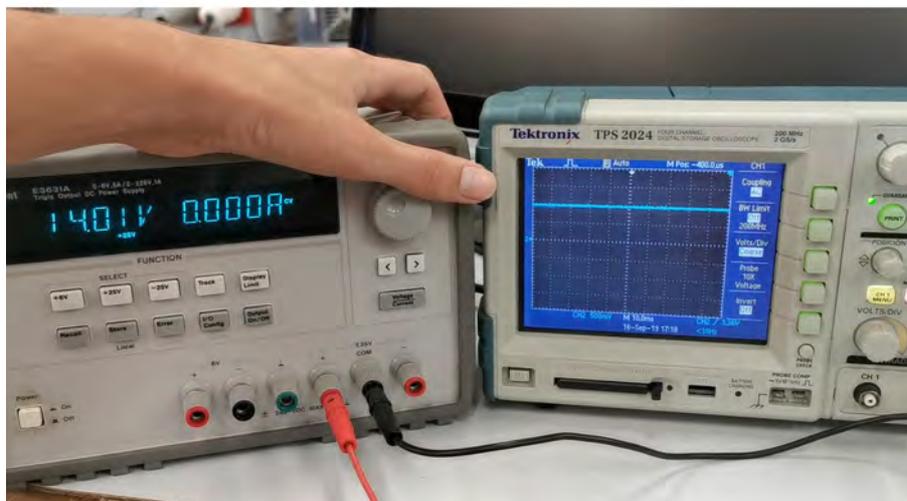


Figura 7-7 Prueba del sensor de voltaje a 14V

Comprobado su correcto funcionamiento está listo para usarse en el montaje final, previa calibración. Para esto, se realizará un ajuste en forma de recta, $y=m*x+b$. Para ello conectamos los sensores a la dSPACE y tomamos valores de medida para distintos valores de la fuente. Así encontramos

- Para el sensor de tensión:
 - $M= 148.3463$
 - $B= -0.0037$
- Para el de corriente:
 - $M=2.09$
 - $B= -0.0797$

7.2 Pruebas del bloque de disparos

Para probar el bloque de disparos utilizamos una fuente de alimentación para conectar a la placa y una señal de PWM con un duty que podamos seleccionar, a través de fibra óptica. Esta señal se generó con un DSP (*Digital signal processor*) para no tener que ocupar la dSPACE.

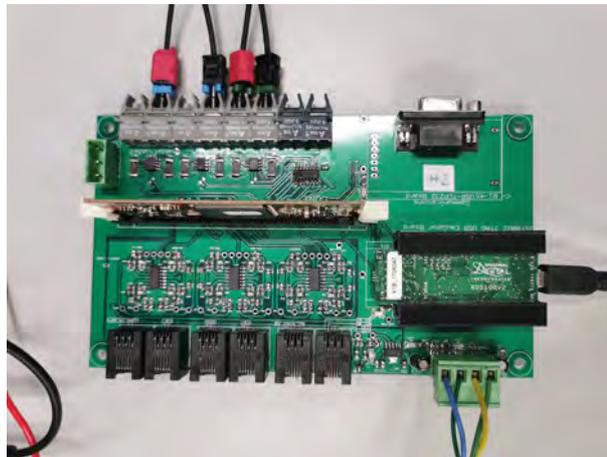


Figura 7-8 DSP ya disponible en el laboratorio

Así, la señal de $D=0.8$ generada a través de la fibra óptica y medida ya en la placa es:

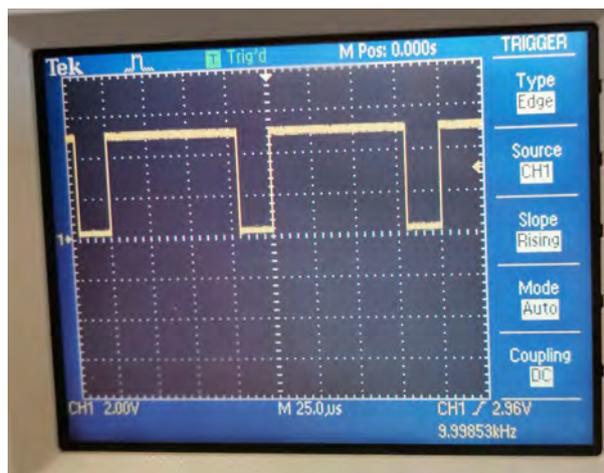


Figura 7-9 Señal de disparo que llega a la placa

Como podemos ver que la escala está en 2V/divs, la señal tiene una amplitud de 5 V. La señal a la salida de los drivers es esta:

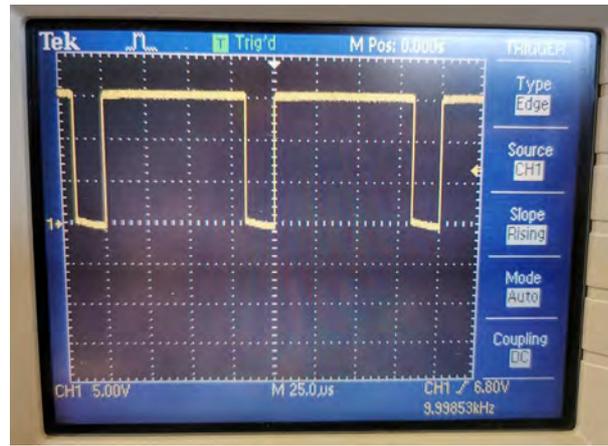


Figura 7-10 Señal de disparo a la salida del driver

En este caso podemos ver cómo estamos a 5/divs y la señal tiene una amplitud de 15V y de forma prácticamente idéntica. Por lo que podemos afirmar que la placa está en correcto funcionamiento.

7.3 Prueba del bloque de diodo

Para probar el bloque del diodo primero se realizó un primer diseño en la placa de pruebas conectado a un generador de señales. Se introdujo una señal sinusoidal para comprobar que funcionase como un simple rectificador y nos quedásemos sólo con la parte positiva o negativa de la señal.

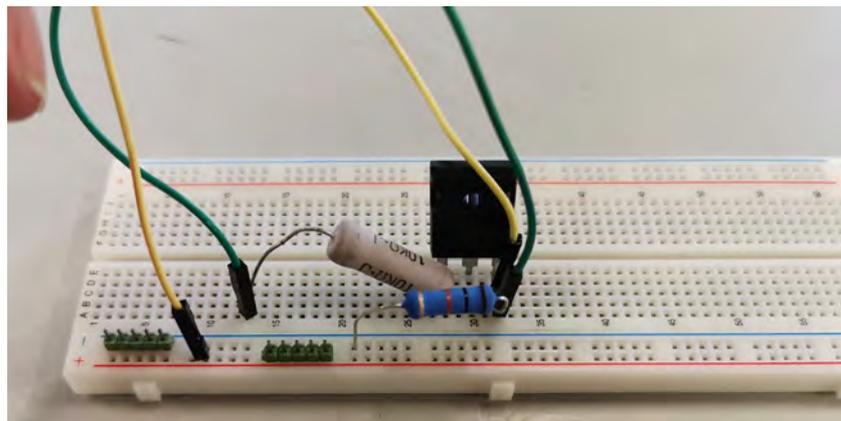


Figura 7-11 Experimento para probar el funcionamiento del diodo

Y el resultado al medir los en los terminales de la carga de prueba fue:

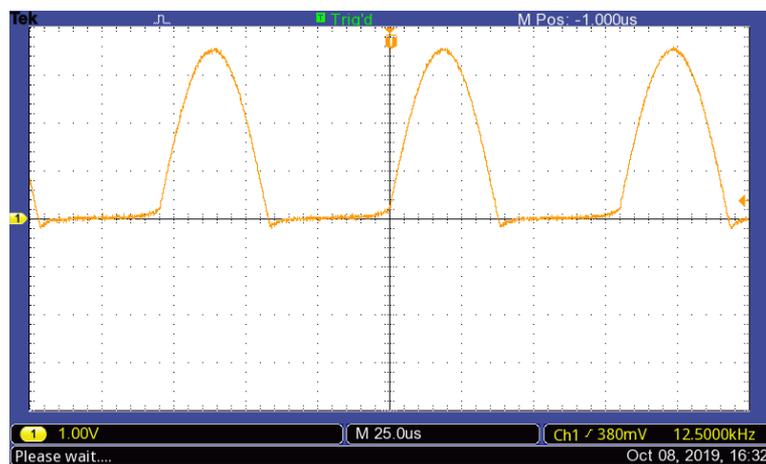


Figura 7-12 Resultado de la prueba funcionando como diodo

Como podemos observar el funcionamiento es el adecuado y por lo tanto este bloque (mismo circuito simplemente montado en una PCB) es el que se implementará en las pruebas finales.

8 PUESTA EN MARCHA

En este apartado vamos a ver el trabajo realizado en cuanto a software se refiere y la pruebas finales una vez está todo correcto. Este modelo de simulink que hemos diseñado, será compilado y mandado a la dSPACE. Posteriormente este se ejecutará.

8.1 Modelo de Simulink y programación

El modelo de Simulink sobre el que nosotros hemos estado trabajando estaba anteriormente realizado por el compañero Fran. Este modelo tenía implementada la gran mayoría de características para funcionar. Entre ellas podemos encontrar un control PI implementado, suficiente para realizar el control del sistema.

Nosotros implementamos algunas **funciones adicionales**, que incluían:

- Selección, en marcha, independiente de voltaje deseado a la salida (Closed loop) y de Duty Cycle deseado (Open Loop)
- Selección, en marcha, del modo de funcionamiento: Closed loop u Open Loop
- Indicador luminoso del estado en el que nos encontramos.
- Gráficas adicionales y de estética cambiada.
- Condiciones de seguridad adicionales.

El esquema más general del modelo de simulink es el siguiente:

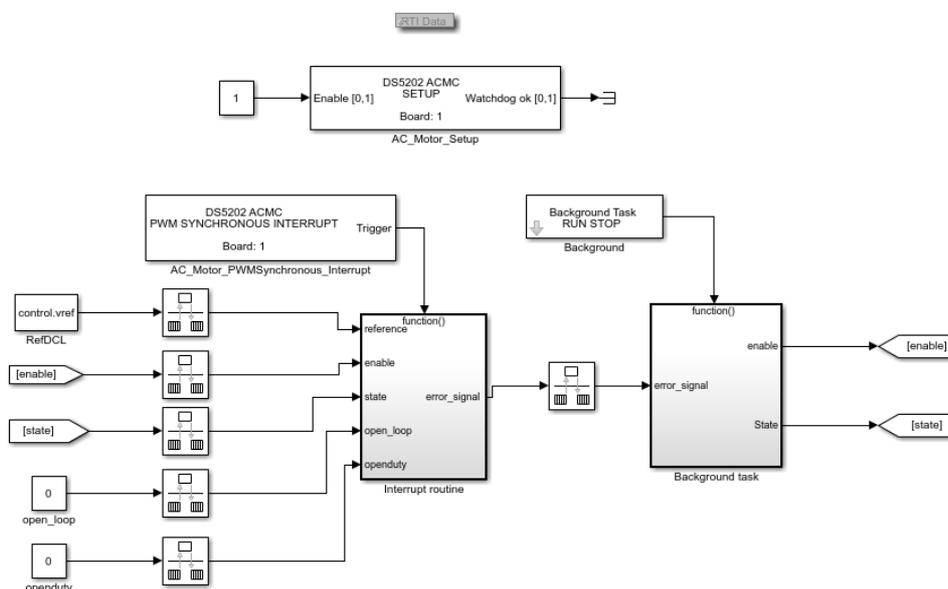


Figura 8-1 Modelo simulink utilizado en su nivel más alto.

En esta imagen abajo a la izquierda podemos ver dos de las nuevas **variables de control que añadimos** que son *open loop* la cual selecciona si queremos tener realimentación en el control o no y *openduty* la cual selecciona el duty cuando estamos en lazo abierto.

Entre los límites de seguridad encontramos que el duty que calculamos no puede ni exceder 0.95 ni ser menor de 0.05.

```

%We establish upper and lower limits for the duty so we don't get values
%higher than 1 or lower than 0
if (dutyOut >= 0.95)
    dutyOut = 0.95;
end
if (dutyOut <= 0.05)
    dutyOut = 0.05;
end
    
```

Figura 8-2 Programación para establecer la condición de seguridad

Además de esta se añadieron valores máximos y mínimos para tanto corriente como voltaje, valores máximos para la k_p y la k_i .

En cuanto a los bloques relativos a la dSPACE, de su propio blockset, solo se cambió los puertos de entradas o salidas y un parámetro de los bloques de entrada. Se añadió un filtro específico para aplicaciones con señales PWM sincronizadas, llamado *Integration (only for PWM synchronous trigger)*.

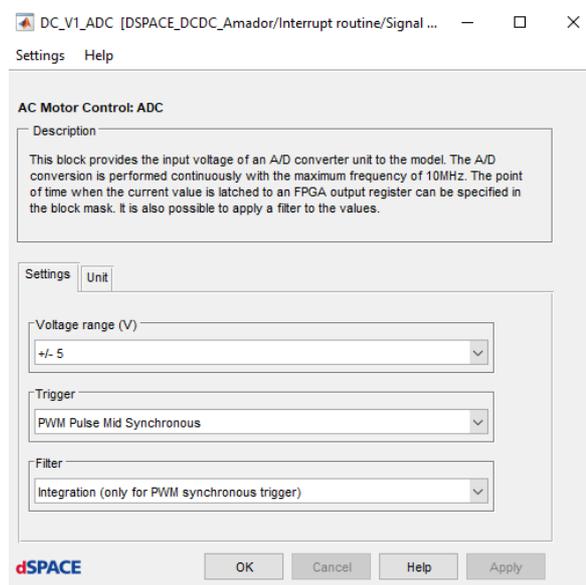


Figura 8-3 Configuración de los bloques de entradas, ADC.

Como última cuestión de la programación y simulink es asegurarnos que la hay sincronización y sobre todo que no cambiamos el duty a un nuevo valor calculado antes de que acabe el periodo de la señal. De esto se encargan el bloque de Trigger (que se puede ver en el esquema general) y también que el fabricante nos asegura tal condición en las especificaciones del bloque que genera las señales PWM.

Duty cycle and frequency update

A new duty cycle is always accepted by the FPGA logic at the next pulse or pause mid. This guarantees no change of the duty cycle during a half PWM period.

A new PWM frequency is accepted by the FPGA at the next pause mid. Thus it is not possible to change the PWM frequency at pulse mid.

Figura 8-4 Extracto documentación del equipo

“Un nuevo duty es siempre aceptado por la lógica de la FPGA al siguiente pulso... Esto garantiza que no hay ningún cambio del duty en mitad del periodo de la PWM.”

8.2 Interfaz para el usuario

Una vez el modelo está compilado y cargado en la dSPACE podemos arrancar ControlDesk que nos proporcionará una interfaz de desarrollo para nuestra aplicación. Los archivos necesarios para este programa serán generados en la compilación del modelo de Simulink.

La gran ventaja de este método es poder realizar medidas y modificaciones del sistema en tiempo real. Esto significa, por ejemplo, poder cambiar las constantes de control mientras lo estamos ejecutando o mostrar una variable nueva en pantalla a través de indicadores numéricos o de representaciones con respecto al tiempo. Todo esto representa una gran diferencia con respecto a la tradicional simulación en simulink ya que estamos ejecutando el mismo modelo.

La interfaz de la que partimos nosotros era la siguiente:

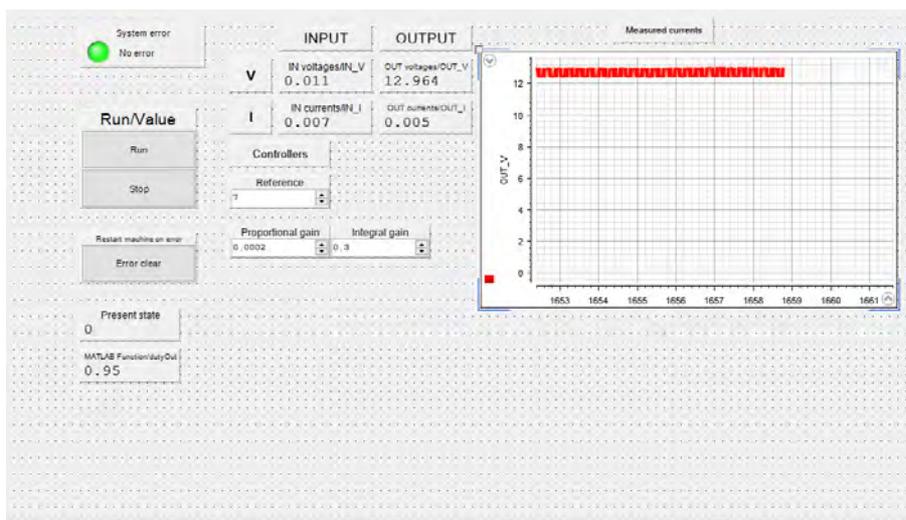


Figura 8-5 Interfaz de ControlDesk de la que se partía

Lo único que hay aquí también con respecto a lo que ya estaba realizado con anterioridad es el color de la gráfica, que se cambió de fondo negro a blanco.

Los cambios a realizar para crear la **nueva interfaz** fueron varios:

- El control de las nuevas variables introducidas.
- Nuevas variables mostradas en representaciones con respecto al tiempo.
- Nuevos indicadores luminosos para un mejor entendimiento.

La interfaz resultante es la siguiente:

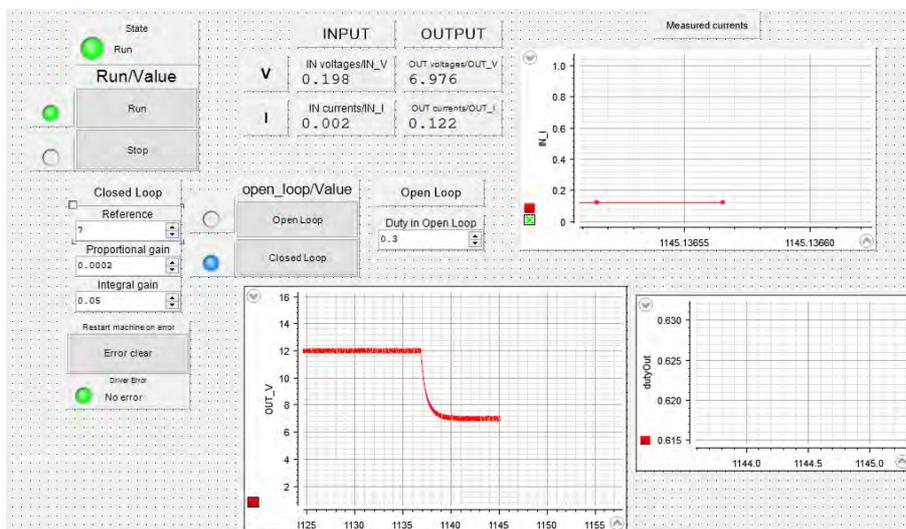


Figura 8-6 Ejemplo de Interfaz una vez realizados los cambios.

Aquí podemos observar los principales cambios estéticos:

- Todas las gráficas se han puesto de **fondo blanco**.
- En azul para la selección del modo de control.
- El indicador verde para *Run*
- El indicador negro para *Stop*
- El indicador negro para *Emergency*
- Se reorganizó la interfaz para que fuera más cómoda.

Como cambios no visuales encontramos:

- El selector de valores ha sido restringido en cuanto valor máx. y mín. para cada configuración distinta.
- El resto de selectores han sido restringidos por temas de seguridad y para que los alumnos no provoquen algún mal funcionamiento sin querer.

8.3 Pruebas de la configuración de reductor (Buck)

Por aspectos de seguridad comenzamos probando el reductor, ya que si algo fallaba o había algún problema las consecuencias serán menores. Con todo ya listo montamos la configuración de reductor con nuestros cables y hacemos las conexiones adecuadas a la dSPACE. Para los siguientes subapartados el proceso a seguir será el mismo con la única diferencia de como organizamos los componentes y la interfaz que abrimos.

En las tres secciones siguientes también iremos **comparando** las medidas que obtenemos por **pantalla** con las medidas que obtenemos por el **osciloscopio**. Con esto podremos ir comprobando que lo vemos por pantalla medido por los sensores sean realmente las medidas que tenemos en los componentes.

Todas las pruebas se realizaron con 20V a la entrada y las pruebas son las siguientes:

- Cambios en la referencia en lazo abierto:
 - De un duty de 0 a 0.5
 - De 0.75 a Parado (*Stop*)
- Cambios en la referencia en lazo cerrado
 - De 0V a 5V.
 - De 15V a Parado (*Stop*).

Así tenemos los siguientes resultados para lazo abierto:

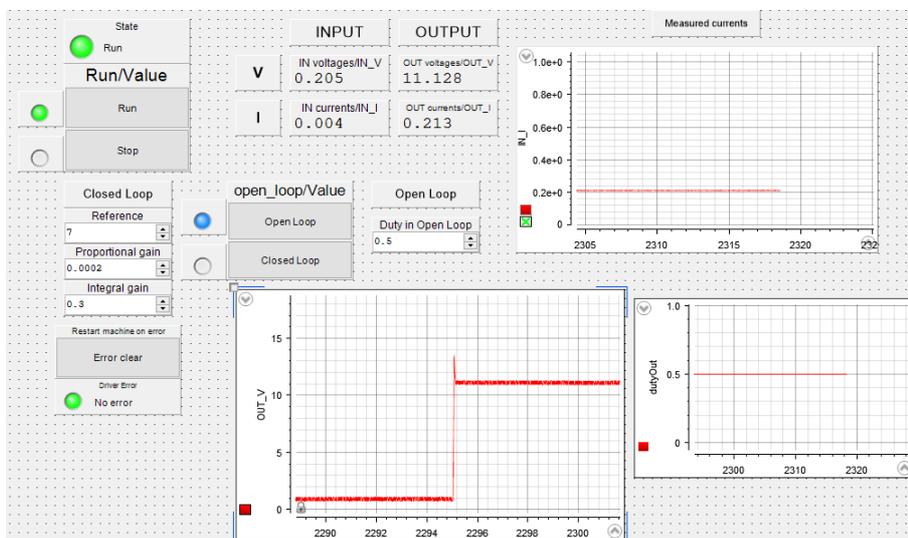


Figura 8-7 Resultado del cambio de la referencia de duty=0 a 0.5

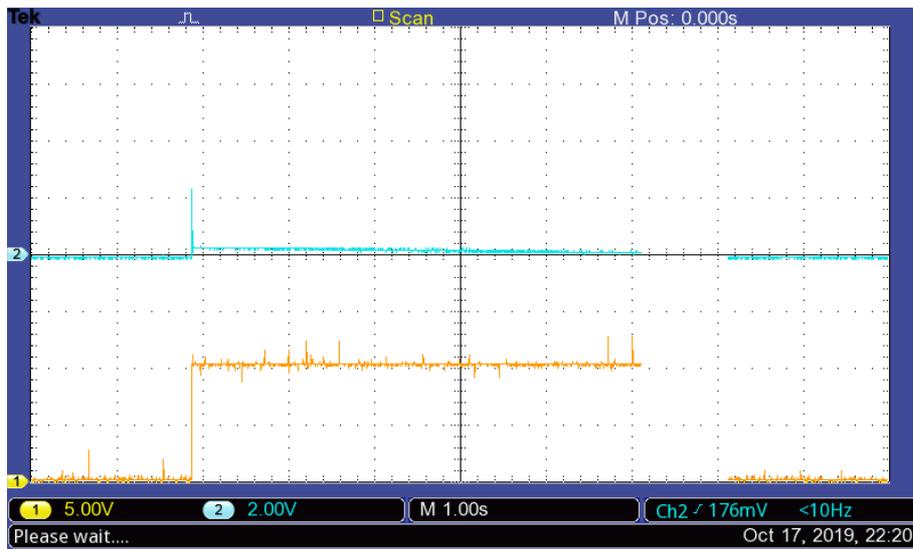


Figura 8-8 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio

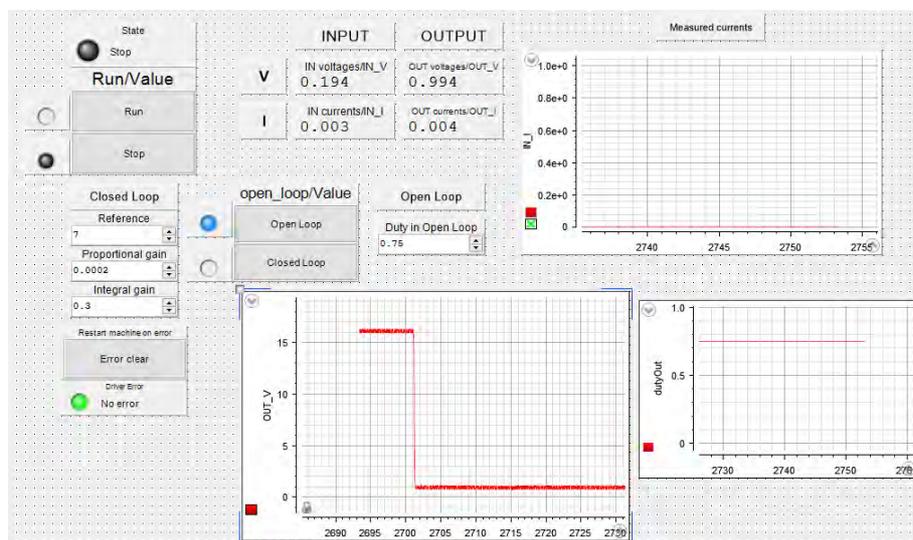


Figura 8-9 Resultado del cambio de la referencia de duty=0.75 a Parado (*Stop*)

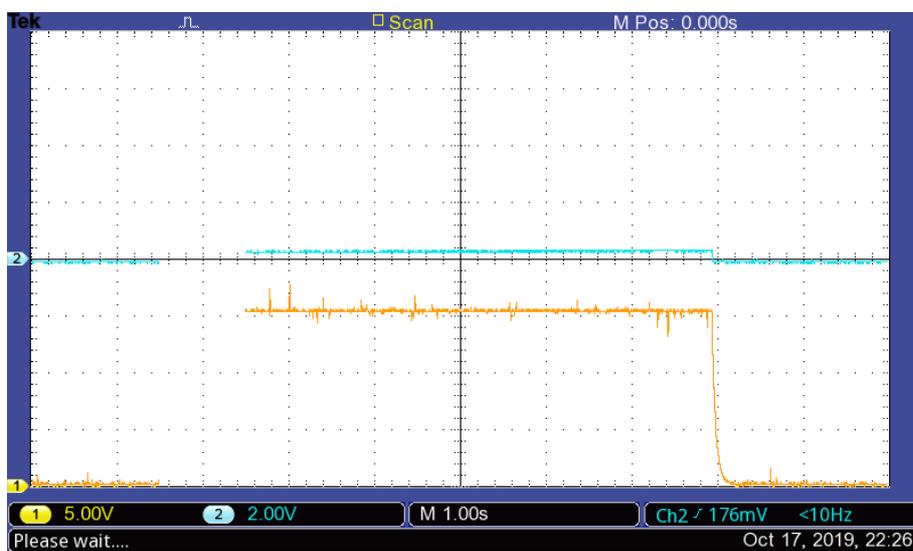


Figura 8-10 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio

Y los resultados para **lazo cerrado**:

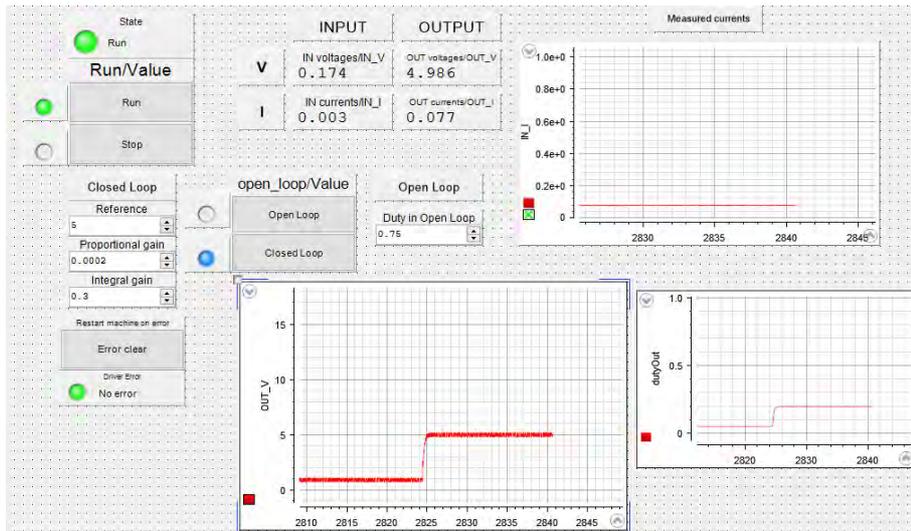


Figura 8-11 Resultado del cambio de Parado a referencia de 5V

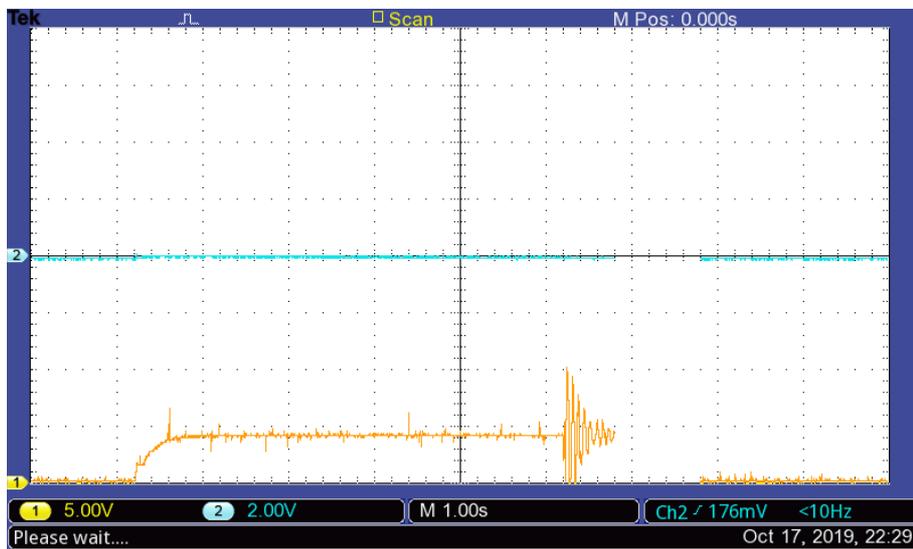


Figura 8-12 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio

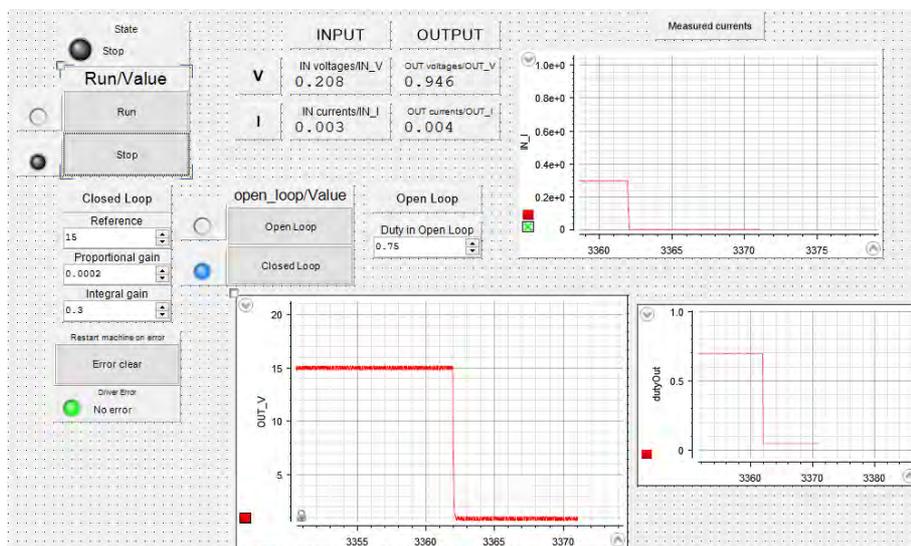


Figura 8-13 Resultado del cambio de la referencia de 15V a Parado (Stop)

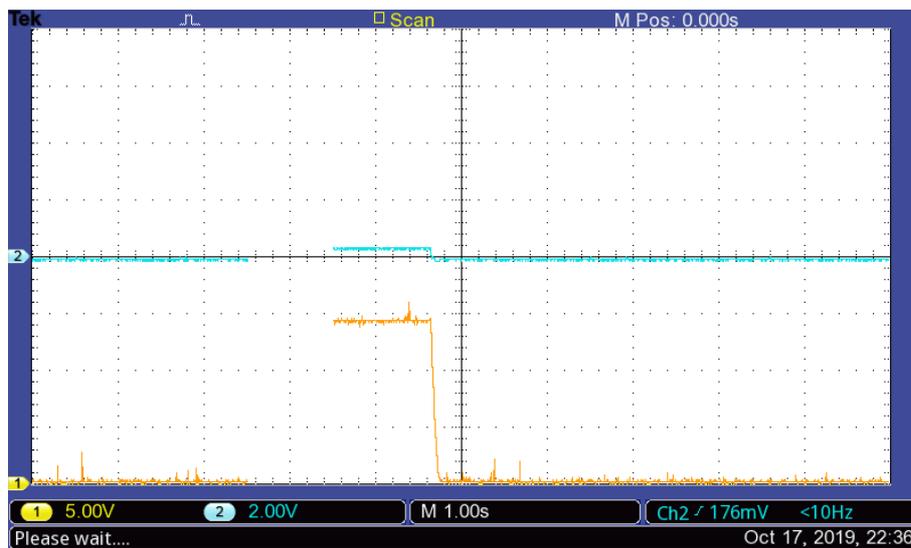


Figura 8-14 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio

8.4 Pruebas de la configuración de elevador (Boost)

En este caso se realizaron pruebas con 3 voltajes distintos para ver el funcionamiento en un rango mayor. Las pruebas son:

- Cambios en la referencia en lazo abierto con una alimentación de 10V:
 - De un duty de 0 a 0.1
 - De 0.2 a 0.35
- Cambios en la referencia en lazo cerrado con entrada de 10V
 - De 12V a 20V.
- Cambios en la referencia en lazo cerrado con entrada de 30V
 - De 35V a 49V
- Cambios en la referencia en lazo cerrado con entrada de 30V
 - De 49V a 50V (*emergency*)

Con esta última prueba reducimos los valores mínimos para las protecciones y así comprobamos que funcionan de manera correcta y el sistema se para.

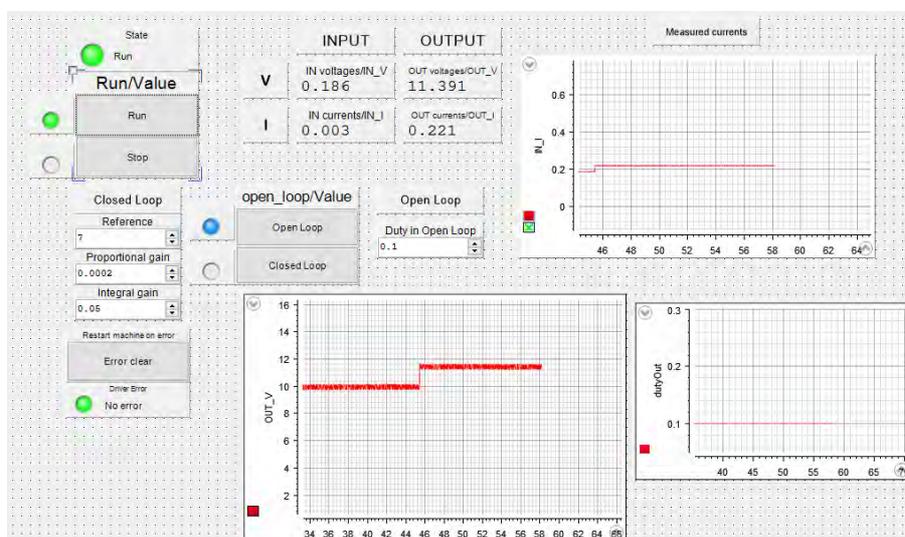


Figura 8-15 Resultado del cambio de la referencia de duty=0 a 0.1

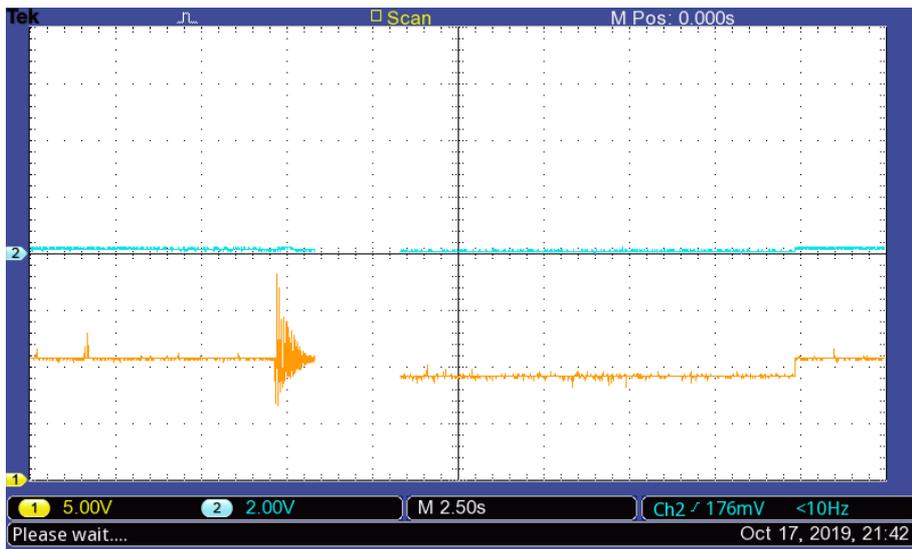


Figura 8-16 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio

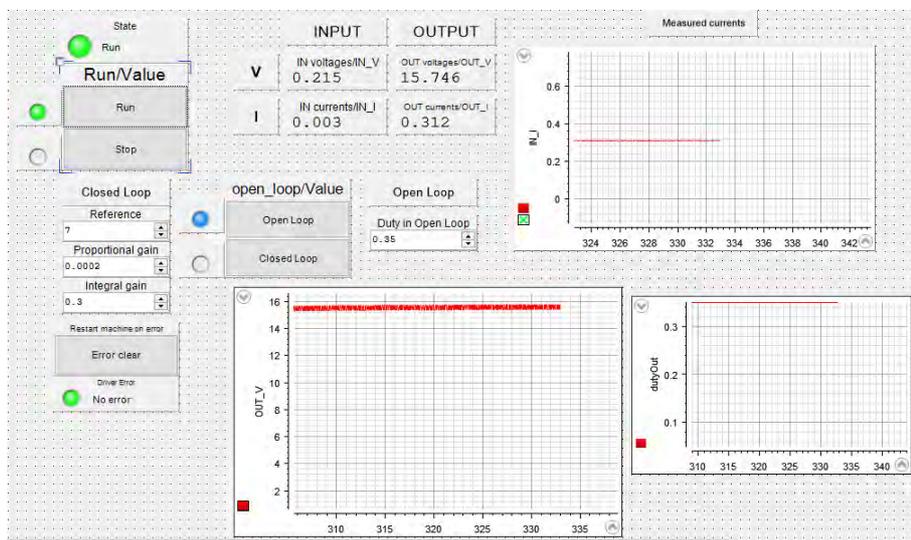


Figura 8-17 Resultado del cambio de la referencia de duty=0.2 a 0.35

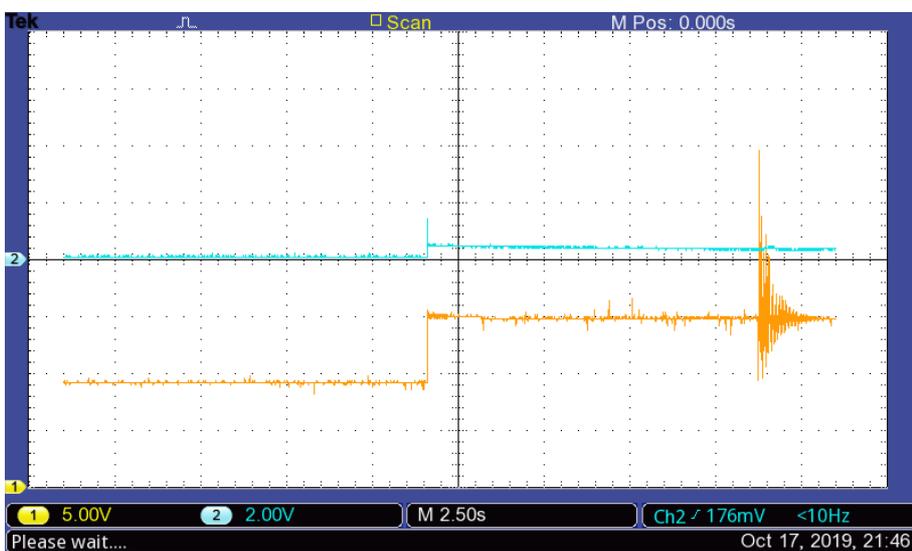


Figura 8-18 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio

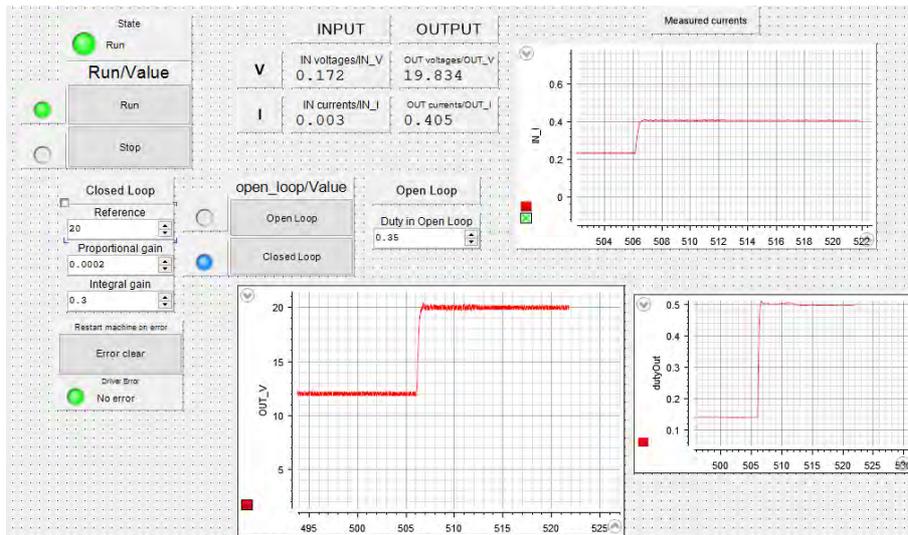


Figura 8-19 Resultado del cambio de la referencia de 12V a 20V

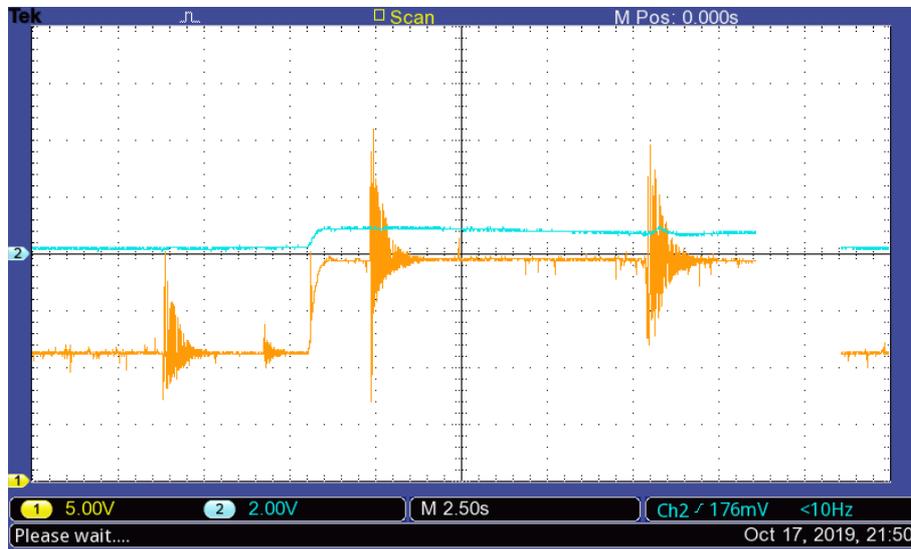


Figura 8-20 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio

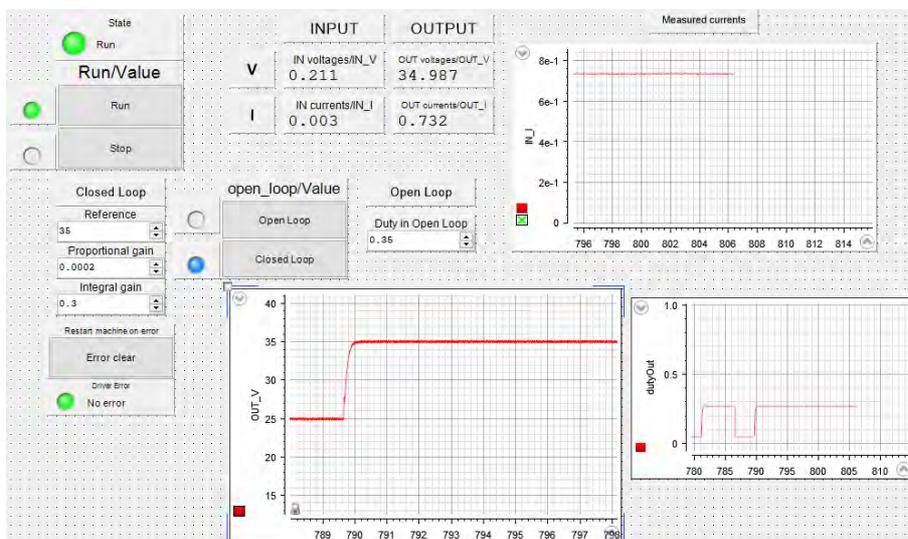


Figura 8-21 Resultado del cambio de la referencia de 25V a 35V

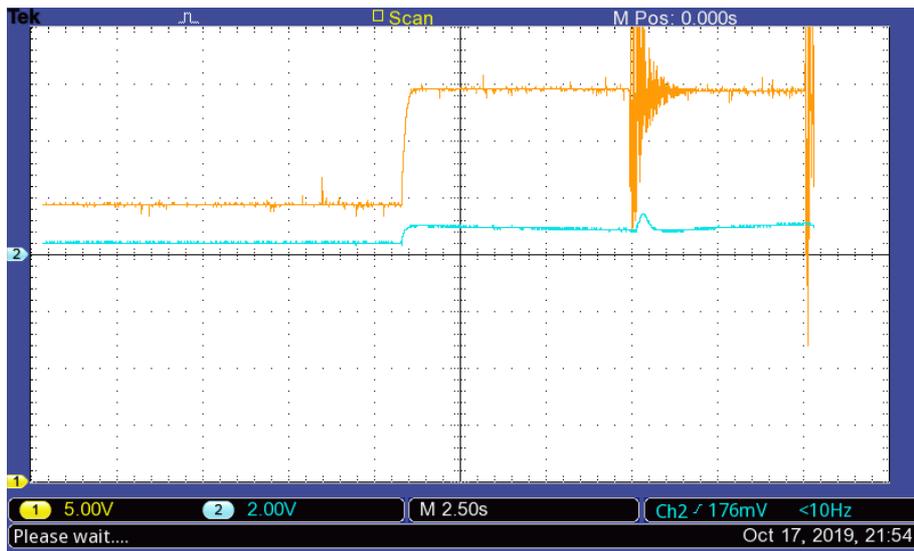


Figura 8-22 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio

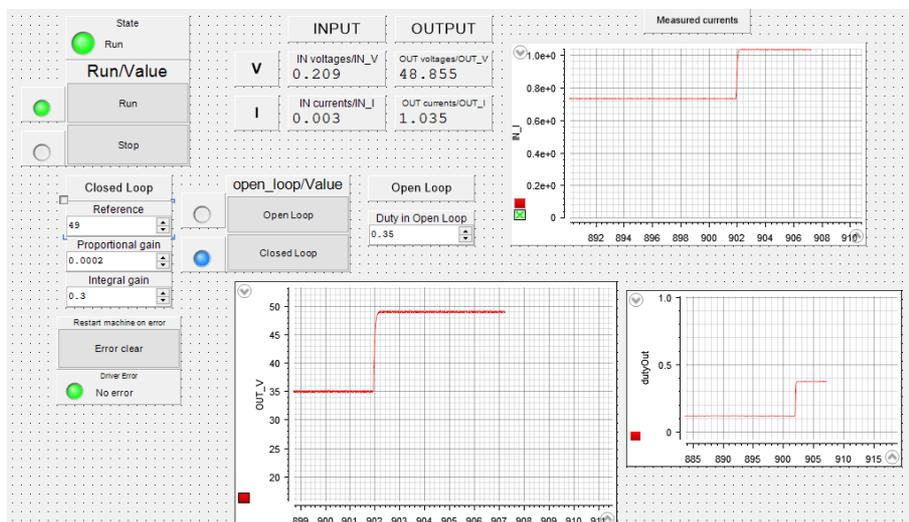


Figura 8-23 Resultado del cambio de la referencia de 35V a 49V

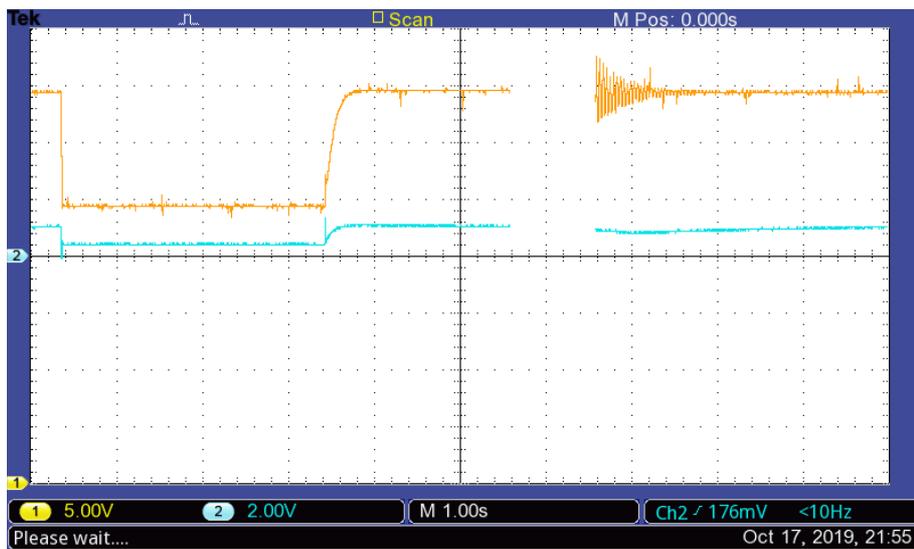


Figura 8-24 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio

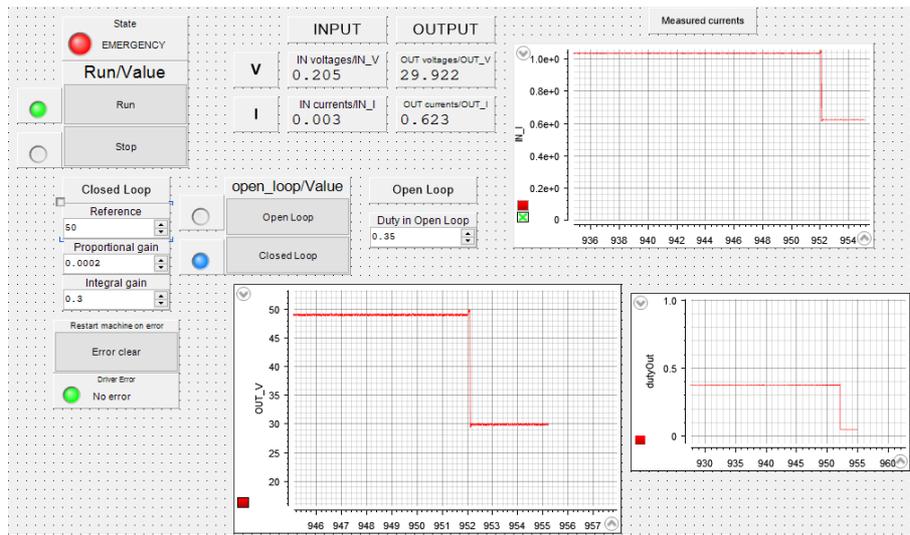


Figura 8-25 Resultado del cambio de la referencia de 49V a 50V y salto de emergencia

Como podemos observar en las imágenes el sistema se comporta de la forma esperada, incluido el **paro por emergencia**.

8.5 Pruebas de la configuración Reductor-Elevador (Buck-Boost)

- Cambios en la referencia en lazo abierto con una alimentación de 10V:
 - De un duty de 0 a 0.1
 - De 0.2 a 0.3
- Cambios en la referencia en lazo cerrado con entrada de 10V
 - De parado (*Stop*) a 7V. (Reductor)
 - De 12V a 7V. (Elevador/Reductor)
 - De parado a 13V (Elevador)

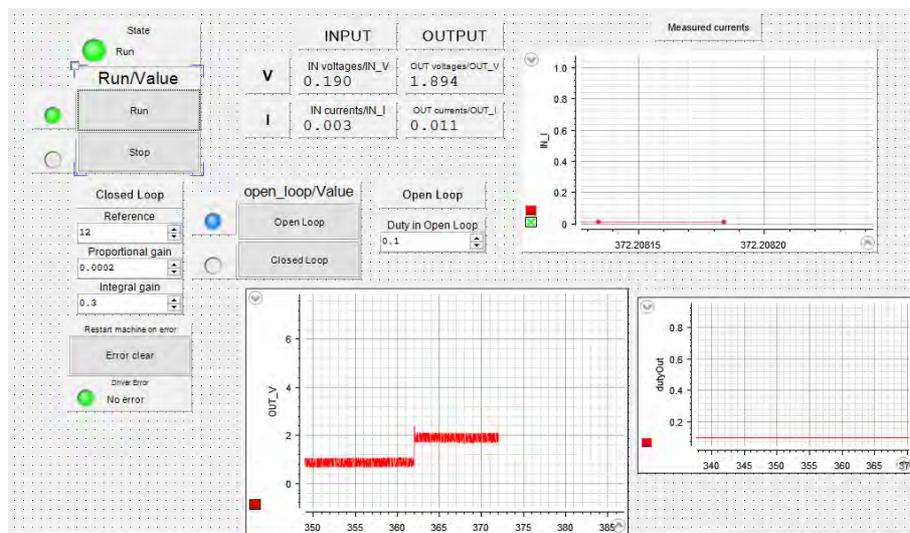


Figura 8-26 Resultado del cambio de la referencia de duty=0 a 0.1

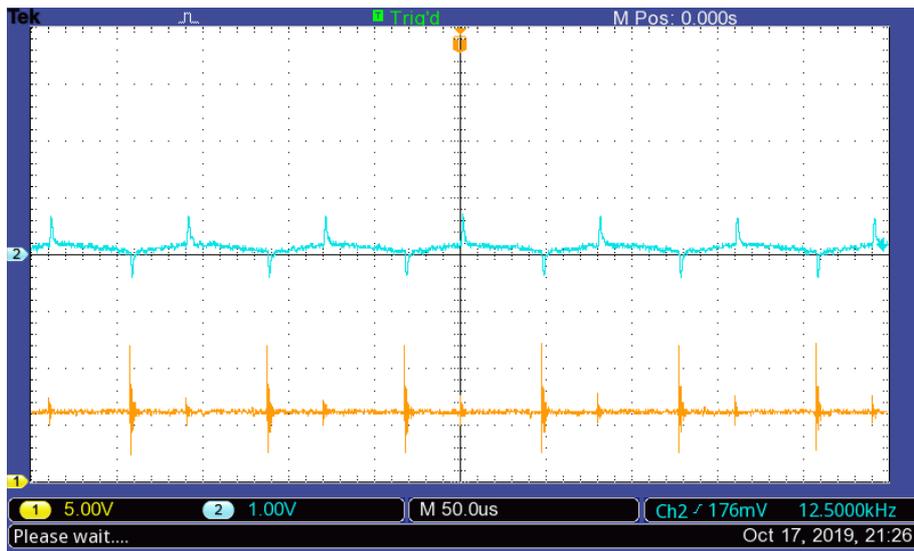


Figura 8-27 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio y en permanente

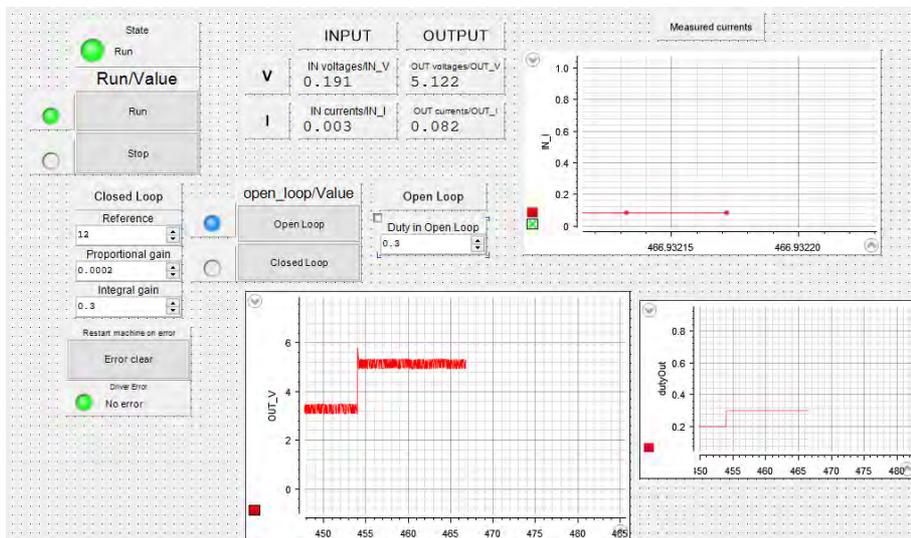


Figura 8-28 Resultado del cambio de la referencia de duty=0.2 a 0.3

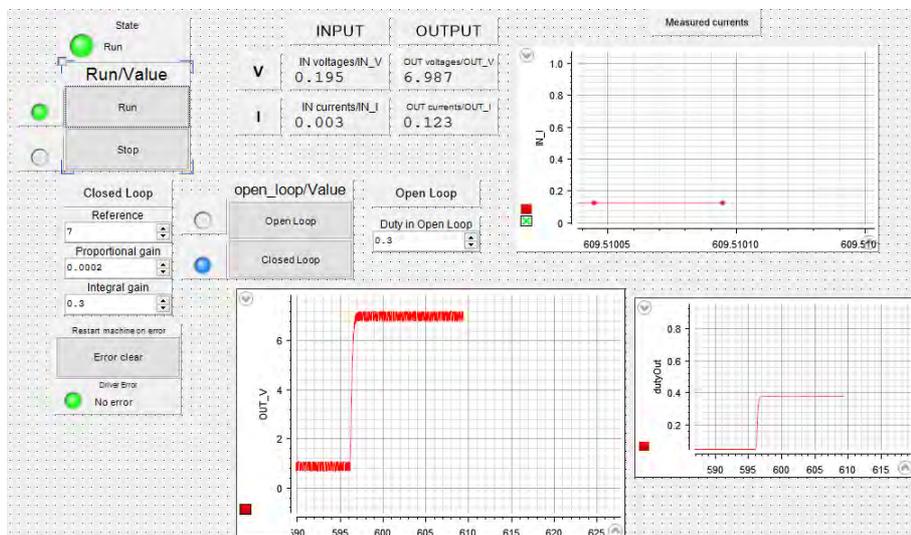


Figura 8-29 Resultado del cambio de la referencia de parada a 7V

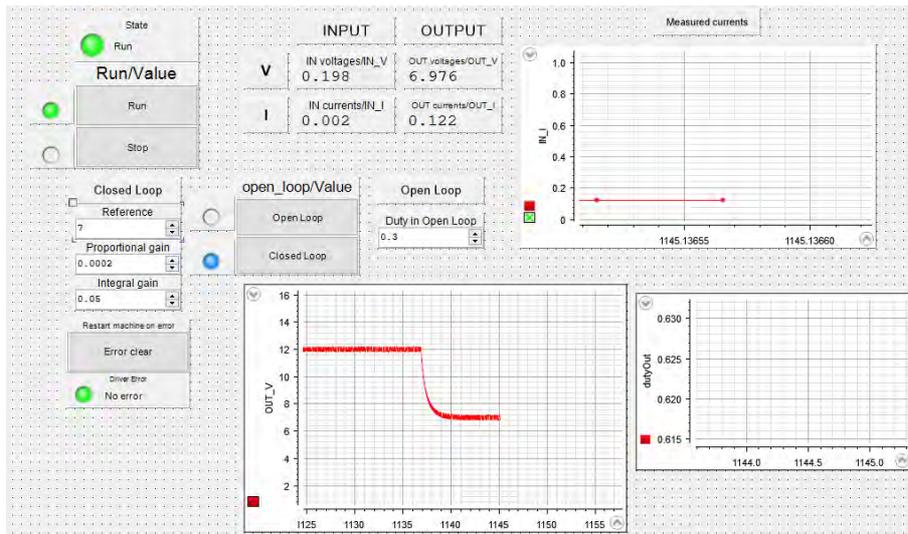


Figura 8-30 Resultado del cambio de la referencia de 12V a 7V

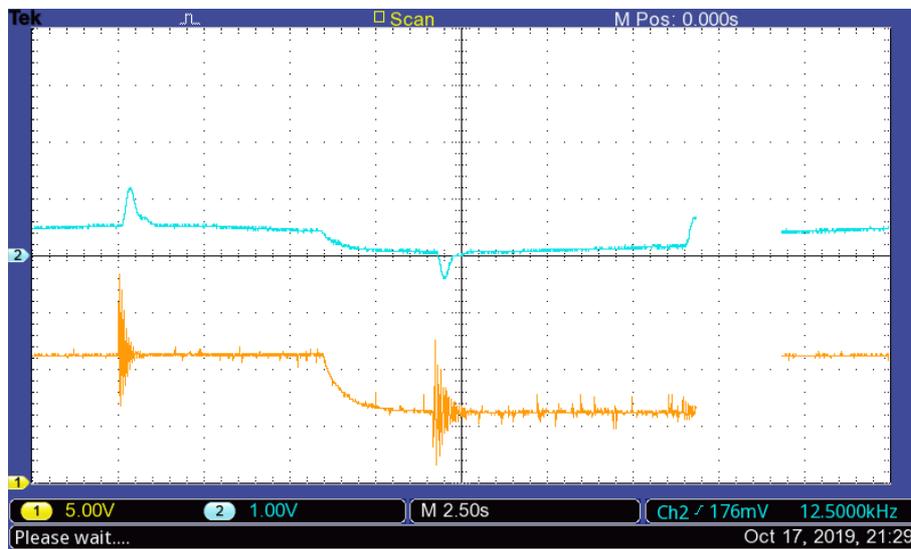


Figura 8-31 Mismo resultado que la figura anterior pero medido directamente con el osciloscopio

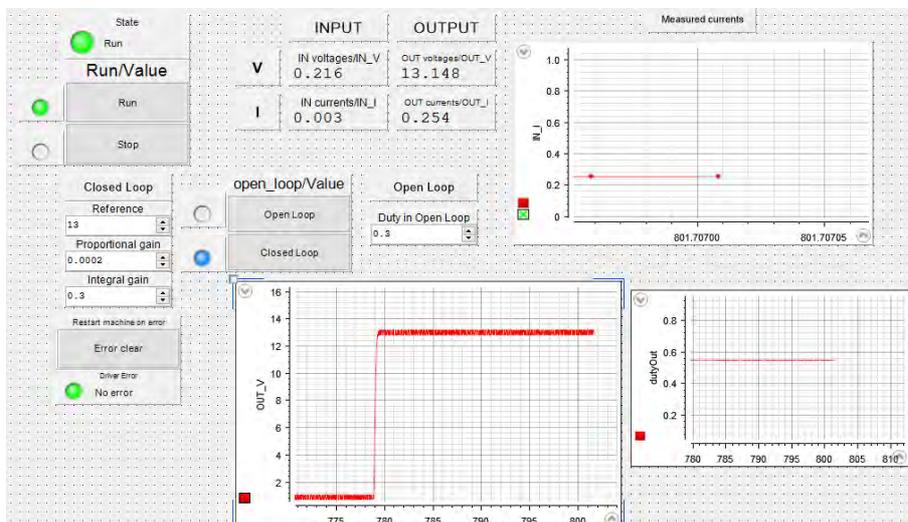


Figura 8-32 Resultado del cambio de la referencia de parado a 13V

Se han hecho todas estas pruebas en este caso para comprobar su **buen funcionamiento** tanto en forma de **elevador** como de **reductor**. El sistema funciona de manera adecuada en ambos casos y la parada funciona de manera adecuada.

9 ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado vamos a realizar un pequeño análisis de los gastos en los que se ha incurrido y en los que se podría haber incurrido en la realización de este trabajo.

9.1 Costes de impresión 3D

Aquí tenemos dos costes distintos: costes de material y coste por tiempo de maquinaria. Este último se va a calcular, pero no se tendrá en cuenta ya que la impresora era propiedad del alumno.

Para hacer este cálculo lo único que vamos a necesitar son las tablas del apartado 6 y el coste de material. Cogiendo datos de estas nos queda la siguiente tabla

Tabla 9–1. Recopilación datos impresión en total

Impresión	Material por unidad	Tiempo por impresión	Nº Intentos	Tiempo total	Material total
Medidas	120g	6h 45min	4	27h 0min	480g
Disparos	80g	5h 0min	3	15h 0min	240g
Diodo	35g	2h 25min	3	7h 15min	105g
Bobina	114g	7h 45min	1	7h 45min	114g
Condensador	51g	3h 40min	2	7h 20min	102g
Resistencia	260g	17h 15min	3	51h 15min	780g
Etiquetas	5g	0 h 50min	7	5h 50min	35g
Caja cables	478g	21h 20min	1	21h 20min	478g
Total				143h 0min	2334g

Una vez tenemos estos datos, valoramos material y tiempo de impresión.

Para material el kg de este plástico es 25€ por lo que, $2.334\text{kg} \cdot 25\text{€}/\text{kg} = 58.35 \text{ €}$

En cuanto al tiempo de impresión, la forma de valorarlo puede variar mucho según la empresa. En nuestro caso vamos a valorar cada hora de impresión por igual y sin ninguna tarifa de comienzo de la máquina. Así, $143\text{h} \cdot 1.3\text{€}/\text{h} = 186 \text{ €}$

Además de esto tenemos el coste en cuanto a materiales referentes a las placas que se fabricaron y los componentes.

Tabla 9–2. Recopilación datos materiales p lacas y componentes

Componente	Unidades	Precio/unidad	Coste Total
Sensores LV 25P	2	62.0 €	124 €
Sensores LA 25P	2	31.0 €	62 €
Drivers	2	3.5 €	7 €
Conectores Fibra Óptica	3	10.0 €	30 €
Resistencias varias	1	2.0 €	2 €
Puertas lógicas	2	0.5 €	1 €
Componentes SMD	1	1.0 €	1 €
Placa de fabricación PCB	4	8.0 €	32 €
Resistencia 300W	1	35.0 €	35 €
Condensador 1µF	1	1.0 €	1 €
Herrajes (tornillos, tuercas, etc.)	1	5.0 €	5 €
Total			300€

Así en total en materiales tendríamos, 58.35 €-300 €-**358.35 €** sin contabilizar el tiempo de impresión ni los equipos utilizados.

En cuanto a los equipos que se utilizaron estaban todos disponibles en el laboratorio. Vamos a listar algunos de ellos para dar una idea de lo que se utilizó para llevar a cabo este proyecto:

- Osciloscopio Tektronix TBS 1102B-EDU: _1258.4 €
- Set de herramientas: _____60 €
- Estación de soldadura: _____188.76 €
- Taladro con soporte: _____200 €
- Generador de señales Tektronix: _____4600 €
- Cámara Termográfica Fluke TI300: _____7000 €
- Multímetro Fluke: _____300 €

10 RESULTADOS Y TRABAJOS FUTUROS

En este apartado vamos a hacer un pequeño resumen de todos los resultados obtenidos y vamos a definir algunos trabajos futuros posibles.

10.1 Resultados obtenidos

En este trabajo se ha expuesto como hemos ido realizando el trabajo desde cero, partiendo de componentes básicos y llegando a tres convertidores funcionales. Ha sido un proceso en el que hemos tocado muchas ramas distintas, desde el estudio de convertidores a la fabricación de placas o las simulaciones en tiempo real de la dSPACE.

Todo este montaje modular y en funcionamiento servirá de gran ayuda en tareas didácticas. El diseño, tanto de software como de hardware, ha sido pensado alrededor de la idea de que posteriormente va a ser utilizado por alumnos. Hemos logrado varias características para hacer esto posible: un sencillo método de conexión o controles muy intuitivos juntos al manual. Además de esto, didácticamente también ofrece muchas ventajas debido a la facilidad para desarrollar nuevos módulos y nuevas aplicaciones de la interfaz

También hará posible un mayor estudio de los sistemas eléctricos que si irán implementando cada vez más a menudo en las aeronaves. Tendremos la oportunidad de investigar y aprender acerca de lo que la iniciativa MEA pretende (*More Electric Aircraft*), pudiendo ver sistemas electrónicos de potencia de manera segura.

Este proyecto será también de vital importancia para los estudios de electrónica embarcada debido a que todos estos funcionan con energía eléctrica y por lo tanto tienen una componente de electrónica de potencia detrás.

Como resultado de las pruebas finales podemos ver que el circuito se comporta adecuadamente en todo el rango de operación y en todas las configuraciones.

También podemos observar el adecuado funcionamiento del software al saltar las emergencias y poder actuar sobre todos los selectores incluidos.

En cuanto al trabajo de laboratorio las tareas que llevaron más tiempo fueron las pruebas de la caja de la resistencia, el depurado de la programación, así como los modelos de Simulink, y poner la placa de disparos en funcionamiento.

Además de poner el circuito en funcionamiento se ha realizado un manual de usuario para que los alumnos que vayan a utilizarlo tengan más facilidad en el aprendizaje y los profesores tengan una guía en la que apoyarse. Ese manual contiene lo esencial para poner en funcionamiento el circuito.

10.2 Trabajos futuros

Como posibles avances futuros para este trabajo encontramos varios. El primero de ellos es añadir un sistema de ventilación activo para la resistencia. Esto nos permitiría alcanzar mayores voltajes a la salida, aumentando así el rango de funcionamiento del sistema dentro de unos márgenes de temperatura de seguridad.

Otro frente por el que avanzar es añadir más aplicaciones ya sean de software o de hardware relacionadas también con el concepto MEA. Como hardware podríamos encontrar un control del consumo de potencia o la eficiencia del sistema, u otro equipo adicional como unos motores conectados a la salida. En cuanto al software podríamos ver una interfaz más propia de aviación, un controles y paradas de emergencia propios de la aviación.

Si se aumenta el rango de funcionamiento también se debería repasar el control y ver que para valores mayores sigue funcionando correctamente.

Un segundo avance podría ser añadir más sensores como por ejemplo de temperatura en la salida para que ante una lectura demasiado elevada se desactivase el sistema o se iniciase la ventilación activa.

REFERENCIAS

Analysis and Design of Power Converter, Amit Kumar Singh, ISBN: 978-981-10-8212-2

<https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-981-10-8213-9>

Power Electronics, Mohan, Undelan, Robbins, 1989.

Introducción

<https://moreelectricaircraft.com/>

Fly by wire

<https://www.airbus.com/company/history/aircraft-history/1980-1987.html>

<https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a320-family.html>

<https://equipo.altran.es/evolucion-de-los-sistemas-del-avion-nuevos-usos-de-la-electricidad-en-la-aeronave/>

<https://www.quora.com/What-would-happen-to-a-Boeing-777-in-the-very-unlikely-event-of-a-total-electrical-failure-while-in-cruise>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Fly-by-wire#Airbus/Boeing>

<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/679158.pdf>

Boeing

https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_07/article_02_3.html

<https://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/dreamliner-advantages-overview>

https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_02/textonly/sy01txt.html

http://www.angelfire.com/ct3/ctenning/electrical_essays/777elecpr/777_design.html

Siemens

<https://press.siemens.com/global/en/feature/major-joint-project-towards-electrification-aviation>

Info

<https://aerospaceexport.com/high-power-bidirectional-dc-dc-converter-for-aerospace-applications/>

Descripción circuito

Conceptos

Pwm

<https://barrgroup.com/Embedded-Systems/How-To/PWM-Pulse-Width-Modulation>

Boost

<http://www.learnabout-electronics.org/PSU/psu32.php>

<https://www.powerelectronicsnews.com/technology/the-dc-dc-boost-converter-power-supply-design-tutorial-section-5-1>

<https://components101.com/articles/boost-converter-basics-working-design>

Calculo Circuito

<http://www.ti.com/lit/an/slva372c/slva372c.pdf>

<http://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf>

<http://www.ti.com/lit/an/slva721a/slva721a.pdf>

Driver

<http://www.ti.com/lit/ml/slua618a/slua618a.pdf> (Pdf descargado)

PCB

<https://pixabay.com/photos/canon-eos-ef-s-17-85-is-lens-1891685/> (imagen)

PCB multicapa

<https://www.sdy-pcb.com/news/company/multilayer-pcb-layer-stackup.html> (imagen)

Through Hole

<https://resources.altium.com/pcb-design-blog/why-use-through-hole-technology-in-pcb-design>

<https://pixabay.com/photos/integrated-circuit-electronics-421816/>

<https://pixabay.com/photos/cyber-security-network-internet-2366908/>

SMD

https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/surface-mount-technology-smd-smt/what-is-smt-primer-tutorial.php

<https://eprpartner.com/through-hole-vs-surface-mounted/>

<https://pixabay.com/photos/pcb-printed-circuit-board-4002378/>

Comparación SMD THM

<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Photo-SMDcapacitors.jpg>

Vias

http://es.fastturnpcbs.com/blog/vias-in-pcb-boards_b19

<https://www.ncabgroup.com/es/preguntas-frecuentes/>

https://en.wikipedia.org/wiki/File:Via_Types.svg (imagen)

Fabricación

Fotografado

https://en.wikipedia.org/wiki/File:Photoresist_of_Photolithography.png (imagen)

<https://www.pcbcart.com/article/content/PCB-manufacturing-process.html>

SilkScreen

https://www.pcbway.com/pcb_prototype/PCB_Silkscreen.html

Diseño PCB

<https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>

<https://www.molex.com/molex/search/partSearch?query=41791&pQuery=> (modelos 3d conector MOL)

<https://grabcad.com/library/rj11-connectors-6p-1> (modelos conectores RJ11)

<https://grabcad.com/library/exuunn-ex636-7-62mm-1> (modelo alimentación)

<https://grabcad.com/library/irfz44n-to-220-1> (modelo 3d MOSFET)

<https://www.tracopower.com/products/browse-by-category/show/dc-dc-converters/smd-package/tsm/1/>
(modelo 3D TRACO)

<https://grabcad.com/library/soic-package-wide-14-16-18-20-24-and-28-pins-1> (modelo 3D driver)

https://grabcad.com/library/plastic-standoff-separadores-de-plastico-1/details?folder_id=4856960 (modelo 3D espaciadores M3)

<https://grabcad.com/library/banana-connector-4-00mm-1> (modelo 3d conector banana)

GLOSARIO

A320	xvii
A380	xvii
Airbus	xvii
Boeing	xvii
Boeing 787	xvii
Boost	6
Buck	5, 6
Buck-Boost	6
<i>duty cycle</i>	6
<i>Fly by wire</i>	xvii
MEA	xvii
PCB	xvii
<i>Power by wire</i>	xvii
UAV	xvii