



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Diseño y simulación de cargador en carga rápida en
CD para vehículos eléctricos**

presentada por

Ing. Alan Yabin Hernández Ruiz

como requisito para la obtención del grado de
**Maestría en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dra. Susana Estefany De león Aldaco

Codirector de tesis

Dr. Jesús Aguayo Alquicira

Cuernavaca, Morelos, México. Febrero de 2026.

Aceptación del documento de tesis



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

Cuernavaca, Mor; 16/diciembre/2025
Oficio No. DIE/222/2025

Asunto: Aceptación de documentos.

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. **ALÁN YABIN HERNÁNDEZ RUIZ**, con número de control **M24CE024** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"CARGADOR RAPIDO DE CD PARA VEHICULOS ELECTRICOS"**, y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dra. Susana Estefany De León Aldaco
Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 10458245

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Jesús Aguayo Alquieira
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 4706315

REVISOR 1

Dr. Jesús Darío Mña Antonio
Doctor en Ingeniería
Cédula profesional 6094069

REVISOR 2

M.C. Alfredo González Ortega
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5695647

C.C.p. Mtra. Verónica Sotelo Boyas, Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
JGM/ibm



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2224,
e-mail: die@cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico



Autorización de impresión de tesis



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 17/diciembre/2025

Oficio No. SAC/297/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ALÁN YABIN HERNÁNDEZ RUIZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

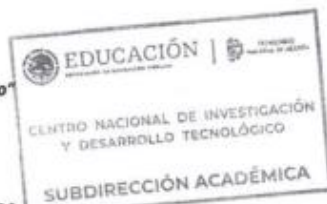
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"CARGADOR RAPIDO DE CD PARA VEHICULOS ELECTRICOS"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Contenido

Aceptación del documento de tesis.....	2
Autorización de impresión de tesis.....	3
Carta de sesión de derechos	4
Abstract.....	10
Resumen.....	11
Dedicatoria	12
Agradecimientos	13
Capítulo 1. Introducción	14
1.1 Objetivos.....	17
1.1.1 General	17
1.1.2 Específicos.....	17
1.2 Hipótesis	17
1.3 Planteamiento del problema.....	17
Capítulo 2. Estado del arte	18
2.1 Proceso de selección.....	18
2.2 Estado actual de los vehículos eléctricos	20
2.2.1 Tecnología de las baterías	23
2.3 Infraestructura de recarga de vehículos eléctricos	29
2.4 Convertidores de potencia CC-CC.....	33
2.5 Resultados.....	41
2.6 Conclusiones	43
2.6.1 Síntesis	44
Capítulo 3. Diseño del convertidor CD-CD.....	45
3.1 Parámetros iniciales del convertidor	47
3.2 Cálculo del convertidor	47
3.3 Selección y diseño de componentes	56
3.3.1 MOSFETS.....	56
3.3.2 Diodos.....	56
Capítulo 4. Diseño del cargador rápido en CD.	58
4.1 Fases del cargador.....	59
4.1.1 Filtro	59

4.1.2 Convertidor CA-CD	60
Capítulo 5. Resultados	64
5.1 Desempeño del convertidor FEC	64
5.2 Desempeño del convertidor resonante LLC	66
5.3 Diseño de la batería.....	70
Capítulo 6. Conclusiones	75
6.1 Nomenclatura	76
Referencias	77
DC Fast Charger For Electric Vehicle Battery	86
Rectifier - Front-End Converter.....	86
DC-DC Converter	87
Battery Pack	87
Simulation Time	88
Front-End Converter Variants	88
Apéndices	89

Figura 1 Emisión de gases de efecto invernadero en México.....	14
Figura 2 Proyección de emisión de gases de efecto invernadero mediante la implementación de estaciones de recarga para vehículos eléctricos.....	16
Figura 3 Diagrama del estado del arte	19
Figura 4 Distribución de publicaciones por año.....	20
Figura 5 Ventas globales de vehículos eléctricos.....	21
Figura 6 Proyección de adopción de electromovilidad	22
Figura 7 Tecnologías de baterías	24
Figura 8 Celda tipo bolsa	25
Figura 9 Celda tipo prisma	26
Figura 10 Celda tipo cilindro.....	27
Figura 11 Convertidor Buck.....	33
Figura 12 Convertidor Boost	34
Figura 13 Convertidor Buck-Boost	35
Figura 14 Convertidor resonante LLC	36
Figura 15 Convertidor medio puente	37
Figura 16 Convertidor puente completo	38
Figura 17 Convertidor multinivel.....	39
Figura 18 Convertidor PEC	40
Figura 19 Convertidor LLC	45
Figura 20 comportamiento del circuito como fuente de voltaje	46
Figura 21 Comportamiento del circuito como fuente de corriente	46
Figura 22 Circuito equivalente convertidor resonante LLC (R_{eq1}).....	50
Figura 23 Circuito equivalente convertidor resonante LLC (R_{eq}).....	50
Figura 24 Circuito equivalente convertidor resonante LLC (R_{se}).....	52
Figura 25 Convertidor resonante LLC	54
Figura 27 Filtro de señal de entradaEcuación 23 Corriente de drenaje necesaria	55
Figura 26 Cargador rápido en CD basado en convertidor resonante LLC	58
Figura 27 Filtro de señal de entrada	59
Figura 28 Front-end converterFigura 27 Filtro de señal de entrada¡Error! Marcador no definido.	
Figura 28 Front-end converter.....	60
Figura 29 FECFigura 28 Front-end converter	¡Error! Marcador no definido.
Figura 29 FEC.....	61
Figura 33 Parámetros de salida del convertidor CA-CDFigura 29 FEC¡Error! Marcador no definido.	
Figura 30 Bloque de control	62
Figura 31 Controlador	63
Figura 32 inversor de señal de control	63
Figura 33 Parámetros de salida del convertidor CA-CD.....	65
Figura 33 Parámetros de salida del convertidor CA-CD...¡Error! Marcador no definido.	
Figura 34 Voltaje en la compuerta VG.....	66
Figura 35 Señal de corriente de drenaje (ID) y voltaje de drenaje fuente (VDS).....	67

Figura 36 Voltaje y corriente de salida del tanque resonante	68
Figura 37 Voltaje y corriente de salida del transformador	69
Figura 38 Parámetros eléctricos del inductor resonante	70
Figura 40 Bloque de batería.....	72
Figura 41 Estructura de la batería	72
Figura 42 Gráficas de salida del cargador.....	73

Ecuación 1 Frecuencia de conmutación.....	48
Ecuación 2 Componente fundamental de alimentación	48
Ecuación 3 Ganancia del sistema	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 4 Ganancia del tanque	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 5 Factor de calidad	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 6 Relación de vueltas	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 7 Resistencia en la carga	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 8 Eficiencia del rectificador	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 9 Resistencia reflejada en el rectificador	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 10 Resistencia reflejada en el inductor	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 11 Reactancia del sistema.....	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 12 Inductancia magnetizante.....	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 13 Resistencia reflejada en el tanque.....	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 14 Reactancia en el tanque	52
Ecuación 15 Capacitor resonante	53
Ecuación 16 Cálculo de inductor	53
Ecuación 17 Inductancia total del sistema	53
Ecuación 18 corriente reflejada en el tanque	53
Ecuación 20 Voltaje eficiente.	55
Ecuación 21 Corriente de drenaje necesaria	55

Abstract

The growing adoption of electric vehicles has driven the development of charging technologies capable of meeting increasing demands for power, efficiency, and compatibility with the electrical grid. In this context, the objective of this thesis is to design a Level 3 fast charger for electric vehicles that maximizes energy efficiency through the implementation of an LLC resonant converter. The work presents a comprehensive analysis of the electric vehicle charging ecosystem, covering Level 3 direct current charging stations, power converter topologies, and the role of energy storage systems in supporting integration with the power grid. Commercial solutions and academic developments are compared considering key parameters such as voltage, current, power, efficiency, and communication protocols.

It also examines current trends in charger architectures, including buck, boost, buck-boost, resonant LLC, and full-bridge configurations, with an emphasis on efficiency, power density, and bidirectional operation capability. The integration of stationary storage as an energy buffer for fast charging stations is also addressed, with the aim of mitigating impacts on the grid. The study highlights the relevance of wide-bandgap semiconductors such as silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN), which offer significant improvements in efficiency and thermal performance. However, a gap is identified between the technical transparency of commercial systems and the limited documentation of academic prototypes, highlighting the need to standardize reporting and validation methods.

In summary, this thesis not only analyzes the current landscape of charging technologies but also proposes the design of a Level 3 charging system based on an LLC resonant converter, aimed at achieving an efficient, scalable solution that is adaptable to the future demands of electric vehicle charging infrastructure.

Resumen

La creciente adopción de los vehículos eléctricos ha impulsado el desarrollo de tecnologías de carga capaces de satisfacer las crecientes demandas de potencia, eficiencia y compatibilidad con la red eléctrica. En este contexto, la presente tesis tiene como objetivo diseñar un cargador rápido de nivel 3 para vehículos eléctricos que maximice la eficiencia energética mediante la implementación de un convertidor resonante LLC. El trabajo presenta un análisis exhaustivo del ecosistema de carga de vehículos eléctricos, abarcando las estaciones de carga de corriente directa de nivel 3, las topologías de los convertidores de potencia y el papel de los sistemas de almacenamiento de energía en el apoyo a la integración con la red eléctrica. Se comparan soluciones comerciales y desarrollos académicos considerando parámetros clave como voltaje, corriente, potencia, eficiencia y protocolos de comunicación.

Asimismo, se examinan las tendencias actuales en las arquitecturas de cargadores, incluyendo configuraciones buck, boost, buck-boost, resonantes LLC y de puente completo, haciendo énfasis en la eficiencia, densidad de potencia y capacidad de operación bidireccional. Se aborda también la integración del almacenamiento estacionario como amortiguador energético para estaciones de carga rápida, con el fin de mitigar los impactos en la red. El estudio destaca la relevancia de los semiconductores de banda ancha como el carburo de silicio (SiC) y el nitruro de galio (GaN), que ofrecen mejoras significativas en eficiencia y rendimiento térmico. Sin embargo, se identifica una brecha entre la transparencia técnica de los sistemas comerciales y la limitada documentación de los prototipos académicos, lo que evidencia la necesidad de estandarizar los métodos de reporte y validación.

En síntesis, esta tesis no solo analiza el panorama actual de las tecnologías de carga, sino que propone el diseño de un sistema de carga de nivel 3 basado en un convertidor resonante LLC, orientado a lograr una solución eficiente, escalable y adaptable a las futuras demandas de la infraestructura de carga de vehículos eléctricos.

Dedicatoria

*Dedico esta tesis a quienes me impulsaron a creer en el poder del conocimiento y la innovación.
A mi familia, por su apoyo inquebrantable y a todos aquellos que, con su ejemplo, me inspiraron
a contribuir al desarrollo de tecnologías que transformen nuestro futuro energético.*

Agradecimientos

A mi madre, mi padre y mi hermana, por su amor incondicional, su comprensión y su apoyo constante a lo largo de mi vida. Su confianza en mí, sus palabras de aliento y su ejemplo de esfuerzo y dedicación han sido la base sobre la cual he construido este logro. A mi familia en general, gracias por acompañarme en los momentos más difíciles y celebrar conmigo cada avance; su presencia ha sido mi mayor motivación para seguir adelante.

A mis amigos, por compartir este camino, por la ayuda mutua, las largas jornadas de estudio y los momentos de compañerismo que hicieron más llevadero este proceso.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico por brindarme las instalaciones, el entorno académico y los recursos necesarios para la realización de este trabajo. Su compromiso con la investigación y la excelencia educativa ha sido fundamental para el desarrollo de este proyecto.

A SECIHTI por el respaldo económico y académico que me permitió dedicarme plenamente a esta investigación.

A mis profesores y asesores, por su orientación y paciencia. Cada enseñanza, consejo y observación contribuyó de manera significativa a la consolidación de este trabajo.

Finalmente, a todas las personas que, directa o indirectamente, aportaron su tiempo, su experiencia o su apoyo moral para la culminación de esta tesis. Cada gesto, palabra y enseñanza fue un impulso más hacia la meta.

Capítulo 1. Introducción

En la actualidad vivimos en un entorno marcado por el uso constante del transporte, donde la movilidad se ha convertido en una prioridad cotidiana. Esto ha impulsado el desarrollo de tecnologías orientadas a modernizar y hacer más eficiente la respuesta a esta necesidad, siendo el automóvil convencional de combustión.

El uso intensivo de estos vehículos ha generado una creciente necesidad de cambio, debido a la gran cantidad de partículas de CO₂ que emiten durante su funcionamiento. Estas emisiones han contribuido significativamente al alarmante aumento de la temperatura global y a la aparición de contingencias ambientales perjudiciales para la salud.[\[1\]](#).

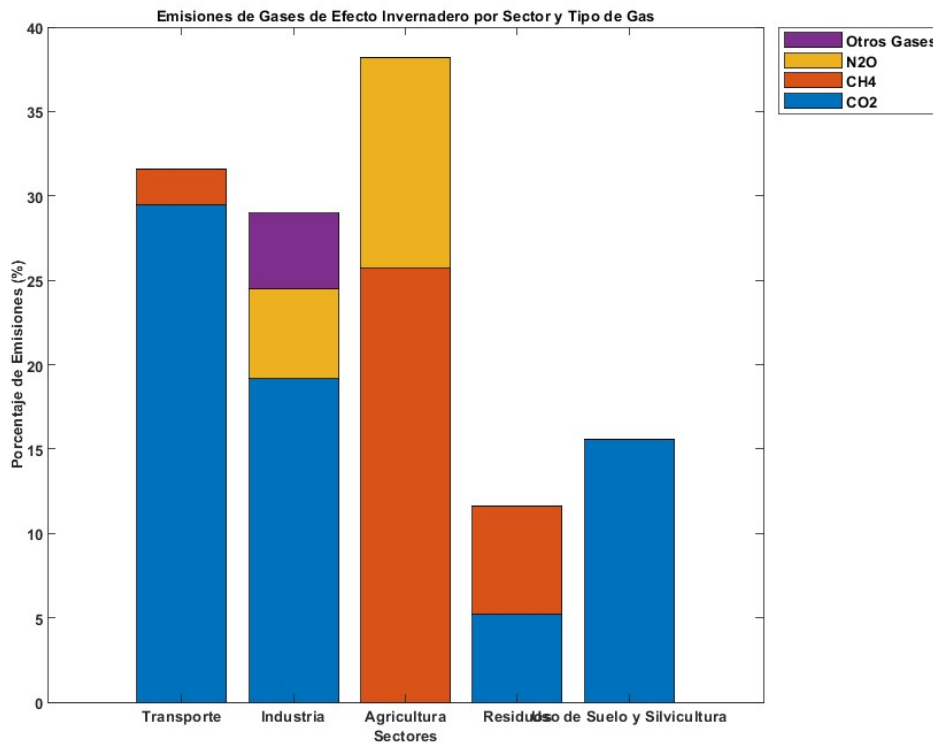


Figura 1 Emisión de gases de efecto invernadero en México.

Al presente en México la distribución de los gases de efecto invernadero mantienen su mayor producción en la distribución de dióxido de carbono en dos sectores considerables los cuales son la industria y la movilidad, en torno a la movilidad abarcando un 32%, además como se denota en la figura 1 la industria energética es una de las principales ramas contaminantes haciendo factible el uso de las energías renovables para así mitigar

Capítulo 1. Introducción

este punto en una posteridad, conforme a partículas de efecto invernadero, denotando también partículas como metano y óxido nitroso.

Sin embargo, la implementación de estos dispositivos presenta ciertos retos a adoptar los cuales complican la adopción formal y exponencial de los vehículos eléctricos, ya que cuentan aun con altos costos de mantenimiento, debido a las características y el poco tiempo que llevan en el mercado, el costo de mantenimiento es un problema el cual no se ha tratado de manera correcta sumando las tarifas altas de carga de estos mismos.

Hoy en día, el uso del transporte es de vital importancia debido a la constante necesidad de movilidad, que siempre ha sido una prioridad diaria. Esto ha llevado al desarrollo de tecnologías que modernizan o agilizan la satisfacción de esta necesidad, siendo la más popular el automóvil convencional propulsado por combustibles fósiles [2]. La constante necesidad de movilidad, sumada a la sobrepoblación mundial, ha generado un nivel preocupante de emisiones de gases de efecto invernadero.

El uso continuo del transporte en nuestra vida cotidiana suscita una preocupación creciente por la eficiencia energética y el uso de tecnologías energéticas. Para mitigar este impacto medioambiental, junto con la tendencia a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, en 2010 se inició el desarrollo de vehículos eléctricos funcionales y eficientes. Esta iniciativa tiene por objeto contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover la adopción de fuentes de energía alternativas para hacer frente a los retos de la movilidad [3].

Sin embargo, la implementación de estas tecnologías se enfrenta a varios retos que dificultan la adopción generalizada y rápida de los vehículos eléctricos. Entre estos retos se encuentran los elevados costos de mantenimiento, que se derivan de las características técnicas del vehículo y de su relativamente corto tiempo en el mercado. Además, los gastos de mantenimiento siguen sin abordarse adecuadamente y se ven agravados por las elevadas tarifas de recarga de estos vehículos [4].

Las emisiones de gases de efecto invernadero siguen generándose principalmente a través de las emisiones de dióxido de carbono de dos sectores importantes: la industria y el transporte, como se ilustra en la figura 1. El sector energético es uno de los principales contaminantes, por lo que la integración de fuentes de energía renovables es una solución viable para mitigar las emisiones futuras. Este enfoque también aborda otros gases de efecto invernadero, como el metano y el óxido nitroso [2].

La implantación de estaciones de recarga rápida y ultrarrápida no solo mejora la eficiencia energética, sino que también contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. En 2015, las emisiones se redujeron en un 50 % en comparación con el índice de referencia de ese periodo. Este resultado es coherente con la trayectoria observada, ya que los escenarios basados en capacidades de recarga más

Capítulo 1. Introducción

bajas o en la dependencia continuada de los combustibles fósiles arrojan una relación coste-beneficio menos favorable, expresada como el porcentaje de partículas mitigadas en relación con las emitidas. Como se muestra en la figura 2, se prevé que esta relación se mantenga hasta 2050 [5].

La adopción de la electromovilidad contribuye a reducir el cambio climático al disminuir la dependencia de los motores de combustión interna y facilitar la integración con las redes eléctricas alimentadas por fuentes renovables. También tiene efectos positivos en la calidad del aire urbano al reducir contaminantes como los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono y las partículas finas, lo que se traduce en beneficios para la salud de la población.

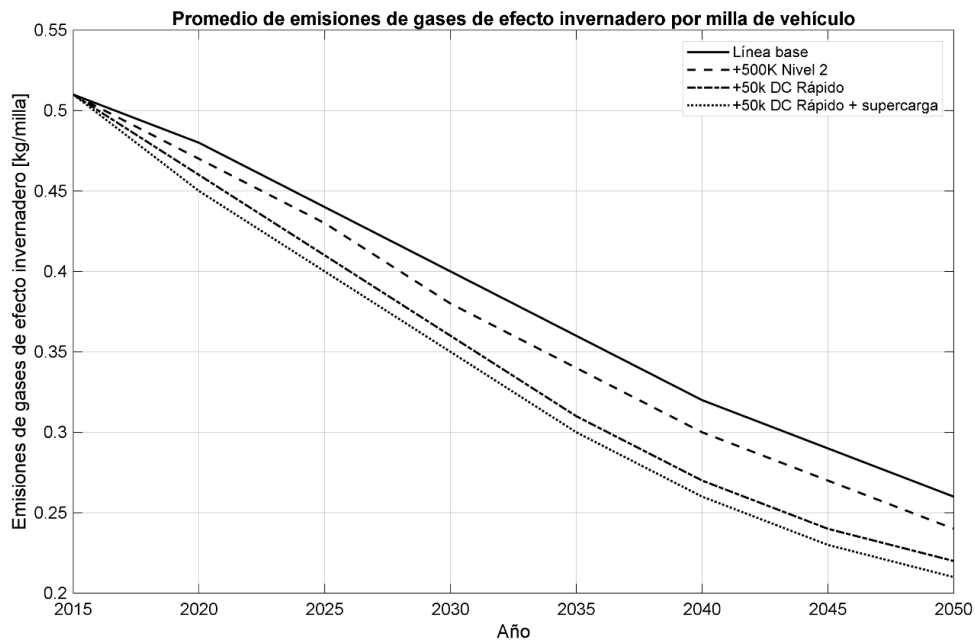


Figura 2 Proyección de emisión de gases de efecto invernadero mediante la implementación de estaciones de recarga para vehículos eléctricos.

Sin embargo, a nivel mundial, el balance medioambiental se ve influido por la intensidad de carbono de la generación de electricidad y la gestión del ciclo de vida de las baterías de iones de litio. En regiones con una alta proporción de energía renovable, la electromovilidad logra reducciones significativas de las emisiones; por el contrario, en países cuya matriz energética depende del carbón o el gas natural, su impacto positivo es más limitado. Por lo tanto, la transición hacia sistemas eléctricos más limpios, junto con el desarrollo de estrategias para el reciclaje y la reutilización de materiales críticos, es esencial para maximizar los beneficios medioambientales de la electromovilidad en el ámbito mundial [6].

1.1 Objetivos

1.1.1 General

Diseño, simulación y caracterización de un cargador rápido de CD para vehículos eléctricos, analizar su impacto en la integración a la red y los retos de la adopción de vehículos eléctricos.

1.1.2 Específicos

- 1.- Analizar el escenario actual del vehículo eléctrico y su impacto en la integración a la red, examinando los distintos tipos de estaciones de recarga y su infraestructura.
- 2.- Diseñar y simular un convertidor CD-CD optimizado para cumplir con los requerimientos de la carga rápida de vehículos eléctricos.
- 3.- Diseñar, simular y caracterizar un cargador rápido de corriente continua para vehículos eléctricos.

1.2 Hipótesis

Un cargador rápido para vehículos eléctricos que use un convertidor resonante LLC como etapa de potencia logrará mayor eficiencia, además de menor estrés de conmutación y menor emisiones EMI, en comparación con una topología de conversión conmutada clásica, bajo las mismas condiciones.

1.3 Planteamiento del problema

En la actualidad, los cargadores de carga rápida para vehículos eléctricos alcanzan eficiencias superiores al 90%, lo que refleja un notable avance tecnológico; sin embargo, persiste una limitación importante relacionada con la disponibilidad y accesibilidad de las estaciones de recarga, así como con el alto costo y la complejidad de los sistemas existentes. La oferta comercial de cargadores de nivel 3 sigue siendo limitada y su implementación resulta costosa debido al uso de componentes y etapas no esenciales. Por ello, este trabajo propone diseñar y simular un cargador rápido de nivel 3 basado en un convertidor resonante LLC, con el fin de optimizar la eficiencia y reducir el número de componentes empleados, logrando un sistema más compacto, accesible y viable para su futura implementación en sectores poblacionales.

Capítulo 2. Estado del arte

Para este estudio, se consultaron diversas bases de datos académicas con el fin de recopilar documentos que ofrecieran una visión general de los vehículos eléctricos y su impacto en la red eléctrica. A continuación, la investigación se centró en los diferentes tipos de cargadores de corriente continua para vehículos eléctricos. Posteriormente, se examinó la bibliografía relacionada específicamente con los dispositivos de carga rápida de nivel 3 para comparar sus parámetros eléctricos clave, como la potencia nominal, el voltaje de salida y la corriente de funcionamiento. Esta revisión también exploró el estado actual de desarrollo de estos cargadores para sentar las bases del diseño futuro de los cargadores y su posible integración en el uso cotidiano.

La búsqueda de artículos siguió un enfoque basado en documentos, organizando las publicaciones de 2013 a 2024. Las palabras clave utilizadas fueron: «cargador rápido», «VE», «cargador de nivel 3», «impacto de los VE» y «topologías de cargadores rápidos». Los documentos se obtuvieron de múltiples bases de datos y motores de búsqueda, entre ellos IEEE Xplore, MDPI y ScienceDirect.

Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de inclusión consideraron artículos revisados por pares, ponencias de conferencias y artículos de revisión que:

- Se centran en los sistemas de carga rápida de vehículos eléctricos, las arquitecturas de los cargadores o las topologías de los convertidores de potencia.
- Aportan contribuciones técnicas o experimentales (simulación).

Los criterios de exclusión eliminaron los estudios que:

- No abordaban directamente el tema central de la carga rápida.
- Estaban fuera de los años de publicación de interés.
- Estaban duplicados en las bases de datos.

2.1 Proceso de selección

La búsqueda inicial arrojó un total de 7344 artículos. Tras aplicar los criterios de exclusión, se eliminaron 7074 artículos. Los 270 artículos restantes se revisaron minuciosamente y, finalmente, se seleccionaron 100 artículos para su inclusión en el análisis del estado actual de la técnica. En la figura 3 se muestra un resumen detallado del proceso de selección.

Capítulo 2. Estado del arte

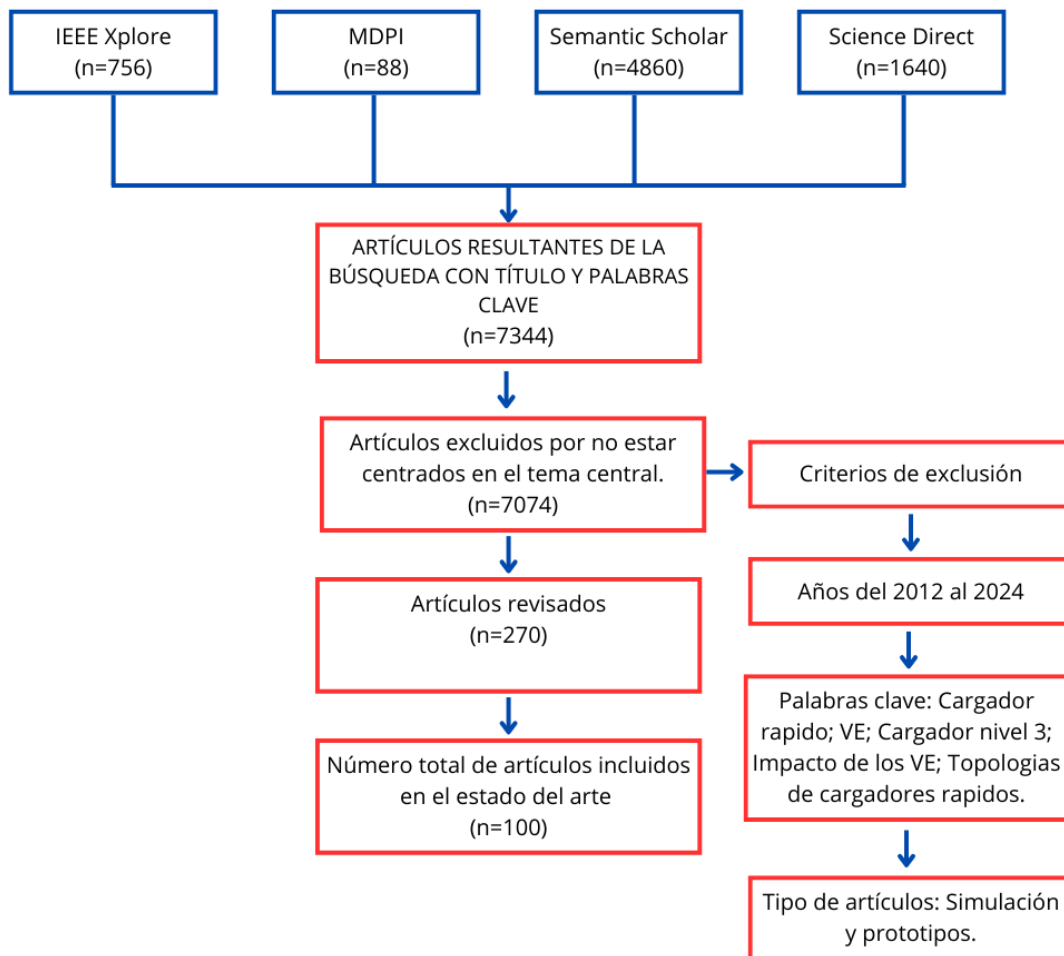


Figura 3 Diagrama del estado del arte

Una vez recopilados los artículos, se clasificaron por año de publicación. Esta clasificación permitió identificar tendencias a lo largo del tiempo. Facilitó el análisis de los dispositivos propuestos en los artículos revisados, lo que permitió detectar patrones clave relevantes para el estudio (Figura 4).

Capítulo 2. Estado del arte

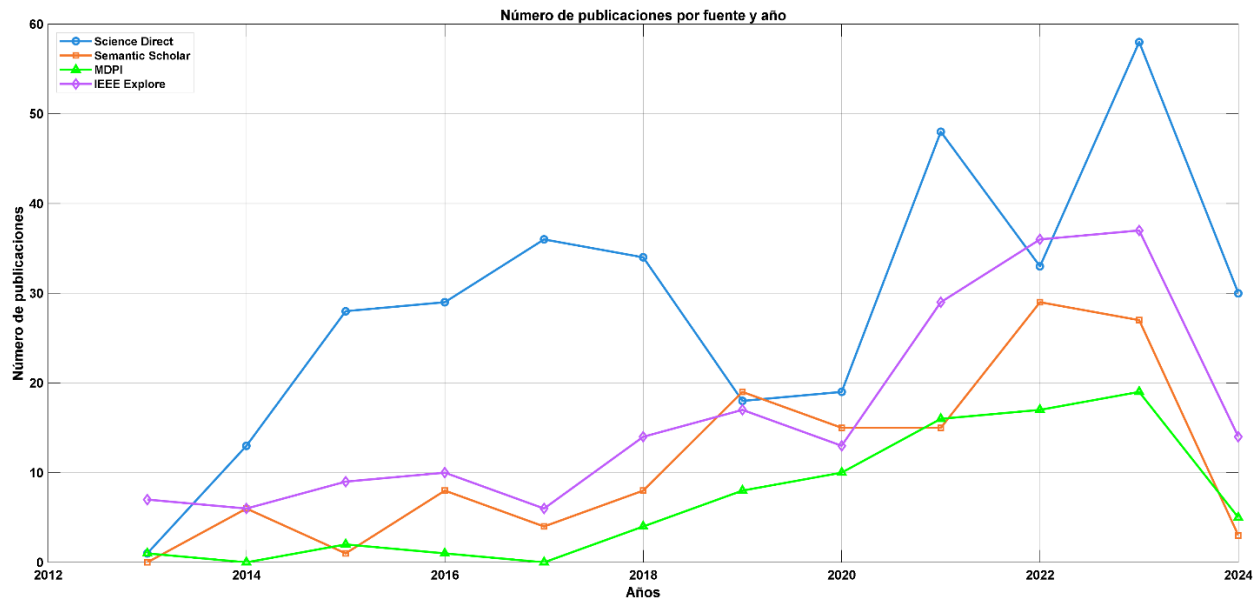


Figura 4 Distribución de publicaciones por año.

2.2 Estado actual de los vehículos eléctricos

Hoy en día, los avances en el sector automovilístico tienen un impacto significativo en la vida cotidiana, y la integración de los vehículos ecológicos en la vida diaria es cada vez más común. Esto constituye una oportunidad sustancial para el desarrollo sostenible, que abarca dimensiones ecológicas, económicas y sociales que, cuando se combinan con una implementación adecuada, pueden ayudar a establecer y mantener estándares en estas áreas. En cuanto a la implementación de los vehículos eléctricos (Figura 4), se ha puesto en marcha un protocolo de estandarización y educación ecológica para orientar a los usuarios en el aprendizaje y el interés por estos vehículos [7].

La implementación de los vehículos eléctricos puede considerarse una realidad más que un concepto futurista representado en las películas de ciencia ficción, lo que fomenta la idea de un futuro orientado a su adopción masiva. Un claro ejemplo de ello es la Fórmula E, que representa la integración de los vehículos eléctricos en las carreras de automovilismo, proporcionando una plataforma para demostrar su eficiencia, productividad y versatilidad.

Hasta hace unos años, existía un conflicto de intereses debido a la falta de información sobre la relación coste-beneficio de estos vehículos, lo que hacía cuestionable su eficiencia ecológica debido al uso de baterías con residuos contaminantes [8]. Un factor crítico que influye en la adopción por parte de los usuarios, especialmente en lo que respecta a la infraestructura de recarga, es la velocidad de recarga percibida. Mientras que los cargadores convencionales de nivel 2 suelen necesitar varias horas para realizar

Capítulo 2. Estado del arte

una recarga completa, las estaciones de recarga rápida de nivel 3 reducen este tiempo a aproximadamente 30 minutos, lo que proporciona una autonomía superior a 300 km. Esta mejora sustancial en la comodidad de la recarga tiene un impacto directo en la aceptación por parte de los usuarios, ya que la capacidad de recargar rápidamente hace que los vehículos eléctricos sean más comparables a los vehículos convencionales de combustión interna en términos de la experiencia de reabastecimiento [9].

Por lo tanto, el despliegue de estaciones de recarga de nivel 3 desempeña un papel clave a la hora de abordar uno de los principales obstáculos para su adopción: el tiempo de recarga. Al alinear los avances tecnológicos en materia de eficiencia con una infraestructura que da prioridad a la comodidad del usuario, los vehículos eléctricos se convierten en una opción más viable y atractiva para su uso generalizado [10].

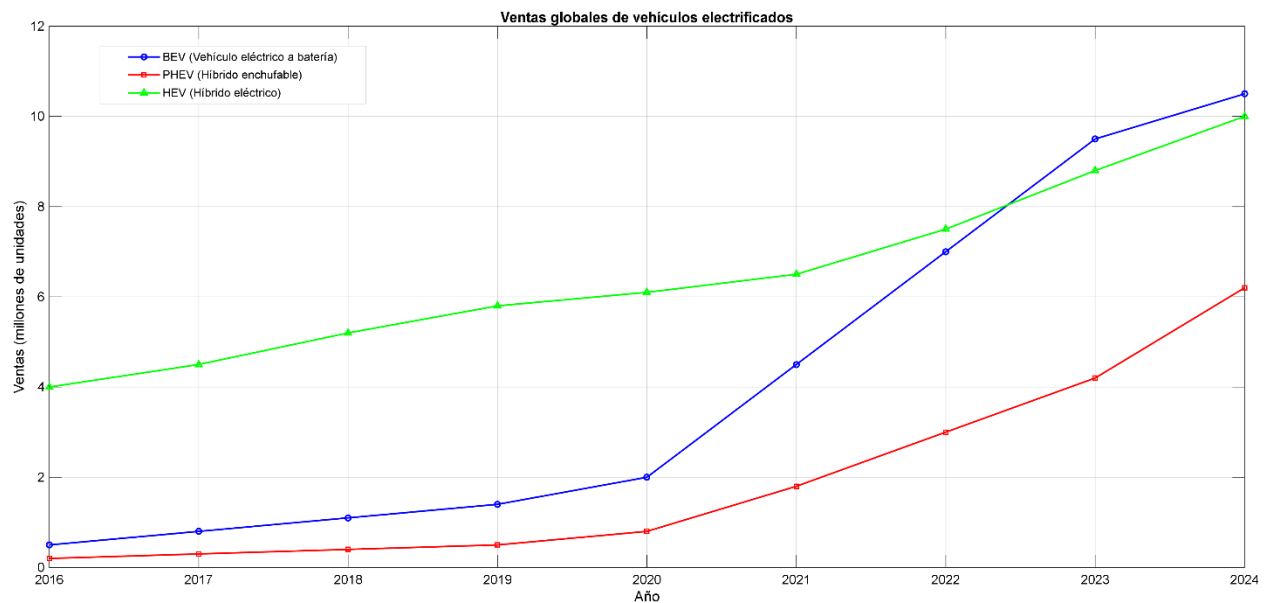


Figura 5 Ventas globales de vehículos eléctricos

El cambio masivo que se muestra en la figura 5 tendrá un impacto significativo en la red eléctrica mundial, ya que la creciente demanda de energía para recargar los vehículos eléctricos requerirá inversiones en infraestructura, tecnologías de redes inteligentes y almacenamiento de energía. Los países con plazos más cercanos ya están integrando estos vehículos en la red (figura 6). Se podrían explorar soluciones para mitigar los retos que plantea la estabilidad de la red, como la gestión de la demanda de energía y la incorporación de fuentes renovables, cuya variabilidad refuerza la necesidad de una planificación sólida y un almacenamiento a gran escala [11].

Capítulo 2. Estado del arte

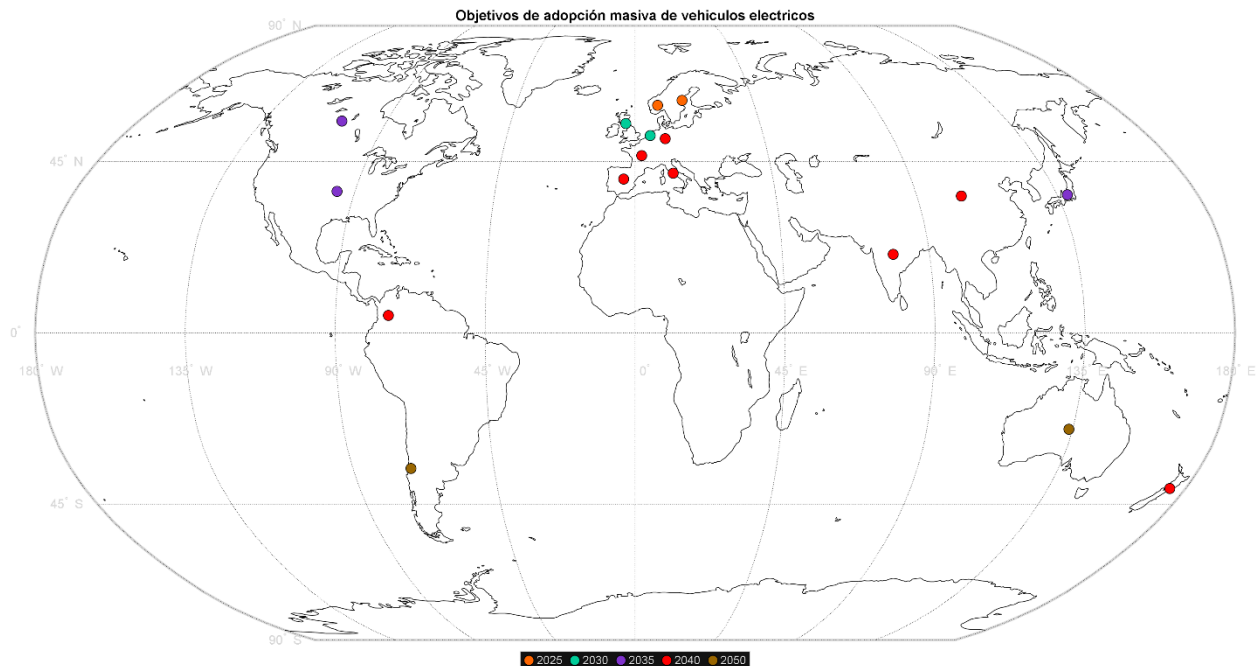


Figura 6 Proyección de adopción de electromovilidad

Uno de los principales retos es la variabilidad de la carga eléctrica que introducen los vehículos eléctricos. La demanda de electricidad se vuelve menos predecible, lo que podría complicar la planificación y el funcionamiento de la red. Sin una gestión adecuada, esto podría provocar desequilibrios entre la oferta y la demanda de energía, lo que afectaría a la estabilidad de la red.

Otro aspecto científico es la carga inalámbrica, que se implementa para el diseño de espacios y la practicidad de la recarga de vehículos, utilizando placas de presión en el piso para generar la recarga a través de bobinas durante un periodo de descanso sin generar pérdidas considerables de energía en forma de calor. Además, pueden ofrecer soluciones innovadoras, como la capacidad de actuar como almacenamiento de energía distribuida a través de tecnologías en las que los vehículos devuelven energía a la red en momentos de alta demanda, lo que ayuda a equilibrar la carga.

La carga inalámbrica también añade flexibilidad en términos de diseño del espacio y comodidad para el usuario, con el potencial añadido de integrarse en estrategias gestionadas o V2G. Sin embargo, el reto es especialmente pronunciado en el caso de las estaciones de carga rápida, que concentran una alta demanda de energía en períodos cortos. Los grupos de estaciones de este tipo podrían suponer una carga significativa para las redes locales, lo que podría provocar apagones o requerir costosas mejoras de la infraestructura.

Por lo tanto, comparar e implementar una combinación de estrategias, como la carga inteligente coordinada, las tarifas por tiempo de uso y el V2G, se vuelve esencial para mitigar el impacto de la adopción de la carga rápida en la red eléctrica y garantizar una transición sostenible hacia la electromovilidad a gran escala.

La adopción masiva de vehículos eléctricos se enfrenta a importantes retos que van más allá de una simple transición tecnológica. Uno de los principales retos es la posible sobrecarga de la red eléctrica. La demanda de electricidad podría aumentar significativamente, poniendo a prueba la capacidad de la infraestructura actual para satisfacer estas nuevas necesidades energéticas. Esto es especialmente preocupante en el caso de las estaciones de carga rápida, que requieren grandes cantidades de energía en períodos cortos. La concentración de múltiples estaciones de carga rápida en áreas específicas podría provocar picos de demanda que la infraestructura eléctrica actual no está preparada para manejar, lo que podría dar lugar a apagones o a la necesidad de costosas mejoras en la red eléctrica.

Otro reto es la ansiedad por la autonomía, que se refiere a la preocupación de que un vehículo eléctrico no tenga suficiente autonomía para completar un viaje sin recargar. A pesar de las mejoras en la autonomía de las baterías, esta preocupación persiste, especialmente en zonas con una infraestructura de recarga insuficiente. La falta de estaciones de recarga rápida, junto con la percepción de que los tiempos de recarga son largos, contribuye a esta ansiedad, lo que desalienta a los posibles compradores[\[12\]](#).

2.2.1 Tecnología de las baterías

La industria energética en el campo de la eficiencia energética se centra en dos áreas en lo que respecta a la electromovilidad. Una de estas áreas se centra en el desarrollo de la tecnología de almacenamiento de energía mediante el diseño de baterías de iones de litio, debido a su gran capacidad para establecer una buena relación entre los parámetros de densidad de potencia y densidad de energía. Esto significa que tienen un equilibrio entre la gran cantidad de energía que pueden almacenar en un espacio reducido y la rapidez con la que liberan esa energía [\[13\]](#).

La tabla 1 muestra que las baterías de plomo-ácido almacenan muy poca energía y no pueden soportar un gran número de ciclos de carga. Por esta razón, la tendencia actual favorece el uso de baterías de iones de litio. También cabe destacar que las baterías de níquel-cadmio presentan una alta tasa de autodescarga en comparación con las otras tecnologías analizadas. Este aspecto es relevante, ya que más adelante se utilizará para ilustrar la relación entre la eficiencia, el tamaño de la batería y las tecnologías de almacenamiento de energía [\[14\]](#).

Capítulo 2. Estado del arte

Tabla 1 Características de las tablas empleadas en vehículos eléctricos

Tecnología de batería	Energía específica (Wh/kg)	Coefficiente de descarga (%/24hrs)	Número de ciclos de recarga
Pb-acid	40	1	500
Ni-Cd	60	5	1350
NiMH	70	2	1350
Li-ion	125	1	1000
Na-NiCl	125	0	1000

Por eso las baterías de iones de litio se utilizan a gran escala en aplicaciones como la electromovilidad. Sin embargo, los investigadores están tratando de desarrollar un nuevo método de almacenamiento centrado en la implementación de supercondensadores [15]. Esta tecnología implementa dispositivos de doble capa con valores mínimos de 1 faradio. En comparación con las baterías de iones de litio, estos dispositivos tienen una alta densidad energética. Sin embargo, su densidad de potencia es muy baja. En términos sencillos, almacenan una gran cantidad de energía, pero la liberan rápidamente [16]. A continuación se muestra un gráfico de Ragone (Figura 7) que ilustra lo anterior [17].

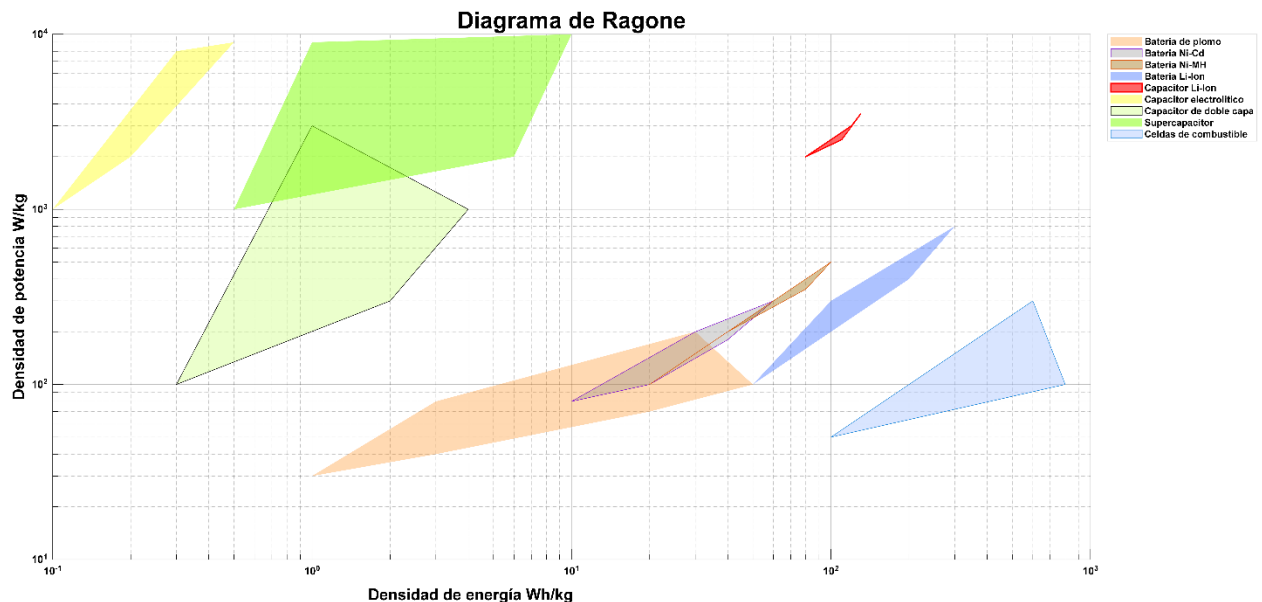


Figura 7 Tecnologías de baterías

Las celdas de combustible no suelen ser adecuadas para el almacenamiento de energía en vehículos eléctricos debido a su complejidad estructural y su tamaño. Para lograr la eficiencia y proporcionar una autonomía comparable a la de las baterías utilizadas en los

vehículos eléctricos e híbridos, las pilas de combustible tendrían que ser mucho más grandes, lo que plantearía retos considerables en términos de embalaje e integración.

2.2.1.1 Celda tipo bolsa

Las celdas de iones de litio tipo bolsa (Figura 8) se caracterizan por su diseño flexible y plano, que permite una mayor densidad energética por unidad de volumen en comparación con los formatos cilíndricos y prismáticos. Su encapsulación en polímero multicapa y lámina de aluminio las hace más ligeras y delgadas, lo que facilita su integración en diseños compactos y su adaptación a diversas estructuras de vehículos [18].

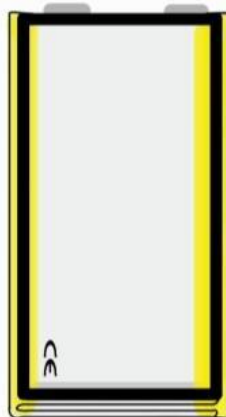


Figura 8 Celda tipo bolsa

En los vehículos eléctricos, las celdas tipo bolsa suelen ensamblarse en módulos y luego en paquetes de baterías que se instalan en la base del vehículo, de manera similar a las celdas cilíndricas. Esta configuración contribuye a una distribución óptima del peso, un centro de gravedad más bajo y un uso eficiente del espacio estructural.

Una ventaja importante de las celdas tipo bolsa es su mayor superficie, que facilita la disipación del calor a nivel del módulo o del paquete mediante conducción o refrigeración líquida. Esta característica ha fomentado su adopción por parte de fabricantes como Hyundai, Kia y General Motors, que valoran su ligereza y flexibilidad en el diseño de los paquetes. Estas baterías pueden proporcionar autonomías superiores a 400 km por carga, dependiendo del diseño del sistema y las condiciones de funcionamiento [19].

No obstante, a nivel de célula individual, las células tipo bolsa son más sensibles a la carga rápida que las células cilíndricas. Sus características estructurales pueden provocar estrés térmico localizado y una degradación acelerada en condiciones de funcionamiento con alta tasa de C, lo que subraya la necesidad de estrategias de gestión térmica robustas.

2.2.1.2 Celda prismática

Las baterías de iones de litio prismáticas (Figura 9) se han vuelto muy comunes en los vehículos eléctricos, ya que son extremadamente planas y «rectangulares» para ocupar el menor espacio posible dentro del vehículo [18]. El hecho de que estas celdas tengan un marco rígido en lugar de la forma cilíndrica más común es novedoso y no solo añade resistencia, sino que también facilita la eliminación del calor. En su interior, están compuestas por capas apiladas de material activo y permiten una alta capacidad [19].

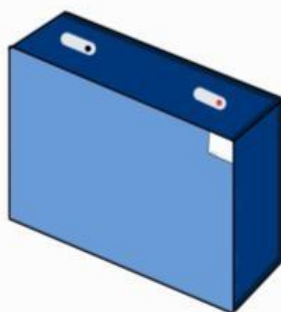


Figura 9 Celda tipo prisma

Su diseño facilita la conexión de refrigerantes, como líquidos o materiales especiales, para ayudar a controlar la temperatura cuando la batería está bajo carga. Tienen una ventaja importante: almacenan mucha energía en un volumen reducido, lo que las convierte en la solución perfecta para los coches eléctricos destinados a recorrer largas distancias [20]. También son menos susceptibles a las cargas de choque o las vibraciones y contribuyen a la seguridad de los automóviles en la carretera. Por otro lado, son más caras y más difíciles de fabricar, y si fallan, las consecuencias pueden ser más graves debido a la gran cantidad de energía que manejan. Además, se ha informado de que pueden hincharse ligeramente si no se utilizan durante largos periodos de tiempo [21].

2.2.1.3 Celda cilíndrica

Las baterías cilíndricas de iones de litio (Figura 10) se construyen enrollando capas de materiales activos, formando celdas compactas y eficientes. Estas celdas se conectan en configuraciones en serie-paralelo para alcanzar los niveles de voltaje y capacidad requeridos. En aplicaciones vehiculares, especialmente en autos eléctricos, este tipo de batería se distribuye a lo largo del piso del vehículo, lo que permite un uso más eficiente del espacio disponible y ayuda a mejorar el centro de gravedad, optimizando así la estabilidad y el rendimiento dinámico del auto.

Capítulo 2. Estado del arte



Figura 10 Celda tipo cilindro

Además, esta distribución uniforme de las celdas facilita la implementación de sistemas de refrigeración más eficientes. Al estar ubicadas en la base del vehículo, las baterías pueden tener canales de ventilación activos o pasivos que permiten disipar el calor generado durante la carga, la descarga o la conducción en condiciones exigentes. Esto no solo prolonga la vida útil de las celdas, sino que también evita el sobrecalentamiento, mejorando la seguridad y el rendimiento del sistema [\[22\]](#).

Marcas como Tesla han adoptado este enfoque en varios de sus modelos. Por ejemplo, el Tesla Model S utiliza una batería compuesta por miles de celdas cilíndricas distribuidas por el piso del vehículo. Esta arquitectura ha demostrado ser muy eficiente tanto en términos de densidad energética como de gestión térmica.

Las baterías cilíndricas de iones de litio se centran en enrollar las celdas en capas a pequeña escala, formando disposiciones en serie-paralelo. Estas mismas baterías se distribuyen a lo largo del piso del vehículo, lo que permite un uso más eficiente del espacio. También hay que señalar que esta distribución de la disposición de las baterías favorece una mejor refrigeración alrededor de las celdas, ya que están distribuidas por toda la base del vehículo y cuentan con canales de ventilación que enfrían el proceso de vida útil y evitan el sobrecalentamiento [\[22\]](#).

El desarrollo de tecnologías para el almacenamiento de energía eléctrica tiene un mercado muy amplio. La tabla 2 muestra algunos tipos de embalaje como parte de una revisión del mercado actual.

Capítulo 2. Estado del arte

Tabla 2 Comparación de baterías comerciales en vehículos eléctricos.

Ref.	Año	Modelo de batería	Composición química	Capacidad	Celdas	Tipo
[22]	2009	BYD Tang (BYD, Shenzhen, China)	LFP	100–150 kWh	200	Bolsa
[23]	2014	GM LMR prismatic (General Motors, MI, USA)	LMR	150 kWh	273	Prisma
[24]	2020	Lucid Air 2170 (Samsung SDI, Yongin, South Korea)	NCA	113 kWh	6600	Cilindro
[25]	2022	Ford Mach-E (Ford, MI, USA)	NCM811	91 kWh	376	Bolsa
[26]	2022	Tesla 4680 (Tesla, TX, USA)	NCM o NCA	82 kWh	4680	Cilindro
[27]	2022	Tesla/NMC (Tesla, NV, USA)	NMC	~55–82 kWh	108	Prisma
[28]	2023	Nio ET7 (NIO, Hefei, China)	NMC	150 kWh	108	Bolsa
[29]	2023	GM Ultium (Ultium Cells LLC, OH, USA)	NCMA	100 kWh	264	Bolsa
[30]	2023	Nio ET7 (NIO, Hefei, China)	NMC	100 kWh	192	Prisma
[31]	2023	Nio ET7(NIO, Hefei, China)	NMC + LFP	75 kWh	118	Prisma
[32]	2023	BYD Blade (BYD, Qinghai, China)	LFP	82–100 kWh	230	Prisma
[33]	2023	BMW NEUE KLASSE (BMW, Debrecen, Munich, Hungary and Germany)	NMC	105 kWh	4680	Cilindro
[34]	2023	Tesla 2170 (Tesla, NV, USA)	NCA	60–82 kWh	2170	Cilindro
[35]	2024	Hyundai Ioniq (Hyundai, Ulsan, South Korea)	LFP	77 kWh	360	Bolsa
[36]	2025	Porsche 18650 (Panasonic, Kadoma, Japan)	NCA	93 kWh	396	Cilindro

Como se puede observar en la tabla, los paquetes de baterías se agrupan según su año de implementación. Recientemente, se han realizado investigaciones y desarrollos sobre

Capítulo 2. Estado del arte

modelos basados en baterías cilíndricas. La principal característica de esta hipótesis es que sus paquetes tienen más celdas en comparación con las baterías prismáticas o tipo bolsa. Esto se debe a que la estructura de agrupación de las celdas permite una mejor colocación y distribución de las mismas en todo el vehículo eléctrico, lo que mejora la refrigeración y la eficiencia en comparación con el resto.

2.3 Infraestructura de recarga de vehículos eléctricos

Actualmente, existen cuatro tipos principales de sistemas de recarga para vehículos eléctricos, clasificados en niveles. Cada nivel especifica un tipo de recarga clasificado según la potencia que suministra y el tiempo que tarda en recargarse. Los niveles 1 y 2, basados en baja potencia, están diseñados para centrarse en la corriente alterna, que, para el nivel 1, proporciona una potencia de carga de 1,44 kW a 1,92 kW, con un tiempo de carga estimado de 11 a 36 h. El nivel 2 proporciona una potencia de carga de 3,1 kW a 19,2 kW, con un tiempo de carga de 2 a 6 h. Los siguientes módulos se centran directamente en la corriente continua, dedicándolos a una mayor potencia para un tiempo de carga más rápido. El nivel 3 cubre un rango de potencia de carga de 50 a 350 kW, logrando tiempos de carga de 30 min. Por último, el nivel 4, dedicado a la carga súper rápida, maneja valores de potencia en rangos superiores a 350 kW, lo que proporciona tiempos de carga de 10 min (Tabla 3) [2].

Tabla 3 Comparativa de niveles de recarga

	Nivel 1 (CA)	Nivel 2 (CA)	Nivel 3 (CD)	Nivel 4 (CD)
Tiempo de recarga	11–36 h	2–6 h	30 min	10 min
Energía consumida	16–50 kWh	16–30 kWh	20–50 kWh	50–160 kWh
Protocolos de conexión	SAE J1772	SAE J1772	CCS, CHAdeMO	CCS, CHAdeMO
Voltaje (V)	120	240	200–1000	Up to 1000
Corriente (A)	12–16	16–80	100–400	300–500

Desde una perspectiva comparativa, cada nivel tiene implicaciones distintas tanto para la red eléctrica como para los usuarios finales. Los cargadores de nivel 1 y nivel 2 ejercen una presión relativamente baja sobre la red debido a su limitada demanda de energía, lo que facilita su integración en entornos residenciales y comerciales. Sin embargo, sus largos tiempos de carga pueden desanimar a los usuarios que dan prioridad a la comodidad y la rapidez. Los cargadores de nivel 3 representan un equilibrio, ya que

Capítulo 2. Estado del arte

ofrecen una carga rápida adecuada para las estaciones públicas y, al mismo tiempo, imponen picos significativos pero manejables en la red. Por el contrario, los cargadores de nivel 4 proporcionan la mayor comodidad a los usuarios, ya que se recargan en cuestión de minutos, pero también generan cargas extremadamente altas y concentradas que pueden poner en peligro la estabilidad de la red local y que a menudo requieren costosas mejoras en la infraestructura, como subestaciones reforzadas o sistemas de almacenamiento de energía específicos.

Por lo tanto, aunque la carga rápida y ultrarrápida es esencial para apoyar la adopción masiva al reducir la ansiedad por la autonomía, su despliegue debe ir acompañado de estrategias de gestión de la red, como la respuesta a la demanda, la carga inteligente y la integración de fuentes de energía renovables para mitigar su impacto. Esta compensación pone de relieve la importancia de equilibrar la comodidad del usuario con la viabilidad técnica y económica del funcionamiento de la red.

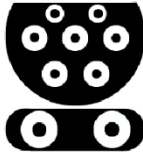
En la actualidad, se están buscando formas de implementar el uso de energías renovables en la recarga de vehículos eléctricos, aprovechando los avances tecnológicos en el uso de la energía para un dispositivo de alto consumo energético como es un vehículo eléctrico. La comunidad científica se centra actualmente en el uso de tecnologías para mejorar el servicio de los vehículos eléctricos mediante la implementación de inteligencia artificial que utiliza redes neuronales para cargar de forma inteligente la batería del vehículo eléctrico, mitigando así la sobrecarga de la red [37]. Es importante aclarar que, a partir de esta sección, la información se centrará en las estaciones de carga rápida y ultrarrápida, debido a la tendencia y la adopción de los vehículos eléctricos.

El uso de vehículos eléctricos ha aumentado. Sin embargo, dos crisis actuales, la superpoblación y la crisis energética, están obstaculizando su plena adopción. Esta situación representa un cambio significativo en la forma en que se consume y gestiona la energía, lo que genera impactos tanto positivos como negativos. Uno de los principales retos es el aumento de la demanda de energía, especialmente cuando se recarga un gran número de vehículos eléctricos simultáneamente durante las horas punta. Estas circunstancias podrían sobrecargar la infraestructura eléctrica existente, que en muchos casos no fue diseñada originalmente para hacer frente a estos picos de demanda adicionales.

Esto suscita preocupaciones medioambientales, ya que las baterías contienen materiales peligrosos que requieren procesos de reciclaje seguros. La adopción masiva de los vehículos eléctricos, aunque es crucial para la movilidad sostenible, requiere una planificación cuidadosa para evitar sobrecargar la red eléctrica y garantizar que la infraestructura, las políticas y la tecnología evolucionen en armonía. La tabla 3 ofrece un resumen de los puntos mencionados.

Capítulo 2. Estado del arte

Tabla 4 Protocolos de comunicación

	CHAdEMO	Tesla Supercharger	CCS
Alimentación	DC	DC	AC/DC
Potencia máxima de carga	Hasta 400 kW	Hasta 250 kW	Hasta 350 kW
Corriente máxima	Hasta 400 A	Hasta 423 A	Hasta 500 A
Estándares de voltaje	200-1000 V	480 V	200-1000 V
Protocolo de comunicación	Control Area Network	Exclusivo de Tesla	Power Line Communication
Fabricantes	Nissan, Mitsubishi, Kia	Tesla	BMW, Audi, Volkswagen, Ford, GM
Diagrama de puertos de conexión			

El análisis comparativo que se presenta en la tabla 4 evidencia la evolución tecnológica de las estaciones de carga rápida y ultrarrápida comerciales durante la última década. Los primeros sistemas, que funcionaban en un rango de 100 a 500 V con niveles de potencia cercanos a los 50 kW, alcanzaban eficiencias de alrededor del 90 %, lo que sentó las bases para protocolos estandarizados como CHAdEMO. A partir de 2017, se ha observado un progreso significativo tanto en la capacidad de manejo de voltaje como de corriente, con cargadores que alcanzan los 150-350 kW y mantienen eficiencias superiores al 94 %.

Capítulo 2. Estado del arte

Tabla 5 Análisis comparativo de estaciones comerciales de recarga para vehículos eléctricos

Ref.	Año	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (kW)	Eficiencia (%)	Protocolo
[38]	2011	100–500	120	50	90	CHAdeMO
[39]	2017	200–500	125	50	95	CCS, CHAdeMO
[40]	2019	50–500	125	50	94	CCS, CHAdeMO
[41]	2020	500	200	100	95	CCS1, CHAdeMO
[42]	2021	150–950	120	60	94	CCS1, CHAdeMO
[43]	2021	170–940	50–400	150	93	CHAdeMO
[44]	2021	920	200–500	350	98.5	CCS2, CHAdeMO
[45]	2021	200–1000	375	150	94	CCS, CHAdeMO
[46]	2022	920	188	75	95	CCS ½, CHAdeMO
[47]	2022	50–920	200	100	95	CCS1, CHAdeMO
[48]	2022	50–410	330	135	91	Supercharger
[49]	2023	200–1000	250–500	2000	94	CCS, CHAdeMO
[50]	2023	150–950	500	350	95	CHAdeMO
[51]	2023	150	500	350	96	CCS, CHAdeMO
[52]	2023	150–1000	350	350	95	CCS, CHAdeMO
[53]	2024	150–920	325	130	97	CCS ½, CHAdeMO
[54]	2024	150–950	380–500	350	94	CCS ½, CHAdeMO
[55]	2024	200–920	500	350	96	CCS2, CHAdeMO
[56]	2024	500	-	6.6	-	CCS
[57]	2024	200–1000	350	350	97	CHAdeMO

Las implementaciones recientes (2021-2024) amplían la tensión de funcionamiento hasta 1000 V y las intensidades nominales superan los 500 A, lo que permite potencias de carga de 250-350 kW. Estas plataformas demuestran eficiencias máximas cercanas al 98 %, consolidando el uso de semiconductores de banda ancha y estrategias avanzadas de gestión térmica. Además, la adopción del CCS (tipos 1 y 2) como protocolo dominante refleja la tendencia hacia la interoperabilidad y la armonización de las normas en aplicaciones de alta potencia.

En resumen, los datos de la tabla 5 ilustran una clara trayectoria hacia una mayor potencia de carga, tiempos de carga más cortos y una mayor eficiencia del sistema. La tecnología comercial más avanzada converge en arquitecturas capaces de suministrar de forma fiable más de 300 kW con eficiencias superiores al 95 %, lo que confirma la

madurez de la tecnología de carga rápida para su despliegue a gran escala en la infraestructura de los vehículos eléctricos.

2.4 Convertidores de potencia CC-CC

2.4.1 Convertidor Buck

El convertidor reductor es una topología muy utilizada para la etapa de conversión inicial o las fuentes de alimentación auxiliares en las estaciones de carga rápida. Su principio de funcionamiento consiste en conmutar un interruptor de alta frecuencia y, a continuación, transferir la energía a través de un inductor a la salida, donde un condensador filtra la tensión de salida [\[58\]](#). La figura 11 muestra un diagrama esquemático de un convertidor reductor en el que se destaca el flujo de corriente.

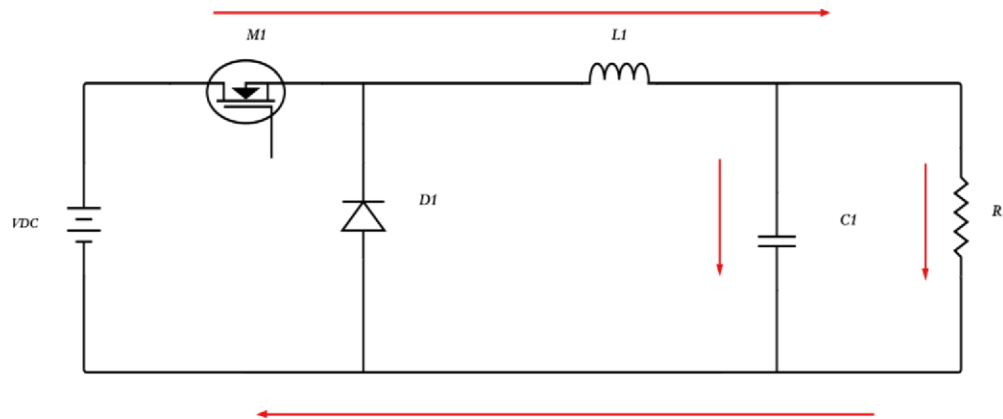


Figura 11 Convertidor Buck

En la carga rápida, este convertidor se utiliza para generar voltajes de control intermedios, controlar niveles de potencia más altos o como parte del sistema de control de carga, actuando como un parámetro de voltaje o corriente constante [\[59\]](#). Los semiconductores de banda ancha, como el carburo de silicio, pueden utilizarse para alcanzar un nivel de eficiencia y minimizar las pérdidas de conmutación, lo cual es necesario cuando se busca un funcionamiento de alta frecuencia. Desde el punto de vista del diseño, las compensaciones están bien establecidas: los bajos índices de trabajo con altos índices de reducción provocan un aumento de la ondulación de la corriente, lo que requiere inductores más grandes o frecuencias de conmutación más altas [\[60\]](#). Los semiconductores de banda ancha, en particular los MOSFET de SiC, permiten frecuencias de conmutación superiores a 100-200 kHz, lo que mejora la respuesta transitoria y reduce el tamaño de los componentes pasivos. Las eficiencias superiores al 95 % son habituales en las etapas auxiliares aisladas, mientras que las implementaciones a nivel de sistema alcanzan el 90-94 % dependiendo de las restricciones de carga y refrigeración [\[61\]](#).

2.4.2 Convertidor Boost

Este convertidor de potencia se centra en aumentar los parámetros eléctricos, concretamente el voltaje en su salida, utilizando un interruptor que aumenta los valores de voltaje mediante la aplicación de un bus de CC. Este proceso inyecta más voltaje del que recibe [62]. Acumula energía en un inductor durante el tiempo de encendido y la transfiere a la salida cuando el interruptor se apaga [63]. Para garantizar una respuesta rápida y una regulación precisa durante la carga rápida, se utilizan técnicas de modulación por ancho de pulso y estrategias de control digital. La figura 12 muestra un diagrama esquemático de un convertidor elevador en el que se destaca el flujo de corriente.

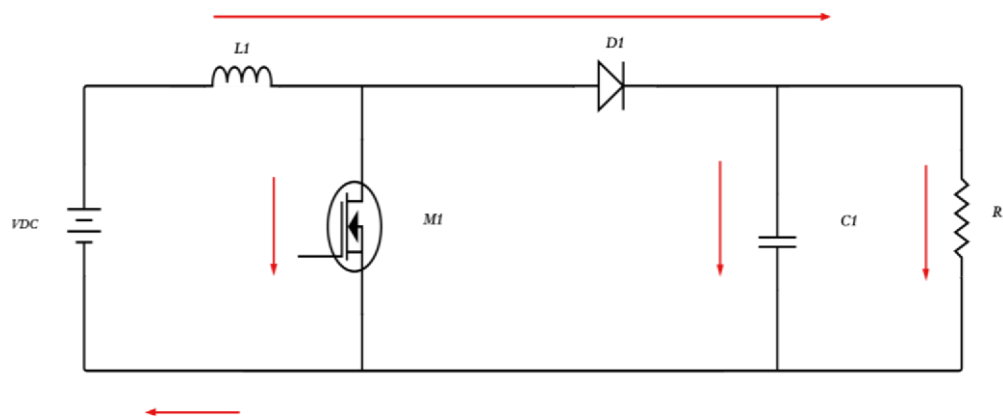


Figura 12 Convertidor Boost

Las limitaciones de diseño incluyen la gestión de corrientes pico elevadas en el interruptor y el diodo, especialmente en ciclos de trabajo elevados, lo que provoca un aumento de las pérdidas por conducción y conmutación. A menudo se adoptan estrategias de control digital con PWM y control en modo corriente para mantener una respuesta rápida. En los cargadores de vehículos eléctricos de alta potencia, las frecuencias de funcionamiento suelen situarse entre 50 y 150 kHz, equilibrando la eficiencia y el diseño magnético. Se han registrado eficiencias de hasta el 97-98 % en configuraciones experimentales que utilizan dispositivos de SiC. La gestión térmica se vuelve crítica debido a la tensión de corriente, que puede mitigarse intercalando múltiples fases de refuerzo [64]. Cabe señalar que este tipo de convertidor se utiliza más comúnmente en aplicaciones de alta potencia, como la carga rápida de vehículos, donde se emplea en diferentes ramas para ampliar su rango de tolerancias a las variables eléctricas.

Un análisis de las tablas 5 y 6 muestra que los porcentajes en los prototipos se mantienen dentro de un cierto margen de error. Sin embargo, cuando se comparan con las topologías comerciales, se observa un cambio significativo en las variables [65].

2.4.3 Convertidor Buck-Boost

El convertidor reductor-elevador es una topología versátil que permite el funcionamiento en modo reductor o elevador, dependiendo de la diferencia entre la tensión de entrada y la tensión requerida por la batería. Esta flexibilidad lo convierte en una solución ideal para adaptarse a arquitecturas duales de 400 V y 800 V, comunes en plataformas modernas como las de Hyundai y Porsche [66]. La figura 13 muestra un diagrama esquemático de un convertidor Buck-Boost en el que se destaca el flujo de corriente.

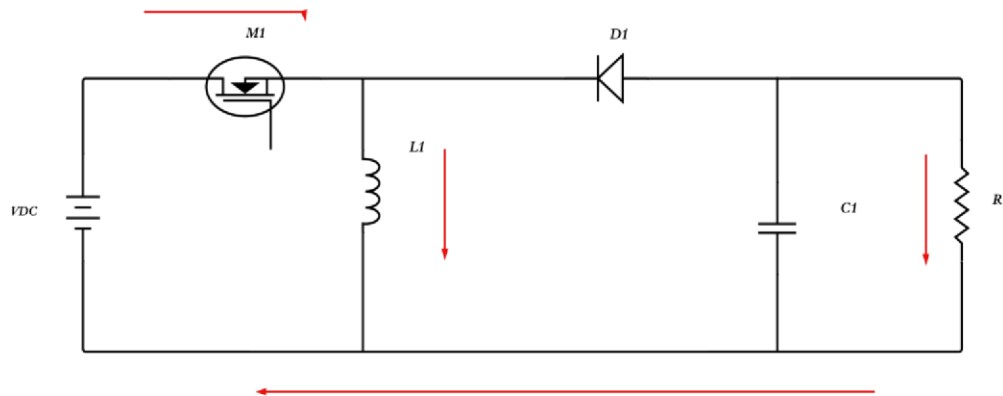


Figura 13 Convertidor Buck-Boost

A diferencia de los convertidores exclusivamente Buck o Boost, la topología bidireccional Buck-Boost permite tanto la carga como la descarga de la batería, lo que contribuye a funciones de red inteligente como el equilibrio de carga o la gestión de picos. Las compensaciones en cuanto a eficiencia incluyen un aumento de las pérdidas por conducción debido a los dispositivos activos adicionales en comparación con las etapas Buck o Boost puras. Sin embargo, la integración de MOSFET de SiC permite frecuencias de conmutación superiores a 100 kHz, lo que permite una mayor densidad de potencia. Los diseños típicos incluyen intercalación multifásica para reducir la ondulación de corriente y mejorar el rendimiento térmico. Las estrategias de control, como el control no lineal de doble bucle, mejoran la estabilidad en transitorios de carga rápidos, lo cual es crucial en escenarios de carga rápida [67]. Las eficiencias reportadas oscilan entre el 95 % y el 97 % en amplias variaciones de voltaje de entrada/salida [68]. Además, la implementación de múltiples ramificaciones mejora el rendimiento térmico y reduce la ondulación de corriente, mientras que las técnicas de control no lineal, como el control de doble bucle, garantizan la estabilidad y una respuesta dinámica rápida a los cambios de carga [69].

2.4.4 Convertidor resonante

Los convertidores resonantes (Figura 14) son modelos de potencia que se utilizan para trabajar a bajos niveles de potencia debido a sus altas frecuencias de funcionamiento. Al alcanzar una alta frecuencia de funcionamiento, se obtiene una baja potencia. Los convertidores resonantes se caracterizan por su baja pérdida de conmutación a pesar de su alta frecuencia [70]. Otra característica de este dispositivo es que, al implementar pocos elementos, reduce considerablemente el peso y la temperatura del dispositivo, lo que reduce significativamente las pérdidas térmicas y de conversión en el sistema [71]. Las compensaciones de eficiencia están relacionadas con el punto de funcionamiento: cuando la frecuencia de conmutación se desvía significativamente de la resonancia, las corrientes circulantes aumentan, lo que conduce a mayores pérdidas de conducción y a una menor eficiencia. Por esta razón, es fundamental seleccionar cuidadosamente el factor de calidad, la relación entre la inductancia magnetizante y la inductancia resonante y el margen de frecuencia de conmutación. Los diseños típicos buscan valores de factor de calidad entre 0,5 y 1,0 para equilibrar la eficiencia, el rango de ganancia de voltaje y la capacidad de regulación de la carga [72].

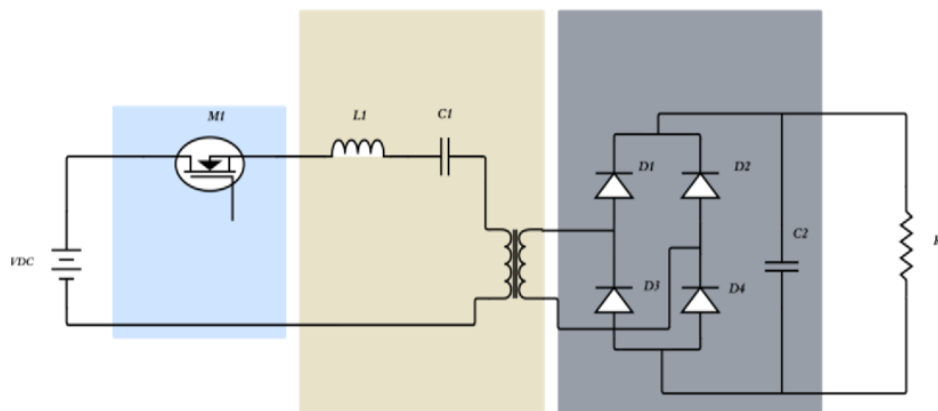


Figura 14 Convertidor resonante LLC

En aplicaciones de carga rápida, el convertidor LLC alcanza eficiencias máximas del 96-98 % con MOSFET de SiC, incluso en amplios rangos de entrada. La gestión térmica se simplifica gracias a la reducción de las pérdidas de conmutación, aunque los diseñadores deben mitigar las pérdidas parásitas del transformador y garantizar un control robusto en condiciones de carga ligera en las que se puede perder el ZVS. Para solucionar esto, se implementan con frecuencia esquemas de control digital y estrategias de modulación de frecuencia adaptativa, lo que mejora la respuesta transitoria y amplía la región ZVS [73].

2.4.5 Convertidor medio puente

La topología de medio puente (Figura 15) se utiliza ampliamente en convertidores resonantes aislados de potencia media, especialmente en cargadores a bordo para vehículos eléctricos e híbridos enchufables. Este convertidor consta de dos interruptores en serie, cuyo punto medio está conectado a un circuito resonante que suele estar formado por un inductor magnetizante, un inductor en serie y un condensador. Este tanque está conectado a un transformador de aislamiento que ajusta el nivel de voltaje a la batería [72]. El convertidor de medio puente se optimiza aún más mediante el uso de material de carburo de silicio, que puede aliviar la sobresaturación de la corriente de pulso, ya que el modelado de los componentes semiconductores es mejor debido a sus características [74].

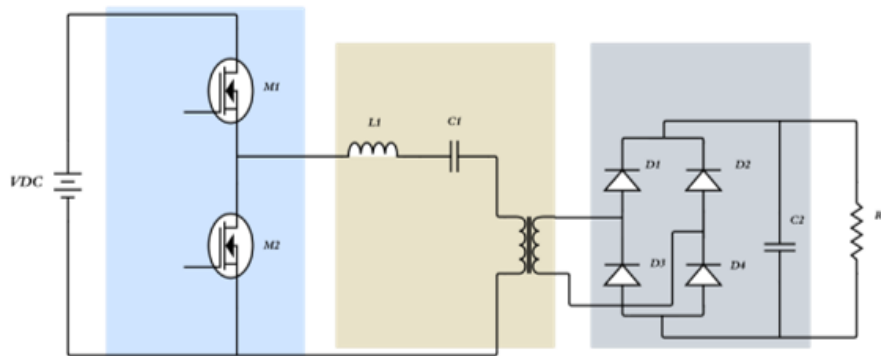


Figura 15 Convertidor medio puente

Con la integración de semiconductores de banda ancha, se pueden alcanzar frecuencias de conmutación entre 100 y 300 kHz, lo que permite una alta densidad de potencia y magnetismo compacto.

Los valores de eficiencia suelen superar el 95 % en los prototipos experimentales de OBC, y los diseños optimizados alcanzan el 96-97 %. Las desventajas incluyen una capacidad de potencia de salida limitada en comparación con las estructuras de puente completo, ya que solo la mitad de la tensión del enlace de CC se utiliza efectivamente en el transformador. Además, es necesario un diseño cuidadoso de los condensadores del enlace de CC y los mecanismos de equilibrio para evitar la deriva de la tensión en el punto medio. A pesar de estas limitaciones, los convertidores de medio puente siguen siendo atractivos para diseños compactos en los que el costo, la reducción de la tensión del dispositivo y el rendimiento EMI son fundamentales [75]. Esta topología también minimiza el ruido electromagnético, mejora la vida útil de los componentes y permite diseños más compactos y ligeros, lo cual es clave en aplicaciones integradas.

2.4.6 Convertidor de puente completo

Se trata de una versión ampliada para aplicaciones de mayor potencia, como estaciones de carga rápida de más de 20 kW, que incluso alcanza configuraciones superiores a 150 kW en sistemas trifásicos. En este diseño, cuatro interruptores forman un puente en H que alimenta simétricamente el tanque resonante y el transformador, generando una señal alterna con mayor amplitud y simetría, lo que mejora el control de la potencia y la transferencia de energía [76].

Al igual que el medio puente, funciona con modulación de frecuencia variable, pero tiene la ventaja adicional de ser compatible con la modulación por desplazamiento de fase. Esta técnica amplía el rango ZVS, especialmente en condiciones de carga parcial, lo que reduce aún más las pérdidas de energía [77]. Además, permite una mayor granularidad en el control de la potencia suministrada, lo que es esencial para satisfacer los requisitos rápidamente cambiantes de múltiples tipos de baterías. Gracias a su alta eficiencia, que supera el 95 %, esta topología se ha convertido en una de las más fiables para las modernas estaciones de carga rápida de vehículos eléctricos.

En la actualidad, el proceso de implementación sigue sin estar claro y solo se dispone de una evaluación comparativa de determinadas topologías, con la ambigüedad adicional que introduce la existencia de un prototipo funcional del dispositivo. Los parámetros de diseño típicos incluyen frecuencias de conmutación en el rango de 50-200 kHz para módulos de alta potencia, con MOSFET de SiC que permiten el funcionamiento hacia el extremo superior de este espectro. Las eficiencias reportadas superan el 95 %, y las implementaciones de última generación alcanzan el 96-98 % en las estaciones de carga rápida comerciales. Las desventajas incluyen corrientes circulantes más altas cuando se opera lejos de la resonancia y una mayor complejidad en la gestión térmica [78]. Sin embargo, las ventajas de la alta escalabilidad, la eficiencia y el control robusto hacen que el convertidor de puente completo sea la topología dominante para la conversión CC/CC aislada de alta potencia en las modernas estaciones de carga rápida de vehículos eléctricos (Figura 16) [79].

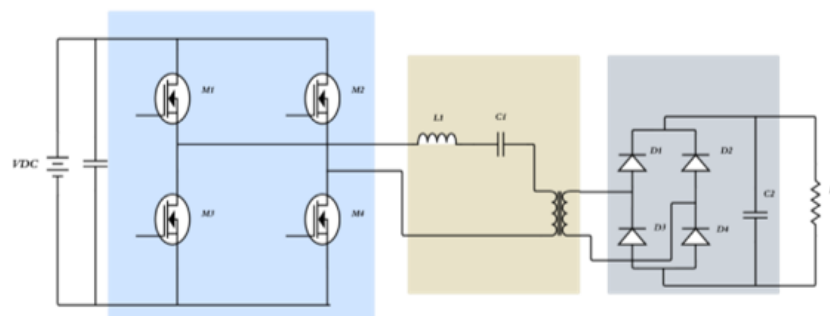


Figura 16 Convertidor puente completo

2.4.7 Convertidor multinivel

Los convertidores multinivel (Figura 17) se han convertido en una alternativa atractiva en aplicaciones de carga rápida para vehículos eléctricos, ya que permiten funcionar a altos voltajes y niveles de potencia significativos, al tiempo que mantienen una alta eficiencia y reducen la tensión eléctrica en los semiconductores. Como es bien sabido y como se ha destacado en la descripción de los convertidores anteriormente mencionados, los semiconductores necesarios para alcanzar etapas de carga rápida con potencias nominales de alrededor de 50 kW requieren dispositivos especializados, ya que los MOSFET convencionales no soportarían los picos de corriente causados por la conmutación. A diferencia de los convertidores convencionales de dos niveles, las arquitecturas multinivel dividen la tensión del enlace de CC en múltiples niveles intermedios, lo que reduce la tensión de bloqueo de cada interruptor y, en consecuencia, las pérdidas de conmutación y conducción. Estas características permiten el uso de dispositivos de menor tensión con un rendimiento dinámico mejorado y menores requisitos de refrigeración, al tiempo que permiten el diseño de filtros más compactos debido a la mayor frecuencia efectiva de los armónicos de conmutación [80].

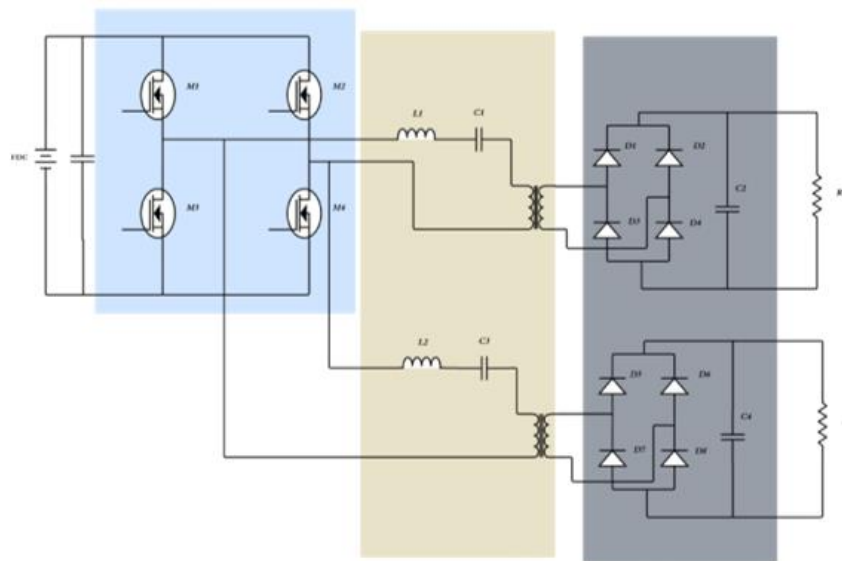


Figura 17 Convertidor multinivel

Al mismo tiempo, estos convertidores se han convertido en una solución consolidada en aplicaciones de alta potencia, ya que permiten combinar diferentes topologías en configuraciones que distribuyen las demandas eléctricas entre múltiples etapas de conversión, normalmente dispuestas en paralelo o en funcionamiento modular. Este enfoque reduce la tensión en cada semiconductor, mejora la distribución de las pérdidas y facilita el uso de filtros más compactos. Una estrategia clave en estas arquitecturas es el uso de modos de funcionamiento que garanticen el equilibrio natural de las tensiones en los buses de enlace de CC, eliminando así la necesidad de circuitos adicionales o

bucles de control complejos para igualar los condensadores intermedios. De esta manera, se supera una de las principales limitaciones históricas de las topologías multinivel, ofreciendo un control más sencillo, una mayor robustez y una mayor eficiencia en los sistemas de conversión de energía a gran escala [\[81\]](#).

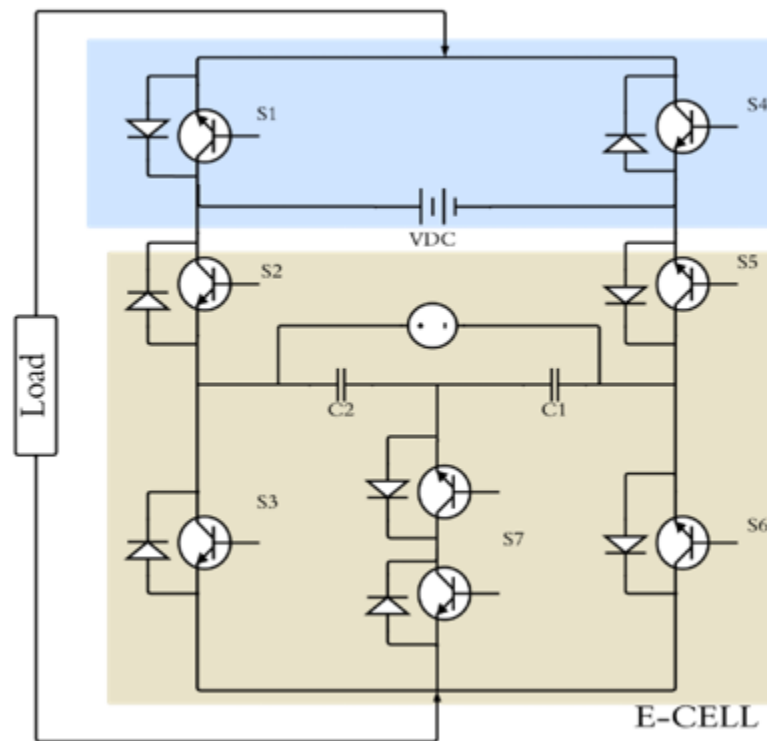


Figura 18 Convertidor PEC

Los avances recientes han ido más allá de las topologías tradicionales de punto neutro fijo y condensador volante. Un avance notable es la topología del convertidor PEC (Figura 18), que combina modularidad, escalabilidad y capacidades mejoradas de equilibrio de voltaje. Esta arquitectura integra múltiples E-Cells en una disposición compacta, lo que permite el funcionamiento a niveles de voltaje medio y alto con una eficiencia mejorada y un control simplificado. A diferencia de los convertidores multinivel modulares convencionales, la estructura PEC equilibra de forma natural los voltajes de los condensadores y reduce el número de componentes pasivos voluminosos, lo que disminuye el volumen y el costo del sistema. Además, su compatibilidad con estrategias de control digital avanzadas, como las técnicas de modulación adaptativa y predictiva de modelos, la hace muy adecuada para aplicaciones de alta potencia, incluida la carga rápida de vehículos eléctricos [\[82\]](#).

Capítulo 2. Estado del arte

Un principio general de funcionamiento de los convertidores multinivel puede expresarse mediante la ecuación de estado que rige la corriente del inductor en términos de los estados de conmutación aplicados.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{cd}m(t) - V_o(t)$$

donde L es la inductancia del elemento almacenador de energía, V_{cd} es el voltaje total del enlace de CD, $m(t)$ es la función de modulación que determina el nivel de voltaje instantáneo aplicado por la estructura multinivel y $v_o(t)$ es el voltaje de salida a través de la carga. Esta ecuación destaca cómo los convertidores multinivel regulan la transferencia de energía distribuyendo el voltaje del enlace de CD a través de múltiples niveles intermedios. Como resultado, cada dispositivo semiconductor experimenta una reducción de la tensión, se minimizan las pérdidas de conmutación y conducción, y se aumenta la frecuencia de conmutación efectiva, lo que conduce a una mayor eficiencia, requisitos de filtrado simplificados y un rendimiento dinámico mejorado en aplicaciones de carga rápida.

2.5 Resultados

Hoy en día, los dispositivos de carga rápida para vehículos eléctricos se consideran nuevas tecnologías que aún se encuentran en fase de mejora. Actualmente, existen diferentes variantes de dispositivos. A continuación, se muestra una tabla comparativa de las características que comparten los distintos tipos de dispositivos de carga.

La ausencia de criterios estandarizados para evaluar e informar sobre las tecnologías de carga rápida. Para subsanar esta carencia, será necesario desarrollar marcos de referencia claros que permitan realizar comparaciones coherentes y significativas entre los diseños emergentes y los productos ya establecidos. Es alentador que ambos sectores avancen en la misma dirección, hacia sistemas más compactos, eficientes y potentes, gracias en parte al uso creciente de semiconductores de banda ancha como el SiC y el GaN y a la adopción de topologías de alto rendimiento como el convertidor resonante de puente completo. La tabla 6 ofrece un análisis comparativo de los diseños de convertidores de potencia utilizados en la carga de vehículos eléctricos propuestos en la bibliografía.

Capítulo 2. Estado del arte

Tabla 6 Análisis comparativo de diseño de cargadores rápidos planteados en la literatura

Ref.	Año	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (kW)	Eficiencia (%)	Arquitectura	Protocolo	Diseño
[83]	2013	390	66	25	95	HPFC	-	Prototipo
[84]	2014	320	6.28	2.1	92	FBD	-	Simulación
[85]	2017	220	13.5	3	93.1	PFC	Plug in	Prototipo
[86]	2017	380	132	50	94	-	CHAdEMO	Prototipo
[87]	2018	700	22	15	96	spo2LB6		Prototipo
[88]	2018	277	-	80	-	G2V	J2894	Simulación
[89]	2018	400	150	-	90	LLC	-	Prototipo
[90]	2019	200	20	4	94	SST	CCS	Prototipo
[91]	2019	500	300	150	-	P2P	-	Simulación
[92]	2019	800	6	4.6	-	PFC	CHAdEMO	Simulación
[93]	2019	310	30	1.5	96.4	LLC	-	Prototipo
[92]	2019	800	24	3.6		PFC	-	Simulación
[56]	2019	100	-	15	-	Boost	-	Prototipo
[94]	2020	48	12	1.5	90	Buck	-	Prototipo
[95]	2020	400	-	3.6	95	LLC	-	Simulación
[96]	2020	400	12.5	15	94	Buck	-	Simulación
[97]	2021	240	18.8	4.5	98.6	2LB6	CCS	Prototipo
[56]	2021	400	-	5	-	2LB6	CCS	Prototipo
[98]	2021	230	14	3	80	-	Plug in	Prototipo
[99]	2021	220	27	6	-	G2V	-	-
[100]	2023	230	16	3.6	-	V2H	-	-

Al analizar los datos presentados en la tabla, se pueden hacer varias observaciones clave. En términos de desarrollo de topología, existe una clara tendencia entre los autores hacia las topologías multinivel, principalmente porque pueden manejar variables eléctricas altas de manera más eficiente, lo que las hace particularmente adecuadas para aplicaciones de carga rápida y ultrarrápida. Por ejemplo, topologías como 2LB6 demuestran un excelente rendimiento, con eficiencias que superan constantemente el 96 %. Por el contrario, las topologías más simples, como los convertidores LLC o buck, se enfrentan a importantes limitaciones para alcanzar altos niveles de potencia. Aunque pueden ser más fáciles de implementar, su capacidad de potencia suele ser limitada, ya que los convertidores buck suelen alcanzar solo alrededor de 1,5 kW. Como resultado, son menos favorables para el desarrollo de convertidores de potencia destinados a la

recarga de vehículos eléctricos, especialmente en el contexto de aplicaciones de alta potencia.

Al revisar la bibliografía, se pueden observar numerosos prototipos propuestos por los usuarios, debido a que hace años existía la necesidad de trabajar con la eficiencia energética en el campo de la recarga de vehículos eléctricos. Existen múltiples artículos que describen los procesos y detallan las variables eléctricas de los mismos diseños, estableciendo la importancia de utilizar topologías multinivel asociadas a los convertidores de potencia utilizados en el diseño de estaciones de carga, donde el objetivo principal es encontrar un equilibrio entre la robustez de los componentes y las características de uso estables. Es importante aclarar que, en la búsqueda de información y los diseños propuestos en los artículos, existe un sesgo significativo en la información, que se evidencia claramente en la elaboración de la tabla.

2.6 Conclusiones

Un análisis comparativo de las soluciones comerciales de carga rápida y los sistemas prototipo que se están investigando actualmente en el ámbito académico revela diferencias notables tanto en las características técnicas como en la madurez del desarrollo. Los cargadores comerciales actuales suelen presentar especificaciones bien establecidas, como el voltaje de salida, la corriente nominal, la potencia suministrada y la eficiencia, y la mayoría superan el 90 % de eficiencia. Esto refleja un alto nivel de perfeccionamiento tecnológico y el cumplimiento de las normas industriales.

Por otro lado, muchos de los prototipos que se encuentran en la bibliografía presentan innovaciones prometedoras en arquitectura y diseño, como convertidores resonantes LLC, topologías bidireccionales buck-boost, transformadores de estado sólido y otras configuraciones avanzadas. Sin embargo, estos sistemas experimentales suelen carecer de datos técnicos detallados. A menudo se omiten o se informan de forma imprecisa parámetros clave como los protocolos de comunicación, las potencias nominales y las cifras de eficiencia, lo que dificulta su comparación directa con los sistemas comercializados.

Para salvar esta brecha, los futuros trabajos académicos deberían adoptar prácticas de información estandarizadas en consonancia con las utilizadas en el sector comercial. Como mínimo, los prototipos deberían incluir de forma sistemática especificaciones como la potencia nominal, la eficiencia en diferentes condiciones de carga, los rangos de tensión y corriente admitidos y la compatibilidad de los protocolos de comunicación. La divulgación clara de estos parámetros permitiría realizar comparativas significativas entre diferentes diseños y facilitaría una evaluación más objetiva de su potencial de comercialización. El establecimiento de estas normas en los informes académicos no solo mejorará la comparabilidad de los resultados de la investigación, sino que también

acelerará la transferencia de topologías innovadoras, como las arquitecturas resonantes, bidireccionales o multinivel, a la práctica industrial.

2.6.1 Síntesis

Esta tesis adopta una perspectiva descriptiva y técnica para examinar el montaje y el funcionamiento de diferentes topologías de carga rápida, con especial énfasis en los diseños en cascada y bidireccionales.

Una revisión de las revistas científicas revela un sesgo en la información dependiendo de los autores y las publicaciones. Esto se debe en gran medida a la falta de estandarización general en la forma de documentar los diseños de circuitos, concretamente en lo que se refiere al nivel de detalle proporcionado. Desde una perspectiva estructurada, al presentar los resultados, los autores deben informar de todas las variables que puede generar un convertidor de potencia. Sin embargo, en la actualidad, muchos se centran únicamente en las variables de salida y destacan las métricas de eficiencia sin explicar cómo se desarrolla y funciona el convertidor en sus múltiples etapas.

Nuestro objetivo es apoyar el avance de una infraestructura de carga inteligente, escalable y energéticamente eficiente que pueda seguir el ritmo de la acelerada adopción de los vehículos eléctricos. Aunque la eficiencia energética ha mejorado significativamente y ya no es la principal barrera, siguen existiendo retos críticos, en particular la disponibilidad limitada de estaciones de carga y la necesidad de una integración perfecta con la red eléctrica. Abordar estas cuestiones es esencial para garantizar el crecimiento sostenible de la electromovilidad. Aunque ya existen varias soluciones comerciales de carga rápida, su despliegue a gran escala y su accesibilidad siguen estando limitados, lo que subraya la importancia de coordinar los esfuerzos en materia de planificación de infraestructuras, normalización y compatibilidad con la red eléctrica.

Capítulo 3. Diseño del convertidor CD-CD.

Como criterio de cumplimiento del factor de potencia en la infraestructura de recarga, se trabajará en un convertidor de potencia CD-CD, el cual sea capaz de ajustar los parámetros de salida a condiciones estipuladas por normas de seguridad preestablecidas para carga rápida, como se analizó anteriormente, implementaremos el modelo de un cargador rápido planteado por Matlab Simulink.

El diseño del convertidor por el cual se va a optar es un convertidor de potencia resonante en arreglo LLC ya que esta clase de convertidores se caracterizan por el bajo porcentaje de pérdidas debido a su modo de conmutación en alta frecuencia [78], cabe aclarar que este tipo de convertidores se emplean actualmente en aplicaciones de potencia baja, debido a la alta frecuencia del tanque resonante. Implementaremos el convertidor resonante mediante el uso de un inversor clase D [72], el tanque resonante con transformador, por último, un rectificador de puente completo [101].

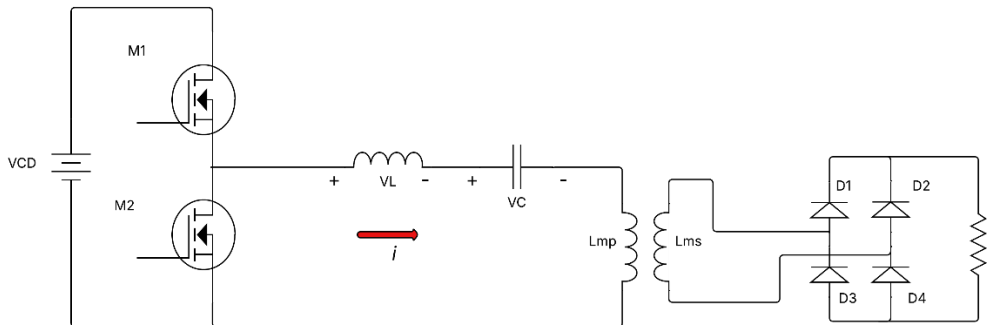


Figura 19 Convertidor LLC

El circuito lleva a cabo una conversión eficiente de CD a través de un tanque resonante y un rectificador. La etapa inicial se refiere al convertidor clase D, que está formado por MOSFETs, los cuales producen una señal de onda cuadrada a partir de la entrada en CD. Los MOSFETs, se manejan de manera alterna para invertir la polaridad de la señal, acondicionándola para las fases siguientes.

La segunda fase es el tanque resonante, compuesto por un capacitor resonante y los inductores, junto con un transformador que ajusta el nivel de voltaje para la parte secundaria del circuito. Este tanque funciona a una frecuencia particular, que se modifica para alinearse con la frecuencia de resonancia. En la operación resonante, se produce una señal sinusoidal o casi sinusoidal, lo que disminuye las pérdidas de energía y optimiza la eficiencia total del convertidor, el puente de diodos transforma la señal alterna salida del tanque resonante otra vez en corriente continua. Los diodos alternan su

Capítulo 3. Diseño del convertidor CD-CD.

conducción según la polaridad de la señal, mientras que el capacitor de salida (C_o) filtra la tensión, suavizándola para proporcionar una salida estable y apropiada para alimentar equipos [102].

Cuando la frecuencia de conmutación es menor que la frecuencia de resonancia, la impedancia del circuito adopta un comportamiento capacitivo, lo que resulta en conmutación con corriente cero [103]. En este caso, el semiconductor realiza la transición cuando la corriente es nula durante la apertura del diodo; esto genera un fenómeno de recuperación inversa en los diodos antiparalelos al cerrarse, lo que provoca pérdidas significativas en el convertidor. Cuando la frecuencia de conmutación supera la frecuencia de resonancia, la impedancia del circuito se comporta como un elemento inductivo, lo que permite conmutar con voltaje cero. En esta situación, la transición del semiconductor ocurre cuando la tensión es nula o muy cercana a cero, reduciendo significativamente las pérdidas de energía en el sistema [104].

El circuito equivalente suele comportarse como fuente de voltaje o fuente de corriente, todo depende de la relación entre la reactancia magnetizante y la resistencia equivalente del circuito simplificado, si la resistencia equivalente es más grande que la reactancia magnetizante, el sistema predomina con los valores de X_{Lmp} , haciendo que el sistema se comporte como una fuente de voltaje.

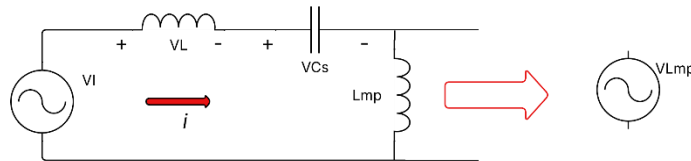


Figura 20 comportamiento del circuito como fuente de voltaje

En caso inverso, si la reactancia magnetizante es mayor, el sistema se comportará como una fuente de corriente, y como tal queremos que el tanque se comporte como fuente de voltaje para el ahorro de componentes.

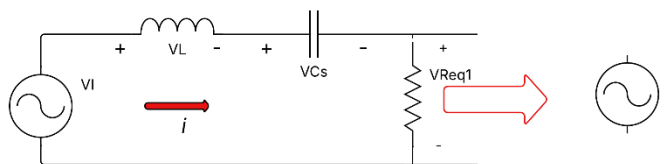


Figura 21 Comportamiento del circuito como fuente de corriente

Capítulo 3. Diseño del convertidor CD-CD.

Para simplificar el diseño del circuito, se recomienda emplear un rectificador que no incluya elementos inductivos; el tanque resonante debe operar como una fuente de corriente para garantizar compatibilidad entre las etapas del sistema. Esto optimiza el comportamiento del convertidor al eliminar elementos que puedan introducir complejidad adicional, como el almacenamiento magnético, mientras se asegura una transferencia eficiente de energía.

3.1 Parámetros iniciales del convertidor

Se consideran los siguientes parámetros iniciales para el diseño del convertidor, según las normas mexicanas, las cuales mencionan que los valores de salida se establecen como mínimos 400 voltios y 50 kW [105]. Al trabajar con convertidores resonantes, los parámetros de frecuencia de conmutación mínima son 100 kHz y considerando que estamos agregando el diseño del convertidor a un dispositivo funcional, consideraremos ese voltaje de entrada. En la tabla 7 se muestran los valores a los que programaremos el diseño del dispositivo.

Tabla 7 Parámetros iniciales del convertidor CD-CD

Especificaciones técnicas del convertidor de potencia	
Condición de resonancia	$w = w_0$
Voltaje de alimentación (V)	800
Voltaje de salida (V)	450
Frecuencia (kHz)	500
Factor de Calidad (Q)	5
Relación de impedancias (a)	10
Voltaje de conducción directa de diodos (V)	1.5

3.2 Cálculo del convertidor

Al trabajar con convertidores resonantes es importante tener en cuenta dos conceptos principales, frecuencia de conmutación (w_0), la cual se estipula mediante el trabajo de los MOSFETS empleados en el convertidor y nos dice que tan seguido hará la conmutación y frecuencia de resonancia (w) [106], esta nos indica la frecuencia que se establece en el tanque resonante entre el inductor y capacitor de este mismo, para hacer posible el funcionamiento del convertidor y trabajar con el modo de conmutación suave estas frecuencias tienen que ser iguales estableciendo la primer condición de resonancia, al cumplir esta condición la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva se

Capítulo 3. Diseño del convertidor CD-CD.

contrarrestan estableciendo que la impedancia del circuito en torno al tanque resonante se comporta como una carga resistiva [107].

$$\omega = \omega_0 \quad (1)$$

Ecuación 1 Frecuencia de conmutación

Para el cálculo de la componente fundamental de la fuente de alimentación (V₁), establecemos el voltaje eficaz en una componente de bus de CD la cual estará estipulada como el voltaje de entrada (VCD), esta misma componente nos va a ayudar a establecer los valores de alimentación que estarán incidiendo en los MOSFETS.

$$V_1 = \frac{2 \cdot VCD}{\pi} \quad V_1 = \frac{2 \cdot 800}{\pi} = 509.29 \text{ V} \quad (2)$$

Ecuación 2 Componente fundamental de alimentación

La ganancia del sistema se categorizará en dos distintos puntos, la ganancia del tanque resonante (M) y la ganancia del sistema completo (Mt), esto se establece debido a que como en nuestro sistema establecimos una salida de voltaje de 450 volts el convertidor (V_R), esto quiere decir que el convertidor debe funcionar como reductor, reduciendo los 800 volts a 450, lo que establece que debemos tener un sistema con una ganancia superior a 0.5, se debe aclarar que la relación de impedancias (a), debe ser estipulada a 10, esto debido a la ganancia del tanque, que se busca que sea alrededor de 1.

$$Q_{\min} = \sqrt{M^2 - 1} \quad a \quad Q_{\min} = \sqrt{\frac{1.004987^2}{10} - 1} = 0.09999 \quad Q = 5 \quad (3)$$

Ecuación 4 Ganancia del tanque

$$Mt = \frac{V_R}{VCD} \quad Mt = \frac{450 \text{ V}}{800 \text{ V}} = 0.56 \quad (4)$$

Ecuación 3 Ganancia del sistema

Para establecer el factor de calidad (Q), la condición de resonancia establece que el factor de calidad debe ser mucho más grande que el factor de calidad mínimo (Q_{min}), dado que el factor de calidad debe ser considerablemente más grande que el factor de calidad mínimo, se calcula este mismo, se propone un factor de calidad del sistema de 5 para asegurar el funcionamiento del convertidor resonante a alta frecuencia y alta potencia [108].

$$Q_{\min} = \sqrt{M^2 - 1} \quad Q_{\min} = \sqrt{\frac{1.004987^2}{10} - 1} = 0.09999 \quad Q = 5 \quad (5)$$

Ecuación 5 Factor de calidad

Capítulo 3. Diseño del convertidor CD-CD.

Obteniendo estos valores, recordemos que en este diseño del convertidor se establece que se puede implementar el uso de un transformador para asegurar lo establecido en los parámetros que se van a implementar, este mismo transformador nos va a ayudar a acotar los valores de voltaje a 450 para posteriormente pasar a la etapa de rectificado con los diodos en arreglo de puente completo. Se plantea la relación de vueltas que debe tener el sistema para alcanzar las variables de la salida [\[109\]](#).

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{2 \cdot M_t}{M} \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{(2)(0.5625)}{1.004987} = 1.119417 \quad (6)$$

Ecuación 6 Relación de vueltas

El cálculo de la resistencia de carga se plantea mediante la relación del voltaje de salida y la potencia estipulada por la siguiente formula.

$$R = \frac{V_R^2}{P} \quad R = \frac{450^2}{50 \text{ kW}} = 4.05 \Omega \quad (7)$$

Ecuación 7 Resistencia en la carga

Para el análisis de la eficiencia del rectificador (η), se plantea el uso de dispositivos reales, por lo que se consideran las pérdidas inherentes a su operación. El estudio se centra específicamente en el rectificador, estableciendo un voltaje directo de conducción (V_f) de 1.5 V. Este valor se define en función del tipo de semiconductor seleccionado, el cual responde a los requerimientos de potencia previamente establecidos.

$$\eta_r = \frac{V_R}{2V_f + V_R} \quad \eta = \frac{450 \text{ V}}{(2)(1.5 \text{ V}) + 450 \text{ V}} = 0.993377 \quad (8)$$

Ecuación 8 Eficiencia del rectificador

Es importante mencionar que para el análisis en torno a las variables eléctricas en el circuito se debe calcular una resistencia equivalente o resistencia reflejada la cual va a cumplir la función de simular una carga en torno al rectificador y la resistencia de carga la cual estará reflejada en el tanque resonante LLC como modo de resumen separada en dos vertientes, la resistencia reflejada en el rectificador (R_{eq}) y la resistencia reflejada en el inductor (R_{eq1}) [\[109\]](#).

$$R_{eq} = \frac{8 \eta_r}{\pi^2} \cdot R \quad R_{eq} = \frac{(8)(0.993377)}{\pi^2} \cdot 4.05 \Omega = 3.2610 \Omega \quad (9)$$

Ecuación 9 Resistencia reflejada en el rectificador

Capítulo 3. Diseño del convertidor CD-CD.

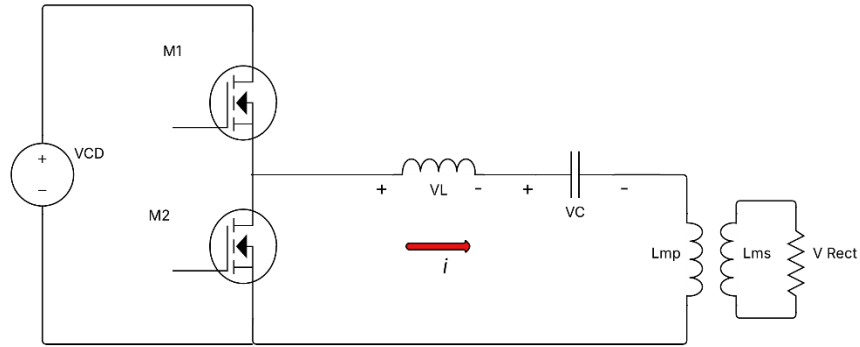


Figura 23 Circuito equivalente convertidor resonante LLC (Req)

$$R_{eq1} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \cdot R_{eq} \quad (10)$$

$$R_{eq1} = (0.893322)^2 \cdot 3.2610 \, \Omega = 2.6023 \, \Omega$$

Ecuación 10 Resistencia reflejada en el inductor

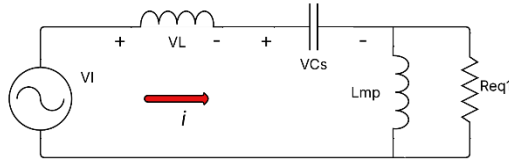


Figura 22 Circuito equivalente convertidor resonante LLC (Req1)

Al trabajar con un transformador, es fundamental considerar la reactancia del sistema (X_{lmp}) y la inductancia magnetizante (L_{mp}). La reactancia del sistema es la oposición de los elementos inductivos y capacitivos al flujo de corriente alterna y está relacionada con la frecuencia de operación y la inductancia presente en el circuito [110]. Una reactancia elevada puede generar caídas de voltaje y afectar la eficiencia del transformador.

$$X_{lmp} = \frac{R_{eq1}}{\sqrt{M^2 - 1}} \quad X_{lmp} = \frac{2.6023 \, \Omega}{0.09999} = 26.0256 \, \Omega \quad (11)$$

Ecuación 11 Reactancia del sistema

Capítulo 3. Diseño del convertidor CD-CD.

Por otro lado, la inductancia magnetizante mide la capacidad del núcleo para almacenar energía en forma de campo magnético y depende del número de vueltas del devanado primario y la reluctancia del núcleo. Una inductancia magnetizante adecuada garantiza que el transformador funcione de manera eficiente sin pérdidas excesivas ni saturación del núcleo, lo que es clave en aplicaciones de potencia y conversión de energía [111].

$$L_{mp} = \frac{X_{lmp}}{w} \quad L_{mp} = \frac{26.0256}{(2 \pi \cdot 500000)} = 8.2842 \mu H \quad (12)$$

Ecuación 12 Inductancia magnetizante

La reactancia equivalente vista a la entrada del transformador (X_{lse}), calculada bajo el supuesto de régimen permanente lineal, este valor modela la inductancia que el tanque resonante presenta al transformador (L_{se}), condicionando el flujo de corriente y el comportamiento dinámico del sistema.

$$X_{lse} = \frac{jX_{lmp}R_{eq1}^2}{R_{eq1}^2 + X_{lmp}^2} \quad (13)$$
$$X_{lse} = \frac{(j)(26.0256)(2.6023 \Omega)^2}{(2.6023 \Omega)^2 + (26.0256)^2} = 0.2576$$

Ecuación 13 Reactancia equivalente reflejada en el transformador

$$L_{se} = \frac{X_{lse}}{w} \quad L_{se} = \frac{0.2576}{(2 \pi \cdot 500000)} = 81.9966 n H \quad (14)$$

Ecuación 14 Inductancia equivalente en el transformador

La resistencia reflejada en el tanque resonante (R_{se}) determina cómo la carga afecta la dinámica del circuito resonante. Esta resistencia, vista desde el embobinado primario del transformador, es el resultado de la carga del embobinado secundario reflejada a través de la relación de transformación del devanado [91].

$$R_{se} = \frac{X_{lmp}^2 R_{eq1}}{R_{eq1}^2 + X_{lmp}^2}$$
$$R_{se} = \frac{(26.0256^2)(2.6023 \Omega)}{2.6023 \Omega^2 + 26.0256^2} = 2.5765 \Omega$$

Ecuación 15 Resistencia reflejada en el tanque

(15)

Capítulo 3. Diseño del convertidor CD-CD.

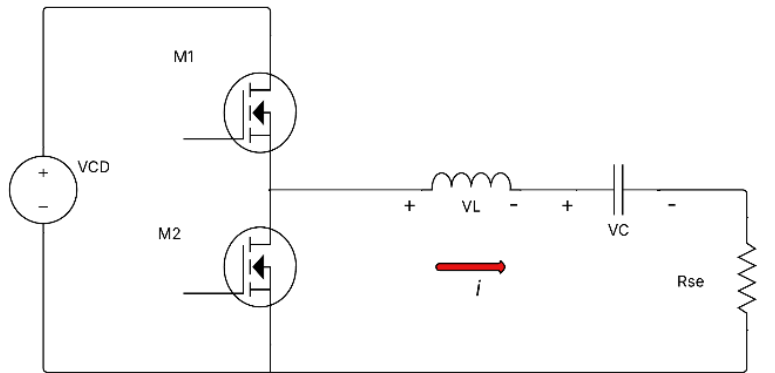


Figura 24 Circuito equivalente convertidor resonante LLC (R_{se})

Si el valor de esta resistencia es demasiado alto, el sistema puede operar en condiciones de baja transferencia de potencia, reduciendo la eficiencia y limitando la capacidad de mantener una regulación estable. A su vez, si la resistencia reflejada es demasiado baja, el tanque resonante puede experimentar un exceso de corriente, lo que puede aumentar las pérdidas en los componentes y comprometer la estabilidad del sistema para así permitir el cálculo y obtener la impedancia inductiva y capacitiva necesarias para lograr la resonancia [112].

A partir de la condición de diseño del tanque resonante, se establece la igualdad entre la reactancia inductiva del inductor resonante X_{lr} y la reactancia capacitiva del capacitor resonante X_{cs} , garantizando así la operación en resonancia. Dicha reactancia capacitiva se expresa como el producto del factor de calidad Q y la resistencia equivalente del sistema R_{se} , obteniéndose $X_{cs} = Q \cdot R_{se}$.

Posteriormente, se considera el efecto de la reactancia de dispersión del transformador X_{lse} , la cual se resta de la reactancia inductiva principal, resultando en la expresión:

$$X_{lr} = X_{cs} = QR_{se} = (5)(2.5765 \Omega) = 12.8826$$

(16)

$$X_l = X_{lr} - X_{lse} \quad X_l = 12.8826 - 0.2576 = 12.6250$$

Ecuación 16 Reactancia en el tanque

Mediante el cálculo de la inductancia (L) y la capacitancia (C_s), se establece la base para la implementación de los componentes físicos que conformarán el tanque resonante, determinando sus propiedades de operación y eficiencia energética. Estos cálculos no solo fijan la frecuencia de resonancia del sistema, sino que también influyen en aspectos como la estabilidad de la transferencia de energía, la reducción de pérdidas y la

Capítulo 3. Diseño del convertidor CD-CD.

respuesta dinámica ante variaciones de carga. Al definir los valores de L y Cs, se busca optimizar la relación entre la corriente y el voltaje, permitiendo una conmutación eficiente y minimizando efectos no deseados como la generación de armónicos o la sobreexcitación del transformador [113].

$$C_s = \frac{1}{X_{cs} \cdot \omega} \quad C_s = \frac{1}{12.8826 \cdot 2 \pi \cdot 500000} = 24.7085 \text{ nF} \quad (17)$$

Ecuación 17 Capacitor resonante

$$L = \frac{X_l}{\omega} \quad L = \frac{12.6250}{(2 \pi \cdot 500000)} = 4.0186 \mu H \quad (18)$$

Ecuación 18 Cálculo de inductor

Derivando una inductancia total del sistema equivalente.

$$L_{ms} = L_{mp} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (19)$$

$$L_{ms} = 8.2842 \mu H \cdot (1.119417)^2 = 10.3808 \mu H$$

Ecuación 19 Inductancia total del sistema

Por último, se obtienen los valores de corriente del tanque resonante, que reflejan el comportamiento eléctrico del sistema y su capacidad de transferencia de energía. A partir de estos valores establecidos, es posible identificar cómo la carga afecta la circulación de corriente en el circuito resonante, especialmente en relación con la impedancia y la respuesta dinámica de los componentes. Al realizar esta evaluación, observamos que los valores obtenidos pueden ser significativamente altos, lo que implica la necesidad de considerar factores como la eficiencia de conversión, la disipación térmica y la estabilidad del sistema [114].

$$I_p = \frac{V_1}{R_{se}} \quad (20)$$

$$I_p = \frac{509.29}{2.5857 \Omega} = 196.9640 A$$

Ecuación 20 corriente reflejada en el tanque

Capítulo 3. Diseño del convertidor CD-CD.

Para el dimensionamiento del capacitor de filtrado C_f , se parte del criterio de que su valor debe ser significativamente mayor al cociente entre la constante de diseño y el rizado de voltaje permitido en la salida, con el objetivo de garantizar una adecuada atenuación de las componentes de alta frecuencia. Considerando un rizado máximo admisible del 4.05 %, una frecuencia de conmutación de 500 kHz y un factor de diseño de 5, se obtiene un valor mínimo requerido para el capacitor de filtrado de 1.03 μF . Este valor asegura una reducción efectiva del rizado de voltaje en la salida del convertidor, contribuyendo a la estabilidad del sistema y al correcto desempeño del cargador bajo las condiciones nominales de operación.

$$C_f \gg \frac{10.52}{\%v_{rf}R} \quad C_f \gg \frac{10.52}{(5)(500000)(4.05)} = 1.03 \mu F \quad (21)$$

Ecuación 21 Capacitor de filtrado

El diseño se plantea mediante especificaciones técnicas basada en hoja de datos en donde se implementa un convertidor resonante en altas potencias

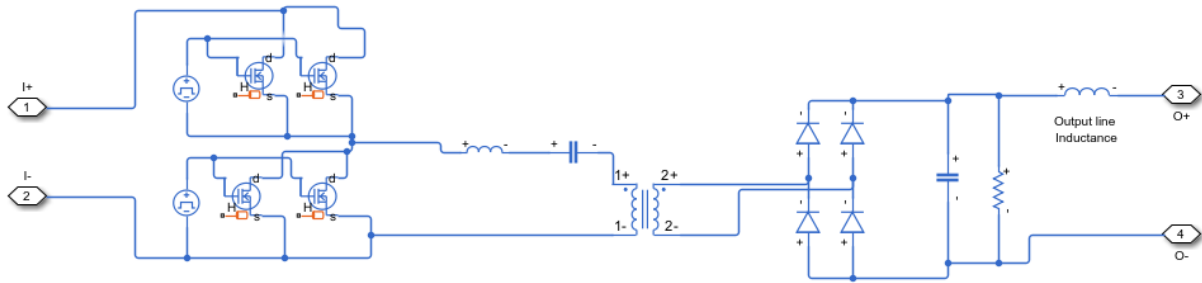


Figura 25 Convertidor resonante LLC

Este convertidor consta de dos pares de interruptores en paralelo, cuyo punto medio está conectado a un circuito resonante que suele estar formado por un inductor magnetizante, un inductor en serie y un condensador (Figura 25). Este tanque está conectado a un transformador de aislamiento que ajusta el nivel de voltaje a la batería. El convertidor de medio puente se optimiza aún más mediante el uso de material de carburo de silicio, que puede aliviar la sobresaturación de la corriente de pulso, ya que el modelado de los componentes semiconductores es mejor debido a sus características.

Con la integración de semiconductores de banda ancha, se pueden alcanzar frecuencias de conmutación entre 100 kHz y 1 MHz, lo que permite una alta densidad de potencia y magnetismo compacto.

Capítulo 3. Diseño del convertidor CD-CD.

Los valores de eficiencia suelen superar el 90 % en los prototipos experimentales de OBC, y los diseños optimizados alcanzan el 90-95 %. Las desventajas incluyen una capacidad de potencia de salida limitada en comparación con las estructuras de puente completo, ya que solo la mitad de la tensión del enlace de CD se utiliza efectivamente en el transformador. Además, es necesario un diseño cuidadoso de los condensadores del enlace de CD y de los mecanismos de equilibrio para evitar la deriva de la tensión en el punto medio. A pesar de estas limitaciones, los convertidores de medio puente siguen siendo atractivos para diseños compactos en los que el costo, la reducción de la tensión del dispositivo y el rendimiento EMI son fundamentales. Esta topología también minimiza el ruido electromagnético, mejora la vida útil de los componentes y permite diseños más compactos y ligeros, lo cual es clave en aplicaciones integradas.

Existen dos puntos a considerar en este MOSFET, es complicado encontrar una relación en torno a corriente de drenaje alta y voltaje de drenaje alto, en una relación de equilibrio, entre voltaje alto y corriente alta se optó por seleccionar este dispositivo.

Un valor pequeño de R_{DSon} es deseable, ya que implica menores pérdidas térmicas, mayor eficiencia y menor necesidad de disipación de calor. Por el contrario, si esta resistencia es elevada, aumenta la caída de voltaje en el dispositivo durante la conducción, lo que conlleva un incremento en las pérdidas de potencia, mayor generación de calor y, en consecuencia, puede requerir sistemas de enfriamiento más robustos o limitar la corriente máxima que puede manejarse de forma segura [115].

Para realizar el cálculo del voltaje eficiente que se implementará en los MOSFETS en la terminal de drenaje calculamos:

$$V_{INEFF} = \frac{V_{CD}}{2} \cdot \frac{2}{\pi} \quad (22)$$
$$V_{INEFF} = \frac{800}{2} \cdot \frac{2}{\pi} = 254.6479$$

Ecuación 22 Voltaje eficiente.

La corriente que entrará en los MOSFETS (I_{in}), establece la corriente en el drenaje que deben tolerar los semiconductores.

$$I_{in} = \frac{V_{INEFF}}{R_{se}} \quad (23)$$
$$I_{in} = \frac{254.64}{2.5857} = 98.48010210 \text{ A}$$

Ecuación 23 Corriente de drenaje necesaria

3.3 Selección y diseño de componentes

3.3.1 MOSFETS

El modelado del MOSFET se realizó mediante Matlab (Tabla 8) en base a especificaciones de la hoja de datos en donde se simula y se rige el comportamiento del MOSFET a una temperatura de 25 grados centígrados para asegurar el funcionamiento del MOSFET en óptimas condiciones, sumado a eso dicho MOSFET se está alimentando en la compuerta con un pulso cuadrado de 500 kHz con un ciclo de trabajo de 50% y una amplitud de 15 volts de acuerdo a las especificaciones dadas por la hoja de datos.

Al trabajar con estos dispositivos con condiciones excelentes en torno a variables eléctricas existe la interferencia de la frecuencia de trabajo, como tal esto nos va a generar grandes pérdidas debido a su frecuencia baja, para esto vamos a compensar con un reajuste de puentes de diodos conectados en paralelo y modelando el dispositivo mediante los parámetros establecidos en la hoja de datos de la siguiente manera.

Tabla 8 Especificaciones del MOSFET C3M0016120K.

C3M0016120K	
Opción de modelado	Basado en umbral con función térmica
Número de terminales	Tres
Parametrización	Especificaciones de hoja de datos
Resistencia de drenado (Rds on)	0.016 Ohms
Corriente de drenado (Ids)	115 A
Voltaje de compuerta (Vgs)	15 V
Voltaje umbral de compuerta (Vth)	2.4 V
Modulación de canal	0.1
Frecuencia de conmutación máxima	1MHz
Temperatura	25

3.3.2 Diodos

Los diodos de carburo de silicio CoolSiC presentan ventajas significativas frente a los diodos de silicio convencionales cuando se emplean en aplicaciones de alta potencia y alta frecuencia. Gracias a su recuperación inversa prácticamente nula, estos dispositivos eliminan las pérdidas asociadas al tiempo de recuperación, reduciendo de manera considerable el estrés térmico y eléctrico en el circuito. Además, los diodos CoolSiC son capaces de soportar corrientes elevadas y altos niveles de voltaje inverso, manteniendo una caída de tensión directa estable incluso a altas temperaturas de operación. Estas características los hacen especialmente adecuados para inversores operando bajo condiciones exigentes, donde la eficiencia, la confiabilidad y la reducción de pérdidas por conmutación son factores críticos para el desempeño global del sistema.(Tabla 9).

Capítulo 3. Diseño del convertidor CD-CD.

Tabla 9 Especificaciones del Diodo IDWD150G120C5.

IDWD150G120C5.	
Corriente de saturación	1x10-14 A/m2
Voltaje de conducción directa	1.5 V
Frecuencia	Alta
Corriente máxima	150 A
Coeficiente de emisión	1
Potencial de unión	1 V
Resistencia óhmica en estado on	0.013
Coeficiente de gradación	0.5

Capítulo 4. Diseño del cargador rápido en CD.

Después de analizar las múltiples aplicaciones que se implementan para el diseño eléctrico electrónico, enfocaremos las simulaciones al software Matlab debido a múltiples razones como lo es la dinámica de trabajo del software, como bien sabemos Matlab es un software muy completo el cual permite el trabajo de simular precisamente ciertos entornos de una manera muy gráfica e interactiva con funciones precargadas, se implementara el diseño de un cargador rápido en CD la cual se ejemplifica en la figura 26 [116].

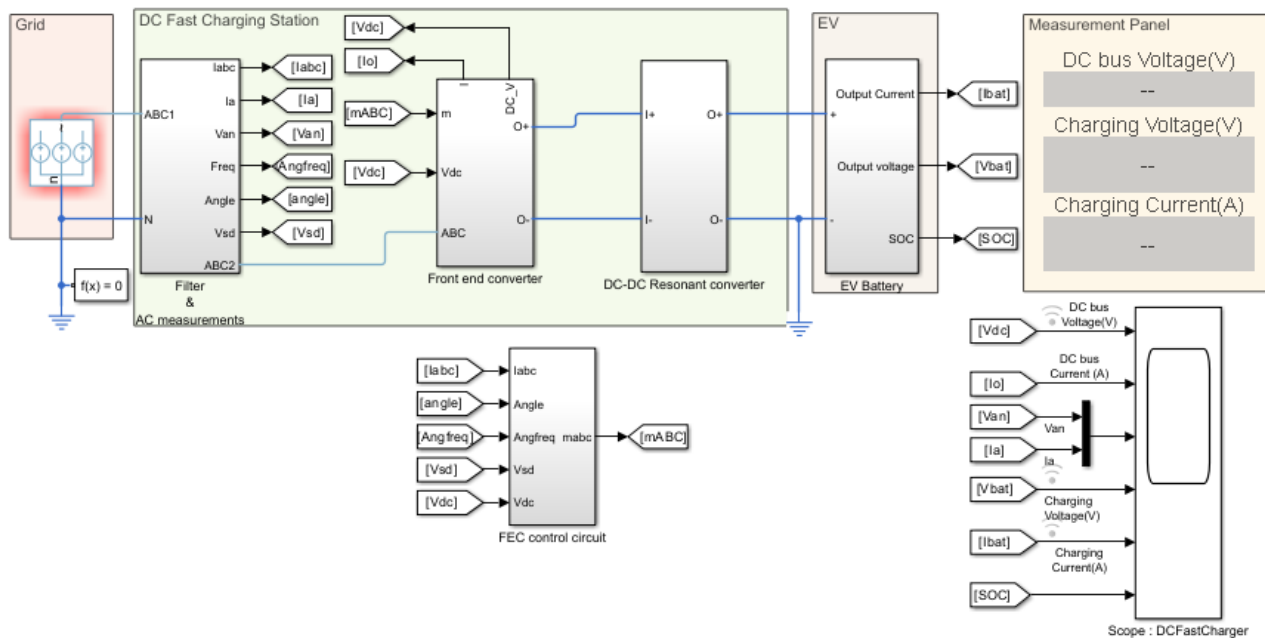


Figura 27 Cargador rápido en CD basado en convertidor resonante LLC

El modo de operación del sistema se emplea en Simulink la cual mediante diagramas de bloques estructura las funciones predeterminadas haciendo así una representación del dispositivo a programar, por otra parte empleando las librerías de Simscape en su versión enfocada en dispositivos eléctricos Simscape electrical nos permitirá el uso y aplicación de bloques precargados para la asignación de topologías y especificaciones eléctricas permitiéndonos así el libre modelado del cargador a nuestros criterios de modelado declarando los valores en variables, el código asociado al esquemático se encuentra en el anexo A.

En torno a la simulación se detalla en partes específicas que posteriormente se modelaran a consideraciones de adaptación de las topologías a implementar, retomando las partes fundamentales de este sistema encontramos el bloque de alimentación, el

Capítulo 4. Diseño del cargador rápido en CD.

bloque del cargador y el bloque de batería del vehículo eléctrico, además de esto contamos con los sub bloques de control para hacer el cargador funcional. Enfocándonos al cargador, se implementan 3 fases de diseño, filtro, convertidor de entrada y convertidor de salida.

4.1 Fases del cargador

4.1.1 Filtro

Este bloque se encarga fundamentalmente de filtrar las señales de entrada y marca los parámetros a procesar de la alimentación del cargador, procesa las señales de entrada provenientes de la red eléctrica de corriente alterna. Su función principal es filtrar armónicos no deseados, ruidos eléctricos y distorsiones que puedan estar presentes en la señal de entrada. De esta manera, asegura una alimentación más limpia y estable para el sistema, realiza mediciones críticas de parámetros eléctricos como la corriente de entrada, el voltaje de línea, la frecuencia y el ángulo de fase.

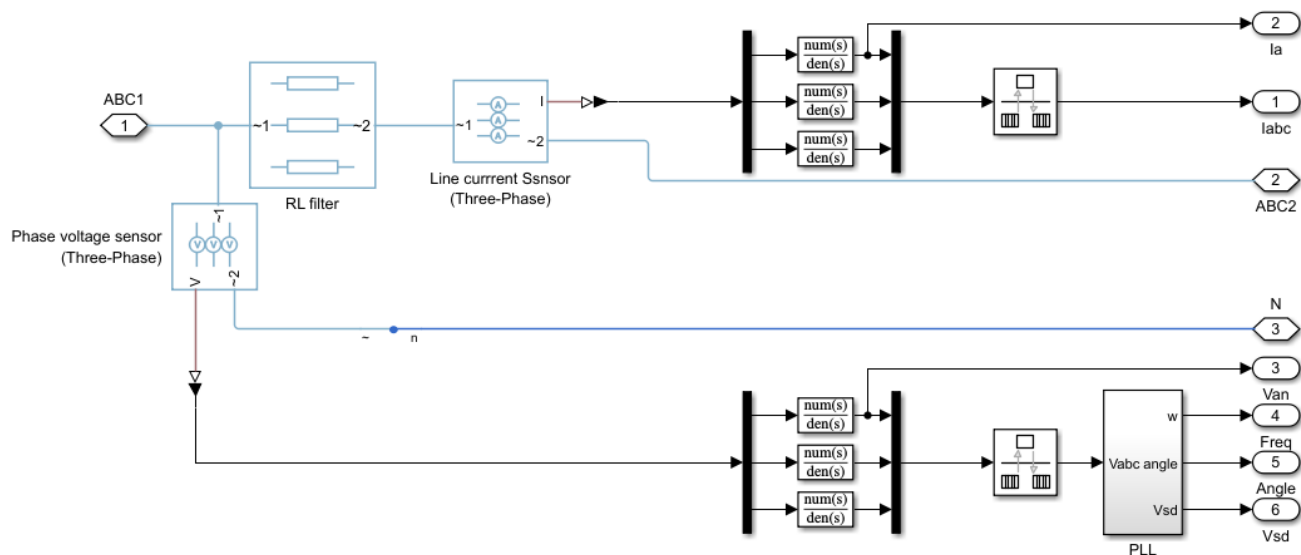


Figura 28 Filtro de señal de entrada

En la figura 27 se muestra la estructura del bloque del filtro en donde la principal función es la reducción de armónicos y sensado de señales, como se observa en la figura contamos con sensores de voltaje y corriente trifásicos en donde se separan características eléctricas importantes a destacar como la corriente promedio establecida por las 3 fases como la corriente eficaz de la alimentación (i_a), en torno al voltaje se estipulan variables como la frecuencia (w), el ángulo de desfase y la descomposición de la señal en espacios vectoriales (V_{sd}), clasificando cada fase de la señal de alimentación como a, b y c.

4.1.2 Convertidor CA-CD

Este bloque tiene como función principal la generación de un bus de CD que servirá como etapa de alimentación para el convertidor de salida. Para su implementación se establecen diversas condiciones operativas específicas que garantizan un funcionamiento adecuado, incluyendo el correcto filtrado, la regulación del voltaje y la estabilidad ante variaciones de carga o perturbaciones en la red de entrada. La arquitectura del bloque está diseñada para proporcionar de manera confiable un nivel de 800 volts en CD, asegurando así las condiciones necesarias para que las etapas posteriores del sistema operen dentro de los parámetros deseados y con la eficiencia requerida, como se observa en la figura 28.

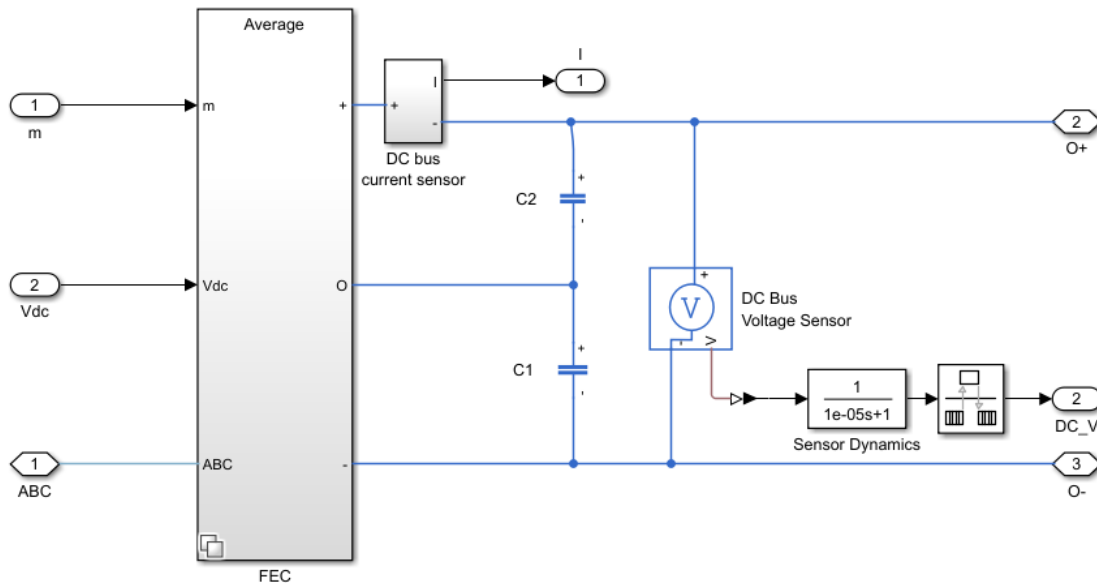


Figura 29 Front-end converter

Los parámetros de entrada del sistema están definidos principalmente por V_{dc} , el cual representa el voltaje de alimentación considerado en su componente fundamental, y por el conjunto ABC, que corresponde a las tres fases de entrada en corriente alterna que alimentan el convertidor. Adicionalmente, se incluye el parámetro m , encargado de establecer las condiciones de control necesarias para garantizar que el voltaje del bus de corriente directa (CD) permanezca estable durante toda la operación. Este parámetro actúa directamente sobre la modulación y el ajuste dinámico del dispositivo, permitiendo que las variaciones de carga o de la red no afecten la calidad de la señal rectificada.

Capítulo 4. Diseño del cargador rápido en CD.

Dentro del bloque FEC se identifica un convertidor rectificador encargado de transformar la señal en corriente alterna en una salida de corriente directa, asegurando la conversión con el nivel de voltaje adecuado para el sistema posterior. Este bloque muestra explícitamente la relación entre la entrada trifásica y la salida en CD, incluyendo su comportamiento en condición de circuito abierto, lo cual permite evaluar el valor máximo de voltaje disponible cuando no existe carga conectada. Además, el FEC integra los elementos necesarios para el filtrado y la conformación de la señal, reduciendo el rizado y estabilizando el nivel de tensión antes de ser transferido al bus de CD, donde posteriormente se utilizará para la etapa de conversión o regulación correspondiente. (figura 29).

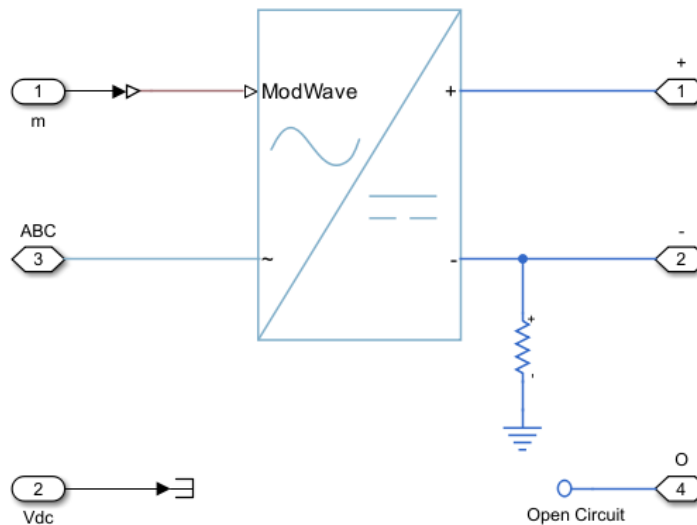


Figura 30 FEC

El bloque de control incorpora dos fases fundamentales que trabajan de manera coordinada para regular el comportamiento del sistema. La primera corresponde al controlador, encargado de procesar las variables del sistema, comparar las referencias con las mediciones reales y generar las señales de corrección necesarias. La segunda fase es el modulador de control, que actúa como un actuador, transformando las órdenes del controlador en señales de modulación adecuadas para los dispositivos de potencia. Esta estructura en dos etapas garantiza una respuesta dinámica precisa, una regulación estable del voltaje y una operación eficiente del convertidor bajo diversas condiciones de carga (Figura 30).

Capítulo 4. Diseño del cargador rápido en CD.

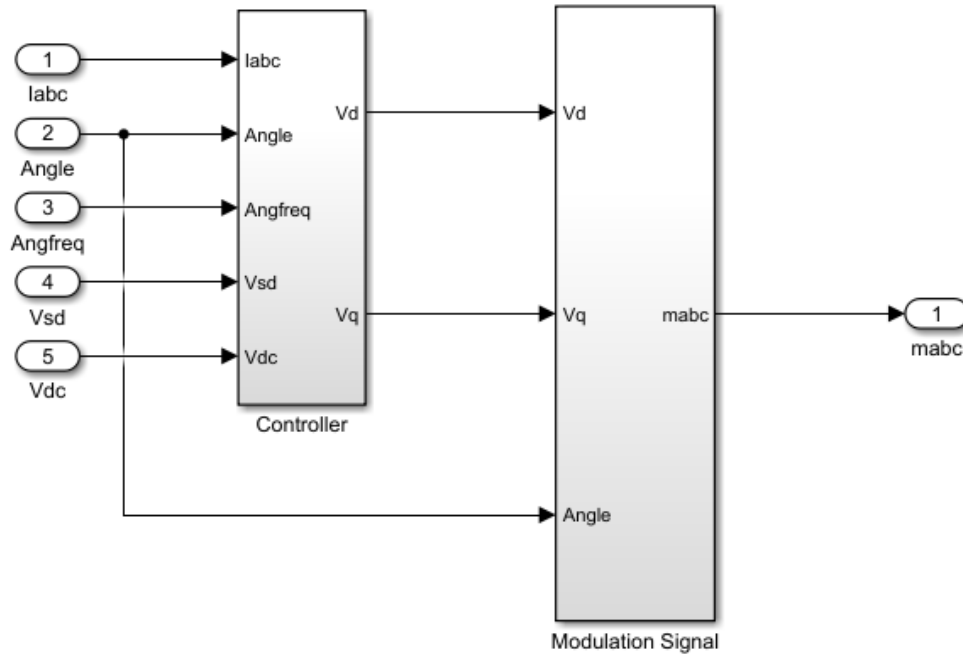


Figura 31 Bloque de control

La figura 31 muestra un sistema completo de control vectorial basado en coordenadas dq, compuesto por un controlador de voltaje, un lazo de control de corriente en el eje d y otro en el eje q, además de un bloque de transformación de corrientes trifásicas a coordenadas dq. El controlador de voltaje recibe la señal de referencia y el voltaje del bus DC, genera un error y lo procesa mediante un regulador para producir la referencia de corriente I_{dref} . Este valor entra al lazo de control del eje d, donde se compara con la corriente I_d medida; el error resultante pasa por un controlador PI que genera la tensión de control del eje d. Este valor se ajusta restando el término de acoplamiento cruzado proporcional a la corriente I_q y a la velocidad angular eléctrica, y también integrando la componente de voltaje en el eje q para producir la señal V_d . Paralelamente, en el lazo del eje q, la corriente I_{qref} se compara con la corriente I_q medida; el error alimenta un controlador PI que entrega la tensión de control del eje q, la cual se suma y se corrige restando el término de acoplamiento cruzado proporcional a la corriente I_d y a la velocidad eléctrica, finalizando en la señal V_q . Ambas corrientes I_d e I_q provienen del bloque de transformación de corrientes trifásicas a dq, el cual recibe las corrientes trifásicas i_{abc} y el ángulo eléctrico de rotación.

Capítulo 4. Diseño del cargador rápido en CD.

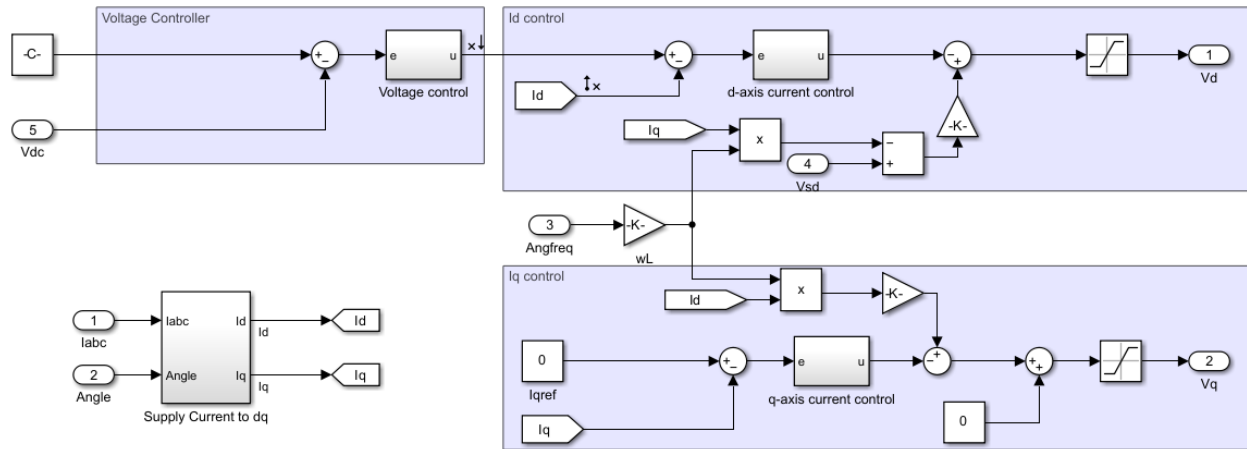


Figura 32 Controlador

El modulador (Figura 32) recibe como entrada las variables procesadas por el controlador, a partir de las cuales genera la señal de control M_{abc} , denominada así por su correspondencia con las tres fases del sistema de alimentación. Esta señal sintetizada por el modulador se inyecta directamente en la etapa de entrada del convertidor, actuando como un mecanismo de retroalimentación que ajusta en tiempo real el comportamiento del sistema. De esta manera, el modulador no solo traduce las órdenes del controlador en una señal modulada adecuada, sino que también permite que el convertidor mantenga una operación estable y eficiente ante variaciones de carga o perturbaciones en la red.

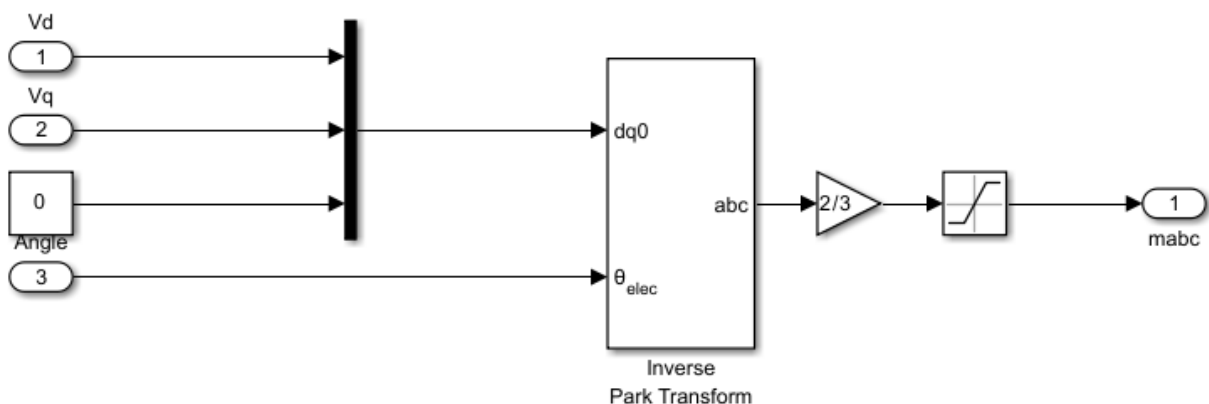


Figura 33 inversor de señal de control

Capítulo 5. Resultados.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación del sistema completo, con el propósito de analizar detalladamente el comportamiento de los principales elementos que lo conforman. Se examinan los parámetros eléctricos del convertidor CA–CD, evaluando su capacidad de rectificación, estabilidad del bus de CD y respuesta ante transitorios. Asimismo, se describe el desempeño del convertidor resonante, considerando su operación en régimen estacionario, la calidad de la transferencia de potencia y la interacción con la carga. Finalmente, se integra el análisis global del cargador, valorando su eficiencia, consistencia operativa y correcta coordinación entre las diferentes etapas, lo cual permite verificar que el diseño propuesto cumple con las condiciones necesarias para una operación segura y funcional en aplicaciones de carga de baterías.

5.1 Desempeño del convertidor FEC

El comportamiento mostrado en las tres gráficas confirma el funcionamiento estable y adecuado del sistema rectificador FEC bajo las condiciones de operación analizadas. En la primera gráfica, correspondiente al voltaje de salida en CD, se aprecia un estado transitorio inicial caracterizado por una ligera caída desde aproximadamente 870 V hasta estabilizarse en torno a los 800 V, lo cual evidencia que el lazo de control y el convertidor consiguen regular eficazmente el nivel de tensión deseado, garantizando un bus de CD robusto y apto para alimentar etapas posteriores. La segunda gráfica, que presenta la corriente de salida en CD, muestra un transitorio más pronunciado debido a la demanda inicial de energía; sin embargo, la corriente converge gradualmente hacia un estado estable, manteniéndose dentro de límites aceptables y confirmando que el convertidor compensa adecuadamente las variaciones de carga sin comprometer la estabilidad del sistema.

Finalmente, la tercera gráfica, que representa el voltaje y la corriente de la fase A de la red, evidencia el correcto acoplamiento entre el convertidor y la fuente de alimentación en CA. A pesar de los transitorios iniciales, las señales evolucionan hasta adoptar formas sinusoidales consistentes y bien definidas, lo que indica que el proceso de rectificación y control de corriente funciona adecuadamente y que el sistema interactúa con la red sin generar distorsiones severas. En conjunto, las tres gráficas verifican que el sistema alcanza un régimen permanente estable, con una conversión eficiente y un control eficaz

Capítulo 5. Resultados.

tanto en la etapa de entrada como en la salida en CD, demostrando así la solidez del diseño implementado, esta información se establece en la figura 33.

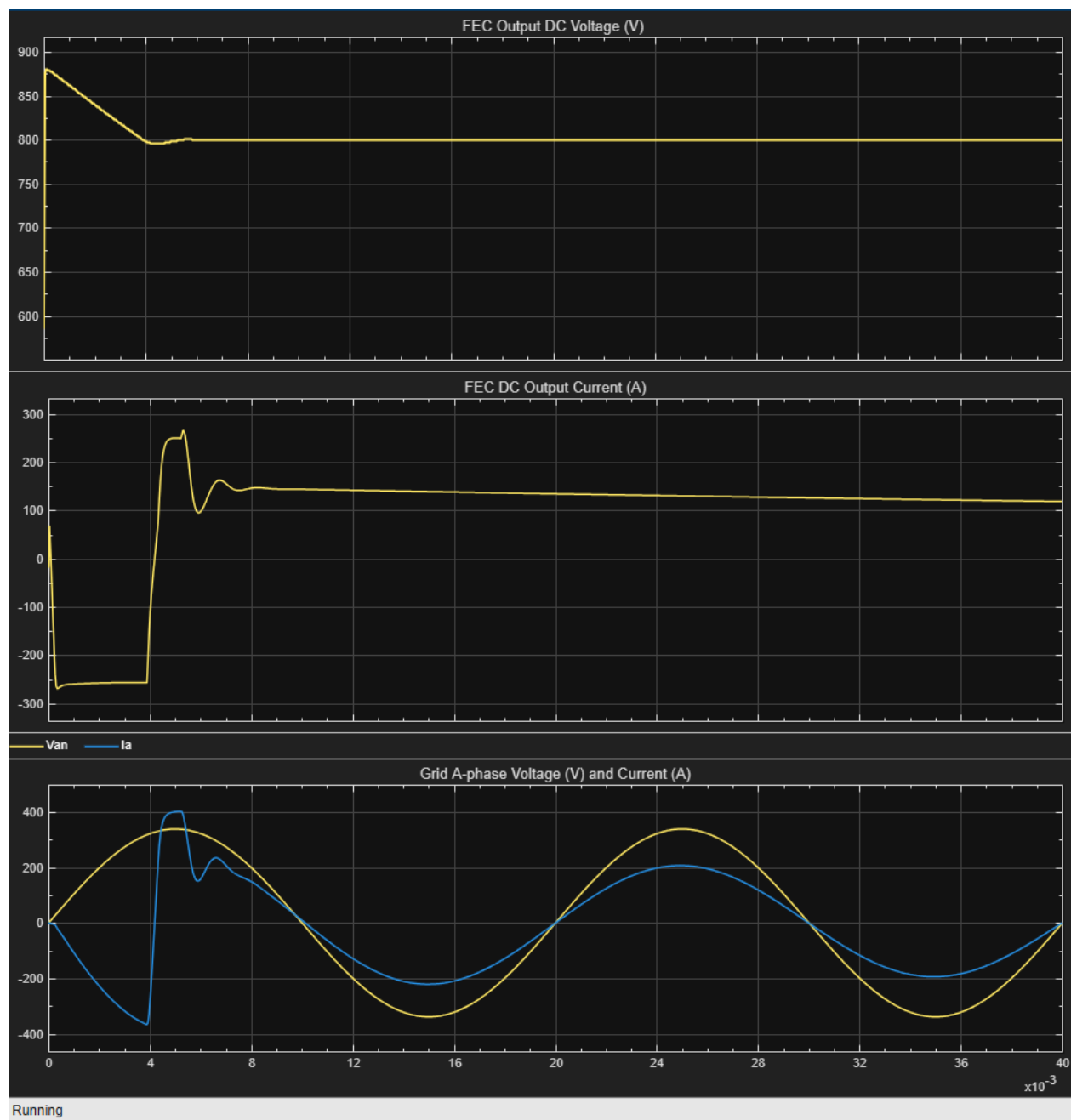


Figura 34 Parámetros de salida del convertidor CA-CD

5.2 Desempeño del convertidor resonante LLC

En el análisis de resultados del convertidor resonante se detalla su comportamiento dinámico y la eficiencia en la conversión de energía. Estos convertidores funcionan mediante la resonancia entre inductores y capacitores, lo que facilita una disminución notable en las pérdidas por conmutación y optimiza la calidad de la transferencia energética. En escenarios de carga rápida y en sistemas eléctricos de alta densidad, los convertidores resonantes ofrecen ventajas notables en términos de eficiencia, aislamiento galvánico y capacidad para mantener un control estable aun ante variaciones en la carga o en el voltaje del bus de entrada. En esta sección se examinan los parámetros eléctricos más relevantes, su comportamiento en régimen transitorio y estacionario, así como la interacción entre los elementos resonantes y el transformador, con el propósito de evaluar el desempeño global del convertidor y su idoneidad para aplicaciones de conversión en sistemas de carga de baterías.

En la Figura 34 se presenta el análisis del comportamiento programado para la conmutación del convertidor. El voltaje aplicado a la compuerta, VG, se configura entre 0 y 15 utilizando un ciclo de trabajo del 50% y una frecuencia de conmutación de 500 kHz, con el propósito de garantizar una operación de alta frecuencia en el tanque resonante. Durante este proceso, la señal de control experimenta una inversión programada, necesaria para asegurar una correcta excitación del convertidor y mantener la simetría en la etapa de conmutación.

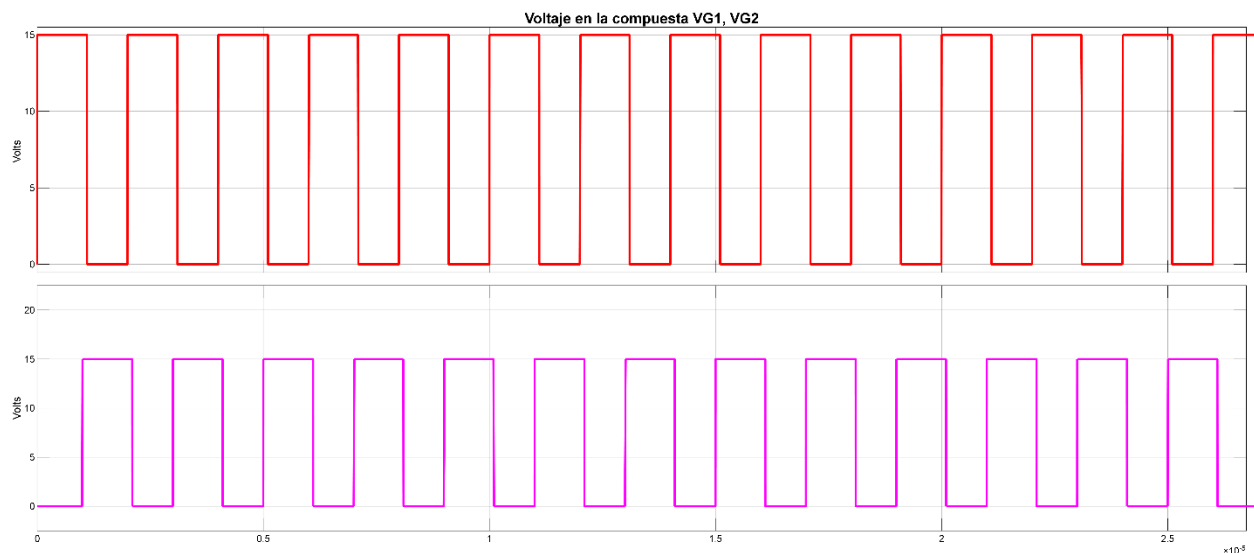


Figura 35 Voltaje en la compuerta VG

A partir de las formas de onda obtenidas, se observa que el voltaje V_{DS} del interruptor presenta pulsos periódicos de alta amplitud que alcanzan valores cercanos a 800 V

Capítulo 5. Resultados.

durante todo el intervalo de simulación, sin evidenciar una reducción progresiva ni una estabilización alrededor de un valor menor. Este comportamiento indica que el convertidor opera de manera continua bajo el voltaje completo del bus de CD, sin una etapa transitoria claramente definida hacia un nivel de tensión reducido. Por otro lado, la corriente en el drenaje del dispositivo muestra un comportamiento oscilatorio con picos elevados y variaciones significativas a lo largo del tiempo, sin estabilizarse en un valor promedio constante, lo cual es característico de un sistema resonante sometido a conmutación de alta frecuencia. Adicionalmente, se aprecia que la conmutación del interruptor ocurre cuando el voltaje V_{DS} se aproxima a cero o cuando la corriente de drenaje es prácticamente nula, evidenciando una operación bajo condiciones de conmutación suave. Este tipo de conmutación permite reducir las pérdidas por encendido y apagado, así como el estrés eléctrico sobre el dispositivo, aun cuando el sistema no haya alcanzado un régimen estacionario completamente estable. (Figura 35).

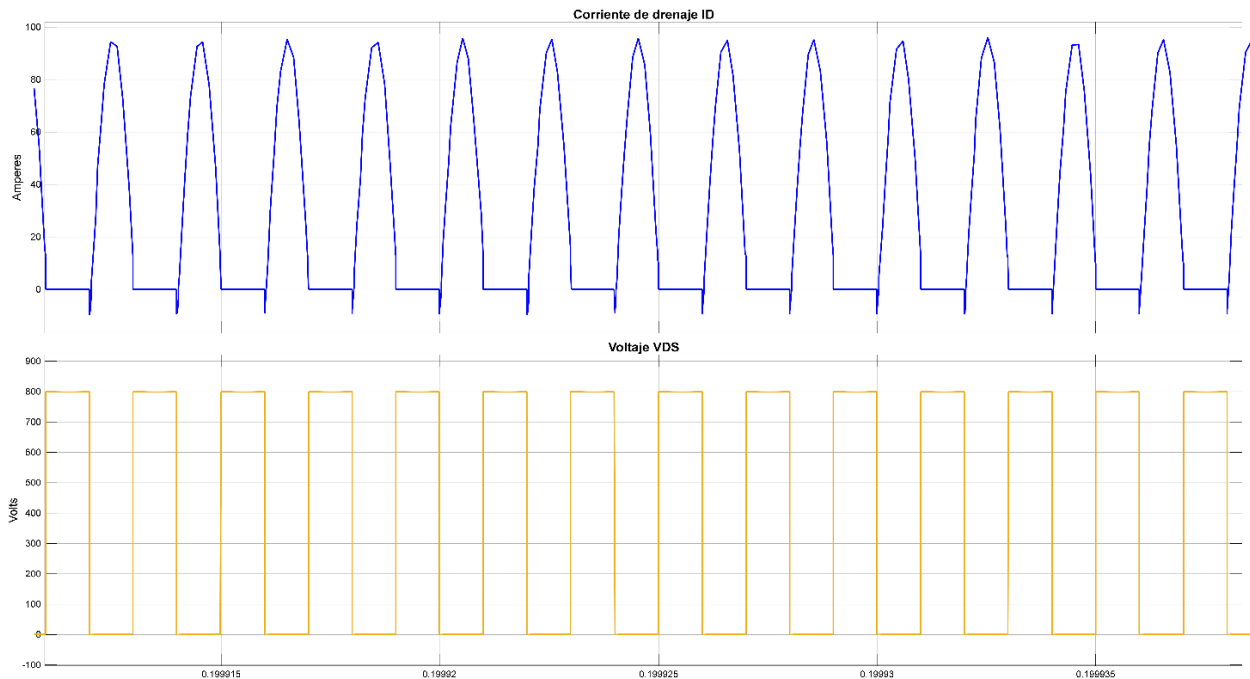


Figura 36 Señal de corriente de drenaje (I_D) y voltaje de drenaje fuente (V_{DS})

Este comportamiento implica una transferencia de potencia del orden de 50 kW, lo que concuerda con aplicaciones de carga rápida para vehículos eléctricos. No obstante, el solapamiento entre tensión y corriente durante las transiciones de conmutación genera pérdidas adicionales y un esfuerzo considerable sobre el semiconductor, incrementando tanto las pérdidas de conmutación como las de conducción. Asimismo, los picos de tensión observados en el arranque representan un riesgo de sobrestres eléctrico para el MOSFET, por lo que se recomienda la implementación de técnicas de mitigación.

Capítulo 5. Resultados.

En la salida del tanque resonante, tanto el voltaje como la corriente presentan formas de onda suavizadas y periódicas, propias de un circuito LC operando cerca de su frecuencia de resonancia. La corriente mantiene un comportamiento senoidal limpio y estable, reflejando un intercambio eficiente de energía entre los elementos reactivos del tanque, mientras que el voltaje muestra pendientes controladas y una reducción evidente de componentes de alta frecuencia (Figura 36). Esta interacción favorece condiciones de conmutación suave en los dispositivos de potencia, reduciendo pérdidas y estrés eléctrico. En conjunto, estas formas de onda confirman que el tanque resonante cumple su función de acondicionamiento energético previo a la etapa de rectificación, contribuyendo al correcto desempeño global del cargador.

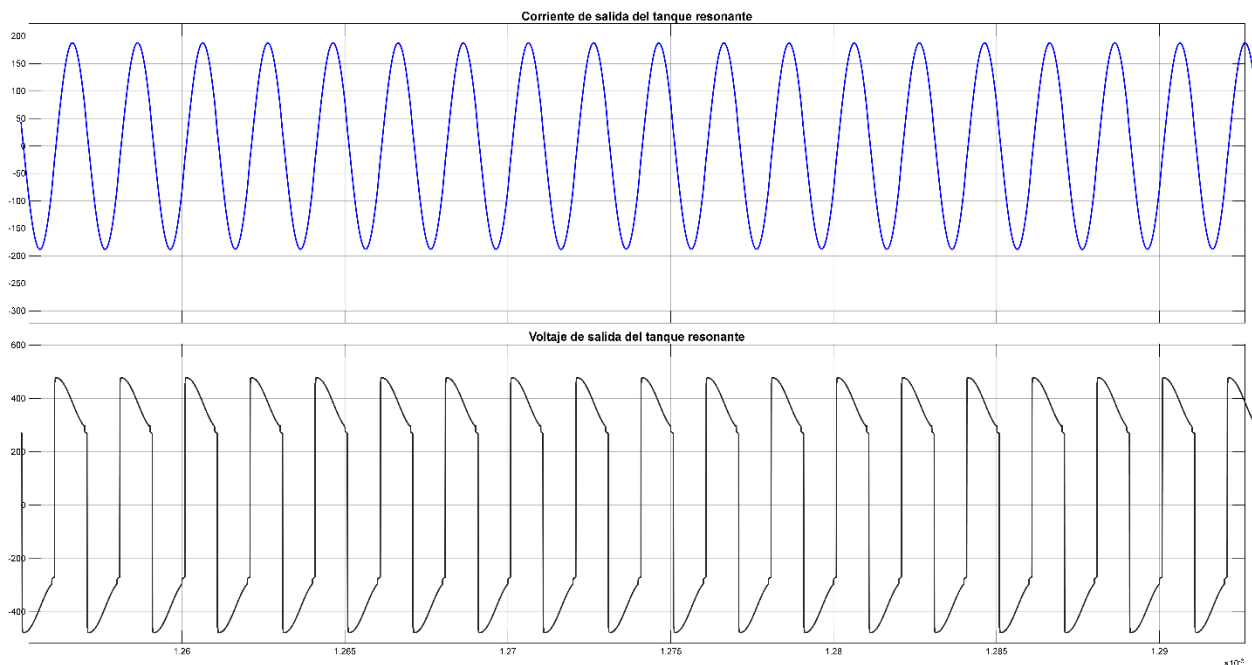


Figura 37 Voltaje y corriente de salida del tanque resonante.

Las formas de onda de voltaje y corriente a la salida del transformador (Figura 37), evidencian un funcionamiento adecuado de esta etapa dentro del cargador resonante. El voltaje presenta pulsos periódicos bien definidos, con niveles estables y transiciones rápidas, característicos de la excitación generada por el inversor en clase D, mientras que la corriente asociada muestra una forma de onda prácticamente senoidal y simétrica. Este comportamiento indica un correcto acoplamiento magnético y confirma que el transformador no opera en condiciones de saturación, permitiendo una transferencia de potencia continua y balanceada hacia la etapa resonante. La coherencia entre ambas señales valida el correcto dimensionamiento del transformador y su adecuada integración con el inversor.

Capítulo 5. Resultados.

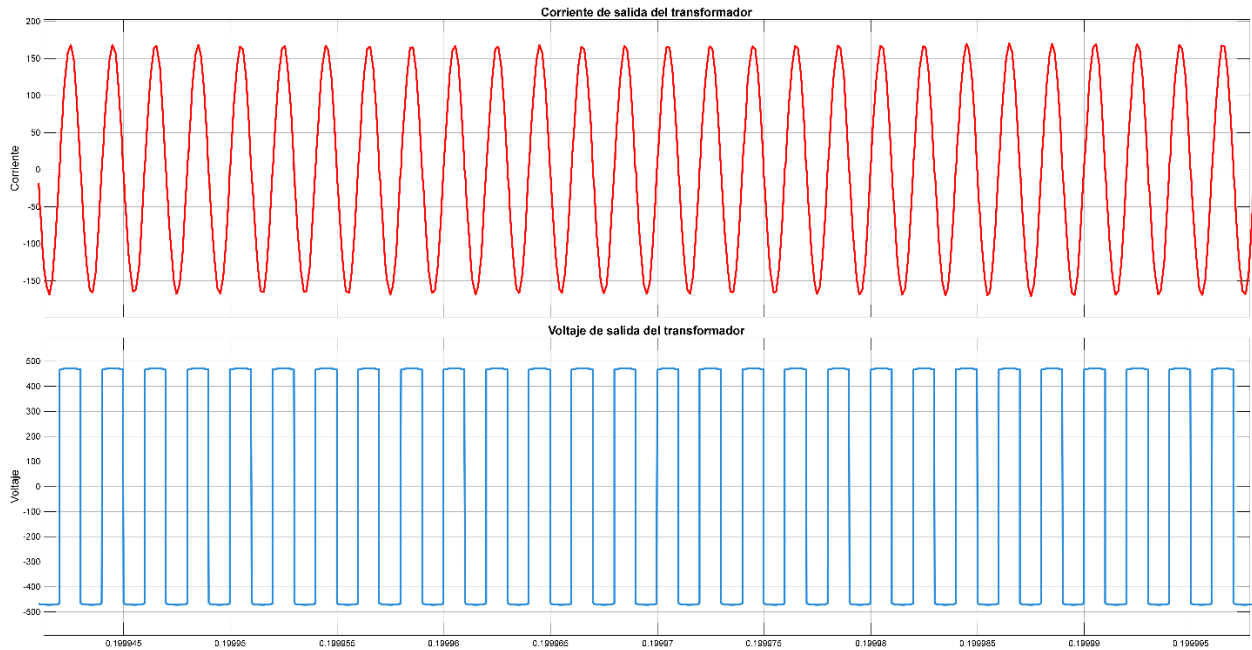


Figura 38 Voltaje y corriente de salida del transformador

Finalmente, la magnitud de la corriente alcanzada supera la capacidad de conducción continua de un solo dispositivo, lo que hace necesario considerar configuraciones en paralelo o la selección de semiconductores con mayores capacidades de corriente y menores pérdidas resistivas, además de una adecuada gestión térmica que garantice la fiabilidad y eficiencia del sistema en operación continua.

Bajo la selección adecuada de componentes, previamente descrita en la sección de diseño del convertidor, se determinan las condiciones eléctricas que gobiernan el comportamiento del inductor resonante durante la operación. Estas decisiones de diseño, particularmente la elección de la inductancia, la capacidad resonante y la frecuencia de conmutación, permiten establecer un perfil de operación estable y acorde a los requerimientos del cargador. En la Gráfica 38 se presentan los parámetros eléctricos obtenidos para el convertidor CD-CD resonante, donde se aprecian valores de 108.2 A y 438.24 V, estos valores concuerdan con el régimen nominal esperado para esta etapa. Asimismo, se identifica un ligero estado transitorio al inicio de la respuesta, asociado al proceso natural de establecimiento de energía en el tanque resonante. Este transitorio disminuye rápidamente, demostrando que el sistema alcanza su régimen permanente de forma estable y sin oscilaciones significativas, validando tanto la selección de los elementos del tanque como la estrategia de conmutación implementada.

Capítulo 5. Resultados.

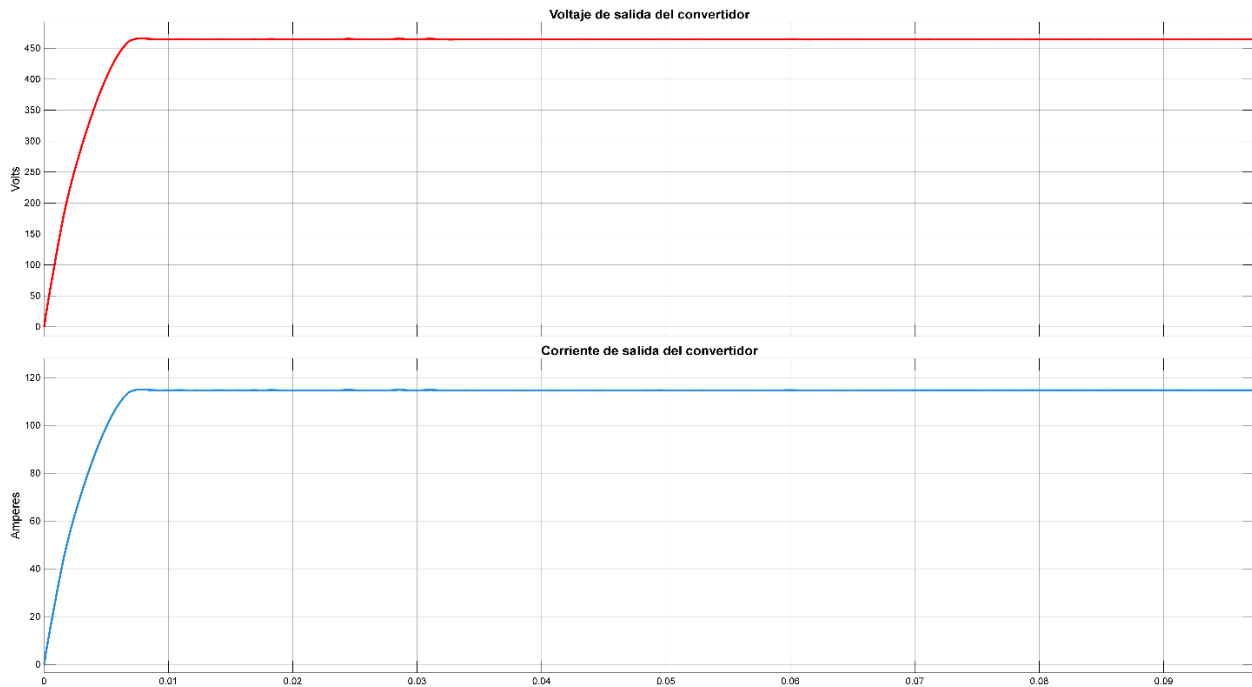


Figura 39 Parámetros eléctricos del inductor resonante

La magnitud de la corriente de salida obtenida en la simulación excede la capacidad de conducción continua especificada, por lo que se hace necesario implementar una configuración de dispositivos en paralelo. Esta estrategia permite distribuir equitativamente la carga de corriente entre varios semiconductores, reduciendo la disipación térmica individual y mejorando la fiabilidad del sistema. Los resultados de la simulación validan la correcta selección de los parámetros del diseño, así como la topología empleada, al evidenciar una operación estable, sin sobrepasar los límites de tensión y corriente establecidos por los componentes críticos.

5.3 Diseño de la batería

Como parte del proceso de revisión y validación de resultados, se modeló una batería con el objetivo de contar con una representación funcional de su estado de carga (SOC) y de los parámetros eléctricos característicos de una batería real. Para ello, se seleccionó un modelo basado en una configuración de celdas cilíndricas, permitiendo simular distintas combinaciones en serie y paralelo con el fin de obtener el voltaje y la capacidad requeridos por el sistema (Figura 38). En particular, se optó por utilizar celdas Panasonic NCR18650PF, debido a su adecuada densidad energética, estabilidad operativa y amplia documentación técnica, lo que facilita su implementación en entornos de simulación y permite una aproximación más precisa al comportamiento dinámico de un paquete de baterías en condiciones reales de carga y descarga.

Capítulo 5. Resultados.

Tabla 10 Características de las celdas

Panasonic NCR18650PF	
Química	Ion-Litio
Celda	Tipo cilindro
Capacidad nominal	2900 mAh
Capacidad mínima garantizada	2750 mAh
Voltaje nominal	3.6 V
Método de carga	CC-CV
Densidad de energía	207 Wh/Kg

Las especificaciones técnicas de la celda Panasonic NCR18650PF permiten afirmar que se trata de un dispositivo altamente adecuado para aplicaciones que demandan una combinación equilibrada entre densidad energética, estabilidad operativa y confiabilidad a largo plazo. Su química de ión-litio y su formato cilíndrico tipo 18650 ofrecen un desempeño consistente, especialmente en sistemas donde las exigencias de corriente y seguridad son prioritarias. La capacidad nominal de 2900 mAh, junto con una capacidad mínima garantizada de 2750 mAh, asegura que el comportamiento real de la celda se mantenga dentro de márgenes predecibles, facilitando la planificación energética y reduciendo incertidumbres durante los procesos de carga y descarga.

El voltaje nominal de 3.6 V, sumado al método de carga mediante CC-CV, proporciona un marco operativo adecuado para gestionar el estado de carga con precisión y minimizar el deterioro por ciclos, lo cual es especialmente relevante en aplicaciones de conversión de potencia y almacenamiento energético. Asimismo, su densidad de energía de 207 Wh/kg evidencia una relación favorable entre energía almacenada y masa, permitiendo construir paquetes de baterías compactos pero capaces de ofrecer un desempeño robusto en regímenes dinámicos de demanda (Figura 40).

En conjunto, estas características convierten a la Panasonic NCR18650PF en una opción altamente confiable para el modelado de baterías dentro de entornos de simulación. Su adopción permite replicar de forma realista el comportamiento de un banco de baterías en configuraciones serie-paralelo, aportando un nivel de fidelidad que mejora la calidad del análisis y la validez de los resultados obtenidos. Por ello, su implementación dentro del estudio no solo contribuye a evaluar el desempeño eléctrico del sistema, sino que también proporciona una referencia sólida para futuras etapas de diseño, optimización e integración con convertidores de potencia y esquemas avanzados de gestión energética.

Capítulo 5. Resultados.

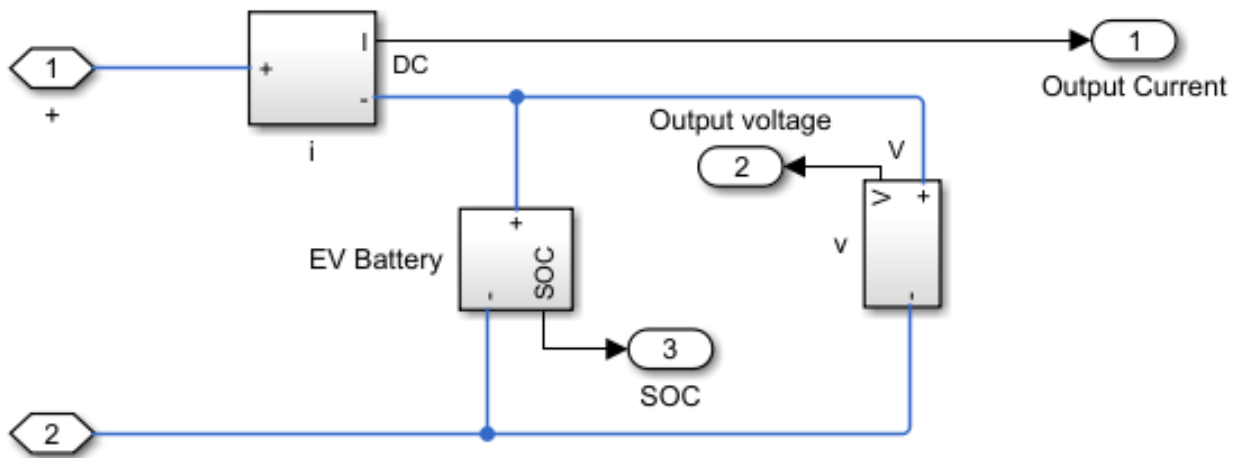


Figura 40 Bloque de batería

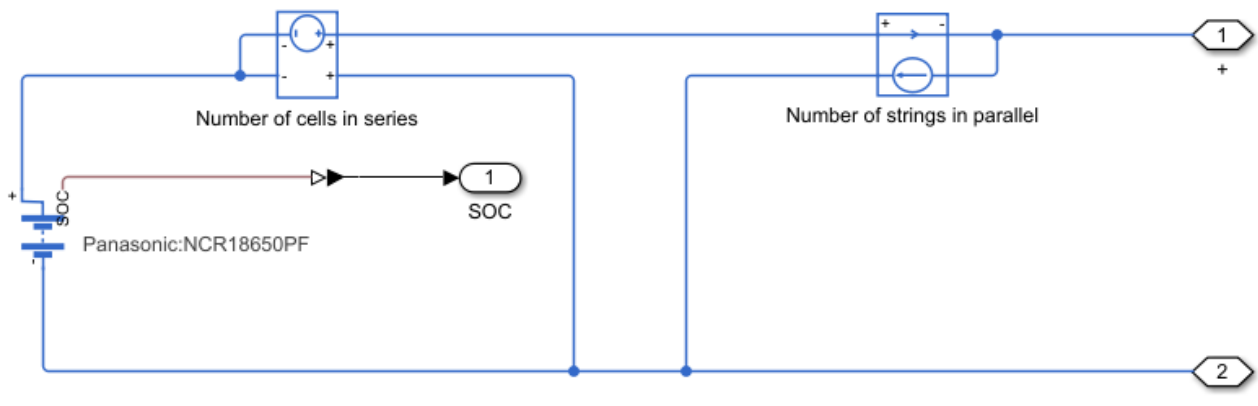


Figura 41 Estructura de la batería

Una vez completado el diseño integral del cargador, incluyendo la selección de los componentes principales, la configuración del convertidor resonante y la estrategia de control, el siguiente paso consiste en representar y analizar las variables de salida del sistema. Este análisis permite evaluar el comportamiento real del cargador bajo las condiciones de operación establecidas, verificando que los niveles de voltaje, corriente y potencia cumplan con los parámetros especificados en el diseño. La representación de estas variables es esencial para validar el desempeño del cargador y asegurar que su funcionamiento sea adecuado y confiable para aplicaciones de carga rápida.

Capítulo 5. Resultados.

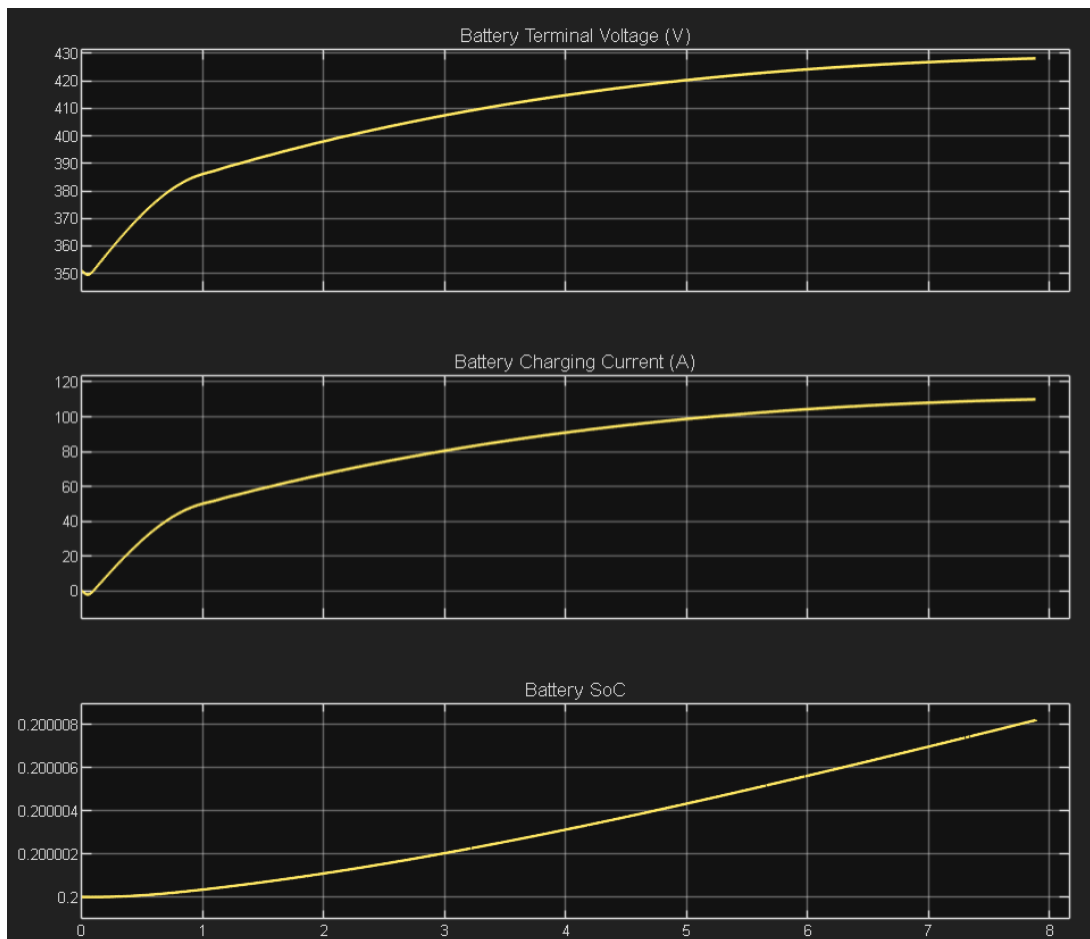
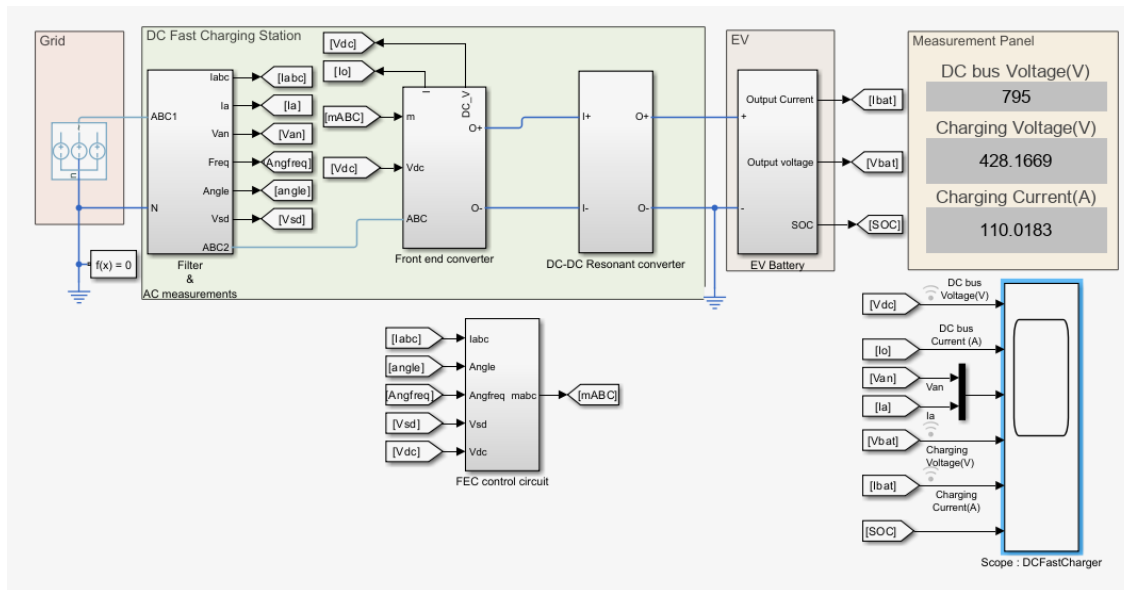


Figura 42 Gráficas de salida del cargador

Capítulo 5. Resultados.

En la figura 42 se muestra la respuesta dinámica del sistema de carga rápida basado en un convertidor resonante LLC conectado a una batería de vehículo eléctrico. En la primera gráfica, el voltaje terminal de la batería presenta un sobre impulso inicial típico del comportamiento resonante del LLC durante la etapa de arranque suave, seguido por una estabilización y un decrecimiento gradual a medida que la batería incrementa ligeramente su estado de carga. En la segunda gráfica, la corriente de carga exhibe un pico inicial característico del modo de operación a plena resonancia y posteriormente desciende de manera controlada conforme el convertidor se desplaza hacia una frecuencia mayor para regular la potencia entregada. Finalmente, la gráfica del SoC refleja un incremento pequeño pero continuo, coherente con un intervalo de simulación corto y con el régimen de corriente decreciente del cargador; este comportamiento es consistente con la curva de carga real de baterías de ion-litio en aplicaciones de carga rápida. En conjunto, los resultados validan la operación estable del convertidor resonante LLC y su transición suave entre las etapas de máxima potencia y regulación.

Capítulo 6. Conclusiones

Para finalizar, la realización de este tema de tesis posibilitó llevar a cabo el diseño completo de un cargador rápido para autos eléctricos fundamentado en un convertidor resonante LLC, alcanzando con éxito las metas establecidas desde la fase conceptual hasta la verificación mediante simulaciones. El análisis comenzó con la elección y cálculo de los componentes clave del convertidor, garantizando que su funcionamiento satisficiera las demandas de potencia, eficiencia y seguridad específicas de aplicaciones de carga rápida. Después, al aplicar el modelo en un ambiente simulado, se logró analizar el comportamiento dinámico de las magnitudes eléctricas, tales como voltajes, corrientes, ondas resonantes y la reacción del sistema frente a cambios súbitos en la carga.

Los resultados alcanzados evidenciaron que el convertidor desarrollado puede funcionar eficientemente bajo las condiciones requeridas, garantizando un control estable de la potencia entregada y cumpliendo con las restricciones de operación de los dispositivos semiconductores. De igual forma, las gráficas indicaron un comportamiento transitorio apropiado, tiempos de establecimiento cortos y niveles de distorsión compatibles con lo previsto en arquitecturas resonantes. Estos rendimientos avalan la factibilidad técnica del diseño, reforzando su capacidad para ser aplicado en escenarios reales de infraestructura de carga rápida.

Finalmente, el análisis realizado sienta una base sólida para trabajos futuros, como la optimización de estrategias de control, la implementación de protecciones avanzadas y el desarrollo de un prototipo físico que permita contrastar los resultados simulados con pruebas experimentales. De esta manera, el proyecto no solo cumple con los objetivos planteados, sino que también abre la puerta a la continuación del diseño hacia un sistema más robusto, eficiente y escalable para las demandas actuales de movilidad eléctrica.

Capítulo 6. Conclusiones.

6.1 Nomenclatura

kW – Kilovatio

h – Hora

V – Voltio

A – Amperio

Hz – Hertzio

kWh – Kilovatio-hora

AC – Corriente alterna

DC – Corriente directa

J2894 – Transferencia inalámbrica de energía para vehículos ligeros enchufables

CCS – Sistema de carga combinada

CHAdEMO – Sistema de carga rápida “Charge de Move”

PSBC – Fuente de alimentación y cargador de batería

EV – Vehículo eléctrico

2LB6 – Convertidor de dos niveles con seis interruptores

V2H – Vehículo a casa

PFC – Corrección del factor de potencia

SST – Transformador de estado sólido

G2V – Red a vehículo

P2P – Punto a punto

HPFC – Corrección del factor de potencia de alta potencia

TLB – Puente de dos niveles

CMM – Control por modo de corriente

DCM – Modo de conducción discontinua

LLC – Convertidor resonante LLC

SiC – Carburo de silicio

MOSFETs – Transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor

OBC – Cargador a bordo

EMI – Interferencia electromagnética

ZVS – Conmutación a tensión cero

Referencias

- [1] J. A. Ros Marin and O. Barrera Doblado, *Vehículos eléctricos e híbridos*. Ediciones Paraninfo, SA, 2017.
- [2] J. Zeng, G. Zhang, S. S. Yu, B. Zhang, and Y. Zhang, "LLC resonant converter topologies and industrial applications—A review," *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 73-84, 2020.
- [3] P. R. Shukla *et al.*, "Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," 2022, doi: 10.1017/9781009157926.
- [4] L. S. Olivares Salgado, "Ventajas y desventajas de los vehículos eléctricos como TPI según la percepción de sus conductores en la ciudad de Bogotá," 2019.
- [5] R. S. Levinson and T. H. West, "Impact of public electric vehicle charging infrastructure," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 64, pp. 158-177, 2018.
- [6] Y. R. Fang *et al.*, "Regionally differentiated promotion of electric vehicles in China considering environmental and human health impacts," *Environmental Research Letters*, vol. 18, no. 7, p. 074022, 22 June 2023 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acdbde>.
- [7] I. E. Agency, "Global EV Outlook 2024: Accelerating ambitions despite headwinds," International Energy Agency, Paris, France, 14 August 2025 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
- [8] J. Á. León, N. O. Rodríguez, and R. Marzoug, "Democratización de la energía y transición hacia la electromovilidad sostenible," in *Agua y energía:: actualidad y retos para un desarrollo sostenible*, 2024: Comunicación Científica, pp. 165-183.
- [9] F. M. Dulcich, D. Otero, and A. M. Canzian, "Evolución reciente y situación actual de la producción y difusión de vehículos eléctricos a nivel global y en Latinoamérica," 2019.
- [10] M. Safayatullah, M. T. Elrais, S. Ghosh, R. Rezaii, and I. Batarseh, "A comprehensive review of power converter topologies and control methods for electric vehicle fast charging applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 40753-40793, 2022.
- [11] M. F. Melo. "La eliminación progresiva mundial de los autos de gasolina." <https://es.statista.com/grafico/32696/objetivos-para-la-eliminacion-de-la-venta-de-autos-nuevos-con-motor-de-combustion-interna/> (accessed 28/08/2024).

Capítulo 6. Conclusiones.

- [12] A. Y. Hernández Ruiz, S. E. De león Aldaco, J. Aguayo Alquicira, M. Ponce Silva, O. Rodríguez Benítez, and E. Flores Rodríguez, "An Overview of Level 3 DC Fast Chargers: Technologies, Topologies, and Future Directions," *Eng*, vol. 6, no. 10, p. 276, 2025.
- [13] A. Qazi *et al.*, "Towards sustainable energy: a systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions," *IEEE access*, vol. 7, pp. 63837-63851, 2019.
- [14] A. Hussain, S. M. Arif, and M. Aslam, "Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 71, pp. 12-28, 2017.
- [15] S. Manzetti and F. Mariasiu, "Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 1004-1012, 2015.
- [16] K. W. Beard and T. B. Reddy, "Linden's handbook of batteries," (*No Title*), 2019.
- [17] M. Winter and R. J. Brodd, "What are batteries, fuel cells, and supercapacitors?," *Chemical reviews*, vol. 104, no. 10, pp. 4245-4270, 2004.
- [18] K. Corporation. "Comparison of different types of electric vehicle battery cells." <https://www.keyence.com/products/marker/laser-marker/resources/laser-marking-resources/comparison-of-different-types-of-electric-vehicle-battery-cells.jsp>.
- [19] M. V. Bozorg and J. F. Torres, "Multifaceted thermal regulation in electrochemical batteries using cooling channels and foam-embedded phase change materials," *arXiv preprint arXiv:2407.15040*, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2407.15040>.
- [20] H. T. Reid *et al.*, "Key considerations for cell selection in electric vertical take off and landing vehicles: a perspective," *EES Batteries*, 2025.
- [21] P. N. Halimah, S. Rahardian, and B. A. Budiman, "Battery cells for electric vehicles," *International Journal of Sustainable Transportation Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 54-57, 2019.
- [22] F. P. Tredeau and Z. M. Salameh, "Evaluation of lithium iron phosphate batteries for electric vehicles application," in *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009: IEEE, pp. 1266-1270.
- [23] E. S. Devices, "Department of Energy (DoE) Final Report Compilation for the Research and Development of High-Power and High-Energy," 2014.
- [24] J. Patel, R. Patel, R. Saxena, and A. Nair, "Thermal analysis of high specific energy NCM-21700 Li-ion battery cell under hybrid battery thermal management system for EV applications," *Journal of Energy Storage*, vol. 88, p. 111567, 2024.
- [25] Y. Wang, D. Ren, X. Feng, L. Wang, and M. Ouyang, "Thermal runaway modeling of large format high-nickel/silicon-graphite lithium-ion batteries based on reaction sequence and kinetics," *Applied Energy*, vol. 306, p. 117943, 2022.
- [26] M. Ank *et al.*, "Lithium-ion cells in automotive applications: Tesla 4680 cylindrical cell teardown and characterization," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 170, no. 12, p. 120536, 2023.

Capítulo 6. Conclusiones.

- [27] R. Chen, "Battery pack design of cylindrical lithium-ion cells and modelling of prismatic lithium-ion battery based on characterization tests," 2022.
- [28] F. Bathel, "Charging the Future: An Analysis of Electric Vehicle Charging Technologies and Related Pilot Projects," Universidade NOVA de Lisboa (Portugal), 2023.
- [29] D. N. Hummes, J. Hunt, B. B. Hervé, P. S. Schneider, and P. M. Montanari, "A comparative study of different battery geometries used in electric vehicles," *Latin American Journal of Energy Research*, vol. 10, no. 2, pp. 94-114, 2023.
- [30] C. Dick, "Balancing Future Grids: A Comprehensive Review of Vehicle-to-Grid Applications and Their Impact Factors," Universidade NOVA de Lisboa (Portugal), 2023.
- [31] J. Li, "A Brief Comparison Between Tesla and NIO In the Electric Vehicle Industry," *Highlights in Business, Economics and Management*, vol. 23, pp. 401-408, 2023.
- [32] R. B. Hossain, S. Sakib, M. Rabbi, S. Islam, P. Roy, and S. Hasan, "A Comprehensive Review of Blade Battery Technology for the Vehicle Industry," *N. Am. Acad. Res*, vol. 6, pp. 1-21, 2023.
- [33] S. Link, C. Neef, and T. Wicke, "Trends in automotive battery cell design: A statistical analysis of empirical data," *Batteries*, vol. 9, no. 5, p. 261, 2023.
- [34] P. Emadi, "Tesla Model 3 2170 Li-ion Cell Dataset and Battery SOC Estimation Blind Modeling Tool," *Borealis*, no. VI, 2023.
- [35] A. Thapa and H. Gao, "Silicon-Based Anode and Its Full-Cell Performance Test Using a High-Capacity Pouch Cell," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 171, no. 1, p. 010504, 2024.
- [36] N. Rosenberger, N. Wagner, A. Fredl, L. Riederle, and M. Lienkamp, "Quantifying the State of the Art of Electric Powertrains in Battery Electric Vehicles: Comprehensive Analysis of the Two-Speed Transmission and 800 V Technology of the Porsche Taycan," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 16, no. 6, p. 296, 2025.
- [37] P. Frías Marín and J. Román Úbeda, "Vehículo eléctrico: situación actual y perspectivas futuras," 2019.
- [38] AeroVironment. "Public Fast Charging Station, 50kW DC, eV50-ps. Public, Fast and reliable electric vehicle charging in minutes, Huntington Dr., Suite 202, Monrovia, CA 91016. 2011." <https://www.evsolutions.com/Upload/Product/635652532473270000.pdf> (accessed 16/05/2024).
- [39] ABB. "Terra CE 54 CJG 4N1-7M-0-0, Infraestructuras para la carga del vehículo eléctrico>DC Charging Products>All-in-One DC Chargers 50 kW, CE. Terra CE 54 CJG 4N1-7M-0-0 Terra 50 kW charger, CCS 2 + CHAdeMO + AC Type 2 cable 43 kW, 3.9 m cables, CE. 2017." <https://new.abb.com/products/es/6AGC063056/terra-ce-54-cjg-4n1-7m-0-0> (accessed 16/05/2024).
- [40] electricmobility. "Efacec QC45. Topmost of fast chargers, compatible with all brands of electric vehicles." <https://electricmobility.efacec.com/ev-qc45-quick-charger/> (accessed 28/08, 2024).

Capítulo 6. Conclusiones.

- [41] E. chargesolutions. "EVBox Troniq 100 fast charging solution, Charges up to 250 km in just 30 minutes with CCS 2, CHAdeMO and AC Type 2 connectors. EVBPI_DC100_EN_012020, 2020." <https://evchargesolutions.com/v/downloads/evbox-troniq-spec-sheet.pdf> (accessed 16/05/2024).
- [42] NationalLED. "TurboEVC™ 60kW Ultra-Fast DC Electric Vehicle Charger, Suitable for Wet Locations. 832-459-4447, sales@nationalled.com. 2021." <https://www.nationalled.com/wp-content/uploads/2021/03/National-LED-TurboEVC-DC-Fast-60kW-EV-Charger.pdf> (accessed 16/05/2024).
- [43] EVTEC. "espresso&charge Ready for all cars, trucks, and busses with up to 150kW DC and 65kW AC. +41 41 260 88 38 , evtec@evtec.ch. 2023." https://www.evtec.ch/application/files/9716/1329/3826/factsheet_espressocharge_6in1_en.pdf (accessed 16/05/2024).
- [44] smartchargeamerica. "Tritium Veefil PK350. Tritium Veefil PK350 350kW Level 3 DC fast electric car charging station with dual ports- CHAdeMO and SAE Combo connector." <https://smartchargeamerica.com/electric-car-chargers/commercial/tritium-veefil-pk350/?srsId=AfmBOoqPZMROOiLyi93Gj0VL73Q83t5Ezix8w419i60A8pR5vrKpAjZ> (accessed 27/09/2024, 2024).
- [45] Circontrol. "Raption Compact 150. Compact fast charger up to 150kW (UFC) combines 150kW ultra-fast charging with 75kW simultaneous charging to offer flexibility depending on charging demand." <https://circontrol.com/es/ev-chargers/raption-compact-150/>.
- [46] Blink. "60kW - 360kW DC Fast Charging Stations, Impressive. powerful range of up to 360kW and up to 600 amps of output current, the Blink fast-charging system is one of the only units built with an all-in-one format for easy installation, deployment, and cost savings. (888) 998.2546, 2022." <https://a-us.storyblok.com/f/1016941/x/77c4c0d3bb/blink-charging-dcfc-60kw-360kw-aug2023.pdf> (accessed 16/05/2024, 2024).
- [47] B. Power. "100 kW DC Fast Charger CLIN-S-815 L3R-100-480. In Process ETL Certification; Complies with UL 2202, UL 2231 UL50E, NEC Article 625, CSA STD C22.2 No. 107.1 FCC Part 15 Class A. 1719 S Grand Ave, Santa Ana CA, 92705, 2022." <https://evgateway.net/pdf/BTC-S-815.pdf> (accessed 16/05/2024).
- [48] TESLA. "SUPERCARGADOR 1MW power cabinet with a similar design to our utility-scale products supports peak rates of up to 250kW per car.2024." https://www.tesla.com/sites/default/files/downloads/Supercharger_First_Response_Guide_es.pdf (accessed 16/05/2024).
- [49] D. Electronics. "Ultra Fast Charger UFC 200 Speed-up your power with UFC 200 Delta DC Charger | High Power Charger 200kW Leaflet (NA version) For larger DC charging parks, 2023." <https://www.deltaww.com/en-US/products/EV-Charging/UFC-200> (accessed 16/05/2024).

Capítulo 6. Conclusiones.

- [50] ABB. "Infraestructura de Recarga de Vehículo Eléctrico Terra High Power - GEN III cargador de 175-350 kW Charger Connect Calle San Romualdo, 13. 2021." <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107992A2226&LanguageCode=es&DocumentPartId=&Action=Launch> (accessed 16/05/2024).
- [51] Alpitronic. "Alpitronic Hypercharger HYC 300 one of the most versatile DC chargers in the market. Hypercharger ensures that today's operators and investors are compatible for tomorrow's requirements." <https://chargingshop.eu/product/alpitronic-hypercharger-hyc-300-kw-dc-station/> (accessed 28/08, 2024).
- [52] S. Signet. "Signet EV DC 350kW Charger. Our reliable and green solution features cutting-edge technology and advanced features for a seamless charging experience " <https://sksignet.us/distributed/350kw-dp--175kw-pc> (accessed 28/08, 2024).
- [53] WALBOX. " SUPERNOVA NORTH AMERICA cargador rápido de CC de próxima generación Connect two 65 kW chargers to deliver up to 130 kW to one vehicle. 2021." https://wallbox.com/media_usa/landings/supernova/20211221_DS_Supernova_EN_US.pdf (accessed 16/05/2024).
- [54] EVGO. " Delta Signet DC350k-CC Combined Charging System Allie Curttright 531-203-0940 Allie.Curttright@evgo.com " <https://www.consumersenergy.com/-/media/CE/Documents/pev/powermidrive-residential-program-approved-charging-station.ashx> (accessed 16/05/2024).
- [55] S. c. America. "Tritium Veefil PK350 Level 3 DC fast electric car charging station dual ports- CHAdeMO and SAE Combo connector (CCS) 2024." <https://smartchargeamerica.com/electric-car-chargers/commercial/tritium-veefil-pk350/> (accessed 16/05/2024).
- [56] H. Wang, "A boost converter design with low output ripple based on harmonics feedback," *arXiv preprint arXiv:1901.10020*, 2019.
- [57] D. Americas. "EVGO Delta 350kW DC Charger. EVgo and Delta Electronics Announce Strategic Collaboration to Advance Nationwide Access to EV Charging." <https://www.delta-americas.com/en-US/products/EV-Charging/ALL/> (accessed 28/08, 2024).
- [58] Z. Zhang and et al., "Design of High Efficiency DC-DC Buck Converter for Electric Vehicle Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 6, 2021.
- [59] R. Ayyanar and H. Lee, "High-frequency buck converters using SiC devices in EV onboard chargers," *Journal of Power Sources*, vol. 502, 2021.
- [60] I. Technologies, "11kW SiC DC-DC Buck Converter Design Guide," Infineon Technologies AG, 2022. [Online]. Available: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/dcdc-converter/11kw-sic-dcdc-buck-converter-design-guide/>

Capítulo 6. Conclusiones.

- [61] J. Cao and et al., "Advanced PWM Control for Interleaved Buck Converter in Fast Charging," *Energies*, vol. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/14/4172>.
- [62] L. Gao, "Review of DC-DC Converters: Analysis and Applications of Buck and Boost Converters," *Applied and Computational Engineering*, vol. 148, no. Corresponding author: m13315115276@163.com, pp. Tianjin, China, 300132, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.22314>.
- [63] S. Ahmad, R. P. C. de Souza, P. Kergus, Z. Kader, and S. Caux, "Robust Switching Control of DC-DC Boost Converter for EV Charging Stations," *arXiv preprint*, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2212.03158>.
- [64] J. Rekha, T. M. T. Thentral, and K. Vijayakumar, "Electric Vehicle Motor, Converter, Controller and Charging Station with Challenges and Configurations: Review," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 12, no. 1, 2022. [Online]. Available: <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/12703>.
- [65] MathWorks. "Boost Converter - Implement boost power converter - Simulink - MathWorks." <https://la.mathworks.com/help/sps/ref/boostconverter.html>.
- [66] M. Alsharif, A. Alghamdi, and et al., "Bidirectional Buck–Boost Converter for EV Fast Charging Using GaN Devices," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 2, pp. 1250–1260, 2023, doi: 10.1109/tte.2023.3245783.
- [67] Á. D. Flores Torres, J. Estevez Carreón, J. Díaz Téllez, R. S. García Ramírez, and J. Pérez Pérez, "Análisis y diseño de un convertidor Buck-Boost," *La Mecatrónica en México*, vol. 8, no. 2, pp. 65–80, 2019. [Online]. Available: <http://www.mecamex.net/revistas/LMEM/revistas/LMEM-V08-N02-02.pdf>.
- [68] J. Shen, C. Zhang, and et al., "Design and Analysis of a Bidirectional Interleaved Buck–Boost Converter for V2G Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 7, pp. 8504–8515, 2022, doi: 10.1109/tpel.2021.3116443.
- [69] K. Sohail and H. Farzaneh, "Model for Optimal Power Coefficient Tracking and Loss Reduction of the Wind Turbine Systems," *Energies*, vol. 15, no. 11, p. 4159, 2022.
- [70] J. Jin and M. P. Systems, "Application Note for an LLC Resonant Converter Using Resonant Controller HR1000A," Monolithic Power Systems, 2019. [Online]. Available: https://media.monolithicpower.com/mps/cms_document/a/n/an151_r1.0.pdf
- [71] J. Jin, "Application Note for an LLC Resonant Converter Using Resonant Controller HR1000A," *The Future of Analog IC Technology*, 2013.
- [72] M. Ponce-Silva, "Conversión Resonante, Convertidor resonante clase E," ed. CENIDET, 2024, p. 54.
- [73] B. Yang, R. Chen, and F. C. Lee, "Integrated magnetic for LLC resonant converter," in *APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No. 02CH37335)*, 2002, vol. 1: IEEE, pp. 346-351.
- [74] S. Sun, J. Fu, and L. Wei, "Optimization of high-efficiency half-bridge LLC resonant converter," in *2021 40th Chinese Control Conference (CCC)*, 2021: IEEE, pp. 5922-5926.

Capítulo 6. Conclusiones.

- [75] A. Quiroga, J. Bayona, and H. Espitia, "Review of Converter Circuits with Power Factor Correction," *Technologies*, vol. 13, no. 6, p. 221, 2025.
- [76] D. Lyu, T. B. Soeiro, and P. Bauer, "Design and implementation of a reconfigurable phase shift full-bridge converter for wide voltage range EV charging application," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 1, pp. 1200-1214, 2022.
- [77] M. A. Ravindran *et al.*, "A novel technological review on fast charging infrastructure for electrical vehicles: Challenges, solutions, and future research directions," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 82, pp. 260-290, 2023.
- [78] C. J. Robles Aguilar, "ESTUDIO DEL CONVERTIDOR CD-CD RESONANTE LLC EN ALTA FRECUENCIA PARA SISTEMAS DE ILUMINACIÓN LED," 2024.
- [79] A. Quiroga and *et al.*, "Comparative Analysis of DC-DC Converter Topologies for Fast EV Charging: Emphasis on Resonant Full-Bridge Efficiency," *Technologies*, vol. 13, no. 6, 2025.
- [80] A. Hren, M. Truntič, and F. Mihalič, "A survey on the state-of-the-art and future trends of multilevel inverters in BEVs. Electronics 12 (13), 2993," ed, 2023.
- [81] D. Elizondo-Martinez, E. L. Barrios, M. Galdeano, A. Ursúa, and P. Sanchis, "Novel two-stage three-level converter with inherently balanced DC voltage for EV fast-charging applications," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 10, no. 3, pp. 6418-6433, 2023.
- [82] M. Sharifzadeh and K. Al-Haddad, "Packed E-Cell (PEC) converter topology operation and experimental validation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 93049-93061, 2019.
- [83] K. J. Pai *et al.*, "Implementation and design of high-power fast charger for lithium-ion battery pack," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 42, no. 11, pp. 1154-1171, 2014.
- [84] I. Sánchez Rincón, J. A. Arízaga Silva, and L. I. Olivos Pérez, "Diseño y simulación de un convertidor CD-CD tipo Full-Bridge dual de baja potencia," *REPOSITORIO NACIONAL CONACYT*, 2014.
- [85] C. Shi, Y. Tang, and A. Khaligh, "A Single-Phase Integrated Onboard Battery Charger Using Propulsion System for Plug-in Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 12, pp. 10899-10910, 2017, doi: 10.1109/tvt.2017.2729345.
- [86] R. Shi, S. Semsar, and P. W. Lehn, "Constant current fast charging of electric vehicles via a DC grid using a dual-inverter drive," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 9, pp. 6940-6949, 2017.
- [87] P. Li, Q. Wang, and S. Lu, "Power conversion efficiency calculation models for electric vehicle fast charger system," in *2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2018: IEEE, pp. 316-321.
- [88] A. Mortezaei, M. Abdul-Hak, and M. G. Simoes, "A bidirectional NPC-based level 3 EV charging system with added active filter functionality in smart grid applications," in *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2018: IEEE, pp. 201-206.

Capítulo 6. Conclusiones.

- [89] X. Yan *et al.*, "Virtual synchronous motor based-control of a three-phase electric vehicle off-board charger for providing fast-charging service," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 6, p. 856, 2018.
- [90] M. Lee, C.-S. Yeh, O. Yu, J.-W. Kim, J.-M. Choe, and J.-S. Lai, "Modeling and Control of Three-Level Boost Rectifier Based Medium-Voltage Solid-State Transformer for DC Fast Charger Application," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 4, pp. 890-902, 2019, doi: 10.1109/tte.2019.2919200.
- [91] M. Hammami, A. Viatkin, M. Ricco, and G. Grandi, "A dc/dc fast charger for electric vehicles with minimum input/output ripple based on multiphase interleaved converters," in *2019 international conference on clean electrical power (ICCEP)*, 2019: IEEE, pp. 187-192.
- [92] J. C. Quijije Barreto, "Simulación en MATLAB–SIMULINK de un cargador de baterías de dos etapas basado en un rectificador Boost y un convertidor resonante para aplicaciones en industria de automoción," Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
- [93] D.-H. Kim, M.-S. Kim, S. Hussain Nengroo, C.-H. Kim, and H.-J. Kim, "LLC resonant converter for LEV (Light Electric Vehicle) fast chargers," *Electronics*, vol. 8, no. 3, p. 362, 2019.
- [94] X. Li, X. Zhang, F. Lin, and F. Blaabjerg, "Artificial-intelligence-based design for circuit parameters of power converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 11, pp. 11144-11155, 2021.
- [95] J. I. Balaguer Molins, "Diseño y evaluación de un convertidor DC-DC resonante LLC en semipunto para un cargador embarcado de 3, 6 kW en un vehículo eléctrico," 2020.
- [96] L. Chen, A. Elkhateb, and N. Athanasopoulos, "Ultra Buck DC/DC Converter for Electric Vehicles," *arXiv preprint arXiv:2009.07822*, 2020.
- [97] P. Papamanolis, D. Bortis, F. Krismer, D. Menzi, and J. W. Kolar, "New EV Battery Charger PFC Rectifier Front-End Allowing Full Power Delivery in 3-Phase and 1-Phase Operation," *Electronics*, vol. 10, no. 17, 2021, doi: 10.3390/electronics10172069.
- [98] M. Sabarimuthu and N. Senthilnathan, "Development of fast and hybrid charger for lithium ion batteries in light weight electric vehicles," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 7, p. e12932, 2021.
- [99] A. Elserougi, I. Abdelsalam, and A. Massoud, "An isolated-boost-converter-based unidirectional three-phase off-board fast charger for electric vehicles," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 12, no. 1, pp. 79-88, 2021, doi: 10.1049/els2.12039.
- [100] D. Petreus, T. Patarau, E. Szilagyi, and M. Cirstea, "Electrical Vehicle Battery Charger Based on Smart Microgrid," *Energies*, vol. 16, no. 9, 2023, doi: 10.3390/en16093853.
- [101] O. A. Bedoya Perea and L. Ospitia Galeano, "Conversor DC-DC tipo LLC para la conexión de sistemas fotovoltaicos," 2018.

Capítulo 6. Conclusiones.

- [102] J. Lu, X. Tong, J. Zeng, M. Shen, and J. Yin, "Efficiency Optimization Design of L-LLC Resonant Bidirectional DC-DC Converter," *Energies*, vol. 14, no. 11, p. 3123, 2021.
- [103] R. H. Ashique and Z. Salam, "A family of true zero voltage zero current switching (ZVZCS) nonisolated bidirectional DC-DC converter with wide soft switching range," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 64, no. 7, pp. 5416-5427, 2017.
- [104] B. Andreyca, "Zero voltage switching resonant power conversion," in *UNITRODE Power Supply Design Seminar SEM-700*, 1990: Unitrode Merrimack, NH, USA.
- [105] CONANCE, "VEHÍCULOS ELÉCTRICOS-EQUIPOS DE ALIMENTACIÓN NMX-J-677-ANCE-2020," 2020-06-25, 2020.
- [106] C. L. Trujillo Rodríguez, D. Velasco De La Fuente, E. Figueres Amorós, G. Garcerá Sanfeliú, and J. Guacaneme Moreno, "Diseño, modelado e implementación de inversor conectado a la red eléctrica a partir de fuentes renovables," *Tecnura*, vol. 16, no. 32, pp. 12-28, 2012.
- [107] M. Juárez, G. Vázquez, J. Sosa, P. Martínez, and F. Garcia, "Analysis and design of resonant inverter for ozone generation," in *2016 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 2016: IEEE, pp. 1-7.
- [108] J. Demetrio Fernández, "Diseño e implementación de un convertidor con doblador de corriente y rectificación síncrona para la carga de baterías LiFePO₄," 2020.
- [109] W. J. Vivanco Arias, "Teoría, cálculo y diseño de transformadores," QUITO/EPN/1964, 1964.
- [110] A. Conesa Roca, *Aplicación de la rectificación controlada en los convertidores DC-DC de varios interruptores de tanque resonante serie*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- [111] B. Alberdi Esuain, "Estudio de un convertidor resonante para la carga de vehículos eléctricos," Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
- [112] N. C. Jiménez-Cabezas, "Modelado y control de un convertidor DC-DC de carga rápida para vehículos eléctricos," 2018.
- [113] D. G. Bravo, "CARGADOR DE BATERÍAS MEDIANTE CONVERTIDOR CC-CC RESONANTE LLC."
- [114] J. M. E. Huerta, *Inversor Resonante de Tres Elementos L-LC con Característica Cortocircuitable para Aplicaciones de Calentamiento por Inducción*. Universitat de Valencia (Spain), 1998.
- [115] G. Lakkas, "MOSFET power losses and how they affect power-supply efficiency," *Analog Appl*, vol. 10, no. 2016, pp. 22-26, 2016.
- [116] I. The MathWorks. "DC Fast Charger for Electric Vehicle." The MathWorks, Inc. <https://la.mathworks.com/help/sps/ug/dc-fast-charger.html>.

DC Fast Charger For Electric Vehicle Battery

This script specifies the parameters to model the DC fast charging station and the EV battery pack.

Table of Contents

[Rectifier - Front-End Converter](#)

[DC-DC Converter](#)

[Battery Pack](#)

[Simulation Time](#)

[Front-End Converter Variants](#)

Copyright 2021 The MathWorks ®, Inc.

Rectifier - Front-End Converter

```
rectifier.ACVoltagePP = 415; % V % RMS value of Phase- phase voltage
rectifier.ACVoltagePN = rectifier.ACVoltagePP/sqrt(3); % V % RMS value of Phase-
phase voltage
rectifier.ACVoltagePeak = rectifier.ACVoltagePN * sqrt(2); % V
rectifier.DCCurrent = 700; % A
rectifier.DCVoltage = 800; % V

rectifier.SystemFrequency = 50; % Hz
rectifier.SwitchFrequency = 10e3; % Hz

rectifier.minVdcPossible = rectifier.ACVoltagePP*sqrt(2/3)/0.5; % V
rectifier.acCurrent =
sqrt(2)*rectifier.DCCurrent*rectifier.DCVoltage/(sqrt(3)*rectifier.ACVoltagePP);
% A

rectifier.maxLVal = 0.95*((rectifier.DCVoltage*0.5)-
rectifier.ACVoltagePP*sqrt(2/3))/(2*pi*rectifier.SystemFrequency*rectifier.acCurr
ent); % H
rectifier.maxACcurrent = 100; % A
rectifier.minACcurrent = -100; % A
rectifier.maxACVoltage = 515; % V
rectifier.minACVoltage = -515; % V
rectifier.minDCVoltage = 0.5*rectifier.DCVoltage; % V

rectifier.lineInductance = 0.1e-3; % H
rectifier.lineResistance = 20e-3; % ohm
```

Anexos

```
rectifier.lineT = rectifier.lineInductance/rectifier.lineResistance; % s
rectifier.OutputCapacitance = 20e-3; % F
rectifier.a = 2; % constant

rectifier.VoltageSensorG = 1; % constant
rectifier.VoltageSensorT = 1/(10*rectifier.SwitchFrequency); % s
rectifier.CurrentSensorG = 1; % constant
rectifier.CurrentSensorT = 1/(10*rectifier.SwitchFrequency); % s
rectifier.G = rectifier.DCVoltage/2; % constant
rectifier.K = rectifier.ACVoltagePeak/rectifier.DCVoltage; % constant
rectifier.Td = 1/(2*rectifier.SwitchFrequency); % s
rectifier.Tphi = rectifier.Td + rectifier.CurrentSensorT; % s
rectifier.Tdel = (2*rectifier.Tphi) + rectifier.VoltageSensorT; % s

rectifier.controller.CurrentG = rectifier.lineInductance/...
    (2*rectifier.G*rectifier.CurrentSensorG*rectifier.Tphi); % constant
rectifier.controller.CurrentT = rectifier.lineT; % s
rectifier.controller.VoltageG = (rectifier.OutputCapacitance...
    *rectifier.CurrentSensorG)/...
    (rectifier.K*2*rectifier.VoltageSensorG*rectifier.Tdel); % constant
rectifier.controller.VoltageT = 4*rectifier.Tdel; % s
```

DC-DC Converter

```
inverter.SwitchFrequency = 10e3; % Hz
% inverter.controller.kp = 2; % constant
% inverter.controller.ki = 1; % constant
% inverter.inductance = 10e-6; % H
% transformer.magnetizingL = 1; % H
% transformer.windingFactor = 0.5; % constant
% chopper.VoltageSensorG = 1; % constant
% chopper.VoltageSensorT = 1/(10*inverter.SwitchFrequency); % s
% chopper.CurrentSensorG = 1; % constant
% chopper.CurrentSensorT = 1/(10*inverter.SwitchFrequency); % s
```

Battery Pack

```
battery.currentReference = 180; % A
battery.initialSOC = 0.2; % constant
battery.AHRating = 50; % Ah
battery.inductance = 5e-3; % H
battery.cellsInSeries = 100; % constant
battery.batteryStringsInParallel = 2; % constant
```

Simulation Time

```
simulation.numberofCycles = 0.1; % constant
simulation.simTime = simulation.numberofCycles/rectifier.SystemFrequency; % s
```

Front-End Converter Variants

In front-end converter, three inverter configurations are implemented.

```
% 1. Average - Used when model fidelity level do not require switching.
% This is mainly used in the linearization of the solar PV system.
% Variant name/expression - Average
% Variant Condition - powerCircuit == 0
average=Simulink.Variant(' powerCircuit == 0 ');
% 2. Two level three-phase inverter
% Variant name/expression - Two Level
% Variant Condition - powerCircuit == 1
twoLevel=Simulink.Variant(' powerCircuit == 1 ');
% 3. Three Level three-phase inverter
% Variant name/expression - discrete
% Variant Condition - powerCircuit == 2
threeLevel=Simulink.Variant(' powerCircuit == 2 ');
% Variable powerCircuit = 0 for Average, powerCircuit = 1 for Two Level
% and powerCircuit = 2 for Three Level inverter

% Select the Required Power circuit
powerCircuit=0;
```


Apéndices



an Open Access Journal by MDPI



CERTIFICATE OF ACCEPTANCE



The certificate of acceptance for the manuscript (**eng-3870354**) titled:
An Overview of Level 3 DC Fast Chargers: Technologies, Topologies, and Future Directions

Authored by:

Alan Yabin Hernández Ruiz; Susana Estefany De León Aldaco; Jesús Aguayo Alquicira; Mario Ponce Silva;
Omar Rodríguez Benítez; Eligio Flores Rodríguez

was accepted in *Eng* (ISSN 2673-4117) on 29 September 2025



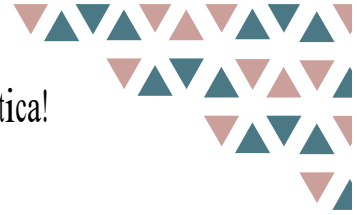
Basel, September 2025

Stefan Tochev
Chief Executive Officer

Apéndices



¡ transición energética!



El Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México, otorga el presente reconocimiento

a: **Ing. Alan Yabin Hernández Ruiz**

por la presentación del trabajo de investigación en modalidad de presentación oral

Panorama de la electromovilidad en mexico y los retos de su adopción

en la décima primera edición del Congreso Nacional de Estudiantes de Energías Renovables (CNEER) 2024 celebrado los días 25, 26 y 27 de septiembre de 2024 en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM.

Ing. Alan Juan de la Rosa Albino
Coordinador Patrocinios
CNEER 2024

Dr. Ángel Manuel Gómez Coronel
Coordinador de Editorial
CNEER 2024

Ing. Ximena Martínez Vite
Coordinadora de Logística
CNEER 2024

Dr. Alejandro Pacheco
Concursos
CNEER 2024







Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

Alan Yabín Hernández Ruiz

TecNM/CENIDET

Por haber asistido y acreditado el curso: "Microcontroladores (PICs y aplicaciones)", impartido a estudiantes del CENIDET, del 05 al 16 de agosto de 2024, con una duración de 30 horas.

Cuernavaca, Morelos, 16 de agosto de 2024



HRA038324

<http://constancias.cenidet.secmex.mx>

LORENZO O. HERNÁNDEZ

**DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

Sello Digital:

byna3CzcSeK/yb3XIViAY3EanQJGFI7WQcMWDjqYUteGLcQJENh+P3eSE12y7pEagL8V7u8uLXhh3N3p3FFeNY
zdi3CndAyJRe13K3uJasCP81Dgdy9Gf7D7YueN1L3eWpFIDm24LldY+5QDe17ia2PcYHs2cF3H3h31ag77cDp
KWi0yNFjErlau+3D1ahSi4FWS1L748L3XW8a8pM4rstQon2P3cinA3hCfGqTq3MNFj357AD3G9u3H3E31a1F4ND
LiQv8N/ugf8TF+htuqTZAca18F8NDV8Kd96aGey/JT0hNXJq33nQml7c3PumX8CE3exp3eCEJdU/TE1eY08e=

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Apéndices



CERTIFICATE OF COMPLETION

This is to certify that

Alan Yabin Hernandez Ruiz

has completed

Power Electronics for Electric Vehicle Battery Charging by Thiago Batista Soeiro

10 September 2024

1 Professional Development Hours

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Rabab M. Ward".

Rabab M. Ward,
IEEE Vice President, Educational Activities



PDH

IEEE CONTINUING EDUCATION

New York State Sponsor Number 117
Florida Provider Number 0003849



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE TLALPAN

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TLALPAN
OTORGA LA PRESENTE**

CONSTANCIA

A

ALAN YABIN HERNÁNDEZ RUÍZ

**POR SU PARTICIPACIÓN COMO PONENTE DE
LA CONFERENCIA:**

**"PANORAMA DE LA ELECTROMOVILIDAD EN MÉXICO LOS
RETOS DE SU ADOPCIÓN"**

**IMPARTIDA EN LAS INSTALACIONES DEL PLANTEL, EN EL
CICLO DE CONFERENCIAS**

**ENERGÍAS RENOVABLES: INGENIERÍA INNOVANDO
PARA UN FUTURO SOSTENIBLE.**

DEL 8 AL 10 DE OCTUBRE DE 2024.

CIUDAD DE MÉXICO, A 10 DE OCTUBRE DE 2024


MARGARITA RAMÍREZ BRAVO
DIRECTORA





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

Alan Yabin Hernández Ruiz

TecNM/CENIDET

Por su valioso y generoso apoyo en la impartición del curso: "Programación FPGA (Field Programmable Gate Array)", con una duración de 30 horas, impartido a estudiantes y personal del CENIDET, del 17 al 28 de junio de 2024. TNM-123 XXXXXXXXX

Cuernavaca, Morelos, 16 de agosto de 2024



HRA037224

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

LORENZO O. HERNÁNDEZ
DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Señal Digital:

QU/ARXNPwt3etTQe./WbStlaNagQVSOZLEUJFbaZnhew4bW13ftaJaa3XJjEeQVFTbFj/ZedyhtDaR/YGhkaRgy
pmf+2m4NvoTGuLxX3AIDMDw7XZJF+S+1jK34OCwStigPyEN531wa8g8nPodr1LGFTJwB3XUyJa2ue3JADvde4T
G+R0ag1Ch1CJu3et2qT2w+3Aap2Va0GoraSDChDeFTanJad+wCE7uDebsY3B8m/TK8eAdfeJWNYfg7NpIND0eD
hpf2eT1LFFPfaU/AD+bc3RURJvIFgQKara3u8DeFJcFTBZaka8318ChNW+NC2AYWPa4eRo+3AAQ0xRRVQgQ==

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico





CERTIFICATE OF COMPLETION

This is to certify that

Alan Yabin Hernandez Ruiz

has completed

**A Review on High Power Density DC-DC Converters for Electromobility
Applications by Ismael Araujo-Vargas**

6 January 2025

1 Professional Development Hours

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Timothy Kurzweg'.

Timothy Kurzweg
IEEE Vice President, Educational Activities



PDH
IEEE CONTINUING EDUCATION

New York State Sponsor Number 117
Florida Provider Number 0003849



CERTIFICATE

PROUDLY PRESENTED TO

Alan Yabin Hernandez Ruiz

A Review on High Power Density DC-DC Converters for Electromobility Applications
by Ismael Araujo-Vargas

Dec 19, 2024

Date of Completion

IEEE PELS

Organizer

