

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y  
Mecatrónica

Diseño y simulación de un cargador de  
batería para una motocicleta eléctrica

Autora: Alba Romero Andrades

Tutores: Alfredo Pérez Vega-Leal

Sergio Vázquez Pérez

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

Sevilla, 2020





Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

# **Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica**

Autora:

Alba Romero Andrades

Tutores:

Alfredo Pérez Vega-Leal

Profesor Contratado Doctor

Sergio Vázquez Pérez

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Electrónica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2020



Proyecto Fin de Carrera: Diseño y simulación de un cargador de batería para una  
motocicleta eléctrica

Autora: Alba Romero Andrades

Tutores: Alfredo Pérez Vega-Leal  
Sergio Vázquez Pérez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

Con este proyecto doy por finalizada una importante etapa de mi vida y es por ello, por lo que me gustaría aprovechar estas líneas para agradecer el apoyo, el cariño, el ánimo y la paciencia recibida por cada una de las personas que han estado a mi lado en ella.

A mi familia, especialmente a mi madre, no es fácil traducir en palabras el coraje y el modo de afrontar las adversidades que la vida nos ha puesto, por luchar con esa fuerza que contagia.

A ti, que estés donde estés me enseñaste que, con esfuerzo, todo es posible y que los límites se los pone uno mismo.

A mis amigos, tanto con los que he convivido día a día en esta etapa como a todos los que incluso en la distancia siempre han estado ahí. En especial a Sandra, nada hubiera sido igual sin su apoyo constante e incondicional y su compañía.

A mi pareja, por ser compañero de batalla, confidente y un hombro en el que apoyarme cuando las fuerzas flaquean. Por seguir cumpliendo metas a su lado.

Al equipo US Racing, por darme la oportunidad de contribuir humildemente en una parte del ambicioso proyecto de diseño y desarrollo de su primera motocicleta eléctrica. Sus ánimos, desde el primer momento han sido muy gratificantes.

Y, por último, pero no por ello menos especial, agradecer también a todos los profesores que han aportado su granito de arena en mi formación, implicándose de manera desinteresada, despertando e impulsando mi interés y curiosidad por este mundo y haciéndome crecer cada día un poco más. En especial a mis tutores, Alfredo y Sergio, por guiarme en este trabajo.

A todos, gracias.

*Alba Romero Andrades*  
*Escuela Técnica Superior de Ingeniería*  
*Sevilla, 2020*



# Resumen

---

Este documento describe el proceso de diseño y simulación de las diferentes etapas de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica.

En primer lugar, el capítulo que abre el presente proyecto analiza e introduce brevemente el entorno que envuelve a este, proporcionando una visión de la evolución que ha sufrido la motocicleta eléctrica a lo largo de la historia y de los motivos que han propiciado el actual interés por los avances relacionados con el reto de la carga de los sistemas de almacenamiento con los que cuentan dichos vehículos eléctricos.

El cuerpo del proyecto se divide en cuatro partes. En la primera de ellas, se lleva a cabo el análisis del medio físico que permite almacenar la energía en la motocicleta; la batería. En la segunda de ellas, se analiza el sistema de conversión de potencia que permite el intercambio energético entre el medio físico que almacena la energía en la motocicleta, presentado en el capítulo anterior, y la red eléctrica; el cargador. Una vez abordados estos análisis, se procede al diseño de las diferentes etapas del cargador. Se lleva a cabo la elección de la topología más adecuada para cada una de ellas mediante un estudio detallado. Se concluye el cuerpo del proyecto con el diseño del control de las etapas que lo requieren, así como con la simulación de cada una de estas mediante el software de modelizado y simulación de sistemas por elementos finitos (MATLAB<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup>).

Finalmente, se exponen las conclusiones en función de los resultados obtenidos, así como las posibles líneas futuras.



# Abstract

---

This document describes the design and simulation process of the different stages of a battery charger for an electric motorcycle.

Firstly, the chapter that opens the present project analyzes and briefly introduces the environment that surrounds it, providing a vision of the evolution that the electric motorcycle has undergone throughout history and the reasons that have led to the current interest in the advances related to the challenge of loading the storage systems that these electric vehicles have.

The body of the project is divided into four parts. In the first one, the analysis of the physical environment that stores energy on the motorcycle is carried out; the battery. In the second one, the power conversion system that allows energy exchange between the physical environment that stores energy in the motorcycle, presented in the previous chapter, and the electrical network is analyzed; the charger. Once these analyzes have been addressed, we proceed to the design of the different stages of the charger. The choice of the most suitable topology for each stage is carried out, this is done by a detailed study. The body of the project is concluded with the design of the control of the stages that require it, as well as with the simulation of each one using the finite element modeling and simulation software (MATLAB<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup>).

Finally, the conclusions are presented based on the results obtained, as well as the possible future lines.



# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xix</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Motivación</i>	1
1.2 <i>El Proyecto MotoStudent</i>	1
1.2.1 <i>¿Qué es?</i>	2
1.2.2 <i>Historia y evolución del equipo</i>	2
1.3 <i>Objetivo</i>	2
1.4 <i>Alcance</i>	3
1.5 <i>Historia y evolución del equipo</i>	3
<b>2 Batería</b>	<b>7</b>
2.1 <i>Características y especificaciones del tipo de celdas que contiene la batería</i>	7
2.2 <i>Determinación del conexionado de las celdas para la construcción de la batería</i>	7
2.3 <i>Características y especificaciones generales de la batería</i>	8
2.3.1 <i>Características</i>	8
2.3.2 <i>Especificaciones</i>	11
<b>3 Cargador</b>	<b>13</b>
3.1 <i>Investigación de los posibles tipos de cargadores y elección del tipo de cargador a diseñar</i>	13
3.1.1 <i>Tipos de cargadores</i>	13
3.1.1.1 <i>Según el lugar donde se lleva a cabo la conversión AC/DC</i>	13
3.1.1.2 <i>En función de su clase de aislamiento</i>	14
3.1.1.3 <i>En función del modo de gestión del flujo de energía entre el vehículo y la red</i>	14
3.1.1.4 <i>En función del modo de su configuración de conexión a red</i>	15
3.1.2 <i>Elección del tipo de cargador a diseñar</i>	15
3.2 <i>Determinación de las especificaciones del cargador o acumulador completo</i>	15
3.2.1 <i>Especificaciones de entrada</i>	15
3.2.2 <i>Especificaciones de salida</i>	16
3.3 <i>Investigación de los diferentes modos de carga y elección del más adecuado</i>	16
3.3.1 <i>Modos de carga atendiendo a los distintos sistemas de control</i>	16
3.3.1.1 <i>Corriente constante</i>	17
3.3.1.2 <i>Tensión constante</i>	17
3.3.1.3 <i>Por pulsos</i>	18
3.3.1.4 <i>Corriente constante / tensión constante (CC/CV)</i>	18
3.3.2 <i>Elección del modo de carga más adecuado para la batería</i>	19

<b>4</b>	<b>Diseño</b>	<b>21</b>
4.1	<i>Selección de la topología del circuito de potencia</i>	21
4.1.1	Etapa DC/DC reductora	22
4.1.2	Etapa AC/DC correctora del factor de potencia	35
4.1.3	Etapa AC/AC reductora y aislante	44
4.1.4	Componentes activos	48
<b>5</b>	<b>Control y simulación</b>	<b>49</b>
5.1	<i>Simulación etapa AC/AC</i>	49
5.2	<i>Control y simulación etapa AC/DC</i>	54
5.3	<i>Control y simulación etapa DC/DC reductora</i>	67
5.3.1	Control de bajo nivel	70
5.3.2	Control de alto nivel	76
<b>6</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>85</b>
<b>7</b>	<b>Pliego de prescripciones técnicas</b>	<b>87</b>
<b>8</b>	<b>Anexo I</b>	<b>89</b>
<b>9</b>	<b>Anexo II</b>	<b>90</b>
<b>10</b>	<b>Anexo III</b>	<b>91</b>
<b>11</b>	<b>Anexo IV</b>	<b>93</b>
<b>12</b>	<b>Anexo V</b>	<b>95</b>
<b>13</b>	<b>Referencias</b>	<b>97</b>

# Índice de Tablas

---

Tabla 2-1. Especificaciones celdas ion litio tipo 18650-2500 mAh compañía Far East First New Energy	7
Tabla 2-2. Especificaciones acumulador completo	11
Tabla 4-1. Forma de operar de un rectificador monofásico puente completo con modulación PWM	40
Tabla 5-1. Especificaciones batería relevantes para el control de alto nivel	77
Tabla 5-2. Rango de tensión y corriente en cada fase de carga	78



# Índice de Figuras

---

Figura 1-1. Peugeot Scoot'Elec [4].	4
Figura 2-1. Proceso de carga de una batería Li-Ion con cátodo formado por óxido de litio-cobalto [7].	10
Figura 2-2. Proceso de descarga de una batería Li-Ion con cátodo formado por óxido de litio-cobalto [7].	10
Figura 3-1. A la izquierda cargador on-board, a la derecha cargador off-board [8].	13
Figura 3-2. Topología general flujo de energía unidireccional/bidireccional [10].	14
Figura 3-3. Tensión y corriente a lo largo del tiempo cuando una batería se carga a corriente constante [13].	17
Figura 3-4. Tensión y corriente a lo largo del tiempo cuando una batería se carga a tensión constante [13].	17
Figura 3-5. Tensión y corriente a lo largo del tiempo cuando una batería se carga por pulsos [13].	18
Figura 3-6. Tensión y corriente a lo largo del tiempo cuando una batería se carga a CC/CV [13].	19
Figura 4-1. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar.	21
Figura 4-2. Esquema básico de un convertidor DC/DC reductor.	22
Figura 4-3. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar una vez seleccionada la etapa DC/DC reductora.	23
Figura 4-4. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar una vez seleccionada la etapa DC/DC reductora considerando $R_{batería}$ .	23
Figura 4-5. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar con las especificaciones de entrada y salida de la etapa DC/DC reductora considerando $R_{batería}$ .	25
Figura 4-6. Etapa DC/DC reductora aislada con sus especificaciones de entrada y salida.	25
Figura 4-7. Intervalo ON convertidor DC/DC reductor; ( $0 < t < t_{ON}$ ).	26
Figura 4-8. Intervalo OFF convertidor DC/DC reductor; ( $t_{ON} < t < T_s$ ).	26
Figura 4-9. Tensión en bornes del dispositivo de conmutación a lo largo de un periodo.	27
Figura 4-10. Tensión de entrada a lo largo de un periodo.	27
Figura 4-11. Tensión de salida a lo largo de un periodo.	27
Figura 4-12. Tensión en bornes de la bobina a lo largo de un periodo.	27
Figura 4-13. Corriente de salida a lo largo de un periodo.	28
Figura 4-14. Corriente por la bobina a lo largo de un periodo.	28
Figura 4-15. Corriente por el condensador a lo largo de un periodo.	28
Figura 4-16. Área bajo la curva de la corriente que circula por el condensador.	30
Figura 4-17. $\Delta Q$ gráficamente.	32
Figura 4-18. Diagrama de bode.	34
Figura 4-19. Clasificación general de los convertidores AC/DC [16].	35
Figura 4-20. Esquema básico de un rectificador monofásico PWM puente completo en configuración fuente de voltaje.	37
Figura 4-21. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar con topología etapa AC/DC y DC/DC.	37

Figura 4-22. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar una vez seleccionada la etapa AC/DC y considerando $R_{DC}$ .	38
Figura 4-23. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar con las especificaciones de entrada y salida de la etapa AC/DC considerando $R_{DC}$ .	39
Figura 4-24. Etapa AC/DC aislada con sus especificaciones de entrada y salida.	39
Figura 4-25. Circuito equivalente promediado del rectificador monofásico.	41
Figura 4-26. Circuito equivalente para el análisis del flujo de potencia.	42
Figura 4-27. Símbolo de un transformador monofásico en MATLAB®/Simulink®.	45
Figura 4-28. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar con topología completa.	45
Figura 4-29. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar una vez seleccionada la etapa AC/AC y considerando $R_{AC}$ .	46
Figura 4-30. Etapa AC/AC aislada con sus especificaciones de entrada y salida.	47
Figura 5-1. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar considerando el control.	49
Figura 5-2. Etapa AC/AC aislada con sus especificaciones de entrada y salida.	50
Figura 5-3. Representación etapa AC/AC aislada en MATLAB®/Simulink®.	50
Figura 5-4. Guardar especificaciones de entrada para su representación etapa AC/AC.	50
Figura 5-5. Tensión a la entrada de la etapa AC/AC (tensión red eléctrica).	51
Figura 5-6. Corriente a la entrada de la etapa AC/AC.	51
Figura 5-7. Tensión y corriente de entrada de la etapa AC/AC.	52
Figura 5-8. Guardar especificaciones de salida para su representación etapa AC/AC.	52
Figura 5-9. Tensión a la salida de la etapa AC/AC.	53
Figura 5-10. Corriente a la salida de la etapa AC/AC.	53
Figura 5-11. Tensión y corriente de salida de la etapa AC/AC.	54
Figura 5-12. Etapa AC/DC aislada con sus especificaciones de entrada y salida.	54
Figura 5-13. Circuito equivalente promediado del rectificador monofásico.	55
Figura 5-14. Esquema del modelo no lineal de la etapa AC/DC.	56
Figura 5-15. Esquema de un sistema controlado que incluye un controlador estabilizante por retroalimentación de estados y un controlador integral [21].	58
Figura 5-16. Esquema completo del sistema controlado.	60
Figura 5-17. Implementación del sistema en lazo cerrado en Simulink.	61
Figura 5-18. Guardar especificaciones de entrada para su representación etapa AC/DC.	61
Figura 5-19. Tensión a la entrada de la etapa AC/DC.	62
Figura 5-20. Corriente a la entrada de la etapa AC/DC.	62
Figura 5-21. Tensión y corriente a la entrada de la etapa AC/DC.	63
Figura 5-22. Guardar corriente de salida y de referencia para su representación etapa AC/DC.	63
Figura 5-23. Corriente a la entrada de la etapa AC/DC y corriente de referencia.	64
Figura 5-24. Guardar tensión de salida y de referencia para su representación etapa AC/DC.	64
Figura 5-25. Tensión a la salida de la etapa AC/DC y tensión de referencia.	65

Figura 5-26. Corriente a la entrada de la etapa AC/DC y corriente de referencia cuando varía la tensión de referencia.	65
Figura 5-27. Tensión y corriente a la entrada de la etapa AC/DC y tensión de referencia cuando esta última varía.	66
Figura 5-28. Tensión a la salida de la etapa AC/DC y tensión de referencia cuando esta última varía.	66
Figura 5-29. Etapa DC/DC reductora aislada con sus especificaciones de entrada y salida.	67
Figura 5-30. Representación etapa DC/DC reductora aislada en MATLAB®/Simulink®.	67
Figura 5-31. Simulink-PS Converter.	68
Figura 5-32. PS-Simulink Converter.	68
Figura 5-33. Solver Configuration.	68
Figura 5-34. Scope.	69
Figura 5-35. Current-Voltage Simscape Interface.	69
Figura 5-36. Current Sensor.	69
Figura 5-37. Voltage Sensor.	69
Figura 5-38. Battery.	70
Figura 5-39. Circuito equivalente de la batería en Simulink [22].	70
Figura 5-40. Stateflow Chart.	71
Figura 5-41. Stateflow Chart Moore.	71
Figura 5-42. Stateflow Chart Mealy.	71
Figura 5-43. Subsistema de dos temporizadores y Stateflow.	72
Figura 5-44. Stateflow del control del temporizador a 50 kHz como máximo y margen de error de 1 mA.	72
Figura 5-45. Control interruptor etapa DC/DC reductora (primer estudio).	73
Figura 5-46. Corriente de referencia y corriente de salida etapa DC/DC reductora (primer estudio).	73
Figura 5-47. Control interruptor etapa DC/DC reductora (segundo estudio).	74
Figura 5-48. Corriente de referencia y corriente de salida etapa DC/DC reductora (segundo estudio).	74
Figura 5-49. Control interruptor etapa DC/DC reductora (tercer estudio).	75
Figura 5-50. Corriente de referencia y corriente de salida etapa DC/DC reductora (tercer estudio).	75
Figura 5-51. Control interruptor, corriente de salida y corriente de referencia etapa DC/DC reductora cuando varía esta última.	76
Figura 5-52. Stateflow control etapas del ciclo de carga.	78
Figura 5-53. Subsistema alto nivel.	79
Figura 5-54. Subsistema de control y simulación alto nivel.	79
Figura 5-55. Corriente a la salida de la etapa DC/DC en la fase de pre-acondicionamiento.	80
Figura 5-56. Tensión a la salida de la etapa DC/DC en la fase de pre-acondicionamiento.	80
Figura 5-57. Estado de carga (SOC) de la batería en %.	81
Figura 5-58. Corriente a la salida de la etapa DC/DC en la fase de corriente constante (CC).	81
Figura 5-59. Tensión a la salida de la etapa DC/DC en la fase de corriente constante (CC).	82
Figura 5-60. Estado de carga (SOC) de la batería en %.	82

Figura 5-61. Tensión a la salida de la etapa DC/DC en la fase de tensión constante (CV).	83
Figura 5-62. Corriente a la salida de la etapa DC/DC en la fase de tensión constante (CV).	83
Figura 5-63. Estado de carga (SOC) de la batería en %.	84
Figura 5-64. Representación en MATLAB®/Simulink® de la etapa DC/DC reductora final.	84

# Lista de Abreviaturas

---

CAGR	Tasa de crecimiento anual compuesto (Compound Annual Growth Rate)
PCS	Sistema de conversión de potencia (Power Conversion System)
MEF	Moto Engineering Foundation
FIM	Federación Internacional de Motociclismo
GP	Gran Premio (Grand Prix)
ANESDOR	Asociación Nacional de Empresas del Sector de Dos Ruedas
ONU DI	Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial
SOCOVEL	Société de Construction de Véhicules Electriques
NiCd	Níquel-Cadmio
AC	Corriente alterna (Alternative Current)
DC	Corriente continua (Direct Current)
Li-Ion	Iones de Litio
LiCoO <sub>2</sub>	Óxido de Litio-Cobalto
LiFePO <sub>4</sub>	Óxido de fosfato de litio y hierro
UNE	Una Norma Española
IEC	Comisión internacional electrotecnia (International Electrotechnical Commission)
CE	Consejo Europeo
V2G	Vehicle to Grid
EN	Norma Europea
BMS	Sistema de Gestión de Baterías (Battery Management System)
Ni-MH	Níquel-Metal-Hidruro
CC-CV	Corriente constante - tensión constante (Constant Current, Constant Voltage)
PFC	Corrección del Factor de Potencia (Power Factor Correction)
MCC	Modo de conducción continua
MCD	Modo de conducción discontinua
D	Duty cycle
IGBT	Transistor bipolar de puerta aislada (Insulated Gate Bipolar Transistor)
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
IGTC	Tiristor conmutado por puerta integrada (Integrated Gate-Commutated Thyristor)
AFE	Active Front End
VSR	Rectificador de fuente de voltaje (Voltage Source Rectifier)
CSR	Rectificador de fuente de corriente (Current Source Rectifier)
VA	Voltio-Amperios
Hz	Hercio
EEUU	Estados Unidos



# 1 INTRODUCCIÓN

---

Los circuitos y equipos electrónicos, así como los vehículos eléctricos, incluyen, cada vez con mayor frecuencia, baterías para el almacenamiento de energía como componentes necesarios para la realización de sus funciones. En el año 2015, sólo en China se produjeron 15,7 GWh de baterías, triplicando así la producción de 2014; y se estimó un crecimiento sostenido de esta producción superior al 30 % anual (CAGR) hasta 2024 [1].

Los sistemas de almacenamiento de energía son sistemas complejos, que comprenden desde un punto de vista general tres subsistemas principales. El primero de ellos es el medio físico que permite almacenar energía. Esta función puede alcanzarse en diferentes formas (energía mecánica, eléctrica, térmica, ...) y en este proyecto estaría representado por las celdas electroquímicas de la batería con la que cuenta la motocicleta. El segundo es el subsistema que permite el intercambio energético entre el medio físico que almacena energía y un sistema exterior, como lo es la red eléctrica. A este subsistema se le conoce como el sistema de conversión de potencia (PCS), y en este proyecto estaría representado por la electrónica de potencia que actúa de interfaz entre los bornes de la batería y la red eléctrica, es decir, por el cargador a diseñar. Finalmente, el tercer subsistema es aquel que gobierna la lógica de carga y descarga energética, y está representado por las tecnologías de información y comunicación asociadas [1].

En ámbitos expertos, el tema del almacenamiento energético siempre ha tenido importancia [1]. No obstante, actualmente, en un tiempo cada vez más marcado por la descarbonización, el desarrollo tecnológico, la movilidad sostenible y la eficiencia energética, adquiere las características de un auténtico “trending topic”. Son muchas las empresas del mundo mecánico, automovilístico e investigativo, las que apuestan diariamente por el desarrollo de nuevos avances relacionados con el reto de la carga de los sistemas de almacenamiento de energía, para mejorar así, la eficiencia de los sistemas electrónicos y eléctricos que los contienen. El objetivo es proporcionar al cliente la mayor flexibilidad y comodidad en el proceso de carga.

## 1.1. Motivación

Este trabajo comienza con un proyecto realizado con el equipo oficial de la Universidad de Sevilla, US Racing Team, que se basa en el diseño y construcción del primer prototipo de motocicleta eléctrica desde cero en la historia del equipo sevillano, para la sexta edición de la Competición Internacional MotoStudent.

Dentro de este ambicioso proyecto, en el departamento de Ingeniería Electrónica de dicho equipo, surge el reto de la creación de un cargador para la batería con la que cuenta dicha motocicleta. La importancia de este dispositivo no solo radica en su diseño y su correcto funcionamiento, sino también en que ambos sean un desarrollo propio en lugar de una solución comercial. Esto no solo supone un crecimiento importante en aprendizaje tanto teórico como técnico sino también un ahorro económico.

Por otra parte, este dispositivo no se quedará en un simple diseño teórico, sino que se fabricará y se empleará en la realidad. Todas estas premisas despiertan en mí un gran interés por profundizar sobre estos dispositivos que permiten tener las baterías operativas, pues a lo largo de este grado, en muchas ocasiones he deseado ver que todo lo aprendido se puede comprimir en, por ejemplo, un dispositivo de utilidad con aplicación real. Es por esto, por lo que no veo mejor modo de acabar esta etapa que, con la realización de un Trabajo Fin de Grado con estas características, donde se tiene una primera aproximación a la ingeniería y se plantea una solución realista a un problema obtenido en el desarrollo de un proyecto real.

## 1.2. El Proyecto MotoStudent

Uno de los campeonatos estudiantiles con más prestigio a nivel mundial de los últimos años es el proyecto MotoStudent.

### 1.2.1. ¿Qué es?

MotoStudent es una competición universitaria a nivel internacional promovida por Moto Engineering Foundation (MEF) y TechnoPark MotorLand. Esta competición supone un desafío entre equipos de estudiantes universitarios de distintas universidades españolas y europeas.

El formato del evento proporciona una oportunidad única para los estudiantes de poder demostrar y comprobar las capacidades y conocimientos adquiridos durante sus estudios universitarios para desarrollar un proyecto industrial real, estudiando, diseñando, optimizando y fabricando el mejor prototipo posible de motocicleta de competición, sujeto a un reglamento y a unas normas, el cual será evaluado y probado en el circuito FIM de MotorLand Aragón, en la provincia de Teruel. Es allí donde se encuentra ubicada la sede oficial del campeonato, siendo este circuito, además, un circuito oficial del calendario de Moto GP.

Los inicios de la competición se remontan a 2009, pero no es hasta 2010 cuando se celebra la primera edición, con 23 equipos participantes. Actualmente, esta competición alberga a 74 equipos y más de 1500 estudiantes.

Desde su cuarta edición cuenta con dos categorías diferentes:

- MotoStudent Petrol

En esta categoría, los estudiantes cuentan con el desafío de construir el mejor prototipo de motocicleta de carreras que empleará como método de propulsión un motor de combustión interna de gasolina de 250 cilindradas y 4 tiempos, siguiendo los estándares de la categoría Moto3.

- MotoStudent Electric

En esta categoría, los estudiantes cuentan con el desafío de construir el mejor prototipo de motocicleta de carreras que empleará como método de propulsión un sistema 100 % eléctrico, siguiendo los estándares de la categoría Moto3.

### 1.2.2. Historia y evolución del equipo

El equipo oficial de la Universidad de Sevilla, US Racing Team, surge con la idea de plasmar la afición de un conjunto de estudiantes de la Universidad de Sevilla por el mundo de las dos ruedas en un proyecto de este ámbito. Desde sus inicios, en este equipo han estado presentes estudiantes de todos los ámbitos y especialidades. Si bien es cierto que la ingeniería desempeña un papel fundamental en él con el diseño, pruebas, fabricación y montaje de los diferentes elementos mecánicos, electrónicos y aerodinámicos del conjunto, el papel desempeñado por las ramas de comunicación, marketing y derecho no es de menor importancia, siendo vital para el buen funcionamiento del equipo.

El equipo añade con esta temporada 2020 su sexta motocicleta fabricada hasta la fecha, con la gran novedad de que, por primera vez en la historia del equipo sevillano, la motocicleta estará impulsada por un motor 100 % eléctrico. Edición tras edición se trabaja en la evolución y corrección de errores para progresar en el equilibrio que debe existir entre fiabilidad y rendimiento. Como si de una especie de mediana empresa de competición conformada y dirigida únicamente por estudiantes se tratara, el Feedback proporcionado es de vital importancia, facilitando la posibilidad de seguir mejorando año tras año.

## 1.3. Objetivo

Realización del diseño y simulación de las diferentes etapas de un cargador para la batería de la primera motocicleta eléctrica que será usada en la sexta edición de la Competición Internacional MotoStudent por el equipo sevillano US Racing, es decir, diseño y simulación de un dispositivo de conversión de potencia que, conectándolo a la red eléctrica y a una batería, sea capaz de convertir la corriente alterna de la red que lo alimenta en corriente continua, tal y como requiere la batería para ser cargada, adecuando dicha corriente eléctrica para cumplir unos requisitos determinados y ser suministrada a la batería para que esta recupere su carga energética.

### 1.4. Alcance

Todo buen diseño requiere de una fase previa en la que se lleve a cabo un estudio de los requisitos necesarios, así como de las limitaciones existentes que puedan afectar directa o indirectamente a este. Es por esto, por lo que para la consecución del objetivo propuesto se desarrollarán las tareas expuestas brevemente a continuación, estableciéndose así el alcance del proyecto.

- Análisis del medio físico que permite almacenar la energía en la motocicleta; batería.  
Se realizará un estudio previo, en el que se llevará a cabo la investigación y análisis de las características y especificaciones del tipo de celdas que contiene la batería. Se determinará el conexionado existente entre dichas celdas, empleado para la construcción del acumulador completo de acuerdo con las características y especificaciones recogidas en el reglamento de la competición. Para concluir con este análisis, se expondrán las características y especificaciones generales de la batería.
- Análisis del sistema de conversión de potencia que permite el intercambio energético entre el medio físico que almacena la energía y la red eléctrica; cargador.  
Se realizará un estudio previo, en el que se llevará a cabo la investigación de los posibles tipos de cargadores a diseñar, de acuerdo con las restricciones establecidas por el lugar de carga de la batería, el reglamento de la competición, así como el presupuesto del equipo. Se determinarán las especificaciones del cargador o acumulador completo. Para concluir con este análisis, se expondrán los diferentes métodos de carga existentes y se seleccionará aquel que resulte más adecuado para el tipo de batería del que se dispone.
- Diseño y simulación mediante el software de modelizado y simulación de sistemas por elementos finitos (MATLAB<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup>), de las diferentes etapas del sistema de conversión de potencia que mejor se adapten a las necesidades de la batería y del proyecto.

El tiempo de conceptualización, diseño y simulación disponible en un trabajo fin de grado ha de gestionarse de la mejor forma posible para conseguir, en este caso, el diseño y simulación de las diferentes etapas del cargador, el cual contrae, como todos los diseños una serie de complejidades en cuanto a fiabilidad, rendimiento y seguridad. Es por esto, por lo que se desestimarán factores como el efecto del envejecimiento de la batería tras varios ciclos de carga o la temperatura de esta en la fase de carga, siendo interesante en líneas futuras comprobar qué efecto produce en el funcionamiento final de éste y perfeccionar el sistema en caso de ser necesario.

### 1.5. Historia y estado del arte

Hoy en día, la industria del automóvil está evolucionando a gran velocidad hacia una electrificación cada vez más presente en la mayoría de los vehículos comerciales. Esto es posible gracias a los avances desarrollados en la Electrónica de Potencia.

Si bien el coche eléctrico e híbrido avanza poco a poco logrando cada vez más presencia en nuestras carreteras, la motocicleta eléctrica se ha convertido ya en un fenómeno que marca las tendencias de movilidad más inmediatas. Según los datos de ANESDOR, en España, más del 5 % de las motos que se comercializan son eléctricas y este crecimiento de la industria viene acompañado de los desarrollos tecnológicos nacidos en competiciones como el mundial de Moto-E. La optimización y desarrollo de baterías más eficientes para mejorar la autonomía, los estudios dinámicos de los sistemas de propulsión, la mejora en las prestaciones y la entrega de potencia o la implementación de sistemas de seguridad son algunos de los progresos que pasan de forma continua de los circuitos a nuestras calles [2].

Según el secretario general de ANESDOR, José María Riaño, “la moto eléctrica es un vehículo perfecto para circular en ciudad. Combina las ventajas ambientales que presenta la tecnología eléctrica y las de movilidad intrínsecas de la moto: contribución a la descongestión del tráfico, reducción de los tiempos de desplazamiento y ahorro económico para los usuarios tanto en la adquisición como en el mantenimiento en comparación con otros medios de transporte y vehículos eléctricos” [2].

La motocicleta eléctrica es un vehículo de dos ruedas que utiliza un motor eléctrico como medio de propulsión. La electricidad se almacena a bordo en una batería recargable, que será la encargada de alimentar dicho motor. Es por ello por lo que no produce contaminación atmosférica ni acústica.

La historia de la motocicleta eléctrica, contrariamente a lo que se tiende a pensar se remonta a muchos años atrás.

Se han encontrado referencias a patentes que sitúan el primer prototipo de motocicleta eléctrica a finales del año 1860. Pero no es hasta 1911 cuando, de acuerdo con un artículo publicado en la revista estadounidense *Popular Mechanics*, se dispone comercialmente de este medio de transporte [3].

Uno de los puntos de inflexión en el desarrollo de este tipo de vehículos se produce cuando el argentino Roberto Eugenio Gentile presenta en la Feria de Los Inventos de la capital Argentina de Buenos Aires, un vehículo biciclo impulsado por energía eléctrica, capaz de alcanzar 65 km/h y con una autonomía de 50 km. Gentile continuó con el desarrollo de estos vehículos obteniendo una patente de invención en 1996 en Argentina y el reconocimiento de la ONUDI [3].

Aunque ya había constancia de algunas marcas de motos eléctricas como la belga SOCOVEL, fue tras la presentación del prototipo creado en 1993 del Peugeot Scoot'Elec en el Mondial du deux roues de Paris celebrado en 1995, cuando el mercado de los vehículos eléctricos se vio impulsado. El Scoot'Elec fue el primer scooter eléctrico que se fabricó en serie durante 10 años y estaba basado en el Zenith de gasolina, con el que compartía elementos de carrocería y de suspensión. Contaba con tres baterías Saft colocadas en el lugar donde el conductor sitúa sus pies, tal y como se muestra en la Figura 1-1, logrando así un centro de gravedad muy bajo [4].



Figura 1-1. Peugeot Scoot'Elec [4].

Estas baterías eran de 18 V y 100 Ah, no siendo extraíbles de modo que la moto debía quedar cerca de un enchufe para ser cargada. La recarga era posible en solo 2 horas con el cargador interno de 1.4 kW, pero para una recarga completa con balanceo de celdas había que esperar 3 horas más. Si la carga aportada a la batería era excesiva, se apreció que se producía una degradación en el rendimiento de esta [4]. Debido a esto, desde sus inicios, el modo de recargar la batería ha sido un tema de crucial importancia.

Por aquel entonces, el ion-litio no se había normalizado en las baterías aún, empleándose baterías de níquel-cadmio (NiCd), populares entonces para pilas recargables de uso doméstico [4]. Hoy día, el uso de baterías de iones de litio ya está normalizado, hecho que permite que puedan ser recargadas en cualquier momento, incluso en el mismo día, ya que no se tiene que esperar a que acabe el ciclo completo de carga o descarga para que funcionen a pleno rendimiento a lo que se le añade el hecho del almacenamiento durante largos periodos de tiempo con un bajo nivel de autodescarga (inferior al 2 % al año). Además, las baterías hechas con iones de litio tienen una densidad de energía más elevada que las de níquel lo que permite que acumulen más carga por unidad de peso y volumen, con la posibilidad de fabricarlas compactas y ligeras [5]. La vida útil de este tipo de baterías está entre 800 y 1200 cargas, pero su desgaste es progresivo.

## **Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica**

Por otra parte, en la actualidad, existen motocicletas con la posibilidad de extraer sus baterías para proceder a la carga de estas fuera del vehículo. La diferencia que supone esto con respecto a su carga dentro del vehículo radica en el lugar en el que debe encontrarse el sistema de conversión AC/DC. En este caso, deberá situarse en un cargador<sup>1</sup> externo al vehículo.

Se ha demostrado que poco a poco las motocicletas eléctricas han ido conquistando el asfalto, pero aún quedan muchos kilómetros por recorrer.

---

<sup>1</sup> Los términos cargador y acumulador completo son sinónimos y en este texto se utilizarán indistintamente.



## 2 BATERÍA

El medio físico que permite el almacenamiento de energía en la motocicleta eléctrica es la batería. A lo largo de este capítulo se llevará a cabo la investigación y análisis de las especificaciones y características generales de la batería o acumulador completo a cargar, así como del tipo de celdas que contiene, indicando el conexionado existente entre ellas. Todo esto es necesario para el establecimiento de los requisitos necesarios, así como de las posibles limitaciones existentes en el diseño del dispositivo que procederá a su carga.

### 2.1. Características y especificaciones del tipo de celdas que contiene la batería

Para la construcción de la batería a cargar se han utilizado celdas de ion-litio tipo 18650-2500 mAh de la compañía *Far East First New Energy* cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Especificaciones celdas ion litio tipo 18650-2500 mAh compañía Far East First New Energy

Capacidad nominal	2500 mAh @ 0.5 C
Capacidad mínima	2450 mAh @ 0.5 C
Tensión nominal	3.6 V
Tensión de carga	4.2 ± 0.05 V
Tensión final de descarga	2.5 ± 0.05 V
Corriente nominal de carga	1250 mA
Corriente nominal de descarga	1250 mA
Resistencia interna	≤ 35 mΩ (AC impedancia, 1000 Hz)
Dimensión celda	Altura: 65.1 mm Diámetro: 18.4 mm
Peso	≤ 48 g

### 2.2. Determinación del conexionado de las celdas para la construcción de la batería

La construcción de la batería se debe hacer de acuerdo con las características y especificaciones recogidas en el reglamento de la competición.

Una batería recargable es un dispositivo que consta de una o más celdas electroquímicas conectadas entre sí, capaces de convertir la energía química almacenada en electricidad. Las especificaciones de la batería dependerán de las especificaciones de las celdas que la componen, así como del conexionado de dichas celdas entre sí.

Se optó por la construcción de la batería mediante la conexión serie y paralelo de las celdas electroquímicas de ion-litio anteriormente analizadas.

Para determinar el número exacto de celdas en serie y en paralelo con las que cuenta el acumulador completo o batería, se contemplaron los rangos de tensión y corriente establecidos por el reglamento de la competición y los pertenecientes a las celdas anteriormente nombradas.

Según el reglamento, el voltaje máximo del sistema de Alta Tensión, y por consiguiente del acumulador, se establece en 126 V, pero debido a que el inversor escogido para el proyecto trabaja a 120 V, se ha fijado dicha tensión como la máxima del sistema.

Una vez fijada la tensión máxima del acumulador, se necesita conocer la energía necesaria para completar las distintas pruebas de la competición. Para ello, se han tenido en cuenta, por una parte, referencias de tiempos de ediciones pasadas y, por otra parte, la necesidad de acabar las pruebas con un remanente de energía del 20 % aproximadamente, a partir del cual las celdas pierden rendimiento y pueden ser dañadas. Con estos datos, se establece la capacidad total de la batería en 11.9 kWh.

Tras el cálculo de la energía total necesaria y contando con las especificaciones de las celdas mostradas en la Tabla 2-1, se llega a la conclusión de que el acumulador ha de estar compuesto como máximo por un total de 28 celdas en serie debido a la limitación del inversor. Por otra parte, para alcanzar el objetivo de la capacidad total, cada uno de estos bloques deberá contar con 32 celdas en paralelo.

## 2.3. Características y especificaciones generales de la batería

### 2.3.1. Características

La batería a cargar, al estar compuesta por la disposición determinada anteriormente de celdas electroquímicas de ion-litio conectadas entre sí, es pues, una batería Li-Ion.

Estas baterías se componen de:

- Dos electrodos; un electrodo negativo (ánodo) y uno positivo (cátodo), conectados por medio de un material conductor iónico.

En este tipo de baterías, normalmente, el cátodo se encuentra formado por un compuesto de litio intercalado, un óxido de metal, pudiendo ser éste, por ejemplo, un compuesto químico llamado óxido de litio-cobalto ( $LiCoO_2$ ) u, óxido de fosfato de litio y hierro ( $LiFePO_4$ ) para evitar el uso de cobalto, un elemento químico caro y escaso. El ánodo generalmente se encuentra hecho de grafito, una variedad cristalográfica del carbono. El grafito tiene una estructura en capas. Estas capas se unen libremente de modo que los iones de litio separados puedan almacenarse muy fácilmente allí. Por tanto, solo es un medio de almacenamiento para iones de litio, no interviniendo en la reacción química de las celdas.

En una celda práctica, el grafito y el óxido de metal se recubren sobre láminas de cobre y aluminio. Estas láminas actúan como colectores de corriente. Las lengüetas positivas y negativas se pueden sacar fácilmente de dichos colectores [6].

- Electrolito

Es el nombre con el que se denomina al material conductor iónico por medio del cual se encuentran conectados los dos electrodos. Habitualmente, un electrolito puede ser ácido o alcalino por lo que a su química se refiere y líquido o sólido, por lo que a su fase se refiere. En el caso de las baterías Li-Ion, se emplea como electrolito una sal orgánica de litio. El electrolito actúa como protector, permitiendo únicamente el paso de iones a través de él, no permitiendo así, el paso de los electrones.

Si debido a alguna condición anormal, la temperatura interna de la celda aumenta, el electrolito líquido se secará y se producirá un cortocircuito entre el ánodo y el cátodo. Se puede provocar de este modo, un incendio o una explosión.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

Para evitar esta situación, se coloca una lámina muy delgada aislante entre los electrodos llamada separador. Los dos electrodos poseen potenciales electroquímicos diferentes, de ahí que se diga que las baterías Li-Ion se basan en el concepto de potencial electroquímico.

- Material separador

Como se indicó anteriormente, mientras que el electrolito actúa como nexo de unión, el separador consiste en una lámina muy delgada aislante que se sitúa entre las sustancias electroquímicamente activas de las zonas anódica y catódica con la finalidad de evitar posibles incidencias. Debido a su microporosidad, es permeable únicamente para los pequeños iones de litio.

Todos estos componentes se pueden apreciar en la Figura 2-1 y Figura 2-2.

Con respecto a su funcionamiento, las baterías Li-Ion se basan en el concepto de potencial electroquímico. El litio es un elemento químico que tiene en su última capa de valencia un único electrón, de modo que, tiende a querer perder dicho electrón. Por esta razón, el litio puro es un metal altamente reactivo, incluso reacciona con el agua y con el aire.

En las baterías de iones de litio, el litio en su forma pura es un metal reactivo mientras que cuando este forma parte de un óxido metálico es bastante estable. Si se supone que de algún modo se ha separado un átomo de litio de este óxido de metal, este átomo de litio será altamente inestable y se formará instantáneamente un ion de litio y un electrón. Sin embargo, el litio como parte del óxido de metal es mucho más estable que en el estado que se nombró anteriormente. Si se pudieran proporcionar dos caminos diferentes para el flujo de electrones y de iones de litio entre el átomo de litio y el óxido de metal, el átomo de litio alcanzaría automáticamente la parte de óxido de metal. Durante ese proceso, se ha producido electricidad. Queda claro con esto que se puede producir electricidad a partir del óxido de litio metálico si primero se separan los átomos de litio metálico del óxido de litio y, en segundo lugar, se guían a los electrones perdidos de dichos átomos de litio a través de un circuito externo.

A continuación, se explica cómo las celdas de iones de litio logran estos dos objetivos:

- Proceso de carga de una batería de iones de litio

Durante el proceso de carga, que se realiza conectando la batería a una fuente de energía externa, tal y como se puede apreciar en la Figura 2-1, los iones de litio cargados positivamente (representados por círculos naranjas en dicha figura) situados en el electrodo positivo abandonarán este, siendo atraídos hacia el electrodo negativo y fluyendo hacia este través del electrolito. Los iones de litio alcanzarán pues el grafito, insertándose entre las capas atómicas de este material y quedando atrapados allí. Los electrones también fluyen desde el electrodo positivo al negativo, pero lo hacen a través del circuito externo ya que no pueden fluir a través del electrolito para alcanzar la capa de grafito. Cuando ya no fluyen más iones, es decir, una vez que todos los átomos de litio llegan a la lámina de grafito, la celda está completamente cargada y lista para ser usada.

En este proceso, la batería almacena energía dado que el potencial electroquímico del grafito es más elevado que el del óxido de metal y, por consiguiente, los iones de litio tienen que “subir” desde el potencial que se encuentran en el cátodo, hasta el del ánodo [7].

De esto modo se logra el primer objetivo, que son los iones de litio y los electrones desprendidos del óxido de metal. Este es un estado inestable para dichos elementos.

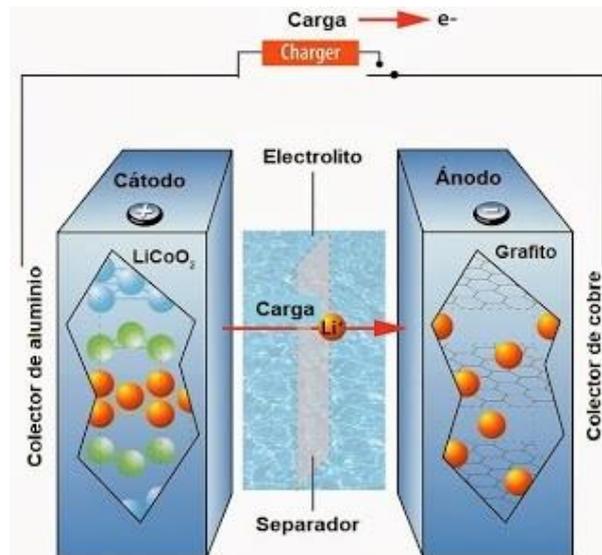


Figura 2-1. Proceso de carga de una batería Li-Ion con cátodo formado por óxido de litio-cobalto [7].

- Proceso de descarga de una batería de iones de litio

Debido a que como se mencionó anteriormente, al finalizar el proceso de carga de una batería Li-Ion, el estado en el que se encuentran los átomos de litio es inestable, tan pronto como se retire la fuente de energía externa y se conecte una carga<sup>2</sup>, los iones de litio desearán volver a su estado estable como parte del óxido de metal. Debido a esta tendencia, tal y como se muestra en la Figura 2-2, los iones de litio (representados por círculos naranjas en dicha figura) fluyen de regreso desde el ánodo hacia el cátodo a través del electrolito. Los electrones también viajan desde el ánodo hacia el cátodo, pero lo hacen a través del circuito exterior. Cuando todos los iones de litio se hayan desplazado de vuelta al electrodo de óxido de metal, la batería estará completamente descargada.

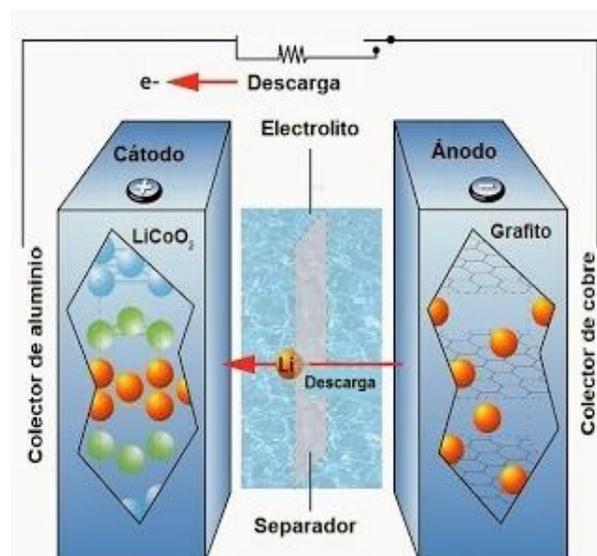


Figura 2-2. Proceso de descarga de una batería Li-Ion con cátodo formado por óxido de litio-cobalto [7].

<sup>2</sup> Se denomina carga a un elemento que consume potencia.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

En este proceso, la batería cede energía dado que los iones de litio en el grafito están a un potencial electroquímico más alto del que tenían en el óxido de metal y, por lo tanto, “bajan” su potencial electroquímico, razón por la cual aportan energía al circuito al que se conecten [7].

De este modo se logra el segundo objetivo, que es obtener una corriente eléctrica a través de la carga, permitiendo así que el dispositivo conectado a la batería pueda realizar su función.

### 2.3.2. Especificaciones

Las especificaciones generales del acumulador completo o batería se muestran en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Especificaciones acumulador completo

Tensión nominal	$100.8 \pm 1.40 \text{ V}$
Tensión de carga	$117.6 \pm 1.40 \text{ V}$
Corriente nominal	40 A
Capacidad	80 Ah
Número de celdas en serie	28 celdas
Número de celdas en paralelo	32 celdas



## 3 CARGADOR

El medio físico que permite el almacenamiento de energía en la motocicleta, presentado en el capítulo anterior (batería de iones de litio) debe ser debidamente manejado, así como correctamente cargado para disponer de toda su capacidad y conservar su vida útil. Es por ello que requiere de un sistema de conversión de potencia para facilitar el intercambio energético con la red eléctrica cuando requiera de esta para ser recargado. En este caso, el sistema de conversión de potencia es el cargador. De este modo, la electrónica de potencia resulta una tecnología fundamental para la conexión a red de los sistemas de almacenamiento de energía.

A lo largo de este capítulo se llevará a cabo la investigación de los posibles tipos de cargadores a diseñar, eligiendo aquel tipo que mejor se adecúe a los requisitos y presupuesto disponible, cumpliendo con la protección, seguridad y fiabilidad que le son imprescindibles. Se determinarán las especificaciones tanto de entrada como de salida del cargador o acumulador completo y se expondrán los diferentes métodos de carga existentes para proceder a la selección de aquel que resulte más adecuado para el tipo de batería del que se dispone.

### 3.1. Investigación de los posibles tipos de cargadores y elección del tipo de cargador a diseñar

Todas las baterías del mercado se cargan en continua. La red proporciona alterna, por tanto, para cargar una batería desde la red eléctrica se tiene que llevar a cabo una transformación de corriente alterna a corriente continua. Esta transformación se realiza empleando un circuito electrónico denominado convertidor AC/DC, también conocido como rectificador, que puede estar ubicado dentro o fuera del vehículo.

#### 3.1.1. Tipos de cargadores

##### 3.1.1.1. Según el lugar donde se lleva a cabo la conversión AC/DC

En la actualización de la norma UNE/IEC 61851-1 se contemplan dos grupos de cargadores teniendo en cuenta el lugar donde se lleva a cabo la conversión AC/DC, es decir, teniendo en cuenta el lugar donde se encuentra ubicado el rectificador:

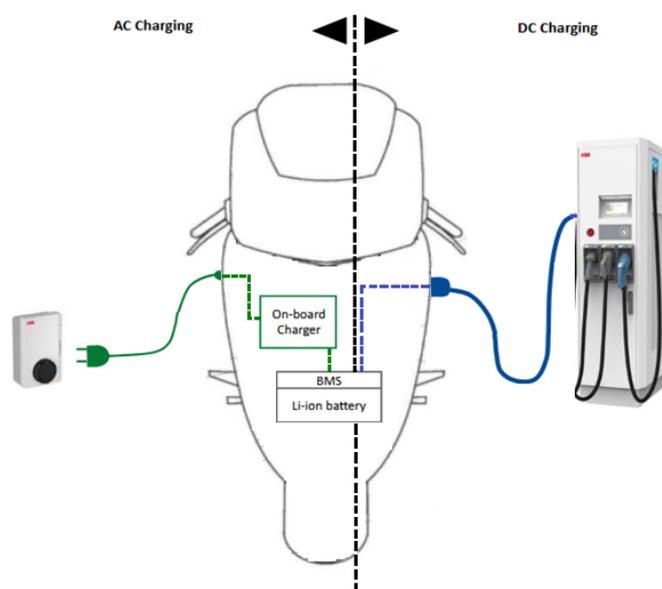


Figura 3-1. A la izquierda cargador on-board, a la derecha cargador off-board.

- Cargadores on-board (cargador de a bordo o embarcado)

Estos cargadores se encuentran situados dentro del vehículo tal y como se muestra en la parte izquierda de la Figura 3-1. De este modo, se lleva a cabo el proceso de conversión AC/DC en el interior del vehículo.

- Cargadores off-board

Estos cargadores se encuentran situados fuera del vehículo tal y como se muestra en la parte derecha de la Figura 3-1. De este modo, el proceso de conversión AC/DC no se lleva a cabo en el interior del vehículo, sino que se lleva a cabo fuera de este, en el cargador, siendo aquí donde se encuentra ubicado pues el rectificador.

### 3.1.1.2. En función de su clase de aislamiento

En la norma anteriormente nombrada (UNE/IEC 61851-1), desde las definiciones iniciales, se describen dos clases de cargadores en función de su clase de aislamiento:

- Cargadores Clase I

Corresponden a los cargadores con aislamiento y protecciones básicas y con terminal de conexión y tierra.

- Cargadores Clase II

Corresponden a los cargadores con aislamiento reforzado y protecciones suplementarias.

Para evitar confusiones, se recuerda que es preceptivo que todos los cargadores dispongan de un dispositivo de protección diferencial con protección mínima equivalente al tipo A (Residual Current Device) y protección contra sobrintensidades (magnetotérmico o similar). Así pues, los sistemas de recarga, además de realizar la función para la que han sido diseñados, deben garantizar la seguridad y que los diversos parámetros eléctricos se mantengan dentro de ciertos intervalos, cumplimiento con los requisitos establecidos en las Directivas 2006/95/CE (Baja Tensión) y la 2004/108/CE sobre Compatibilidad Electromagnética. [9]

### 3.1.1.3. En función del modo de gestión del flujo de energía entre el vehículo y la red

Los cargadores pueden dividirse en dos grandes grupos en función de cómo gestionan el flujo de energía entre el vehículo y la red, tal y como se puede apreciar en la Figura 3-2.

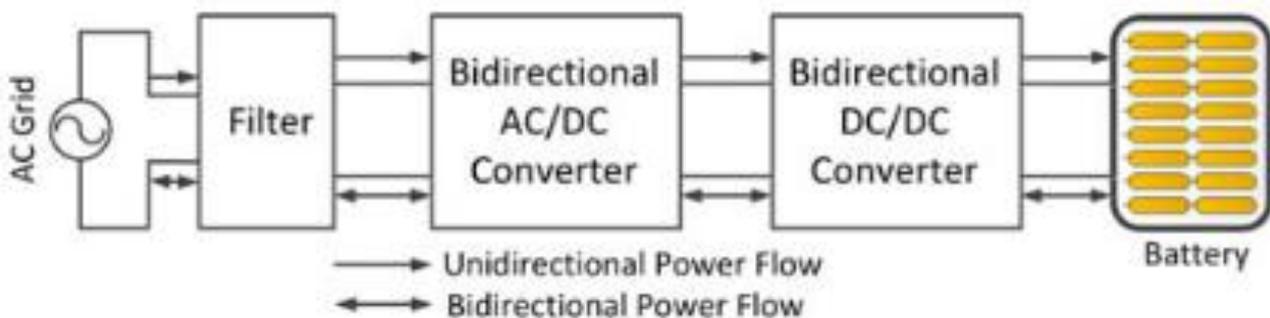


Figura 3-2. Topología general flujo de energía unidireccional/bidireccional [10].

- Cargadores unidireccionales

Los cargadores unidireccionales pueden cargar la batería, pero no inyectar energía a la red.

## **Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica**

- Cargadores bidireccionales

Los cargadores bidireccionales permiten tanto cargar la batería como inyectar energía a la red. Este último sentido se conoce como V2G.

### **3.1.1.4. En función del modo de su configuración de conexión a red**

Existen dos posibles configuraciones de conexión a red y con ellas, dos posibles tipos de cargadores:

- Cargadores con conexión a red del tipo monofásica, comúnmente conocidos como cargadores monofásicos.

Este tipo de cargadores partirán de una red eléctrica de corriente alterna monofásica con una tensión de alimentación de 230 V eficaces y frecuencia 50 Hz (Europa) o 60 Hz (otros países como EEUU o Japón).

- Cargadores con conexión a red del tipo trifásica, comúnmente conocidos como cargadores trifásicos.

Este tipo de cargadores partirán de una red eléctrica de corriente alterna trifásica con una tensión de alimentación de 400 V eficaces y frecuencia 50 Hz (Europa) o 60 Hz (otros países como EEUU o Japón).

### **3.1.2. Elección del tipo de cargador a diseñar**

Teniendo en cuenta que la batería de la motocicleta será extraída de esta para ser cargada, la primera restricción en el diseño del cargador viene dada por el lugar en el que debe situarse el rectificador. Este debe encontrarse en el cargador y no en el interior del vehículo. Es por esto por lo que se opta por el diseño de un cargador off-board.

Por otra parte, el cargador a diseñar busca poder cargar la batería, pero en principio no requiere la inyección de energía a la red. Sin embargo, el equipo pide el diseño de un cargador bidireccional por su mayor rango de funciones que podrían ser de utilidad en futuras ediciones.

El reglamento de la competición permite tanto la elaboración y empleo de un cargador con conexión a red tipo monofásica como con conexión tipo trifásica. Teniendo en cuenta que tras su diseño se procederá a su montaje, se busca la elaboración de un cargador que sea compacto y económico (cumpliendo con todos los requisitos necesarios). La simplicidad en el diseño es un aspecto clave para conseguirlo. Por otra parte, la instalación monofásica es la instalación habitual, de modo que la elaboración de un cargador monofásico permitiría la carga de la batería en un mayor número de lugares, mientras que la elaboración de un cargador trifásico únicamente permitiría la carga de la batería en puntos que contarán con una instalación trifásica. Tomando en consideración todos los factores nombrados anteriormente, se opta por el diseño de un cargador monofásico.

Por último, se debe tener en cuenta que lo más habitual es que a la misma red a la que se encuentra conectado el cargador, se encuentren conectados más receptores, con los que podrá interferir, pudiendo interferir también con otros aparatos o elementos del entorno. Es por esto por lo que se opta por el diseño de un cargador que cumpla con la normativa de compatibilidad electromagnética. Se toma la norma europea EN 61000-3-2, como la norma análoga a la de la Comisión Electrónica Internacional que regula los límites de emisión de armónicos por parte de los dispositivos electrónicos.

## **3.2. Determinación de las especificaciones del cargador o acumulador completo**

### **3.2.1. Especificaciones de entrada**

Al llevar a cabo el diseño de un cargador monofásico, se partirá de una red eléctrica de corriente alterna monofásica con una tensión de alimentación de 230 V eficaces y frecuencia 50 Hz.

### 3.2.2. Especificaciones de salida

La tensión en cada celda en ningún caso debe superar su tensión de carga (4.2 V), ya que, si el cargador intenta llegar a los 4.2 V/celda durante la carga, el BMS va a abrir el contactor del que dispone para evitar la entrada de intensidad a la batería, impidiendo así dañarla debido a una tensión en las celdas superior a su tensión de carga. Es por esto por lo que se recomienda no establecer una tensión máxima de salida del cargador muy cercana al límite. Este límite se calcula teniendo en cuenta la tensión de carga de cada celda (4.2 V/celda) y el número de celdas en serie con las que cuenta el acumulador (28). Se muestra el valor obtenido en la expresión (2.1).

$$4.2 \text{ V/celda} \cdot 28 \text{ celdas} = 117.6 \text{ V} \quad (2.1)$$

Se opta por un valor de tensión máxima de salida del cargador de 110 V, de modo que se dispone de un margen aceptable entre dicho valor y el valor límite de la tensión de salida del cargador.

Por otra parte, estudios realizados por la Real Academia de Ingeniería recomiendan la carga de una batería Li-Ion a una tasa de carga inferior a 1C, ya que es habitual que, si se supera dicha tasa de carga, se acelere la degradación de las celdas, reduciéndose su vida útil y en situaciones de sobrecarga, el material catódico podría colapsar, provocando una explosión [1]. La mayoría de los fabricantes recomiendan si es posible, una tasa de carga de 0.1C, aunque esto suponga en condiciones ideales un tiempo de carga de 10 horas. La tasa de carga de corriente constante especificada por el fabricante es la velocidad de carga máxima que la batería puede tolerar sin ser dañada. Un valor de tasa de carga igual a 0.1C permite que la corriente máxima del convertidor sea más pequeña, facilitándose así el diseño y permitiéndose la elaboración de un cargador más compacto y económico. Es por esto por lo que se opta por una tasa de carga de este valor (0.1C). Tomando en consideración dicho valor, teniendo en cuenta el número de celdas en paralelo con las que cuenta el acumulador (32) y que la corriente en cada celda no debe superar su valor de corriente nominal de carga (1.25 A), se establece el límite de corriente a la salida del cargador. Se puede apreciar el valor de dicho límite en la expresión (2.2).

$$1.25 \text{ A/celda} \cdot 32 \text{ celdas} \cdot 0.1C = 4 \text{ A} \quad (2.2)$$

Las especificaciones del acumulador completo son pues:

- Tensión de alimentación de 230 V eficaces y frecuencia 50 Hz.
- Valor de tensión máxima de salida de 110 V.
- Límite de corriente a la salida de 4 A.

## 3.3. Investigación de los diferentes modos de carga y elección del más adecuado

De acuerdo con [11], la carga de la batería es el aspecto más importante en los sistemas de gestión de baterías, por lo que se debe elegir el modo de carga más adecuado.

### 3.3.1. Modos de carga atendiendo a los distintos sistemas de control

La carga puede ser entregada a la batería según diferentes esquemas de carga, dependiendo de la química de la batería. Como resultado de la diversidad en los sistemas de baterías y sus aplicaciones, los algoritmos de carga son también variados. Por ejemplo, algunos algoritmos de carga son adecuados para cargadores solares, otros son adecuados para cargadores de baterías de una sola química, mientras que otros son apropiados para cargadores de baterías de varias químicas [12].

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

Atendiendo a los distintos sistemas de control, se pueden diferenciar varios modos de carga:

### 3.3.1.1. Corriente constante

Aplicando este modo de carga, se inyecta una corriente constante a la batería durante todo el periodo de carga de esta, que produce un aumento gradual de la tensión del voltaje de carga hasta que este último alcanza su valor límite superior. Se puede apreciar en la Figura 3-3 la evolución a lo largo del tiempo de la corriente inyectada a la batería y de la tensión en bornes de la misma cuando esta se carga a corriente constante.

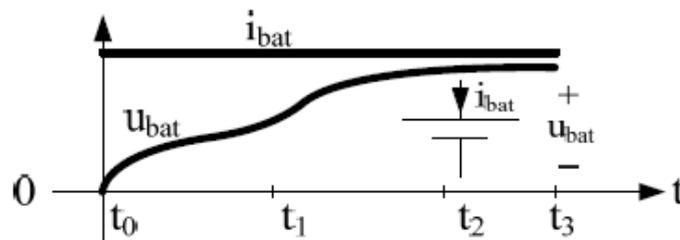


Figura 3-3. Tensión y corriente a lo largo del tiempo cuando una batería se carga a corriente constante [13].

Los cargadores que emplean el modo de carga a corriente constante no tienen en cuenta los procesos electroquímicos que se producen en el interior de la batería y, por tanto, no optimizan el rendimiento de esta, ya que en este tipo de cargadores suele ocurrir que el suministro de carga a la batería se hace de modo que las reacciones químicas que se llevan a cabo estén localizadas en la superficie del electrodo [14].

Se usa generalmente en baterías de níquel-cadmio (NiCd) y níquel-metal-hidruro (Ni-MH).

### 3.3.1.2. Tensión constante

Es muy importante destacar que este modo de carga no es apto para baterías de litio.

En este modo de carga, se aplica una tensión constante en los bornes de la batería que produce una disminución gradual de la corriente de carga. En los primeros instantes del proceso de carga, en los que la batería se encuentra prácticamente descargada, los valores de corrientes son valores elevados, pero conforme el estado de carga va evolucionando y la batería se va cargando, dichos valores de corriente van disminuyendo. Se puede apreciar en la Figura 3-4 la evolución a lo largo del tiempo de la corriente inyectada a la batería y de la tensión en bornes de la misma cuando esta se carga a tensión constante.

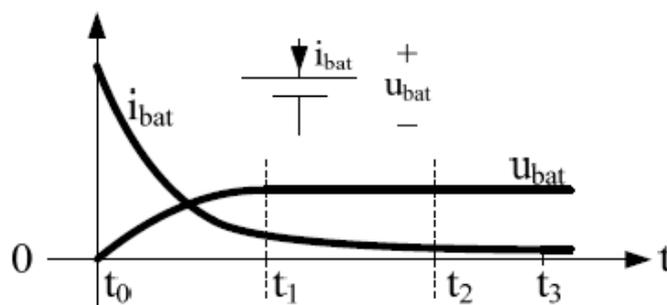


Figura 3-4. Tensión y corriente a lo largo del tiempo cuando una batería se carga a tensión constante [13].

La ventaja de los cargadores que emplean este modo de carga es que la carga es más rápida que a corriente constante. Sin embargo, este modo de carga tampoco tiene en cuenta los procesos electroquímicos en el interior de la batería, resultando en significativos efectos negativos a largo plazo [14].

### 3.3.1.3. Por pulsos

Aplicando este modo de carga, se inyectan a la batería pulsos de corriente de una duración determinada ( $T_{carga}$  de hasta un segundo) intercalados por periodos cortos de no carga, reposo o descanso ( $T_{descanso} \approx 20/30$  segundos). Estos últimos permiten que se establezcan las reacciones químicas que se llevan a cabo en el interior de la batería antes de reiniciar de nuevo el proceso de carga. Se puede apreciar en la Figura 3-5 la evolución a lo largo del tiempo de la corriente inyectada a la batería cuando esta se carga por pulsos.

La velocidad de carga (basada en la corriente media inyectada a la batería) puede controlarse con precisión variando la anchura de los pulsos.

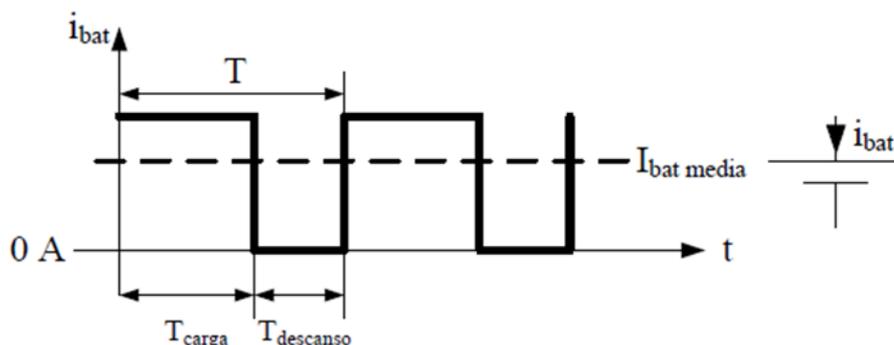


Figura 3-5. Tensión y corriente a lo largo del tiempo cuando una batería se carga por pulsos [13].

Una desventaja de este método es que puede desarrollar reacciones químicas no deseadas en la superficie del electrodo tales como formación de gases, o el crecimiento de cristales.

Existen distintos modos de carga por pulsos dependiendo de la forma en la que se apliquen los pulsos, la duración de estos, etc. Por ejemplo: carga por pulsos con un único pulso de descarga intercalado en el tiempo de descanso, carga por pulsos con varios pulsos de descarga intercalados en el tiempo de descanso, carga a pulsos con un único pulso de descarga sin tiempo de descanso...

### 3.3.1.4. Corriente constante / tensión constante (CC/CV)

Este modo de carga combina la carga a corriente constante y la carga a tensión constante.

Se usa generalmente para baterías de litio y otro tipo de baterías que pueden ser vulnerables a daños si se sobrepasa el valor límite de tensión superior. La tasa de carga de corriente constante especificada por el fabricante es la velocidad de carga máxima que la batería puede tolerar sin ser dañada. Se necesitan precauciones especiales para maximizar la tasa de carga y para asegurarse de que la batería está completamente cargada mientras que al mismo tiempo se evita la sobrecarga. Por esta razón, se recomienda que el método de carga cambie de corriente constante a tensión constante antes de que la tensión en bornes de la batería alcance su límite superior. Debe tenerse en cuenta que esto implica que los cargadores de las células de iones de litio deben ser capaces de controlar tanto la corriente de carga como la tensión en bornes de la batería [15].

En este modo de carga, el proceso de carga se puede dividir en 4 fases:

- Fase 1: pre-acondicionamiento.

Esta etapa únicamente se llevará a cabo si la batería se encuentra profundamente descargada, por ejemplo, por debajo de 3 V/elem. En estas condiciones el cargador realiza un pequeño pre-acondicionamiento aplicando un 10% de la corriente máxima.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

- Fase 2: carga a corriente constante.

Esta fase se puede apreciar en el intervalo  $[t_0, t_1]$  de la Figura 3-6 en la que se muestra la tensión y corriente a lo largo del tiempo cuando una batería se carga a corriente constante/tensión constante. En esta fase se proporciona a la batería una corriente constante controlada que produce un aumento gradual del voltaje de carga hasta que dicho voltaje alcanza un nivel preestablecido, normalmente, su valor límite superior. Una vez alcanzado dicho valor, comienza el proceso de carga a tensión constante.

- Fase 3: carga a tensión constante.

Esta fase se puede apreciar en el intervalo  $[t_1, t_2]$  de la Figura 3-6 en la que se muestra la tensión y corriente a lo largo del tiempo cuando una batería se carga a corriente constante/tensión constante. En esta fase se proporciona a la batería una tensión constante controlada que produce una disminución gradual de la corriente de carga hasta que dicha corriente alcanza un valor mínimo determinado que se corresponde con el alcance de la capacidad total de la batería. Una vez alcanzada esta capacidad total, la carga propiamente dicha finaliza y se comienza el régimen de flotación, también conocido como fase de mantenimiento.

- Fase 4: mantenimiento o régimen de flotación.

Esta fase se puede apreciar en el intervalo  $[t_2, t_3]$  de la Figura 3-6 en la que se muestra la tensión y corriente a lo largo del tiempo cuando una batería se carga a corriente constante/tensión constante. Este régimen no es propiamente de carga, sino de compensación de fugas de la batería. En él, la tensión se disminuye a un valor tal que se compensen las fugas de la batería para que esta no se vaya descargando lentamente con el transcurso del tiempo. Al disminuirse la tensión, también se disminuye la corriente [13].

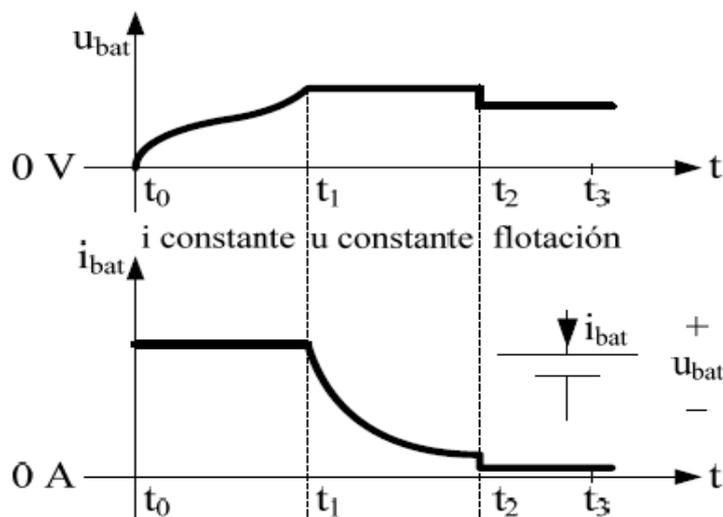


Figura 3-6. Tensión y corriente a lo largo del tiempo cuando una batería se carga a CC/CV [13].

### 3.3.2. Elección del modo de carga más adecuado para la batería

De acuerdo con lo expuesto anteriormente y con [12], para realizar una carga de forma efectiva y segura utilizando una batería formada por iones de litio, el método de control de carga requerido es el conocido como corriente constante/tensión constante (CC-CV).



Es habitual que los cargadores se diseñen de forma que sean lo más económicos posible. En el caso de este proyecto, tras el diseño del cargador se procederá a su montaje de modo que, esta premisa es de gran importancia. La simplicidad en el diseño es un aspecto clave para conseguirlo.

A lo largo de este capítulo se llevará a cabo la elección de la topología del circuito de potencia completo que permite el intercambio energético entre la red eléctrica y la batería cuando esta última requiera ser cargada, así como el estudio detallado de cada una de las etapas con las que consta dicha topología con el fin de seleccionar la configuración más adecuada para cada una de ellas.

## 4.1. Selección de la topología del circuito de potencia

Para llevar a cabo el diseño del circuito de potencia completo del cargador, además de tenerse en cuenta la forma de la corriente y tensión de salida, la cual vendrá dada por el modo de carga seleccionado, también se deberá evaluar cómo es la corriente que el cargador demanda a la red para no inyectar armónicos de corriente a esta y cumplir con la normativa de compatibilidad electromagnética.

Como se decidió y justificó en el capítulo anterior, se diseñará un cargador monofásico, off-board y bidireccional que deberá cumplir con la normativa de compatibilidad electromagnética y contar con aislamiento galvánico. El control de la carga de la batería se hará empleando el método CC-CV. Teniendo en cuenta todo esto, la topología del circuito de potencia completo del cargador, enumerando desde la red hacia la batería debe constar de tres etapas:

1. Etapa de entrada AC/AC que reduzca la tensión de red y proporcione aislamiento galvánico.
2. Etapa que lleve a cabo el proceso de conversión AC/DC, es decir, que sea capaz de convertir la corriente alterna proporcionada por la etapa de entrada en corriente continua, tal y como requiere la batería para ser cargada. Además, como se desea que el cargador a diseñar no introduzca distorsión a la red, cumpliendo así con la normativa de compatibilidad electromagnética, la corriente demandada a la red tiene que ser lo más parecida posible a una senoide. De este modo, esta etapa se encarga de ello mediante la corrección del factor potencia, siendo pues una etapa PFC.
3. Etapa DC/DC reductora que adecue los niveles de continua (tensión y corriente) proporcionados por la etapa AC/DC, de acuerdo con el método de control de carga requerido para realizar la carga de la batería de forma efectiva y segura (control CC-CV). Ha de ser reductora porque la etapa AC/DC que la precede, al ser una etapa PFC, eleva la tensión.

El diagrama de bloques general del cargador a diseñar es pues el mostrado en la Figura 4-1.



Figura 4-1. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar.

Se debe diseñar cada etapa del diagrama de bloques general del cargador por separado, conociendo respectivamente, las condiciones de entrada y de salida de cada una de ellas. Se asumirá que la etapa anterior a la que se procede a estudiar funciona correctamente y de este modo, se fijarán las condiciones de entrada. Para el caso de la salida, se emulará la carga conectada a cada etapa con una resistencia que consuma la potencia máxima con la que se va a trabajar. De este modo, se obtendrán los valores de los componentes de cada una de las etapas.

Una vez diseñadas todas las etapas, sería interesante evaluar el sistema completo para comprobar que no se comporta de forma inestable.

Se comenzará diseñando desde la batería hacia la red, de modo que la primera etapa a diseñar será la etapa DC/DC reductora, continuando con la etapa AC/DC correctora del factor de potencia y finalizando con la etapa AC/AC.

#### 4.1.1. Etapa DC/DC reductora

Los convertidores DC/DC son sistemas de electrónica de potencia con un amplio rango de uso. Su función es adaptar la naturaleza de la energía eléctrica a las necesidades de la carga. Dentro de los convertidores DC/DC, cuando se requiere aplicar una tensión a la carga menor que la tensión de entrada, como es el caso que nos ocupa, se emplea un convertidor DC/DC reductor. El esquema básico de este tipo de convertidor (cuando se desea que sea bidireccional) se muestra en la Figura 4-2.

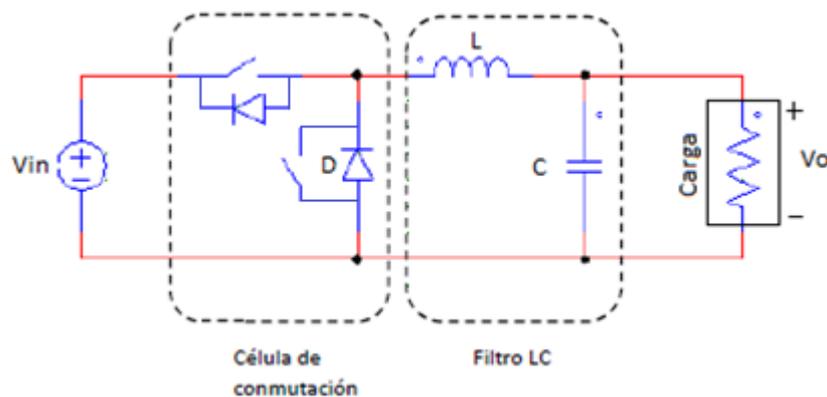


Figura 4-2. Esquema básico de un convertidor DC/DC reductor.

Este tipo de convertidor DC/DC operando en modo de conducción continua (MCC) es ideal por su alto rendimiento y la escasa utilización de componentes en su montaje. Teóricamente un convertidor reductor tiene un rendimiento del 100%, aunque en la realidad esto no se hace posible debido a las pérdidas estáticas y dinámicas que se llevan a cabo en sus elementos semiconductores. No obstante, se consiguen rendimientos por encima del 95%, muy superior a lo conseguido con otros sistemas de potencia. Es por ello por lo que, para la adaptación de los niveles de continua (tensión y corriente) proporcionados por la etapa AC/DC, de acuerdo con el método de control de carga requerido para la realización de la carga de la batería de forma efectiva y segura, se selecciona una etapa DC/DC reductora. Con respecto a esta etapa empleada para conectar el sistema de carga a la batería, podría ser interesante que estuviera compuesta por varios convertidores DC/DC reductores conectados en paralelo. En ciertas ocasiones se recomienda esta estructura principalmente por dos motivos:

1. En el caso de que la carga tenga que ser una carga rápida y los requerimientos de corriente sean grandes, permite repartir las corrientes de carga entre los convertidores conectados.
2. Al emplear una conexión en paralelo, los convertidores se operarán en INTERLEAVING. Esto no es más que aplicar las portadoras triangulares de cada convertidor con un cierto desfase ( $360^\circ / \text{número de convertidores en paralelo}$ ), permitiéndose así que las corrientes de salida tengan más calidad. De este modo, la vida útil de la batería aumentará.

En el caso abordado en este proyecto, como el requerimiento de corriente es pequeño (4 A), el punto 1 no es clave, pero podría ser interesante colocar varios convertidores en paralelo por la ventaja destacada en el segundo de los puntos. Esto a costa de hacer el convertidor más caro, pero aseguraría la vida útil de la batería. El número ideal de etapas reductoras a colocar en paralelo vendría determinado por el rizado máximo de corriente que admite la batería. Teniendo en cuenta que la batería empleada no tiene una restricción estricta con respecto al rizado máximo de corriente que admite y, por otra parte, que como se muestra en la Figura 4-2 un convertidor reductor cuenta a la salida con un filtro LC, no se deberían necesitar muchas etapas. De hecho, se comenzará diseñando la etapa con un único convertidor DC/DC reductor, de modo que el diagrama de bloques general del cargador a diseñar teniendo en cuenta esto, queda como se muestra en la Figura 4-3.

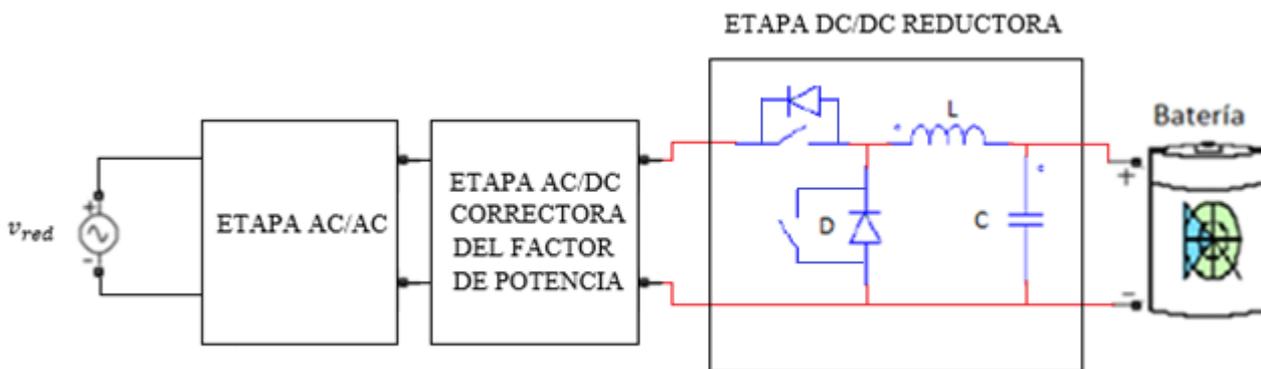


Figura 4-3. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar una vez seleccionada la etapa DC/DC reductora.

A la salida de la etapa, como se muestra en la Figura 4-3 se encuentra conectada la batería. Para proceder al cálculo de los diferentes componentes de la etapa (L y C), se debe emular dicha carga mediante una resistencia que consuma la potencia máxima que se necesita inyectar en la batería. A esta resistencia se le denomina  $R_{bateria}$ , de modo que el diagrama de bloques teniendo en cuenta esta modificación queda como se muestra en la Figura 4-4.

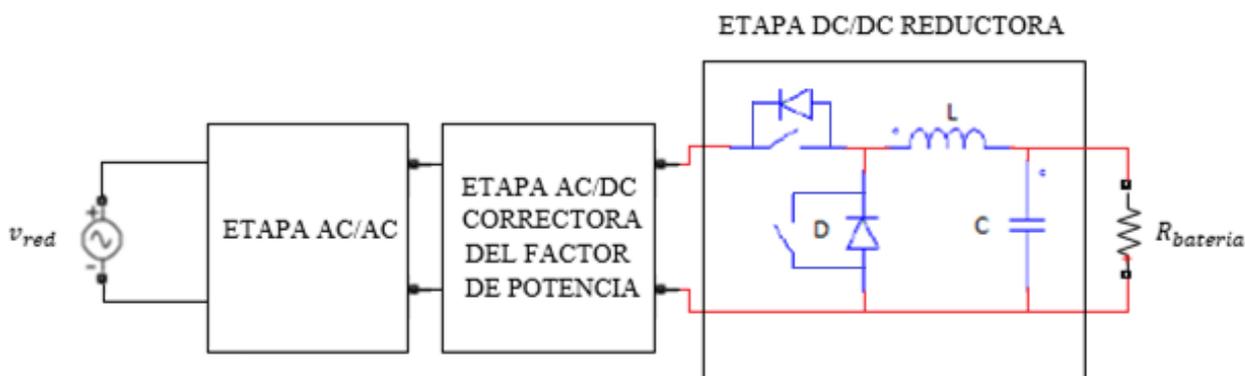


Figura 4-4. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar una vez seleccionada la etapa DC/DC reductora considerando  $R_{bateria}$ .

Para conocer el valor de la potencia máxima que se necesita inyectar en la batería, se ha de considerar las especificaciones de salida de la etapa, las cuales coinciden con las especificaciones de salida del cargador:

- Intervalo de tensión de salida

- Tensión mínima en la batería ( $V_{o_{min}}$ )

Para determinar la tensión mínima en la batería se toma en consideración que no es recomendable que en ningún momento la batería se descargue por completo, ya que como se mencionó, si la tensión en una celda de litio desciende por debajo de 2 V se produce en ella una reacción química que afecta a la vida útil de esta. De este modo, y teniendo en cuenta que en las especificaciones de las celdas de iones de litio que componen la batería (tabla 2-1), la tensión final de descarga se considera 2.5 V y la batería cuenta con 28 celdas en serie, la tensión mínima en la batería se considera de 70 V.

- Tensión máxima en la batería ( $V_{o_{max}}$ )

La tensión máxima en la batería se calculó anteriormente en [3.2.2] y su valor es de 110 V.

El intervalo de tensión de salida de dicha etapa es pues:  $V_o \in [70 \text{ V}, 110 \text{ V}]$ .

- Intervalo de corriente de salida

- Corriente máxima que se inyecta en la batería ( $I_{o_{max}}$ )

El límite de corriente que admitirá la batería se calculó anteriormente en [3.2.2] y su valor es de 4 A.

- Corriente mínima que se inyecta en la batería ( $I_{o_{min}}$ )

Para determinar la corriente mínima que se inyectará a la batería se toma en consideración que en el caso de que la batería se encuentre profundamente descargada, el cargador realizará un pequeño acondicionamiento aplicando a la batería una corriente del 10% de la corriente máxima. De este modo, la corriente mínima que admitirá la batería tiene un valor de 0.4 A.

El intervalo de corriente de salida de dicha etapa es pues:  $I_o \in [0.4 \text{ A}, 4 \text{ A}]$ .

Teniendo en cuenta estas especificaciones, se procede al cálculo de la resistencia que emulará a la batería, teniendo en cuenta, que esta resistencia debe consumir la potencia máxima que se necesita inyectar a la batería, siendo esta última 440 W, tal y como se muestra en la expresión (4.1).

$$P_{o_{max}} = V_{o_{max}} \cdot I_{o_{max}} = 110 \text{ V} \cdot 4 \text{ A} = 440 \text{ W} \quad (4.1)$$

Considerando la ley de Ohm, como se muestra en la expresión (4.2) se puede obtener el valor de la resistencia que consume la potencia máxima, siendo este 27.5  $\Omega$ .

$$P_{o_{max}} = \frac{V_{o_{max}}^2}{R_{bateria}} \rightarrow R_{bateria} = \frac{V_{o_{max}}^2}{P_{o_{max}}} = \frac{(110 \text{ V})^2}{440 \text{ W}} = 27.5 \Omega \quad (4.2)$$

Por otra parte, es muy importante considerar que los convertidores reductores habitualmente tienen un factor de reducción entre 1 y 2.5 respecto a su tensión de entrada. El motivo de esto es que, a efectos prácticos, se vuelven muy ineficientes para mayores reducciones debido a los efectos de los dispositivos de potencia reales. Teniendo en cuenta esto y conociendo la tensión mínima que se va a tener en la batería, se puede definir cuál debe ser el valor de tensión a la entrada de dicha etapa. Si se considera un factor de reducción igual a 2, tal y como se muestra en la expresión (4.3), se obtiene que el valor de la tensión a la entrada de dicha etapa ha de ser de 140 V.

$$V_{in} = V_{DC} = V_{o_{min}} \cdot f_{red} = 70 \text{ V} \cdot 2 = 140 \text{ V} \quad (4.3)$$

Teniendo en cuenta todo lo anterior, tal y como se muestra en la Figura 4-5, se puede completar la Figura 4-4 con el valor de la resistencia obtenido en la expresión (4.2) así como con las especificaciones de entrada y salida de la etapa de estudio.

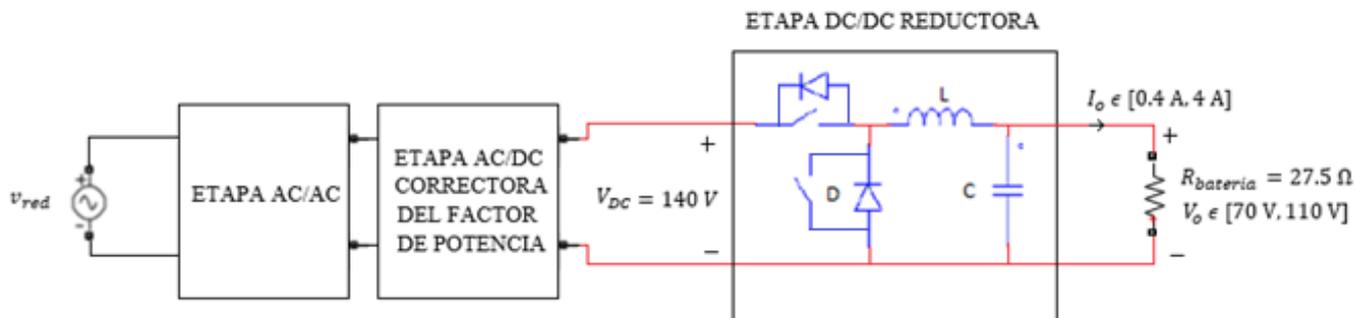


Figura 4-5. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar con las especificaciones de entrada y salida de la etapa DC/DC reductora considerando  $R_{bateria}$ .

Para aislar la etapa que nos ocupa, basta con colocar a la entrada de esta una fuente de tensión continua de valor  $V_{CD} = 140 \text{ V}$ . De este modo, se obtiene la Figura 4-6.

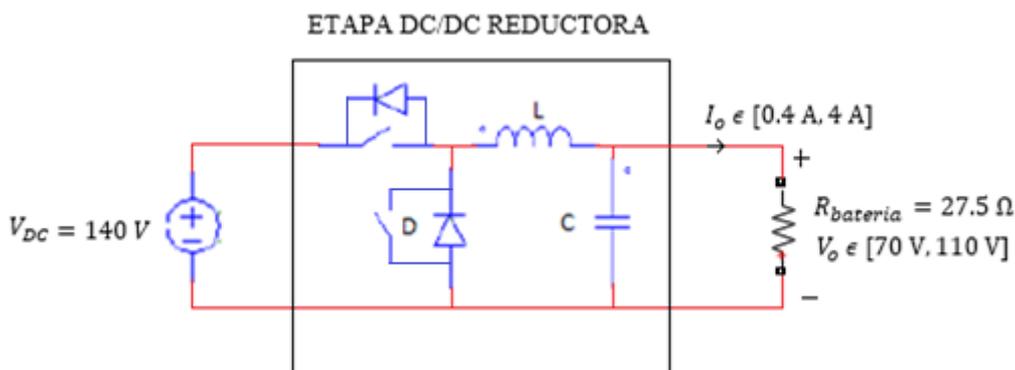


Figura 4-6. Etapa DC/DC reductora aislada con sus especificaciones de entrada y salida.

Los convertidores DC/DC reductores, al igual que la mayoría de los convertidores DC/DC, pueden trabajar en dos modos de conducción, modo de conducción continua (MCC) o modo de conducción discontinua (MCD). El funcionamiento en el primero de ellos se dará cuando la corriente circulante por la inductancia nunca llegue a anularse, mientras que el funcionamiento en conducción discontinua tendrá lugar cuando, por el contrario, dicha corriente llegue a anularse. Se realiza el diseño para que el convertidor DC/DC reductor opere en modo de conducción continua y para el caso del valor máximo de la corriente de salida (4 A), ya que este se considera el caso más desfavorable. Dentro de este modo de conducción continua se distinguen dos intervalos:

- Intervalo ON

Nos encontramos en este intervalo cuando el dispositivo de conmutación permite que la corriente circule transmitiendo la tensión de entrada a un extremo del inductor. De este modo, la corriente circula por la inductancia y el condensador, dejando el diodo bloqueado e impidiendo que circule corriente a través de él, tal y como se muestra en la Figura 4-7.

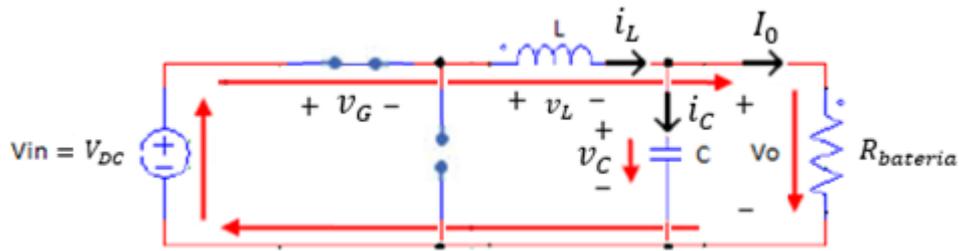


Figura 4-7. Intervalo ON convertidor DC/DC reductor; ( $0 < t < t_{ON}$ ).

Analizando el circuito mostrada anteriormente en la Figura 4-7 se obtienen las expresiones (4.4), (4.5) y (4.6).

$$-V_{in} + v_L + v_o = 0 \quad (4.4)$$

Si el condensador C tiene el valor adecuado, la tensión en la carga será prácticamente constante:  $v_o(t) \simeq V_o$ . Considerando que esto se cumple, la expresión anterior queda tal y como se muestra en la expresión (4.5).

$$V_{in} = v_L + V_o \rightarrow v_L = V_{in} - V_o \quad (4.5)$$

Por otra parte, como hemos considerado  $v_o(t) \simeq V_o$  y el valor de la resistencia no varía, se tiene también que  $i_o(t) \simeq I_o$ .

$$i_L = i_C + I_o \quad (4.6)$$

- Intervalo OFF

Por el contrario, nos encontramos en este intervalo cuando la tensión de entrada se encuentra aislada debido a que el dispositivo de conmutación se comporta como un circuito abierto, de modo que la energía almacenada en el condensador circula a través del diodo, tal y como se aprecia en la Figura 4-8.

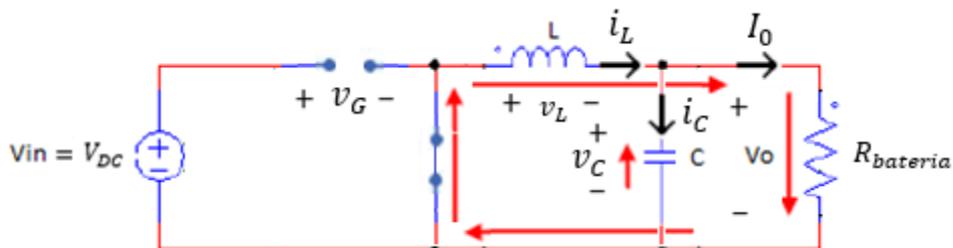


Figura 4-8. Intervalo OFF convertidor DC/DC reductor; ( $t_{ON} < t < T_s$ ).

Analizando el circuito mostrada anteriormente en la Figura 4-8 se obtienen las expresiones (4.7) y (4.8).

$$v_L + V_o = 0 \rightarrow v_L = -V_o \quad (4.7)$$

$$i_L = i_C + I_o \quad (4.8)$$

Representando gráficamente a lo largo de un periodo las expresiones obtenidas para cada intervalo, así como la tensión en bornes del dispositivo de conmutación ( $V_G$ ), tensión de entrada ( $V_{in} = V_{DC}$ ), tensión de salida ( $V_o$ ), corriente de salida ( $I_o$ ) y corriente por el condensador ( $I_C$ ), se obtienen las Figuras 4-9, 4-10, 4-11, 4-12, 4-13, 4-14 y 4-15.

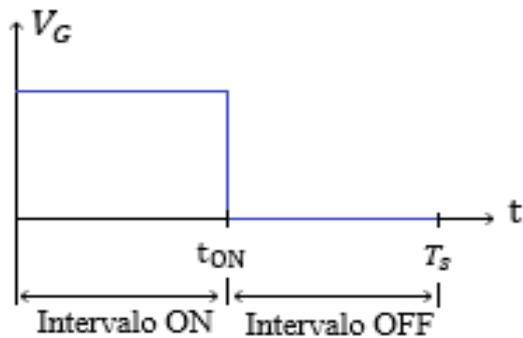


Figura 4-9. Tensión en bornes del dispositivo de conmutación a lo largo de un periodo.

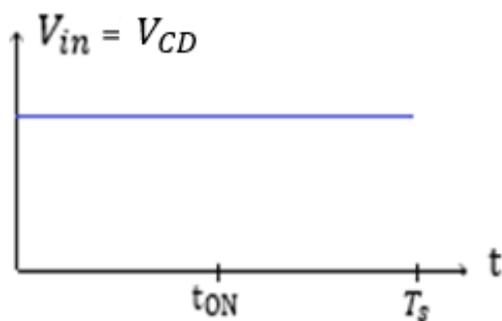


Figura 4-10. Tensión de entrada a lo largo de un periodo.

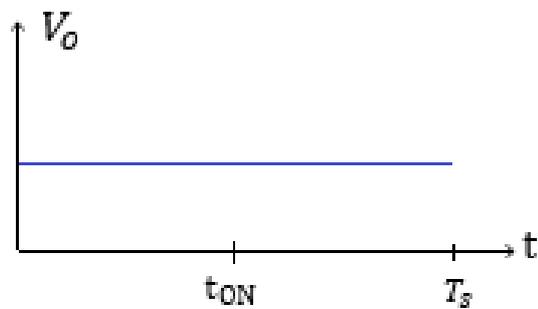


Figura 4-11. Tensión de salida a lo largo de un periodo.

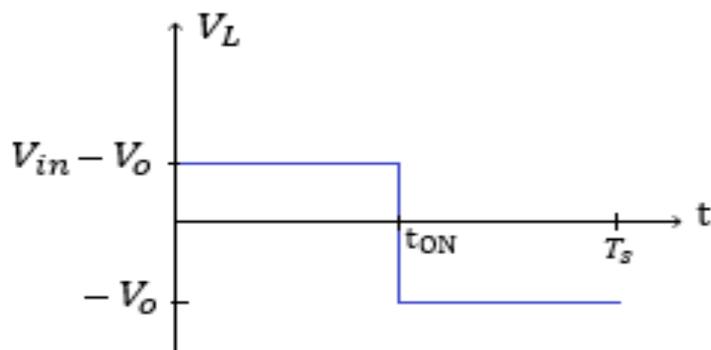


Figura 4-12. Tensión en bornes de la bobina a lo largo de un periodo.

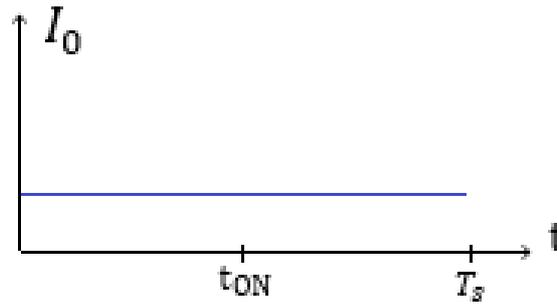


Figura 4-13. Corriente de salida a lo largo de un periodo.

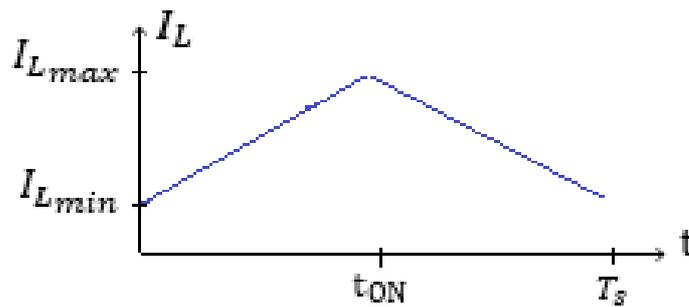


Figura 4-14. Corriente por la bobina a lo largo de un periodo.

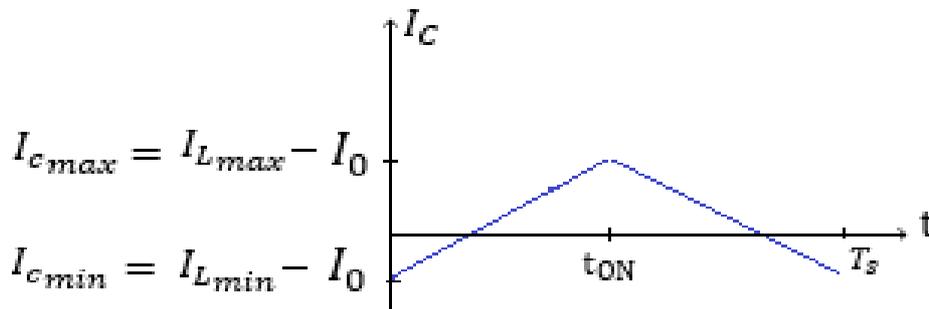


Figura 4-15. Corriente por el condensador a lo largo de un periodo.

La cantidad de carga que absorbe la bobina durante el intervalo ON es igual a la cantidad de carga que cede esta durante el intervalo OFF, tal y como se puede apreciar en la Figura 4-14.

Por otra parte, tal y como se muestra en la expresión (4.9), se ha de cumplir que la integral de la caída de tensión en bornes de la bobina en régimen permanente a lo largo de un periodo ( $T_s$ ) sea cero.

$$\int_0^{T_s} v_L(t) dt = \int_0^{t_{ON}} v_L(t) dt + \int_{t_{on}}^{T_s} v_L(t) dt = 0 \quad (4.9)$$

Si se sustituye el valor de la tensión en bornes de la bobina por su expresión en cada intervalo, se obtiene la expresión (4.10).

$$\int_0^{t_{ON}} (V_{in} - V_o) dt + \int_{t_{ON}}^{T_s} -V_o dt = 0 \quad (4.10)$$

Se resuelve la integral de modo que se obtiene la expresión (4.11).

$$(V_{in} - V_o) \cdot t_{ON} + (-V_o) \cdot (T_s - t_{ON}) = 0 \quad (4.11)$$

Si, por una parte, se desarrolla la expresión anterior tal y como se muestra en la expresión (4.12) y, por otra, se tiene en cuenta que el duty cycle (D) o ciclo de trabajo es la relación existente entre el tiempo que una señal se encuentra en estado activo ( $t_{ON}$ ) y el periodo de la misma ( $T_s$ ), se obtiene la relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida en función de dicho ciclo de trabajo tal y como se muestra en la expresión (4.13).

$$V_{in} \cdot t_{ON} - V_o \cdot t_{ON} - V_o \cdot T_s + V_o \cdot t_{ON} = 0 \rightarrow V_{in} \cdot t_{ON} = V_o \cdot T_s \quad (4.12)$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{t_{ON}}{T_s} = D \quad (4.13)$$

En el caso que nos ocupa, al poder variar la tensión de salida dentro de un intervalo  $V_o \in [V_{o_{min}} = 70 \text{ V}, V_{o_{max}} = 110 \text{ V}]$ , se determinarán dos valores posibles de duty cycle correspondientes con los límites de dicho intervalo. El valor obtenido considerando el límite inferior del intervalo se obtiene en la expresión (4.14) mientras que el valor obtenido considerando el límite superior se obtiene en la expresión (4.15).

$$D|_{V_{o_{min}}} = \frac{V_{o_{min}}}{V_{in}} = \frac{70 \text{ V}}{140 \text{ V}} = 0.5 \quad (4.14)$$

$$D|_{V_{o_{max}}} = \frac{V_{o_{max}}}{V_{in}} = \frac{110 \text{ V}}{140 \text{ V}} = 0.7857 \quad (4.15)$$

Se continúa calculando el incremento de corriente que circula por la bobina ( $\Delta I_L$ ) a partir de la expresión de la tensión en bornes de esta. Se parte de la expresión que por definición determina la tensión en bornes de una bobina; expresión (4.16).

$$v_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \quad (4.16)$$

Se despeja de la expresión anterior la derivada de la corriente por la bobina en función del tiempo tal y como se muestra en (4.17).

$$\frac{1}{L} \cdot v_L(t) dt = di_L(t) \quad (4.17)$$

Con el fin de obtener el incremento de corriente por la bobina, se integran los dos términos de la expresión anterior en el intervalo ON. Se obtiene la expresión (4.18).

$$\frac{1}{L} \int_0^{t_{ON}} v_L(t) dt = \int_{I_{L_{min}}}^{I_{L_{max}}} di_L(t) \quad (4.18)$$

Si se sustituye el valor de la tensión en bornes de la bobina por su expresión en el intervalo indicado y se toma en consideración que, por definición, la integral definida de una derivada variante en el tiempo es un incremento, se obtiene la expresión (4.19).

$$\frac{1}{L} \cdot (V_{in} - V_o) \cdot t_{ON} = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \Delta I_L \quad (4.19)$$

Además, si se expresa  $t_{ON}$  como el producto del duty cycle (D) y el periodo ( $T_s$ ), se obtiene que la expresión (4.20), la cual determina el rizado de corriente en la bobina.

$$\Delta I_L = \frac{(V_{in} - V_o)}{L} \cdot D \cdot T_s \quad (4.20)$$

Por otra parte, si se toma en consideración que el valor medio de la corriente que circula por el condensador es cero, se obtiene la relación existente entre el valor medio de corriente por la bobina y el valor medio de corriente a la salida. Por definición, la expresión (4.21) muestra el valor medio de corriente por el condensador.

$$I_C = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_C(t) dt = 0 \quad (4.21)$$

También por definición, el área recogida bajo la curva de la corriente que circula por el condensador y el eje x (área sombreada en color verde) ha de coincidir con el área recogida bajo dicho eje y la curva de corriente que circula por el condensador (área sombreada en color rojo). Para una mejor visibilidad de dichas áreas, estas se muestran sombreada en la Figura 4-16. Se obtiene de este modo la expresión (4.22).

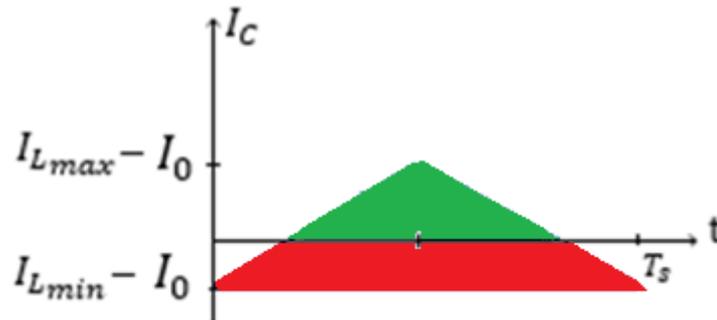


Figura 4-16. Área bajo la curva de la corriente que circula por el condensador.

$$\text{Área verde} = \text{Área roja} \quad (4.22)$$

Si se tiene en cuenta las expresiones (4.6), (4.8) y (4.21) se concluye que el valor medio de la corriente por la bobina ( $I_L$ ) ha de coincidir con el valor medio de corriente de salida tal y como se muestra a continuación en la expresión (4.23) ya que el valor medio de la corriente que circula por el condensador es cero.

$$I_L = I_o = 4 A \quad (4.23)$$

Asimismo, si se toma la frecuencia de muestreo igual a la frecuencia de conmutación y de un valor de 20 kHz, se puede obtener el valor del periodo a partir de la expresión (4.24).

$$T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{20 \cdot 10^3} \quad (4.24)$$

Como requisito de diseño del convertidor, se tiene que el rizado de corriente por la bobina ( $\Delta I_L$ ) no puede superar el 5% de su valor medio ( $I_L = 4 A$ ), de modo que ha de cumplirse la relación mostrada en la expresión (4.25).

$$\Delta I_L = \frac{(V_{in} - V_o)}{L} \cdot D \cdot T_s < 0.5 \cdot I_L = 0.5 \cdot 4 A = 0.2 A \quad (4.25)$$

Si se despeja de la expresión anterior el valor de la bobina, se tiene la expresión (4.26).

$$L > \frac{(V_{in} - V_o) \cdot D}{0.2 \cdot f_s} \quad (4.26)$$

Igualmente, si se sustituye la tensión de entrada ( $V_{in}$ ) y la frecuencia de muestro ( $f_s$ ) por su valores respectivamente y se tiene en cuenta, de nuevo, que la tensión de salida ( $V_o$ ) puede variar dentro de un intervalo delimitado por un límite inferior ( $V_{o_{min}}$ ) y un límite superior ( $V_{o_{max}}$ ), así como que se tiene un duty cycle (D) asociado a cada uno de dichos límites, se obtendrán dos posibles valores de L.

En la expresión (4.27) se muestra el valor de L obtenido considerando el límite superior de la tensión a la salida ( $V_{o_{max}}$ ), así como el duty cycle asociado a dicho valor ( $D|_{V_{o_{max}}}$ ).

$$L_{min} > \frac{(V_{in} - V_{o_{max}}) \cdot D|_{V_{o_{max}}}}{0.2 \cdot f_s} = \frac{(140 V - 110 V) \cdot 0.78}{0.2 \cdot 20 \cdot 10^3} = 5.89 mH \quad (4.27)$$

Por otra parte, en la expresión (4.28) se muestra el valor de L obtenido considerando el límite inferior de la tensión a la salida ( $V_{o_{min}}$ ), así como el duty cycle asociado a dicho valor ( $D|_{V_{o_{min}}}$ ).

$$L_{max} > \frac{(V_{in} - V_{o_{min}}) \cdot D|_{V_{o_{min}}}}{0.2 \cdot f_s} = \frac{(140 V - 70 V) \cdot 0.5}{0.2 \cdot 20 \cdot 10^3} = 8.75 mH \quad (4.28)$$

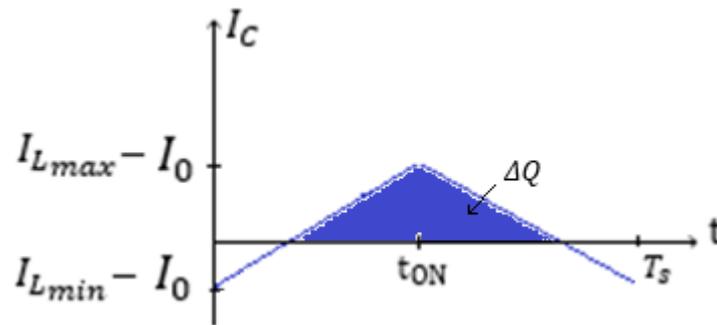
Aplicando un factor de seguridad al valor de L más grande obtenido ( $L_{max}$ ), se tiene como resultado final el valor mostrado en la expresión (4.29).

$$L = 9 mH \quad (4.29)$$

Para el funcionamiento de dicho convertidor en modo de conducción continua (MCC), se supone que todo el rizado de tensión a la salida lo absorbe el condensador. Dicho valor de rizado se puede obtener teniendo en cuenta, por una parte, el incremento de carga en el condensador, el cual se obtiene observando el área encerrada entre la gráfica de la corriente que circula por este y el eje x, y, por otra parte, el valor del condensador tal y como se muestra en la expresión (4.30).

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \quad (4.30)$$

Si se sustituye el incremento de carga en el condensador ( $\Delta Q$ ) por el área encerrada entre la gráfica de la corriente que circula por este y el eje x (Figura 4-17) se obtiene lo que se muestra en la expresión (4.31).

Figura 4-17.  $\Delta Q$  gráficamente.

$$\Delta V_o = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{T_s}{2} \cdot \frac{\Delta I_L}{2} \quad (4.31)$$

Asimismo, si se tiene en cuenta la expresión (4.20), la relación existente en la tensión de entrada y salida en función del duty cycle (expresión (4.13)) así como la relación existente entre la frecuencia de muestreo y el periodo (expresión (4.24)), la fórmula anterior queda tal y como se muestra a continuación en la expresión (4.32).

$$\Delta V_o = \frac{V_o \cdot (1 - D)}{8 \cdot L \cdot C \cdot f_s^2} \quad (4.32)$$

Por una parte, si se toma como requisito del diseño del convertidor, que el rizado de la tensión de salida de este no puede superar el 1% y teniendo en cuenta que los valores de tensión de salida y duty cycle a emplear han de ser los que han proporcionado el mayor valor de L ( $V_{o_{min}} = 70 \text{ V}$  y  $D|_{V_{o_{min}}} = 0.5$ ) se tiene el valor del rizado de tensión de salida tal y como se muestra en la expresión (4.33).

$$\Delta V_o < 0.01 \cdot V_{o_{min}} = 0.01 \cdot 70 \text{ V} = 0.7 \text{ V} \quad (4.33)$$

Por otra parte, si se tiene en cuenta dicho valor obtenido y el valor final de L determinado en la expresión (4.29), se obtiene tal y como se muestra en la expresión (4.34) el valor de C despejando de la expresión (4.32).

$$C > \frac{V_{o_{min}} \cdot (1 - D|_{V_{o_{min}}})}{8 \cdot L \cdot \Delta V_o \cdot f_s^2} = \frac{70 \text{ V} \cdot (1 - 0.5)}{8 \cdot 9 \cdot 10^{-3} \text{ H} \cdot 0.7 \text{ V} \cdot (20 \cdot 10^3 \text{ Hz})^2} = 1.74 \mu\text{F} \quad (4.34)$$

Aplicando un factor de seguridad al valor de C obtenido, tal y como se hizo con L, se tiene como resultado final el valor mostrado en la expresión (4.35).

$$C = 2 \mu\text{F} \quad (4.35)$$

A priori, podría parecer que con una bobina de  $9 \text{ mH}$  y un condensador de  $2 \mu\text{F}$  se tendría esta etapa reductora correctamente diseñada. Sin embargo, antes de afirmar esto, en primer lugar, se debe verificar que, para dichos valores, tal y como se desea, la etapa está diseñada para operar en modo de conducción continua. Si se cumple la expresión (4.36), donde  $I_{oB}$  hace referencia al valor medio de la corriente a la salida en el caso límite (límite entre modo de conducción continua y modo de conducción discontinua), quedaría correctamente verificado.

$$I_o = 4 \text{ A} > I_{oB} = I_{LB} = \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_{in} \cdot T_s}{2L} \cdot D \cdot (1 - D) =$$

$$= \frac{140 \text{ V}}{2 \cdot 9 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^3} \cdot 0.5 \cdot (1 - 0.5) = 0.0972 \text{ A} \quad (4.36)$$

Como la expresión (4.36) se cumple, queda verificado que para una bobina de 9 mH y un condensador de 2 µF, la etapa opera en modo de conducción continua.

En segundo lugar, se ha de realizar un estudio de la función de transferencia del filtro para ver si estamos en lo cierto suponiendo que la etapa está correctamente diseñada.

La función de transferencia de un filtro LC ideal es la mostrada en la expresión (4.37).

$$H(s) = \frac{1}{L \cdot C} \frac{1}{s^2 + s \cdot \frac{1}{R \cdot C} + \frac{1}{L \cdot C}} \quad (4.37)$$

Para los valores  $C = 2 \text{ µF}$  y  $L = 9 \text{ mH}$ , resulta la expresión (4.38).

$$H(s) = \frac{1}{2 \cdot 10^{-6} \cdot 9 \cdot 10^{-3}} \frac{1}{s^2 + s \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2 \cdot 10^{-6} \cdot 9 \cdot 10^{-3}}} \quad (4.38)$$

Como la función de transferencia tiene un denominador de segundo grado, se tienen dos polos complejos conjugados y, por tanto, se tiene un pico de resonancia en una frecuencia que se denomina  $f_{res}$ . El valor de dicha frecuencia se calcula en la expresión (4.39). Dicho valor es cierto cuando el valor del condensador es despreciable frente al valor de la resistencia. Si esto no ocurre, el valor de la resistencia produce un desplazamiento en la frecuencia de resonancia.

$$f_{res} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{\sqrt{9 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}} = 7.34 \text{ kHz} \quad (4.39)$$

Para llevar a cabo la comprobación de que dicho pico de resonancia se encuentra a la frecuencia determinada en la expresión anterior, se representa el diagrama de bode de la función de transferencia teniendo en cuenta que debido a que tanto la corriente de salida como la tensión de salida están definidas en un intervalo, existen dos posibles valores de resistencia,  $R_{min}$  y  $R_{max}$  tal y como se muestra en las expresiones (4.40) y (4.41).

$$R_{min} = \frac{V_{o_{min}}}{I_{o_{max}}} = \frac{70 \text{ V}}{4 \text{ A}} = 17.5 \text{ Ω} \quad (4.40)$$

$$R_{max} = \frac{V_{o_{max}}}{I_{o_{min}}} = \frac{110 \text{ V}}{0.4 \text{ A}} = 275 \text{ Ω} \quad (4.41)$$

Asimismo, al contemplarse dos posibles valores de R, se obtienen dos funciones de transferencia para los valores de resistencia límite, mostradas en las expresiones (4.42) y (4.43).

$$H_{max}(s) = \frac{5.556 \cdot 10^7}{s^2 + 1818 s + 5.556 \cdot 10^7} \quad (4.42)$$

$$H_{min}(s) = \frac{5.556 \cdot 10^7}{s^2 + 2.857 \cdot 10^4 s + 5.556 \cdot 10^7} \quad (4.43)$$

El diagrama de bode de las funciones de transferencia anteriores se muestra en la Figura 4-18 y se ha obtenido mediante las líneas de código correspondientes mostradas en el Anexo I.

En él se puede apreciar la existencia de un pico de resonancia a la frecuencia de resonancia obtenida en la expresión (7.34).

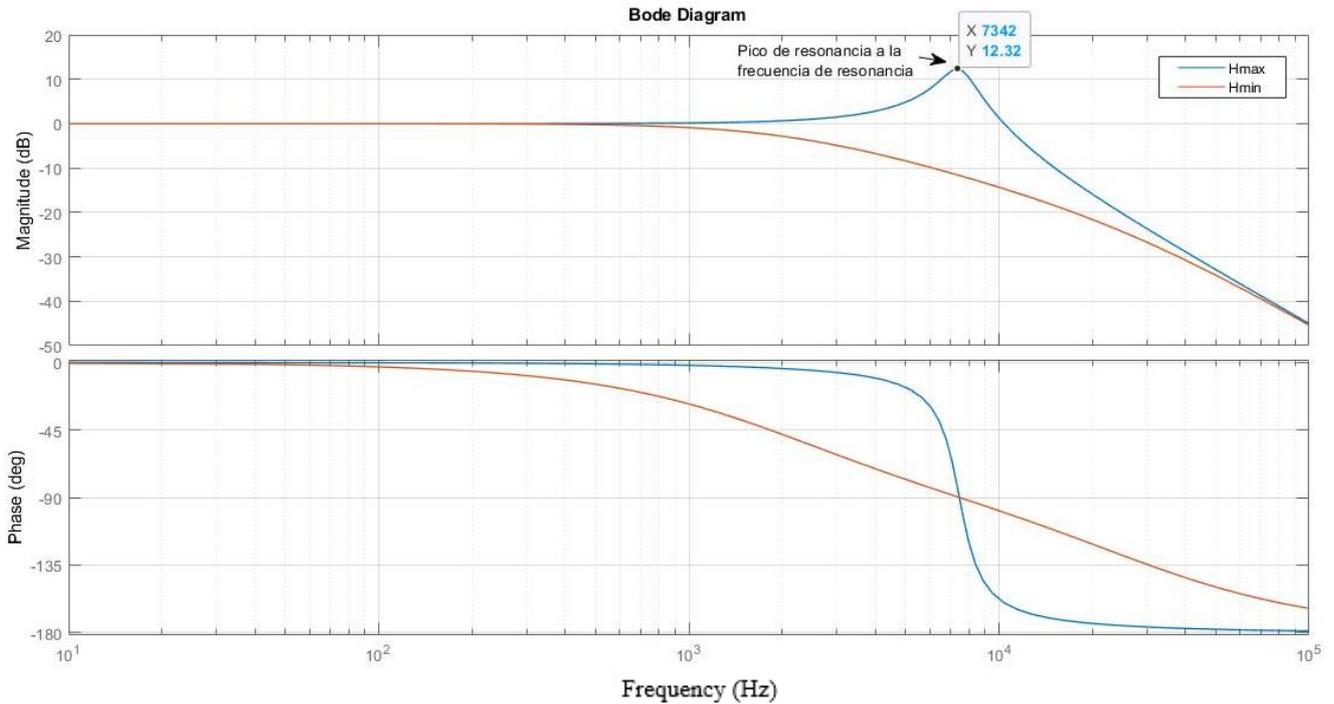


Figura 4-18. Diagrama de bode.

Sin embargo, es aconsejable que la frecuencia de resonancia ( $f_{res}$ ) no esté más allá de la décima parte de la frecuencia de conmutación ( $f_{conm} = f_s$ ) tal y como se indica en la expresión (4.44), de modo que si esto no se cumple puede suponer un problema en el diseño y afectar gravemente a la estabilidad del convertidor.

$$f_{conm} = f_s = 10 \cdot f_{res} \quad (4.44)$$

En el caso que nos ocupa, teniendo en cuenta los valores de los componentes obtenidos, se tiene un valor de frecuencia de resonancia igual a 7.34 kHz. Teniendo en cuenta el valor de frecuencia de conmutación elegido ( $f_{conm} = 20$  kHz) no se cumple la expresión (4.44), de modo que se debe modificar el valor de uno de los componentes obtenidos para asegurar la estabilidad el convertidor.

Si se tiene en cuenta la expresión (4.39) que relaciona la frecuencia de resonancia con los valores L y C, se obtiene a partir de la expresión (4.44), la expresión (4.45).

$$\frac{1}{10} \cdot f_s = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \rightarrow \sqrt{L \cdot C} = \frac{10}{f_s} \quad (4.45)$$

Se mantiene el valor de L que se tenía anteriormente ( $L = 9$  mH) para que la expresión (4.36), la cual verificaba la premisa de diseño para modo de conducción continua no se vea afectada, y se determina despejando de la expresión anterior el nuevo valor de C, obteniéndose lo mostrado en la expresión (4.46).

$$C = \frac{10^2}{f_s^2 \cdot L} = \frac{10^2}{(20 \cdot 10^3)^2 \cdot 9 \cdot 10^{-3}} = 27.78 \mu\text{F} \quad (4.46)$$

Es importante tener en cuenta que el valor final de los componentes de dicha etapa ha de estar normalizarlo a los estándares comerciales. Si el valor obtenido matemáticamente no coincide con un valor normalizado, se ha de buscar siempre el valor superior a este (para seguir cumpliendo especificaciones) que si lo esté. En el caso de las bobinas esto es menos preocupante pues se suelen mandar a fabricar a medida y es habitual ajustar su valor con el fabricante. En el caso que nos ocupa, el valor obtenido para la bobina es  $L = 9 \text{ mH}$ , y debido a lo mencionado anteriormente, no ha de ser adaptado. Sin embargo, el valor final del condensador no corresponde con un valor normalizado, por lo que se busca el valor mayor más próximo que si lo está, siendo este  $C = 33 \text{ }\mu\text{F}$ . Por otra parte, es muy importante también de cara a la elección de estos componentes, escoger adecuadamente los límites de tensión y corriente de cada uno de ellos.

De este modo, queda comprobado que para una bobina de  $9 \text{ mH}$  y un condensador de  $33 \text{ }\mu\text{F}$  se tiene esta etapa reductora correctamente diseñada, ya que, tal y como se desea, para estos valores la etapa opera en modo de conducción continua (verificándose la expresión (4.36)) y el estudio de la función de transferencia del filtro demuestra la estabilidad del convertidor.

### 4.1.2. Etapa AC/DC correctora del factor de potencia

Todas las baterías del mercado se cargan en continua, con corriente y tensión continua. La primera etapa de la que consta la topología seleccionada para el diseño del circuito de potencia completo proporciona corriente y tensión alterna, de modo que se requiere de una segunda etapa que se encargue de llevar a cabo el proceso de conversión AC/DC, es decir, que sea capaz de convertir la corriente y tensión alterna proporcionada por la etapa de entrada AC/AC, en corriente y tensión continua, tal y como requiere la batería para ser cargada. Los circuitos electrónicos diseñados para permitir dicha transformación se denominan convertidores AC/DC, también conocidos como rectificadores. Se pueden clasificar en dos grandes grupos: rectificadores que funcionan con baja frecuencia de conmutación (rectificadores de línea conmutada) y rectificadores con corrección del factor de potencia (PFC). Esta clasificación general de los convertidores AC/DC se muestra en la Figura 4-19.

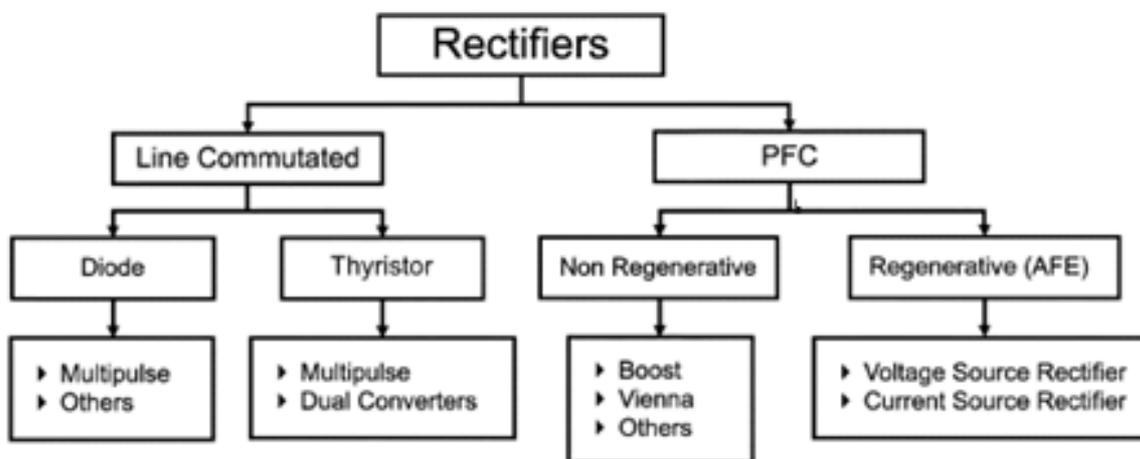


Figura 4-19. Clasificación general de los convertidores AC/DC [16].

Como se aprecia en la Figura 4-19, los rectificadores de línea conmutada a su vez se pueden clasificar en dos subgrupos atendiendo a los dispositivos semiconductores que emplean:

- Rectificadores de línea conmutada basados en diodos.

Estos convertidores AC/DC de línea conmutada son los más simples y usan diodos como dispositivos semiconductores para transformar la energía eléctrica de corriente alterna a corriente continua.

- Rectificadores de línea conmutada basados en tiristores.

Estos convertidores AC/DC de línea conmutada son más complejos y usan tiristores como dispositivos semiconductores para transformar la energía eléctrica de corriente alterna a corriente continua, permitiéndose así el control del flujo de potencia.

La principal desventaja de estos convertidores conmutados naturalmente es la generación de armónicos y potencia reactiva, lo que supondría que el cargador incumpliera las normas de compatibilidad electromagnética. Un método básico y típico para reducir los armónicos de la corriente de entrada en esos convertidores es, por ejemplo, el uso de conexiones multipulso basadas en transformadores con múltiples devanados. Una mejora adicional podría ser el uso de filtros pasivos. Sin embargo, esta solución es poco tolerante a variaciones en la carga y el consumo de un cargador a lo largo del tiempo varía mucho, por lo tanto, queda descartada como posible solución [16].

Otra forma conceptualmente diferente de reducción de armónicos en los convertidores AC/DC es la llamada corrección del factor de potencia (PFC). En estos convertidores, interruptores de potencia controlados como transistores bipolares de puerta aislada (IGBT), tiristores de apagado de puerta (GTO) o tiristores integrados de puerta controlada (IGCT) están incluidos en el circuito de alimentación del rectificador para cambiar activamente la forma de onda de la corriente de entrada, siendo esta lo más parecida a una senoide y, por tanto, reduciendo la distorsión. Estos circuitos reducen pues los armónicos y, en consecuencia, mejoran el factor de potencia, que es el origen de su nombre genérico PFC [16].

Como se aprecia en la Figura 4-19, los rectificadores con corrección del factor potencia también se pueden clasificar en dos subgrupos, esta vez atendiendo a las aplicaciones para las que son adecuados teniendo en cuenta el sentido del flujo de energía.

- Rectificadores con corrección del factor de potencia no regenerativos

Son convertidores AC/DC para aplicaciones donde la energía se transmite solo desde la fuente de CA a la carga de CC. Dos posibles ejemplos de estos convertidores son el rectificador elevador (boost) y el rectificador Vienna.

- Rectificadores con corrección del factor de potencia regenerativos

Son convertidores AC/DC para aplicaciones donde el flujo de energía se puede revertir durante la operación, de modo que, en todas estas aplicaciones, el rectificador debe poder devolver energía a la fuente de alimentación, lo que se conoce como regeneración de energía, de ahí el origen de su nombre genérico. Un rectificador regenerativo puede funcionar con un factor de potencia alto o cualquier combinación de potencia activa-reactiva [16]. Estos rectificadores, también conocidos como AFE, se pueden clasificar como:

- Rectificadores de fuente de voltaje (VSR)
- Rectificadores de fuente de corriente (CSR).

Tomando en consideración toda la información aportada, si se desea que el cargador a diseñar no introduzca mucha distorsión a la red, cumpliendo así con la normativa de compatibilidad electromagnética, la corriente demandada a la red tiene que ser lo más parecida posible a una senoide. Se descartan pues todas las opciones que empleen rectificadores de línea conmutada y se opta por un rectificador con PFC, ya que de este modo se reducen los armónicos cumpliéndose así la normativa de compatibilidad electromagnética.

Por otra parte, como se decidió el diseño de un cargador bidireccional, dentro de los rectificadores con PFC, se optará por un rectificador regenerativo fuente de voltaje. Este rectificador controlado será un puente completo operándolo adecuadamente para tener un factor de potencia unidad. El esquema básico de este tipo de convertidor se muestra en la Figura 4-20.

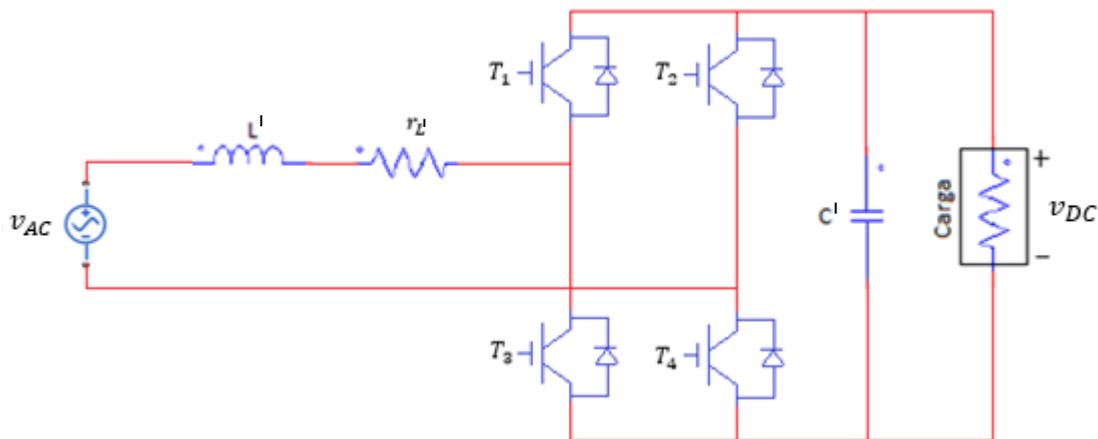


Figura 4-20. Esquema básico de un rectificador monofásico PWM puente completo en configuración fuente de voltaje.

Como se aprecia en la figura anterior, este rectificador monofásico tiene cuatro interruptores de potencia controlados como son los transistores de puerta aislada (IGBT) nombrados como  $T_1, T_2, T_3$  y  $T_4$ . La bobina de entrada ( $L'$ ) reduce la fluctuación de la corriente de entrada y el condensador de salida ( $C'$ ) reduce la fluctuación del voltaje de salida en continua.

El diagrama de bloques general del cargador a diseñar teniendo en cuenta la topología escogida para esta etapa, así como la elegida para la etapa DC/DC reductora, queda como se muestra en la Figura 4-21.

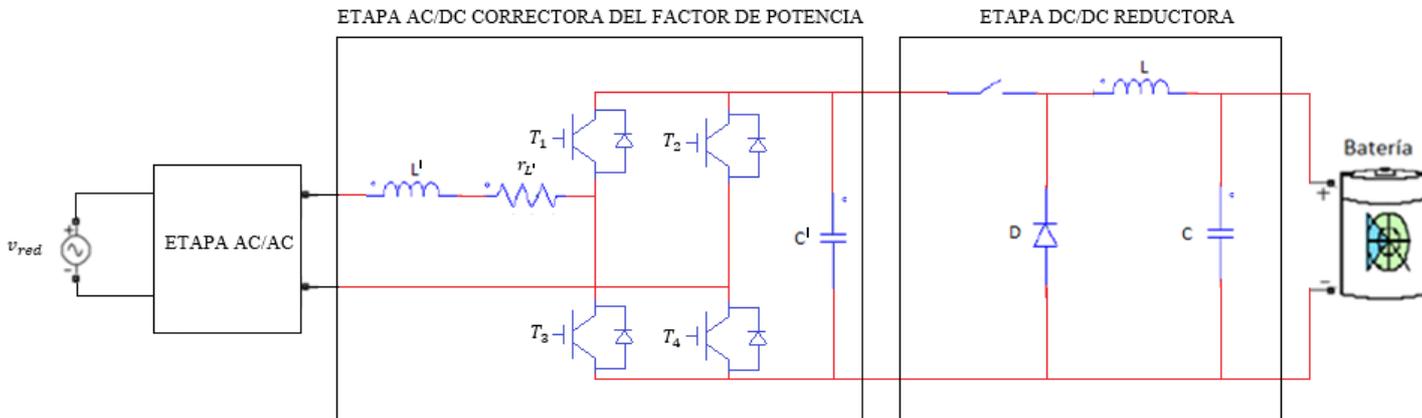


Figura 4-21. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar con topología etapa AC/DC y DC/DC.

A la salida de la etapa que nos ocupa, como se muestra en la Figura 4-21 se encuentra conectada la etapa DC/DC reductora a la cual a su vez se encuentra conectada la batería. Para proceder al cálculo de los diferentes componentes de los que consta la etapa que nos ocupa ( $L'$  y  $C'$ ), se debe emular dicha carga mediante una resistencia que consuma la potencia máxima que se necesita inyectar en la etapa DC/DC reductora. A esta resistencia se le denomina  $R_{DC}$ , de modo que el diagrama de bloques teniendo en cuenta esta modificación queda como se muestra en la Figura 4-22.

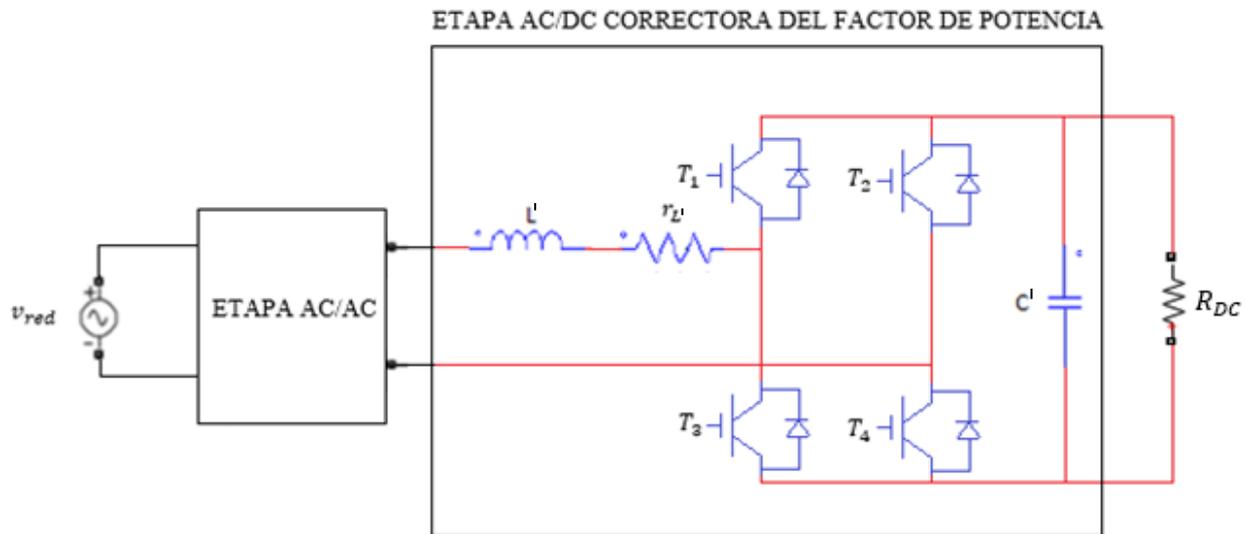


Figura 4-22. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar una vez seleccionada la etapa AC/DC y considerando  $R_{DC}$ .

Para conocer el valor de la potencia máxima que se necesita inyectar en la etapa DC/DC reductora, se tiene en cuenta que, en un convertidor DC/DC reductor la potencia de entrada y de salida coinciden, de modo que la potencia máxima que se desea inyectar en la etapa DC/DC reductora ( $P_{DCmax}$ ) coincide con la potencia máxima que se requiere inyectar en la batería ( $P_{o_{max}} = 440 \text{ W}$ ) tal y como se muestra en la expresión (4.47).

$$P_{DCmax} = P_{o_{max}} = 440 \text{ W} \quad (4.47)$$

Si se tiene en cuenta esto y, además, que la tensión a la entrada de la etapa DC/DC reductora, o lo que es lo mismo, la tensión a la salida de la etapa AC/DC es  $V_{DC} = 140 \text{ V}$  tal y como se obtuvo en la expresión (4.3), se procede al cálculo de la resistencia que emulará todo el sistema conectado a la salida de la etapa AC/DC. Para ello se ha de considerar que esta resistencia debe consumir la potencia máxima que se necesita inyectar a la etapa DC/DC reductora. Considerando la ley de Ohm, como se muestra en la expresión (4.48) se puede obtener el valor de la resistencia que consume la potencia máxima, siendo este  $44.55 \Omega$ .

$$P_{DCmax} = \frac{V_{DC}^2}{R_{DC}} \rightarrow R_{DC} = \frac{V_{DC}^2}{P_{DCmax}} = \frac{(140 \text{ V})^2}{440 \text{ W}} = 44.55 \Omega \quad (4.48)$$

Por otra parte, es muy importante considerar que, en esta topología, la tensión a la salida de la etapa ( $V_{DC}$ ) debe ser mayor que el valor de pico del voltaje de entrada, o lo que es lo mismo, el valor de pico del voltaje de salida del transformador. Teniendo en cuenta esto se debe elegir la relación de transformación del transformador. Normalmente, interesa que la tensión en el secundario sea lo mayor posible, ya que así las corrientes serán menores y las pérdidas también. Tomando en consideración todo lo anterior, se toma una tensión eficaz a la entrada de la etapa que nos ocupa de  $81.3 V_{rms}$ . La relación existente entre el valor eficaz y el valor de pico se muestra en la expresión (4.49).

$$V_{rms} = \frac{\sqrt{2}}{2} V_p = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (4.49)$$

Como se muestra en la expresión (4.50), si se despeja  $V_p$  de la expresión (4.49) y se sustituye  $V_{rms}$  por su valor, se obtiene el valor de pico del voltaje a la entrada de la etapa que nos ocupa.

$$V_p = \frac{2}{\sqrt{2}} V_{rms} = \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot 81.3 \text{ V} = 115 \text{ V} \quad (4.50)$$

La tensión a la entrada de la etapa que nos ocupa ( $v_{AC}$ ) tiene pues la expresión (4.51).

$$v_{AC}(t) = V_p \text{sen}(\omega t) = V_p \text{sen}(2\pi \cdot f(\text{Hz}) \cdot t) = 115 \text{sen}(100\pi t) \quad (4.51)$$

De acuerdo con todo lo anterior, tal y como se muestra en la Figura 4-23, se puede completar la Figura 4-22 con el valor de la resistencia obtenido en la expresión (4.48) así como con las especificaciones de entrada y salida de la etapa de estudio.

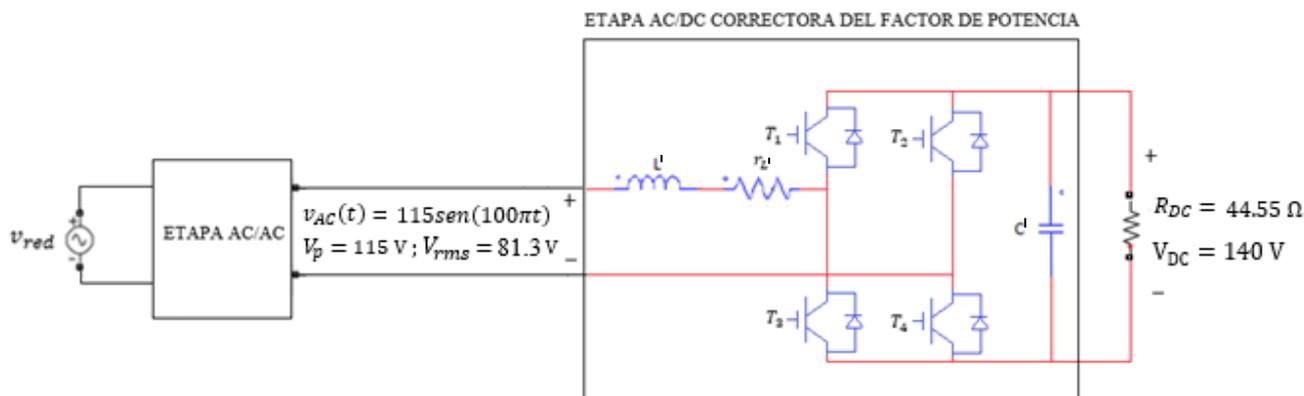


Figura 4-23. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar con las especificaciones de entrada y salida de la etapa AC/DC considerando  $R_{DC}$ .

Para aislar la etapa que nos ocupa, basta con colocar a la entrada de esta una fuente de tensión alterna de valor de pico  $V_p = 115 \text{ V}$  y frecuencia  $f = 50 \text{ Hz}$ . De este modo, se obtiene la Figura 4-24.

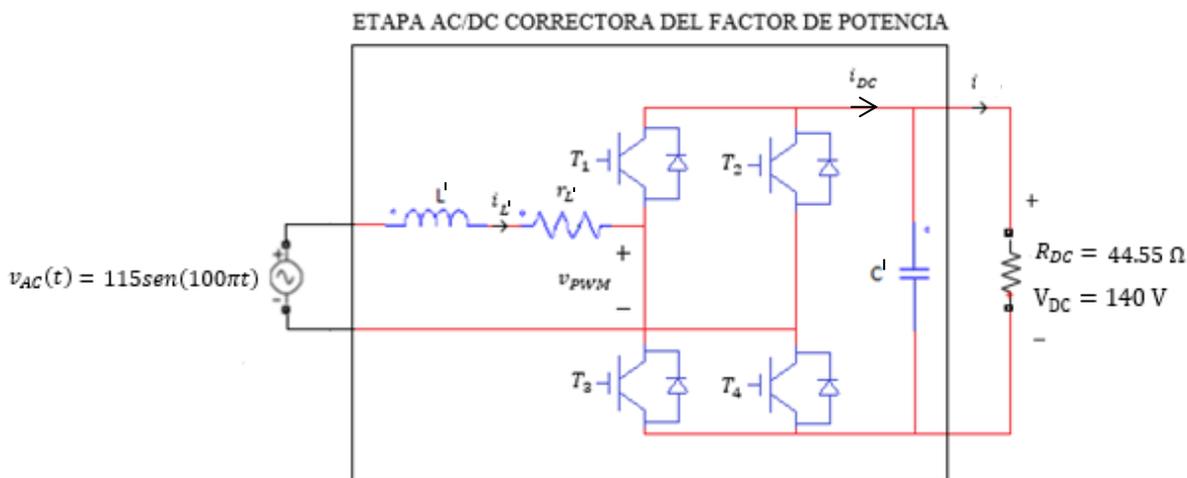


Figura 4-24. Etapa AC/DC aislada con sus especificaciones de entrada y salida.

Al ser una etapa correctora del factor de potencia, se han de calcular los componentes que con las especificaciones que se tienen, hacen que el factor de potencia sea igual a la unidad. Para llegar a este cálculo, se comienza obteniendo el circuito equivalente promediado de este, necesario para llevar a cabo el análisis del flujo de potencia entre la salida del transformador y el rectificador, que será el que nos determinará el valor de los componentes.

1. Obtención del circuito equivalente promediado del rectificador.

Se parte de una modulación por ancho de pulso de tres niveles y se proponen las funciones de conmutación  $s_{w1}$  y  $s_{w2}$  mostradas en las expresiones (4.52) y (4.53).

$$s_{w1} = \begin{cases} 1 \rightarrow & T_1 \text{ cerrado, } T_3 \text{ abierto} \\ 0 \rightarrow & T_3 \text{ cerrado, } T_1 \text{ abierto} \end{cases} \quad (4.52)$$

$$s_{w2} = \begin{cases} 1 \rightarrow & T_2 \text{ cerrado, } T_4 \text{ abierto} \\ 0 \rightarrow & T_4 \text{ cerrado, } T_2 \text{ abierto} \end{cases} \quad (4.53)$$

La forma de operar de este rectificador monofásico puente completo cuando se utiliza una modulación por ancho de tres niveles es la mostrada en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Forma de operar de un rectificador monofásico puente completo con modulación PWM

$s_{w1}$	$s_{w2}$	$v_{PWM}$	$i$	$i_{DC}$
1	0	$v_{DC}$	$V_{dc}/R_{dc}$	$i_{L'}$
1	1	0	$V_{dc}/R_{dc}$	0
0	0	0	$V_{dc}/R_{dc}$	0
0	1	$-v_{DC}$	$V_{dc}/R_{dc}$	$-i_{L'}$

Si se observa la tabla anterior, se puede verificar que se cumplen las ecuaciones (4.53) y (4.54).

$$v_{PWM} = (s_{w1} - s_{w2}) v_{DC} \quad (4.53)$$

$$i_{DC} = (s_{w1} - s_{w2}) i_{L'} \quad (4.54)$$

Donde  $s_{w1}, s_{w2} \in \{0, 1\}$ .

Como las funciones de conmutación son discontinuas y la técnica de control que se va a aplicar es sobre funciones continuas, se emplea el operador de promediado mostrado en la expresión (4.55) para volver continuas las funciones de conmutación en un periodo  $T_s$ .

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} x(\tau) d\tau \quad (4.55)$$

Aplicando el operador de promediado, sobre un periodo de conmutación  $T_s$  a las ecuaciones (4.53) y (4.54), teniendo en cuenta que se denominará  $d_1$  y  $d_2$  al promedio en un periodo de cada una de las funciones de conmutación respectivamente y que, para ese mismo periodo,  $v_{DC}$  e  $i_{L'}$  son constantes, se obtienen las ecuaciones (4.56) y (4.57).

$$\tilde{v}_{PWM}(t) = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} (s_{w1}(\tau) - s_{w2}(\tau)) v_{DC}(\tau) d\tau \rightarrow \tilde{v}_{PWM} = (d_1 - d_2) v_{DC} \quad (4.56)$$

$$\tilde{i}_{DC}(t) = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} (s_{w1}(\tau) - s_{w2}(\tau)) i_{L'}(\tau) d\tau \rightarrow \tilde{i}_{DC} = (d_1 - d_2) i_{L'} \quad (4.57)$$

Donde  $d_1, d_2 \in \{0, 1\}$ .

Si se considera  $d_{12} = d_1 - d_2 \in \{-1, 1\}$ , las ecuaciones (4.56) y (4.57) quedan como se muestra en las ecuaciones (4.58) y (4.59) respectivamente.

$$\tilde{v}_{pwm} = d_{12} v_{DC} \quad (4.58)$$

$$i_{DC} = d_{12} i_{L'} \quad (4.59)$$

A partir de las ecuaciones (4.58) y (4.59) se puede representar el circuito de la Figura 4-20 por su equivalente promediado tal y como se muestra en la Figura 4-25.

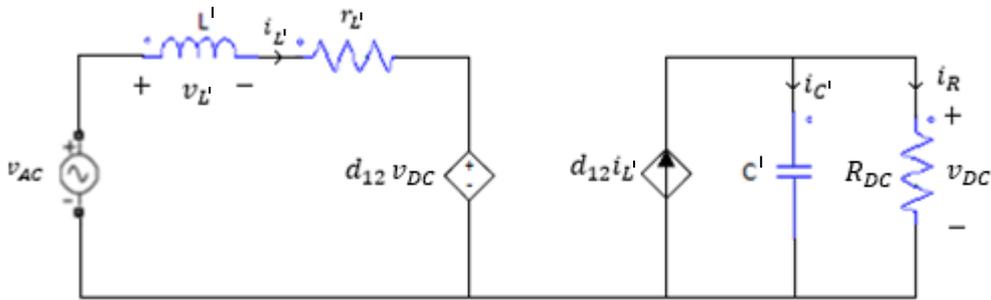


Figura 4-25. Circuito equivalente promediado del rectificador monofásico.

## 2. Análisis del flujo de potencia

Por definición, tal y como se muestra en la expresión (4.60), el factor de potencia es el cociente entre la potencia suministrada a la carga y la potencia aparente de la fuente.

$$FP = \frac{\text{Potencia suministrada a la carga } (P)}{\text{Potencia aparente de la fuente } (S_{AC})} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (4.60)$$

De este modo, si se desea que el rectificador actúe como corrector del factor de potencia, ha de diseñarse la etapa para que cumpla la expresión (4.60). Así, la corriente se encontrará en fase con la tensión y la potencia reactiva será 0 tal y como se indica en la expresión (4.61).

$$FP = 1 \rightarrow P = \sqrt{P^2 + Q^2} \rightarrow Q = 0 \quad (4.61)$$

Tomando como referencia la Figura 4-23 del lado del transformador y despreciando la resistencia de la bobina ( $r_{L'}$ ), se calcula la potencia que este entrega. La tensión a la entrada de la etapa es la mostrada en la expresión (4.62).

$$v_{AC} = V_p \text{sen}(\omega t) \quad (4.62)$$

Si este voltaje se expresa en forma fasorial, queda la expresión (4.63).

$$V_{AC} = V_p \quad (4.63)$$

Empleando una modulación senoidal, tomando la fundamental del voltaje  $v_f = d_{12}v_{dc}$  de amplitud  $V_r$  y sabiendo que puede estar desfasada un ángulo  $\alpha$  con respecto del voltaje de entrada al rectificador (voltaje de salida del transformador), se tiene lo mostrado en la expresión (4.64).

$$v_f(t) = mV_{dc}\text{sen}(\omega t + \alpha) = V_r\text{sen}(\omega t + \alpha) \quad (4.64)$$

Donde  $m$  es el índice de modulación dado por la expresión (4.65).

$$m = \frac{V_r}{V_{dc}} \quad (4.65)$$

De este modo, se puede redibujar la Figura 4-25 únicamente en la parte del transformador como se muestra a continuación en la Figura 4-26.

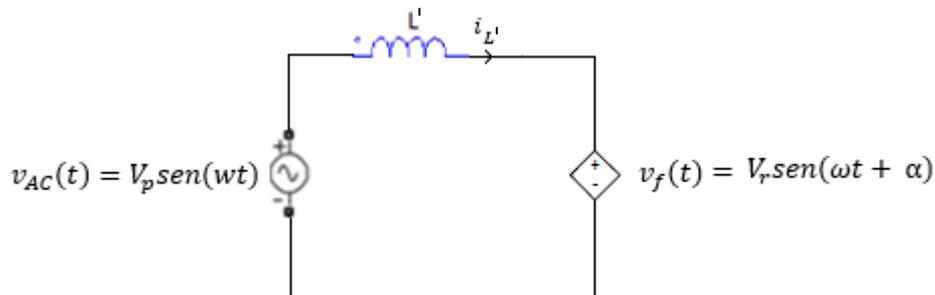


Figura 4-26. Circuito equivalente para el análisis del flujo de potencia.

Se puede observar que  $v_f$  se puede escribir como dos fasores en cuadratura teniendo en cuenta que  $\text{sen}(\omega t + \alpha)$  se puede expresar como  $\cos(\alpha)\text{sen}(\omega t) + \text{sen}(\alpha)\cos(\omega t)$  y por otra parte, que  $\cos(\omega t)$  se puede expresar como  $\text{sen}(\omega t + 90^\circ)$  tal y como se muestra en la expresión (4.66).

$$v_f = V_r\text{sen}(\omega t + \alpha) = V_r(\cos(\alpha)\text{sen}(\omega t) + \text{sen}(\alpha)\text{sen}(\omega t + 90^\circ)) \quad (4.66)$$

La fundamental del voltaje en forma fasorial se indica en la expresión (4.67).

$$V_f = V_r(\cos(\alpha)\angle 0^\circ + \text{sen}(\alpha)\angle 90^\circ) = V_r(\cos(\alpha) + j\text{sen}(\alpha)) \quad (4.67)$$

Observando la Figura 4-24, se tiene que la corriente circulante por la bobina viene dada por la expresión (4.68):

$$I_{L'} = \frac{V_p - V_f}{j\omega L'} = \frac{V_p - V_r(\cos(\alpha) + j\text{sen}(\alpha))}{j\omega L'} \quad (4.68)$$

Multiplicando numerador y denominador por el conjugado del denominador se elimina la parte compleja del denominador de la expresión anterior, obteniéndose la expresión (4.69).

$$I_{L'} = \frac{-V_r\text{sen}(\alpha) + j(V_r\cos(\alpha) - V_p)}{\omega L'} \quad (4.69)$$

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

Teniendo en cuenta que la potencia aparente de la fuente es el producto del valor eficaz de la tensión de la fuente ( $V_{AC(RMS)}$ ) y del valor eficaz de la corriente que sale de esta ( $I_{L'(RMS)}$ ) y teniendo en cuenta que podemos expresar un valor eficaz como su valor de pico entre raíz de dos como se indicó en la expresión (4.49), la potencia aparente queda definida por la expresión (4.70).

$$S_{AC} = V_{AC(RMS)} I_{L'(RMS)} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \frac{I_{L'}}{\sqrt{2}} = \frac{V_p I_{L'}}{2} \quad (4.70)$$

Sustituyendo en la expresión (4.70) el valor de pico de la corriente circulante por la bobina ( $I_{L'}$ ) por su expresión (4.69), se obtiene la ecuación (4.71).

$$S_{AC} = \frac{V_p - V_r \text{sen}(\alpha) + j(V_r \cos(\alpha) - V_p)}{2 \omega L'} = P + jQ \quad (4.71)$$

Por tanto, separando en la expresión (4.71) la potencia activa de la potencia reactiva se obtienen las expresiones (4.72) y (4.73).

$$P = \frac{V_p V_r \text{sen}(\alpha)}{2 \omega L'} \quad (4.72)$$

$$Q = \frac{V_p (V_r \cos(\alpha) - V_p)}{2 \omega L'} \quad (4.73)$$

Como se desea diseñar el rectificador para que tenga factor de potencia unitario, la corriente circulante por la bobina debe estar en fase con el voltaje de entrada a la etapa de modo que, la potencia reactiva debe ser igual a cero. Se obtiene así la expresión (4.74) la cual ha de verificarse para cumplir las condiciones mencionadas.

$$Q = \frac{V_p (V_r \cos(\alpha) - V_p)}{2 \omega L'} = 0 \rightarrow V_r = \frac{V_p}{\cos(\alpha)} \quad (4.74)$$

Sustituyendo en la expresión (4.72) el valor de  $V_r$  obtenido en la expresión anterior, se obtiene la igualdad mostrada en (4.75).

$$P = \frac{V_p \frac{V_p}{\cos(\alpha)} \text{sen}(\alpha)}{2 \omega L'} \rightarrow \tan(\alpha) = \frac{2P \omega L'}{V_p^2} \quad (4.75)$$

De (4.65) y (4.74) el índice de modulación queda de la forma mostrada en la expresión (4.76).

$$m = \frac{V_p}{V_{DC} \cos(\alpha)} \quad (4.76)$$

Una vez conocidas todas las expresiones anteriores y teniendo en cuenta los requerimientos de dicha etapa de potencia mostrados en las expresiones (4.77), (4.78), (4.79) y (4.80), se procede al cálculo de sus componentes.

$$P = 440 \text{ W} \quad (4.77)$$

$$V_{DC} = 140 \text{ V} \quad (4.78)$$

$$v_{AC} = V_p \text{ sen}(\omega t) = 115 \text{ sen}(\omega t) \quad (4.79)$$

$$\omega = 2\pi f(\text{Hz}) = 100\pi \text{ rad/s} \quad (4.80)$$

Si se considera  $m = 0.9$ , despejando de la expresión (4.76) se obtiene el valor de  $\cos(\alpha)$  mostrado en la expresión (4.81).

$$\cos(\alpha) = \frac{V_p}{mV_{DC}} = \frac{115 \text{ V}}{0.9 \cdot 140 \text{ V}} = 0.91 \quad (4.81)$$

Para obtener el valor de la inductancia de entrada ( $L'$ ) basta con despejar dicho valor de la expresión (4.75) y sustituir cada término por su valor. El valor de  $L'$  resultado queda mostrado en la expresión (4.81).

$$L' = \frac{V_p^2 \cdot \tan(\alpha)}{2P\omega} = \frac{(115 \text{ V})^2 \cdot \tan(\arccos(0.91))}{2 \cdot 440 \text{ W} \cdot 100\pi} = 21.8 \text{ mH} \quad (4.81)$$

Por otra parte, si se desea tener un rizado de tensión a la salida menor al 15 %, el valor del capacitor necesario se obtiene a través de la expresión (4.82) [21] que determina la relación existente entre el rizado de tensión a la salida (en porcentaje) y la capacidad en un rectificador puente complejo.

$$C' = \frac{100}{4 \cdot f(\text{Hz}) \cdot R_{DC} \cdot \Delta V_o (\%)} = \frac{100}{4 \cdot 50 \cdot 44.55 \cdot 15} = 748.22 \mu\text{F} \quad (4.82)$$

Es importante tener en cuenta que el valor final de los componentes de dicha etapa al igual que para la etapa anterior y todas las etapas, ha de estar normalizarlo a los estándares comerciales. Si el valor obtenido matemáticamente no coincide con un valor normalizado, se ha de buscar siempre el valor superior a este (para seguir cumpliendo especificaciones) que si lo esté. En el caso que nos ocupa, el valor final del condensador no corresponde con un valor normalizado, por lo que se busca el valor mayor más próximo que si lo está, siendo este  $C' = 820 \mu\text{F}$ . En el caso de la bobina esto es menos preocupante pues como se mencionó con anterioridad, se suele mandar a fabricar a medida y es habitual ajustar su valor con el fabricante. En el caso que nos ocupa, el valor obtenido para la bobina se redondea al entero más próximo, siendo este  $L' = 22 \text{ mH}$ .

De este modo, queda comprobado que para una bobina de  $22 \text{ mH}$  y un condensador de  $820 \mu\text{F}$  se tiene esta etapa AC/DC correctamente diseñada.

### 4.1.3. Etapa AC/AC reductora y aislante

La topología seleccionada para el diseño del circuito de potencia completo requiere de una primera etapa que se encargue de convertir la energía eléctrica alterna proporcionada por la red, de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de un nivel de tensión inferior, así como de proporcionar aislamiento galvánico. Este aislamiento es un método de protección que garantiza la seguridad. Los dispositivos eléctricos diseñados para permitir ambas premisas se denominan transformadores.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

Se distinguen dos tipos de transformadores atendiendo a la frecuencia a la que funcionan: transformadores de 50 Hz y transformadores de alta frecuencia. El transformador de dicha etapa será de 50 Hz ya que esta es la frecuencia a la que se encuentra la red a la que se conectará y, por tanto, la frecuencia a la que trabajará. Si bien es cierto que este tipo de transformadores presentan el inconveniente de que para una misma potencia aparente son más voluminosos que un transformador de alta frecuencia, debido a que el prototipo del cargador a diseñar es para un cargador off-board y no comercial no se estima que suponga una gran desventaja.

De este modo, la primera etapa del sistema de conversión de potencia que facilitará el intercambio energético entre la red eléctrica y la batería, teniendo en cuenta que la red es una red alterna monofásica y que su frecuencia es de 50 Hz, estará formada por un transformador monofásico de 50 Hz.

Se muestra en la Figura 4-27 el símbolo empleado en el software de modelizado y simulación MATLAB®/Simulink® para representar un transformador monofásico.

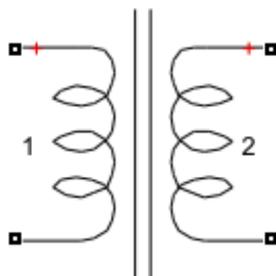


Figura 4-27. Símbolo de un transformador monofásico en MATLAB®/Simulink®.

El funcionamiento de los transformadores está basado en el fenómeno de inducción electromagnética. Como se puede apreciar en la Figura 4-27, un transformador monofásico cuenta con dos bobinas o devanados, denominados primario y secundario atendiendo respectivamente a la entrada o salida del sistema donde se instalen. En este caso, el devanado primario irá conectado a la red eléctrica y será el nombrado por un 1 en la Figura 4-27, mientras que el devanado secundario irá conectado a la segunda etapa del sistema de potencia y será el nombrado por un 2 en la misma figura. Si las dos devanados tienen el mismo número de vueltas, la tensión de la salida del transformador será idéntica que la tensión de entrada. Por el contrario, si se tiene diferente número de vueltas en el primario y el secundario, si se cuenta con un número de vueltas superior en el primario, se tendrá una tensión más baja en el secundario (en proporción a la relación de vueltas) y, si se cuenta con un número de vueltas inferior en el primario, se tendrá una tensión más alta en el secundario.

El diagrama de bloques general del cargador a diseñar teniendo en cuenta la topología escogida para esta etapa, así como la elegida para la etapa AC/DC y DC/DC reductora, queda como se muestra en la Figura 4-28.

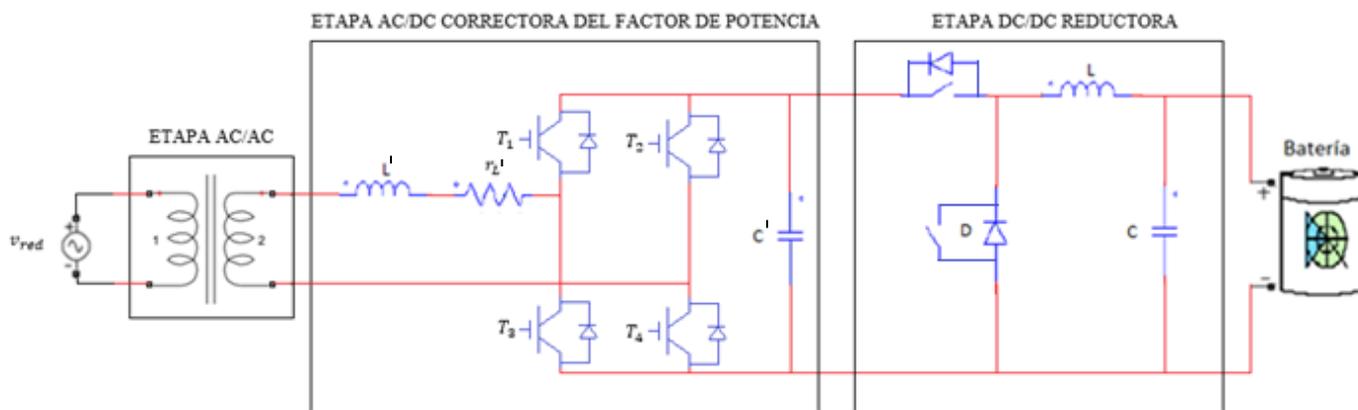


Figura 4-28. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar con topología completa.

A la salida de la etapa, como se muestra en la Figura 4-28 se encuentra conectada la etapa AC/DC a la cual a su vez se encuentra conectada la etapa DC/DC reductora y a esta última la batería. Para estudiar la etapa que nos ocupa, se debe emular dicha carga mediante una resistencia que consuma la potencia máxima que se necesita inyectar en la etapa AC/DC. A esta resistencia se le denomina  $R_{AC}$ , de modo que el diagrama de bloques teniendo en cuenta esta modificación queda como se muestra en la Figura 4-29.

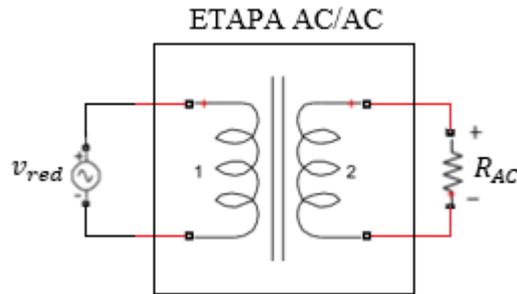


Figura 4-29. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar una vez seleccionada la etapa AC/AC y considerando  $R_{AC}$ .

Para conocer el valor de la potencia máxima que se necesita inyectar en la etapa AC/DC, se tiene en cuenta que dicha etapa se ha diseñado de modo que corrija el factor de potencia y, por tanto, como se muestra en la expresión (4.61) la potencia que esta entrega a la carga coincide con la potencia suministrada por la fuente de alterna, es decir, por el transformador. La potencia máxima que la etapa AC/DC entrega a la carga es  $P_{DCmax} = 440 \text{ W}$ , de modo que la potencia máxima que se requiere inyectar en la etapa AC/DC ( $P_{ACmax}$ ) tal y como se muestra en la expresión (4.83), también tiene ese valor.

$$P_{DCmax} = P_{ACmax} = 440 \text{ W} \quad (4.83)$$

Si se tiene en cuenta esto y, además, que la tensión eficaz a la entrada de la etapa AC/DC, o lo que es lo mismo, la tensión eficaz a la salida de la etapa AC/AC que nos ocupa es  $V_{rms} = 81.3 \text{ V}$ , se procede al cálculo de la resistencia que emulará todo el sistema conectado a la salida de la etapa AC/AC. Para ello se ha de considerar que esta resistencia debe consumir la potencia máxima que se necesita inyectar a la etapa AC/DC. Considerando la ley de Ohm, como se muestra en la expresión (4.84) se puede obtener el valor de la resistencia que consume la potencia máxima, siendo este  $15 \Omega$ .

$$P_{ACmax} = \frac{V_{rms}^2}{R_{AC}} \rightarrow R_{AC} = \frac{V_{rms}^2}{P_{ACmax}} = \frac{(81.3 \text{ V})^2}{440 \text{ W}} = 15 \Omega \quad (4.84)$$

Por otra parte, la tensión a la entrada de la etapa que nos ocupa es la tensión de la red eléctrica ( $v_{red}$ ). Al ser una red monofásica, su tensión eficaz es  $V_{rms} = 230 \text{ V}$  y se encuentra a una frecuencia  $f = 50 \text{ Hz}$ . Teniendo en cuenta todo esto y la expresión (4.49) que relaciona la tensión eficaz y la tensión de pico, se tiene lo que se muestra en la expresión (4.85).

$$v_{red}(t) = V_p \text{sen}(\omega t) = \frac{2V_{rms}}{\sqrt{2}} \text{sen}(2\pi \cdot f(\text{Hz}) \cdot t) = 325.27 \text{sen}(100\pi t) \quad (4.85)$$

De acuerdo con todo lo anterior, tal y como se muestra en la Figura 4-30, se puede completar la Figura 4-29 con el valor de la resistencia obtenido en la expresión (4.84) así como con las especificaciones de entrada y salida de la etapa de estudio.

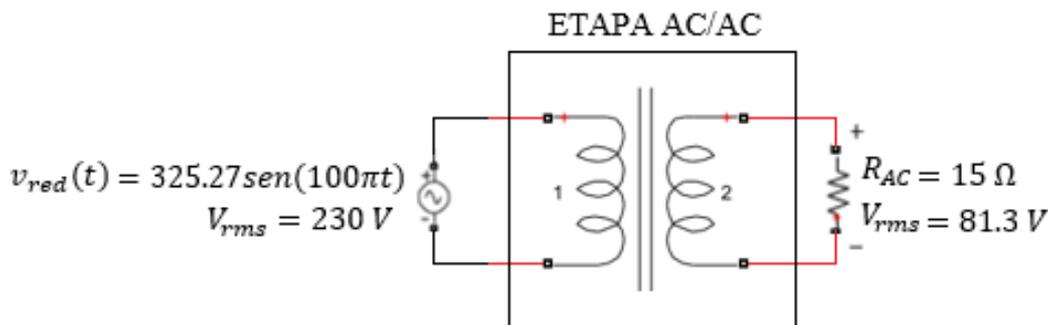


Figura 4-30. Etapa AC/AC aislada con sus especificaciones de entrada y salida.

Los parámetros que caracterizan a un transformador monofásico son:

- Potencia nominal ( $P_n$ )

Es la potencia aparente máxima que puede suministrar el bobinado secundario del transformador. Se mide en voltio-amperios (VA).

Se obtiene dicho valor teniendo en cuenta que la potencia máxima a la salida del cargador es de 440 W, ya que, como se mencionó en [3.2.2] el valor de tensión máxima de salida es de 110 V y el límite de corriente a la salida es de 4 A. Teóricamente, por una parte, la potencia a la entrada y a la salida de la etapa DC/DC reductora coinciden y, por otra parte, la potencia a la entrada y a la salida de la etapa AC/DC, debido a que se diseña para llevar a cabo la corrección del factor de potencia, también coinciden. Se concluye pues, que el valor de la potencia nominal del transformador es de 440 VA. Para líneas futuras se recomienda considerar un cierto margen de seguridad para la compensación de las posibles pérdidas en cada una de las etapas del sistema.

- Frecuencia nominal ( $f_n$ )

Es la frecuencia a la que trabaja el transformador. Se mide en hercios (Hz).

Como se mencionó anteriormente, el transformador de dicha etapa será de 50 Hz ya que esta es la frecuencia a la que se encuentra la red a la que se conectará y, por tanto, la frecuencia a la que trabajará.

- Tensión eficaz, resistencia e inductancia en el primario

La tensión eficaz en el primario es la tensión eficaz de la red a la que se conecta el transformador. Teniendo en cuenta que dicha red es una red alterna monofásica de tensión eficaz 230 V, se concluye que la tensión eficaz en el primario del transformador es de 230 V.

La resistencia en el primario ( $R_1$ ) es la resistencia eléctrica del devanado primario que modela las pérdidas por efecto Joule en este. Para realizar simulaciones en MATLAB<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> se toma dicho valor como 0 Ω.

La inductancia en el primario ( $L_1$ ) suele hacer referencia a la inductancia de dispersión, inductancia correspondiente al flujo de dispersión en el devanado primario. Es una componente inductiva presente en un transformador que aparece como resultado de un acoplamiento magnético imperfecto entre los devanados. Para realizar simulaciones en MATLAB<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> es habitual tomar dicho valor como 0 H.

- Tensión eficaz, resistencia e inductancia en el secundario

La tensión eficaz en el secundario ha de ser la mayor posible con el fin de disminuir las pérdidas, pero teniendo en cuenta que la etapa AC/DC correctora de factor de potencia seleccionada lleva a cabo una elevación de la tensión, es decir, el voltaje en continua que proporciona a su salida es mayor que el valor de pico del voltaje que tiene en su entrada. Teniendo en cuenta todo lo anterior, se selecciona una tensión eficaz en el devanado secundario del transformador de 81.3 V, valor que corresponde a una tensión de pico de 115 V.

La resistencia en el secundario ( $R_2$ ) es la resistencia eléctrica del devanado secundario que modela las pérdidas por efecto Joule en este. Al igual que en el devanado primario, se toma dicho valor como 0  $\Omega$  para realizar las simulaciones.

La inductancia en el secundario ( $L_2$ ) suele hacer referencia a la inductancia de dispersión, inductancia correspondiente al flujo de dispersión en el devanado secundario. Al igual que en el devanado primario, se toma dicho valor como 0 H.

Para la obtención de una simulación más realista se deberían considerar unas pérdidas Joule del 2-3 % y una cierta dispersión característica en los transformadores (2-5 por unidad) tanto en el primario como en el secundario.

- Resistencia e inductancia de magnetización

La inductancia de magnetización del núcleo ( $L_m$ ) modela el efecto del flujo útil en este.

La resistencia de magnetización ( $R_m$ ) es la resistencia eléctrica que modela las pérdidas en el núcleo magnético bien por histéresis y/o corrientes de Foucault.

Para realizar simulaciones en MATLAB<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> es habitual tomar el valor de la resistencia de magnetización como  $10^6 \Omega$  y el valor de la inductancia de magnetización del núcleo como 0 H.

#### 4.1.4. Componentes activos

Los componentes activos que se emplearán serán transistores MOSFET. El componente real a seleccionar ha de ser capaz de suministrar la tensión y corriente necesarias en cada etapa.

# 5 CONTROL Y SIMULACIÓN

El control es un área de la ingeniería que ha sido bastante estudiada, sin embargo; son muchas las aplicaciones que exigen que el control sea muy eficiente y por ello han ido surgiendo diferentes ramas dentro del control: control adaptable, control robusto, control inteligente, etc. A pesar de lo anterior se puede decir que el control se clasifica en dos grandes ramas: el control lineal y el control no lineal. En la mayoría de los casos, más no en todos, el análisis y diseño de un control lineal requiere de menos esfuerzo que uno no lineal, sin embargo, su rango de operación es limitado. Se espera que si un sistema es no lineal entonces un controlador no lineal debería ser el más adecuado; no obstante, muchas veces resulta que el controlador no lineal puede ser mucho más complejo y tener un costo económico mucho mayor y finalmente operar en el rango donde también con un controlador lineal se tiene el mismo desempeño. Por esto último, antes de utilizar un controlador no lineal, vale la pena explorar si uno lineal ofrece los requerimientos de control para el sistema no lineal [21].

A lo largo de este capítulo se llevará a cabo el diseño del control, así como la simulación de cada etapa mediante el software de modelado y simulación MATLAB®/Simulink®, exponiendo los resultados obtenidos.

El diagrama de bloques general del cargador a diseñar considerando el control necesario para cada etapa es el mostrado en la Figura 5-1.

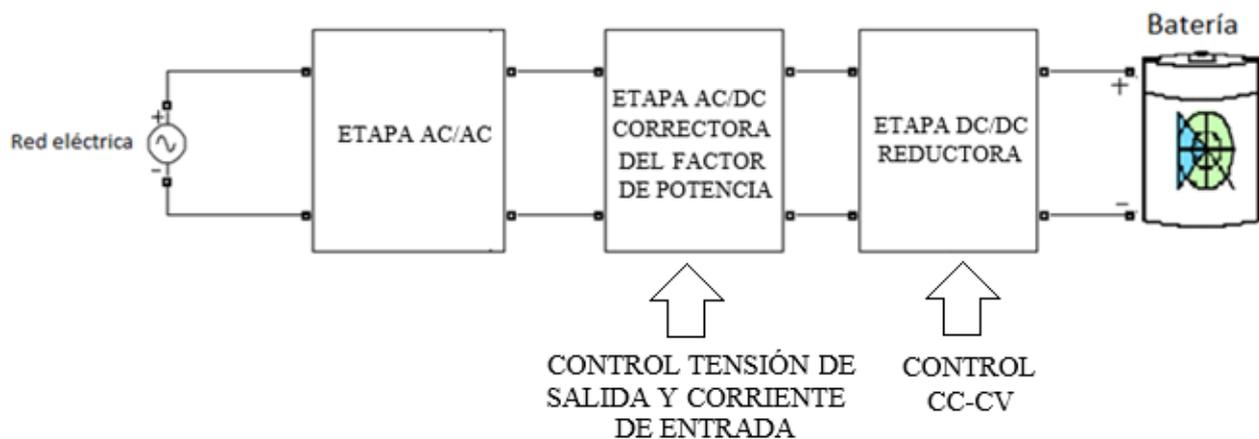


Figura 5-1. Diagrama de bloques general del cargador a diseñar considerando el control.

## 5.1. Simulación etapa AC/AC

Se comienza realizando la simulación de la primera y única etapa de potencia que no requiere de un sistema de control; la etapa AC/AC encargada de proporcionar aislamiento galvánico y reducir la tensión de red.

De acuerdo con lo que se mostró en la Figura 4-28, al aislar dicha etapa modelando su carga por una resistencia de valor adecuado (obtenida en la expresión (4.84)) así como teniendo en cuenta sus especificaciones de entrada y salida se tiene nuevamente lo mostrado en la Figura 5-2.

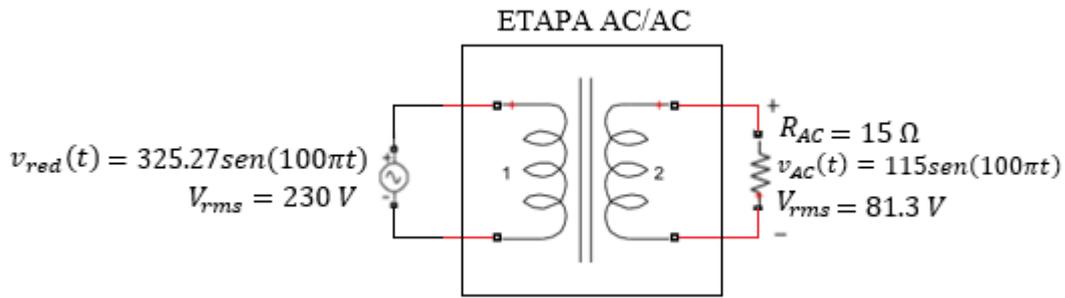


Figura 5-2. Etapa AC/AC aislada con sus especificaciones de entrada y salida.

Representando la Figura 5-2 en el software de modelizado y simulación **MATLAB®/Simulink®** se obtiene lo mostrado en la Figura 5-3.

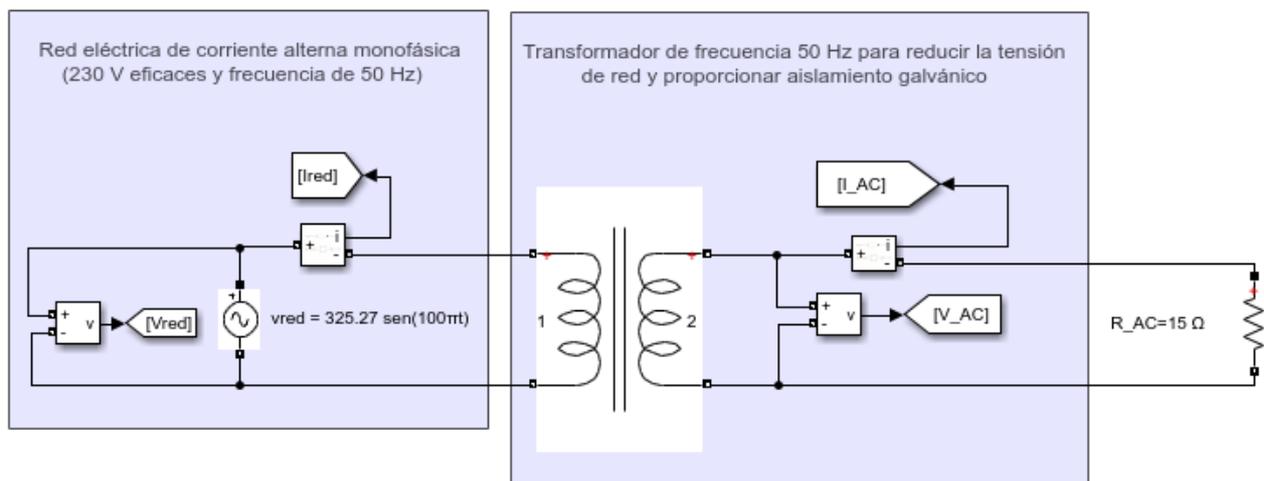


Figura 5-3. Representación etapa AC/AC aislada en **MATLAB®/Simulink®**.

El objetivo de dicha simulación radica en la comprobación del cumplimiento de las especificaciones tanto de entrada como de salida de la etapa.

Para llevar a cabo la representación de las especificaciones de entrada de la etapa, en primer lugar, se guarda el valor de cada una de ellas en una variable tal y como se muestra en la Figura 5-4.

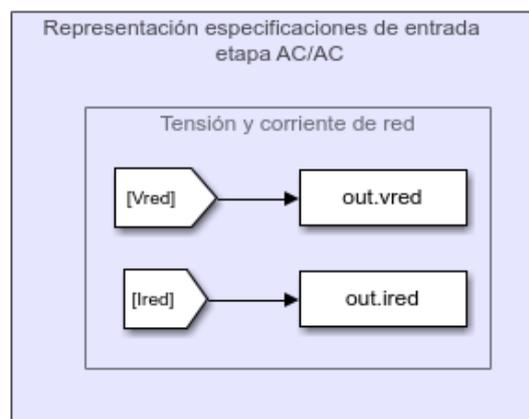


Figura 5-4. Guardar especificaciones de entrada para su representación etapa AC/AC.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

Posteriormente, mediante las líneas de código correspondientes con las especificaciones de entrada de dicha etapa (etapa AC/AC) mostradas en el Anexo II se procede a la obtención de las figuras que las representan.

La tensión a la entrada de la etapa corresponde con tensión de la red eléctrica y tal y como se muestra en la Figura 5-5 su valor de pico corresponde con el valor deseado (325.2 V).

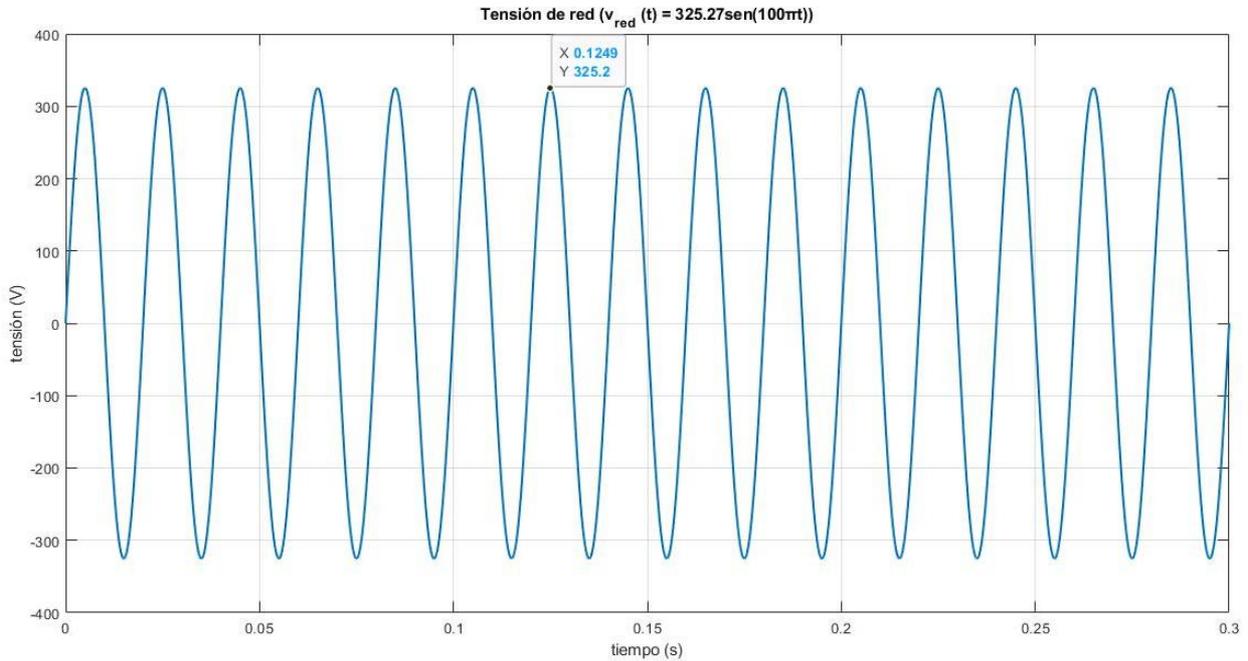


Figura 5-5. Tensión a la entrada de la etapa AC/AC (tensión red eléctrica).

Por otra parte, la corriente de entrada de la etapa se corresponde con la corriente demandada por la carga a la red eléctrica y se muestra en la Figura 5-6.

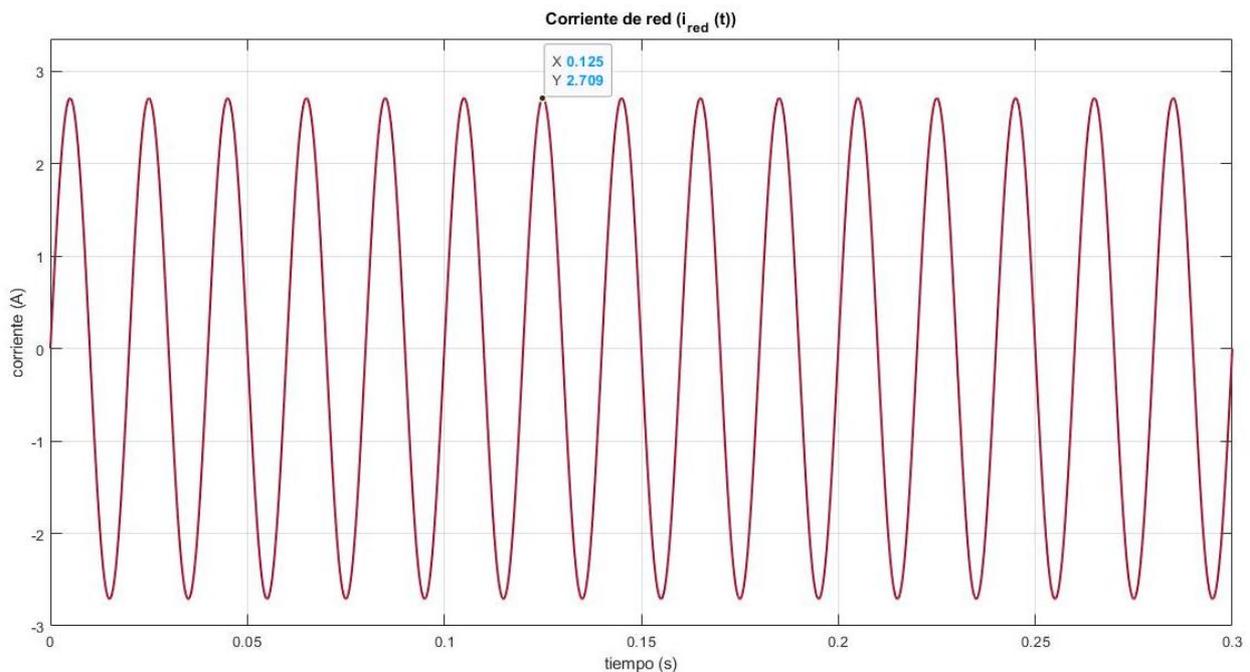


Figura 5-6. Corriente a la entrada de la etapa AC/AC.

Si se observan los valores X de los ‘Data Tips’ mostrados en las Figuras 5-5 y 5-6 se comprueba que la tensión y corriente a la entrada de la etapa AC/AC se encuentran en fase. Con el objetivo de verificar lo anteriormente nombrado, se representa en una misma figura (Figura 5-7) ambas especificaciones de entrada. En dicha figura es difícil apreciar que ambas señales se encuentran en fase debido a la diferencia de escala que existe entre ellas.

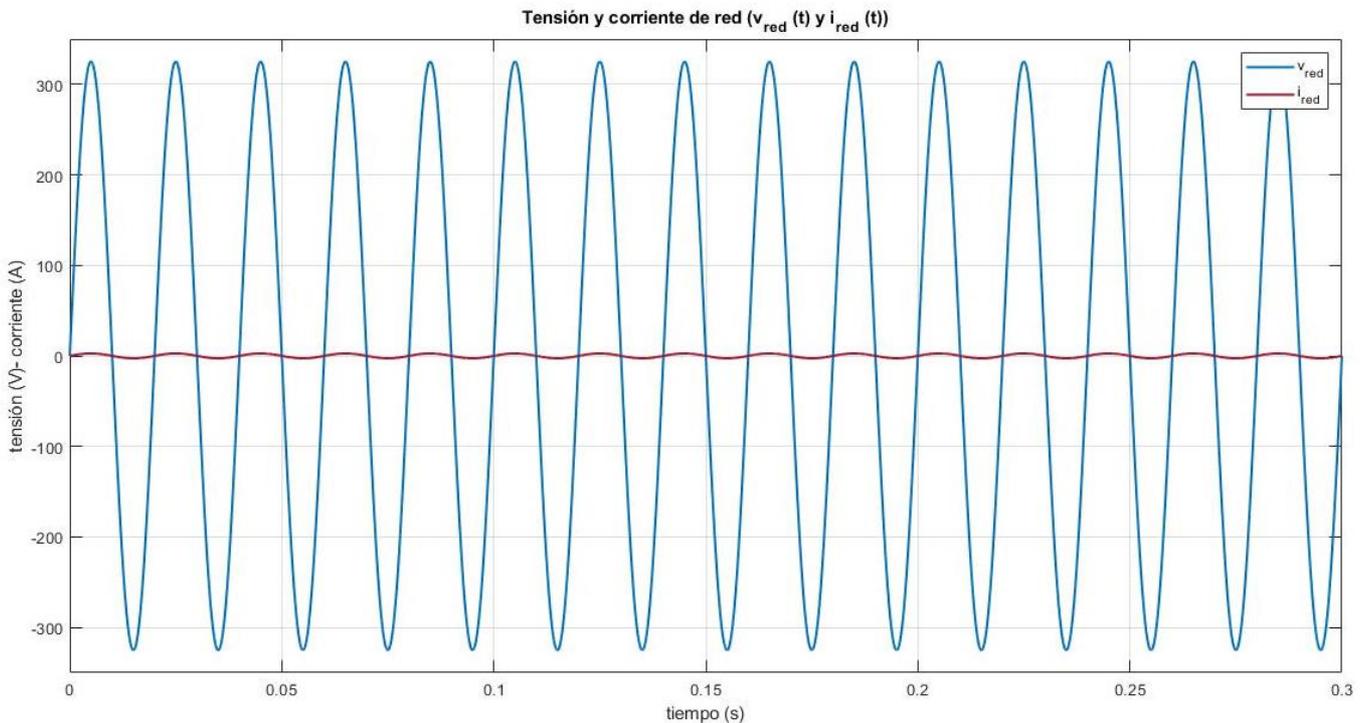


Figura 5-7. Tensión y corriente de entrada de la etapa AC/AC.

Con respecto a la representación de las especificaciones de salida de la etapa, se realiza el mismo procedimiento seguido para la representación de las especificaciones de entrada, de modo que, en primer lugar, se guarda el valor de cada una de ellas en una variable tal y como se muestra en la Figura 5-8 y posteriormente, mediante las líneas de código correspondientes con las especificaciones de salida de dicha etapa (etapa AC/AC) mostradas en el Anexo II se procede a la obtención de las figuras que las representan.

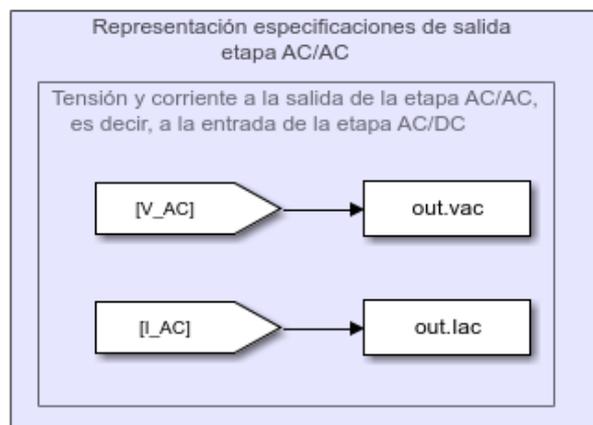


Figura 5-8. Guardar especificaciones de salida para su representación etapa AC/AC.

La tensión a la salida de la etapa tal y como se muestra en la Figura 5-9 tiene un valor de pico correspondiente con el valor deseado (115 V).

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

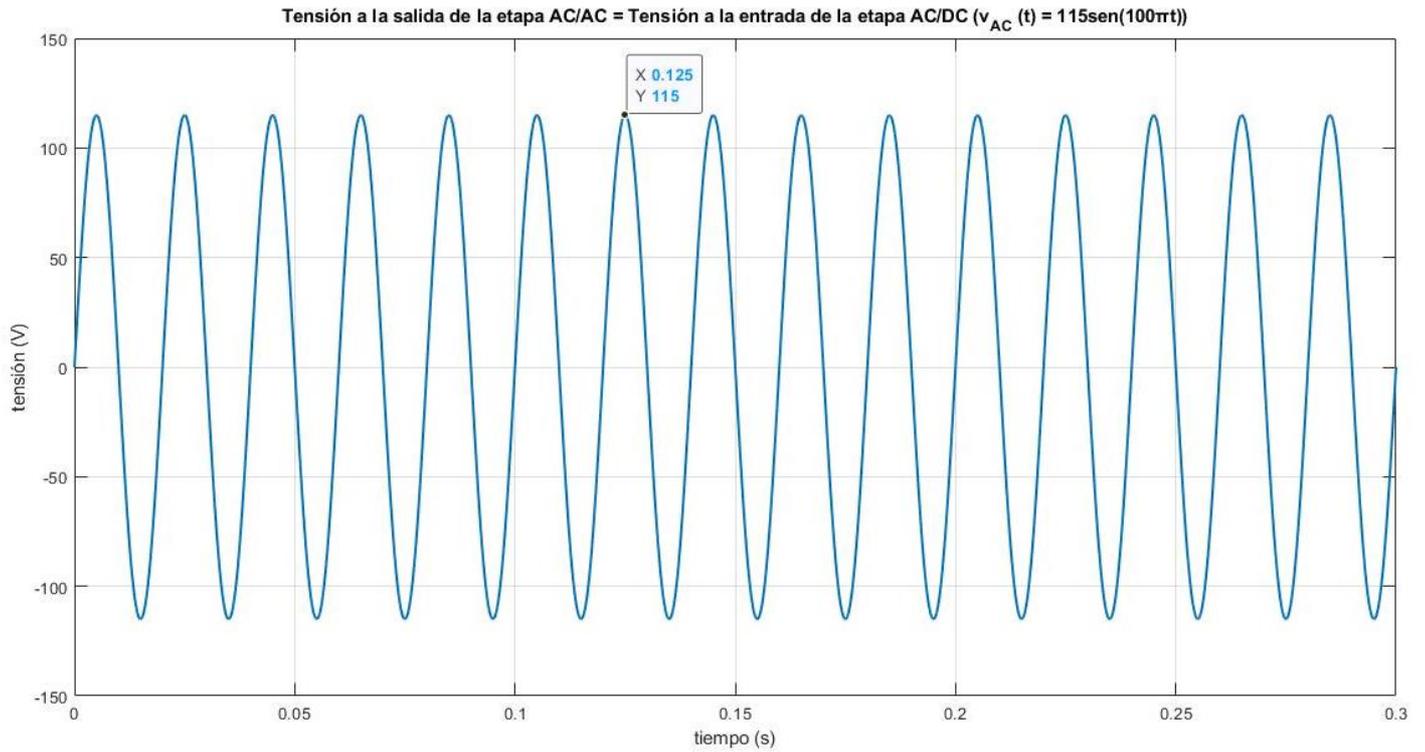


Figura 5-9. Tensión a la salida de la etapa AC/AC.

Por otra parte, la corriente de salida de la etapa se muestra en la Figura 5-10.

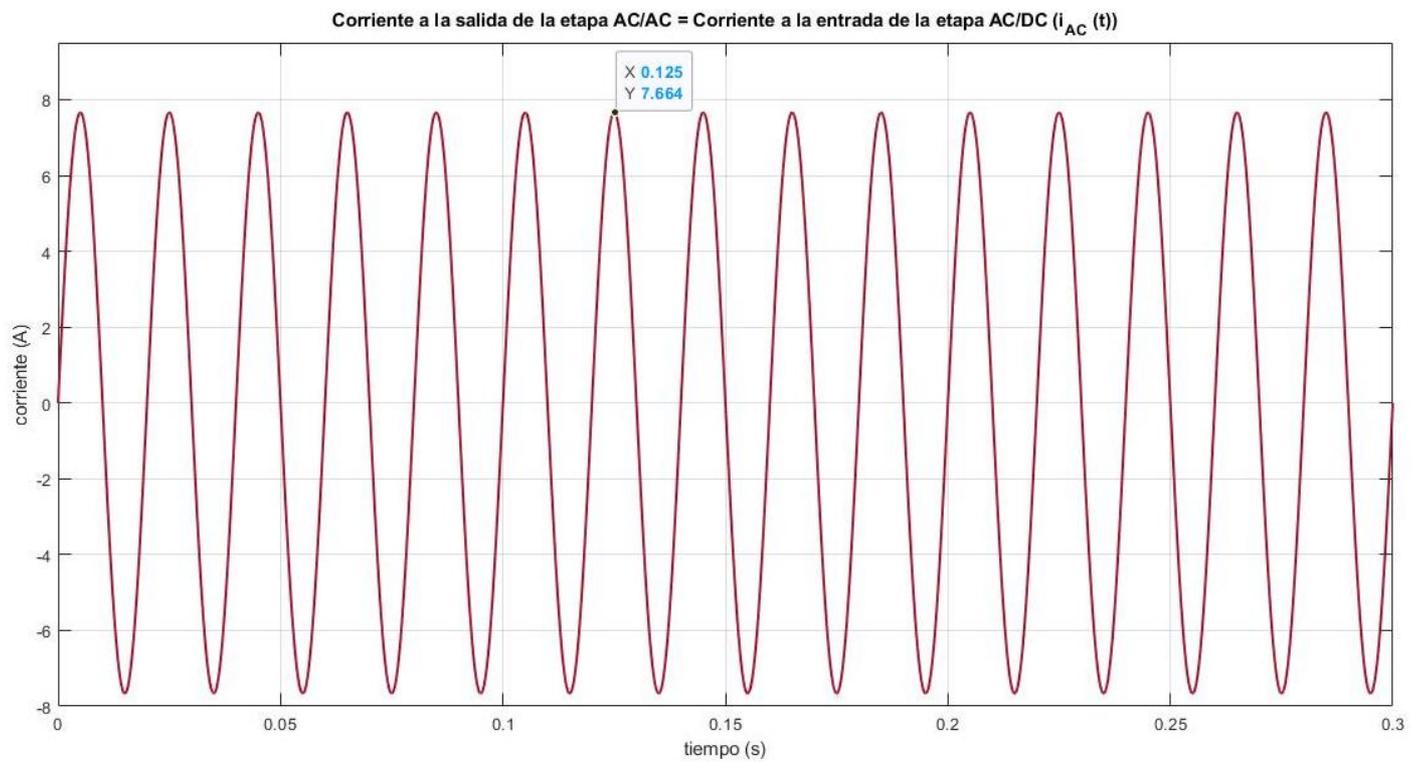


Figura 5-10. Corriente a la salida de la etapa AC/AC.

Si se observan los valores X de los ‘Data Tips’ mostrados en las Figuras 5-9 y 5-10 se comprueba que la tensión y corriente a la salida de la etapa AC/AC también se encuentran en fase. Con el objetivo de verificar lo anteriormente nombrado, se representa en una misma figura (Figura 5-11) ambas especificaciones de salida. En este caso, en dicha figura es más fácil apreciar que ambas señales se encuentran en fase ya que la diferencia de escala que existe entre ellas es menor.

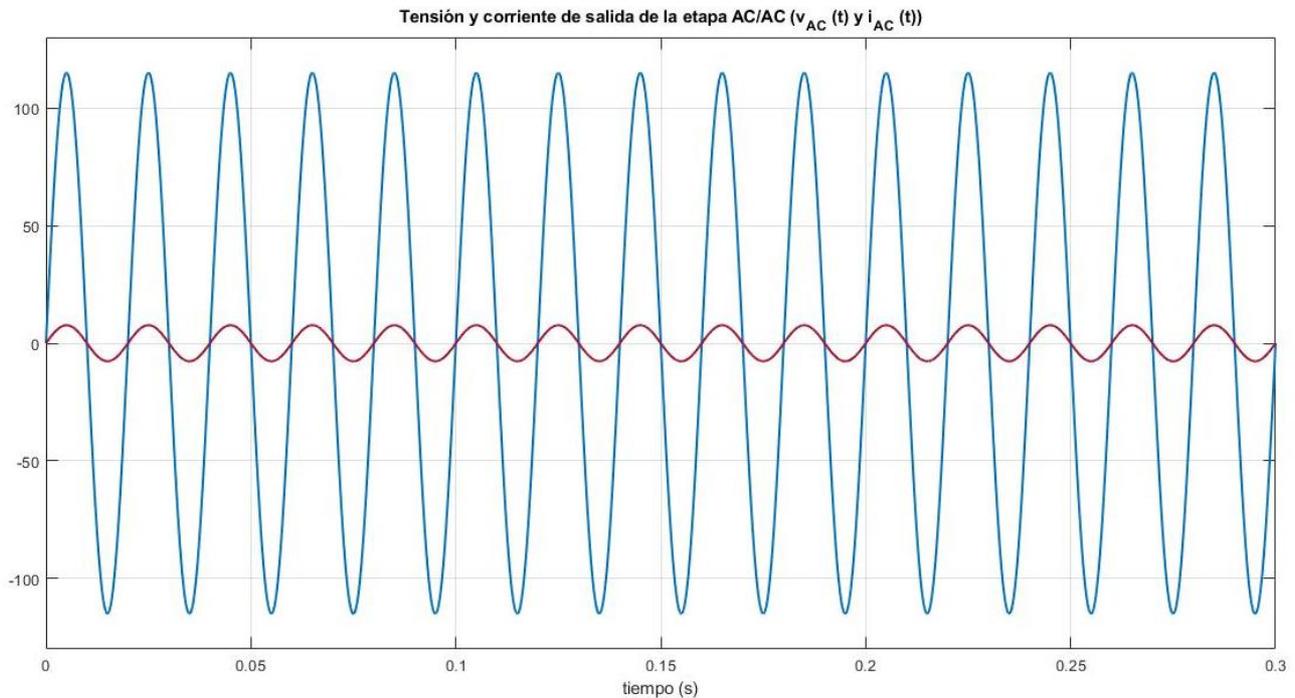


Figura 5-11. Tensión y corriente de salida de la etapa AC/AC.

## 5.2. Control y simulación etapa AC/DC

Se procede a la realización del control de la segunda etapa de potencia del sistema completo; la etapa AC/DC encargada de convertir la corriente y tensión alterna proporcionada por la etapa AC/AC, en corriente y tensión continua, tal y como requiere la batería para ser cargada.

De acuerdo con lo que se mostró en la Figura 4-22, al aislar dicha etapa modelando su carga por una resistencia de valor adecuado (obtenida en la expresión (4.48)) así como como teniendo en cuenta sus especificaciones de entrada y salida se tiene nuevamente lo mostrado en la Figura 5-12.

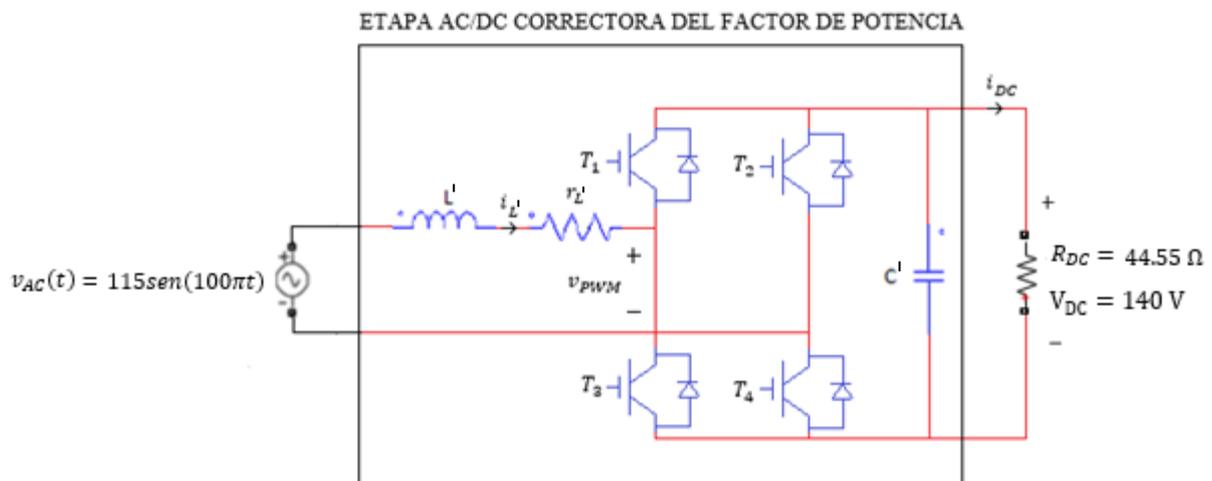


Figura 5-12. Etapa AC/DC aislada con sus especificaciones de entrada y salida.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

Se desempeñará un control lineal con el objetivo de, por una parte, regular la tensión a la salida ( $V_{DC}$ ) y, por otra parte, mantener la corriente de entrada ( $i_{L'}$ ) senoidal y en fase con el voltaje de entrada ( $v_{AC}$ ) de manera que no se introduzcan armónicos en la red, cumpliéndose así con la normativa de compatibilidad electromagnética.

Para llevar a cabo el diseño del controlador en primer lugar ha de obtenerse el modelo no lineal del sistema y posteriormente, linealizar dicho modelo.

### 1. Modelo no lineal

Para la obtención del modelo no lineal de la etapa es importante rescatar el circuito promediado que se obtuvo en la Figura 4-23, de modo que este se muestra de nuevo en la Figura 5-13.

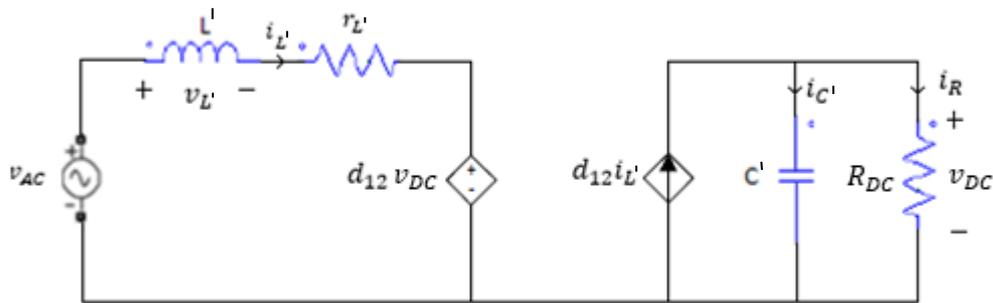


Figura 5-13. Circuito equivalente promediado del rectificador monofásico.

Analizando dicho circuito se obtienen las ecuaciones (5.1) y (5.2).

$$-v_{AC} + v_{L'} + d_{12}v_{DC} = 0 \quad (5.1)$$

$$d_{12}i_{L'} = i_{C'} + i_R \quad (5.2)$$

Las expresiones (5.3) y (5.4) definen respectivamente, la tensión en bornas de una bobina ( $v_L$ ) y la corriente circulante por un condensador ( $i_{C'}$ ).

$$v_{L'} = L' \frac{di_{L'}}{dt} \quad (5.3)$$

$$i_{C'} = C' \frac{dv_{DC}}{dt} \quad (5.4)$$

Sustituyendo las expresiones anteriores, en las ecuaciones (5.1) y (5.2), se obtienen las expresiones (5.5) y (5.6).

$$v_{AC} = L' \frac{di_{L'}}{dt} + r_L i_{L'} + d_{12}v_{DC} \quad (5.5)$$

$$d_{12}i_{L'} = C' \frac{dv_{DC}}{dt} + \frac{v_{DC}}{R} \quad (5.6)$$

Tomando como variables de estado las variables que se deseen controlar, es decir, la corriente en el inductor ( $i_{L'}$ ) y el voltaje a la salida del rectificador ( $v_{DC}$ ) coincidente con el voltaje en el capacitor, se obtiene el modelo promediado no lineal del rectificador dado por las ecuaciones (5.7) y (5.8).

$$\frac{di_{L'}}{dt} = \frac{v_{AC}}{L'} - \frac{r_{L'}i_{L'}}{L'} - \frac{d_{12}v_{DC}}{L'} \rightarrow \frac{di_{L'}}{dt} = \frac{1}{L'}(v_{AC} - r_{L'}i_{L'} - d_{12}v_{DC}) \quad (5.7)$$

$$\frac{dv_{DC}}{dt} = \frac{d_{12}i_{L'}}{C'} - \frac{v_{DC}}{RC'} \rightarrow \frac{dv_{DC}}{dt} = \frac{1}{C'}\left(d_{12}i_{L'} - \frac{v_{DC}}{R}\right) \quad (5.8)$$

Expresando dicho modelo promediado no lineal en forma matricial, se obtiene la expresión (5.9).

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{L'}}{dt} \\ \frac{dv_{DC}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{L'}}{L'} & -\frac{d_{12}}{L'} \\ \frac{d_{12}}{C'} & -\frac{1}{RC'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L'} \\ v_{DC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L'} \\ 0 \end{bmatrix} v_{AC} \quad (5.9)$$

Representando dicho modelo no lineal en el software de modelizado y simulación MATLAB®/Simulink® se obtiene lo mostrado en la Figura 5-14.

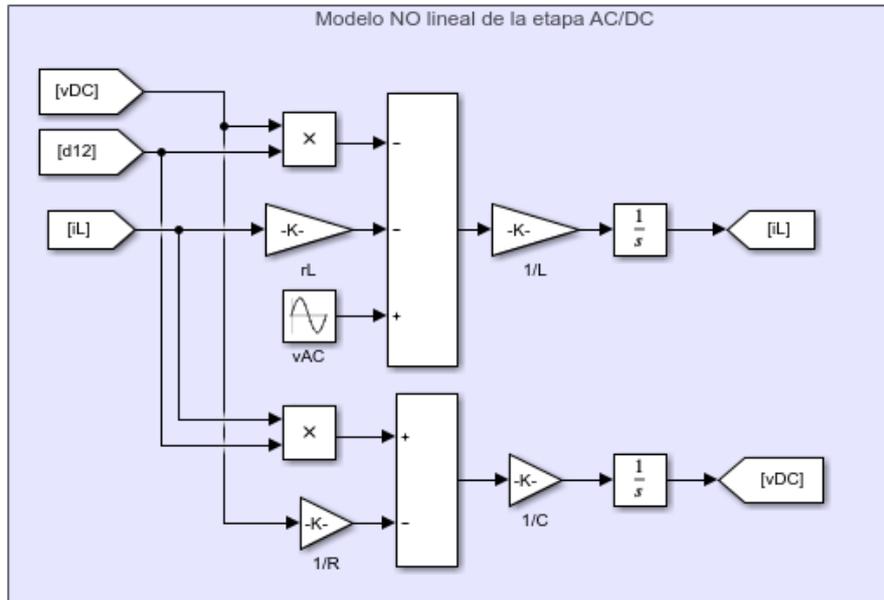


Figura 5-14. Esquema del modelo no lineal de la etapa AC/DC.

## 2. Linealización del modelo.

La operación del rectificador, en estado permanente, se caracteriza por tener señales variantes en el tiempo. Dichas señales son las mostradas en las expresiones (5.10), (5.11), (5.12) y (5.13).

$$v_{AC} = V_p \text{sen}(\omega t) \quad (5.10)$$

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

$$d_{12} = m \text{sen}(\omega t + \alpha), \quad m \in [0,1] \quad (5.11)$$

$$i_{L'} = I_{L'} \text{sen}(\omega t) \quad (5.12)$$

$$v_{DC} = V_{DC} + V_{rizo} \text{sen}(\omega t), \quad V_{DC} \gg V_{rizo} \rightarrow v_{DC} \simeq V_{DC} = \text{cte} \quad (5.13)$$

La corriente es senoidal debido a que la señal de control  $d_{12}$  es senoidal, por ello, para llevar a cabo la linealización, es posible trabajar con las amplitudes o valores de pico de dichas señales, siempre y cuando la amplitud de la señal de control sea multiplicada por una senoide unitaria. Para linealizar el modelo se utiliza el Jacobiano y se evalúa en el punto de operación deseado ( $V_{DC0}, I_{L'0}, M$ ) [21].

Reescribiendo las ecuaciones (5.7) y (5.8) para los valores de pico de la señal de control ( $m$ ) y de la corriente ( $I_{L'}$ ) y tomando el valor constante de la tensión a la salida ( $V_{DC}$ ) se tienen las ecuaciones (5.14) y (5.15).

$$f_1(I_{L'}, V_{DC}, m) = \frac{dI_{L'}}{dt} = \frac{1}{L'} (V_p - r_{L'} i_{L'} - m V_{DC}) \quad (5.14)$$

$$f_2(I_{L'}, V_{DC}, m) = \frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C'} \left( m I_{L'} - \frac{V_{DC}}{R} \right) \quad (5.15)$$

Por otra parte, se tienen las expresiones (5.16) y (5.17).

$$A = \left. \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta i_{L'}} & \frac{\delta f_1}{\delta v_{DC}} \\ \frac{\delta f_2}{\delta i_{L'}} & \frac{\delta f_2}{\delta v_{DC}} \end{bmatrix} \right|_{I_{L'}=I_{L'0}, V_{DC}=V_{DC0}, m=M} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{L'}}{L'} & -\frac{M}{L'} \\ \frac{M}{C'} & -\frac{1}{RC'} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

$$B = \left. \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta d_{12}} \\ \frac{\delta f_2}{\delta d_{12}} \end{bmatrix} \right|_{I_{L'}=I_{L'0}, V_{DC}=V_{DC0}, m=M} = \begin{bmatrix} -\frac{V_{DC0}}{L'} \\ \frac{I_{L'0}}{C'} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Si se toma como salida de la etapa la variable de estado tensión en bornas del condensador o lo que es lo mismo, el voltaje a la salida del rectificador ( $v_{DC}$ ), se tiene la expresión (5.18).

$$C = [0 \quad 1] \quad (5.18)$$

Finalmente, el modelo lineal queda como se muestra en las ecuaciones (5.19) y (5.20).

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_{L'}}{dt} \\ \frac{dV_{DC}}{dt} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} I_{L'} \\ V_{DC} \end{bmatrix} + Bm = \begin{bmatrix} -\frac{r_{L'}}{L'} & -\frac{M}{L'} \\ \frac{M}{C'} & -\frac{1}{RC'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L'} \\ V_{DC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{V_{DC0}}{L'} \\ \frac{I_{L'0}}{C'} \end{bmatrix} m \quad (5.19)$$

$$V_{DC} = C \begin{bmatrix} I_{L'} \\ V_{DC} \end{bmatrix} = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} I_{L'} \\ V_{DC} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

### 3. Diseño del controlador.

Teniendo en cuenta el valor de cada uno de los componentes de esta etapa calculados en [4.1.2] y que el valor de la resistencia parásita de la bobina es  $r_{L'} = 0.35$  según [17], así como los requerimientos de la etapa de potencia, para el punto de operación ( $I_{L'0} = \frac{V_r \text{sen}(\alpha)}{\omega L} = 7.6 \text{ A}$ ,  $V_{DC0} = 140 \text{ V}$ ,  $m=0.9$ ), el modelo lineal queda de la forma mostrada en las expresiones (5.21) y (5.22). El valor de las matrices A y B se obtiene mediante las líneas de código correspondientes del Anexo III.

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_{L'}}{dt} \\ \frac{dV_{DC}}{dt} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} I_{L'} \\ V_{DC} \end{bmatrix} + Bm = \begin{bmatrix} -15.9 & -40.9 \\ 1097.6 & -27.4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L'} \\ V_{DC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -6.3636 \\ 9.2450 \end{bmatrix} m \quad (5.21)$$

$$V_{DC} = C \begin{bmatrix} I_{L'} \\ V_{DC} \end{bmatrix} = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} I_{L'} \\ V_{DC} \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

La matriz de controlabilidad es de rango completo con lo cual se verifica que el sistema es controlable [18, 19]. También se verifica que el sistema es Hurwitz y, por lo tanto, los polos deseados en lazo cerrado se pueden colocar en cualquier lugar de la izquierda del plano complejo y con esto lograr la estabilización por retroalimentación de estados, sin embargo, esto sería válido solo para un punto de operación [20]. Si se quiere que el sistema amplíe su rango de operación entonces se puede utilizar un control integral como el que se muestra en la Figura 5-15.

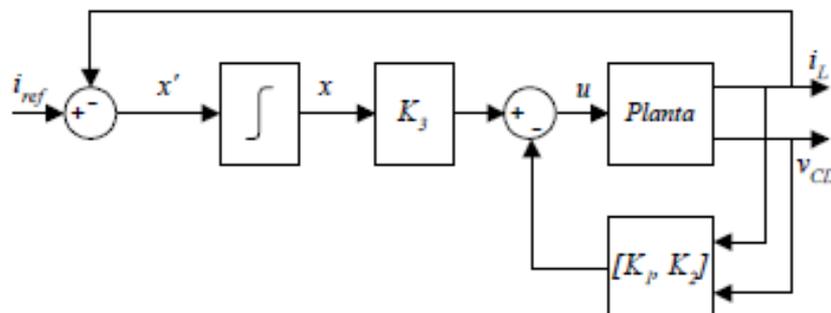


Figura 5-15. Esquema de un sistema controlado que incluye un controlador estabilizante por retroalimentación de estados y un controlador integral [21].

Para el diseño del control integral [20], tomando como base la figura anterior, la ley de control viene dada por la expresión (5.23).

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

$$u = i_{ref} - [K_1 \quad K_2] \begin{bmatrix} i_{L'} \\ v_{DC} \end{bmatrix} + K_3 x = i_{ref} - [K_1 \quad K_2 \quad -K_3] \begin{bmatrix} i_{L'} \\ v_{DC} \\ x \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

De este modo, el sistema en lazo cerrado está dado por la expresión (5.24).

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{L'}}{dt} \\ \frac{dv_{DC}}{dt} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_{L'} \\ v_{DC} \end{bmatrix} + Bu = A \begin{bmatrix} i_{L'} \\ v_{DC} \end{bmatrix} + B \left( i_{ref} - K \begin{bmatrix} i_{L'} \\ v_{DC} \\ x \end{bmatrix} \right) \quad (5.24)$$

Donde  $K = [K_1 \quad K_2 \quad -K_3]$  es el vector de ganancias empleado para retroalimentar los estados.

Se puede reescribir el sistema de forma aumentada quedando como sigue en la expresión (5.25).

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{L'}}{dt} \\ \frac{dv_{DC}}{dt} \\ \frac{dx}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L'} \\ v_{DC} \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 1 \end{bmatrix} \left( i_{ref} - K \begin{bmatrix} i_{L'} \\ v_{DC} \\ x \end{bmatrix} \right) \quad (5.25)$$

De esta forma el sistema en lazo cerrado con control integral queda tal y como se muestra en la expresión (5.26).

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{L'}}{dt} \\ \frac{dv_{DC}}{dt} \\ \frac{dx}{dt} \end{bmatrix} = (\mathcal{A} - \mathcal{B}K) \begin{bmatrix} i_{L'} \\ v_{DC} \\ x \end{bmatrix} + \mathcal{B}i_{ref} \quad (5.26)$$

Donde  $\mathcal{A}$  y  $\mathcal{B}$  vienen dadas por las expresiones (5.27) y (5.28) respectivamente.

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

$$\mathcal{B} = \begin{bmatrix} B \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

Para encontrar el vector de ganancias  $K$  se emplea el método de Ackerman [18].

Como se desea que la corriente  $i_{L'}$  siga una referencia de forma senoidal y esté en fase con el voltaje de entrada de la etapa, la colocación de los polos se propone a una frecuencia alta, pero que no sea mayor a la frecuencia de conmutación, para que tenga la capacidad de seguir a dicha referencia [21].

Se proponen dos polos  $-3000 \pm j2046.56453076276$  (obtenidos mediante las líneas de código correspondientes del Anexo II) que corresponden a una respuesta de segundo orden con un tiempo de establecimiento de 0.001 segundos y una sobreoscilación del 1%. Sin embargo, se tiene un sistema de tercer orden. Para proponer el tercer polo se observa también mediante las líneas de código correspondientes del Anexo III que la función de transferencia del sistema en lazo abierto tiene un cero en  $-86.806$  rad/s, de esta manera se puede colocar el tercer polo a esta frecuencia para poder anular el cero de la función de transferencia.

Teniendo en cuenta todo lo anterior y mediante las líneas de código correspondientes del Anexo III, el vector de ganancias queda como se muestra en la expresión (5.29).

$$K = [K_1 \ K_2 \ -K_3] = [-0.84545 \ -0.13541 \ 1915.28016] \quad (5.29)$$

El diagrama completo del sistema controlado se muestra en la Figura 5-16.

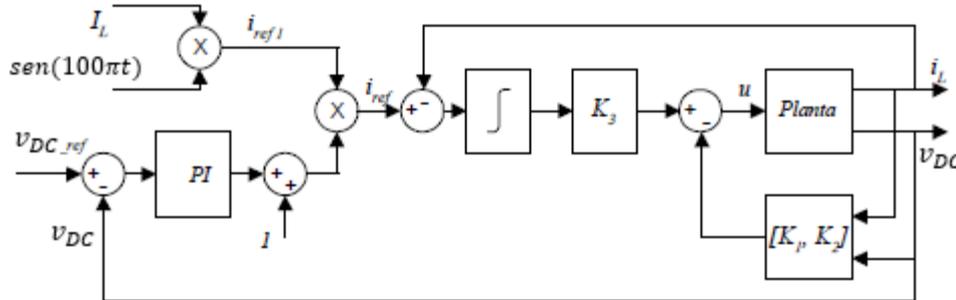


Figura 5-16. Esquema completo del sistema controlado.

En dicha imagen se observa que existe un lazo externo para el control del voltaje de salida de la etapa ( $v_{DC}$ ), de tal manera que a través del control de la corriente se puede especificar también el valor de dicho voltaje deseado. Esto es posible ya que al variar la amplitud de la corriente de referencia  $i_{ref}$ , varía el voltaje de salida. De esta manera, con el control PI se logra que el sistema siga el nivel de voltaje deseado modulando la amplitud de la corriente de referencia. Con respecto a la unidad que se suma a la salida del control PI es para no hacer cero la corriente de referencia. Para generar la referencia  $i_{ref1}$  se toma en consideración que la potencia de entrada y de salida de la etapa, es decir, la potencia del lado de alterna y la potencia del lado de continua debe ser la misma tal y como se muestra en la expresión (5.30) [21].

$$P_{AC} = \frac{V_p I_p}{2} = P_{DC} = v_{DC} i_{DC} = \frac{(V_{DC})^2}{R} \quad (5.30)$$

Por otra parte,  $i_{ref}$  sigue la expresión (5.31).

$$i_{ref} = I_L \sin(100\pi t) \quad (5.31)$$

Donde el valor de pico de la corriente de referencia  $I_L$  viene dado por la expresión (5.32), resultante de despejar  $I_p$  de la expresión (5.30).



Posteriormente, mediante las líneas de código correspondientes con las especificaciones de entrada de dicha etapa (etapa AC/DC) mostradas en el Anexo IV se procede a la obtención de las figuras que las representan.

La tensión a la entrada de la etapa corresponde con la tensión de salida de la etapa AC/AC que la precede y como se muestra en la Figura 5-19 su valor de pico corresponde con el valor deseado (115 V).

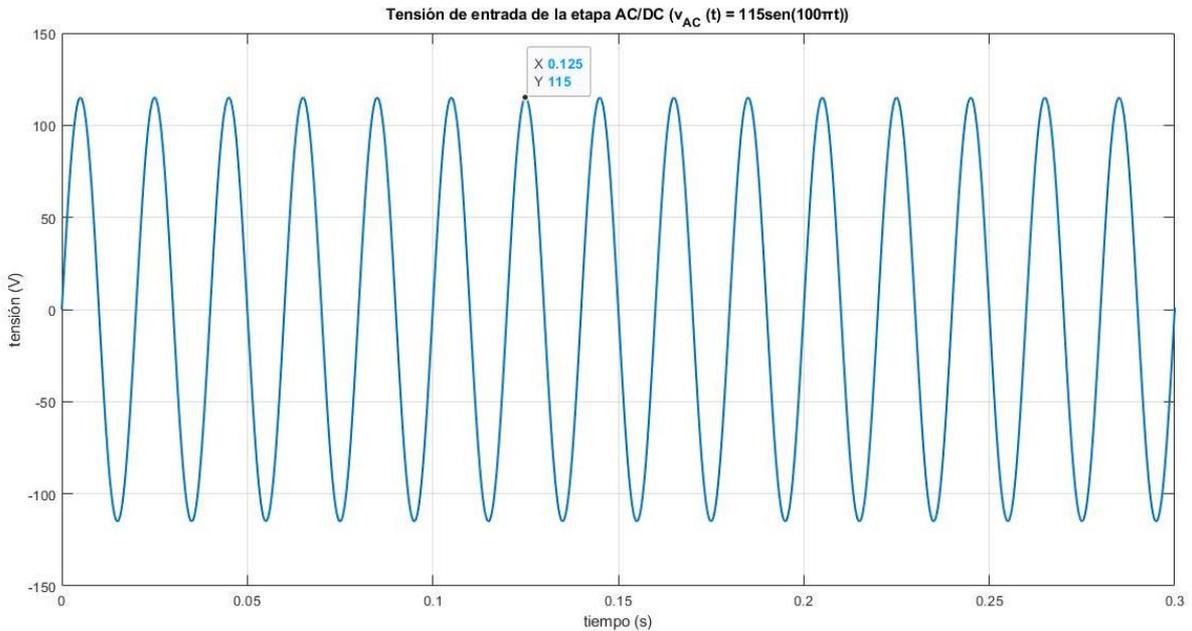


Figura 5-19. Tensión a la entrada de la etapa AC/DC.

Por otra parte, la corriente de entrada de la etapa se corresponde con la corriente a la salida de la etapa AC/AC que la precede y como se muestra en la Figura 5-20 su valor de pico también corresponde con el valor deseado (7.6 A).

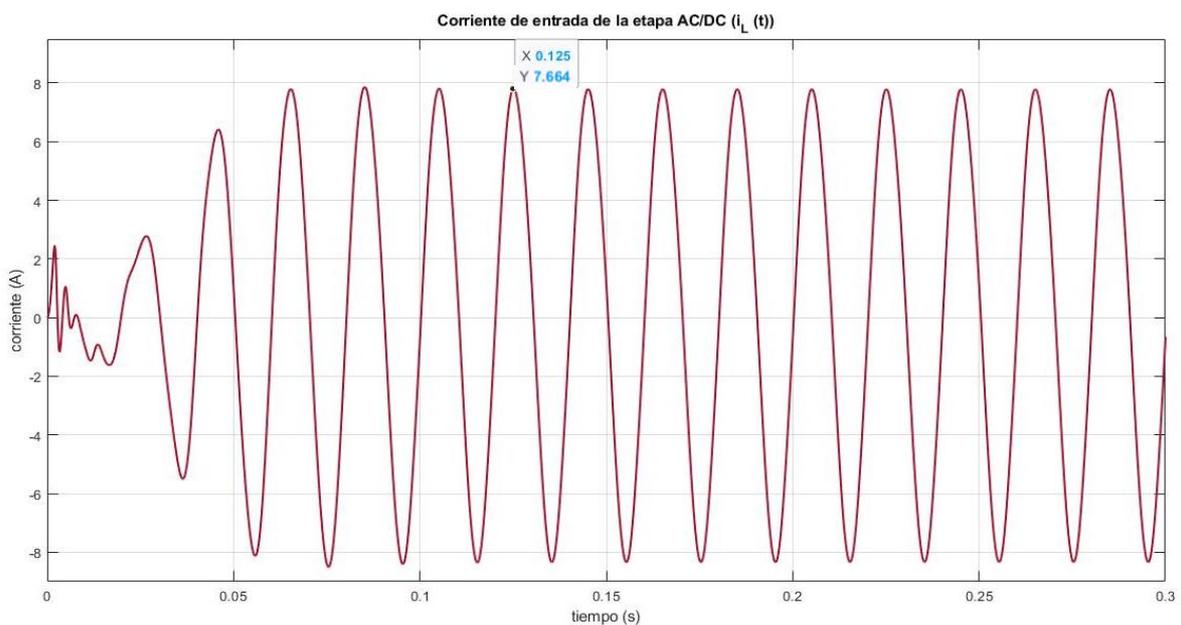


Figura 5-20. Corriente a la entrada de la etapa AC/DC.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

Si se observan los valores X de los 'Data Tips' mostrados en las Figuras 5-19 y 5-20 se comprueba que la tensión y corriente a la entrada de la etapa AC/DC se encuentran en fase. Con el objetivo de verificar lo anteriormente nombrado, se representa en una misma figura (Figura 5-21) ambas especificaciones de entrada.

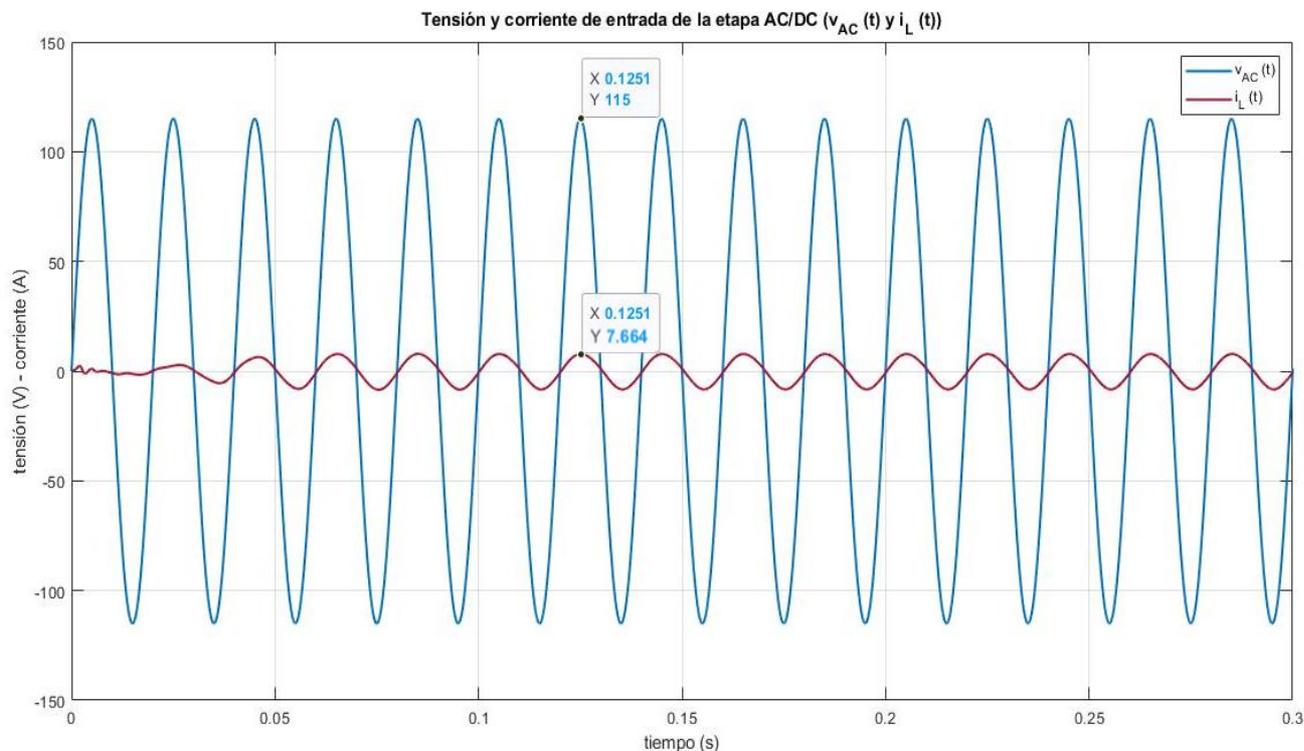


Figura 5-21. Tensión v corriente a la entrada de la etapa AC/DC.

Del mismo modo, si se desea comprobar que la corriente de entrada sigue correctamente a la corriente de referencia se ha de llevar a cabo la representación conjunta de ambas corrientes. Para ello se guarda el valor de cada una de ellas en una variable tal y como se muestra en la Figura 5-22.

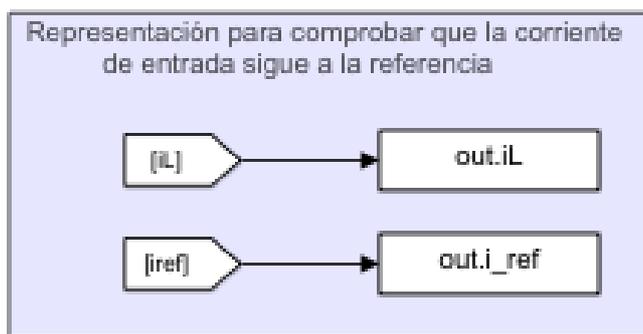


Figura 5-22. Guardar corriente de salida y de referencia para su representación etapa AC/DC.

Mediante las líneas de código correspondientes mostradas en el Anexo IV se obtiene la Figura 5-23. En ella se puede observar como la corriente de referencia es seguida por la corriente de entrada de la etapa ( $i_L$ ). Se puede apreciar la existencia de un pequeño error en régimen permanente el cual aparece debido a que el seguimiento de la corriente de referencia diseñado no es ideal.

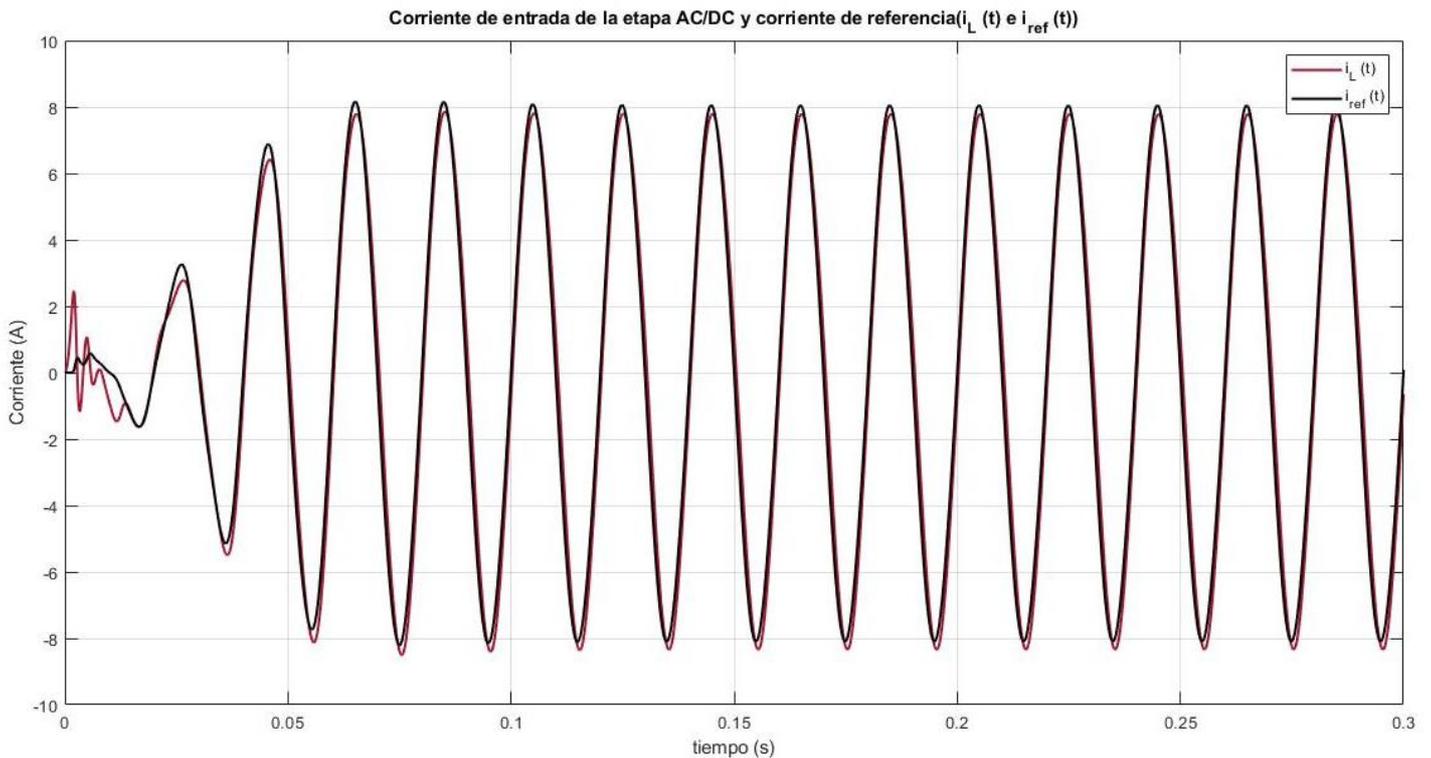


Figura 5-23. Corriente a la entrada de la etapa AC/DC y corriente de referencia.

Con respecto a la representación de las especificaciones de salida de la etapa, se realiza el mismo procedimiento seguido para la representación de las especificaciones de entrada, de modo que, en primer lugar, se guarda el valor de cada una de ellas en una variable tal y como se muestra en la Figura 5-24 y posteriormente, mediante las líneas de código correspondientes con las especificaciones de salida de dicha etapa (etapa AC/DC) mostradas en el Anexo II se procede a la obtención de las figuras que las representa.

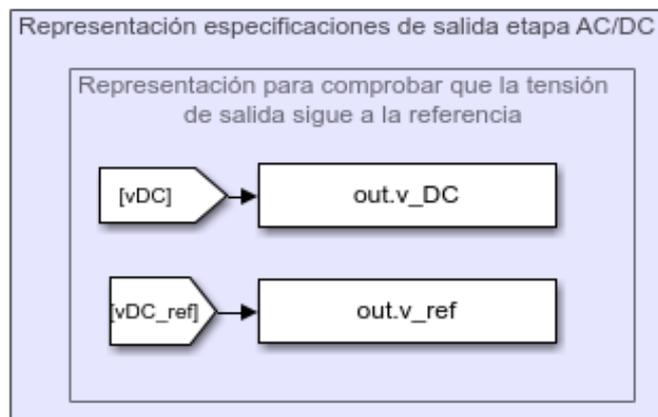


Figura 5-24. Guardar tensión de salida y de referencia para su representación etapa AC/DC.

Si se desea comprobar que la tensión de salida sigue correctamente a la tensión de referencia se ha de llevar a cabo la representación conjunta de ambas tensiones. El resultado obtenido es satisfactorio tal y como se observa en la Figura 5-25.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

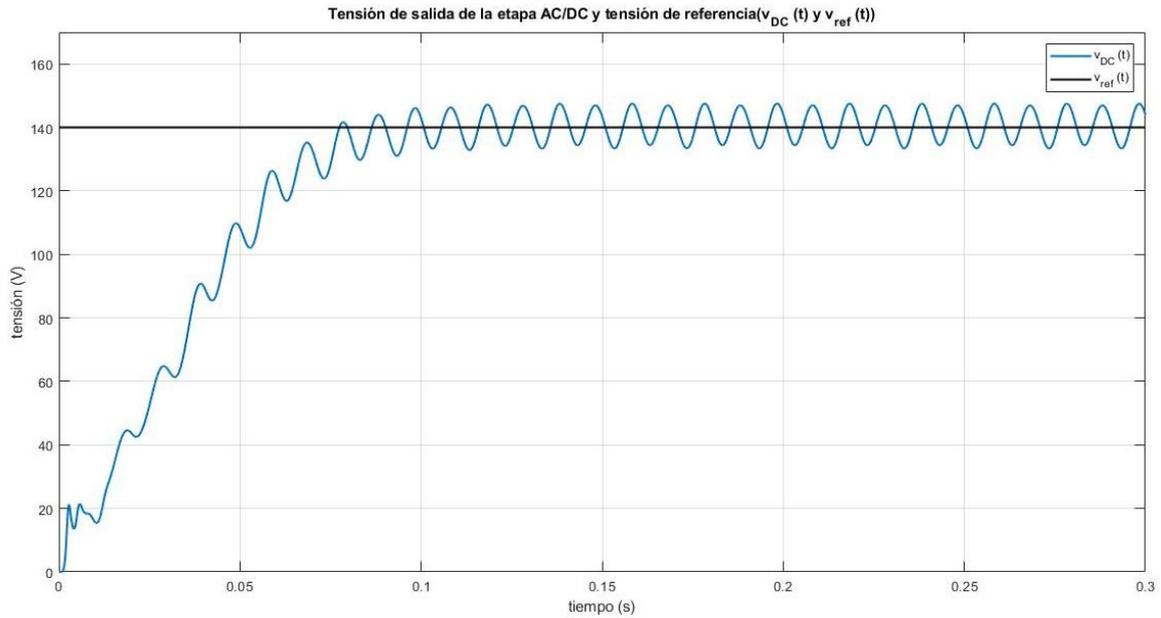


Figura 5-25. Tensión a la salida de la etapa AC/DC y tensión de referencia.

### 2. Pruebas en lazo cerrado con cambio en la referencia de la tensión de salida de la etapa ( $V_{DC-ref}$ )

Para la prueba en cuestión se varía el valor deseado para la referencia de tensión a la salida de la etapa de  $V_{DC-ref} = 140\text{ V}$  a  $V_{DC-ref} = 115\text{ V}$ .

El objetivo de dicha simulación radica en la comprobación del correcto funcionamiento del controlador entre 115 V y 140 V. Para referencias fuera de este rango es de esperar que el controlador no funcione correctamente ya que fue diseñado para 140 V y no puede operar a menos de 115 V debido a que la etapa trabaja como elevadora y el voltaje de pico de la tensión de entrada es de 115 V.

En primer lugar, observando la Figura 5-26 se comprueba que para esta prueba la corriente de referencia es seguida por la corriente de entrada de la etapa ( $i_L$ ).

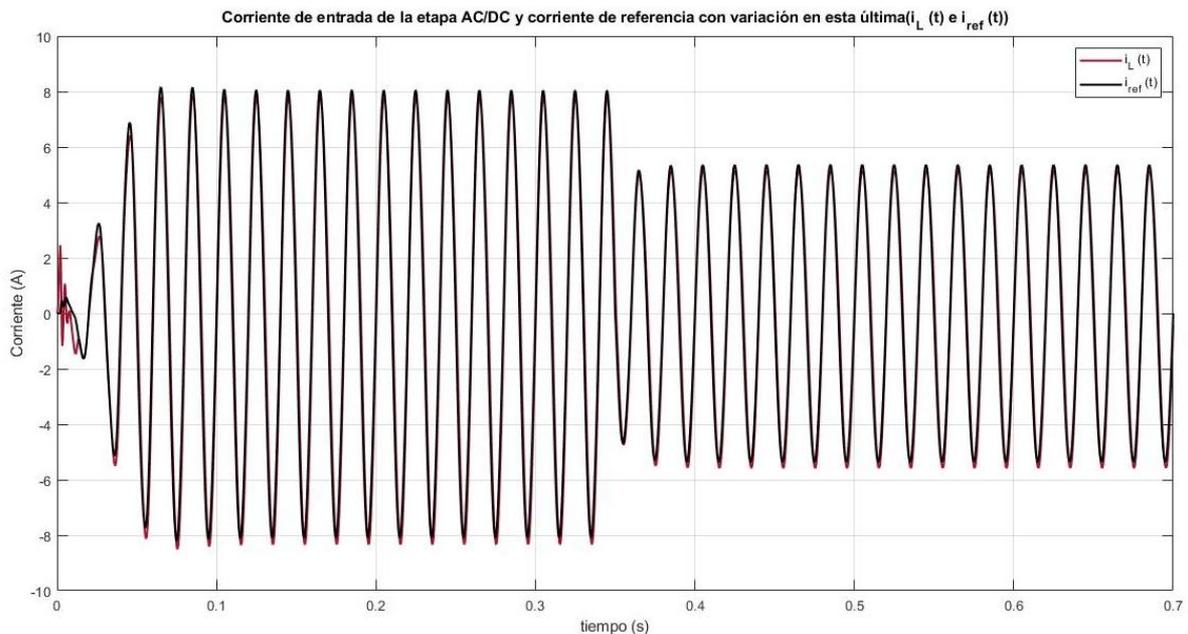


Figura 5-26. Corriente a la entrada de la etapa AC/DC y corriente de referencia cuando varía la tensión de referencia.

En segundo lugar, tal y como se muestra en la Figura 5-27 se lleva a cabo la representación de las especificaciones de entrada de la etapa (tensión y corriente) de manera conjunta para ver cómo afecta el cambio en la tensión de referencia aplicado en dicha prueba.

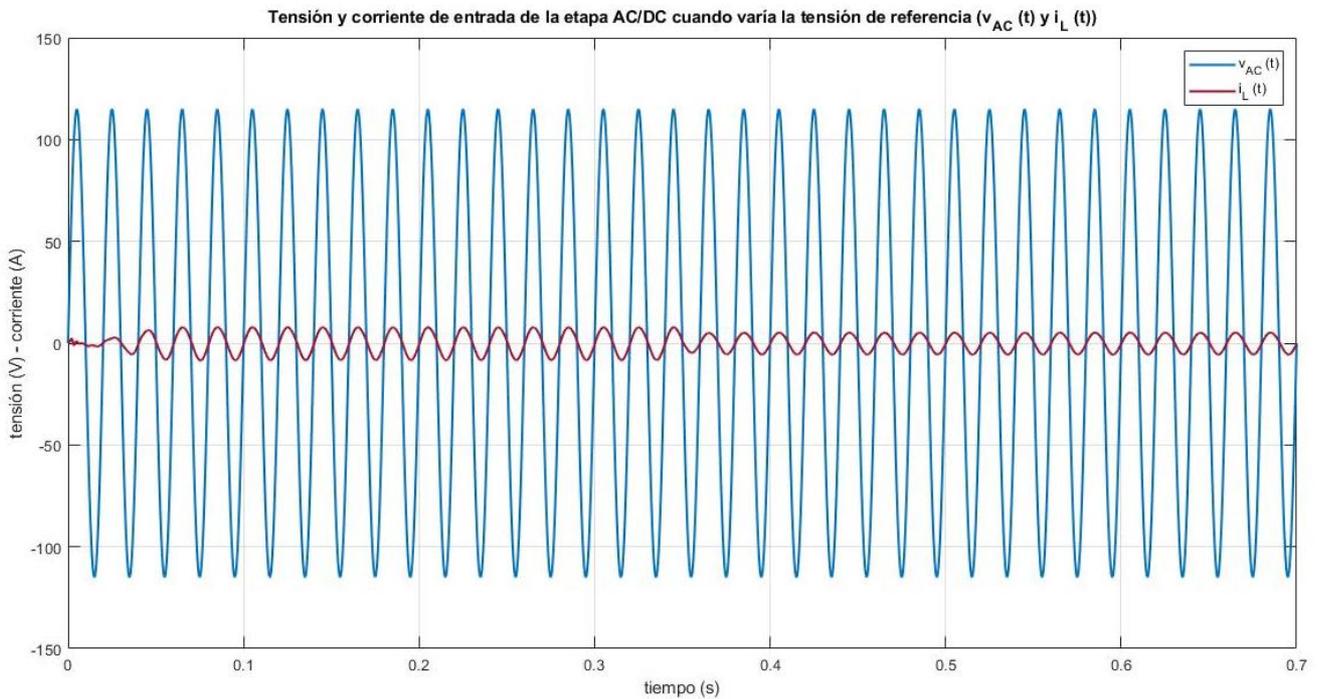


Figura 5-27. Tensión y corriente a la entrada de la etapa AC/DC cuando varía la tensión de referencia.

Por último, si se desea comprobar que la tensión de salida sigue correctamente a la tensión de referencia aun cuando esta última sufre variaciones, se ha de llevar a cabo la representación conjunta de ambas tensiones. El resultado obtenido es satisfactorio tal y como se observa en la Figura 5-28.

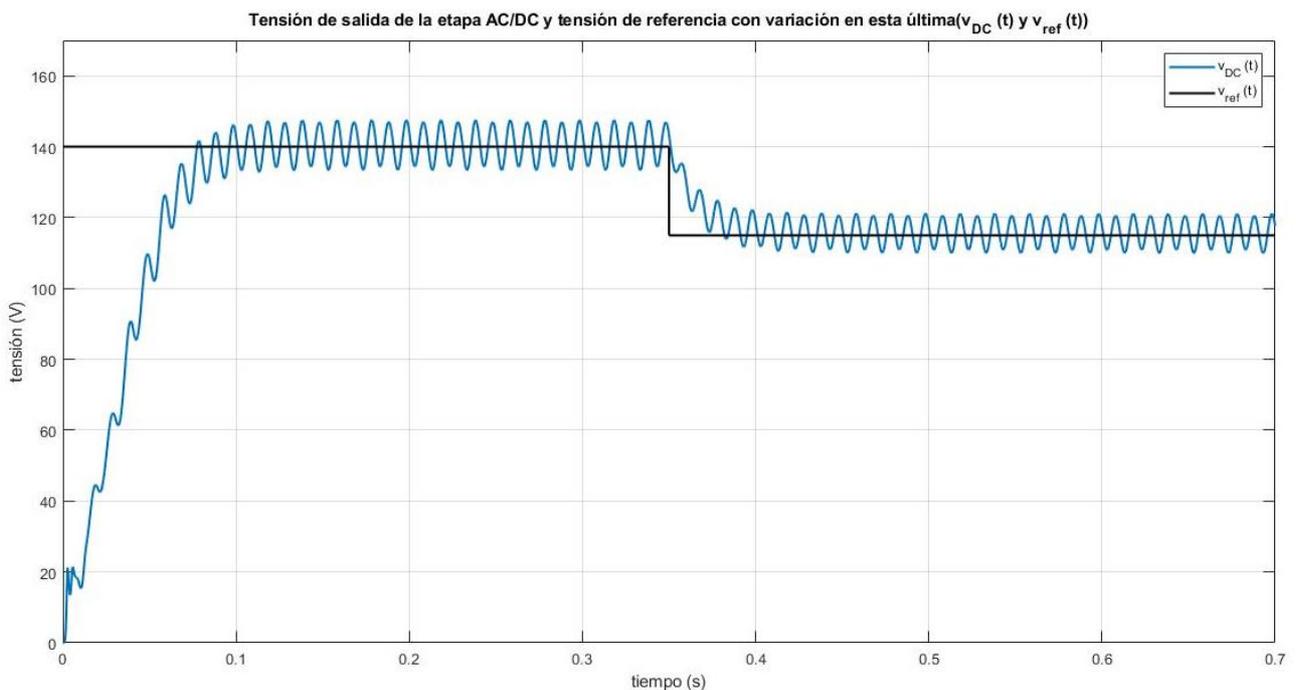


Figura 5-28. Tensión a la salida de la etapa AC/DC y tensión de referencia cuando esta última varía.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

De acuerdo con los resultados obtenidos, en términos generales se puede concluir que el controlador lineal diseñado para la etapa AC/DC tiene un buen desempeño, quedando validada la metodología de diseño.

### 5.3. Control y simulación etapa DC/DC reductora

En este apartado se muestra el procedimiento de diseño del control de la última etapa de potencia del sistema completo; la etapa DC/DC reductora encargada de adecuar los niveles de continua (tensión y corriente) proporcionados por la etapa AC/DC, de acuerdo con el método de control de carga requerido para realizar la carga de la batería de forma efectiva y segura (control CC-CV), así como la simulación de esta misma.

De acuerdo con lo que se mostró en la Figura 4-6, al aislar dicha etapa modelando su carga por una resistencia de valor adecuado (obtenida en la expresión (4.2)) así como como teniendo en cuenta sus especificaciones de entrada y salida se tiene nuevamente lo mostrado en la Figura 5-29.

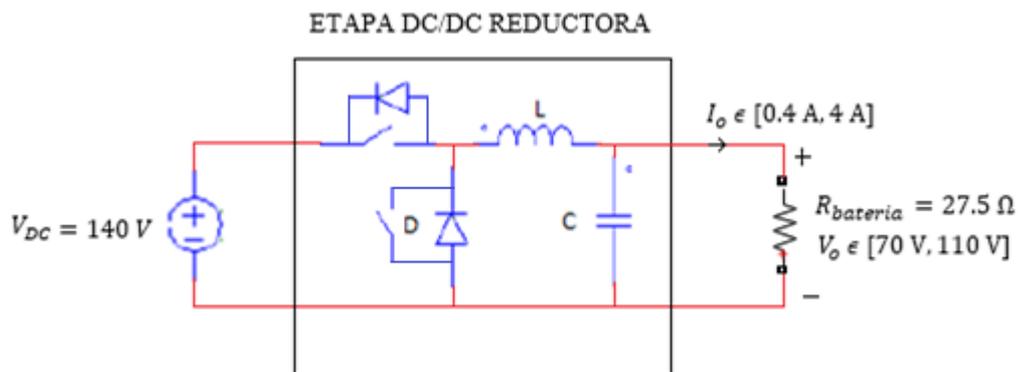


Figura 5-29. Etapa DC/DC reductora aislada con sus especificaciones de entrada y salida.

Representando la Figura 5-28 en el software de modelizado y simulación MATLAB<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> se obtiene lo mostrado en la Figura 5-30.

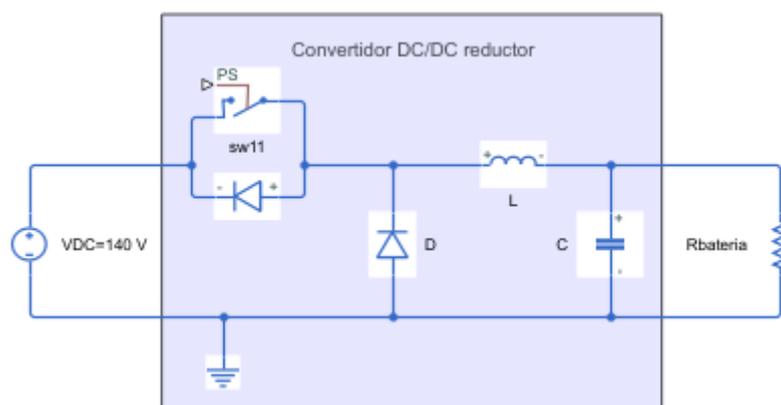


Figura 5-30. Representación etapa DC/DC reductora aislada en MATLAB<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup>.

Se desempeñará el control CC-CV requerido por esta etapa mediante un algoritmo doble nivel. El procedimiento de diseño del control se divide pues en dos partes:

- Control de alto nivel (control de ciclo de carga).

En éste se asigna el comportamiento a seguir por el cargador en un proceso de carga completo, control de tensión de la batería, tiempo de carga, carga de recuperación y mantenimiento, de modo que se genera una referencia de tensión o corriente en función del modo de carga deseado, facilitando así el procesamiento de cómo se quiere que actúe el control de bajo nivel [15].

- Control de bajo nivel (control del convertidor).

Este control se encarga de hacer funcionar el convertidor DC/DC según se haya configurado el nivel superior, creando las señales de conmutación necesarias para conseguir la corriente o tensión especificada por el control de ciclo. Dicho de otro modo, es la circuitería que controla los elementos de potencia, frecuencia de conmutación, etc. [15].

Es interesante que ambos niveles no interaccionen entre sí.

Antes de proceder a la descripción de la metodología empleada para el diseño de cada uno de los niveles del control se muestran los elementos de conversión y medición empleados en MATLAB®/Simulink® para ello.

### Elementos de conversión y medición empleados para el diseño y simulación del control

- 1) Bloque Simulink-PS Converter.

Este bloque se muestra en la Figura 5-31 y se encarga de convertir las señales de entrada de Simulink en señales físicas.



Figura 5-31. Simulink-PS Converter.

- 2) Bloque PS-Simulink Converter.

Este bloque se muestra en la Figura 5-32 y se encarga de convertir las señales físicas en señales de salida de Simulink.



Figura 5-32. PS-Simulink Converter.

- 3) Bloque Solver Configuration.

Cada red física representada por un diagrama de bloques Simscape™ conectado requiere información de configuración del solucionador para la simulación. Este bloque se muestra en la Figura 5-33 y se encarga de especificar los parámetros de Solver que necesita su modelo antes de que pueda comenzar la simulación.

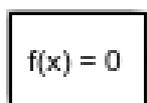


Figura 5-33. Solver Configuration.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

### 4) Bloque Scope.

Este bloque se presenta en la Figura 5-34 y se encarga de mostrar las señales obtenidas durante la simulación en el dominio del tiempo.

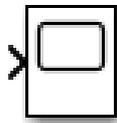


Figura 5-34. Scope.

### 5) Bloque Current-Voltage Simscape Interface.

Este bloque se muestra en la Figura 5-35 y es un bloque de interfaz necesario para conectar los circuitos de energía especializados de Simscape™ Electrical™ con elementos eléctricos de la librería Foundation también de Simscape. Conserva la corriente que circula por él, así como el voltaje, conservando pues la energía eléctrica.



Figura 5-35. Current-Voltage Simscape Interface.

### 6) Bloque Current Sensor.

Este bloque comúnmente conocido como amperímetro se muestra en la Figura 5-36 y se encarga de medir la corriente que circula en el lugar del circuito donde este se sitúa.

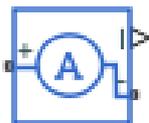


Figura 5-36. Current Sensor.

### 7) Bloque Voltage Sensor.

Este bloque comúnmente conocido como voltímetro se muestra en la Figura 5-37 y se encarga de medir la tensión entre los dos puntos del circuito donde se sitúa.



Figura 5-37. Voltage Sensor.

## 8) Bloque Battery.

Este bloque es el modelo de batería del que dispone la librería de Simulink y se emplea para la simulación del control del convertidor. Se muestra en la Figura 5-38 e implementa un modelo dinámico genérico parametrizado para representar los tipos más populares de baterías recargables. Permite elegir el tipo de batería que se quiere tener (iones de litio, níquel-cadmio, plomo-ácido e hidruro metálico de níquel) para así adecuar la respuesta de modo que esta última se asemeje a la respuesta del modelo real.

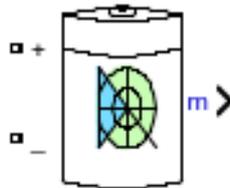


Figura 5-38. Battery.

El circuito equivalente que modela el bloque de la batería se muestra en la Figura 5-39.

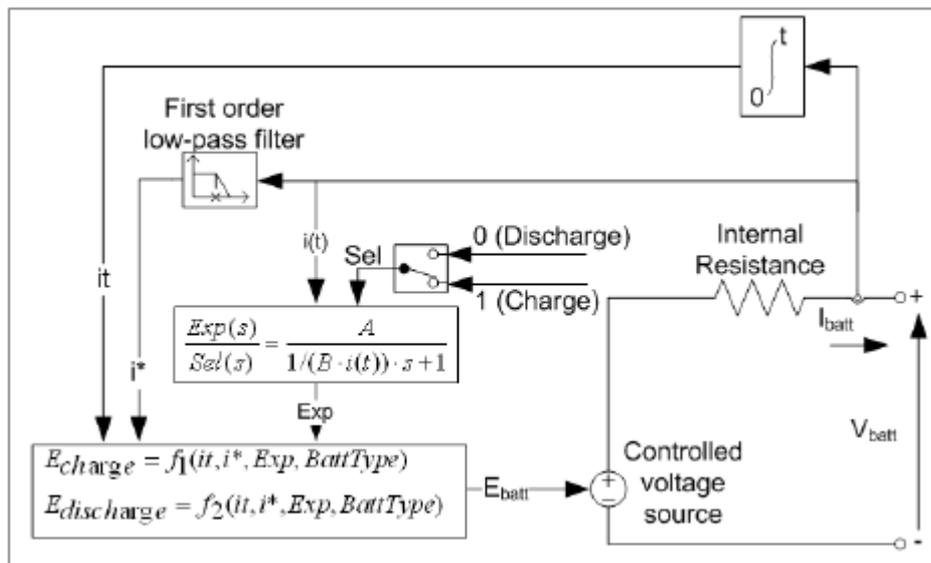


Figura 5-39. Circuito equivalente de la batería en Simulink [22].

Una vez mostrados los elementos de conversión y medición empleados en MATLAB®/Simulink® así como el modelo de la batería que se empleará para realizar las simulaciones, se procede a la descripción de la metodología empleada para el diseño del control del bajo y alto nivel.

### 5.3.1. Control de bajo nivel

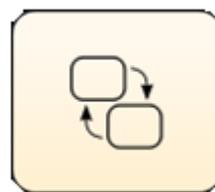
En este apartado se describe la metodología empleada para diseñar el control de bajo nivel, así como las conclusiones relevantes y resultados obtenidos en cada proceso.

Como se muestra en la Figura 5-30 se considera una fuente de tensión continua de 140 V en la entrada, equivalente al valor que en su lugar se obtendría en la etapa rectificadora con el objetivo de mitigar los transitorios producidos por los elementos del circuito al iniciar su funcionamiento. Por otra parte, el condensador del que dispone esta etapa ha de encontrarse previamente cargado a dicho nivel de tensión.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

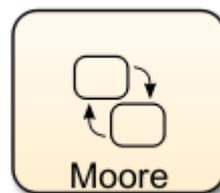
Como se mencionó anteriormente, este control se encarga de hacer funcionar el convertidor DC/DC creando las señales de conmutación necesarias para conseguir la corriente o tensión especificada por el control de ciclo. El control y tratamiento “driver” de la consigna de corriente para atacar al interruptor de potencia se realiza utilizando la extensión de Simulink®, conocida como Stateflow®. Este entorno permite diseñar y desarrollar el control de un modo más simple y visual, empleando diagramas de flujo y máquina de estado para modelizar y simular decisiones lógicas [15].

A la representación gráfica de una máquina de estados finitos que consta de estados, transacciones y datos se le conoce en este entorno como chart (diagrama de Stateflow®). Este gráfico de flujo de estado es un modelo de máquina de estado híbrido y es el tipo predeterminado. Combina la semántica de los gráficos de Mealy y Moore con la semántica extendida de los gráficos de Stateflow.



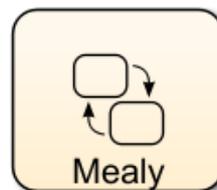
**Chart**

Figura 5-40. Stateflow Chart.



**Moore**

Figura 5-41. Stateflow Chart Moore.



**Mealy**

Figura 5-42. Stateflow Chart Mealy.

Sin embargo, a menudo, las máquinas de Moore junto con las máquinas Mealy se consideran paradigmas básicos estándar de la industria para modelar máquinas de estados finitos.

Para la elaboración del control de bajo nivel se emplea un Stateflow Chart Moore configurado adecuadamente para que cuente con tres entradas (in, ton y toff) y una salida (out). Dos de las entradas (ton y toff) son utilizadas como temporizadores para los estados de conducción y no conducción. Se ha optado por esta solución debido a que los contadores internos de los que dispone el propio Stateflow generaban errores al compilar, impidiendo por tanto iniciar la simulación. Además, el funcionamiento de estos contadores es necesario para garantizar que la frecuencia de conmutación generada sea como máximo de 50 kHz. Frecuencias superiores a este valor podrían llegar a provocar que el interruptor nunca se llegara a abrir. Uno de los temporizadores (toff) se inicia al pasar por cero y el otro (ton) al pasar por uno tal y como se muestra en la Figura 5-43, permitiéndose así el control de los tiempos de conducción y no conducción por separado [15]. Para integrar en Simulink los temporizadores junto con el Stateflow se engloba dentro de un subsistema el cual se muestra en la Figura 5-43.

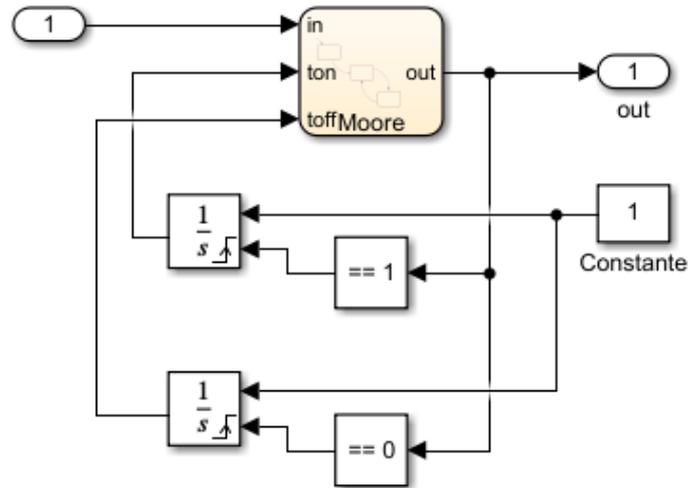


Figura 5-43. Subsistema de dos temporizadores y Stateflow.

La tercera entrada (in) del Stateflow es utilizada para chequear el error existente entre la corriente de referencia y la real. Tal y como se muestra en la Figura 5-44, la secuencia interna del Stateflow arranca inicializando la salida del “driver” a cero para forzar que el interruptor se encuentre apagado en caso de no estarlo y se fija que el error existente no supere 1 mA tanto en la zona superior como en la inferior. Por lo tanto, como se puede apreciar en la Figura 5-44 el control oscilará entre los dos estados (On y Off) para conseguir este requisito, siempre con la limitación máxima fijada anteriormente.

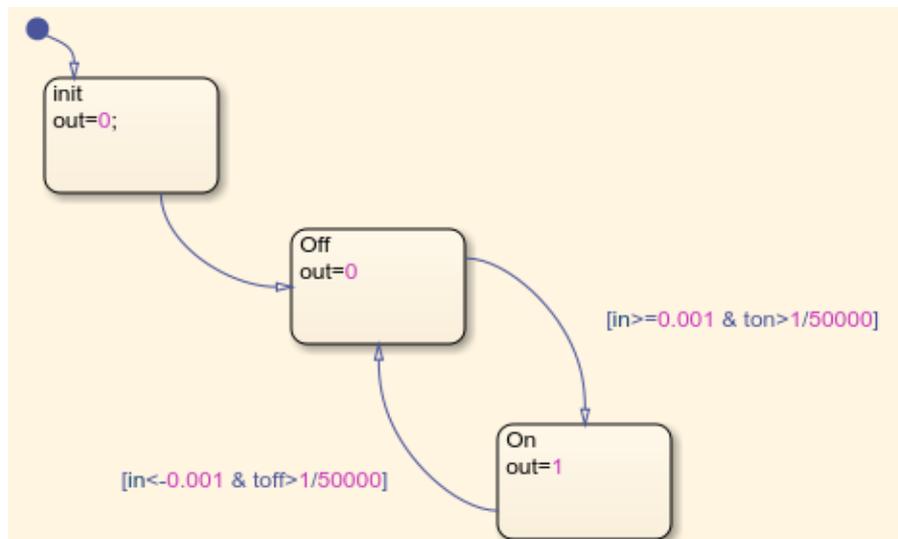


Figura 5-44. Stateflow del control del temporizador a 50 kHz como máximo y margen de error de 1 mA.

Para realizar las simulaciones se sustituye la resistencia que modelaba la batería ( $R_{bateria}$ ) por el modelo de batería mostrado en la Figura 5-38 haciendo uso del Bloque Current-Voltage Simscape Interface (Figura 5-35) y se integra en Simulink el subsistema que engloba los temporizadores junto con el Stateflow.

Se realizarán tres estudios. En el primero de ellos se fija la corriente de referencia (que proporcionaría el control de alto nivel) en el valor mínimo de corriente que tendrá que proporcionar el cargador: 0.4 A. En el segundo estudio, por el contrario, se fija la corriente de referencia en el valor máximo de corriente que se tendrá a la salida del cargador: 4 A. Finalmente, en el último estudio a realizar, se fija la corriente de referencia en un valor intermedio entre el valor máximo y mínimo de corriente que se tendrá a la salida del cargador, por ejemplo: 2.5 A. La batería queda fijada a un 80 % de carga y para agilizar las simulaciones se eligen 3 ms de funcionamiento del sistema.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

Los resultados obtenidos para el primer estudio se muestran en las Figuras 5-45 y 5-46. Observando dichas figuras se comprueba el funcionamiento del circuito de control de corriente siendo el convertidor capaz de alcanzar la corriente fijada de 0.4 A en un tiempo inferior a 0.25 ms. La respuesta del sistema es realmente rápida.

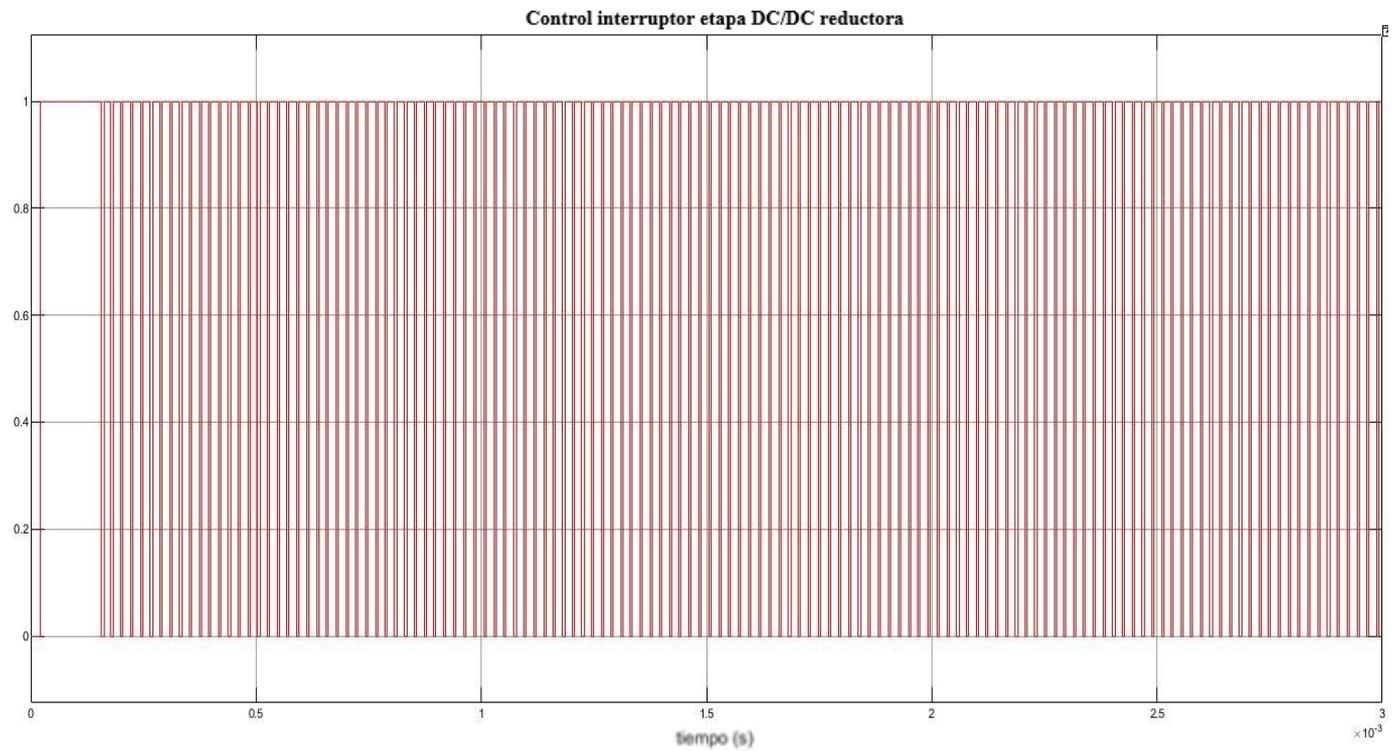


Figura 5-45. Control interruptor etapa DC/DC reductora (primer estudio).

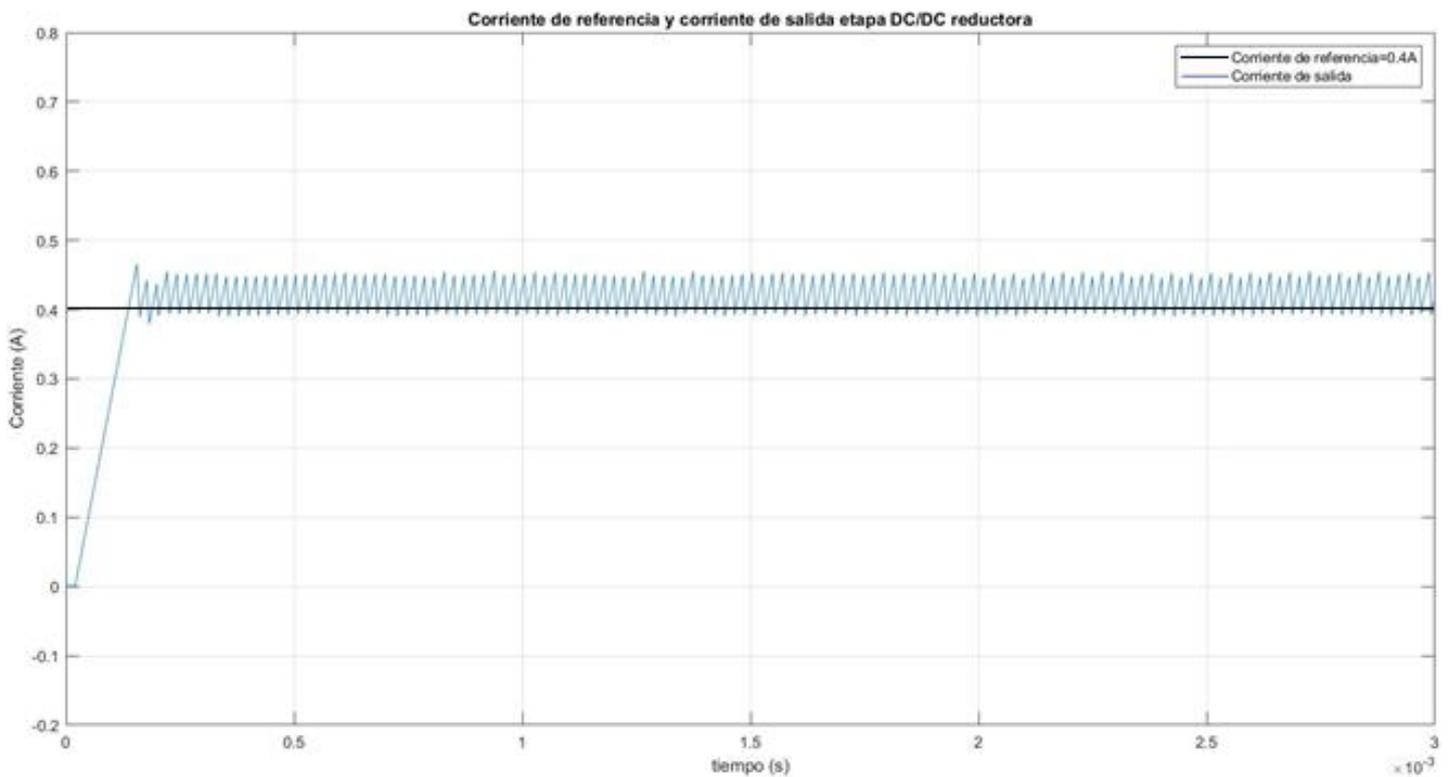


Figura 5-46. Corriente de referencia y corriente de salida etapa DC/DC reductora (primer estudio).

Los resultados obtenidos para el segundo estudio se muestran en las Figuras 5-47 y 5-48. De nuevo observando dichas figuras se comprueba que el sistema es capaz de proporcionar la corriente fijada, en este caso de 4 A. Sin embargo, para alcanzar dicho valor de corriente el tiempo necesario es de aproximadamente 1.25 ms siendo este superior al del primer estudio.

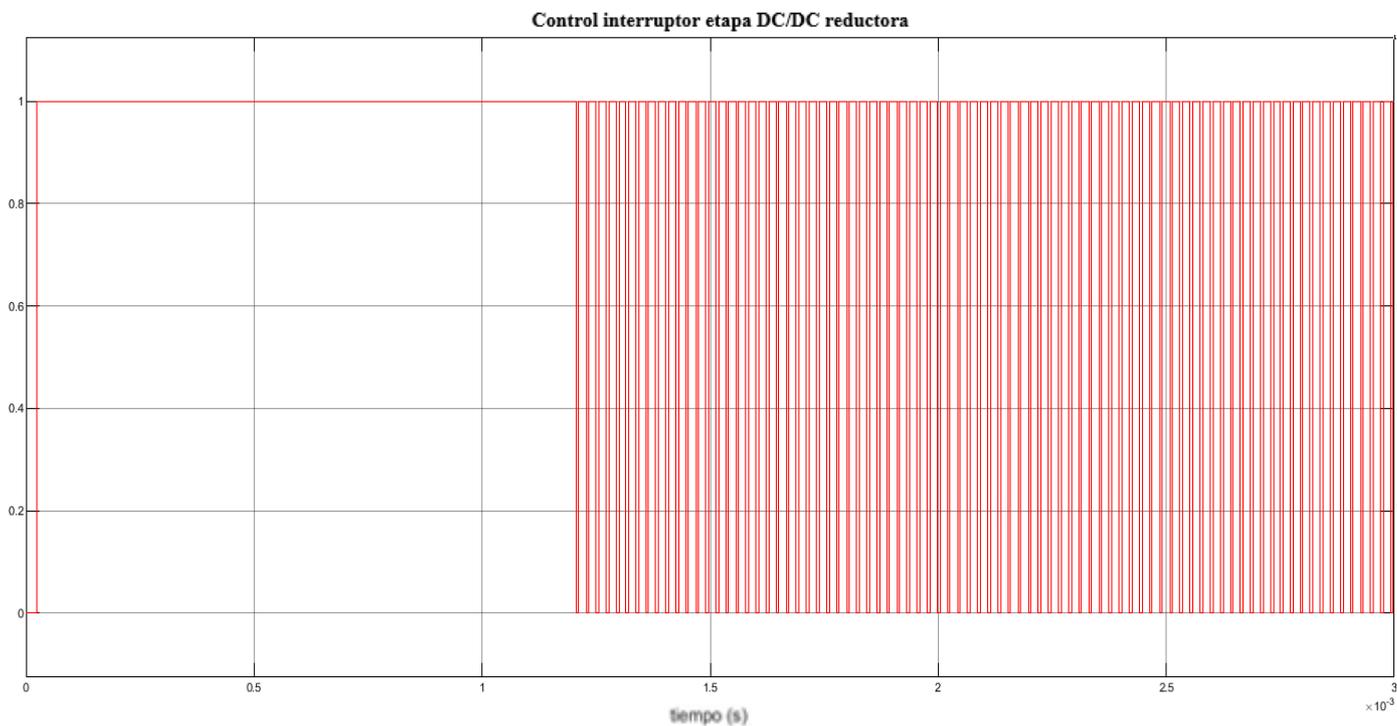


Figura 5-47. Control interruptor etapa DC/DC reductora (segundo estudio).

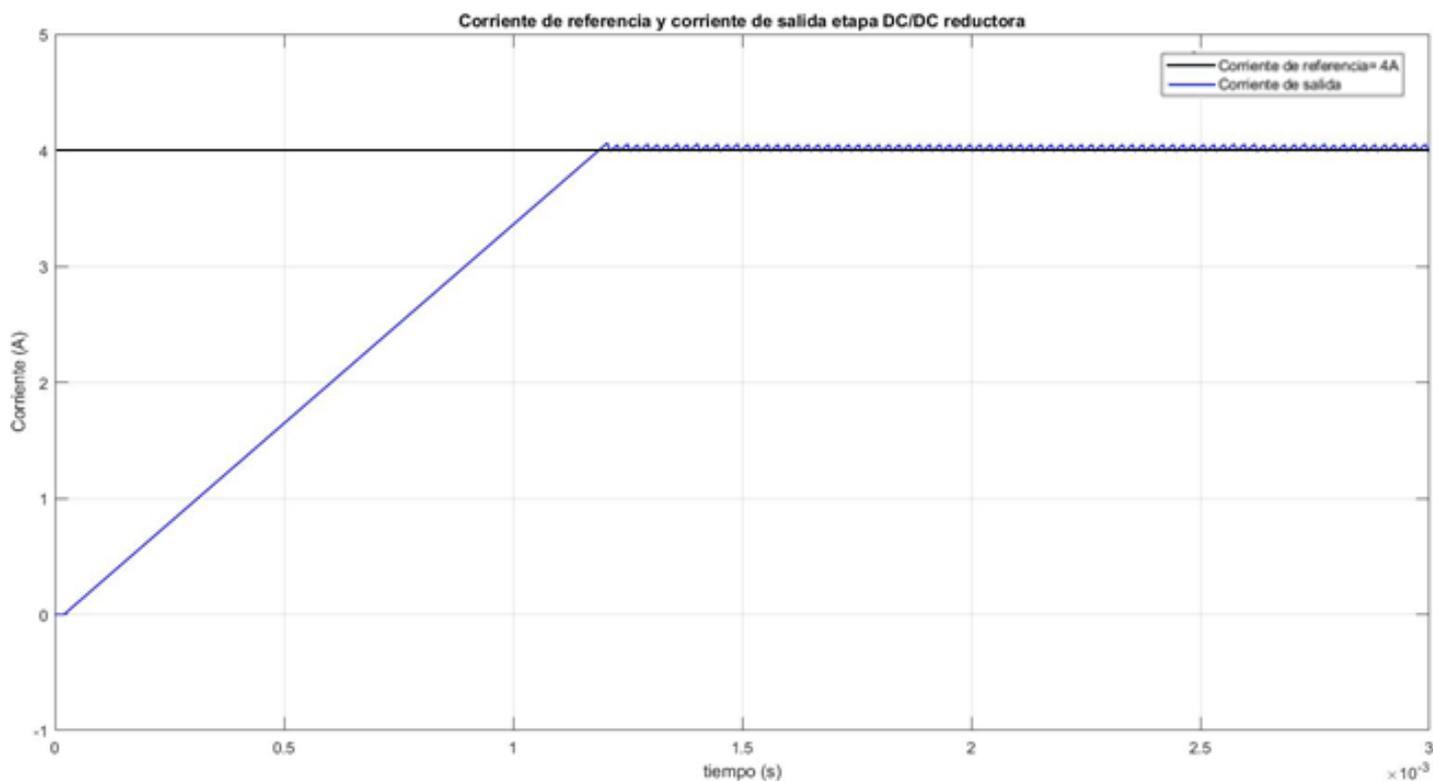


Figura 5-48. Corriente de referencia y corriente de salida etapa DC/DC reductora (segundo estudio).

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

Finalmente, los resultados obtenidos para el último estudio se muestran en las Figuras 5-49 y 5-50. Una vez más se alcanza la corriente fijada, en este caso de 2.5 A. El tiempo necesario por el convertidor para alcanzar esta consigna de corriente es de aproximadamente 0.75 ms.

Control interruptor etapa DC/DC reductora

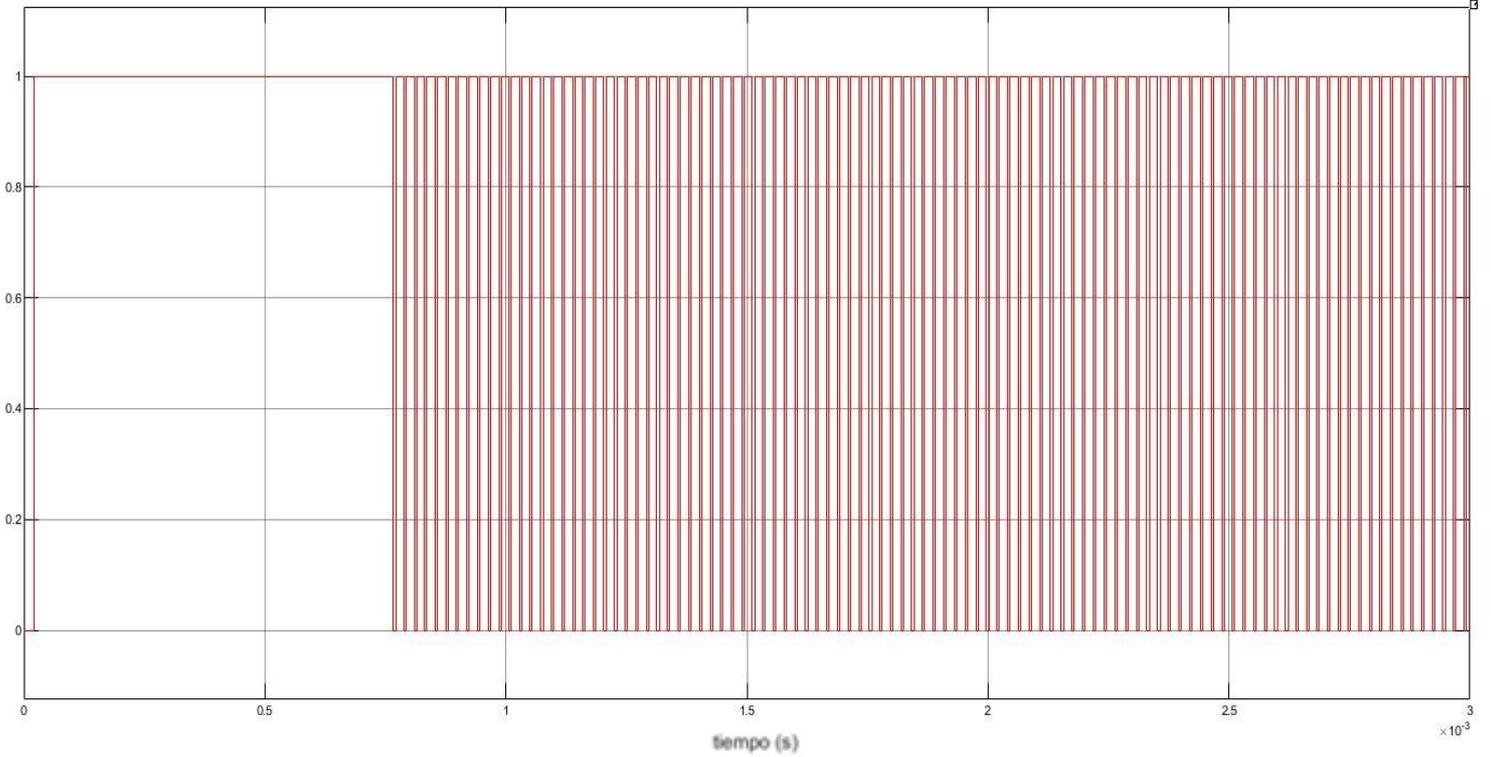


Figura 5-49. Control interruptor etapa DC/DC reductora (tercer estudio).

Corriente de referencia y corriente de salida etapa DC/DC reductora

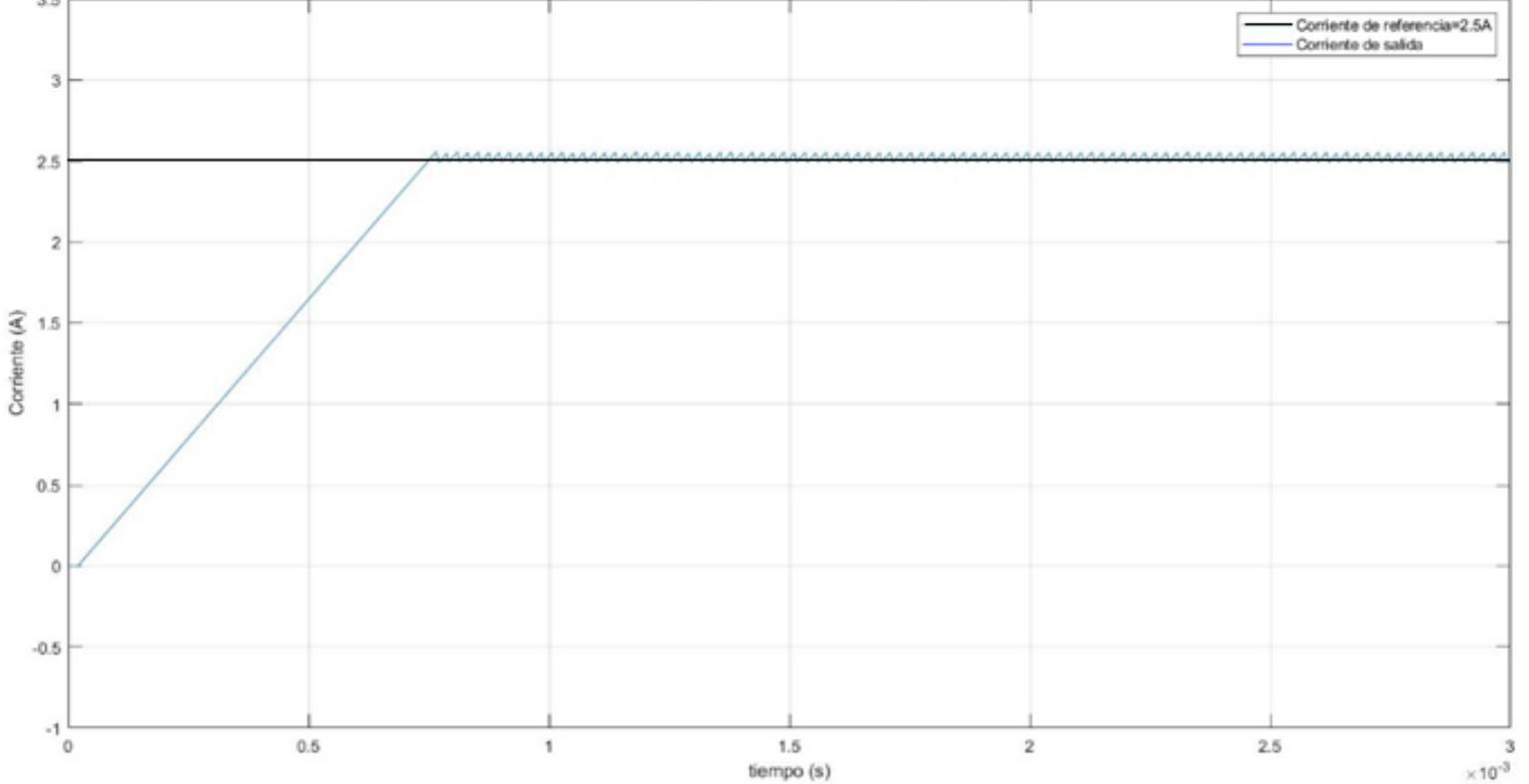


Figura 5-50. Corriente de referencia y corriente de salida etapa DC/DC reductora (tercer estudio).

Realizados los tres ensayos se puede afirmar que el cargador responde según lo esperado al control de bajo nivel implementado.

Sin embargo, para poder garantizar un funcionamiento adecuado se necesita un respuesta rápida del sistema ante una variación de la consigna. De este modo, se fuerzan diferentes niveles de corriente de referencia y se aprecia la respuesta que proporciona el sistema en la Figura 5-51.

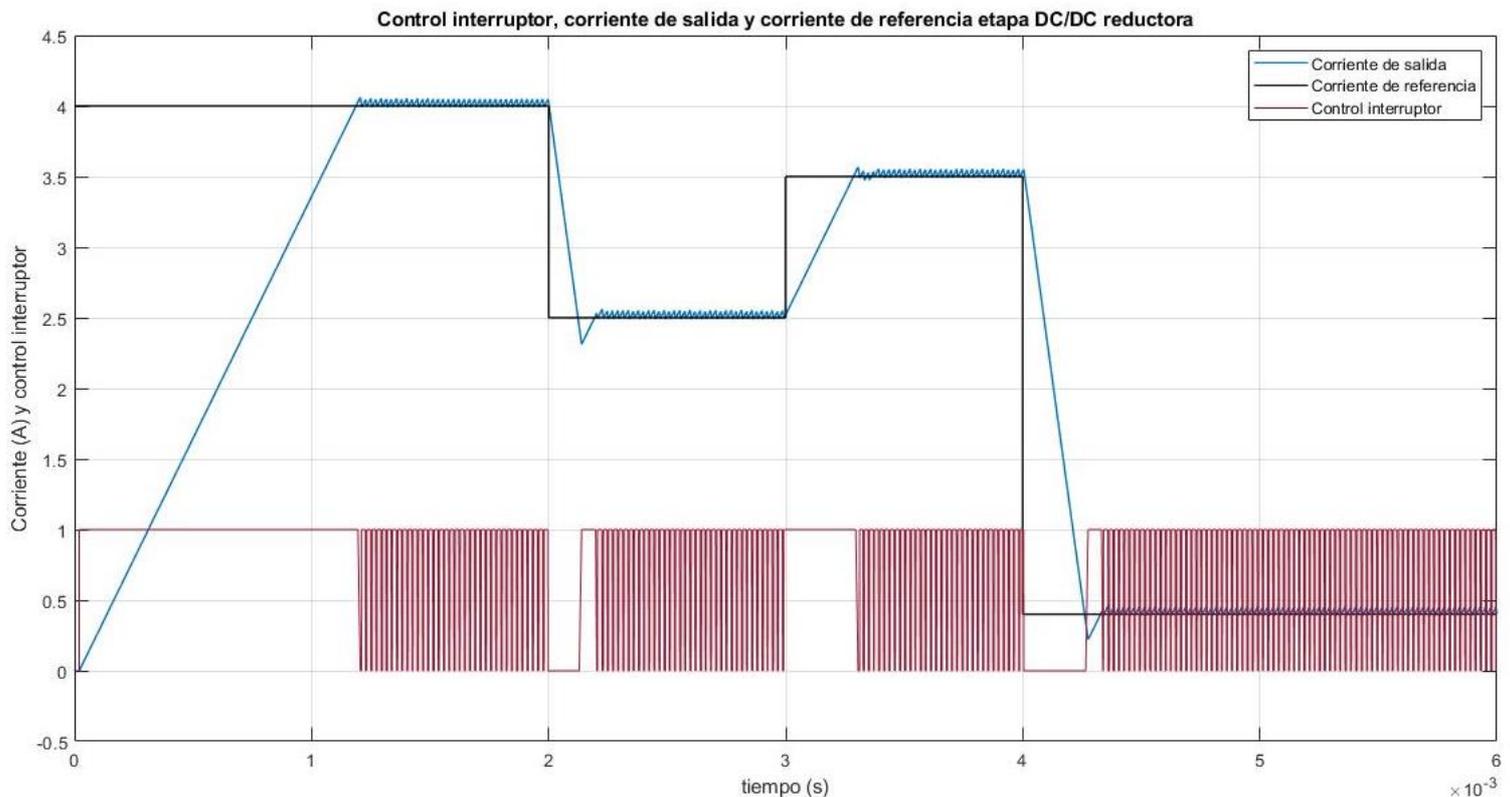


Figura 5-51. Control interruptor, corriente de salida y corriente de referencia etapa DC/DC reductora cuando varía esta última.

La respuesta obtenida en la Figura 5-51 demuestra el funcionamiento esperado y deseado del convertidor al control de bajo nivel implementado. Aun así, es importante destacar que el control que se ha empleado es de tipo bang-bang y, por tanto, presenta una frecuencia de conmutación variable. Este es el motivo por el cual existe un rizado de corriente variable en todas las figuras mostradas en este apartado del proyecto.

Por otra parte, este tipo de control implica una dificultad superior con respecto al control PWM en el filtrado de las interferencias electromagnéticas.

### 5.3.2. Control de alto nivel

En este apartado se describe la metodología empleada para diseñar el control de alto nivel, así como las conclusiones relevantes y resultados obtenidos en cada proceso.

El control de alto nivel se podría considerar como el cerebro del convertidor, pues es el encargado de, a partir de la tensión en bornas de la batería, determinar que fase de carga es la adecuada proporcionando así a la salida el valor de corriente conveniente. Este valor de corriente es el valor de consigna que se proporcionará al control de bajo nivel. Al estar trabajando con una batería de iones de litio, de acuerdo con lo expuesto anteriormente en [3.2.2] y con [12], para realizar una carga de forma efectiva la curva de carga que ha de conseguirse corresponde a una CC-CV. Esto quiere decir que en la primera fase de carga se realiza un control a corriente constante y posteriormente, en la segunda fase de carga se lleva a cabo un control a tensión constante. La transición de la fase de carga a corriente constante a la de tensión constante se ha de realizar antes de alcanzar el límite superior de la tensión de celda.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

Las especificaciones de la batería relevantes para el diseño del control se detallan en la tabla 5-1.

Tabla 5-1. Especificaciones batería relevantes para el control de alto nivel

Tecnología	Ion-Litio
Capacidad	80 Ah
Tensión nominal	100.8 V
Tensión de descarga máxima	70 V
Tensión de carga máxima	110 V
Ratio máximo de carga	0,1C
Elementos en serie	28

Debido a que el ratio máximo de carga es de 0.1C, como se indicó en [3.2.2] podría inyectarse en la batería una corriente máxima de 4 A.

Como se indicó en [3.3.1.4] el ciclo completo de carga está compuesto por cuatro etapas o fases: pre-acondicionamiento, corriente constante, tensión constante y mantenimiento. A continuación, se detalla cada una de ellas con el objetivo de saber su finalidad.

### 1. Pre-acondicionamiento

Esta etapa únicamente se llevará a cabo si la batería se encuentra profundamente descargada, por ejemplo, por debajo de 3 V/elem. En estas condiciones el cargador realiza un pequeño pre-acondicionamiento aplicando un 10% de la corriente máxima. De este modo se evita que las celdas alcancen temperaturas excesivas mientras que el nivel de carga de la batería no permita aceptar la etapa de corriente constante a corriente máxima. Suele ser inusual la necesidad de dicha etapa pues se evita la descarga profunda de la batería para que esta no sea dañada [15].

### 2. Corriente constante

Alcanzados los 3 V/elem. el convertidor suministra la máxima corriente de carga hasta alcanzar los 3,9 V/elem. Es habitual que esta fase de carga se mantenga hasta alcanzar los 4,1 V/elem. pero en el caso que nos ocupa al querer disponer de un margen aceptable con respecto al valor límite de la tensión de salida del cargador (tal y como se mencionó en [3.2.2]), este valor se ve ligeramente reducido.

### 3. Tensión constante

Cuando la tensión en bornas de la batería se encuentra en 3,9 V/elem. el cargador deja de trabajar a corriente constante y pasa a operar a tensión constante con el objetivo de eliminar cualquier sobrecarga. Esta transición de etapa transcurre de manera fluida para asegurar que se alcance la capacidad máxima de carga en la batería sin riesgo a que esta sea dañada. Dicha etapa se mantiene hasta que la corriente se anula totalmente. Habitualmente, el valor de tensión en bornas de la batería para iniciar esta etapa del ciclo de carga es de 4,1 V/elem.

Llegado a este punto se considera completado el ciclo de carga.

#### 4. Mantenimiento

Si tras completarse el ciclo de carga se mantiene el cargador conectado a la batería, éste realiza lo que se denomina una carga de nivelado para contrarrestar la auto-descarga de la batería. Este proceso habitualmente se inicia cuando la tensión de la batería cae por debajo de los 3,9 V/elem. y finaliza al alcanzar de nuevo los 4,1 V/elem., sin embargo, por el mismo motivo que se comentó con anterioridad, en este caso, comenzará cuando la tensión de la batería caiga por debajo de 3.7 V/elem. y finalizará al alcanzar de nuevo los 3,9 V/elem.

La finalidad de que el ciclo de carga de una batería de iones de litio esté compuesto por cuatro fases o etapas es la de evitar una sobrecarga en la batería, ya que si esto llegara a ocurrir se vería reflejado negativamente en la vida de esta pudiendo llegar a ser potencialmente peligroso. Esto último se debe a que el movimiento interno de los iones una vez alcanzada la tensión máxima, queda limitado y la mayor parte de la energía aplicada se transforma en energía térmica motivando el sobrecalentamiento de la batería. Si debido a lo anterior se llegara a producir una desgasificación del electrolito la batería podría sufrir una explosión [15].

En la tabla 5-2 se muestra un resumen del comportamiento que el circuito de control de alto nivel tendrá en función de la tensión en bornas de la batería.

Tabla 5-2. Rango de tensión y corriente en cada fase de carga

	$V_{\text{MIN}}$ (V/elem.)	$V_{\text{MAX}}$ (V/elem.)	$V_{\text{MIN}}$ (V)	$V_{\text{MAX}}$ (V)	$I_{\text{OUT}}$ (A)
Pre- acondicionamiento	0	3	0	84	0.4
Corriente constante (CC)	3	3,9	84	109,2	4
Tensión constante (CV)	3,9	4	109,2	110	-
Mantenimiento	3,7	3,9	103,6	109,2	4

Para la elaboración del control de alto nivel se emplea un Stateflow Chart con las cuatro etapas del ciclo de carga anteriormente mencionadas (Figura 5-52), configurado adecuadamente para que cuente con dos entradas (V y e) y una salida (I).

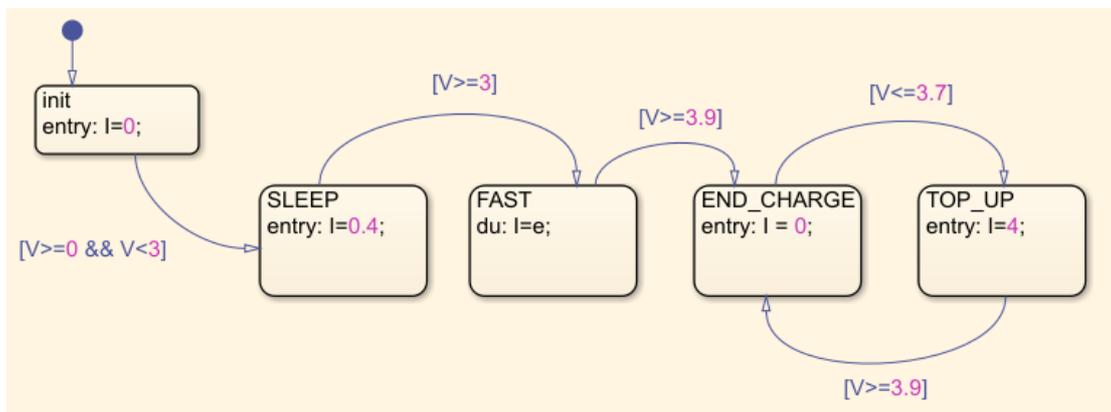


Figura 5-52. Stateflow control etapas del ciclo de carga.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

Del mismo modo que en el diseño del control de bajo nivel, se integra este Stateflow junto con el resto de los elementos necesarios para elaborar el control CC-CV dentro de un subsistema que contiene una entrada y una salida tal y como se muestra en la Figura 5-53. La entrada contiene el nivel de tensión de la batería que se procesa de manera que opere a nivel elemental. Esto se consigue conociendo previamente el número de celdas dispuestas en serie en la batería, que en este caso son 28. Esta misma entrada es tratada con un control P, encargado de corregir el error existente entre la tensión de batería real y la máxima, 109,2 V, en las fases de corriente constante y tensión constante. Esta compensación se realiza mediante el control de la corriente de salida, limitada a 4 A cuando el error es muy grande.

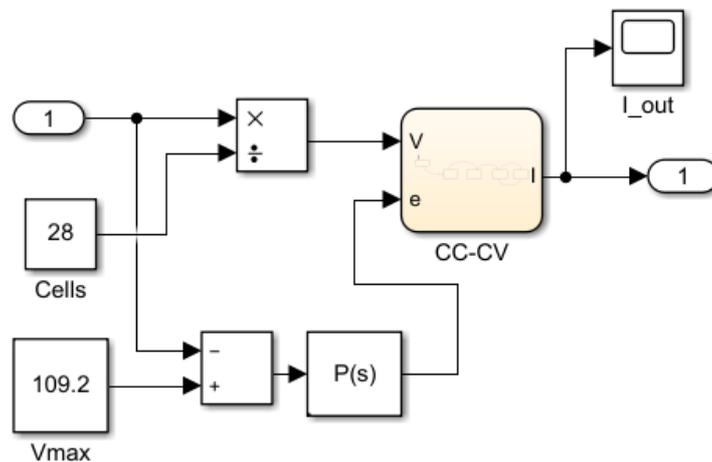


Figura 5-53. Subsistema alto nivel.

Como se puede apreciar en la Figura 5-54 para agilizar el proceso de simulación se ha sustituido toda la electrónica de potencia encargada de proporcionar la corriente demandada por una fuente de corriente controlada. Sin embargo, se sigue manteniendo el mismo modelo de batería utilizado para las simulaciones del control de bajo nivel.

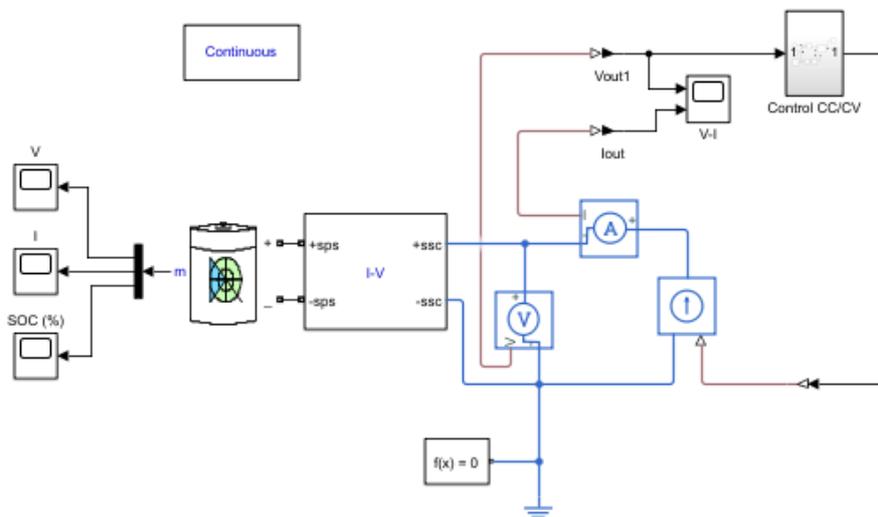


Figura 5-54. Subsistema de control y simulación alto nivel.

Aun sustituyendo toda la electrónica de potencia encargada de proporcionar la corriente demandada por una fuente de corriente controlada, se hace inviable realizar una simulación en la que se lleve a cabo una carga completa de la batería ya que se necesitarían de múltiples semanas para reproducir las 10 horas (36000 s) que se requieren para este proceso de carga completo. Por tanto, para poder comprobar que el cargador efectúa correctamente las etapas del ciclo de carga se opta por realizar pequeñas simulaciones en diferentes estados de carga de la batería. El tiempo de simulación escogido es de 100 ms.

En primera instancia, se considera que la batería está totalmente descargada, es decir, se ajusta el parámetro de porcentaje de carga inicial de la batería en un 0 %. Con la batería totalmente descargada ( $SOC (\%) = 0$ ) el convertidor inicia la carga en la etapa de pre-acondicionamiento aplicando a la batería una corriente constante de 0.4 A tal y como se muestra en la Figura 5-55. Por otra parte, en la Figura 5-56 se representa la evolución de la tensión en bornes de la batería, así como en la Figura 5-57 la variación en el estado de carga de esta (SOC en %).

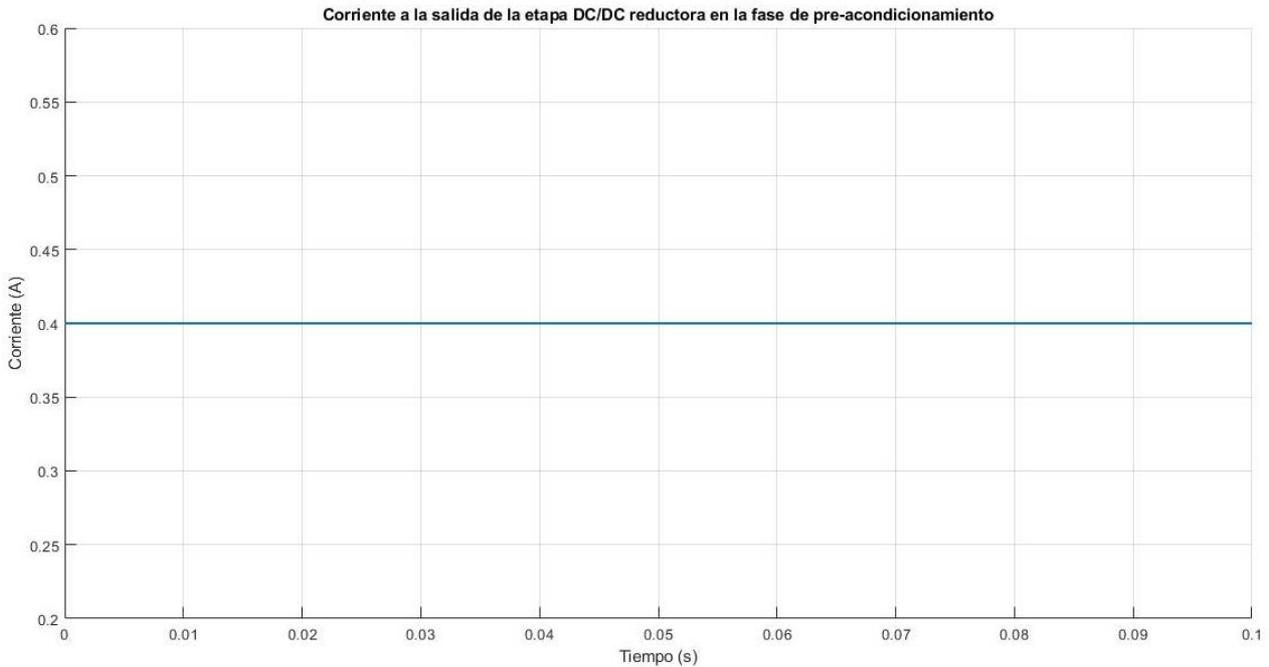


Figura 5-55. Corriente a la salida de la etapa DC/DC en la fase de pre-acondicionamiento.

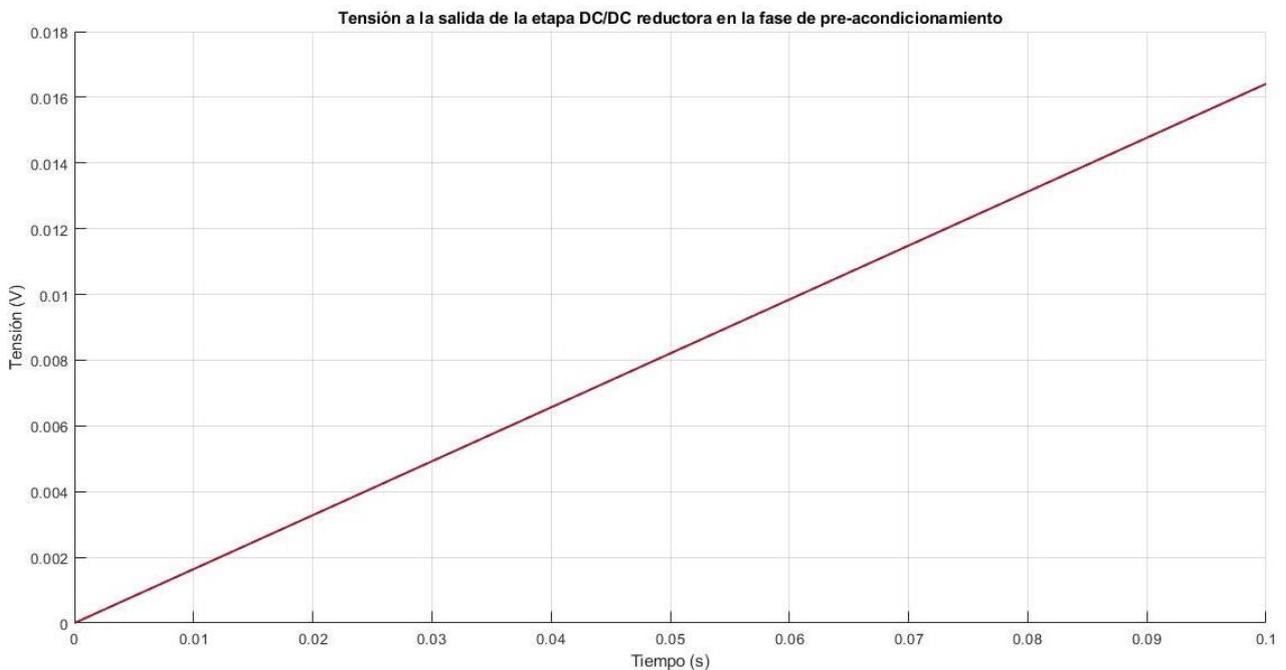


Figura 5-56. Tensión a la salida de la etapa DC/DC en la fase de pre-acondicionamiento.

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

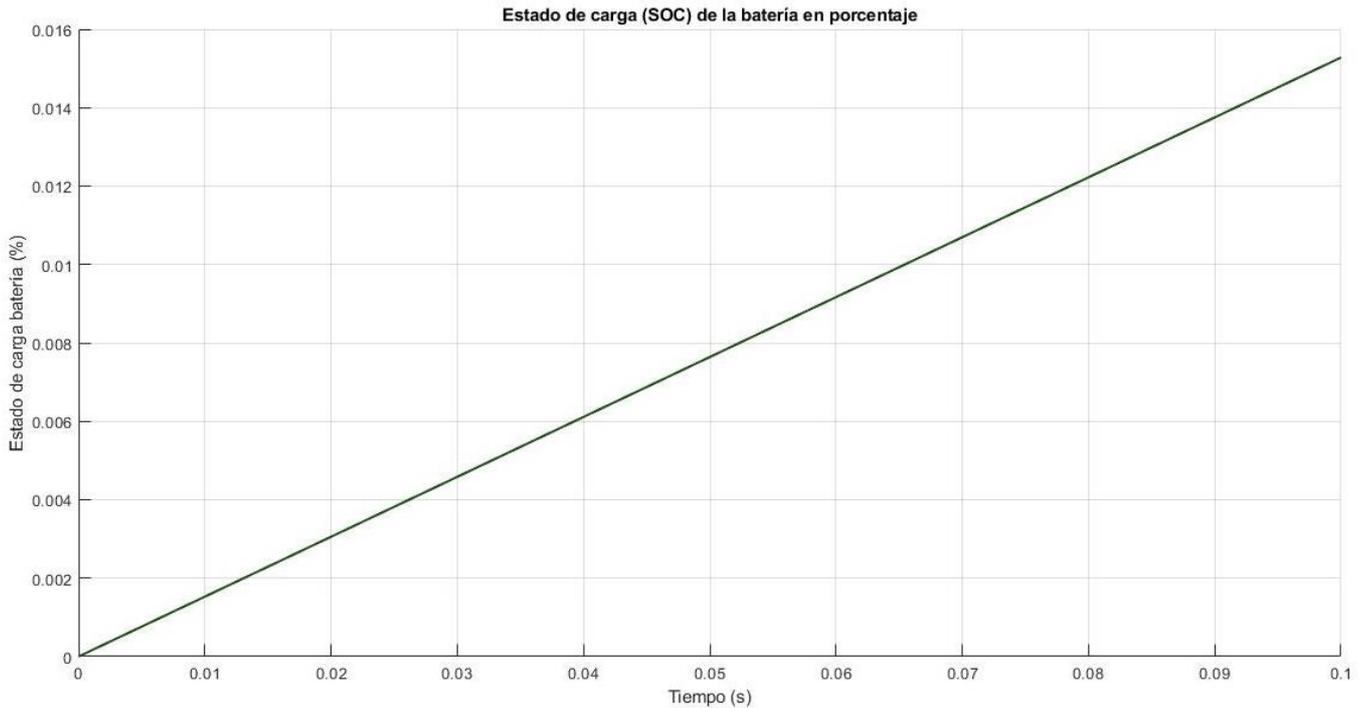


Figura 5-57. Estado de carga (SOC) de la batería en %.

Se prosigue ajustando el parámetro de porcentaje de carga inicial de la batería en un 20 %. Con la batería en este estado de carga el convertidor inicia el proceso de carga directamente en la etapa o fase de carga a corriente constante (CC), proporcionando a la batería una corriente de 4 A tal y como se muestra en la Figura 5-58. Por otra lado, en la Figura 5-59 se representa la evolución de la tensión en bornes de la batería, así como en la Figura 5-60 la variación en el estado de carga de esta (SOC en %). Se puede observar que, para este estado de carga, el valor de la tensión en bornes de la batería aún no ha alcanzado su valor máximo (109,2 V).

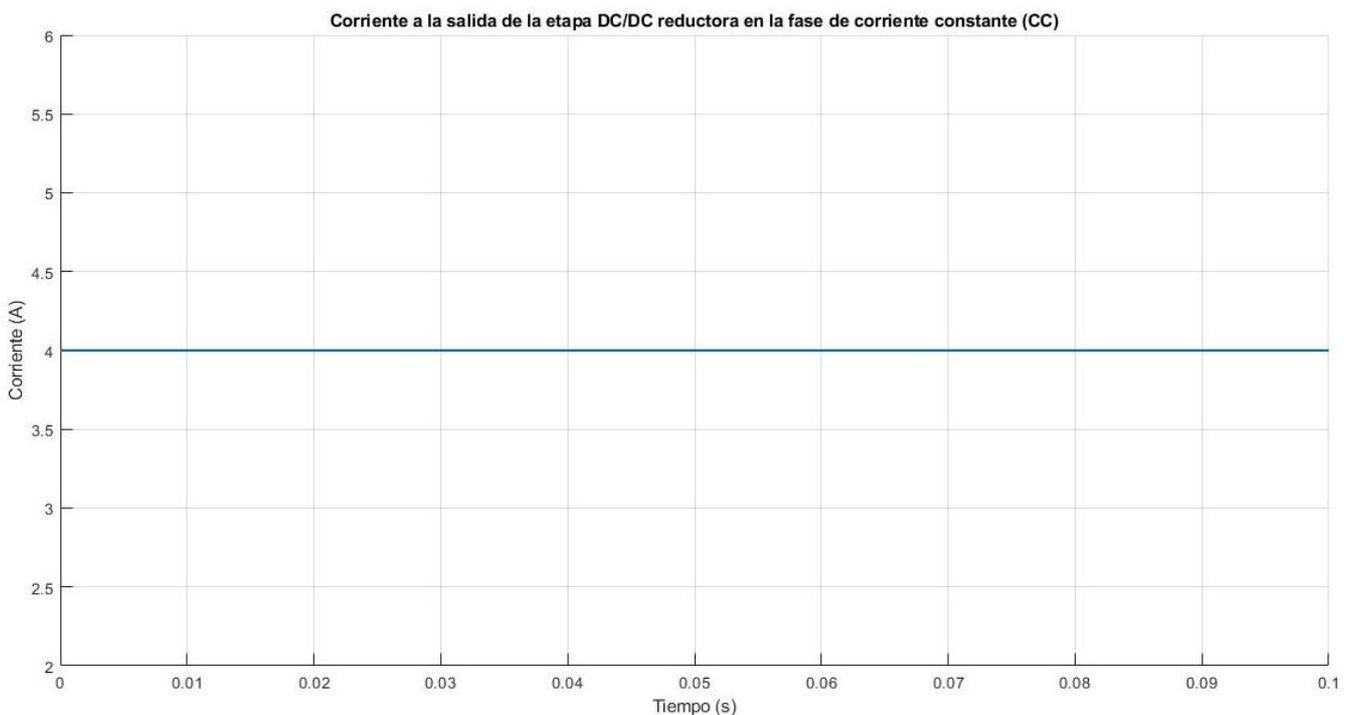


Figura 5-58. Corriente a la salida de la etapa DC/DC en la fase de corriente constante (CC).

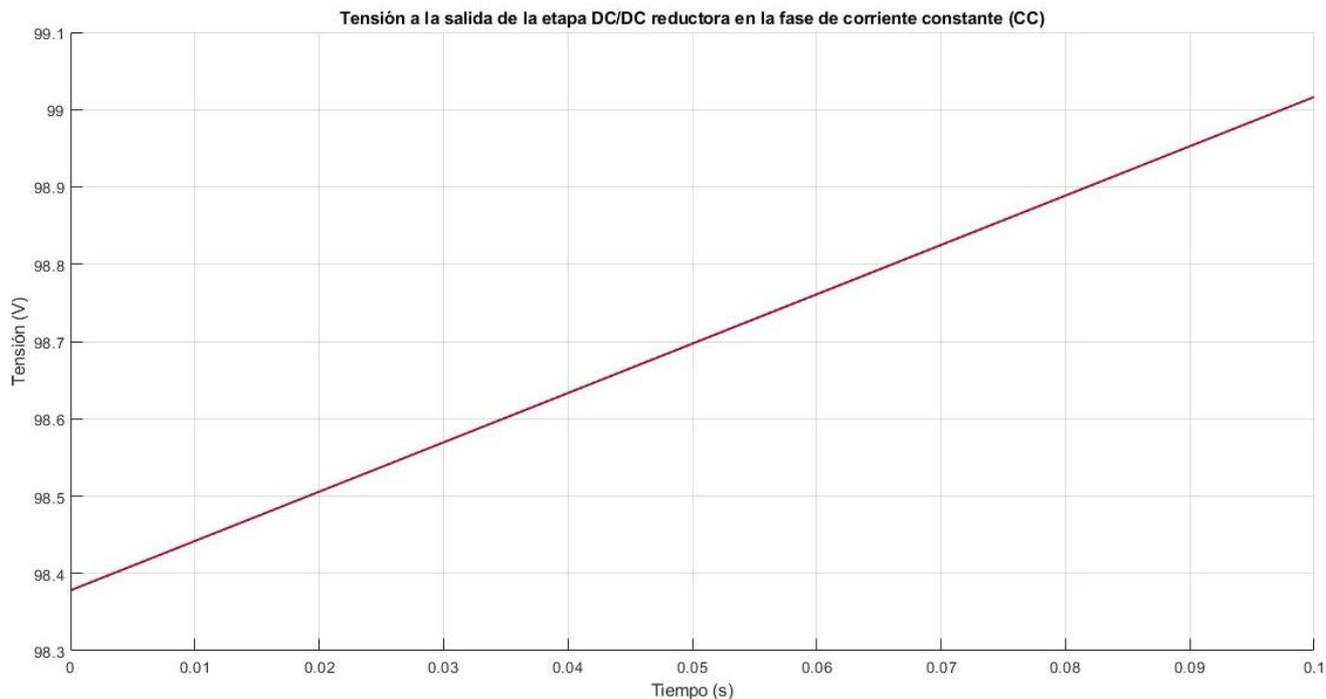


Figura 5-59. Tensión a la salida de la etapa DC/DC en la fase de corriente constante (CC).

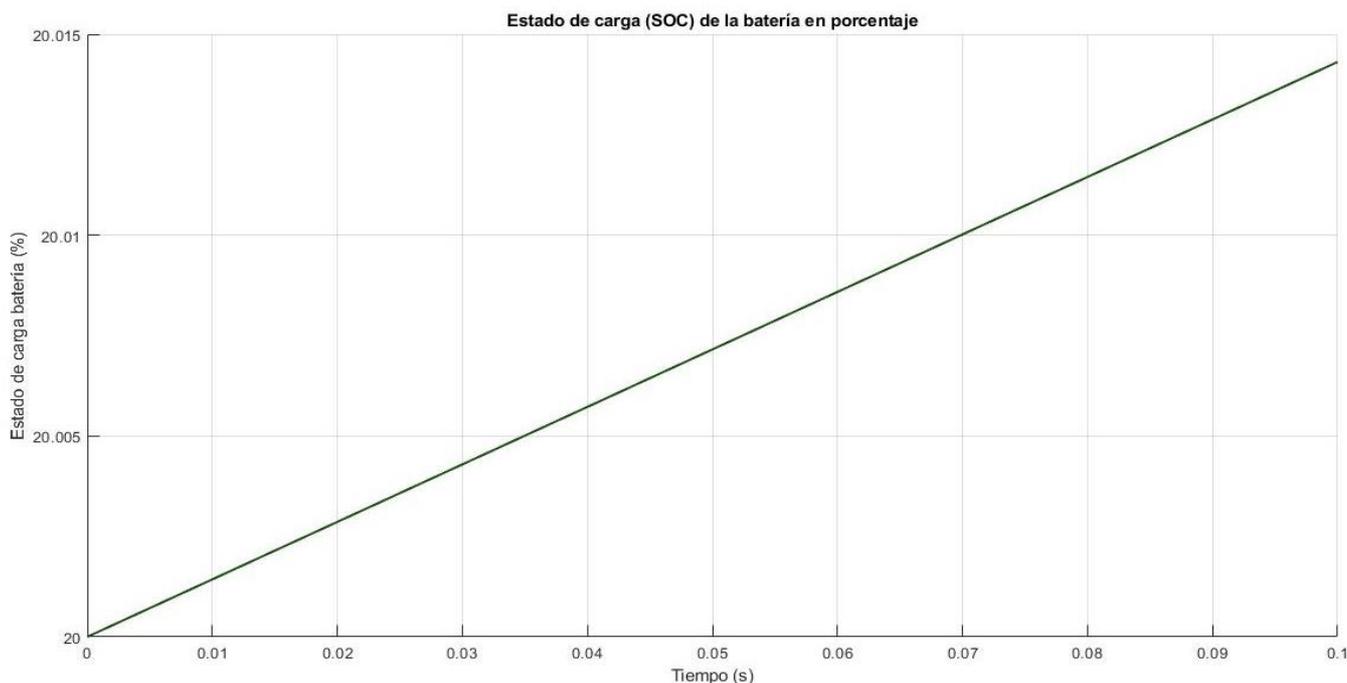


Figura 5-60. Estado de carga (SOC) de la batería en %.

En el caso de un porcentaje de carga de la batería igual a un 80 %, el nivel de tensión en bornas de la batería es lo suficientemente alto, de modo que en este supuesto el convertidor inicia directamente la carga en la fase de carga a tensión constante (CV), entregando a la batería una tensión de 109.2 V tal y como se muestra en la Figura 5-61. Por otra parte, en la Figura 5-62 se representa la evolución de corriente proporcionada a la batería, así como en la Figura 5-63 la variación en el estado de carga de esta (SOC en %).

## Diseño y simulación de un cargador de batería para una motocicleta eléctrica

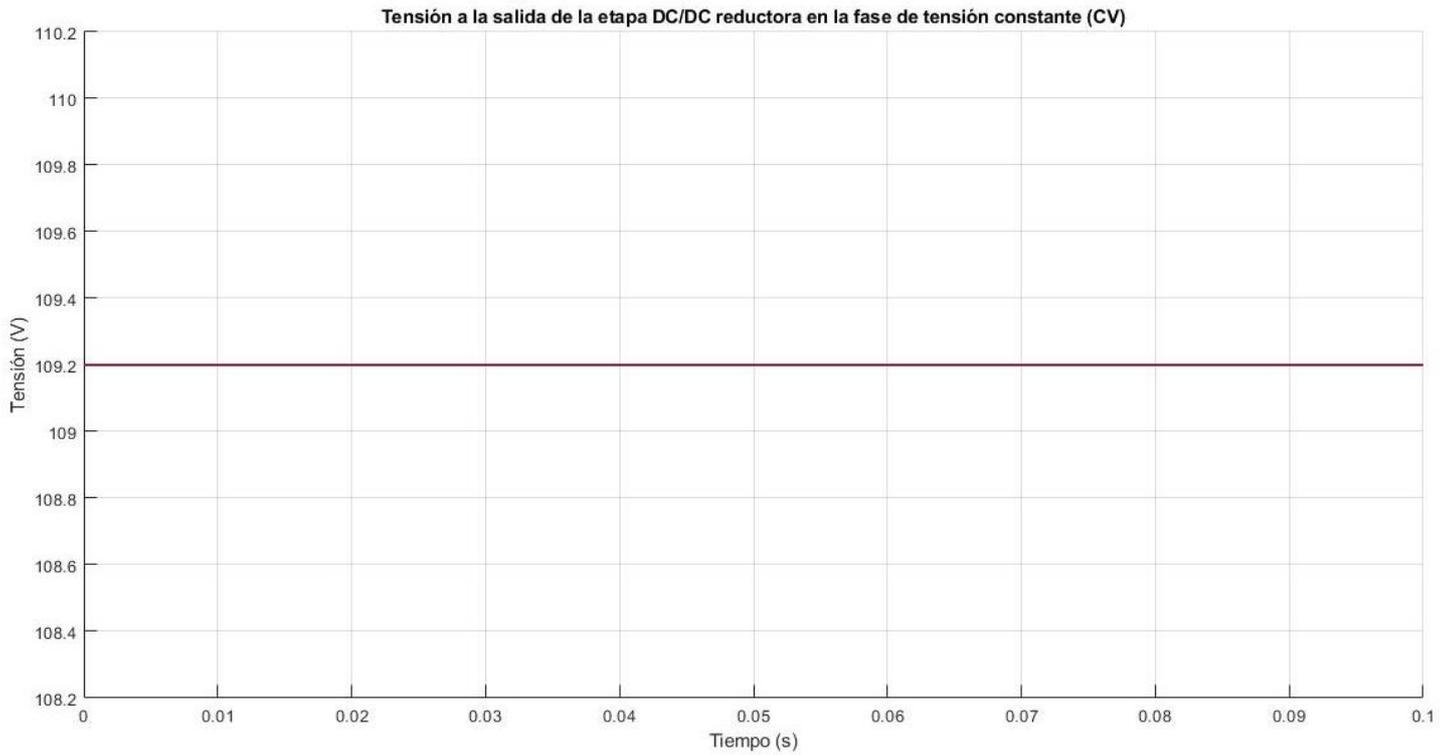


Figura 5-61. Tensión a la salida de la etapa DC/DC en la fase de tensión constante (CV).

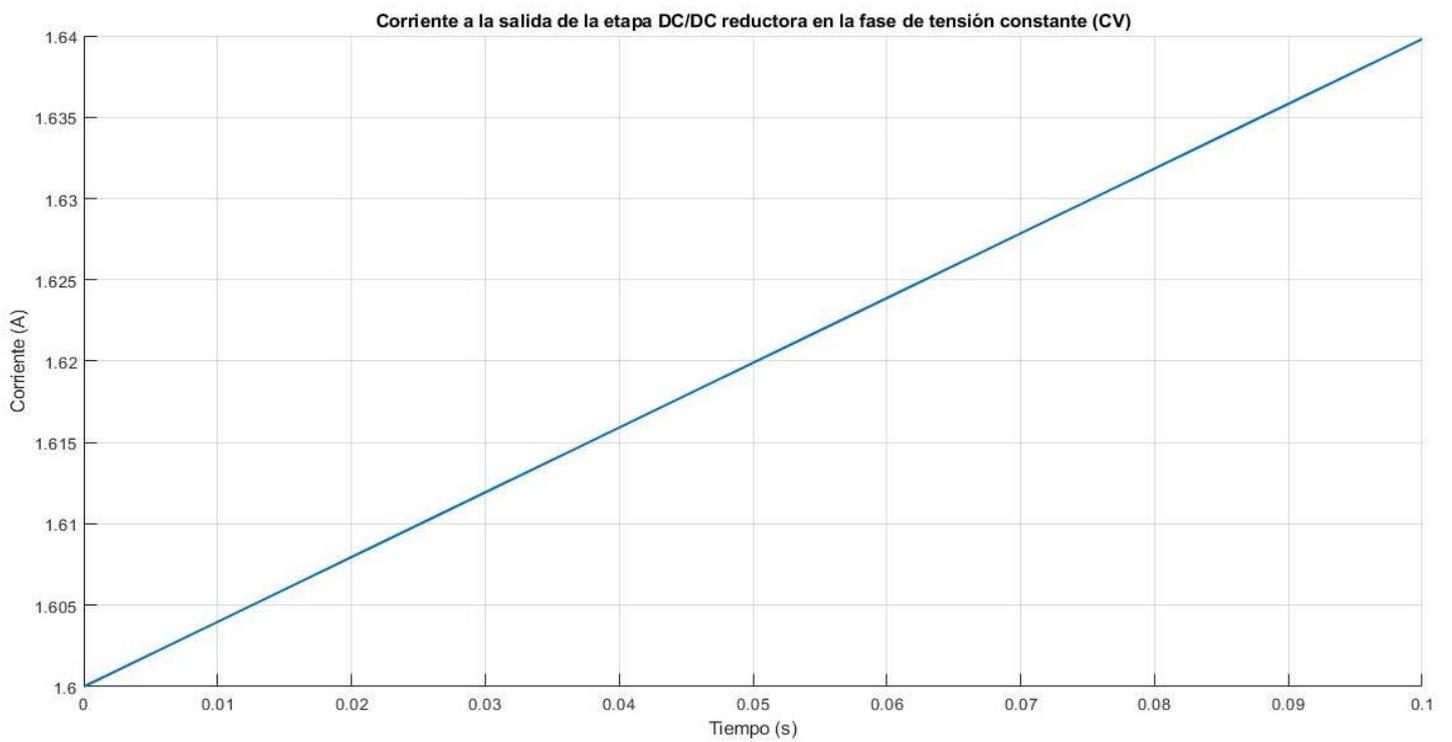


Figura 5-62. Corriente a la salida de la etapa DC/DC en la fase de tensión constante (CV).

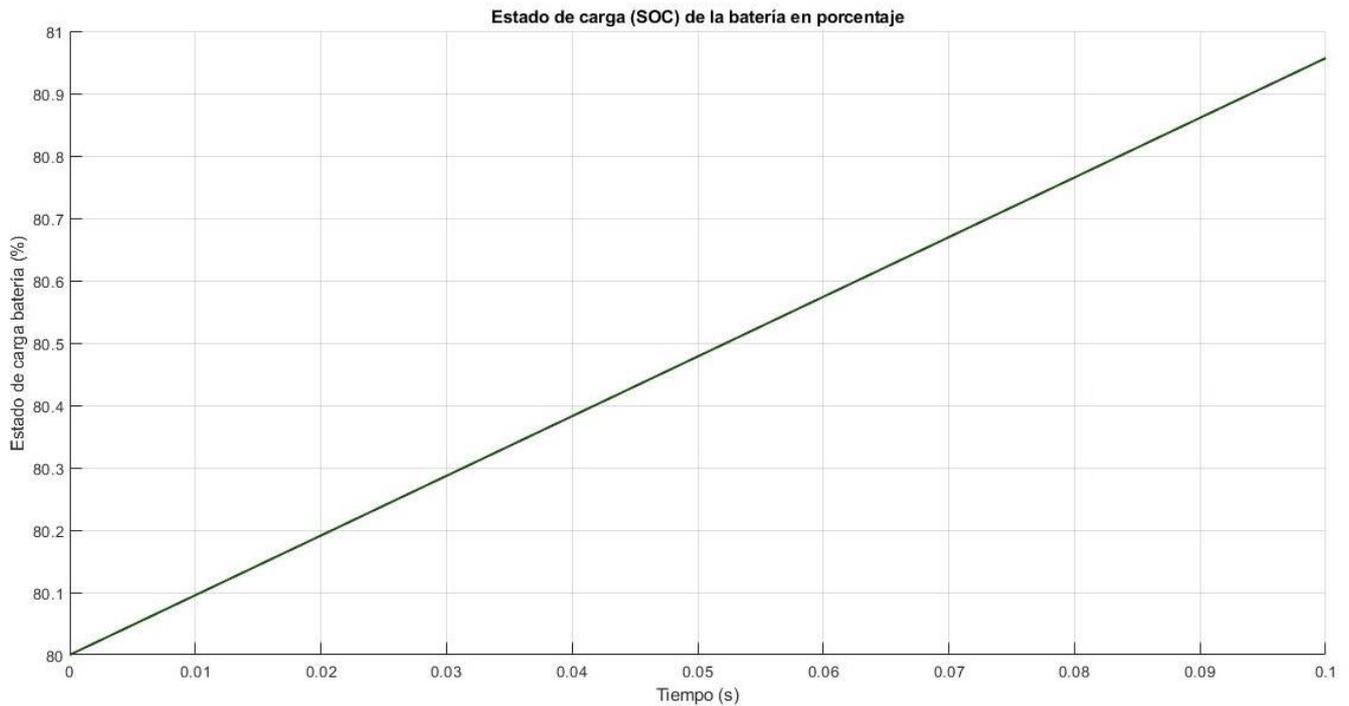


Figura 5-63. Estado de carga (SOC) de la batería en %.

Apreciando los resultados obtenidos mediante las líneas de código correspondientes mostradas en el Anexo V se puede concluir que tanto el modelo utilizado como el circuito de control de alto nivel diseñado responden satisfactoriamente según lo esperado.

Para finalizar este apartado se muestra en la Figura 5-64 la representación en MATLAB®/Simulink® de la etapa DC/DC reductora final considerando el desempeño del control CC-CV requerido por esta mediante el algoritmo de doble nivel.

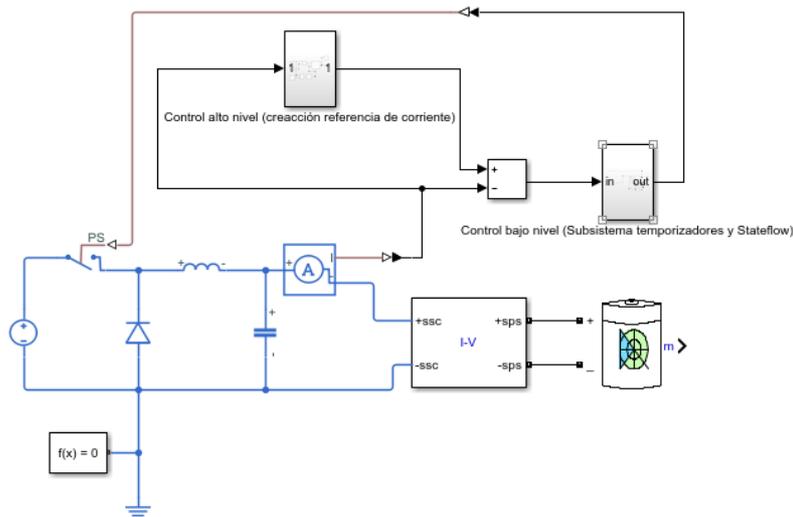


Figura 5-64. Representación en MATLAB®/Simulink® de la etapa DC/DC reductora final.

## 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

---

Todos los objetivos propuestos al inicio del proyecto fueron alcanzados de manera satisfactoria, consiguiendo diseñar, controlar y simular las diferentes etapas de un cargador para la batería de la primera motocicleta eléctrica del equipo US Racing.

Se comenzó realizando un análisis del medio físico que permite almacenar la energía en la motocicleta; la batería. En primer lugar, se llevó a cabo una investigación de la características y especificaciones del tipo de celdas que esta contiene (celdas de ion-litio tipo 18650-2500 mAh de la compañía Far East First New Energy). En segundo lugar, se estudió el conexionado adecuado de dichas celdas para la construcción de la batería, concluyéndose que esta tenía que estar compuesta por una total de 28 celdas en serie (debido a la limitación del inversor) y, por otra parte, cada uno de estos bloques debía contar con 32 celdas en paralelo (para alcanzar el objetivo de la capacidad total). Se finalizó este estudio mostrando las características (componentes de una batería de iones de litio: dos electrodos, un electrolito y un material separador) y especificaciones generales de la batería (proceso de carga y descarga de este tipo de baterías).

Se continuó analizando el sistema de conversión de potencia que permite el intercambio energético entre el medio físico que almacena la energía en la motocicleta y la red eléctrica; el cargador. En primer lugar, se llevó a cabo el estudio de los posibles tipos de cargadores según el lugar donde se lleva a cabo la conversión AC/DC (cargadores on-board y cargadores off-board), en función de su clase de aislamiento (cargadores clase I y cargadores clase II), en función del modo de gestión del flujo de energía entre el vehículo y la red (cargadores unidireccionales y cargadores bidireccionales) y según el modo de configuración de conexión a red (cargadores monofásicos y cargadores trifásicos). En segundo lugar, se determinó el tipo de cargador a diseñar seleccionando el más adecuado de acuerdo con las especificaciones y requisitos necesarios; cargador off-board, bidireccional, monofásico, que cumpla con la normativa de compatibilidad electromagnética y cuente con aislamiento galvánico. En tercer lugar, se determinaron sus especificaciones de entrada (tensión de alimentación de 230 V eficaces y frecuencia de 50 Hz) y salida (valor de tensión máxima de salida de 110 V y límite de corriente a la salida de 4 A). Para concluir con este análisis se estudiaron los diferentes modos de carga existentes (corriente constante, tensión constante, por pulsos y corriente constante/tensión constante) y se seleccionó el más adecuado teniendo en cuenta que la batería a cargar es una batería de iones de litio y para realizar una carga de forma efectiva y segura utilizando este tipo de baterías, el método de control de carga requerido es el conocido es el por corriente constante/tensión constante (CC-CV).

Se prosiguió con la selección de la topología más adecuada para cada una de las etapas con las que cuenta el diagrama de bloques general del cargador; transformador como etapa de entrada AC/AC (reductora de la tensión de red y que proporciona aislamiento galvánico), rectificador monofásico PWM puente completo en configuración fuente de voltaje como etapa AC/DC (encargada de convertir la corriente alterna proporcionada por la etapa de entrada en corriente continua, tal y como requiere la batería para ser cargada y correctora del factor de potencia para asegurar el cumplimiento de la normativa de compatibilidad electromagnética) y convertidor DC/DC reductor como etapa DC/DC (para adecuar los niveles de continua (tensión y corriente) proporcionados por la etapa AC/DC, de acuerdo con el método de control de carga requerido para realizar la carga de la batería de forma efectiva y segura). Se estudió detalladamente cada una de estas etapas con la finalidad de la determinación del valor de sus componentes, es decir, se dimensionó y diseñó cada una de ellas. Para esta fase de diseño se tuvo en cuenta que el diseño de cada una de las etapas debía realizarse por separado, conociendo respectivamente las condiciones de entrada y de salida de cada una de ellas. Se asumió que la etapa anterior a la que se procede a estudiar funciona correctamente y de este modo, se fijaron las condiciones de entrada. Para el caso de la salida, se emuló la carga conectada a cada etapa con una resistencia que consuma la potencia máxima con la que se va a trabajar. De este modo, se obtuvo que la potencia nominal del transformador tenía que ser de 440 VA y su frecuencia de 50 Hz, los valores de la bobina y el condensador del rectificador debían ser de 22 mH y 820  $\mu$ F respectivamente y para el caso de la etapa DC/DC reductora de 9 mH y 33  $\mu$ F.

Se concluyó el cuerpo del proyecto con el diseño del control de las etapas que lo requieren (etapa AC/DC y etapa DC/DC), así como la simulación satisfactoria de cada una de estas mediante el software de modelizado y simulación de sistemas por elementos finitos (MATLAB®/Simulink®) exponiendo los resultados obtenidos.

Con respecto al control de la etapa AC/DC se desempeñó un control lineal con el objetivo de, por una parte, regular la tensión a la salida y, por otra parte, mantener la corriente de entrada senoidal y en fase con el voltaje de entrada de manera que no se introduzcan armónicos en la red, cumpliéndose así con la normativa de compatibilidad electromagnética. Con respecto al control de la etapa DC/DC se desempeñó el control CC-CV requerido por esta etapa mediante un algoritmo doble nivel. El procedimiento de diseño del control se dividió pues en dos partes, un control de alto nivel que en función del modo de carga deseado genera una referencia de tensión o corriente y un control de bajo nivel encargado de hacer funcionar el convertidor DC/DC según se haya configurado el nivel superior, creando las señales de conmutación necesarias para conseguir la corriente o tensión especificada por el control de ciclo.

Como se mencionó en la introducción, el actual interés por los avances relacionados con el reto de la carga de los sistemas de almacenamiento con los que cuentan los vehículos eléctricos son el futuro de estos, por lo tanto, lo recogido en este trabajo es un pequeño paso en esa dirección. Como trabajo futuro y posibles ampliaciones de este proyecto, se realizan las propuestas mostradas a continuación:

- Aumento de la tasa de carga para una carga de la batería en un tiempo más reducido.

El objetivo para futuras ediciones es la mejora del cargador diseñado llevando a cabo tareas como pueden ser el aumento de la tasa de carga con las modificaciones que eso conlleva (colocación de varios convertidores DC/DC reductores en paralelo, por ejemplo). Dicho aumento de la tasa de carga será necesario en futuras ediciones debido a que se estima el empleo de baterías cada vez más potentes y el reto de reducir cada vez más el tiempo de carga de estas. De hecho, la elección de la topología para el sistema de potencia completo ha sido la mostrada en este proyecto teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, ya que es habitual que para bajas potencias la topología empleada sea otra. Sin embargo, el objetivo es poder seguir empleando esta topología (ajustando adecuadamente sus componentes) cuando la potencia que se tenga que entregar a la batería sea muy superior a la tratada en este proyecto.

- Efecto del envejecimiento de la batería tras varios ciclos de carga o la temperatura de esta en la fase de carga.

Tal y como se mencionó en el alcance de dicho proyecto, el tiempo de conceptualización, diseño y simulación disponible en un trabajo fin de grado ha de gestionarse de la mejor forma posible para conseguir, en este caso, el diseño y simulación del cargador, el cual contrae, como todos los diseños una serie de complejidades en cuanto a fiabilidad, rendimiento y seguridad. Es por esto, por lo que se han desestimado factores como el efecto del envejecimiento de la batería tras varios ciclos de carga o la temperatura de esta en la fase de carga, siendo interesante en líneas futuras comprobar qué efecto produce en el funcionamiento final de éste y perfeccionar el sistema en caso de ser necesario.

- Estudio de la alimentación del cargador mediante tecnologías de generación basadas en fuentes renovables intermitentes, como el viento o la radiación solar.

## 7 PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

---

**E**l objetivo del presente pliego radica en la descripción general de los pasos previos al montaje del sistema completo mostrados a continuación.

1. Compra y preparación de todos los materiales y componentes necesarios (transformador, componentes eléctricos, cables, placas...).

La compra de los materiales, componentes y aparatos necesarios debe realizarse con antelación suficiente para que se encuentren disponibles en el momento del montaje.

2. Diseño de las placas de circuito impreso (PCB's) del convertidor CA/CC y del convertidor CC/CC.

Este diseño se llevará a cabo mediante cualquier programa de diseño de PCB's. Es interesante que una vez hecho esto, se elabore un plano de cada placa de circuito impreso, así como un plano en el que se muestre la situación de los componentes en estas para facilitar el posterior montaje.

3. Fabricación de las placas de circuito impreso.

La fabricación de los circuitos impresos habitualmente sigue los procedimientos mostrados a continuación:

1. Insolado
2. Revelado
3. Atacado
4. Metalizado de las vías (si fuese necesario)
5. Montaje

4. Montaje de los componentes en las placas de circuito impreso correspondientes, así como cableado.
5. Comprobación del funcionamiento de las placas de circuito impreso.
6. Implementación en un microprocesador del control elaborado.
7. Puesta en marcha del conjunto.
8. Control de calidad del conjunto.
9. Mantenimiento necesario para el buen funcionamiento del sistema.



## 8 ANEXO I

```
% ESTUDIO ESTABILIDAD CONVERTIDOR DC/DC REDUCTOR

% Valor bobina y condensador filtro
L=9*10^-3
C=27.78*10^-6

% Especificaciones salida convertidor DC/DC reductor

% Tensión
Vo_min=70
Vo_max=110

% Corriente
Io_min=0.4
Io_max=4

% Resistencia que simula la carga conectada a la etapa
R_max=(Vo_max/Io_min)
R_min=(Vo_min/Io_max)

% FUNCIONES DE TRANSFERENCIA FILTRO LC

num = [1/(L*C)]
den_Rmax=[1 1/(R_max*C) 1/(L*C)]
den_Rmin=[1 1/(R_min*C) 1/(L*C)]

Func_max=tf([num],[den_Rmax])
Func_min=tf([num],[den_Rmin])

% REPRESENTACIÓN BODE

figure(1);bode(Func_max,Func_min);grid;xlim ([10,100000]);
```

## 9 ANEXO II

```

%                               ESPECIFICACIONES DE ENTRADA ETAPA AC/AC

% Representación tensión de red en función del tiempo(vred(t))
figure(1);plot(out.tiempo,out.vred);xlabel('tiempo (s)');ylabel('tensión
(V)');title('Tensión de red (v_r_e_d (t) = 325.27sen(100?t))');xlim([0, 0.3]);grid;

% Representación corriente de red en función del tiempo(ired(t))
figure(2);plot(out.tiempo,out.ired);xlabel('tiempo (s)');ylabel('corriente
(A)');title('Corriente de red (i_r_e_d (t))');xlim([0, 0.3]);ylim([-3 3.35]);grid;

% Representación conjunta de las especificaciones de entrada
figure(3);plot(out.tiempo,out.vred,out.tiempo,out.ired);xlabel('tiempo
(s)');ylabel('tensión (V)- corriente (A)');title('Tensión y corriente de red
(v_r_e_d (t) y i_r_e_d (t))');xlim([0, 0.3]); grid;

%                               ESPECIFICACIONES DE SALIDA ETAPA AC/AC

% Representación tensión a la salida del transformador (etapa AC/AC) = tensión a la
% entrada de la etapa AC/DC en función del tiempo (vAC(t))
figure(4);plot(out.tiempo,out.vac);xlabel('tiempo (s)');ylabel('tensión
(V)');title('Tensión a la salida de la etapa AC/AC = Tensión a la entrada de la
etapa AC/DC (v_A_C (t) = 115sen(100?t))');xlim([0, 0.3]);grid;

% Representación corriente a la salida del transformador (etapa AC/AC) = corriente a
la entrada de la etapa AC/DC en función del tiempo (iAC(t))
figure(5);plot(out.tiempo,out.Iac);xlabel('tiempo (s)');ylabel('corriente
(A)');title('Corriente a la salida de la etapa AC/AC = Corriente a la entrada de la
etapa AC/DC (i_A_C (t))');xlim([0, 0.3]);ylim([-8 9.5]);grid;

% Representación conjunta de las especificaciones de salida
figure(6);plot(out.tiempo,out.vac,out.tiempo,out.Iac);xlabel('tiempo
(s)');title('Tensión y corriente de salida de la etapa AC/AC (v_A_C (t) y i_A_C
(t))');xlim([0, 0.3]);grid;

```

## 10 ANEXO III

```

% VALORES DE LOS COMPONENTES Y ESPECIFICACIONES DE LA ERAPA AC/DC

% Valor de la bobina de entrada
L=22*10^-3;
% Valor de la resistencia parásita de la bobina de entrada
rL=0.35;
% Valor del condensador de salida
C=820*10^-6;
% Valor de la resistencia que simula la carga conectada a la etapa
R=44.55;

% Índice de modulación
M=0.9;
% Tensión de salida de la etapa
VDC=140;
% Tensión de pico de entrada de la etapa
Vp=115;
% sen(α)
senoalpha=0.4146082488;
% cos(α)
cosalpha=0.91;
% Amplitud de la fundamental del voltaje
Vr=(Vp/cosalpha);
% Frecuencia en rad/s
w=2*pi*50;
% Corriente de pico por la bobina de entrada de la etapa
IL=(Vr*senoalpha)/(w*L);

% OBTENCIÓN DE LAS MATRICES A Y B DEL MODELO LINEAL

A=[(-rL/L) (-M/L); (M/C) -1/(R*C)]
B=[(-VDC/L); (IL/C)]
C=[1 0]

%OBTENCIÓN DE LAS MATRICES  $\mathcal{A}$  Y  $\mathcal{B}$  DEL SISTEMA EN LAZO CERRADO CON CONTROL INTEGRAL

 $\mathcal{A}$  =[A; -C];
 $\mathcal{A}$  =[a zeros(3,1)];
 $\mathcal{B}$  =[B;1];

format long g;

SO=0.01; % Sobreoscilación del 1%
te=0.001; % Tiempo de establecimiento de 0.001 segundos

% Parámetros para calcular los polos del sistema que corresponden a una respuesta de
segundo orden con un tiempo de establecimiento de 0.001 s y una sobreoscilación del
1%
delta=abs(log(SO))/sqrt(pi^2+log(SO)^2);
wn=3/(delta*te);

```

```
% ss2tf para pasar del espacio de estados a función de transferencia del sistema en
lazo abierto
[num,den]=ss2tf(A,B,C,0,1);

% Definimos la función de transferencia una vez que tenemos su numerador y su
denominador

G=tf(num,den);
% Observamos el cero que tiene la función de transferencia del sistema en lazo
abierto
CeroG=roots(num);

% Se coloca el tercer polo a la frecuencia del cero de la función de transferencia
para poder cancelarlo
p=[-delta*wn+wn*sqrt(1-delta^2)*j  -delta*wn-wn*sqrt(1-delta^2)*j  CeroG];

%      OBTENCIÓN DEL VECTOR DE GANANCIAS EMPLEADO PARA RETROALIMENTAR LOS ESTADOS

K=place(A,B,p);
```

## 11 ANEXO IV

```

%           BUCLE CERRADO SIN CAMBIOS EN LA REFERENCIA DE LA TENSIÓN DE SALIDA

%           ESPECIFICACIONES DE ENTRADA ETAPA AC/DC

% Representación tensión entrada en función del tiempo (vAC(t))
figure(1);plot(out.t,out.v_AC);xlabel('tiempo (s)');ylabel('tensión
(V)');title('Tensión de entrada de la etapa AC/DC (v_A_C (t) =
115sen(100?t))');xlim([0, 0.3]);grid;

% Representación corriente entrada en función del tiempo (iL(t))
figure(2);plot(out.t,out.iL);xlabel('tiempo (s)');ylabel('corriente
(A)');title('Corriente de entrada de la etapa AC/DC (i_L (t))');xlim([0,
0.3]);ylim([-9, 9.5]);grid;

% Representación conjunta de las especificaciones de entrada para comprobar que la
tensión y corriente están en fase
figure(3);plot(out.t,out.v_AC,out.t,out.iL);xlabel('tiempo (s)');ylabel('tensión (V)
- corriente (A)');title('Tensión y corriente de entrada de la etapa AC/DC (v_A_C (t)
y i_L (t))');xlim([0, 0.3]);grid;

% Representación conjunta de la corriente de entrada y la referencia de
% dicha corriente
figure(4);plot(out.t,out.iL,out.t,out.i_ref);xlabel('tiempo (s)');ylabel('Corriente
(A)'); title('Corriente de entrada de la etapa AC/DC y corriente de referencia (i_L
(t) e i_r_e_f (t))');xlim([0, 0.3]);grid;

%           ESPECIFICACIONES DE SALIDA ETAPA AC/DC

% Representación conjunta de la tensión de salida y la referencia de dicha
% tensión
figure(5);plot(out.t,out.v_CD,out.t,out.v_ref);xlabel('tiempo (s)');ylabel('tensión
(V)'); title('Tensión de salida de la etapa AC/DC y tensión de referencia(v_D_C (t)
y v_r_e_f (t))');xlim([0, 0.3]);grid;

%           BUCLE CERRADO CON CAMBIOS EN LA REFERENCIA DE LA TENSIÓN DE SALIDA

%           ESPECIFICACIONES DE SALIDA ETAPA AC/DC

% Representación conjunta de la tensión de salida y la referencia de dicha
% tensión con variación en esta última
figure(6);plot(out.t,out.v_CD,out.t,out.v_ref);xlabel('tiempo (s)');ylabel('tensión
(V)');title('Tensión de salida de la etapa AC/DC y tensión de referencia con
variación en esta última(v_D_C (t) y v_r_e_f (t))');xlim([0, 0.7]);ylim([0,
170]);grid;
% Representación conjunta de las especificaciones de entrada para comprobar que la
tensión y corriente están en fase
figure(7);plot(out.t,out.v_AC,out.t,out.iL);xlabel('tiempo (s)');ylabel('tensión (V)
- corriente (A)');title('Tensión y corriente de entrada de la etapa AC/DC cuando
varía la tensión de referencia (v_A_C (t) y i_L (t))');xlim([0, 0.7]);grid;

```

```
%                               ESPECIFICACIONES DE ENTRADA ETAPA AC/DC

% Representación conjunta de la corriente de entrada y la referencia de
% dicha corriente con variación en esta última
figure(8);plot(out.t,out.iL,out.t,out.i_ref);xlabel('tiempo (s)');ylabel('Corriente
(A)');title('Corriente de entrada de la etapa AC/DC y corriente de referencia con
variación en esta última(i_L (t) e i_r_e_f (t)) ');xlim([0, 0.7]);grid;
```

## 12 ANEXO V

```

% GRÁFICAS CONTROL BAJO NIVEL O CONTROL DEL CONVERTIDOR DC/DC REDUCTOR

% ESTUDIO 1: Se fija la corriente de referencia (que proporcionaría el control de
alto nivel) en el valor mínimo de corriente que tendrá que proporcionar el cargador:
0.4 A

% Representación corriente de referencia y corriente de salida en función del tiempo
figure(1);plot(out.tiempo,out.iout_min,out.tiempo,out.iref_min);title('Corriente de
referencia y corriente de salida etapa DC/DC reductora');xlabel('tiempo
(s)');ylabel('Corriente (A)');ylim([-0.2 0.8]);legend('Corriente de
referencia=4A','Corriente de salida');grid;
% Representación del control del interruptor en función del tiempo
figure(2);plot(out.tiempo,out.sw_min);title('Control interruptor');xlabel('tiempo
(s)');ylim([-1 2]);grid;

% ESTUDIO 2: Se fija la corriente de referencia en el valor máximo de corriente que
se tendrá a la salida del cargador: 4 A.

% Representación corriente de referencia y corriente de salida en función del tiempo
figure(3);plot(out.tiempo,out.iout_max,out.tiempo,out.iref_max);title('Corriente de
referencia y corriente de salida etapa DC/DC reductora');xlabel('tiempo
(s)');ylabel('Corriente (A)');ylim([-1 5]);legend('Corriente de
referencia=4A','Corriente de salida');grid;
% Representación del control del interruptor en función del tiempo
figure(4);plot(out.tiempo,out.sw_max);title('Control interruptor');xlabel('tiempo
(s)');ylim([-1 2]);grid;

% ESTUDIO 3: Se fija la corriente de referencia en un valor intermedio entre el
valor máximo y mínimo de corriente que se tendrá a la salida del cargador, por
ejemplo: 2.5 A.

% Representación corriente de referencia y corriente de salida en función del tiempo
figure(5);plot(out.tiempo,out.iout_med,out.tiempo,out.iref_med);title('Corriente de
referencia y corriente de salida etapa DC/DC reductora');xlabel('tiempo
(s)');ylabel('Corriente (A)');ylim([-1 3.5]);legend('Corriente de
referencia=2.5A','Corriente de salida');grid;
% Representación del control del interruptor en función del tiempo
figure(6);plot(out.tiempo,out.sw_med);title('Control interruptor');xlabel('tiempo
(s)');ylim([-1 2]);grid;

% GRÁFICAS CONTROL ALTO NIVEL O CONTROL DEL CICLO DE CARGA DEL CONVERTIDOR DC/DC

% ESTUDIO 1: Se fija el estado de carga de la batería a un 0 %.

% Representación corriente a la salida de la etapa DC/DC reductora en función del
tiempo
figure(7);plot(out.tiempo,out.corriente);title('Corriente a la salida de la etapa
DC/DC en la fase de pre-acondicionamiento');xlabel('Tiempo (s)');ylabel('Corriente
(A)');grid;

```

```
% Representación tensión a la salida de la etapa DC/DC reductora en función del
tiempo
figure(8);plot(out.tiempo,out.tension);title('Tensión a la salida de la etapa DC/DC
en la fase de pre-acondicionamiento');xlabel('Tiempo (s)');ylabel('Tensión
(s)');grid;

% Representación estado de carga batería en porcentaje
figure(9);plot(out.tiempo,out.SOC);title('Estado de carga (SOC) de la batería en
%');xlabel('Tiempo (s)');ylabel('Estado de carga batería (%)');grid;

% ESTUDIO 2: Se fija el estado de carga de la batería a un 20 %.

% Representación corriente a la salida de la etapa DC/DC reductora en función del
tiempo
figure(10);plot(out.tiempo,out.corriente);title('Corriente a la salida de la etapa
DC/DC en la fase de corriente constante (CC)');xlabel('Tiempo(s)');ylabel('Corriente
(A)');grid;

% Representación tensión a la salida de la etapa DC/DC reductora en función del
tiempo
figure(11);plot(out.tiempo,out.tension);title('Tensión a la salida de la etapa DC/DC
en la fase de corriente constante (CC)');xlabel('Tiempo (s)');ylabel('Tensión
(s)');grid;

% Representación estado de carga batería en porcentaje
figure(12);plot(out.tiempo,out.SOC);title('Estado de carga (SOC) de la batería en
%');xlabel('Tiempo (s)');ylabel('Estado de carga batería (%)');grid;

% ESTUDIO 3: Se fija el estado de carga de la batería a un 80 %.

% Representación tensión a la salida de la etapa DC/DC reductora en función del
tiempo
figure(13);plot(out.tiempo,out.tension);title('Tensión a la salida de la etapa DC/DC
en la fase de tensión constante (CC)');xlabel('Tiempo (s)');ylabel('Tensión
(s)');grid;

% Representación corriente a la salida de la etapa DC/DC reductora en función del
tiempo
figure(14);plot(out.tiempo,out.corriente);title('Corriente a la salida de la etapa
DC/DC en la fase de tensión constante (CV)');xlabel('Tiempo (s)');ylabel('Corriente
(A)');grid;

% Representación estado de carga batería en porcentaje
figure(15);plot(out.tiempo,out.SOC);title('Estado de carga (SOC) batería en
%');xlabel('Tiempo (s)');ylabel('Estado de carga batería (%)');grid;
```

## 13 REFERENCIAS

- [1] Real Academia de Ingeniería, «El almacenamiento de energía en la distribución eléctrica del futuro,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.raing.es/es/publicaciones/libros/el-almacenamiento-de-energ-en-la-distribuci-n-el-ctrica-del-futuro>.
- [2] Asociación Nacional de Empresas del Sector de Dos Ruedas, «El futuro de la moto eléctrica,» 2019. S. [En línea]. Available: <https://www.anesdor.com/futuro-moto-electrica/>.
- [3] Wikipedia, «Historia de la motocicleta eléctrica,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Motocicleta\\_eléctrica](https://es.wikipedia.org/wiki/Motocicleta_eléctrica).
- [4] Javier Costas, «Moto del día: Peugeot Scoot'Elec,» 2019. [En línea]. Available: <https://motos.espirituracer.com/motodeldia/moto-del-dia-peugeot-scootelec/>.
- [5] Redy, M.V., G.V. Subba Rao, and B.V.R. Chowdari. [En línea] «Metal Oxides and Oxysalts as Anode Materials for Li Ion Batteries,» Chem. Rev., 2013. 113(7): p. 5364–5457.
- [6] Youtube, [Aprenda Ingeniería], «Batería de iones de litio, ¿Cómo funciona?,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=ydCfLFJqaBw>.
- [7] Ignacio Mártil, «Funcionamiento de una batería de ion-litio,» 2019. [En línea]. Available: <https://blogs.cdecomunicacion.es/ignacio/2019/02/21/funcionamiento-de-una-bateria-de-ion-litio-pros-y-contras/#comment-745>.
- [8] Álvaro Vázquez, «Webinar #10, Criterios de selección de un cargador de vehículo eléctrico,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.voltimum.es/abb-criterios-seleccion-cargador-vehiculo>.
- [9] Sociedad de Técnicos de Automoción, «El vehículo eléctrico. Desafíos tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocio,» 2011, pp.197.
- [10] Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles. Murat Yilmaz; Krein, Philip T.; 5, May de 2013, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, págs. 2151-2169.
- [11] Battery and Energy Technologies Website. [En línea]. Available: <http://www.mpoweruk.com/>.
- [12] A. A. H. Hussein and I. Batarseh, «A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers,» Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 60, pp. 830-838, 2011.
- [13] Fernando Pastor, «Simulación y diseño de un puente rectificador para su utilización como cargador de baterías,» 2017. [En línea]. Available: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle//10324/25365/TFG-P-647.pdf>.
- [14] R. C. Cope and Y. Podrazhansky, «The art of battery charging,» in Battery Conference on Applications and Advances. The Fourteenth Annual, 1999, pp. 233-235.

- [14] R. C. Cope and Y. Podrazhansky, «The art of battery charging,» in Battery Conference on Applications and Advances. The Fourteenth Annual, 1999, pp. 233-235.
- [15] Javier Logroño, «Cargador de batería para vehículos,» 2017. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/112391/TFG%20CARGADOR%20DE%20BATER%20C3%8DA%20PARA%20VEH%20C3%8DCULOS%20-%20JAVIER%20LOGRO%20C3%91O%20DI%20C3%89GUEZ.pdf>.
- [16] José R. Rodríguez, Senior Member, IEEE, Juan W. Dixon, Senior Member, IEEE, José R. Espinoza, Member, IEEE, Jorge Pontt, Senior Member, IEEE, and Pablo Lezana, «PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art,» IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 52.
- [17] FASTRON. [En línea]. Available: <http://www.fastrongroup.com/>.
- [18] Chen Chi-Tsong, «Linear System Theory and Design,» Oxford 3rd Ed.1999.
- [19] Nise Norman S., «Sistemas de Control para Ingeniería,» Tercera Ed.2006.
- [20] Khalil Hassan K., «Nonlinear Systems,» Third Ed. 2002.
- [21] Pérez R. Javier, Núñez G. Ciro A. y Cárdenas G. Víctor M., «Control lineal para un rectificador monofásico PWM puente completo,» 2009. Revista de ingeniería eléctrica, electrónica y computación, Vol. 7
- [22] Help Center MathWorks®, «Battery,» [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/battery.html>.