



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, TÉRMICA Y DE
FLUIDOS

ÁREA DE CONOCIMIENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL
CONTROL ELECTRÓNICO DEL FRENADO
ELECTROMAGNÉTICO EN UN BANCO DE
POTENCIA

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Autor: **Pedro de Lucas García García**

Tutor: **Javier Pérez Fernández**

MÁLAGA, junio de 2025

Resumen

Desde los inicios de la industria automovilística, los bancos de potencia han sido esenciales para evaluar el rendimiento de motores en distintas condiciones. Este proyecto se enfoca en los bancos de absorción, que generan carga para medir el par motor mediante distintos sistemas, como el uso de corrientes de Foucault. Este método aplica una resistencia electromagnética controlada, cuyo correcto funcionamiento depende de un suministro energético estable y eficiente.

El presente trabajo se centra en el diseño e implementación de dicho sistema, considerando aspectos como la regulación de corriente, la protección de los componentes y su integración con el control del banco de pruebas.

En primer lugar, se plantea el análisis y el fundamento teórico del circuito de electrónica de potencia. Para ello se presentan previamente las características del freno electromagnético que se alimentará eléctricamente y, a continuación, se propone un circuito que se ajuste a los requerimientos necesarios. Dicho circuito se trata de un convertidor AC-DC asociado con un convertidor DC-DC reductor. Una vez propuesto el circuito se comprobará su funcionamiento mediante el software PSIM y se analizarán los resultados obtenidos.

Con la simulación realizada correctamente, se procede a la implementación del circuito. Para ello, en primer lugar se rehace el circuito propuesto en una placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés, Printed Circuit Board). Se hará uso del software EasyEDA, donde también se establecen las capas de las que consta la PCB y el trazado de las pistas que conectan los diferentes componentes del circuito. También se diseña una caja protectora para la placa PCB mediante SolidWorks. Dicha caja contará con una tapa de metacrilato que permita aislar la placa y verla a su vez.

Finalmente, con el circuito diseñado, se realizan una serie de ensayos para verificar que lo llevado a cabo en simulación funciona correctamente de forma experimental.

Palabras clave: Banco de potencia, Freno electromagnético, sistema de alimentación, electrónica de potencia, PCB.

Abstract

Since the early days of the automotive industry, dynamometers have been essential tools for evaluating engine performance under various conditions. This project focuses on absorption-type dynamometers, which generate load to measure engine torque through different systems, such as the use of eddy currents. This method applies a controlled electromagnetic resistance, whose proper functioning depends on a stable and efficient power supply.

This bachelor thesis is centered on the design and implementation of such a system, considering aspects such as current regulation, component protection, and integration with the test bench control system.

First, the analysis and theoretical basis of the power electronics circuit are presented. To do so, the characteristics of the electromagnetically powered brake are introduced, followed by the proposal of a circuit that meets the necessary requirements. This circuit consists of an AC-DC converter combined with a buck DC-DC converter. Once the circuit is proposed, its operation is verified using PSIM software, and the results are analyzed.

After the simulation, the circuit is implemented. The proposed design is recreated on a PCB using EasyEDA software, which also defines the PCB layers and the routing of tracks connecting the various components. A protective enclosure for the PCB is also designed using SolidWorks. This enclosure includes a methacrylate cover to isolate and simultaneously allow visibility of the board.

Finally, with the circuit built, a series of tests are carried out to verify that the experimental performance matches the simulated results.

Keywords: Power test bench, electromagnetic brake, power supply system, power electronics, PCB.

Agradecimientos

A mis padres Lucas y Eli. Gracias Mamá por aguantarme durante estos cinco años, por estar ahí para todo cuando lo he necesitado y por cuidar de todos nosotros. Gracias por el gran sacrificio que realizas por nuestra familia. Gracias Papá por sacar siempre tiempo para nosotros después de tu trabajo, por saber brindarnos a todos con tu paciencia y atendernos con amabilidad a pesar del cansancio. Gracias también por todo el apoyo y consejo que me has ofrecido durante la realización del proyecto.

A mi hermana Gloria. Gracias por sacarme una sonrisa cada vez que no me he encontrado de buen humor y por soportarme en todo momento. Gracias por darme el privilegio de ser tu hermano mayor y todo lo que conlleva serlo. Durante este tiempo has crecido un montón y has ido madurando como persona, sigue así y nunca cambies pequeña.

A Emma. Gracias por llegar en un momento inesperado de mi vida para quedarte. Has sido capaz de sacar la mejor versión de mi, siempre risueña y alegre, ofreciéndome en todo momento tu apoyo sin ningún inconveniente ni interés. Gracias por ser un pilar fundamental en todo el proceso y por soportarme a diario sin poner nunca una mala cara. Sigue haciendo felices a las personas que te rodean y nunca cambies.

A mis compañeros de carrera. Gracias por haberme acompañado en todo momento y por hacer posible todo esto, sin vuestra ayuda no habría sido lo mismo. En especial me gustaría agradecer a Manuel Córdoba Ramos porque ha estado ahí desde primera hora y es un gran apoyo mental en todo momento. Juntos hemos crecido desde que comenzamos y juntos vamos a ser capaces de ponerle la guinda al pastel.

A los profesores que han contribuido a mi formación durante la carrera de Ingeniería Eléctrica, en especial al tutor del proyecto, Javier Pérez Fernández, quien ha confiado en mi para la realización del proyecto y que ha sido servicial, atento y colaborativo en todo momento.

Acrónimos

AC	Alternating Current
BCM	Boundary Conduction Mode
BJT	Bipolar Junction Transistor
CCM	Continuous Conduction Mode
DC	Direct Current
DCM	Modo de conducción discontinua
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
PCB	Printed Circuit Board
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
PWM	Pulse Width Modulation
RPM	Revoluciones por Minuto
SI	Sistema Internacional de Unidades
SMD	Surface Mount Device

Índice

Resumen	3
Abstract	5
Agradecimientos	7
Acrónimos	9
1 Introducción	19
1.1 Antecedentes	19
1.2 Objetivos	20
1.3 Metodología	21
1.4 Estructura del documento	22
2 Estado del arte	23
2.1 El banco de potencia	23
2.1.1 Par y potencia	23
2.1.2 Tipos de bancos de potencia	24
2.2 Motores y sus tipos	29
2.2.1 Motores térmicos	29
2.2.2 Motores eléctricos	30
2.2.3 Motores híbridos	33
2.2.4 Motores hidráulicos	34
2.3 Motor síncrono de imanes permanentes	35
3 Análisis y fundamento teórico del control electrónico	39
3.1 Análisis del freno electromagnético	39
3.2 Fundamento teórico del circuito electrónico	41

3.2.1	Rectificador de diodos y condensadores	41
3.2.2	Interruptores controlables	41
3.2.3	Circuito convertidor reductor	45
3.3	Circuito y resultados	52
3.3.1	Circuito electrónico propuesto	52
3.3.2	Resultados de la simulación en PSIM	54
4	Diseño y montaje PCB en EasyEDA	59
4.1	Realización del circuito en EasyEDA	59
4.1.1	Elección y justificación de los componentes	59
4.1.2	Esquemático del circuito	62
4.2	Diseño de la PCB	65
4.3	Diseño de la carcasa en SolidWorks	68
5	Implementación y ensayos	71
5.1	Montaje de la PCB	71
5.2	Ensayos realizados	73
5.2.1	Primer ensayo: Seguimiento de la corriente del shunt	74
5.2.2	Segundo ensayo: Seguimiento de una señal cuadrada	75
5.2.3	Tercer ensayo: Alimentación del freno electromagnético	77
6	Conclusiones y líneas futuras de desarrollo	81
6.1	Conclusiones	81
6.2	Líneas futuras de desarrollo	82
	Bibliografía	85

Índice de figuras

2.1	Curva típica motor de combustión y de motor eléctrico.	24
2.2	Banco de potencia de tipo inercial.	25
2.3	Ley de Faraday. Fuente: [1]	28
2.4	Banco de potencia de absorción electromagnética.	28
2.5	Motor térmico.	30
2.6	Máquina eléctrica.	31
2.7	Partes de un motor asíncrono.	32
2.8	Motor síncrono de rotor bobinado.	33
2.9	Motor térmico.	33
2.10	Motor hidráulico.	34
2.11	Diagrama resumen.	34
2.12	Motor Síncrono de Imanes Permanentes.	35
2.13	Tipos de rotor en motores síncronos de imanes permanentes: a) Imanes montados en la superficie y b) imanes insertados en el rotor.	36
3.1	Freno de absorción electromagnética.	40
3.2	Diagrama de circuito a diseñar.	41
3.3	Tipos de transistores BJT.	42
3.4	Transistor de potencia: Forma constructiva, curvas reales e ideales.	43
3.5	Transistor MOSFET: Símbolo, forma constructiva y curvas reales e ideales.	44
3.6	Transistor bipolar de puerta aislada IGBT: Símbolo, curvas reales e ideales.	45
3.7	Diagrama de bloques de un convertidor cc-cc.	45
3.8	Convertidor cc-cc básico.	46
3.9	Conmutación por modulación por ancho de pulso.	47
3.10	Topología tipo de convertidor <i>buck</i>	48

3.11	Rizado de la tensión de salida en un convertidor reductor.	51
3.12	Circuito propuesto inicialmente.	52
3.13	Circuito definitivo.	53
3.14	Corriente de la carga con una señal continua de 3 [V].	54
3.15	Tensión de la carga con una señal continua de 3 [V].	54
3.16	Señal del shunt frente a la consigna de entrada de 3 [V].	55
3.17	Señal de control.	55
3.18	Corriente de la carga con una señal continua de 1.5 [V].	56
3.19	Tensión de la carga con una señal continua de 1.5 [V].	56
3.20	Señal del shunt frente a la consigna de entrada de 1.5 [V].	56
3.21	Señal de control.	57
3.22	Corriente de la carga con una señal sinusoidal de 1.5 [V] de amplitud.	57
3.23	Tensión de la carga con una señal sinusoidal de 1.5 [V] de amplitud.	58
3.24	Señal del shunt frente a la consigna de entrada sinusoidal de 1.5 [V] de amplitud.	58
3.25	Señal de control.	58
4.1	Circuito propuesto inicialmente.	63
4.2	Circuito definitivo.	64
4.3	<i>Top Layer</i>	66
4.4	<i>GND</i>	66
4.5	<i>Electric Supply</i>	67
4.6	<i>Bottom Layer</i>	67
4.7	Diseño 3D de la placa PCB.	68
4.8	Vista isométrica de la carcasa.	69
4.9	Vista de planta de la carcasa.	69
4.10	PCB colocada en la carcasa.	70
5.1	Proceso de montaje de la PCB.	72
5.2	PCB completa.	72
5.3	Generador de señales empleado.	73
5.4	Osciloscopio empleado.	73
5.5	Seguimiento de la corriente del shunt a la consigna de entrada.	74
5.6	Seguimiento de una señal cuadrada con duty cycle del 20 %	75

5.7	Seguimiento de una señal cuadrada con duty cycle del 60 %	76
5.8	Ensayo en el freno electromagnético.	77

Índice de Tablas

2.1	Características del motor. Fuente: [2].	36
2.2	Valores nominales del motor. Fuente: [2].	37
2.3	Valores máximos del motor. Fuente: [2].	37
3.1	Especificaciones eléctricas. Fuente: Elaboración propia.	40
4.1	Componentes usados en el circuito. Fuente: Elaboración propia. . . .	61

Capítulo 1

Introducción

Contenido

1.1	Antecedentes	19
1.2	Objetivos	20
1.3	Metodología	21
1.4	Estructura del documento	22

1.1. Antecedentes

En el Departamento de Ingeniería Mecánica de la escuela, la caracterización de motores ha sido una parte importante de la labor investigadora y docente. Usualmente, las pruebas de rendimiento y medición de potencia de los motores se realizaban mediante un banco inercial modelo *HHM 450*, el cual permite determinar parámetros como la potencia, el par motor y la eficiencia en condiciones dinámicas. Este tipo de banco se basa en el principio de aceleración de una masa inercial, registrando los cambios en velocidad angular para estimar el rendimiento del motor bajo prueba.

Sin embargo, el método inercial presenta ciertas limitaciones, especialmente cuando se desea realizar una caracterización más detallada o estática del comportamiento del motor, como por ejemplo, la respuesta en condiciones estacionarias o la determinación precisa del par en ausencia de aceleración. Con el objetivo de suplir estas necesidades, se ha implementado en el departamento un nuevo banco de pruebas basado en un freno electromagnético.

Este banco permite aplicar una carga controlada al eje del motor en pruebas estáticas, facilitando así una evaluación más versátil de sus características. A diferencia del sistema inercial, el freno electromagnético ofrece una resistencia ajustable de forma continua, controlable electrónicamente, lo que permite replicar condiciones de carga variables y constantes sin depender de la aceleración de masas.

Para garantizar un funcionamiento preciso y seguro del nuevo banco, se ha desarrollado un sistema de control electrónico que regule la alimentación del freno magnético. Este sistema es esencial para poder ajustar la carga aplicada, monitorizar su comportamiento y asegurar que los ensayos se realicen en condiciones repetibles y controladas. El presente Trabajo de Fin de Grado se enmarca en el diseño e implementación de dicho sistema de control.

1.2. Objetivos

El presente proyecto tiene como objetivo el desarrollo e implementación del control electrónico para el mecanismo de frenado de un banco de potencia de absorción basado en corrientes de Foucault. Se busca garantizar el seguimiento de la consigna de entrada que permita obtener mediciones precisas del par motor. Para ello, se va a diseñar y fabricar la electrónica de control para ajustar las corrientes del freno magnético y se llevarán a cabo una serie de ensayos experimentales.

Para conseguir el objetivo principal será necesario lograr una serie de objetivos secundarios:

- Realizar una revisión del estado del arte.
- Analizar y fundamentar teóricamente el circuito de electrónica de potencia necesario para el control del freno electromagnético.
- Proponer un circuito compuesto por un convertidor AC-DC y un convertidor DC-DC reductor que cumpla con los requerimientos del sistema.
- Simular el circuito propuesto utilizando el software PSIM para verificar su funcionamiento y analizar los resultados obtenidos.
- Diseñar la placa PCB para el circuito mediante el software EasyEDA, incluyendo el trazado de pistas y la definición de capas.
- Diseñar una caja protectora para la placa PCB utilizando SolidWorks, que permita aislar y visualizar el circuito a través de una tapa de metacrilato.
- Realizar ensayos experimentales para validar el desempeño del circuito implementado y corroborar que los resultados experimentales coinciden con los simulados.

1.3. Metodología

Para realizar este TFG se ha llevado a cabo el siguiente procedimiento:

1. Análisis del sistema de frenado y diseño del circuito:

En esta primera fase, se llevará a cabo un análisis detallado del sistema de frenado electromagnético que se va a implementar en el banco de potencia. Este análisis incluirá el estudio de las especificaciones técnicas del sistema de frenado basado en corrientes de Foucault, las necesidades de alimentación y los parámetros de control requeridos. Con esta información, se diseñará el circuito electrónico encargado de alimentar dicho sistema, asegurando que pueda ajustarse de manera precisa a las necesidades de corriente y voltaje para el funcionamiento del freno magnético.

2. Simulación del circuito con PSIM:

Una vez diseñado el circuito, se procederá a realizar una simulación del mismo utilizando el software PSIM. En esta etapa, se validará que el diseño sea funcional y adecuado para las especificaciones del sistema de frenado electromagnético. La simulación permitirá realizar pruebas previas a la construcción física del sistema, garantizando que todos los elementos del circuito respondan de manera adecuada a las condiciones operativas esperadas. Se realizarán pruebas de diversos escenarios para asegurar la estabilidad y el control del freno magnético.

3. Diseño de la placa PCB en EasyEDA:

Con el diseño del circuito validado, se procederá al diseño de la placa de circuito impreso (PCB). Utilizando el software EasyEDA, se creará un diseño preliminar en 3D de la placa PCB que contendrá todos los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema de frenado. En esta fase, se optimizará el layout de la placa, considerando aspectos como la distribución de los componentes, las rutas de conexión y el espacio disponible para asegurar un montaje adecuado.

4. Fabricación y montaje de la placa PCB:

En esta etapa, se procederá a la fabricación de la placa PCB a partir del diseño realizado. Una vez recibida la placa, se llevará a cabo el montaje de los componentes electrónicos de acuerdo con las especificaciones del diseño. Se prestará especial atención a la correcta soldadura de los componentes y a la calidad de las conexiones eléctricas para evitar fallos en el sistema. Una vez montada la placa, se realizará una inspección visual y se realizarán pruebas preliminares para verificar que los componentes estén instalados correctamente.

5. Pruebas con motor real y validación del sistema:

En la fase final de implementación, se llevará a cabo un ensayo utilizando un motor real, en particular un motor síncrono de imanes permanentes, con el sistema de frenado electromagnético ya montado y funcionando. Se realizarán diversas pruebas de funcionamiento para comprobar la efectividad del sistema de frenado y verificar que los ajustes de corriente sean adecuados. Esta fase permitirá identificar posibles ajustes y realizar la calibración final del sistema.

6. Redacción de la memoria final:

Una vez completadas las pruebas y validaciones, se procederá a la redacción de la memoria final del proyecto.

1.4. Estructura del documento

En este capítulo introductorio se plantean los antecedentes sobre los que se plantea este TFG, los objetivos propuestos y la metodología seguida para conseguirlos.

En el capítulo 2 se presenta el estado del arte de las tecnologías empleadas en los bancos de potencia, los tipos de máquinas eléctricas que se pueden encontrar hoy en día y los motores térmicos, con la finalidad de contextualizar este TFG dentro del ámbito tecnológico y científico.

A lo largo del capítulo 3 se detallará el circuito electrónico que se ha diseñado para realizar el control del freno electromagnético y se mostrarán resultados de la simulación obtenida mediante el software PSIM.

En el capítulo 4 se desarrollará el diseño de la placa PCB empleando el software EasyEDA.

En el capítulo 5 se llevará a cabo la implementación en la realidad de la placa y si esta tiene un correcto funcionamiento.

En el último capítulo, el 6, se realizarán una serie de conclusiones y comparaciones frente a lo que se puede encontrar en el mercado actual y se comentarán las posibles líneas futuras de desarrollo del proyecto propuesto.

Finalmente se concluye con la bibliografía que contiene las referencias consultadas para la realización de este trabajo.

Capítulo 2

Estado del arte

Contenido

2.1	El banco de potencia	23
2.1.1	Par y potencia	23
2.1.2	Tipos de bancos de potencia	24
2.2	Motores y sus tipos	29
2.2.1	Motores térmicos	29
2.2.2	Motores eléctricos	30
2.2.3	Motores híbridos	33
2.2.4	Motores hidráulicos	34
2.3	Motor síncrono de imanes permanentes	35

2.1. El banco de potencia

2.1.1. Par y potencia

Los bancos de potencia, también llamados dinamómetros, son unas herramientas que permiten conocer el estado del motor, su régimen, el par que está ejerciendo, etc. [3].

El par motor(M) es la capacidad que tiene el propio motor de producir trabajo y es generado como resultado de aplicar una fuerza en sentido rotacional. Su unidad de medida en el SI es Newton por metro[Nm][4]. La ecuación que lo define viene dada por 2.1:

$$M[Nm] = F[N] \cdot d[m] \quad (2.1)$$

La potencia, en términos teóricos, se define como la cantidad de trabajo efectuado por unidad de tiempo. El trabajo es una magnitud relacionada con la fuerza y

representa la energía requerida para generar el desplazamiento de un cuerpo bajo la acción de dicha fuerza en el contexto mecánico. Por lo tanto, la potencia mide la rapidez con la que se realiza este trabajo y, en el movimiento lineal, se expresa como el producto de la fuerza por la velocidad. En el caso de un movimiento rotatorio, como ocurre en los motores, la potencia se determina multiplicando el par motor por la velocidad angular 2.2.

$$P[W] = M[Nm] \cdot n[rad/s] \quad (2.2)$$

Su unidad en el Sistema Internacional (SI) es el watio [W], aunque también se utilizan coloquialmente los caballos de vapor [CV], los cuales se definen como la potencia que se necesita para elevar una masa de 75 kg a un metro de altura y a una velocidad de un metro por segundo. Un CV equivale a 735,5 W [4].

En los bancos de potencia se obtienen tanto el par como la velocidad angular de giro del eje que se ensaya, por lo que estos datos permiten calcular la potencia que desarrolla el motor y representar en una gráfica tanto el par como la potencia que entrega el motor en función del régimen de giro al que se encuentre tal y como se ve en la Figura 2.1.

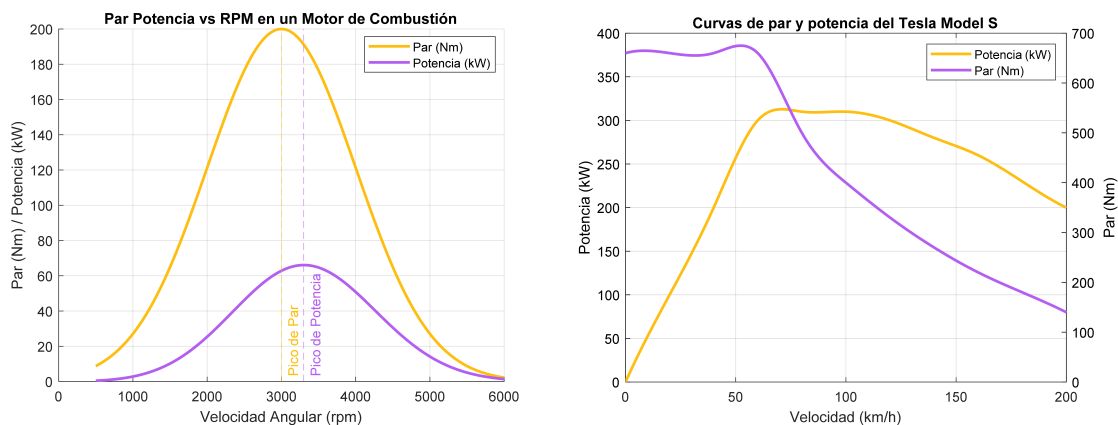


Figura 2.1: Curva típica motor de combustión y de motor eléctrico.

Fuente: Elaboración propia.

2.1.2. Tipos de bancos de potencia

Los bancos de potencia se pueden agrupar en dos grandes grupos según su aplicación: aquellos diseñados para ensayar motores de forma individual y los bancos de chasis, en los que se prueba el vehículo completo a través de sus ruedas.

Estos últimos permiten simular las condiciones de funcionamiento del vehículo, incluyendo situaciones extremas, de manera segura, objetiva y sin la influencia de factores externos. Generalmente, los bancos de pruebas se encuentran en recintos

cerrados, y sus componentes pueden estar instalados en un alojamiento de hormigón en el suelo o en una estructura independiente.[3]

El banco de potencia en el que se fundamenta el presente proyecto es del primer tipo descrito, es decir, un banco de potencia diseñado para ensayar el motor de forma individual.

Otra forma en la que se pueden clasificar los bancos de potencia es según el tipo de carga o freno:

- Inerciales

Los bancos inerciales están conformados básicamente por unos rodillos de masa y dimensiones conocidos que pueden girar libremente y que, junto a un programa de ordenador que interpreta cómo estos son acelerados y frenados por las ruedas del vehículo, convierte las mediciones obtenidas en gráficas de potencia en función de las revoluciones por minuto(RPM), par en función de las RPM o incluso rendimiento. Dicha masa inercial opone resistencia al motor o al vehículo cuando este está acelerando, sin embargo, no producen resistencia a un régimen de revoluciones estacionario.

Los bancos inerciales, si están bien diseñados, son lo bastante precisos para que sus valores puedan considerarse válidos en la mayoría de las ocasiones y son especialmente útiles para comparar. Así, gracias a su sencillez y precisión, son muy útiles para apreciar pequeños ajustes o mejoras que se hayan realizado en el motor. Una de las grandes ventajas de los bancos inerciales es que no es necesaria su calibración, independientemente del tipo de vehículo o condiciones en las que se realice el ensayo.

El gran inconveniente de los bancos inerciales es que, debido a su diseño, necesariamente se han de realizar las mediciones con grandes cargas de aceleración, ya que cuentan con dificultad para medir la potencia a RPM constantes. Como consecuencia, ajustar y optimizar pequeños parámetros se hace muy complicado ya que es apenas se aprecia el comportamiento del motor a un determinado régimen de giro o carga mas que en un periodo de tiempo muy pequeño [5].



Figura 2.2: Banco de potencia de tipo inercial.

Fuente: [5].

- De freno o absorción

El banco de freno o absorción consta de un rodillo de mínima inercia adosado a un sistema de absorción de energía. La principal característica de los bancos de freno es que son capaces de medir par a la misma vez que aplican fuerza de frenada.

Debido a que con un banco de freno es posible aplicar cargas variables es factible simular condiciones de marcha prácticamente idénticas a la realidad.

Sin embargo, los bancos de freno tienen importantes desventajas. Normalmente los resultados de la medición de potencia son menos precisos que en los bancos inerciales, ya que los bancos de freno son más complejos y tienen muchas más piezas móviles[5].

Banco de freno hidráulico

Estos tipos de bancos también son llamados de freno de agua, y están formados por un rotor y un estator lleno de agua que actúa como elemento de frenado y como elemento refrigerante. Con estos bancos se permiten realizar ensayos tanto en regímenes estacionarios como en transitorios.

La acción de frenado se produce porque el agua de los alveolos del rotor se expulsa a una alta velocidad debido a la fuerza centrípeta en dirección a los alveolos del estator, a los que entran por su perímetro externo. La forma de estos alveolos hace que el agua sea redirijida hacia el rotor por la parte más cercana al eje de rotación a una velocidad menor que la inicial. En este recorrido, el agua sigue una trayectoria helicoidal, y es la turbulencia generada la que produce una acción de frenada entre el rotor y el estator debido al rozamiento entre las superficies del freno y el agua. La resistencia que opone el agua al giro del rotor reacciona sobre el estator y produce un par igual al par motor. A mayor flujo de agua a través del banco, mayor es la acción de frenado obtenida.

El par resistente se puede regular empleando una válvula que estrangula la corriente de agua o bien, colocando unas compuertas entre los alveolos del estator y los del rotor.

En los bancos hidráulicos ha de mantenerse la presión del agua dentro de un umbral, ya que una variación de presión provocaría una variación en el par resistente y por lo tanto una variación en la medida del par del motor.

Los frenos de absorción transforman toda la energía mecánica que reciben del motor en calor. En este caso, el agua se va calentado a su paso por el freno. Este calor es evacuado por el sistema de refrigeración del freno, que suele estar formado por un abastecimiento continuo de agua, normalmente mediante un circuito cerrado, y haciendo uso de una torre de refrigeración[3].

Banco de freno regenerativo

Los bancos de prueba que utilizan un motor eléctrico como generador en modo de freno, conocidos como bancos de freno regenerativos, representan una solución eficiente, precisa y sostenible para la caracterización de motores eléctricos.

Este tipo de banco se basa en el principio de un motor eléctrico que puede funcionar en modo generador cuando es impulsado mecánicamente por otro sistema. En esta configuración, el motor bajo prueba convierte la energía mecánica en energía eléctrica. En lugar de disipar esta energía en forma de calor, el banco regenerativo la recupera y puede:

- Devolverla a la red eléctrica
- Reutilizarla localmente en un circuito cerrado

El sistema de carga suele estar compuesto por un segundo motor eléctrico, denominado máquina de carga, que actúa como freno dinámico. Su par se controla electrónicamente mediante un variador de frecuencia, permitiendo aplicar condiciones de carga específicas.

Los bancos de freno regenerativo destacan por su eficiencia energética, al recuperar la energía generada en lugar de disiparla, y por su precisión en el control del par y la velocidad. Además, ofrecen mayor durabilidad al evitar componentes de fricción y permiten realizar ensayos tanto estáticos como dinámicos de forma versátil y controlada.

Este tipo de banco es especialmente útil en ensayos de motores eléctricos de tracción, como los utilizados en vehículos eléctricos, donde se requiere caracterizar la entrega de par, la eficiencia y el comportamiento regenerativo del sistema en condiciones controladas.

Bancos de potencia de absorción electromagnética.

Este tipo de banco de potencia será el que se tiene como base del proyecto, por lo que se procederá a una explicación más detenida del funcionamiento.

El funcionamiento del freno electromagnético está basado en la ley de Faraday. Cuando el flujo del campo magnético que circula a través de una superficie cambia con el tiempo, se genera una fuerza electromotriz inducida.

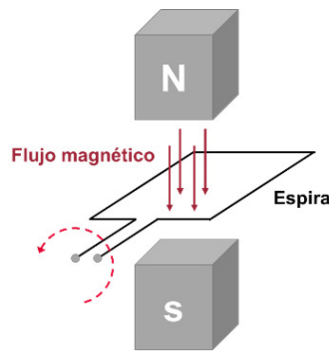


Figura 2.3: Ley de Faraday. Fuente: [1]

Esa fuerza hace que surja una corriente denominada corriente inducida, la cual se opone a la variación de flujo que la ha producido. Cuando la corriente inducida no se ve obligada a circular por un conductor bien definido, sino que circula por una masa metálica como es el caso del banco de potencia, a esta corriente se le conoce como corriente parásita o de Foucault [6].

Cuando un conjunto de cargas, que forman una corriente, atraviesan una zona en la que existe un campo magnético, sobre esas cargas en movimiento aparece una fuerza magnética. En el caso del freno electromagnético, una serie de bobinas generan un campo magnético, y es el rotor, la masa metálica sobre la que se generan esas corrientes parásitas o de Foucault. Produciéndose una fuerza que se opone al sentido de giro del rotor, disminuyendo su velocidad y frenándolo. La magnitud de la fuerza de frenado dependerá directamente de la intensidad que circula por las bobinas del freno [4].

En estos dinamómetros hace falta una refrigeración porque la potencia de frenada obtenida se transforma completamente en calor, ya que en el disco se introducen corrientes, y al no haber circuito externo, se calienta. Esta refrigeración se consigue circulando agua por unas camisas mecanizadas que posee el estátor [3].

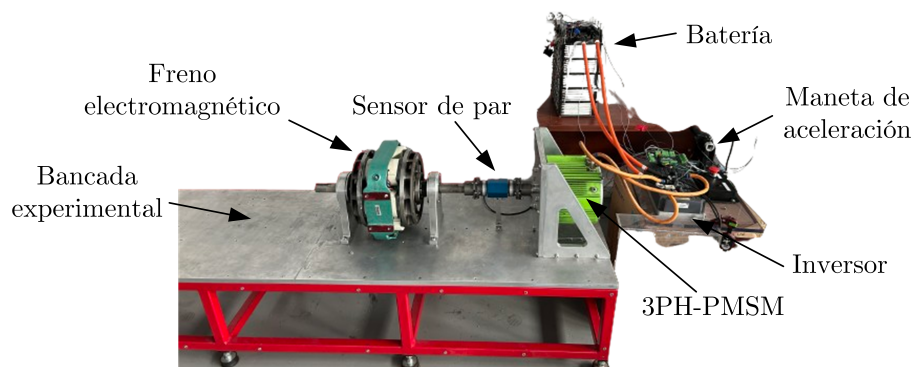


Figura 2.4: Banco de potencia de absorción electromagnética. Fuente: Elaboración propia.

2.2. Motores y sus tipos

Una vez queda explicado el funcionamiento del banco de potencia se procede a la explicación del motor y los tipos que se pueden encontrar.

En general, un motor se puede considerar como un dispositivo que permite transformar cualquier tipo de energía en energía mecánica [7]. Si bien se pueden clasificar de varias formas, en este caso, el presente proyecto realizará una clasificación según el tipo de energía utilizada.

2.2.1. Motores térmicos

Un motor térmico es un dispositivo diseñado para convertir la energía térmica de un fluido compresible en energía mecánica. Esta energía térmica puede provenir directamente de fuentes naturales, como la radiación solar o la energía geotérmica, o generarse a partir de otras formas de energía, como la energía química almacenada en la materia. En este último caso, es necesario un proceso de conversión, como la combustión, para transformar la energía química en térmica. Además, se requiere un fluido de trabajo capaz de modificar su energía en respuesta al calor absorbido y un sistema mecánico adecuado que permita convertir dicha energía en movimiento mecánico[7].

Dependiendo de donde se produzca el proceso de combustión los motores se pueden clasificar en:

- Motores de combustión externa: si el proceso de combustión tiene lugar de forma externa al fluido de trabajo, como por ejemplo los motores Stirling.
- Motores de combustión interna: si el proceso de combustión tiene lugar en el propio fluido de trabajo, siendo este generalmente una mezcla de aire y combustible.

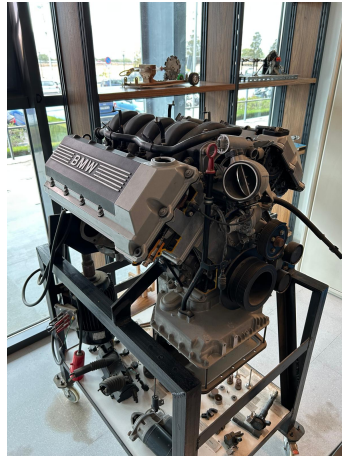


Figura 2.5: Motor térmico.
Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Motores eléctricos

Una máquina eléctrica es el resultado de aplicar de manera inteligente los principios del electromagnetismo, especialmente la ley de inducción de Faraday. Un motor eléctrico, en particular, es un tipo de máquina eléctrica que convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Su funcionamiento se basa en la introducción de una corriente a través de una fuente externa, la cual interactúa con el campo magnético generando el movimiento de la máquina. Como resultado, se produce una fuerza electromotriz inducida que se opone a la corriente, conocida como fuerza contra-electromotriz. Por lo tanto, para operar, el motor requiere un suministro de energía eléctrica que se transformará en energía mecánica [6].

Un motor eléctrico consta de dos partes principales:

- El estator, que es la parte fija y tiene forma cilíndrica.
- El rotor, que es la parte giratoria y que va colocado en la cavidad del estátor. Se monta sobre un eje con rodamientos que pueden estar en pedestales o integrados en la carcasa del estator.

Entre ambas se encuentra el entrehierro, donde se genera el campo magnético que permite el acoplamiento entre los sistemas eléctrico y mecánico.

Tanto el estator como el rotor contienen devanados de cobre, por los cuales circulan corrientes conectadas a un circuito externo. Uno de estos devanados, llamado inductor, genera el flujo magnético, mientras que el inducido recibe ese flujo y genera corrientes. La ubicación de estos devanados depende de factores de construcción y eficiencia. La carcasa del estator, que protege y soporta la máquina, puede ser un monobloque de hierro en máquinas pequeñas o ensamblada en varias partes en las más grandes [6].

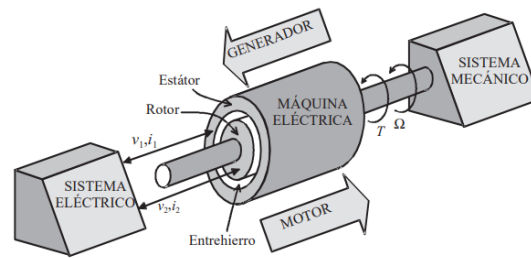


Figura 2.6: Máquina eléctrica.

Fuente: [6].

Según el tipo de alimentación, los motores eléctricos se clasifican en tres grupos:

- Motores de corriente continua.

Un motor de corriente continua (DC, por sus siglas en inglés, Direct Current) convierte la energía eléctrica de entrada en energía mecánica de salida. En esencia, funciona como una dinamo en sentido inverso, en concordancia con el principio de reciprocidad electromagnética establecido por Faraday y Lenz [6]. Históricamente, los motores de corriente continua han sido más empleados que los motores de corriente alterna (AC, por sus siglas en inglés, Alternating Current) debido a la mayor sencillez para controlar la velocidad y el par de salida. Por este motivo, su uso se vio extendido en diferentes aplicaciones como la tracción ferroviaria o diversos procesos productivos industriales. Sin embargo, la aparición de la electrónica de potencia contribuyó a que con el paso de los años, estos motores DC se vieran reemplazados por los motores de AC debido a su menor coste y mantenimiento [8].

- Motores AC.

- Motores asíncronos.

Este tipo de motor es, junto a los síncronos, uno de los más empleados en la actualidad debido a una buena fiabilidad, sencillez y bajo coste de mantenimiento. Hay dos tipos de máquinas asíncronas o de inducción según el tipo de rotor:

- Rotor en jaula de ardilla. Está compuesto por una serie de barras que se disponen de forma similar a la que se puede ver en las jaulas para roedores, de ahí el origen de su nombre. Están conectadas en cortocircuito mediante dos anillos de metal en los extremos.
- Rotor devanado. Tiene una forma similar a la del estator, con un núcleo laminado y un devanado eléctrico en el exterior del rotor. Este se alimenta mediante tres anillos rozantes montados en el extremo del eje y conexiónados eléctricamente a cada una de las fases.

En cuanto al estator de los motores de inducción es igual en ambos casos, estando formado por una serie de láminas de acero al silicio aisladas para disminuir las pérdidas debidas a las corrientes de Foucault [8].

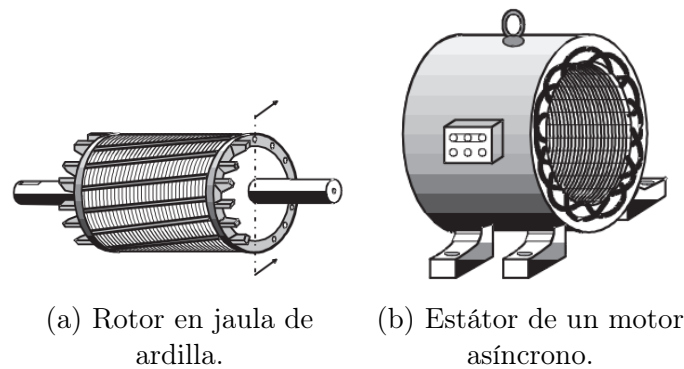


Figura 2.7: Partes de un motor asíncrono.

Fuente: [6]

- Motores síncronos.

Los motores síncronos son máquinas eléctricas cuya velocidad de rotación n [rpm] en estado estacionario está directamente relacionada con la frecuencia de la red de corriente alterna con la cual trabaja, de acuerdo con la expresión 2.3.

$$n = \frac{60f}{p} \quad (2.3)$$

Donde p es el número de polos del motor [8].

Es necesario destacar que, en los últimos años, cada vez son más las aplicaciones en las que los motores síncronos, sobre todo los de imanes permanentes (PMSM, por sus siglas en inglés, Permanent Magnet Synchronous Motor) resultan una opción más interesante, por ejemplo en el desarrollo de los vehículos eléctricos [9].

Hay dos tipos de motores síncronos en función de cómo se genere el campo magnético del rotor:

- Motores síncronos de rotor bobinado. En este tipo de motores se usan una serie de bobinas a modo de electroimán para generar el campo magnético del rotor. Para ello, estos devanados se excitan mediante DC a través de unos anillos rozantes montados sobre el eje. En cuanto a la disposición de las bobinas se tienen dos posibilidades:
 - ◊ Rotor de polos salientes, donde los devanados se disponen en forma de arrollamientos concentrados en torno a los núcleos polares, que se encuentran repartidos de manera simétrica por el perímetro del rotor. Por lo tanto el entrehierro presenta un espesor no uniforme, haciendo que la reluctancia sea variable a lo largo del mismo.
 - ◊ Rotor de polos lisos, donde los devanados se sitúan en una serie de ranuras previamente mecanizadas en el rotor. Se suele usar más en aplicaciones de alta velocidad [8].

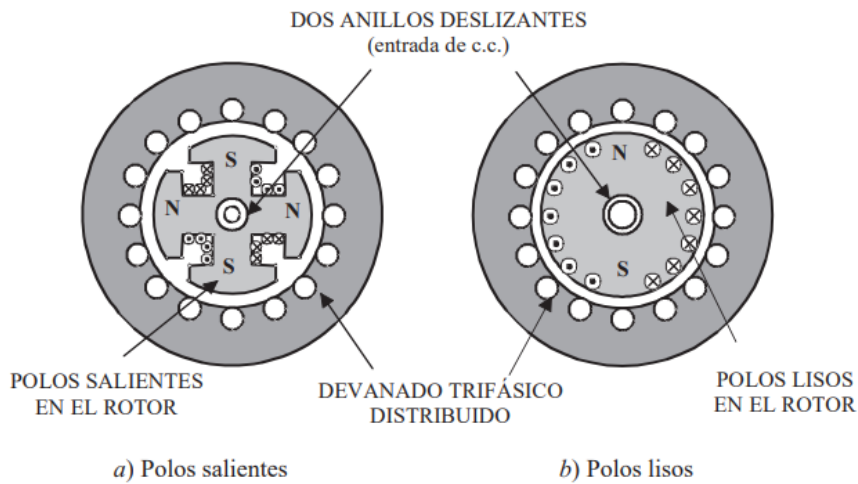


Figura 2.8: Motor síncrono de rotor bobinado.
Fuente: [6].

- Motor síncrono de imanes permanentes. En la Sección 2.3 se detallará más sobre este tipo de motores.

En cuanto al estator, este es idéntico al de los motores de inducción.

2.2.3. Motores híbridos

Son motores que combinan la energía de combustión con la eléctrica y hay tres tipos:

- Híbridos en serie.
- Híbridos en paralelo.
- Híbridos enchufables (PHEV, por sus siglas en inglés, Plug-in Hybrid Electric Vehicle).



Figura 2.9: Motor térmico.
Fuente: [10].

2.2.4. Motores hidráulicos

Un motor hidráulico es un dispositivo que convierte la energía de un fluido a presión en energía mecánica en forma de movimiento rotativo o lineal. Se basan en el principio de la hidráulica, donde un líquido incompresible, como el aceite hidráulico, transmite fuerza a través de un sistema cerrado.



Figura 2.10: Motor hidráulico.
Fuente: Elaboración propia.

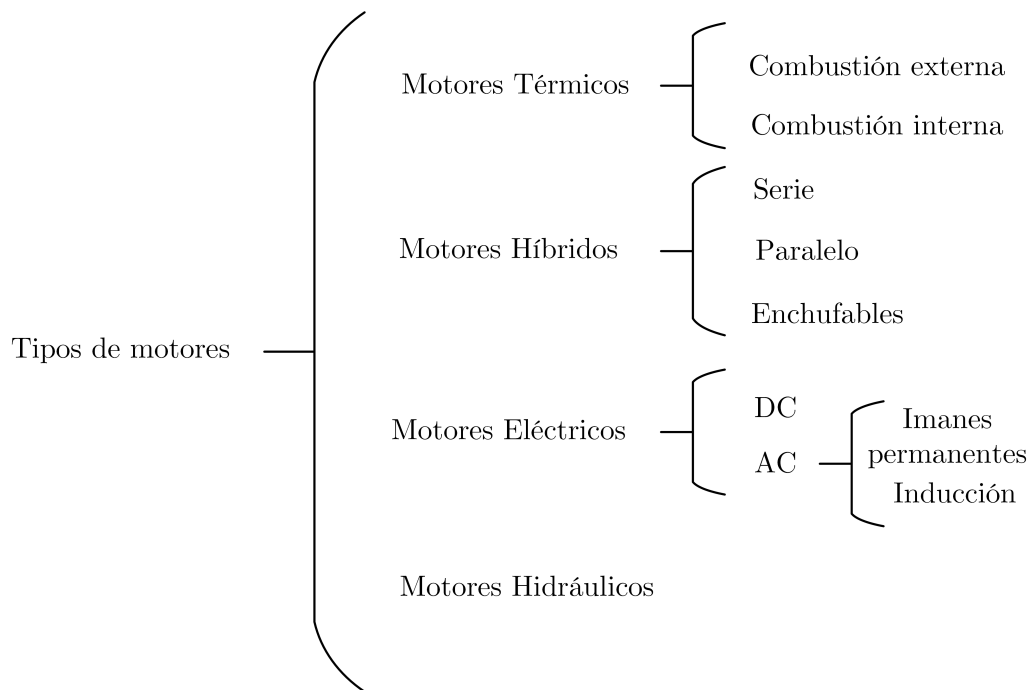


Figura 2.11: Diagrama resumen.
Fuente: Elaboración propia.

2.3. Motor síncrono de imanes permanentes

En esta sección se detallará un poco más sobre el PMSM puesto que es el motor con el que cuenta el banco de potencia.

Los PMSM generan su flujo magnético rotórico a través de imanes integrados en el rotor, fabricados comúnmente con materiales como ferrita o aleaciones de tierras raras, como neodimio-hierro-boro (NdFeB) y samario-cobalto (SmCo). La ausencia de devanados en el rotor permite una mayor densidad de potencia, reduciendo tanto el tamaño como el peso del motor. Sin embargo, el costo y la disponibilidad de estos imanes representan un desafío, además de su susceptibilidad a la desmagnetización con el tiempo, especialmente en condiciones de altas temperaturas o exposición a campos magnéticos intensos [8].

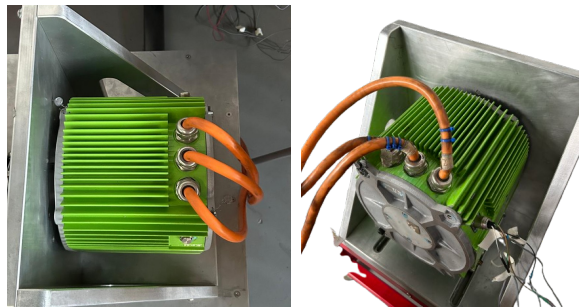


Figura 2.12: Motor Síncrono de Imanes Permanentes.
Fuente: Elaboración propia.

Según la ubicación de los imanes, el PMSM se clasifica en:

- Imanes montados en la superficie.

Los imanes se fijan a la superficie del rotor mediante adhesivos. Dado que su permeabilidad es similar a la de los materiales no ferrosos, el entrehierro entre el núcleo del rotor y el estator se mantiene uniformemente distribuido. La principal ventaja de este diseño es su simplicidad y bajo costo de fabricación. No obstante, los imanes están expuestos a las fuerzas centrífugas generadas por la rotación, lo que puede provocar su desprendimiento. Por esta razón, su aplicación se limita principalmente a sistemas de baja velocidad [8].

- Imanes insertados en el interior del rotor.

Los imanes se integran dentro del rotor, lo que mejora la robustez de la máquina al reducir el estrés mecánico sobre ellos. Además, este diseño incrementa el par del motor gracias al efecto del par de reluctancia, ya que la diferencia de permeabilidad magnética entre los materiales del rotor genera una saliencia

electromagnética. No obstante, la incorporación de estos rotores aumenta la complejidad de fabricación, lo que se traduce en un mayor costo [8].

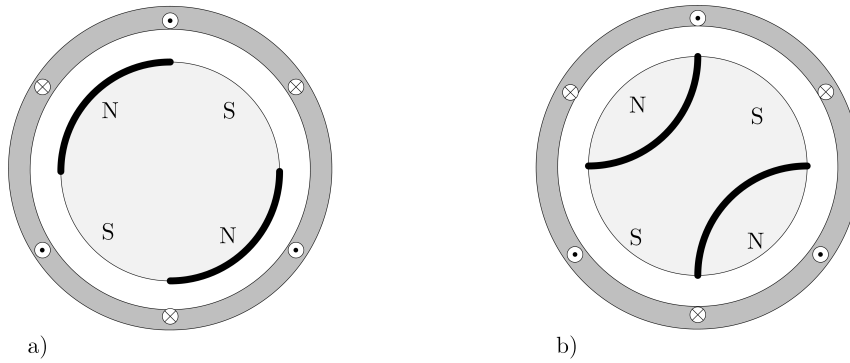


Figura 2.13: Tipos de rotor en motores síncronos de imanes permanentes: a) Imanes montados en la superficie y b) imanes insertados en el rotor.
Fuente: Elaboración propia.

En concreto, el motor eléctrico con el que cuenta el banco de potencia es el suministrado en la competición *MotoStudent* (MS1920) en el año 2019-2020 y con el que se compitió durante el 2020. Sus características principales aparecen en las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3.

Tipo	Síncrono de imanes permanentes
Peso	20 [kg]
Protección	IP65
Temperatura ambiente permitida	$(-20,45)^{\circ}\text{C}$
Momento de inercia del rotor	0.009 kg/m^2

Tabla 2.1: Características del motor. Fuente: [2].

Especificaciones	Nomenclatura	Valores	Unidades
Par	T_{nom}	22	Nm
Potencia	P_{nom}	13	kW
Revoluciones	n_{nom}	5720	rpm
Corriente de fase	I_{nom}	156	A
Voltaje de la batería	V_{nom}	96	V
Frecuencia	$f_{el,nom}$	381	Hz
Factor de potencia	$\cos(\phi)$	0.75	-

Tabla 2.2: Valores nominales del motor. Fuente: [2].

Especificaciones	Nomenclatura	Valores	Unidades
Par	T_{max}	95	Nm
Potencia	P_{max}	42	kW
Revoluciones	n_{max}	8000	rpm
Corriente de fase	I_{max}	781	A
Voltaje de la batería	V_{max}	200	V
Frecuencia	$f_{el,max}$	533	Hz

Tabla 2.3: Valores máximos del motor. Fuente: [2].

Capítulo 3

Análisis y fundamento teórico del control electrónico

Contenido

3.1	Análisis del freno electromagnético	39
3.2	Fundamento teórico del circuito electrónico	41
3.2.1	Rectificador de diodos y condensadores	41
3.2.2	Interruptores controlables	41
3.2.3	Circuito convertidor reductor	45
3.3	Circuito y resultados	52
3.3.1	Circuito electrónico propuesto	52
3.3.2	Resultados de la simulación en PSIM	54

3.1. Análisis del freno electromagnético

El freno electromagnético para el cual se pretende diseñar el control electrónico es el que aparece en la Figura 2.12. Como ya se ha comentado en el Capítulo 2, este se trata de un freno electromagnético cuyo principio de funcionamiento se basa en las corrientes de Foucault. El modelo de freno electromagnético con el que se cuenta pertenece al fabricante *Klam* y cuenta con las características que aparecen en la Tabla 3.1.



Figura 3.1: Freno de absorción electromagnética.
Fuente: Elaboración propia.

Tensión [V]	192
Resistencia por bobina [Ω] $\pm 5\%$ (20°C)	1.6
Resistencia [Ω] $\pm 5\%$ (20°C)	19.2
Consumo [A] $\pm 5\%$ (20°C)	10
Resistencia de aislamiento [$M\Omega$]	1

Tabla 3.1: Especificaciones eléctricas. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 3.1, es necesario alimentar el freno con una tensión DC que pueda variar entre 0 y 192 [V], sin embargo, la tensión de la red eléctrica es de 230 [V] en AC. Por lo tanto se requerirá de un circuito de electrónica de potencia que sea capaz de rectificar de AC a DC y que permita reducir y ajustar la tensión de salida entre 0 y 192 [V] DC. En la Figura 3.2 se muestra el circuito esquematizado en un diagrama de bloques.

Por lo tanto la solución propuesta es la siguiente:

- Para convertir la corriente alterna en corriente continua se empleará un rectificador monofásico no controlado de puente completo, comúnmente llamado puente rectificador de diodos.
- Para reducir la tensión a la salida del circuito se utilizará un circuito convertidor reductor tipo *buck*.

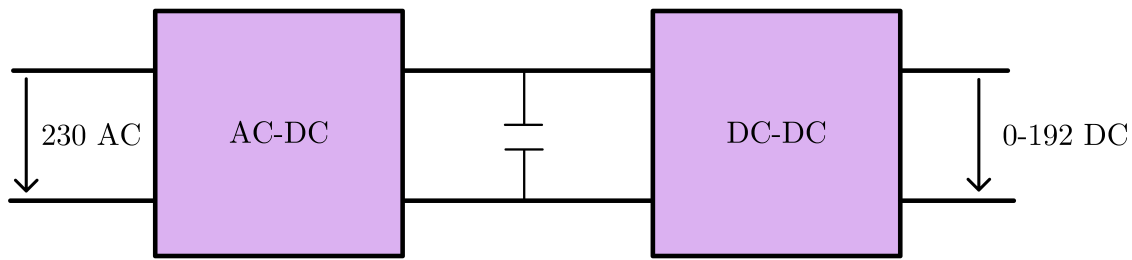


Figura 3.2: Diagrama de circuito a diseñar.
Fuente: Elaboración propia.

3.2. Fundamento teórico del circuito electrónico

3.2.1. Rectificador de diodos y condensadores

El primer elemento que aparece en el circuito es el rectificador monofásico no controlado de puente completo. Como ya se ha mencionado en 3.1, se encarga de transformar AC en DC mediante el uso de cuatro diodos dispuestos en forma de puente. En los rectificadores monofásicos en puente, los diodos conducen en pares opuestos de forma alterna en cada semiciclo de AC. Un diodo de la parte superior de una rama conduce simultáneamente con un diodo de la parte inferior de la rama opuesta [11].

El valor medio de la tensión de salida V_o , debido a la presencia de la inductancia de la fuente L_s , depende de la carga, es decir, de la intensidad I_o que circula por ella:

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_u^{\pi} V_s \sin(wt) d(wt) = \frac{V_s}{\pi} (1 + \cos(u)) = \frac{2V_s}{\pi} \left(1 - \frac{I_o L_s w}{V_s}\right) \quad (3.1)$$

Como en la conmutación los cuatro diodos se encuentran conduciendo, la caída de tensión en ellos es nula.

Con el objetivo de suavizar la corriente rectificadora se emplearán un total de cinco condensadores de $470\mu F$ conectados en paralelo. En el apartado 3.3 se verá en más detalle cómo se disponen los condensadores para suavizar la corriente.

3.2.2. Interruptores controlables

La electrónica de potencia se basa en el uso de dispositivos semiconductores que operan en modo de conmutación, es decir, funcionan como interruptores electrónicos que pueden estar en uno de dos estados: abiertos (bloqueando el paso de corriente) o

cerrados (permitiendo el paso de corriente sin restricción). No se contemplan estados intermedios, salvo durante el breve intervalo de tiempo en el que ocurre la transición entre ambos estados (conocido como período transitorio de conmutación). Los principales dispositivos utilizados en estos sistemas incluyen diodos y transistores de potencia, así como GTOs e IGBTs, todos ellos construidos a partir de materiales semiconductores [6].

Los transistores son dispositivos electrónicos fundamentales en el diseño de circuitos. Su función principal es la de amplificar señales o actuar como interruptores electrónicos. Existen varios tipos de transistores, y se clasifican principalmente en función de su estructura y forma de control.

- Transistor bipolar de unión BJT.

El transistor bipolar de unión (BJT, por sus siglas en inglés, Bipolar Junction Transistor) es un dispositivo de tres terminales compuesto por dos uniones PN formadas en un solo cristal semiconductor. Existen dos tipos de configuraciones del transistor bipolar, el NPN y el PNP. El transistor NPN (Figura 3.3-a) está compuesto por una región tipo P ubicada entre dos regiones tipo N, mientras que el transistor PNP (Figura 3.3-b) tiene una región tipo N entre dos regiones tipo P. Los tres terminales externos de estos transistores se denominan emisor, base y colector. Actualmente, casi todos los transistores son de silicio, y la configuración más común es la NPN. En los símbolos de los transistores, la flecha en el emisor indica la dirección real del flujo de cargas positivas en la región del emisor para cada tipo de transistor. En la Figura 3.3 también se muestran las direcciones reales de las intensidades en la base y el colector.

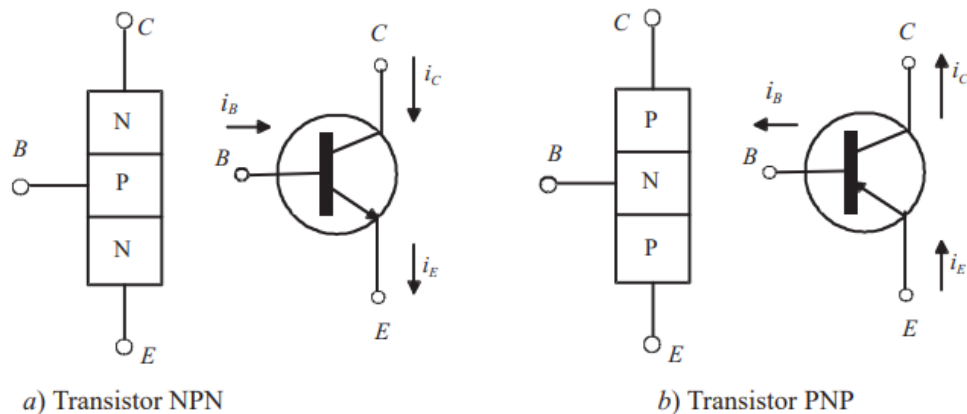


Figura 3.3: Tipos de transistores BJT.

Fuente: [6]

En electrónica de potencia, los transistores operan siempre en modo de conmutación, lo que significa que funcionan en las zonas de corte y saturación. En este modo, los terminales de colector y emisor se conectan al circuito principal, mientras que el terminal de base actúa como el electrodo de control. En la 3.4

se muestra un transistor de potencia utilizado en el control de motores, acompañado de las curvas características reales e ideales del dispositivo. Cuando la corriente de base es cero $i_B = 0$, el transistor se encuentra en corte o apagado (OFF), actuando como un interruptor abierto. Sin embargo, si se aplica una corriente suficiente a la base para llevar el transistor a la zona de saturación, el transistor comienza a conducir (estado ON) y actúa como un interruptor cerrado. En este estado, la tensión $v_{CE(sat)}$ es del orden de 1 o 2 V, lo que implica que las pérdidas por conducción en el BJT son relativamente bajas. Es importante señalar que el transistor es un dispositivo activo controlado por corriente, ya que la corriente en la base determina si el transistor está en estado abierto o cerrado. Para mantener el transistor en conducción, la corriente de base debe ser suficientemente grande, es decir, la corriente de base i_B debe ser superior a i_C/h_{FE} , donde i_C es la corriente de colector y h_{FE} es la ganancia de corriente en continua del transistor [6].

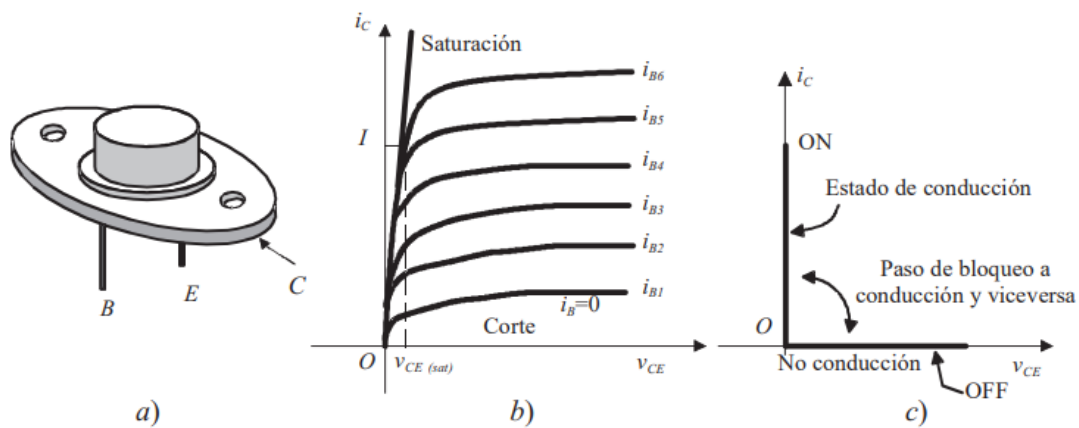


Figura 3.4: Transistor de potencia: Forma constructiva, curvas reales e ideales.
Fuente: [6]

- Transistor MOSFET.

El Transistor de Efecto de Campo de Semiconductor de Óxido Metálico (MOSFET, por sus siglas en inglés, Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) es un dispositivo que conmuta de forma muy rápida, lo que lo hace ideal para aplicaciones de alta frecuencia y baja potencia. En la Figura 3.5 se muestra el símbolo correspondiente y las curvas de comportamiento real e ideal.

El MOSFET tiene tres terminales: drenador (D), fuente (S) y puerta (G). La corriente fluye en la dirección drenador-fuente. Debido a su baja capacidad de bloqueo a la tensión inversa, el MOSFET lleva un diodo integrado en su interior en sentido inverso. A diferencia de un BJT, que es controlado por corriente, un MOSFET es un dispositivo controlado por tensión, generalmente alrededor de 5 V. Cuando se aplica una tensión positiva entre la puerta y la fuente, el transistor entra en conducción.

El MOSFET conmuta muy rápido y las pérdidas durante el proceso de conmutación son mínimas. Sin embargo, cuando el dispositivo está en estado de conducción, la caída de tensión es relativamente alta, lo que genera pérdidas por conducción. [6].

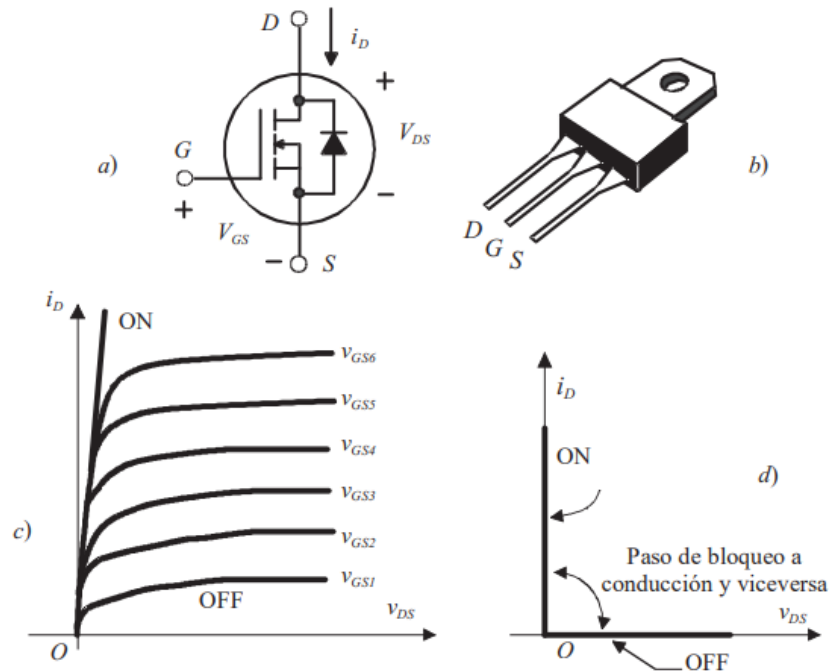


Figura 3.5: Transistor MOSFET: Símbolo, forma constructiva y curvas reales e ideales.

Fuente: [6]

- Transistor bipolar de puerta aislada

El transistor bipolar de puerta aislada (IGBT, por sus siglas en inglés, Insulated Gate Bipolar Transistor) es un dispositivo semiconductor de potencia híbrido, que combina las características de los transistores de unión BJT y de los MOSFET. Su puerta es de tipo MOSFET, lo que le otorga una alta impedancia de entrada. Al igual que el MOSFET, el IGBT se enciende o conduce por tensión, lo que lo hace fácil de controlar. Sin embargo, al igual que el BJT, el IGBT presenta una caída de tensión baja en el estado de conducción.

En términos de velocidad de conmutación, el IGBT tiene una velocidad menor que la del MOSFET, pero es comparable a la del BJT. El símbolo de este dispositivo y sus curvas características de funcionamiento se muestran en la Figura 3.6.

En el mercado, se encuentran IGBTs que pueden manejar hasta 2.000 V y 3.000 A, capacidades significativamente superiores a las de los transistores

BJT. Además, la frecuencia de conmutación de los IGBT se encuentra en el orden de 20 kHz [6].

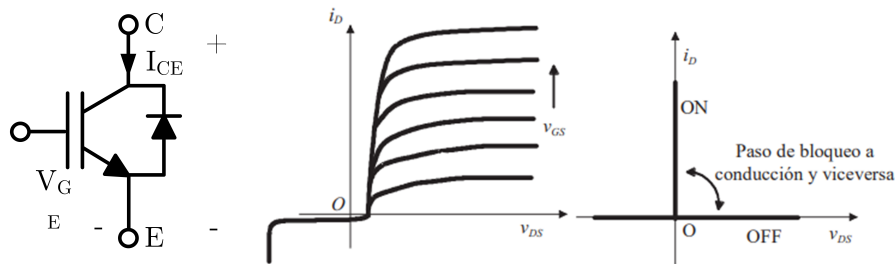


Figura 3.6: Transistor bipolar de puerta aislada IGBT: Símbolo, curvas reales e ideales.

Fuente: [6]

3.2.3. Circuito convertidor reductor

Los convertidores DC-DC, también conocidos como *choppers*, se utilizan en numerosas aplicaciones industriales, destacándose especialmente en fuentes de alimentación de corriente continua reguladas y en el control de motores de corriente continua.

La Figura 3.7 presenta un diagrama de bloques de un convertidor DC-DC. La entrada de estos convertidores suele ser una tensión continua no controlada, proveniente de un rectificador de diodos. Antes de ingresar al convertidor, esta tensión pasa por un filtro capacitivo, que reduce su impedancia interna y minimiza el rizado. Dentro del *chopper*, la tensión continua no regulada se transforma en una con el voltaje deseado.

A la salida del convertidor DC-DC, se incorpora un filtro paso bajo, considerado parte integral del sistema. La tensión resultante, ya regulada, se encarga de alimentar la carga [11].

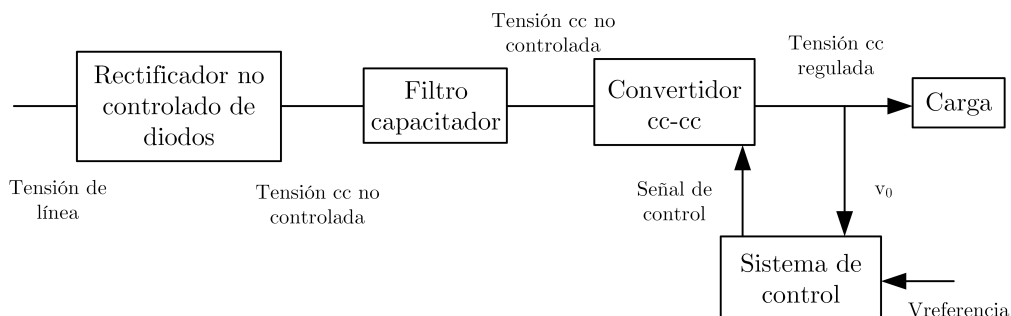


Figura 3.7: Diagrama de bloques de un convertidor cc-cc.

Fuente: Elaboración propia.

Un convertidor DC debe entregar a su salida una tensión continua con el valor deseado, sin verse afectado por posibles fluctuaciones en la tensión de entrada o la corriente.

Los convertidores DC utilizan uno o más interruptores para transformar un nivel de tensión continua en otro. La regulación de la tensión de salida se logra controlando el tiempo en que los interruptores permanecen en conducción (t_{on}) o en estado de corte (t_{off}) [11].

Para explicar el concepto descrito, se tiene la Figura 3.8-a que muestra un convertidor DC-DC básico.

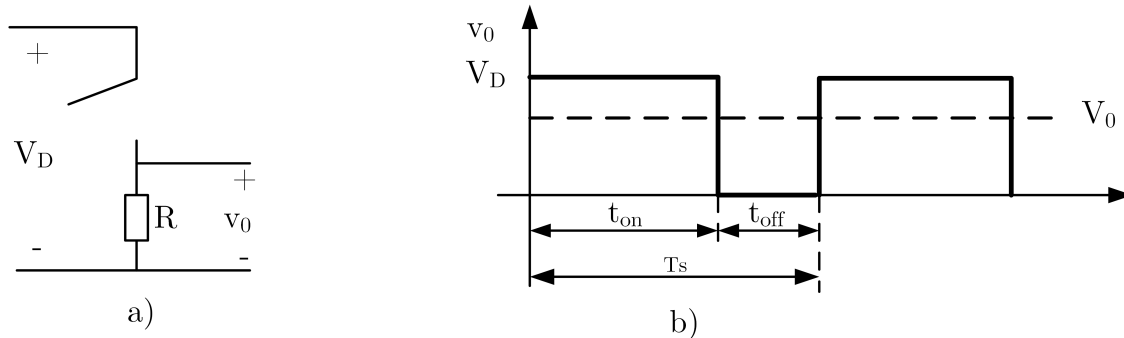


Figura 3.8: Convertidor cc-cc básico.

Fuente: Elaboración propia.

El valor medio V_0 de la tensión de salida v_0 de la Figura 3.8-b depende del tiempo en el que el interruptor esté cerrado o abierto, es decir, está en función de t_{on} y t_{off} .

$$V_0 = f(t_{on}, t_{off}) \quad (3.2)$$

y por lo tanto función del periodo de conmutación T_s

$$T_s = t_{on} + t_{off} \quad (3.3)$$

De este modo, se mantiene constante la frecuencia de conmutación, es decir, el periodo T_s , y regula el tiempo de conducción t_{on} del interruptor. Este método, conocido como modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés, Pulse Modulation Width), varía el factor de conducción D , definido como la fracción de tiempo en la que el interruptor permanece en conducción dentro de un período T_s determinado [11].

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (3.4)$$

La señal que regula la conmutación del interruptor se genera al comparar una señal denominada de control con una onda repetitiva, como se muestra en la Figura

3.9. Esta tensión de control depende, a su vez, de la tensión de referencia que se desea lograr en la salida y de la tensión real obtenida en ella.

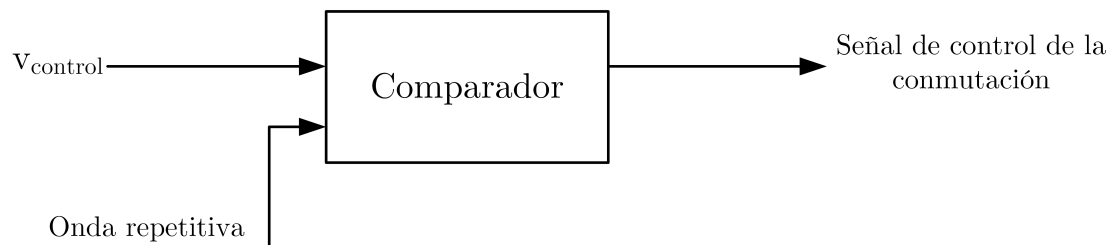


Figura 3.9: Conmutación por modulación por ancho de pulso.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del circuito que se va a implementar, las señales a comparar serán la del *shunt* y la consigna de entrada, que consiste en una señal sinusoidal que oscilará entre 0 y 3 [V] de pico a una frecuencia de 1[Hz]. Dicha señal pasa previamente a través de un seguidor de tensión con el que se pretende evitar la pérdida o distorsión de la señal y garantizar estabilidad e integridad en la medida. Seguidamente pasa a través de dos amplificadores inversores con los que se consigue modular la tensión final de la señal entre 0 y 100[mV]. El motivo de la frecuencia tan baja se debe a que si se realiza un ensayo variando la carga de frenada, esta ha de ser baja para que se pueda regular correctamente la tensión de salida.

Debido a un error a la hora de considerar la alimentación del amplificador operacional, se ha necesitado otra solución para conseguir modular la tensión final. En un principio el amplificador iba alimentado a $\pm 12[V]$, sin embargo, para simplificar y minimizar el diseño, se optó por alimentar el amplificador operacional a 12[V], provocando que la tensión no saliera negativa en el amplificador inversor y haciendo que el circuito no funcionara. La solución final ha consistido en hacer que la señal pase a través de un seguidor de tensión y posteriormente pase por un divisor de tensión que permita obtener la tensión deseada. Esta señal de tensión se comparará con la tensión del *shunt*, y la señal comparada se volverá a comparar con una tensión continua de 6 [V]. Finalmente, la salida del comparador será la encargada de controlar el interruptor IGBT.

En cuanto al tipo de interruptor controlable empleado(ver 3.2.2), se ha usado un transistor IGBT, debido a que es capaz de soportar tensiones mayores que el resto de transistores.

Como ya se ha comentado, se requerirá de un convertidor reductor, comúnmente llamado *buck*. Este produce una tensión media de salida menor que su tensión continua de entrada y emplea un filtro paso-bajo consistente en una bobina y un condensador para eliminar rizados.

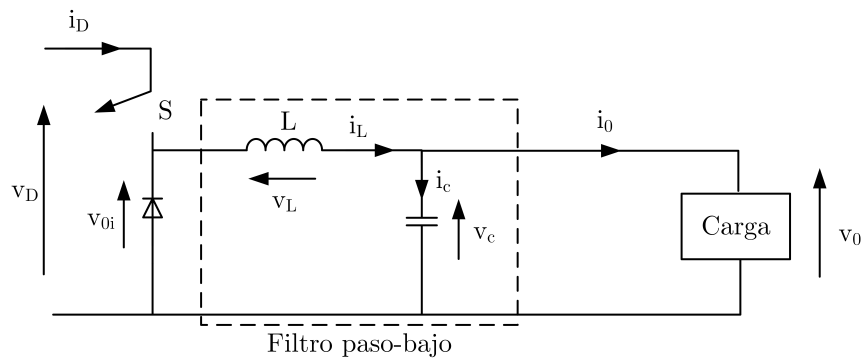


Figura 3.10: Topología tipo de convertidor *buck*.

Fuente: Elaboración propia.

Si la carga conectada al circuito es una bobina, la energía inductiva debería ser absorbida o disipada por el interruptor, lo que podría dañarlo. Para evitar este problema, se utiliza un diodo. Cuando el interruptor controlable S está cerrado, el diodo se encuentra polarizado en inversa, permitiendo que la energía suministrada por la fuente se reparta entre la bobina y la carga. En cambio, al abrirse el interruptor S , la corriente almacenada en la bobina fluye a través del diodo, lo que permite transferir parte de esa energía a la carga [11].

En el análisis de los convertidores reductores, se asumirá que el condensador del filtro tiene un valor lo suficientemente alto como para que la tensión de salida v_0 se mantenga prácticamente constante, con un valor cercano a V_0 . Más adelante se determinará el valor del rizado presente en dicha tensión de salida. Además, la corriente media en la bobina I_L será igual a la corriente media de salida I_0 , ya que la corriente media que circula por el condensador es nula [11].

Según la conducción en la bobina, los circuitos *bucks* se dividen en:

- Modo de conducción continua.

En el modo de conducción continua (CCM, por sus siglas en inglés, Continuous Conduction Mode) de un convertidor reductor *buck*, la corriente que circula por la bobina nunca llega a ser nula durante el ciclo de conmutación. Es decir, el inductor mantiene siempre una cierta cantidad de energía almacenada, ya sea mientras el interruptor está cerrado en la fase de conducción, o abierto en la fase de transferencia a través del diodo.

Este modo de operación se presenta normalmente cuando la carga conectada al convertidor es elevada, la frecuencia de conmutación es alta o se utiliza una inductancia de valor suficientemente grande. Bajo estas condiciones, el convertidor funciona de manera más eficiente y con un rizado de corriente significativamente menor.

Una de las principales ventajas del modo continuo es la estabilidad en la tensión de salida, que se mantiene prácticamente constante. En este régimen, la

relación entre la tensión de salida y la tensión de entrada depende directamente del ciclo de trabajo D , cumpliendo la expresión:

$$V_0 = D * V_D \quad (3.5)$$

Gracias a estas características, el análisis del funcionamiento del convertidor en CCM resulta más sencillo, ya que las ecuaciones que lo describen son lineales y más predecibles. Este modo es ideal para aplicaciones que requieren una salida regulada y un rendimiento eficiente en condiciones de carga moderada a alta tal y como se precisa en el control electrónico del freno electromagnético.

- Modo de conducción discontinua.

En el modo de conducción continua (DCM, por sus siglas en inglés, Discontinuous Conduction Mode) de un convertidor reductor *buck*, la corriente en la bobina cae a cero durante una parte del ciclo de conmutación. Esto significa que el inductor se descarga completamente antes de que comience un nuevo ciclo, interrumpiéndose temporalmente el flujo de energía desde el inductor hacia la carga.

Este tipo de conducción suele darse cuando la carga es ligera, la inductancia es pequeña o el ciclo de trabajo es bajo. A diferencia del CCM, en DCM la energía almacenada en la bobina durante el tiempo en que el interruptor está cerrado no es suficiente para mantener la corriente durante todo el periodo de conmutación.

Una característica importante del DCM es que la relación entre la tensión de salida y la de entrada ya no depende linealmente del ciclo de trabajo, sino que también intervienen otros factores como la inductancia, la frecuencia de conmutación y la carga, como se ve en 3.6.

$$\frac{V_0}{V_D} = \frac{D^2}{D^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{I_0}{I_{LB,max}} \right)} \quad (3.6)$$

Aunque en este modo aumenta el rizado de corriente y la tensión de salida puede ser menos estable, el DCM puede ser ventajoso en condiciones de baja carga, ya que reduce las pérdidas por conmutación y puede simplificar ciertos aspectos del control.

En resumen, el DCM es más común en aplicaciones de baja potencia y exige un análisis más detallado para garantizar una regulación adecuada de la salida.

- Límite entre los modos de conducción continua y discontinua.

El modo de conducción límite, también llamado modo crítico (BCM, por sus siglas en inglés, Boundary Conduction Mode), es la condición exacta en la que el convertidor *buck* cambia de operar en CCM a DCM. En este punto, la corriente en la bobina llega justo a cero al final del ciclo de conmutación, sin que exista un intervalo de tiempo en el que permanezca en cero.

Su análisis es especialmente útil para determinar la carga mínima que permite mantener la conducción continua. A esta carga se le conoce como carga crítica. Si la carga disminuye por debajo de ese umbral, el convertidor entra en DCM. Matemáticamente, la condición de conducción límite se puede calcular igualando la corriente mínima del inductor a cero y resolviendo la expresión correspondiente para obtener el valor de la carga o la corriente media que produce esta transición.

Este modo tiene aplicaciones prácticas, por ejemplo en convertidores que funcionan con control por frecuencia variable, ya que permite aprovechar algunas ventajas de ambos modos: eficiencia a baja carga y una respuesta más rápida a variaciones de carga o tensión de entrada.

Supóngase el esquema de la Figura 3.10 que muestra la topología de un convertidor reductor *buck* convencional. El rizado de la tensión de salida V_0 se determina a partir de las formas de onda que genera el circuito cuando opera en modo de conducción continua, las cuales se muestran en la Figura 3.11. Para este análisis, se asume que la componente de rizado en la bobina i_L circula a través del condensador, mientras que el valor medio de i_L ($I_L = I_0$) lo hace a través de la carga.

Del circuito se deduce que:

$$i_c = i_L - i_0 = i_L - I_0 \quad (3.7)$$

De esta manera, si $i_L < I_0$, lo cual sucede durante $t = T_s/2$, la intensidad i_c es negativa, es decir, el condensador se descarga respecto a la tensión media V_0 . Por otro lado, si $i_L > I_0$, la intensidad i_c tiene signo positivo, por lo que el condensador se carga durante lo que queda de semiperiodo. El área coloreada en la Figura 3.11 muestra este incremento de carga ΔQ . Así el rizado de la tensión de salida ΔV_0 se calcula como:

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{T_s}{2} \frac{\Delta I_L}{2} \quad (3.8)$$

El rizado de la corriente a través de la bobina ΔI_L resulta de resolver la siguiente integral durante el intervalo de tiempo t_{off} :

$$\int_{i_L(t=DT_s)}^{i_L(t=T_s)} di_L = \frac{1}{L} \int_{DT_s}^{T_s} v_L dt \quad (3.9)$$

De esta forma, según la Figura 3.11:

$$\Delta I_L = -\frac{V_0}{L}(1 - D)T_s \quad (3.10)$$

que, aunque resulta de signo negativo al disminuir la intensidad durante T_{off} , se considerará su valor absoluto al sustituirla en la Ecuación 3.8.

$$\Delta V_0 = \frac{T_s^2 V_0}{8LC}(1 - D) \quad (3.11)$$

Teniendo en cuenta además que la frecuencia de corte f_c del filtro paso-bajo inmerso en el convertidor vale

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.12)$$

la expresión 3.11 queda como:

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{\pi^2}{2} (1 - D) \left(\frac{f_c}{f_s}\right)^2 \quad (3.13)$$

La Ecuación 3.13 indica que el rizado de la tensión puede reducirse significativamente si se selecciona una frecuencia de corte f_c del filtro paso bajo considerablemente menor que la frecuencia de conmutación f_s . Además, cuando el convertidor opera en modo de conducción continua, el rizado en la tensión de salida no depende de la carga. Un análisis equivalente puede realizarse en el caso de funcionamiento en modo de conducción discontinua [11].

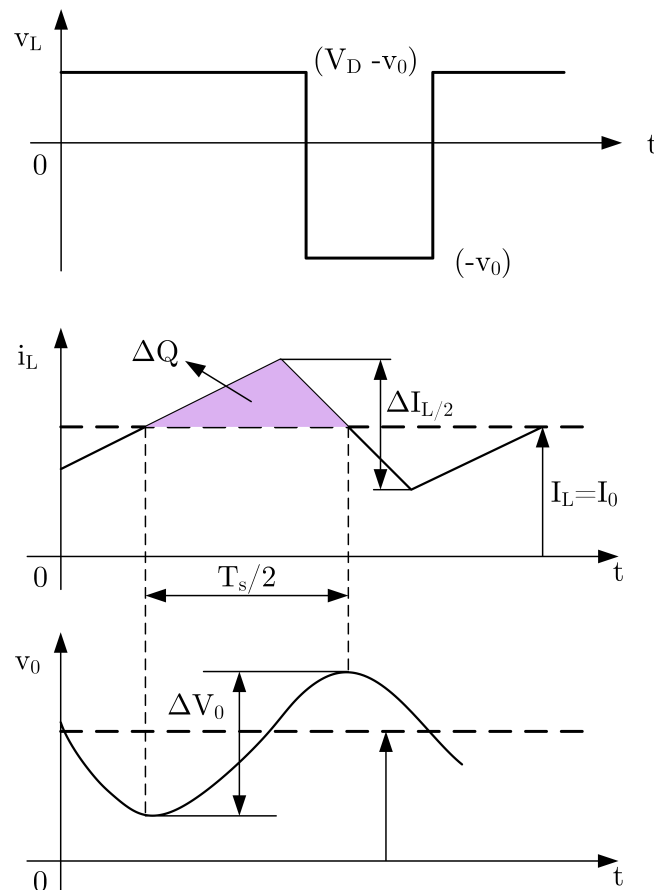


Figura 3.11: Rizado de la tensión de salida en un convertidor reductor.

Fuente: Elaboración propia.

En el convertidor reductor, el filtro paso-bajo estará formado por una bobina de $9[mH]$ y dos condensadores en paralelo de $470[\mu F]$. Tanto los elementos del filtro

paso-bajo como el resto de componentes serán detallados y justificados en la Sección 4.1.

3.3. Circuito y resultados

3.3.1. Circuito electrónico propuesto

Una vez llevado a cabo el análisis y realizados los cálculos de los elementos del circuito se lleva a cabo su implementación en el software *PSIM*¹ tal y como se ve en la Figura 3.12.

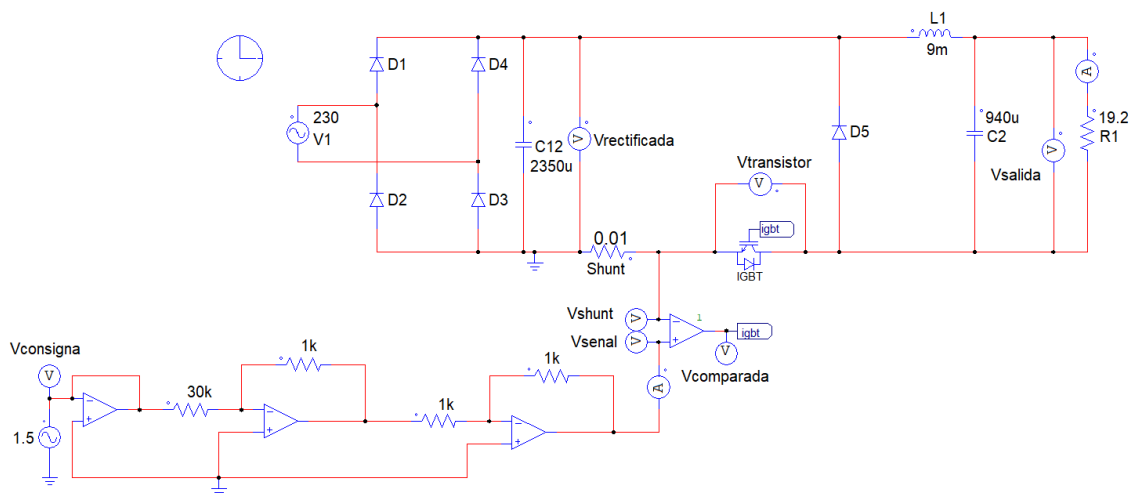


Figura 3.12: Circuito propuesto inicialmente.

Fuente: Elaboración propia.

Como ya se ha comentado en la Sección 3.2.3, se ha rediseñado el circuito propuesto inicialmente, siendo el de la Figura 3.13 el que se llevará a la práctica.

Se ha implementado el circuito analizado en la sección 3.2 y el cual cuenta con las siguientes partes diferenciadas:

- Rectificador de diodos a la entrada, junto a los condensadores que se encargan de suavizar la tensión rectificada.
- Circuito reductor *buck*, encargado de reducir y controlar la tensión de salida.
- Consigna de entrada, explicada en la sección 3.2.3.

¹*PSIM* es un programa de simulación de circuitos electrónicos. Es ideal para la simular el funcionamiento de un motor con control digital, o simular la conversión de energía renovable, etc. [12]

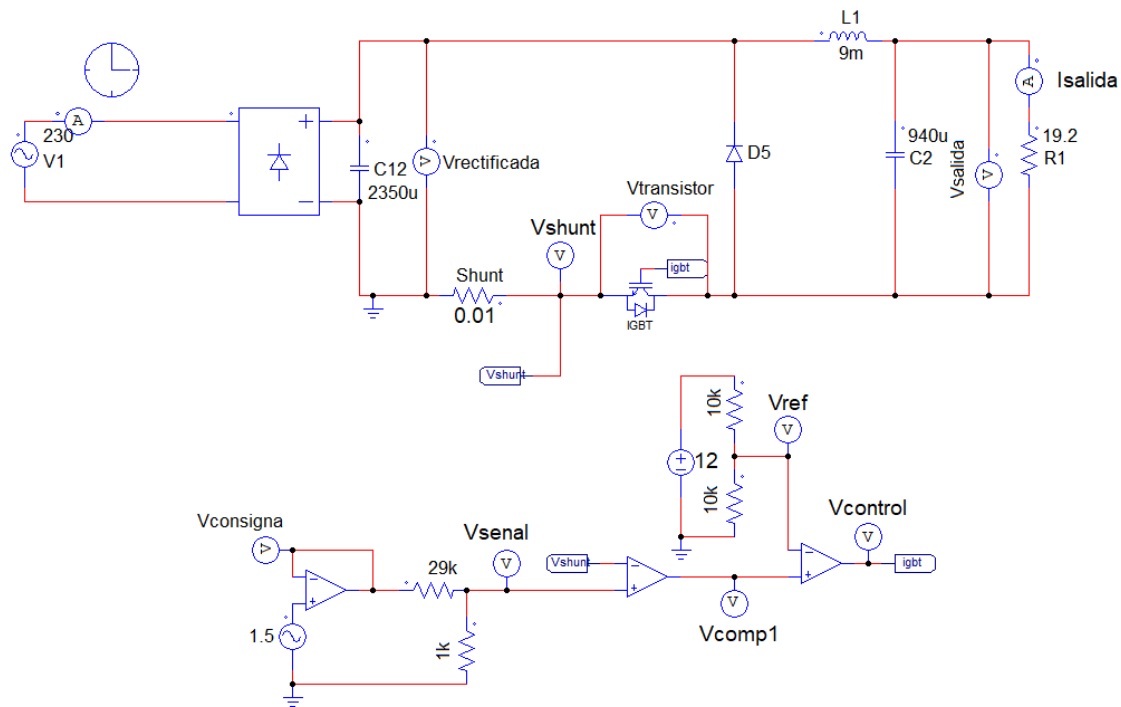


Figura 3.13: Circuito definitivo.
Fuente: Elaboración propia.

En el circuito presentado en la Figura 3.13, el IGBT se encuentra ubicado en la rama baja del reductor *buck*, entre el nodo del inductor y masa. Esta configuración resulta adecuada y funcional por varias razones.

Al colocar el IGBT en la rama inferior, se simplifica el circuito de control, ya que el disparo del dispositivo puede hacerse directamente con referencia a masa, sin necesidad de un *driver* flotante o de alto voltaje, como ocurriría si el interruptor estuviera en la rama superior.

Otro punto clave es la incorporación del diodo "D5", el cual permite la circulación de corriente del inductor cuando el IGBT se apaga. Esto es necesario porque el IGBT no puede conducir en sentido inverso. Este diodo asegura el correcto funcionamiento del convertidor y la continuidad de la corriente inductiva.

Finalmente, dado que este tipo de convertidor no requiere frecuencias de conmutación excesivamente altas, el IGBT es completamente viable, ya que sus pérdidas por conmutación no afectan significativamente el rendimiento general del sistema.

El IGBT funcionaría en la rama alta pero implicaría mayor complejidad de control, mayor costo y dificultad de protección y mayor riesgo de fallos si no se controla con precisión.

3.3.2. Resultados de la simulación en PSIM

A continuación se analizan los valores de las tensiones y corrientes del circuito en función de la consigna de entrada que se de.

Señal continua de 3[V]

Esta simulación se ha realizado dando una consigna de entrada de 3[V] continua. Como se observa en la Figura 3.14, la intensidad de salida es de 10 [A], la máxima que puede consumir la carga. Tarda un pequeño periodo de tiempo en hacerse estable y se comprueba que prácticamente no aparece rizado en la señal. De igual manera, la Figura 3.15 muestra la tensión de la carga, la cual es de 192 [V]. La tensión también tarda un pequeño periodo de tiempo en estabilizarse y apenas tiene rizado en la señal.

En las Figuras 3.16 y 3.17 se muestran el seguimiento del shunt a la señal de entrada ya amplificada y el resultado de la comparación de ambas señales. Se comprueba que la tensión del shunt es un poco inferior a la de la señal de 100 [mV], luego la señal de control que le llegará al transistor hará que este se encuentre siempre abierto.

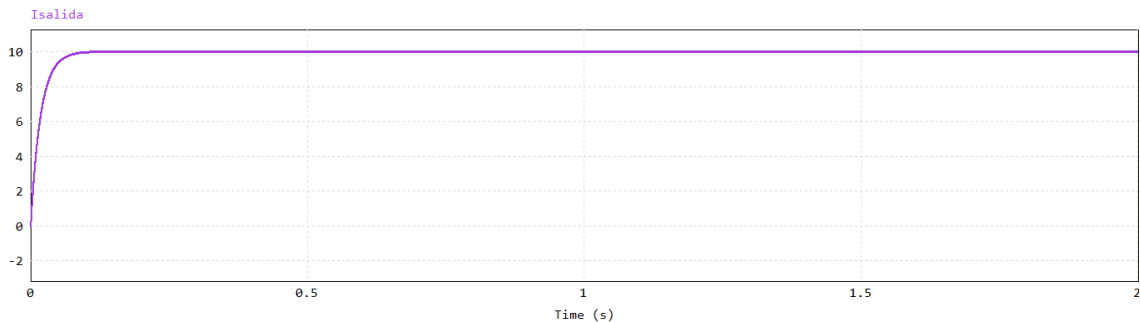


Figura 3.14: Corriente de la carga con una señal continua de 3 [V].
Fuente: Elaboración propia.

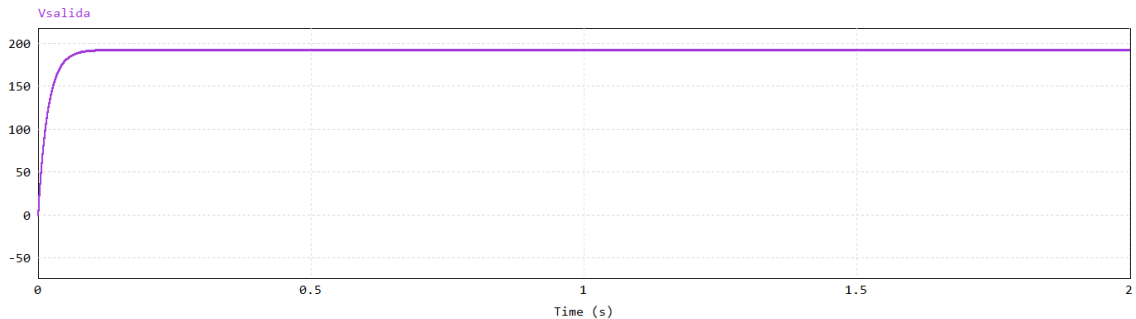


Figura 3.15: Tensión de la carga con una señal continua de 3 [V].
Fuente: Elaboración propia.

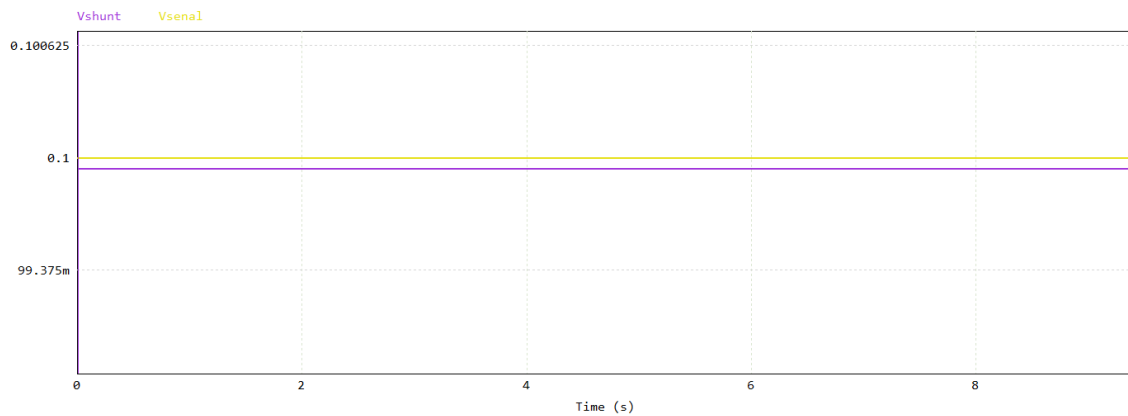


Figura 3.16: Señal del shunt frente a la consigna de entrada de 3 [V].

Fuente: Elaboración propia.

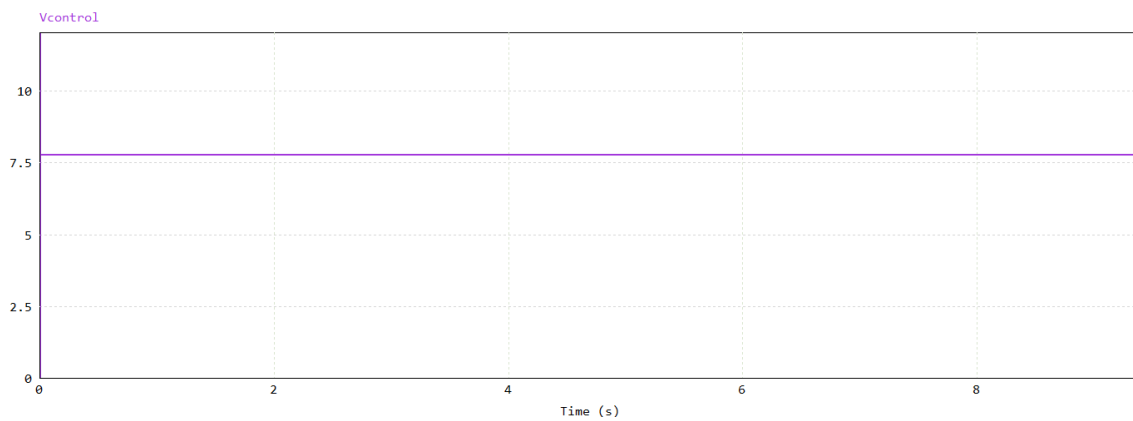


Figura 3.17: Señal de control.

Fuente: Elaboración propia.

Señal continua de 1.5[V]

Esta simulación guarda mucha similitud a la primera que se ha realizado. En este caso, la consigna de entrada es una señal continua de 1.5[V]. Como se ve en las Figuras 3.18 y 3.19, la intensidad promedio será de 5 [A] y la tensión promedio ronda los 96 [V].

De igual manera, las Figuras 3.20 y 3.21 muestran el seguimiento del shunt a la señal de entrada y la salida de la señal comparada.

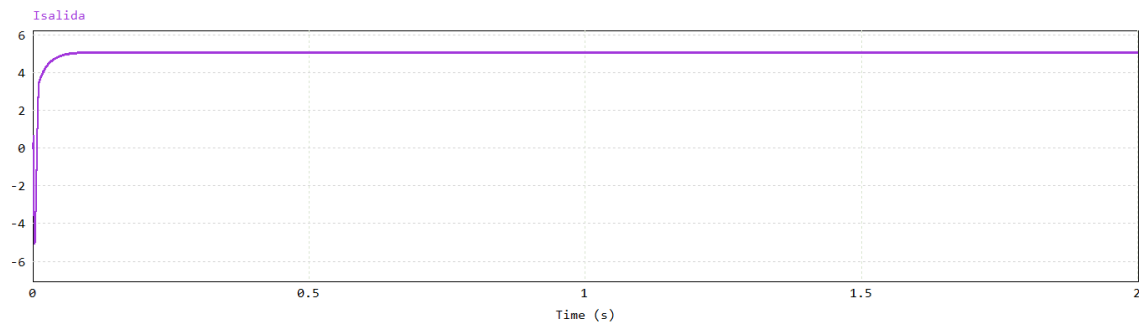


Figura 3.18: Corriente de la carga con una señal continua de 1.5 [V].
Fuente: Elaboración propia.

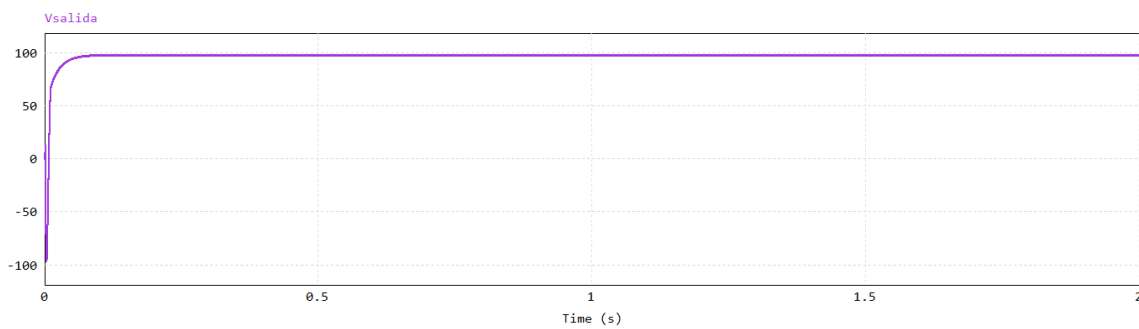


Figura 3.19: Tensión de la carga con una señal continua de 1.5 [V].
Fuente: Elaboración propia.

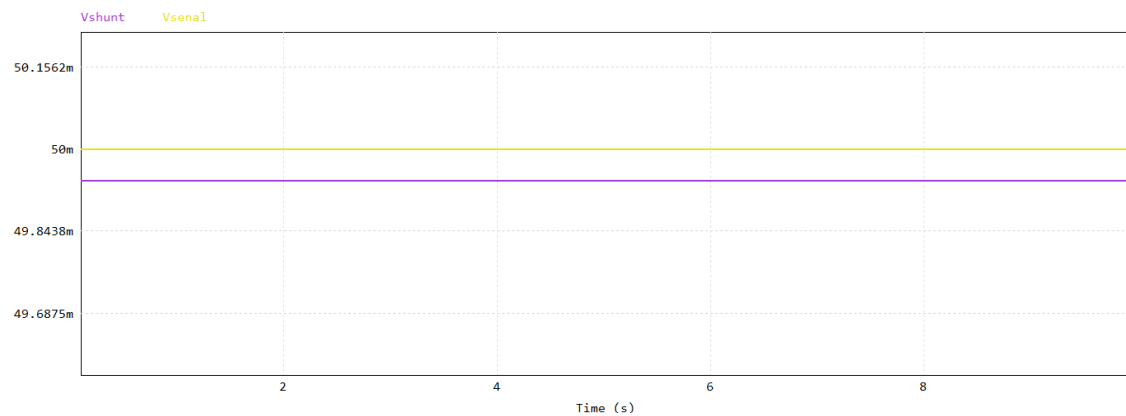


Figura 3.20: Señal del shunt frente a la consigna de entrada de 1.5 [V].
Fuente: Elaboración propia.

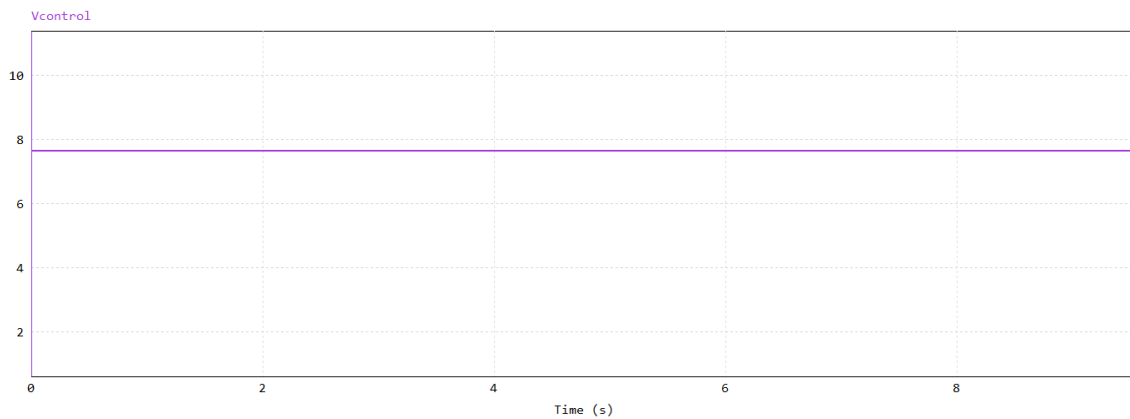


Figura 3.21: Señal de control.
Fuente: Elaboración propia.

Señal sinusoidal de 1.5[V]

Por último, esta simulación es un símil de la segunda, solo que en esta ocasión, la señal sinusoidal es de 1.5[V] de amplitud, conservando la frecuencia de 1[Hz]. Como se ve en las Figuras 3.22 y 3.23, tanto la intensidad como la tensión de la carga se encuentran oscilando entre sus valores máximos y cero.

En el caso de las Figuras 3.24 y 3.25, se observa como el *shunt* sigue perfectamente la señal y como la señal comparada varía según la tensión de la señal. En este caso, también se adjunta en la Figura 3.24 el seguimiento del *shunt* a la señal de consigna. De esta forma se puede comprobar como no hay desfase entre la consigna que se le da al circuito y la actuación de este.

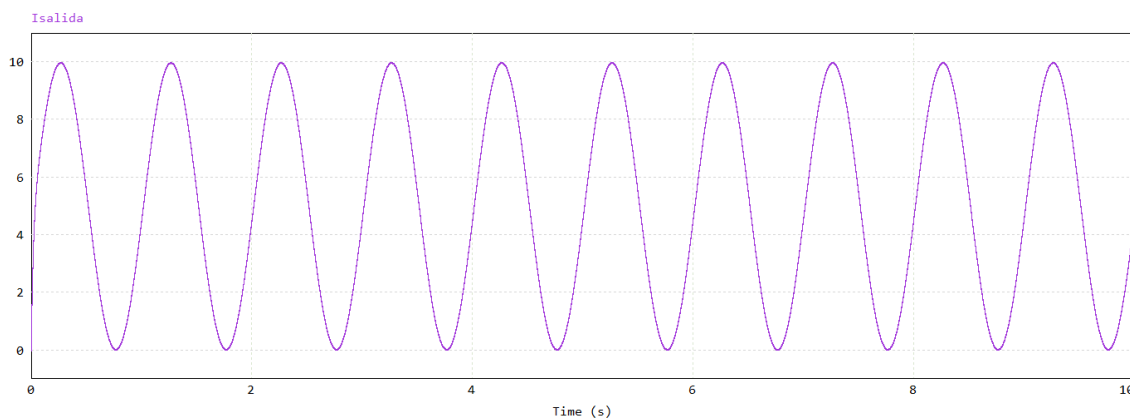


Figura 3.22: Corriente de la carga con una señal sinusoidal de 1.5 [V] de amplitud.
Fuente: Elaboración propia.

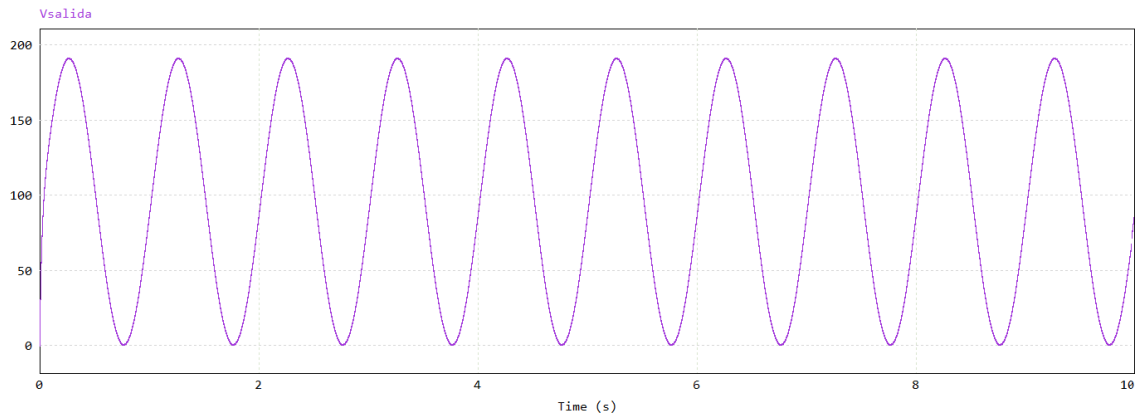


Figura 3.23: Tensión de la carga con una señal sinusoidal de 1.5 [V] de amplitud.
Fuente: Elaboración propia.

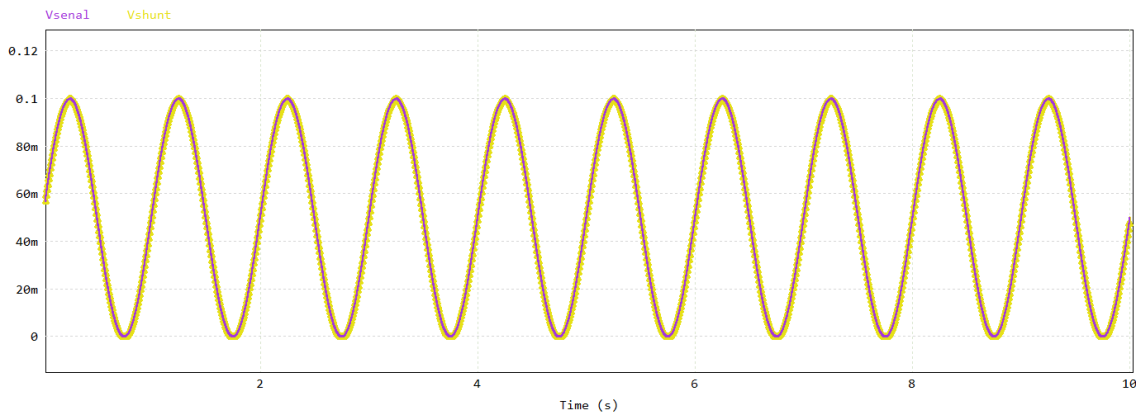


Figura 3.24: Señal del shunt frente a la consigna de entrada sinusoidal de 1.5 [V] de amplitud.
Fuente: Elaboración propia.

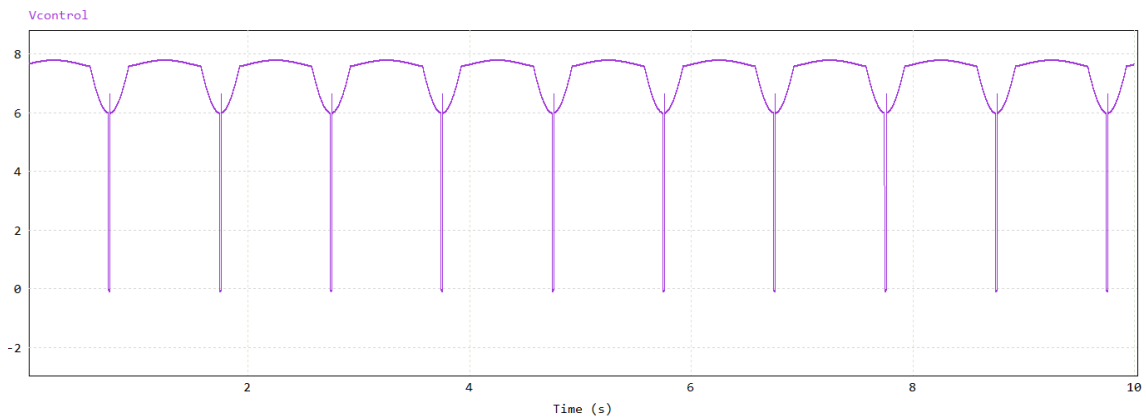


Figura 3.25: Señal de control.
Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 4

Diseño y montaje PCB en EasyEDA

Contenido

4.1	Realización del circuito en EasyEDA	59
4.1.1	Elección y justificación de los componentes	59
4.1.2	Esquemático del circuito	62
4.2	Diseño de la PCB	65
4.3	Diseño de la carcasa en SolidWorks	68

4.1. Realización del circuito en EasyEDA

Una vez realizado y comprobado el funcionamiento del circuito en *PSIM* se procede al diseño de la placa PCB que se implementará en la realidad y que será la encargada de controlar el frenado electromagnético en el banco de potencia. Para ello se utilizará el *software EasyEDA*.¹

4.1.1. Elección y justificación de los componentes





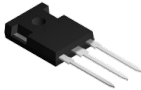
El primer paso en el diseño de la placa PCB será crear el circuito de forma esquemática para posteriormente imprimirlo en la placa. El circuito diseñado en *PSIM* se llevará a cabo en *EasyEDA*, solo que teniendo en cuenta algunas consideraciones extras:

- Conector AC para alimentar la placa.

¹EasyEDA es una herramienta de automatización de diseño electrónico (EDA) basada en la web que permite a ingenieros, educadores, estudiantes y entusiastas de la electrónica diseñar, simular y compartir esquemas de circuitos y diseños de placas de circuito impreso (PCB) directamente desde un navegador, sin necesidad de instalar software adicional [13].

- Portafusibles para proteger el circuito.
- Circuito de precarga con el que se evitará que la alta demanda de corriente al conectar la placa a la red haga que salten las protecciones del cuadro eléctrico.
- Terminales de conexión para introducir la consigna y sacar la alimentación del freno electromagnético.
- Una serie de amplificadores operacionales con los que se harán el seguidor de tensión y los comparadores.
- Convertidor AC/DC para alimentar los amplificadores operacionales.

Para la selección de los elementos, debido a que el presente proyecto se trata de una implementación, se han considerado los disponibles en los catálogos *online* con los que se han contado [14] [15]. A partir de la disponibilidad de los componentes se han seleccionado aquellos que han permitido sacar el mejor resultado posible en el circuito presentado. En la Tabla 4.1 se encuentra la lista de elementos usados en el circuito:

Componente	Imagen	Datasheet	Precio (€)	Cantidad
Conector AC		[16]	4.66	1
Portafusibles		[17]	1.78	2
Puente rectificador de diodos		[18]	4.54	1
Shunt		[19]	0.03	1
IGBT		[20]	4.64	1

Condensador		[21]	4.61	7
Bobina		[22]	18,86	1
Diodo		[23]	3.18	1
Amplificador operacional AD820		[24]	1.76	3
Resistencia $1k\Omega$		[25]	0.08	1
Resistencia $10k\Omega$		[26]	0.06	2
Resistencia $30k\Omega$		[27]	0.11	1
Convertidor AC-DC		[28]	2.56	1
Limitador de corriente		[29]	3,35	1
Terminal		[30]	0.48	2

Tabla 4.1: Componentes usados en el circuito. Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Esquemático del circuito

Una vez justificados y seleccionados los componentes del circuito electrónico se lleva a cabo en EasyEDA, siendo el circuito de la Figura 4.1 el propuesto en primer lugar y el de la Figura 4.2 el definitivo, habiendo resuelto el problema de alimentación del amplificador operacional comentado en la Sección 3.2.3.

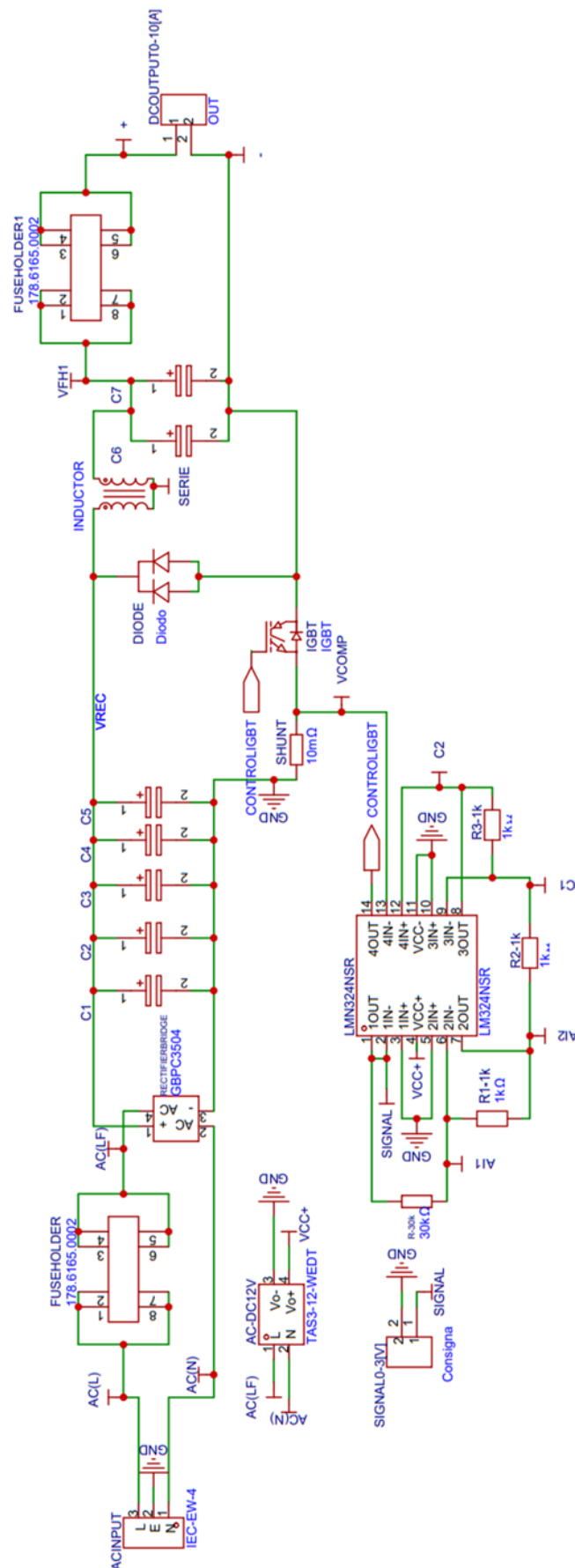


Figura 4.1: Circuito propuesto inicialmente.
Fuente: Elaboración propia

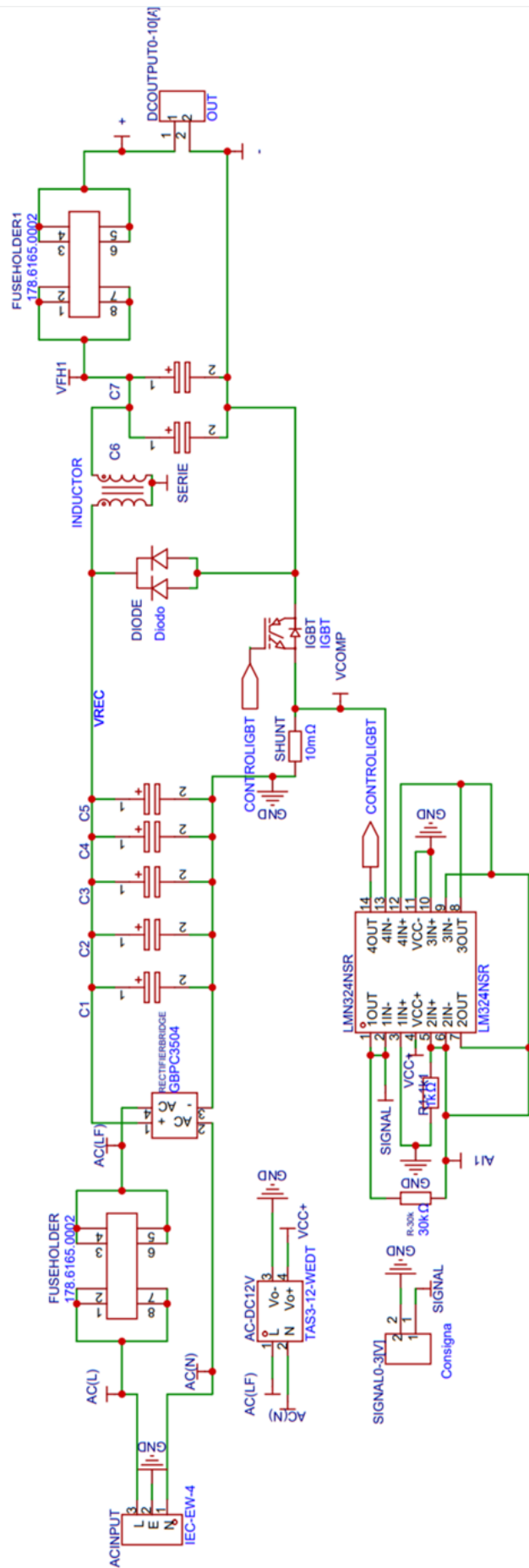


Figura 4.2: Circuito definitivo.

Fuente: Elaboración propia

4.2. Diseño de la PCB

Una vez definido completamente tanto el circuito como los componentes que se van a emplear, se procede a la realización de la placa PCB. Para ello, en el mismo *software* se crea un nuevo entorno para crear la PCB y se importa el esquemático previamente justificado.

Con los componentes importados al entorno de diseño de la PCB, será necesario crear la superficie de la placa y las capas por la que estará formada. Constará de cuatro capas en total:

- *Top Layer*. Esta capa se utilizará para realizar las conexiones entre los componentes del circuito.
- *GND*. En esta capa irá colocada la referencia a tierra de la placa.
- *Electric Supply*. Será la encargada de suministrar la energía eléctrica a la PCB.
- *Bottom Layer*. Se empleará para la conexión de componentes también.

Definidas las capas se procede a la conexión de los elementos. Estas conexiones se realizan mediante pistas o *paths*, y puesto que por ellas circulará corriente, será necesario que estas cuenten con una determinada anchura para que no haya ningún sobrecalentamiento ni deterioro en ninguna pista. Se tendrá este aspecto en cuenta sobre todo en la rama de entrada y paralelo de los condensadores, donde circularán altas corrientes.

Se ha procurado además diseñar las pistas de forma que no haya ningún ángulo recto debido a varias razones técnicas. Los ángulos de 90°C pueden generar interferencias en señales de alta frecuencia, al provocar reflexiones y alteraciones en la impedancia. Además, tienden a concentrar corriente en la esquina interna, lo que incrementa el riesgo de sobrecalentamiento. Desde el punto de vista de fabricación, estas esquinas agudas dificultan el proceso de grabado químico, provocando errores como el sobregabado o la acumulación de ácido (*acid traps*), que pueden dañar las pistas. Por ello, se utilizan ángulos de 45°C o curvas suaves para garantizar un rendimiento eléctrico óptimo y una mayor confiabilidad del circuito.

Teniendo en cuenta todas las consideraciones postuladas se presentan las capas y las pistas de la PCB definitiva en las siguientes Figuras.

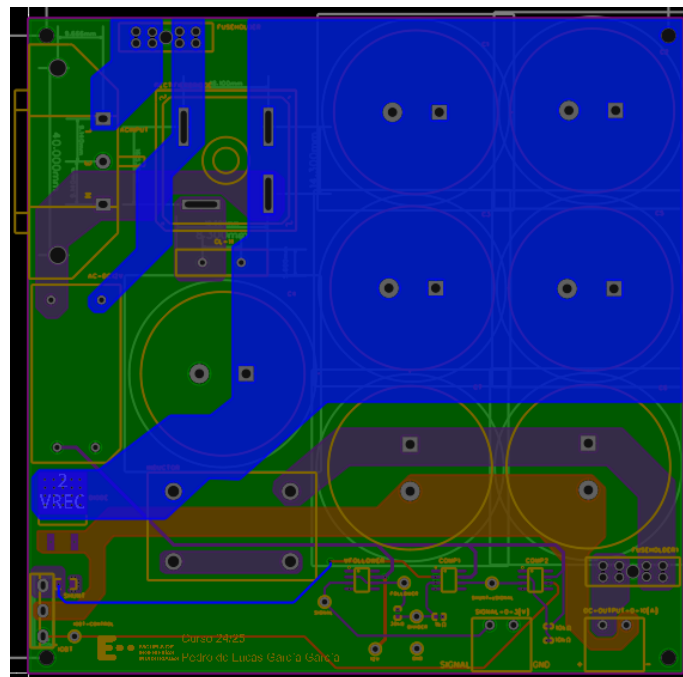


Figura 4.5: *Electric Supply*.
Fuente: Elaboración propia

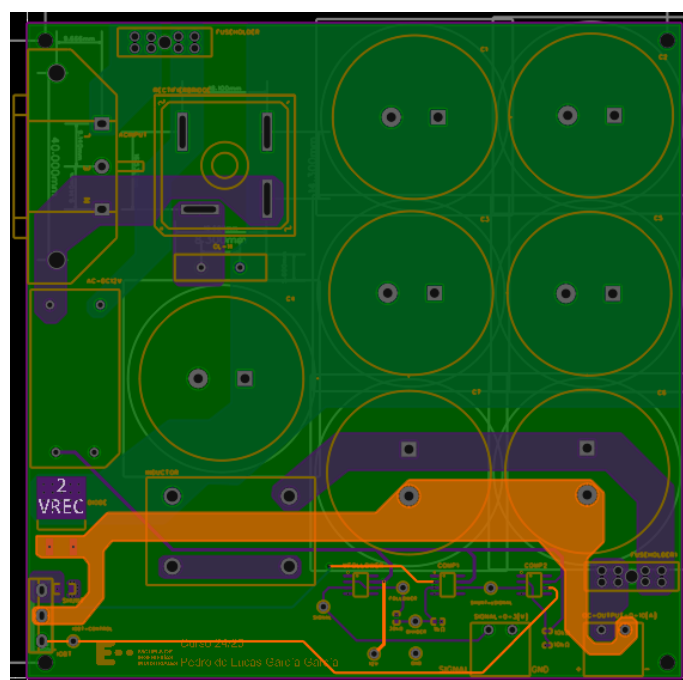


Figura 4.6: *Bottom Layer*.
Fuente: Elaboración propia

Finalmente se presenta el diseño final de la PCB, con unas dimensiones de 140×140 [mm], y con unos agujeros pasantes de 3 [mm] en cada una de sus esquinas. En la Figura 4.7 se presenta el diseño 3D previo a su pedido.

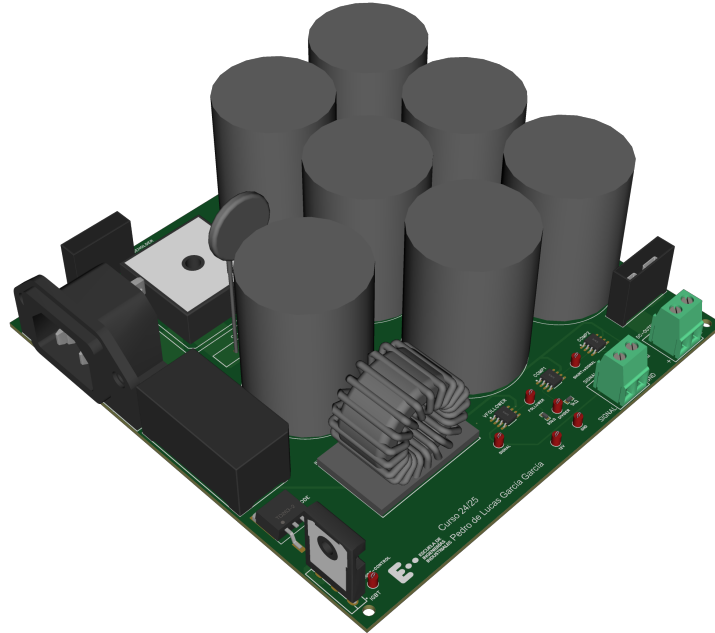


Figura 4.7: Diseño 3D de la placa PCB.
Fuente: Elaboración propia

4.3. Diseño de la carcasa en SolidWorks

Una vez diseñada la PCB encargada de la alimentación del freno electromagnético, se ha realizado también el diseño de una carcasa con objeto de garantizar cierto aislamiento y protección de la placa. Dicha carcasa consta de un cuerpo impreso en 3D, el cual cuenta con sus respectivos orificios para la entrada de corriente, la consigna de entrada y la salida hacia el freno electromagnético. El método de fijación elegido para unir la placa a la carcasa será mediante la colocación de unos insertos metálicos en la base de la carcasa que permitan realizar una unión atornillada entre ambas. La carcasa contará con una tapa de metacrilato de 4 [mm] de espesor y con unas dimensiones de 153×153 [mm] que irá fijada a la carcasa de igual manera y enrasada con el borde de esta. Debido a que es necesario contar con un espesor mínimo para colocar el inserto, el cuerpo contará con un espesor de 7 [mm], mientras que la hoquedad para el alojamiento de la placa será de 142×142 [mm], un milímetro más por cada lado que la propia placa. La altura final de la carcasa será de 70 [mm].

Se muestran en las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 el diseño de la carcasa propuesto y como se vería el diseño final de la PCB con la carcasa.

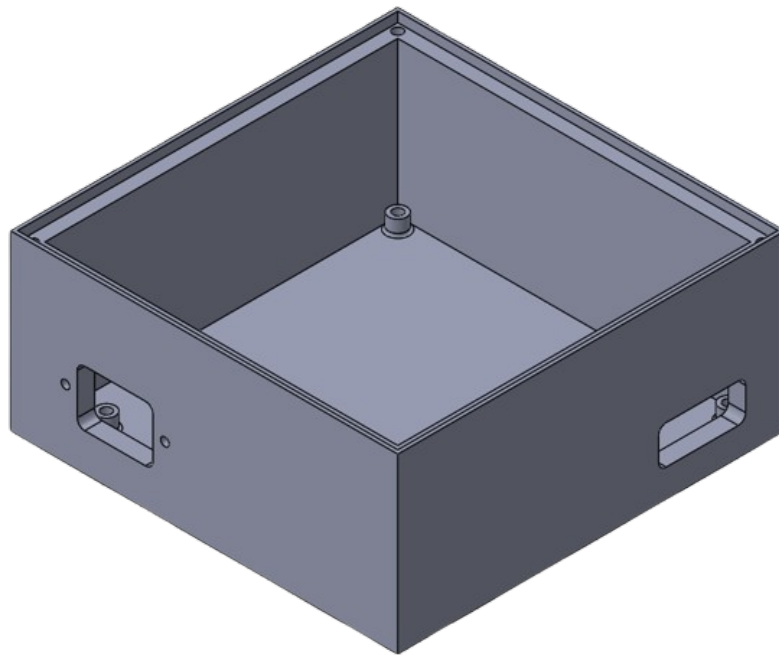


Figura 4.8: Vista isométrica de la carcasa.
Fuente: Elaboración propia

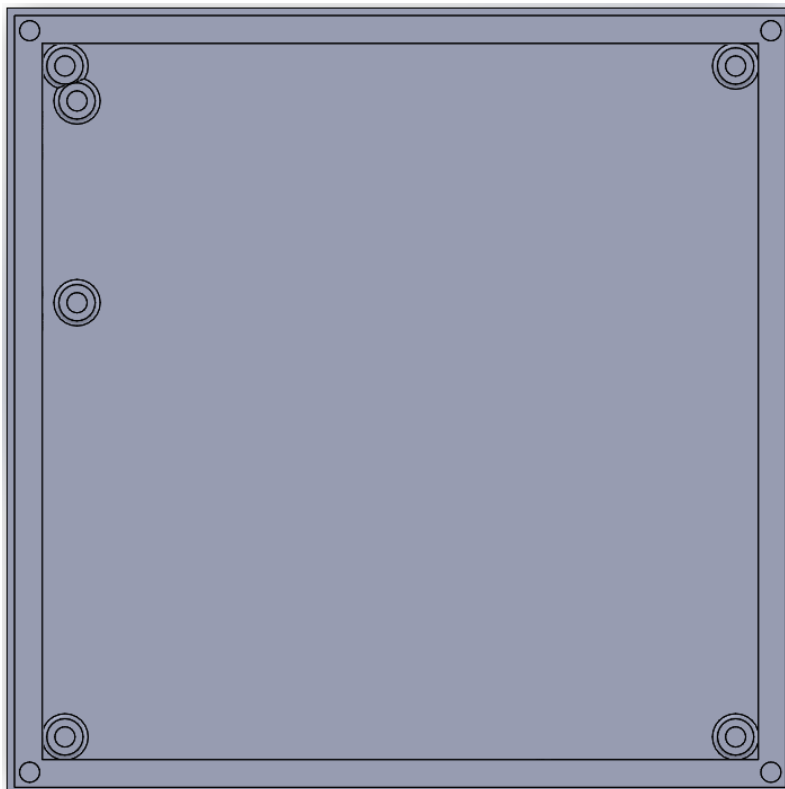


Figura 4.9: Vista de planta de la carcasa.
Fuente: Elaboración propia

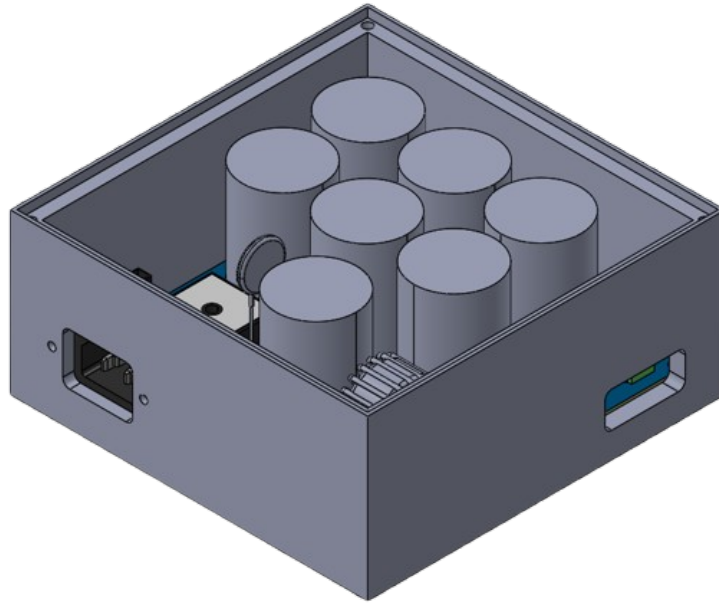


Figura 4.10: PCB colocada en la carcasa.
Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5

Implementación y ensayos

Contenido

5.1	Montaje de la PCB	71
5.2	Ensayos realizados	73
5.2.1	Primer ensayo: Seguimiento de la corriente del shunt	74
5.2.2	Segundo ensayo: Seguimiento de una señal cuadrada	75
5.2.3	Tercer ensayo: Alimentación del freno electromagnético	77

5.1. Montaje de la PCB

Habiendo diseñado y explicado el funcionamiento de la PCB, se procede a su pedido online. Algunos de los componentes son de montaje en superficie (SMD, por sus siglas en inglés, Surface Mount Device), es decir, se colocan directamente sobre la placa, mientras que el resto de elementos son de tipo *Through-Hole*, es decir, insertados a través de unos agujeros en la PCB.

Los componentes tipo SMD serán los amplificadores operacionales, resistencias, igbt, diodo, test-points, shunt y el convertidor AC/DC que alimenta a los comparadores. Los componentes tipo *Through-Hole* serán los portafusibles, el conector Ac, condensadores, bobinas y el puente rectificador de diodos.

En la Figura 5.1 se puede ver el proceso de montaje de la placa, con los componentes SMD y algunos componentes *Through-Hole* ya colocados.

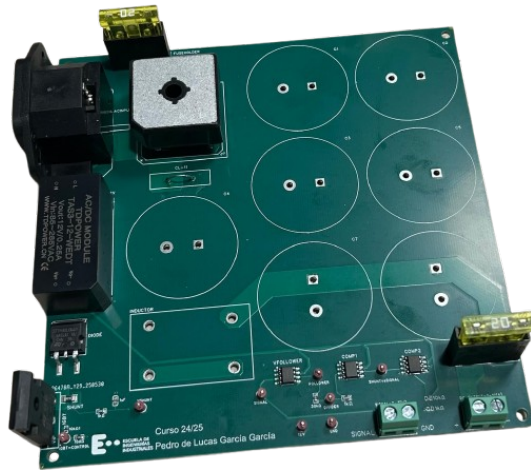


Figura 5.1: Proceso de montaje de la PCB.
Fuente: Elaboración propia

Una vez colocados todos los elementos de la placa, se puede proceder a realizar algunos ensayos. En la Figura 5.2 se puede ver el resultado final con todos los componentes fijados.

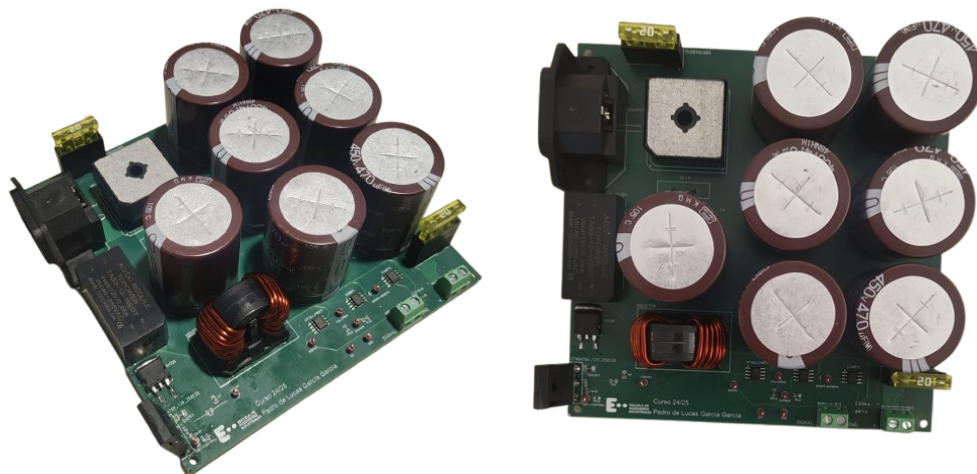


Figura 5.2: PCB completa.
Fuente: Elaboración propia.

5.2. Ensayos realizados

Con la placa montada al completo, el paso final sería comprobar que los resultados obtenidos en simulación son similares a los obtenidos experimentalmente.

Para ello, se realizará en primer lugar un ensayo de seguimiento de la corriente del *shunt* a la consigna de entrada.

Se generará la onda senoidal de la consigna de entrada con un generador de ondas *RIGOL DG 2041A* y se relizarán las medidas con un osciloscopio *Tektronik TDS 2024B* tal y como se aprecian en las Figuras 5.3 y 5.4.



Figura 5.3: Generador de señales empleado.
Fuente: Elaboración propia

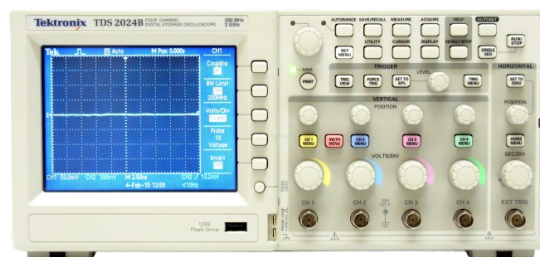


Figura 5.4: Osciloscopio empleado.
Fuente: Elaboración propia

5.2.1. Primer ensayo: Seguimiento de la corriente del shunt

Para una consigna de entrada de 1,2[V] pp, con un *offset* de 0,6[V] y una frecuencia de 1[Hz] se obtiene el resultado experimental que se aprecia en la Figura 5.5.

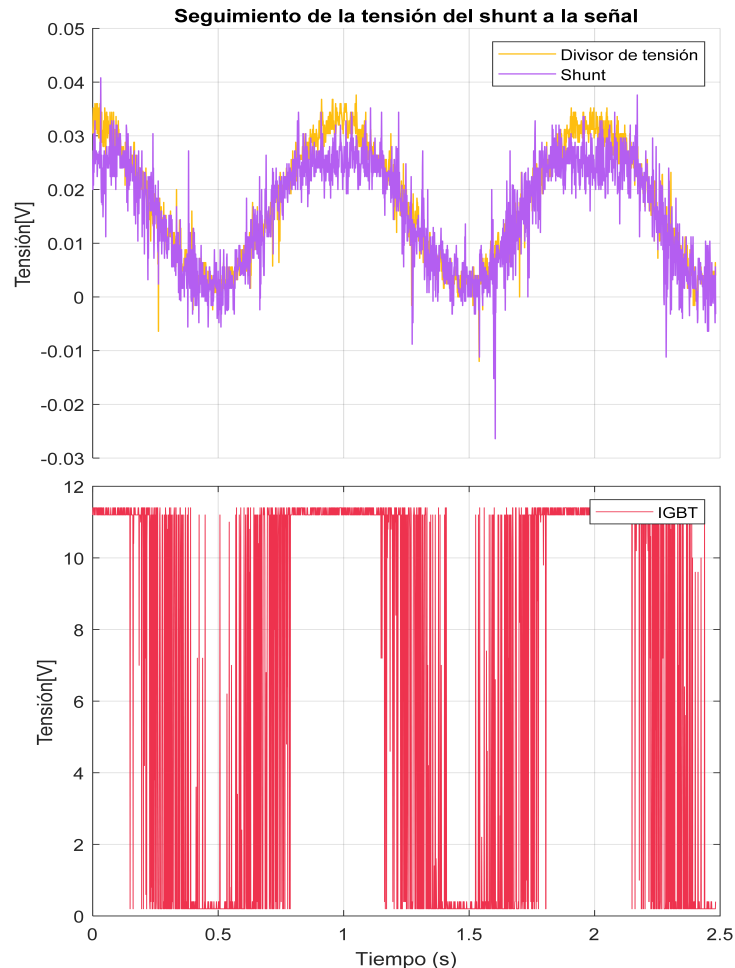


Figura 5.5: Seguimiento de la corriente del shunt a la consigna de entrada.

Fuente: Elaboración propia

En este caso, el ensayo experimental es con una consigna diferente a la de la simulación realizada, aunque igualmente se puede observar el correcto funcionamiento del circuito.

La señal pintada en amarillo representa la tensión que hay en el divisor de tensión, que oscila entre 0 y 40[mV]. La señal morada es la tensión del shunt, la cual es capaz de seguir la tensión de la señal de entrada. Se puede apreciar cierto ruido en el seguimiento de la señal, lo cual es normal en los ensayos experimentales.

En color rojo, se tiene la tensión del IGBT, la cual oscila entre 0 y 12[V]. Se aprecia también que este abre cuando el shunt necesita aumentar la tensión para

seguir la señal y cierra cuando la tensión de la señal disminuye.

5.2.2. Segundo ensayo: Seguimiento de una señal cuadrada

El siguiente ensayo ha consistido en hacer el seguimiento de una señal cuadrada. Se han realizado en total dos, con una amplitud de la señal de 12[V] y una frecuencia de 1[kHz]:

- Un primer ensayo con un *duty cycle* de un 20 %.
- El segundo ensayo con un *duty cycle* de un 60 %.

En las Figuras 5.6 y 5.7 se muestran los resultados obtenidos:

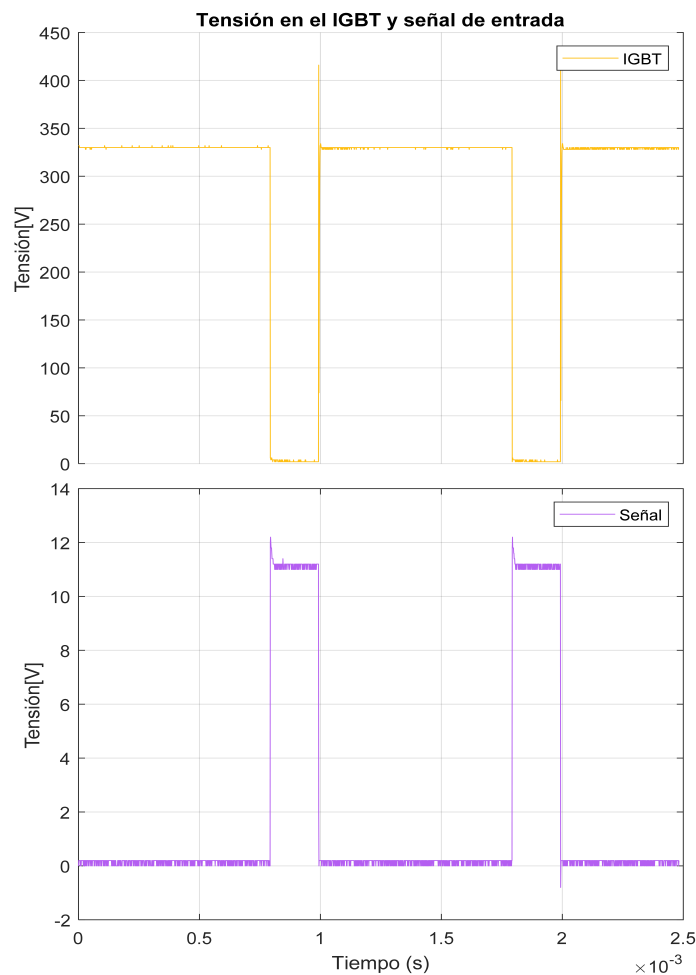


Figura 5.6: Seguimiento de una señal cuadrada con duty cycle del 20 %

Fuente: Elaboración propia

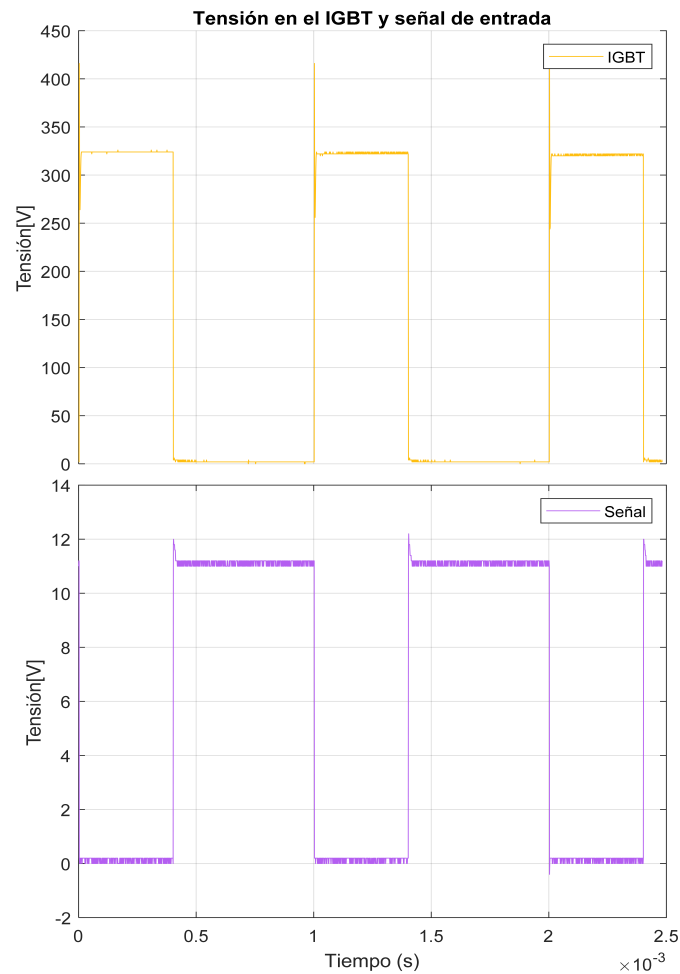


Figura 5.7: Seguimiento de una señal cuadrada con duty cycle del 60 %.

Fuente: Elaboración propia

Se propone este ensayo debido a que haciendo pruebas en el banco se ha detectado una gran interferencia electromagnética debido al inversor de potencia del motor eléctrico. Para evitar un mal seguimiento de la corriente se ha decidido hacer un control todo-nada mediante una señal digital PWM que no se ve distorsionada por el ruido.

Como ya se ha dicho, la Figura 5.6 muestra el seguimiento de una señal cuadrada. En este caso se grafica la tensión que hay entre las puertas del IGBT y se ve como forma una onda cuadrada con una amplitud máxima de unos 330[V], lo cual es lógico debido a que el valor de corriente DC que se tiene es el eficaz.

Respecto a la señal cuadrada que se tiene como entrada se ve como cuando esta vale 0[V] el IGBT se encuentra abierto y una vez la señal vale 12[V] hace que el IGBT se cierre y la tensión en sus puertas caiga a 0[V].

En cuanto a la Figura 5.7, se obtienen las mismas conclusiones que anteriormente, solo que en este caso, al contar con un *duty cycle* mayor, el IGBT se encuentra mayor

tiempo conduciendo, provocando así una circulación de corriente por la carga mayor que en el caso precedente.

5.2.3. Tercer ensayo: Alimentación del freno electromagnético

Finalmente, una vez comprobado que la PCB es capaz de realizar el seguimiento de la consigna de entrada, se ha comprobado su funcionamiento en el freno del banco de potencia, tal y como se aprecia en la Figura 5.8.

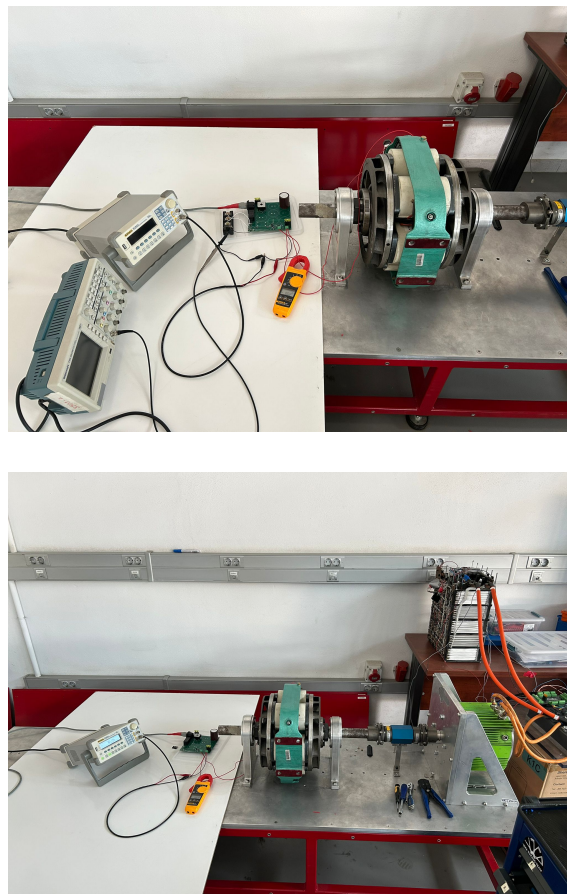


Figura 5.8: Ensayo en el freno electromagnético.
Fuente: Elaboración propia.

Para la realización de este ensayo, se han conectado los terminales de salida de la PCB al freno electromagnético y se ha procedido de manera similar a las pruebas previas. La consigna de entrada en este caso se trata de una señal cuadrada de 12[V]. Al principio, con un *duty cycle* del 20 %, la placa ha funcionado de forma correcta. Sin embargo, conforme se ha aumentado el *duty cycle* y por lo tanto, la corriente que pasa por el IGBT, el seguimiento de la consigna no ha sido fructífero y el transistor

ha acabado fallando. Esto se debe a que al demandar la carga una corriente mayor, el IGBT no sea capaz de disipar la potencia requerida.

Tanto en simulación como en los ensayos previos no se había considerado este fallo, y hasta que no se ha llevado a cabo la prueba con el freno no se ha podido detectar.

A modo de justificación se calcula la potencia que es necesaria disipar.

Se tiene el IGBT empleado con las siguientes características:

- $V_{CE(SAT)} = 1,55[V]$
- $R_{thJC} = 0,42[^\circ C/W]$
- $R_{thJA} = 50[^\circ C/W]$
- $E_{ON} + E_{OFF} = 2,4[mJ]$
- $T_J = 175[^\circ C]$

En primer lugar se calculan las pérdidas en el *switching* del transistor, a una frecuencia de 1[kHz]:

$$P_0 = E_{ON+OFF} \cdot f = 2,4[W] \quad (5.1)$$

A continuación se halla la potencia que disipa el IGBT para dos corrientes diferentes:

- Para 1[A]: $P_0 = U_{CE} \cdot I = 1,55[W]$
- Para 10[A]: $P_0 = U_{CE} \cdot I = 15,5[W]$

Una vez conocida la potencia que disipa el IGBT se calcula la temperatura que alcanza sin disipador de la siguiente manera:

$$T = T_{AMB} + (P_S + P_0) \cdot R_{thJA} \quad (5.2)$$

Y se tiene que:

- Para 1[A]: $T_{1A} = 25[^\circ C] + (2,4[W] + 1,55[W]) \cdot 50[^\circ C/W] = 222,5[^\circ C]$
- Para 10[A]: $T_{10A} = 25[^\circ C] + (2,4[W] + 15,5[W]) \cdot 50[^\circ C/W] = 920[^\circ C]$

Como se puede ver en los resultados, para la corriente de 1[A], la temperatura que alcanza es ligeramente superior a la máxima que soporta el transistor. Aún así funcionaba correctamente.

Mientras que para la corriente de 10[A] se tiene que la temperatura que se alcanza es de 920[°C], lo cual justifica que el IGBT se funda casi al momento de aumentar la intensidad que consume la carga.

Se propone una solución incluyendo un disipador térmico en el transistor [31], haciendo que este pueda funcionar correctamente. En este caso, se calcula la temperatura de la siguiente forma:

$$T = T_{AMB} + (P_S + P_0) \cdot (R_{thJC} + R_{thDISIPADOR}) \quad (5.3)$$

Y se tiene que:

- Para 1[A]: $T_{1A} = 25[^\circ\text{C}] + (2,4[\text{W}] + 1,55[\text{W}]) \cdot (0,42 + 5)[^\circ\text{C}/\text{W}] = 46[^\circ\text{C}]$
- Para 10[A]: $T_{10A} = 25[^\circ\text{C}] + (2,4[\text{W}] + 15,5[\text{W}]) \cdot (0,42 + 5)[^\circ\text{C}/\text{W}] = 122[^\circ\text{C}]$

En este caso, se puede ver como el IGBT funcionaría correctamente.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras de desarrollo

6.1. Conclusiones

En este trabajo se ha diseñado, simulado e implementado experimentalmente un sistema electrónico de potencia para el control de un freno electromagnético en un banco de absorción. A partir del cumplimiento de los objetivos planteados, se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- Se ha llevado a cabo una revisión del estado del arte.
- Se ha desarrollado un esquema basado en un convertidor AC-DC seguido de un convertidor DC-DC reductor, capaz de suministrar una corriente controlada y estable al freno electromagnético. La simulación realizada con PSIM ha permitido validar el comportamiento dinámico y estático del sistema bajo diferentes condiciones de carga.
- El diseño teórico ha sido materializado en una placa PCB, diseñada con EasyEDA, donde se ha asegurado un correcto trazado de pistas y disposición de componentes, minimizando pérdidas y mejorando la eficiencia del circuito.
- Se ha diseñado una caja protectora mediante SolidWorks, que incluye una tapa de metacrilato para aislar eléctricamente la placa y permitir su inspección visual. De este modo, se garantiza mayor seguridad y facilidad para el mantenimiento del sistema.
- Los ensayos experimentales han permitido corroborar que el sistema implementado reproduce fielmente las condiciones simuladas, asegurando una regulación precisa de la corriente y un suministro energético estable para el freno electromagnético. Debido a las circunstancias para realizar las pruebas experimentales, no va a ser posible solucionar el problema que ha surgido para alimentar el freno electromagnético a tiempo. Aún así, el seguimiento de la

consigna de entrada ha sido validado experimentalmente y se puede concluir que funciona.

- La solución propuesta en el presente trabajo presenta un coste significativamente menor en comparación con las alternativas habituales en la industria automotriz. Esto se logra mediante una selección eficiente de componentes y un diseño compacto que reduce los gastos de fabricación y mantenimiento, sin comprometer el desempeño ni la estabilidad del sistema [32][33].
- Se considera que el presente proyecto aporta una solución eficiente y adaptable para el control de bancos de absorción, favoreciendo la medición precisa del par motor en aplicaciones automotrices.

6.2. Líneas futuras de desarrollo

A partir del trabajo realizado y de los resultados obtenidos, se presentan diversas posibilidades de mejora y expansión del sistema desarrollado:

- Se propone integrar un circuito de descarga en la placa PCB para eliminar de forma controlada la energía almacenada en los elementos pasivos como los condensadores. Esta medida incrementaría la seguridad del sistema durante tareas de mantenimiento y desconexión, evitando posibles descargas accidentales.
- La utilización de un microcontrolador permitiría generar señales PWM con alta precisión, así como gestionar múltiples entradas y salidas. Esto habilitaría la interacción con sensores y la comunicación con dispositivos externos, aportando mayor flexibilidad y capacidad de adaptación al sistema.
- A través del microcontrolador, se podría incorporar una interfaz gráfica o sistema de comunicación para permitir al usuario configurar parámetros, visualizar datos en tiempo real y registrar resultados, facilitando el control y análisis de las pruebas realizadas.
- Se plantea una futura revisión del diseño de la placa para reducir su tamaño, mejorar la gestión térmica y facilitar su integración en distintos entornos de prueba. La compactación y optimización del *layout* también contribuirían a una mayor eficiencia y confiabilidad del sistema.
- Se sugiere implementar funciones de autodiagnóstico y sistemas de protección en tiempo real, que detecten condiciones anómalas como sobrecorrientes, sobretemperaturas o fallos en el sistema de control, elevando así la robustez y seguridad operativa del equipo.

Bibliografía

- [1] “Ley de Faraday.” Recuperado marzo de 2025. Disponible en línea: <https://imamagnets.com/productos/blog/ley-de-faraday-y-ley-de-lenz/>
- [2] “MS1920 ENGIRO-MS1920 Official Electric Motor INFO.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: <https://es.scribd.com/document/499586697/MS1920-ENGIRO-MS1920-Official-Electric-Motor-INFO>
- [3] “Diseño de un banco de potencia para motocicletas.” Recuperado marzo de 2025. Disponible en línea: <https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/8883>
- [4] “Diseño y fabricación banco potencia para automóviles.” Recuperado marzo de 2025. Disponible en línea: <https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/44286>
- [5] “Bancos de potencia, una aproximación teórica.” Recuperado marzo de 2025. Disponible en línea: <https://8000vueltas.com/2012/11/12/bancos-de-potencia>
- [6] J. Fraile Mora, *Maquinas electricas*. McGraw-Hill Interamericana de España, 2011.
- [7] F. Payri Gonzalez, *Fundamentos de motores de combustion interna alternativos*. Reverté, 2012.
- [8] A. González Prieto, J. J. Aciego Gallardo, I. González Prieto, and M. J. Durán Martínez, *Accionamientos Eléctricos. Fundamentos, control y aplicaciones*. Paraninfo, 2022.
- [9] T. A. Huynh and M. F. Hsieh, “Performance analysis of permanent magnet motors for electric vehicles (EV) traction considering driving cycles,” *Energies*, vol. 11, 6 2018.
- [10] “Motor híbrido: ¿qué es y cómo funciona? - Renault.” Recuperado marzo de 2025. Disponible en línea: <https://www.renault.es/e-tech-full-hybrid/motor.html>
- [11] A. Pozo Ruz and N. Jiménez Redondo, *Electrónica de Potencia*, 1st ed. Universidad de Málaga, 2005.
- [12] “PSIM Download.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: https://psim.software.informer.com/Descargar-gratis/#google_vignette

-
- [13] “EasyEDA.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: <https://sites.google.com/view/caracterizaciondesimuladores/home/easyeda>
- [14] “RS: Soluciones industriales y componentes eléctricos.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: <https://es.rs-online.com/web/>
- [15] “LCSC Electronics.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: <https://www.lcsc.com/>
- [16] “Conector AC.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: <https://docs.rs-online.com/6c51/0900766b813ebb1f.pdf>
- [17] “Portafusibles.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2410311309_Littelfuse-178-6165-0002_C207061.pdf
- [18] “Puente rectificador de diodos.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: <https://docs.rs-online.com/1ef2/0900766b80dadbc1.pdf>
- [19] “Shunt.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2410121314_PSA-Prosperity-Dielectrics-FMF06FTHR010-LH_C105362.pdf
- [20] “IGBT.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2211080700_STMicroelectronics-STGWA75H65DFB2_C2971080.pdf
- [21] “Condensador.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: <https://docs.rs-online.com/9a5c/0900766b813621e3.pdf>
- [22] “Bobina.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: <https://docs.rs-online.com/f4e3/0900766b81303e93.pdf>
- [23] “Diodo.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_1806011144_STMicroelectronics-STTH30L06GY-TR_C221467.pdf
- [24] “Amplificador operacional ad820.” Recuperado junio de 2025. Disponible en línea: https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2310091147_Analog-Devices-AD820AN-3V_C4370310.pdf
- [25] “Resistencia 1kOhm.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2411071710_FOJAN-FRC0603J102-TS_C2907113.pdf
- [26] “Resistencia 10kOhm.” Recuperado junio de 2025. Disponible en línea: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2304140030_YAGEO-RC0402FR-0710KL_C60490.pdf

-
- [27] “Resistencia 30kOhm.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2411221126_UNIROYAL-Uniroyal-Elec-0603WAF3002T5E_C22984.pdf
- [28] “Convertidor AC-DC.” Recuperado abril de 2025. Disponible en línea: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2304140030_TDPOWER-TAS3-12-WEDT_C570965.pdf
- [29] “CL-11.” Recuperado junio de 2025. Disponible en línea: https://www.mouser.es/datasheet/2/18/1/AAS_920_325D_Thermometrics_NTC_Inrush_031814_web_p-1315885.pdf
- [30] “Terminal PCB.” Recuperado junio de 2025. Disponible en línea: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_1912251636_Ningbo-Kangnex-Elec-WJ500V-5-08-2P_C8465.pdf
- [31] “Disipador térmico.” Recuperado junio de 2025. Disponible en línea: <https://es.rs-online.com/web/p/disipadores/0203599>
- [32] “Brake Power Supply.” Recuperado junio de 2025. Disponible en línea: <https://sportdevices.com/product/brake-power-supply/>
- [33] “BD2 eddy current brake power.” Recuperado junio de 2025. Disponible en línea: <https://perek.it/product/bd2-eddy-current-brake-power-supply-interface/>

