

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Departamento de Ingeniería Eléctrica**



**SIMULACIÓN DE CARGADOR COMPACTO DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS  
PARA OPERACIÓN EN REDES TRIFÁSICAS Y CAPACIDAD  
VEHICLE-TO-GRID**

**Emilio Fernando Contreras Boulet**

Profesor Guía: Matías David Díaz Díaz

Trabajo de Titulación presentado en conformidad  
a los requisitos para obtener el Título de Ingeniero  
de Ejecución en Electricidad

Santiago – Chile  
2020

© **Emilio Fernando Contreras Boulet**, 2020



· Algunos derechos reservados. Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartir Igual 3.0. Sus condiciones de uso pueden ser revisadas en: <<http://creativecommons.org/licenses/bync-sa/3.0/cl/>>.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer en primer lugar al profesor Matías Díaz, por su paciencia, comprensión y apoyo constante. A mi compañero, amigo y colega Christopher Ortega con el cual tomamos este desafío y ha sido un tremendo apoyo durante este proceso. A mis hijos por su comprensión y a quienes han sido lo mas importante dentro de todo este proceso, mis padres y hermana; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron constantemente para alcanzar mis sueños.

**Gracias Fernando, Patricia y Sylvana, mis pilares.**

**TÍTULO:** Simulación de cargador compacto de vehículos eléctricos para operación en redes trifásicas y capacidad Vehicle-to-Grid.

**CLASIFICACIÓN TEMÁTICA:** Electrónica de potencia; Vehículos eléctricos – Baterías; Sistemas de control.

**AUTOR:** Contreras Boulet, Emilio Fernando

**CARRERA:** Ingeniería de Ejecución en Electricidad

**PROFESOR GUÍA:** Díaz Díaz, Matías David

**AÑO:** 2020

**CÓDIGO UBICACIÓN BIBLIOTECA:** **2020 / P / 004**

### **RESUMEN**

El presente proyecto de título realiza estudios a un Cargador Compacto de Vehículos Eléctricos (CCVE), para tal efecto se ha evaluado, contrastado y sometido a simulaciones de carga y/o descarga aplicando una topología configurada con dos convertidores de potencia, para comprobar la rectificación del voltaje alterno en continuo con AC/DC y un DC/DC que permite controlar corriente y tensión constante, en ambos casos con módulos semiconductores IGBTs.

El desarrollo de pruebas ha permitido comprobar el comportamiento de la topología y definir el CCVE con una cantidad acotada de componentes, consiguiendo dar respuesta al perfil de carga necesario para el suministro de energía a un modelo electroquímico equivalente de batería de Ion Litio, con etapas de corriente a tensión constante y flexible, que permite establecer potencia bidireccional para aplicación Vehicle-to-Grid, respondiendo en forma eficiente a la operación de carga de un Vehículo Eléctrico.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>Índice de Tablas</b>	<b>v</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>vi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Origen y necesidad . . . . .	1
1.2 Descripción del problema . . . . .	2
1.3 Objetivos . . . . .	2
1.3.1 Objetivo general . . . . .	2
1.3.2 Objetivos específicos . . . . .	2
1.4 Desarrollo y alcances . . . . .	3
1.5 Aporte personal . . . . .	3
<b>2 Estado del Arte</b>	<b>5</b>
2.1 Introducción . . . . .	5
2.2 La electromovilidad y los vehículos eléctricos . . . . .	6
2.3 Electromovilidad en Chile . . . . .	7
2.3.1 Estaciones de carga en Chile . . . . .	8
2.4 Infraestructuras de carga . . . . .	8
2.4.1 Mercado de los cargadores eléctricos conductivos . . . . .	8
2.4.2 Modos de carga . . . . .	11
2.5 Topología de cargadores externos de alta potencia . . . . .	13
2.5.1 Etapa de rectificación AC/DC . . . . .	14
2.5.2 Zona de convertidor DC/DC de alta potencia . . . . .	16
2.5.3 Cuatro cuadrantes de operación de convertidores de potencia . . . . .	18
2.6 Principios básicos de baterías en vehículos eléctricos . . . . .	20
2.6.1 Características técnicas, carga y descarga de baterías de Ion Litio . . . . .	20
2.6.2 Modelo electroquímico equivalente de una batería de Ion Litio . . . . .	21
<b>3 Modelo y control del CCVE de carga rápida</b>	<b>23</b>
3.1 Introducción . . . . .	23
3.2 Topología general del CCVE propuesto . . . . .	23
3.3 Modelamiento del CCVE . . . . .	24
3.3.1 Modelamiento rectificador trifásico . . . . .	24
3.3.2 Modelamiento convertidor medio puente . . . . .	32

<b>4 Simulación del CCVE</b>	<b>34</b>
4.1 Introducción . . . . .	34
4.2 Etapa de potencia del CCVE propuesto . . . . .	34
4.3 Etapa de control del CCVE propuesto . . . . .	35
4.3.1 Estrategia de control rectificador AC/DC . . . . .	36
4.3.2 Estrategia de control del convertidor DC/DC . . . . .	38
<b>5 Resultados Obtenidos</b>	<b>40</b>
5.1 Introducción . . . . .	40
5.2 Parámetros rectificador trifásico . . . . .	40
5.3 Prueba 1: Carga resistiva . . . . .	41
5.4 Prueba 2: Carga batería Ion Litio . . . . .	43
5.5 Prueba 3: Aplicación Vehicle-to-Grid . . . . .	45
<b>6 Conclusiones</b>	<b>47</b>
6.1 Conclusión general . . . . .	47
6.1.1 Conclusiones específicas de los casos estudiados . . . . .	48
6.1.2 Conclusiones generales . . . . .	49
6.2 Trabajos futuros . . . . .	50
<b>Referencias</b>	<b>51</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Principales marcas de cargadores a nivel mundial. . . . .	9
Tabla 2.2	Resumen de los modos de carga. . . . .	12
Tabla 2.3	Cuatro cuadrantes de operación de convertidores. . . . .	19
Tabla 3.1	Frecuencias de control $w_n$ . . . . .	26
Tabla 3.2	Datos para diseño de PI de corriente en <i>Matlab</i> para etapa AC/DC. . . . .	29
Tabla 3.3	Datos para diseño de PI de tensión en <i>Matlab</i> para etapa AC/DC. . . . .	30
Tabla 3.4	Datos para diseño de PI de corriente en <i>Matlab</i> para etapa DC/DC. . . . .	33
Tabla 3.5	Datos para diseño de PI de tensión en <i>Matlab</i> para etapa DC/DC. . . . .	33
Tabla 5.1	Parámetros del rectificador trifásico para las tres pruebas. . . . .	41
Tabla 5.2	Parámetros de componentes de prueba 1 con carga resistiva. . . . .	41
Tabla 5.3	Parámetros de componentes de prueba 2 con modelo batería Ion Litio. . . . .	43
Tabla 5.4	Parámetros de componentes de prueba 3 bidireccional. . . . .	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Topología de conexión general para carga AC y DC de un VE. . . . .	6
Figura 2.2. Modos de carga de cargadores eléctricos. . . . .	11
Figura 2.3. Estructura general de un cargador de batería externo. . . . .	13
Figura 2.4. Arquitecturas de estaciones de carga. . . . .	14
Figura 2.5. Rectificador trifásico de fuente de voltaje de dos niveles. . . . .	15
Figura 2.6. Rectificador Viena conectado a la red. . . . .	15
Figura 2.7. Rectificador de pulsos múltiples con filtro de potencia activa de DC. . . . .	16
Figura 2.8. Convertidor Buck intercalado multicanal no aislado. . . . .	17
Figura 2.9. Convertidor de puente completo ZVS con cambio de fase. . . . .	17
Figura 2.10. Convertidor resonante LLC de medio puente. . . . .	17
Figura 2.11. Convertidor DC/DC Dual Active Bridge. . . . .	18
Figura 2.12. Perfil de carga de cuatro etapas para una batería de Ion Litio. . . . .	21
Figura 2.13. Modelo de baterías de Ion Litio basado en el modelo Thevenin Runtime. . . . .	22
Figura 3.1. Topología general de CCVE. . . . .	24
Figura 3.2. Topología de rectificador trifásico. . . . .	24
Figura 3.3. Esquema de control front-end en rectificador trifásico. . . . .	26
Figura 3.4. Esquema lazo DC-Link con perturbación. . . . .	28
Figura 3.5. Circuito equivalente planta de corriente. . . . .	29
Figura 3.6. Circuito equivalente planta de tensión. . . . .	30
Figura 3.7. Esquema lazo anidado con PIs del rectificador. . . . .	31
Figura 3.8. Topología de convertidor medio puente. . . . .	32
Figura 3.9. Circuitos equivalentes planta I-V convertidor DC/DC. . . . .	32
Figura 3.10. Control anidado de controladores PI de tensión y corriente. . . . .	33
Figura 4.1. Etapa de potencia del rectificador AC/DC. . . . .	35
Figura 4.2. Etapa de potencia del convertidor DC/DC. . . . .	35
Figura 4.3. Etapa de control del CCVE. . . . .	36
Figura 4.4. Esquema de control front-end en rectificador trifásico. . . . .	36
Figura 4.5. Lazo anidado de sistema de control tensión y corriente. . . . .	37
Figura 4.6. Etapa de modulación PWM del rectificador trifásico. . . . .	37
Figura 4.7. Control anidado de controladores PI de tensión y corriente. . . . .	38
Figura 4.8. Estrategia de control para I-V constante asumiendo perfil de carga de batería de Ion Litio. . . . .	38

Figura 4.9. Etapa de modulación PWM del convertidor DC/DC. . . . .	39
Figura 5.1. Circuito de prueba 1 con carga resistiva. . . . .	41
Figura 5.2. Respuesta del CCVE de la prueba 1 con carga resistiva. . . . .	42
Figura 5.3. Respuesta del CCVE para la prueba 2 batería Ion Litio: corriente y tensión. . .	43
Figura 5.4. Respuesta del CCVE para la prueba 2 batería Ion Litio: SoC y potencia. . .	44
Figura 5.5. Respuesta del CCVE de la prueba 3 con operación bidireccional. . . . .	46

# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 ORIGEN Y NECESIDAD

La electricidad es protagonista esencial en los procesos de modernización, estableciendo redes de gran impacto en el suministro energético para un significativo número de artefactos tecnológicos en la industria y recientemente en la electromovilidad. Las transformaciones que a diario ocurren en el planeta han convertido la electricidad en el icono de la modernización, debido a la adopción de su diversa empleabilidad, siendo fundamental el inmenso campo que abastece a equipos eléctricos, aumentando exponencialmente la instalación de generadoras y producción de electricidad a menor costo, permitiendo accesibilidad y en consecuencia mayor aplicación en equipos domiciliarios, industriales, médicos, transporte, etc. Sin embargo, en Chile la energía aún proviene fundamentalmente de combustibles fósiles como el carbón, gas natural y petróleo [1], lo que conlleva un gran impacto ambiental, en el marco del fenómeno que preocupa a la humanidad sobre el cambio climático y sus efectos nocivos a nivel planetario, situación abordada en el Acuerdo de París a partir del año 2015 [2], estableciendo un plan de Acción Mundial que pone límite al calentamiento global, que requiere al menos el 20 % de todos los vehículos por carretera de todo el mundo sean impulsados eléctricamente para el año 2030, siendo fundamental el desarrollo de la electromovilidad para disminuir las emisiones del transporte, con el propósito de reducir la vulnerabilidad a los efectos adversos al cambio climático.

Chile no está ajeno a la implementación de esta energía limpia que viene aumentando su inserción en el transporte público y privado, impulsada por la estrategia nacional de electromovilidad [3], que tiene como meta alcanzar una matriz 100 % eléctrica en el transporte

público urbano y un 40 % de vehículos Eléctricos (en adelante VE) particulares al año 2050, lo cual supone una gran incidencia en la red eléctrica.

Esta proyección, además de los avances en electromovilidad, permiten ratificar la necesidad de desarrollo de infraestructura de carga rápida que permita suministrar energía en un tiempo acotado hacia un VE en forma segura y eficiente.

## **1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Frente al desarrollo de electromovilidad producido por la necesidad de establecer una alta inserción de VEs, ha implicado desafíos al sistema eléctrico, por lo cual, se ha considerado tener en cuenta que el suministro de energía debe ser en tiempos reducidos, eficientes, seguros y que posean infraestructura de carga con altos niveles de potencia; estas observaciones se constituyen en la base para establecer qué topología de carga es óptima para realizar este trabajo y cuáles son los elementos entre el VE y la red eléctrica [4] que deben intermediar, opciones que hoy no solo transfieren energía desde la Red hacia el VE, sino también de forma inversa, concepto denominado Vehicle-to-Grid (en adelante V2G) [5], los cuales consideran los niveles de corriente, tensión y potencia para cumplir con el perfil de carga de un banco de baterías de Ion Litio [6], siendo este tipo de tecnología el más utilizado en los VEs [7].

En consecuencia, en este trabajo se plantea analizar una topología de Cargador Compacto de Vehículos Eléctricos (en adelante CCVE), que pueda brindar suministro eléctrico hacia y desde la batería del VE, para proporcionar servicios V2G.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo general**

Desarrollar simulación de etapas de potencia y control de Cargador Compacto de Vehículos Eléctricos con capacidad V2G para operación en redes trifásicas.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Estudiar el estado del arte en electromovilidad en Chile y el mundo, vehículos eléctricos e infraestructura de carga.
- Definir etapas de control y potencia para CCVE con conexión a redes trifásicas y habilitación de capacidades V2G.

- Desarrollar simulación CCVE para conexión en redes trifásicas y habilitación de capacidades V2G en software *Plecs*.
- Validar operación del CCVE propuesto en modos de carga de corriente constante, tensión constante y operación para servicios V2G.

#### **1.4 DESARROLLO Y ALCANCES**

En una primera etapa se revisa la bibliografía en electromovilidad, para definir la topología del CCVE que reduce la cantidad de componentes eléctricos, con aplicación bidireccional que contempla operación en dos cuadrantes con corriente bipolar. Debido a la importancia de los acumuladores electroquímicos este proyecto de título incorpora una guía de recomendaciones para la carga/descarga de baterías de Ion Litio y define el sistema de control y topología necesaria para el CCVE.

El cargador se simula en el software *Plecs* contemplando potencia y control, además en el mismo software se realizan pruebas que simulan la operación de carga, descarga y servicio bidireccional de potencia, por lo que se hace necesario establecer que el proyecto se restringe solo a la etapa de simulación.

Los alcances de este trabajo consideran validar el CCVE en 3 etapas de operación: la primera corresponde a carga de Corriente Constante (Grid-following o feeding), luego carga de Tensión Constante (Grid-forming) y finalmente la etapa de Terminación de Carga. Complementariamente se realizan pruebas bidireccionales para comprobar que el CCVE logre trabajar en V2G.

Se hace presente que este trabajo no aborda los siguientes desarrollos:

- Implementación del CCVE.
- Análisis acabado de modelos electroquímicos de baterías.
- Análisis V2G considerando la dinámica de la Red.
- Dimensionamiento y análisis de pérdidas de los dispositivos semiconductores.
- No se dimensiona el transformador de aislación de manera detallada.

#### **1.5 APORTE PERSONAL**

El aporte personal considera entregar a la comunidad académica la documentación comprometida con este proyecto de título al Departamento de Ingeniería Eléctrica de la

Universidad de Santiago de Chile, área académica del departamento y el centro de investigación E2Tech para su libre disposición, en la cual se encuentran los siguientes antecedentes:

- Descripción general actualizada de Chile y el mundo con respecto a la electromovilidad.
- El desarrollo de un modelo de control y potencia para un cargador compacto de vehículos eléctricos.
- Publicación de la nota “Usach prepara pruebas Vehicle-to-Vehicle para transferencia de energía entre VEs”, en conjunto con el docente Matías Díaz Díaz del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Usach, para el portal “Electromov”.
- Publicación de la nota “El rol de la Electrónica de Potencia en la electromovilidad”, en conjunto con alumnos y el docente Félix Rojas Lobos del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Usach, para el portal “Electromov”.

## CAPÍTULO 2

---

### ESTADO DEL ARTE

---

#### 2.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se aborda el Estado del Arte de los cargadores eléctricos, como ha sido la transición de los cargadores rápidos dentro del contexto de electromovilidad, el avance que existe y como se proyecta dentro de los próximos años.

Los cargadores eléctricos en la inserción de VEs son fundamentales para abastecer de carga en distancias cortas y tiempos acotados. Por tanto es importante conocer los alcances técnicos de carga y descarga de los bancos de baterías, debido a la importancia del perfil de carga adecuado que se suministra bajo estrictos sistemas de seguridad, control y protección.

A continuación se presenta una descripción general de los temas que se abordan en este capítulo:

- La electromovilidad y los vehículos eléctricos.
- Electromovilidad en Chile.
- Infraestructuras de carga.
- Topología de cargadores externos.
- Principios básicos de los acumuladores de energía.

## 2.2 LA ELECTROMOVILIDAD Y LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

La electrificación del transporte público y privado se ha masificado con el fin de dar respuesta al cambio climático disminuyendo las emisiones de CO<sub>2</sub> [8] alineado con lo establecido en el Acuerdo de París del 2015 [2], que ha propuesto como objetivo de transición de un 20% VE para el año 2030 [9], es decir un 13,4% con respecto al total de Vehículos a nivel mundial, disponiendo de a lo menos 500 modelos a partir del año 2022 que generarán apertura y accesibilidad, creando competitividad en precios con respecto a los de combustión interna, sumado a políticas públicas de mayor accesibilidad a puntos de carga de mayor eficiencia y desarrollo tecnológico, para disminuir los costos de fabricación de VEs.

Ahora bien, los VEs deben considerar componentes de Electrónica de Potencia (EDP) para cargar sus bancos de baterías que contemplan 2 tipos de configuraciones [4]:

- **Cargadores Internos:** La EDP se encuentra mayormente en el interior del vehículo que contempla un convertidor AC/DC de Corriente Alterna (en adelante AC).
- **Cargadores Externos:** El convertidor de EDP se encuentra en el exterior y considera Corriente Continua (en adelante DC).

Se consideran alternativas de corriente AC, con cargadores a bordo, cuando se conectan hacia el puerto AC del VE según Figura 2.1, la EDP interna del vehículo tiene restricciones, en cuanto a componentes de volumen reducido que no eleve el costo del VE y sobretodo que contemple seguridad en el momento de carga. Por otro lado, si se consideran cargadores de corriente DC, el punto de carga hacia el VE es el conector DC y en ese caso se incluye toda la EDP en una estación de carga externa.

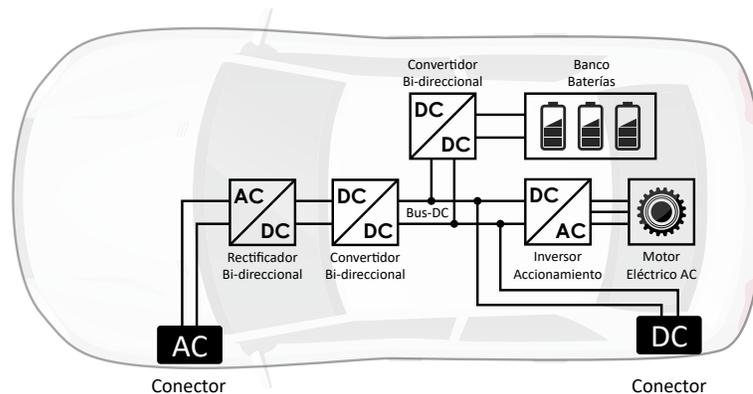


Figura 2.1. Topología de conexión general para carga AC y DC de un VE. Basado en cita [4].

Esta área ha crecido y se desarrolla con bastante velocidad [8, 10] para que los equipos resuelvan la carga en tiempo más acotado con altos niveles de seguridad en cuanto a

protecciones y múltiples configuraciones, proyectando cargas inteligentes elaboradas desde el concepto de Smartcity [11], que no solo contempla la carga hacia el VE, sino también de manera inversa hacia la red eléctrica, concepto denominado V2G [5].

## **2.3 ELECTROMOVILIDAD EN CHILE**

El año 2017 el gobierno chileno publicó la estructura de desarrollo del “Plan de Mitigación de GEI (Gases de Efecto Invernadero)” [12] y la “Estrategia Nacional de Electromovilidad” [3], impulsadas por los Ministerios de Energía, de Transportes y Telecomunicaciones y del Medio Ambiente. Luego en el año 2018 el Ministerio de Energía estableció la “Ruta Energética 2018-2022” [13], que contiene el compromiso de “avanzar decididamente en el desarrollo de la electromovilidad en Chile, de manera que al 2022 se cuente con al menos 10 veces más VE en nuestras calles”. El plan estableció como metas en el eje de Transporte Eficiente que al 2050 el 40% de los vehículos particulares y el 100% de los vehículos de transporte público sean eléctricos.

La electromovilidad está presente en la ruta energética, impulsada en el transporte eficiente, mediante estrategias para la regulación y estándares de desarrollo óptimo para la integración de VEs, fomentando la incorporación de normas de seguridad de la infraestructura de carga e interoperabilidad de los sistemas de carga y sistemas de comunicación asociados, entre otros. Las transformaciones más complejas han sido un ejemplo dentro del desarrollo y tienen a Chile entre las grandes potencias a nivel mundial del mercado de VE [9], debido a la gran implementación de buses eléctricos en el sistema de transporte público y electrolíneas, logrando tener un avance en Mayo del 2020 de 127 puntos de carga públicos y un parque de 1265 vehículos [10], que contemplan: 2 camiones, 18 buses interurbanos, 432 buses urbanos y 813 vehículos livianos y medianos.

Es importante destacar que se han establecido incentivos para el desarrollo e investigación de cargadores eléctricos que no solo puedan suministrar energía hacia la red, sino que también cumplan con el modo inverso, por lo anterior, en Julio del año 2019 se inauguró el primer cargador bidireccional para vehículos eléctricos en Latino América [14], contemplando tecnología V2G desarrollada por la Agencia SE apoyada por el Ministerio de Energía, con la colaboración de Enel X y Nissan, en el marco del Acuerdo Público Privado de Electromovilidad, complementado con la instalación de un sistema solar de 3 kW de potencia y un vehículo eléctrico Nissan LEAF que cuenta con una batería de 40 kWh.

### **2.3.1 Estaciones de carga en Chile**

La infraestructura de carga ha visto un fuerte aumento de electrolinerías durante el año 2019, que proveen energía de recarga a las baterías de VE de forma rápida y segura, mediante una inversión de más de 1000 millones de pesos y una alianza con Copec, convirtieron a Santiago en la región con la red de carga eléctrica pública más grande de Sudamérica, interconectando los extremos norte y sur del país [15].

Cabe destacar que según la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), la electromovilidad en Chile cuenta con una infraestructura operativa en 12 regiones, que corresponden a 104 puntos de carga a vehículos particulares y seis terminales de buses eléctricos ubicadas en la Región Metropolitana [16]. Cada instalación disponible puede tener hasta 3 conectores, como es el caso de los cargadores Voltex, en las estaciones Copec, con dos salidas de corriente continua y una de corriente alterna, de las cuales 122 puntos son de carga lenta AC y 27 de carga rápida DC.

## **2.4 INFRAESTRUCTURAS DE CARGA**

Las infraestructuras de carga o cargadores eléctricos, son de 2 tipos [4]; Conductivo e Inductivo. El primer caso utiliza un contacto eléctrico para poder transferir energía hacia las baterías, clasificados como cargadores lentos y rápidos. En el segundo caso se utilizan bobinas primarias, que se puede encontrar en el suelo, y una bobina secundaria en el lado de la superficie inferior del VE, transfiriendo de forma inalámbrica a través del acoplamiento de campo magnético, de esta forma se eliminan cables y conectores. La transferencia de energía de forma inalámbrica suele ser menos eficiente.

### **2.4.1 Mercado de los cargadores eléctricos conductivos**

En el mercado de cargadores conductivos podemos encontrar una variada gama, según un reporte del 2018 de Reserachs Markers [17], estos deben tener un crecimiento significativo de USD \$5,3 mil millones en 2018, llegando a USD \$30,41 mil millones en el 2023. Las empresas claves que operan en el mercado de estaciones de carga de vehículos eléctricos se incluyen: ChargePoint (EE.UU.), ABB (Suiza), Tesla (EE.UU.), Engie (Francia), AeroVironment (EE.UU.), Schenider Electric (Francia), Siemens (Alemania), Efacec (Portugal), EVgo (EE.UU.), Leviton (EE.UU.), Alfen (Países Bajos), Allego (Países Bajos), Blink Charging (EE.UU.), Clipper Creek (EE.UU.), SemaConnect (EE.UU.), TGOOD (Honk Kong). En tabla 2.1 se presenta las

especificaciones técnicas de los cargadores eléctricos de VEs de las principales marcas a nivel mundial.

Los cargadores eléctricos tienen diferentes etapas de carga en sus convertidores, arquitecturas del tipo AC/AC para niveles de potencias más bajas y AC/DC para potencias altas de cargas (Fastcharger) o súper-cargas (Supercharger). En los niveles de potencia más bajo, encontramos los niveles 1 y 2, los cuales en la mayoría de los casos son cargadores inteligentes con entrada 220 V AC y salida 220 V AC, estos son conectados al vehículo con un monitor para mantener un control visual del estado de carga de las baterías fuera del vehículo y dependen del convertidor AC/DC, para establecer los flujos de potencia para cargar el banco de baterías.

Tabla 2.1. Principales marcas de cargadores a nivel mundial y especificaciones técnicas generales. Basado en cita [17, 18].



	ChargePoint- EE.UU.			ABB- Suiza			Tesla- EE.UU.	
	CT 4000 Family	CPF 50 Family	Express 250	Terra AC Wallbox	DC Wallbox	Terra 54	Wallbox	Supercharger
Nivel SAE J1772	2	2	3	2	2	3	2	3
Conexión	1 $\phi$	1 $\phi$	3 $\phi$	1 $\phi$	3 $\phi$	3 $\phi$	1 $\phi$ -3 $\phi$	3 $\phi$
<b>Conexión Entrada - opción 1 (AC)</b>								
Voltaje (V)	208/240	208/240	400	110/240	400	400	230	277/480
Corriente (A)	40	80	96	-	40	277	32	250
<b>Conexión Entrada - opción 2 (AC)</b>								
Voltaje (V)	-	-	480	-	-	-	400	-
Corriente (A)	-	-	80	-	-	-	32	-
<b>Salida niveles de Potencia - opción 1</b>								
Potencia (kW)	7.2	12	62.5	7.7	24	160	2.8	250
Voltaje (V)	240 AC	240 AC	200/1000 DC	240 AC	150/920 DC	150/920 DC	180/264 AC	-
Corriente (A)	30	50	156	32	60	375	16	-
<b>Salida niveles de Potencia - opción 2</b>								
Potencia (kW)	3.8	-	125	-	-	350 (L.C.)*	22	-
Voltaje (V)	240 AC	-	200/1000 DC	-	-	150/920 DC	400 AC	-
Corriente (A)	16	-	200	-	-	500 (L.C.)*	32	-
<b>Tipos de conectores</b>								
SAE J1772 (Jap.- Ame.)	1 o 2	1 o 2	-	1	-	-	Tesla Connect	-
CHAdeMO (Japon)	-	-	US: 140 EU: 125 A	-	1 o 2	1 o 2	-	1 o 2
CCS1 (America)	-	-	174 a 200 A	-	-	-	-	1 o 2
CCS2 (UE- Mundo)	-	-	200 A	-	1 o 2	1 o 2(L.C.)*	-	-

(\*) L.C.: Liquid Cooler - Enfriamiento por líquido.

En el nivel 3 de carga la mayoría de los cargadores externos contemplan una arquitectura

de conversión AC/DC fuera del vehículo y un conector al vehículo de entrada DC con salida DC directa al banco de baterías, en los cuales la etapa de control de flujo de potencia se realiza fuera del VE, logrando llegar a niveles de carga muy elevados, encontrando cargadores con aproximadamente 250 kW de potencia, como es en el caso del Tesla Supercharger.

Las tres marcas de cargadores eléctricos indicados en la Tabla 2.1 disponen de niveles de carga 2 y 3, suprimiendo el nivel 1, ya que este tipo de conector se incluye en la compra del vehículo, en tanto el análisis de mercado de cargadores eléctricos contempla la compra de un equipo adicional para minimizar los tiempos de carga.

En el nivel 2 de carga se pueden ver cargadores del tipo Wallbox, que son equipos de dimensiones y pesos medios (medidas aprox. de los equipos 50x40x40 cm – 70 kg contemplando el equipo, cable de alimentación y conector) empotrados a una muralla, control en pantallas LCD integradas en la mayoría de los equipos y con sistemas de comunicación wifi (GMS-3G). Los niveles de potencia varían según la cantidad de corriente que se puede suministrar, pudiendo lograr desde 2.8 kW como lo puede hacer el Wallbox de Tesla hasta 24 kW como se logra en DC Wallbox de ABB.

En el nivel de carga 3, existe un cargador eléctrico mucho más complejo, la gran característica es la robustez de sus protecciones por los niveles de corriente que pueden llegar a utilizar. Se definen en este nivel cargadores con entrada 400 V AC 3 $\phi$ , con niveles de potencia DC que pueden llegar hasta 250 kW como es en el caso de Supercharger Tesla. La tecnología en este tipo de cargadores ha ido mejorando con gran rapidez. Se ha requerido en algunos casos reemplazar la refrigeración de inyección de Aire a Líquida (L.C.) por las altas temperaturas que se producen por el flujo de corriente. Cabe mencionar que los datos no obtenidos de la súper carga para el caso de Tesla, se debe a que la empresa solo menciona los niveles de potencia de salida en las especificaciones técnicas de este tipo de cargador.

Estos cargadores de Nivel 3 al ser un módulo externo del vehículo, contemplan componentes mucho más grandes y de mayor masa que en el nivel 2, el modulo completo llega a tener una masa aprox. de 145 kg (Express 250 – ChargePoint), por lo anterior la logística de instalación de este tipo de módulo requiere de una empresa o personas calificadas para la instalación y puesta en marcha del cargador.

Cada cargador eléctrico está regulado y estandarizado según normas de varias organizaciones, como en el caso de la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), la SAE International (Society of Automotive Engineers) y la IEC (International Electrotechnical Commission).

El estándar SAE J1772 [19], define las prácticas relacionadas con los métodos de carga, expuestos en los diferentes cargadores [19]: Nivel 1 AC, Nivel 2 AC y Nivel 3 AC, contemplando

niveles de carga rápida DC, que en algunos casos continúan en desarrollo.

En paralelo, la norma IEC 62196 [20], también conocida como CCS o COMBO, es un estándar internacional para el conjunto de conectores eléctricos y niveles de carga (Especialmente la carga rápida) para VEs que se mantiene por la IEC y que aborda parámetros muy similares a la SAE J1772, pero cumple con los estándares de la norma europea, que promueve los diferentes niveles de carga (Hasta 690 V AC y 1000 V DC).

Además de los estándares SAE e IEC, una asociación llamada CHAdeMO propuso un método de carga rápida como un estándar Global de la industria. El nombre CHAdeMO es una abreviatura de “CHArge de MOve”, que se traduce como “carga para moverse”. CHAdeMO fue formado por Tokyo Electric Power Company (TEPCO), Nissan, Mitsubishi y Fuji Heavy Industries. Toyota se unió como un quinto miembro ejecutivo. La salida máxima compatible con el protocolo CHAdeMO es de 500 V / 125 A, con una potencia que alcanza los 62,5 kW.

## 2.4.2 Modos de carga

Los modos de carga se configuran según las normas IEC 61851-1 — IEC 62752 [21], las cuales asimilan las Niveles de comunicación, seguridad y potencia.

Los modos de carga asimilados por las normativas antes señaladas, establecen 4 modos: Enchufe no dedicado (Modo 1), enchufe no dedicado con protección más control de carga (Modo 2), enchufe dedicado (Modo 3) y enchufe externo (Modo 4).

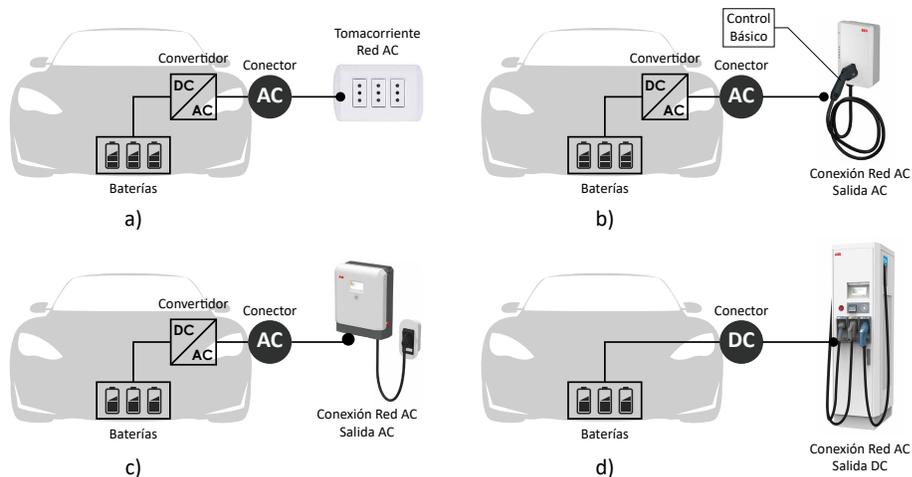


Figura 2.2. Modos de carga de cargadores eléctricos: a) Modo de carga 1, enchufe no dedicado. b) Modo de carga 2, enchufe no dedicado con protección y control de carga. c) Modo de carga 3, enchufe dedicado. d) Modo de carga 4, enchufe externo. Basado en cita [21].

A continuación, en la Tabla 2.2 se comparan los diferentes modos de carga con sus

principales características:

Tabla 2.2. Resumen de los modos de carga referidos a las normas IEC 61851-1 — IEC 62752. Basado en cita [21].

Características	Modos de Carga			
	1	2	3	4
Descripción general	Conducción conductiva a la red de suministro AC y un VE, sin comunicación o características de seguridad adicionales.	Conducción conductiva a la red de suministro AC y un VE, con comunicación o características de seguridad adicionales.	Conducción conductiva a la red de suministro AC y un VE, con comunicación o características de seguridad adicionales.	Conducción conductiva a la red de suministro AC o DC y un VE, con comunicación (de alto nivel) o características de seguridad adicionales.
Corrientes y Voltajes máximos	16 A y 250 V AC, 1 Fase. 16 A y 480 V AC, 3 fases.	32 A y 250 V AC, 1 Fase. 32 A y 480 V AC, 3 Fase.	32 A y 250 V AC, 1 Fase.  70 A y 250 V AC, 1 Fase. 63 A y 480 V AC, 3 Fases.  16/32 A y 250 V AC, 1f. 63 A y 480 V AC, 3 Fases.	AA: 200 A y 600 V DC BB: 250 A y 600 V DC EE: 200 A y 600 V DC FF: 200 A y 1000 V DC
Potencias Generales	< 3.5 kW	< 22 kW si es 3 $\phi$ . < 7 kW si es 1 $\phi$ .	Entre 3.5 kW a 43 kW.	Potencias mayores a 24 kW
Nivel de Seguridad	Depende de la instalación eléctrica de la cual se toma la energía.	Seguridad mínima que depende de la instalación eléctrica, pero existe comprobación de la conexión a tierra.	Mayor seguridad por que el gabinete del cargador tiene protecciones integradas.	Mayor seguridad por que el gabinete del cargador tiene protecciones integradas.
Nivel de Comunicación	Sin Comunicación.	Comunicación Básica.	Alto nivel de comunicación que permite control de carga.	Alto nivel de comunicación que permite control de carga.

En general los modos de carga 1, 2 y 3 tienen etapas de conversión con entrada AC y salida AC para luego conectarse a la entrada AC del VE, la diferencia entre los modos son las etapas de conversión que están en el interior del vehículo de forma dedicada o integrada, característica que identifica si se cargan directamente las baterías que corresponde a una carga dedicada o si pasan por algún otro componente interior del vehículo se considera cargador integrado, como por ejemplo la conexión interior hacia el motor del VE. Los componentes de protección del modo 1 y 2 tienen ciertos límites para suministrar altos niveles de potencia, por otro lado el nivel 3 contempla carga dedicada para una mayor potencia y con esto a la vez genera acortar los tiempos de carga, como también la incorporación de niveles de control complejo, sistema que puede identificar los niveles de carga, protección con función piloto y verificación de conexión correcta, entre otros.

Ahora bien, el modo 4 es el más complejo, pero da mayor flexibilidad para cargar el VE. Este tipo de cargador es externo, puede contemplar la etapa de rectificación AC/DC y en todos los casos contempla la carga hacia las baterías con un tipo de convertidor DC/DC fuera del VE, para luego conectarse a la entrada DC del VE. De esta forma se puede configurar este cargador en niveles mucho más altos de potencia, lo que se traduce en disminuir los tiempos de carga.

Es un cargador complejo, el cual es parte fundamental del sistema de control. Al contemplar niveles de potencia altos, este modo requiere de componentes de protección robustos, de gran tamaño y peso los cuales no son rentables cuando se integran al vehículo. Por lo tanto este tipo de cargador de modo 4, es el más caro del mercado. Como se puede ver en la Tabla 2.1, los cargadores eléctricos en este modo son el Express 250, Terra 54 y Tesla Supercharger.

## 2.5 TOPOLOGÍA DE CARGADORES EXTERNOS DE ALTA POTENCIA

En la estructura general de cargadores eléctricos indicada en la Figura 2.3, se pueden identificar 3 zonas; La primera contempla filtros de entrada, la segunda es de Rectificación AC/DC y la tercera es de control de potencia del convertidor DC/DC para carga hacia las baterías, el cual contempla un filtro. Las diferencias entre ambas es que la Figura 2.3 a) contempla un transformador de aislación galvánica de baja frecuencia que está incluido dentro de la conexión a la Red AC, este tipo de configuración de cargador externo no considera un sistema de aislación como protección. En el caso de la aislación galvánica en la etapa de conversión DC/DC, ésta se considera de alta frecuencia, de esta forma el cargador externo puede eliminar el transformador en la red AC.

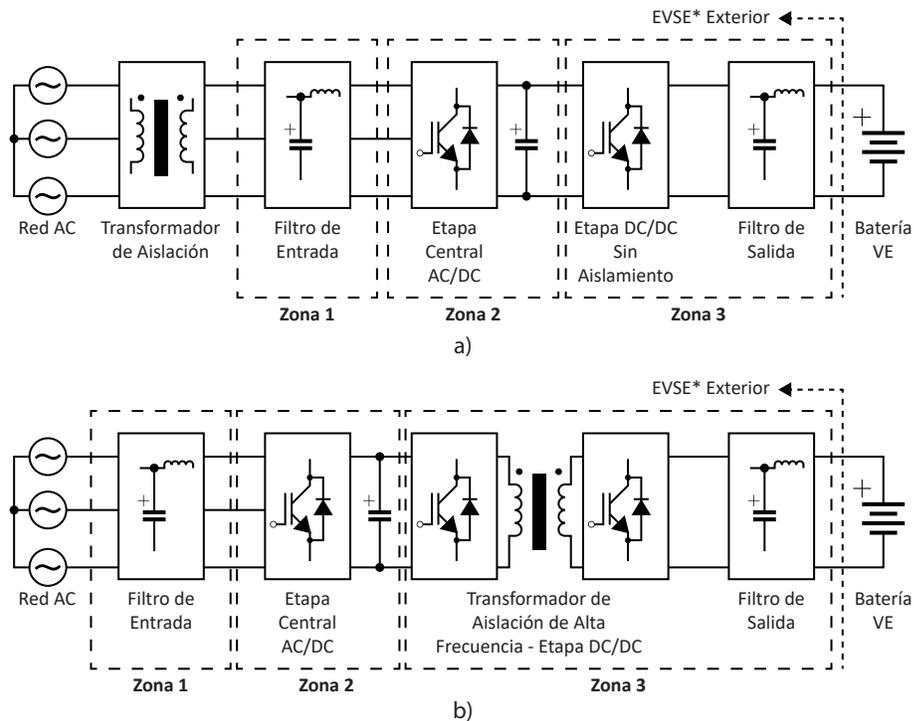


Figura 2.3. Estructura general de un cargador de batería externo. (a) Aislación de baja frecuencia. (b) Aislación de alta frecuencia. Basado en cita [4].

El transformador de aislamiento de la Figura 2.3 b) suele tener una relación 1:1. Es un equipo que no dispone de una conexión directa entre los devanados primarios y secundarios, garantizando la protección contra el choque eléctrico, el filtro de las componentes de alta frecuencia de tensión y corriente presentes en uno de los devanados. Dentro del sistema de protección podemos indicar que este puede aislarse de la tierra en la instalación evitando las corriente de tierra o tensiones indeseadas entre tierra y neutro, creando un sistema local de tierra. Esto permite proteger aparatos sensibles como son los equipos de electrónica incluidos en el cargador eléctrico.

El cargador eléctrico exterior puede operar con múltiples equipos conectados a un bus AC o DC como se puede observar en la Figura 2.4.

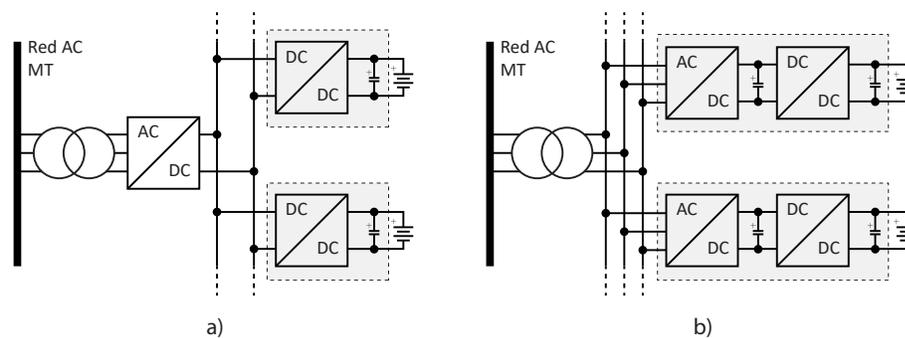


Figura 2.4. Arquitecturas de estaciones de carga: (a) Concepto común de bus DC. (b) Concepto común de bus AC. Basado en cita [4].

Una gran particularidad de este tipo de configuración es que puede centralizar la zona de rectificación para luego conectarla a un bus DC en común como se muestra en la Figura 2.4 a). Por otro lado es posible contemplar un equipo completo con las dos etapas de conversión, tanto de rectificación AC/DC como la zona de convertidor DC/DC, dentro del mismo equipo, esto le da más flexibilidad ya que contempla su conexión hacia la red mediante la conexión hacia el bus AC, sin depender de la capacidad del rectificador para conectarlo hacia el empalme de red AC de media tensión.

### 2.5.1 Etapa de rectificación AC/DC

Dentro de las etapas de rectificación, se pueden señalar tres topologías generales [4]; Rectificador trifásico de fuente de voltaje de dos niveles, Rectificador Viena y Convertidor Buck intercalado multicanal no aislado.

El Rectificador Trifásico de dos Niveles de la Figura 2.5, contempla un filtro  $L_g$  en la entrada, luego la etapa de rectificación con una matriz de seis conmutadores IGBT con

diodos antiparalelos que controlan la tensión del DC-Link. Al contemplar los diodos antiparalelos en los conmutadores pasivos junto con un esquema de control adecuado, se pueden lograr corrientes bipolares, con tensión Positiva, de esta forma este convertidor puede trabajar de forma bidireccional configurado para trabajar en dos cuadrantes de operación. Este tipo de topología también se puede considerar con entrada monofásica, lo cual cambia a una matriz de cuatro conmutadores IGBT con diodos antiparalelos.

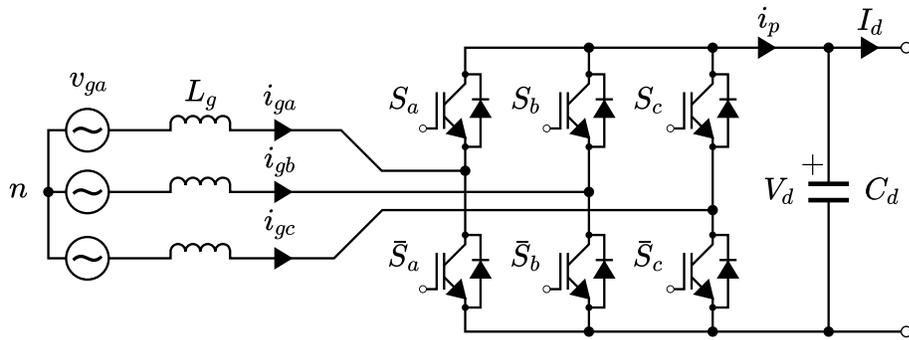


Figura 2.5. Rectificador trifásico de fuente de voltaje de dos niveles. Basado en cita [4].

El rectificador Viena que se presenta en la Figura 2.6, cuenta con dispositivos de conmutación activa más bajos, solo usando diodos, a costa de sacrificar las características de operación inversa, logrando de esta forma solo aplicación Unidireccional. Lo anterior indica que opera en un cuadrante de operación bloqueando corrientes y tensiones positivas. Esta topología comparte el principio operativo de aumentar el voltaje con respecto al rectificador trifásico de dos niveles.

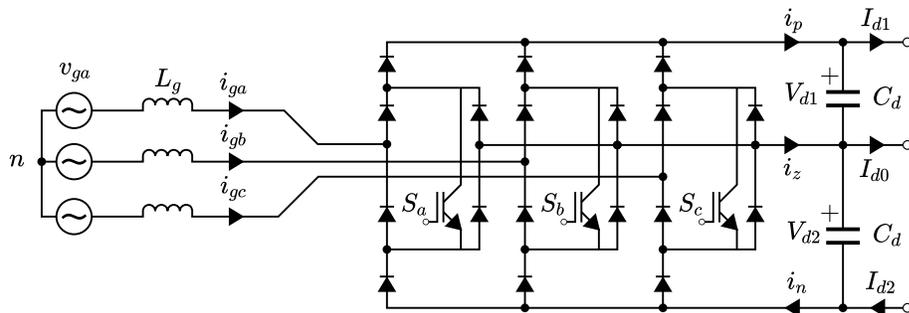


Figura 2.6. Rectificador Viena conectado a la red. Basado en cita [4].

El tercer tipo de topología es el Rectificador de pulsos múltiples con filtro de potencia activa de DC que se muestra en la Figura 2.7. Es un rectificador no regenerativo de doce pulsos desacoplado. Incluye una etapa de filtro de potencia activa DC con condensadores de tensión  $V_{d3-4}$  en la zona de almacenamiento de energía (ESS) para eliminar los armónicos tanto en el lado DC como en el AC.

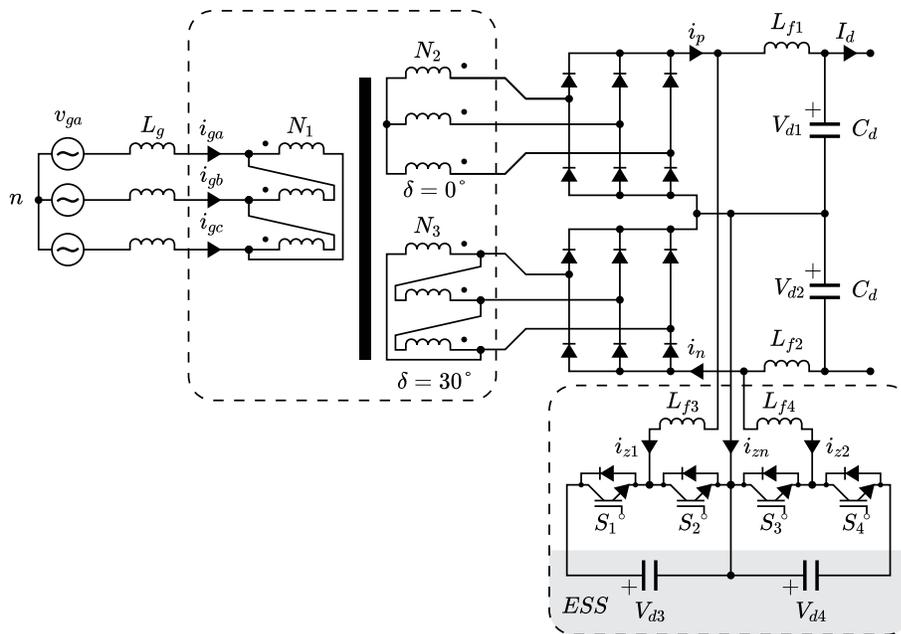


Figura 2.7. Rectificador de pulsos múltiples con filtro de potencia activa de DC. Basado en cita [4].

La cancelación de armónicos de puede realizar gracias a la configuración triangular de las corriente  $i_p$  e  $i_n$ .

### 2.5.2 Zona de convertidor DC/DC de alta potencia

Existe un abanico de convertidores DC de alta potencia, a continuación se describen cuatro generales: Convertidor Buck intercalado multicanal no aislado, Convertidor de puente completo ZVS con cambio de fase, Convertidor resonante LLC de medio puente y Convertidor DC/DC Dual Active Bridge (DAB).

El convertidor Buck intercalado multicanal no aislado que se muestra en la Figura 2.8, es un tipo de convertidor reductor, que no incluye una etapa de aislamiento, ya que se establece el transformador en la zona de rectificación o en la conexión hacia la red. Se pueden ver que tres canales bidireccionales están compartiendo la potencia de salida, lo cual mediante esta configuración se puede reducir el tamaño del filtro, ya que la operación intercalada aumenta la frecuencia equivalente de salida, permitiendo reducir el inductor de salida.

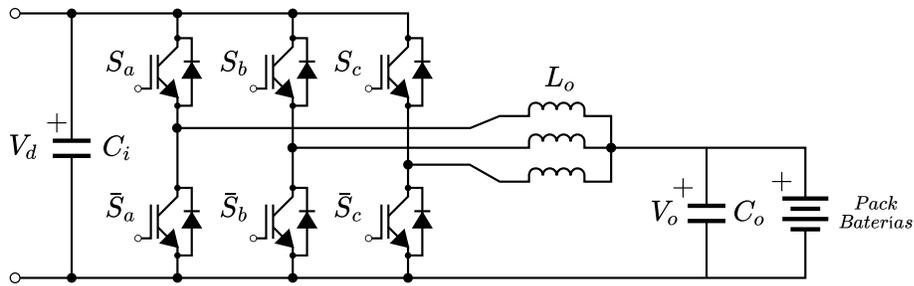


Figura 2.8. Convertidor Buck intercalado multicanal no aislado. Basado en cita [4].

El Convertidor de puente completo ZVS (conmutación de voltaje cero) con cambio de fase contempla un transformador de aislación galvánica de alta frecuencia, lo cual permite no incluir este tipo de protección en la zona de rectificación. Utiliza una capacitancia parásita en los dispositivos de conmutación y la inductancia de fuga del transformador de Alta Frecuencia (AF) para conformar un circuito resonante que se controla en la operación ZVS. En el lado secundario del transformador, el convertidor rectificador monofásico con un puente H de diodos, establece que las corrientes son unipolares, catalogando este tipo de topología dentro de un cuadrante de operación.

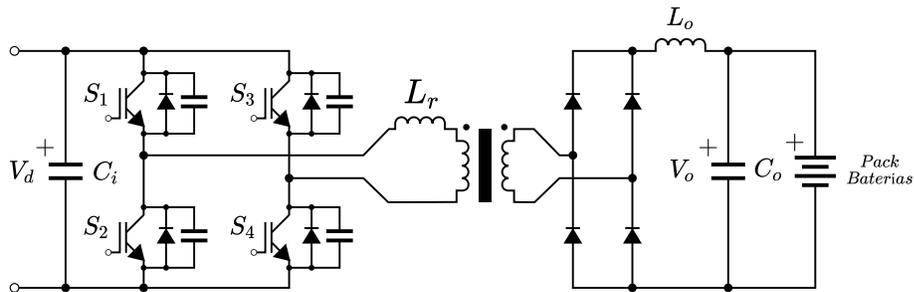


Figura 2.9. Convertidor de puente completo ZVS con cambio de fase. Basado en cita [4].

El convertidor resonante LLC de medio puente de la Figura 2.10, está compuesto por un medio puente activo en el lado primario, seguido por tres componentes pasivos: El inductor resonante  $L_r$ , el condensador resonante  $C_r$  y el inductor magnetizante  $L_m$ .

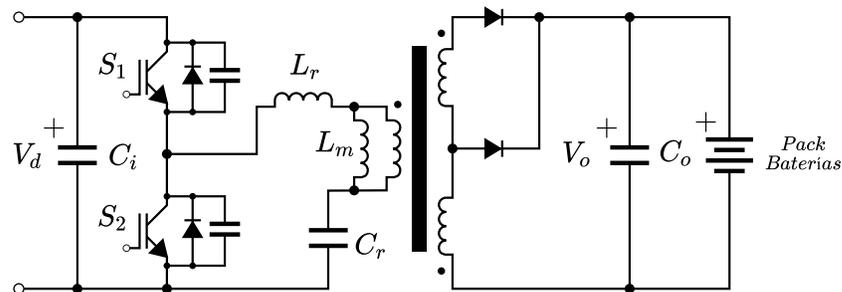


Figura 2.10. Convertidor resonante LLC de medio puente. Basado en cita [4].

El convertidor DC/DC Dual Active Bridge (DAB) que se muestra en la Figura 2.11, es una topología de circuito aislado bidireccional. El modo de operación solo controla los conmutadores de la zona izquierda (Lado primario del transformador) y puede suministrar la energía hacia las baterías. Cuando se requiere un control de suministro inverso, se necesita modular ambos puentes H, contemplando grandes rangos de variabilidad en los voltajes de entrada y salida. Se puede asegurar la conmutación de cero voltaje (ZVS, por sus siglas en inglés zero voltage switching) para todos los conmutadores, de tal forma de reducir la pérdida de conmutación y el ruido eléctrico generado (EMI).

En su modo de operación más simple, cuando la energía necesita ser transferida del circuito del lado izquierdo al circuito del lado derecho, por ejemplo, los interruptores IGBT del lado derecho no se accionan, dejando sus diodos antiparalelos en forma de un puente de diodos regular. En estas circunstancias, la topología se vuelve idéntica a un convertidor PSM normal [4], que es simple de operar, pero no muy flexible en términos de ganancia de voltaje. Por otro lado, cuando ambos puentes están modulados, la transferencia de energía se puede lograr en ambas direcciones y con grandes rangos de variabilidad en los voltajes de entrada y salida. Además, se puede asegurar ZVS para todos los conmutadores para reducir la pérdida de conmutación y el ruido eléctrico generado (EMI, por sus siglas en inglés Electro Magnetic Interference.).

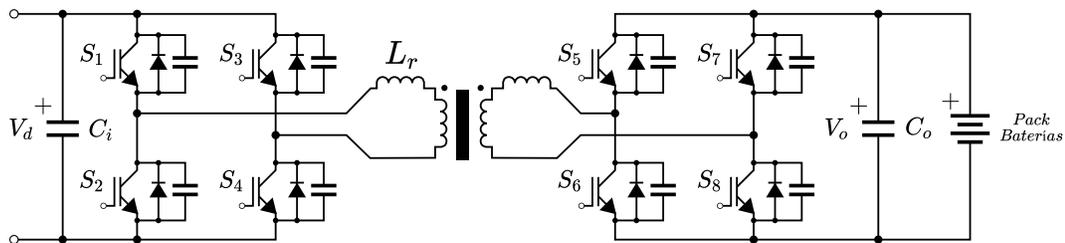
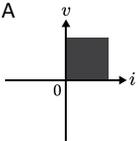
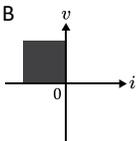
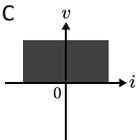
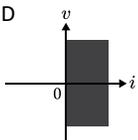
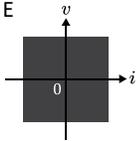


Figura 2.11. Convertidor DC/DC Dual Active Bridge (DAB). Basado en cita [22].

### 2.5.3 Cuatro cuadrantes de operación de convertidores de potencia

Los 4 cuadrantes de operación [4] en convertidores se pueden clasificar en 5 clases como se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Cuatro cuadrantes de operación de convertidores. Basado en cita [4].

Modo de Operación / Clase	Voltaje (V) Corriente (I)	Flujo / Característica	Convertidor
<b>1 Cuadrante</b>			
A	 V: Pos (+) I: Pos (+)	<b>Unidireccional.</b> Transporta o bloquea corriente en una dirección (Bloqueo directo hacia adelante). Conducción de corriente unidireccional, con voltajes positivos.	Buck o Boost.
B	 V: Pos (+) I: Neg (-)	<b>Unidireccional.</b> Lleva la corriente en una dirección, bloquea en la otra (Bloqueo de conducción inversa hacia adelante). Capáz de producir corriente en dirección Inversa, con un Voltaje Positivo.	Buck o Boost.
<b>2 Cuadrantes</b>			
C	 V: Pos (+) I: Pos (+) Neg (-)	<b>Bidireccional.</b> Se transporta en una dirección o se bloquea en ambas direcciones (Bloqueo bidireccional de conducción hacia adelante). Carga Durante la Desaceleración de un VE. Freno Regenerativo. Cambio de polaridad solo de corriente. Descarga Durante la Aceleración de un EV. Suministro de energía al motor. Cambio de polaridad solo de corriente.	Buck-Boost. Medio Puente.
D	 V: Pos (+) Neg (-) I: Pos (+)	<b>Bidireccional.</b> Se transporta en ambas direcciones, pero se bloquea solo en una dirección (Bloqueo bidireccional hacia adelante). Operación con Flujos de Corriente Positivos, con Bloqueo de tensión Positiva.	Inversor (DC-AC).
<b>4 Cuadrantes</b>			
E	 V-I: Pos (+) Neg (-)	<b>Bidireccional.</b> Bloquea voltajes de corriente alterna y conduce corrientes de corriente alterna.	Puente H, Ciclo-convertidores, Convertidor Matricial de 3 $\phi$ a 3 $\phi$ .

Los convertidores Unidireccionales se pueden representar como convertidores tipo Reductor (Buck) o Elevador (Boost), que contemplan su modo de operación en un cuadrante. Este modo bloquea las corrientes en una dirección (positivas o negativas) y tensiones positivas, dependiendo la configuración a utilizar.

El segundo modo de operación es característico de los convertidores tipo buck/boost y medios puentes. Este modo tiene la particularidad de operar en dos cuadrantes, el cual debe bloquear corriente y voltajes en ambas direcciones. Teniendo en cuenta que para este modo existen dos clases: C y D. En el caso de la clase C, se debe bloquear la corriente bidireccional y tensión positiva. En el caso de la clase D, se debe bloquear la tensión bipolar y corriente positiva.

En el caso del modo de operación de 4 cuadrantes, ya se contemplan convertidores más complejos, que pueden operar con tensiones y corrientes bipolares, logrando una aplicación totalmente bidireccional.

## **2.6 PRINCIPIOS BÁSICOS DE BATERÍAS EN VES**

Batería es un término genérico para determinar una fuente de electricidad, que puede almacenar energía de forma química y convertir esto directamente en energía eléctrica. Una batería puede ser una sola celda o múltiples celdas conectadas en serie o paralelo [23], para aumentar el voltaje o corriente disponible por arreglo de batería.

Dentro de las celdas electroquímicas se encuentran las de Ion Litio, las cuales se clasifican en primarias y secundarias [24]. En el primer caso son celdas que una vez utilizadas se desechan. En cambio, las secundarias, cuyas reacciones de descarga de ánodo y cátodo son reversibles, se pueden volver a recargar con seguridad. Para la elección de una batería de Ion Litio se deben tener presente las características de: Alta densidad de energía y alta densidad de potencia. Una alta densidad de energía permite un rango de conducción alta, mientras que una alta densidad de potencia ayuda a aumentar la aceleración.

Un estudio de la tecnología de los diferentes tipos de baterías secundarias publicado por la MDPI [25], identifica las ventajas y desventajas de las baterías de Ion Litio, éstas tienen grandes prestaciones que pueden potenciar una mejor respuesta de rendimiento y alcance con respecto a otras tecnologías, dado que son fuente de almacenamiento de mayor utilización en el mercado de VEs [7].

### **2.6.1 Características técnicas, carga y descarga de baterías de Ion Litio**

La configuración del Pack de baterías de Ion Litio de un VE nos permite establecer los niveles de tensión y corriente nominales que se deben tener en cuenta para operar, una vez conectados de forma conductiva con el cargador eléctrico [26]. Como en el caso de un cargador de alta potencia, estos funcionan mediante su conexión desde el puerto DC como se puede ver en la Figura 2.1, la cual es una conexión directa hacia el Pack de baterías, pero quien se lleva todo el esquema de control y protección es el cargador externo de baterías. Por lo tanto, este equipo externo, debe tener en cuenta el perfil de carga de la batería de Ion Litio como se muestra en la Figura 2.12.

El perfil de carga de una batería de Ion Litio requiere de cuatro etapas [6]: La primera es la carga lenta de celdas agotadas, en la cual se aplica una tensión que se va elevando en el

primer intervalo de tiempo, de esta forma generamos una diferencia de potencial que induce una corriente. La segunda consta de aplicar una corriente constante, la cual va a operar hasta que la batería alcance el 80% del SoC. Luego se debe controlar un nivel de tensión constante que se ajusta al nivel tensión máxima que puede soportar la batería. Una pequeña disminución en la precisión del voltaje de salida da como resultado una gran disminución en la capacidad de la batería. Como última etapa tenemos la terminación de carga, la cual es un estado de flotación que establece el nivel permanente de carga máxima debido al control de tensión constante que se aplica hacia las baterías desde el cargador.

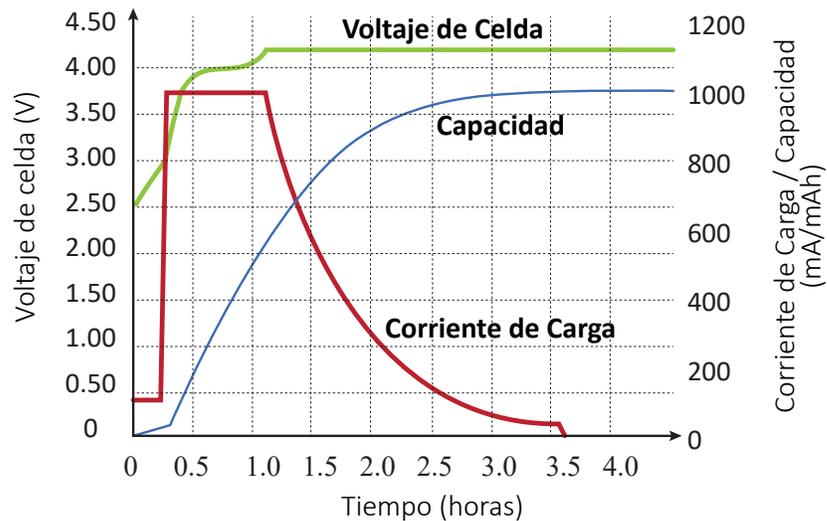


Figura 2.12. Perfil de carga de cuatro etapas para una batería de Ion Litio: carga lenta de celdas agotadas, carga de corriente constante, carga de voltaje constante y terminación de carga. Basado en cita [6].

Cabe mencionar que el perfil de carga se debe mantener en los parámetros correctos, los cuales se establecen mediante un sistema de control óptimo. Si no se mantienen los niveles de corriente constante sobrepasando el límite adecuado del 80% del SOC, o no se controlan los niveles de voltaje adecuados, se produce sobre tensión o sobre corriente, se logra un mínimo deterioro a largo plazo de las baterías, por otro lado en situaciones extremas, es posible considerar el deterioro y peligro inmediato en el proceso de operación o manipulación de las baterías [27].

## 2.6.2 Modelo electroquímico equivalente de una batería de Ion Litio

Los acumuladores de energía están compuestos generalmente por elementos químicos, con los cuales podemos realizar modelos equivalentes que logren tener características muy

similares a los comportamientos reales pero simulados con componentes eléctricos. Estos modelos eléctricos equivalentes están compuestos generalmente por fuentes de tensión, fuentes de corrientes, inductancias, capacitores, resistencias y componentes variables, entre otros. Lo que hace la diferencia entre uno y otro, es el alcance que puedan tener para poder simular de manera real el comportamiento de un acumulador de energía. Por lo señalado, si el modelo equivalente contempla mayor realismo, este tiende a ser un modelo mucho más complejo. A continuación se presentan los modelos equivalentes [28]:

- Modelo de Thevenin capa simple.
- Modelo de Thevenin doble capa.
- Modelo de Thevenin Runtime.
- Modelo de Shepherd.
- Modelo de Copetti y Chenlo.
- Modelo de Plett.
- Modelo circuital 1.
- Modelo circuital 2.

El modelo Thevenin Runtime de la Figura 2.13, es un circuito complejo, que tiene la característica de poder calcular el SOC de la batería, mediante la configuración y parámetros que se entregan a un sistema de algoritmos que se desarrollaron en base a testeos en laboratorio [29].

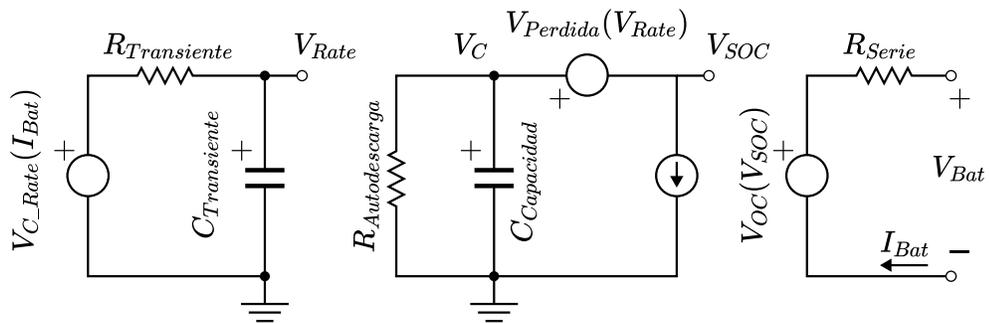


Figura 2.13. Modelo de baterías de Ion Litio basado en el modelo Thevenin Runtime. Basado en cita [29].

El modelo equivalente de Thevenin Runtime, es un modelo complejo, pero brinda datos que pueden simular de manera más fidedigna el comportamiento de carga y descarga de un banco de baterías.

## CAPÍTULO 3

---

# MODELO Y CONTROL DEL CCVE DE CARGA RÁPIDA

---

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Los convertidores asociados al suministro de energía pueden ser configurados como una topología compacta aplicado a la parte de rectificación AC/DC o al convertidor DC/DC, por tal razón en este capítulo se describe una configuración que busca la optimización en la cantidad de componentes para lograr una carga rápida de alta potencia y aplicación V2G. Con el propósito de conseguir la mencionada optimización, se abordarán las siguientes temáticas que permitan respaldar el citado objetivo:

- Topología general del CCVE propuesto.
- Modelamiento del CCVE.

### 3.2 TOPOLOGÍA GENERAL DEL CCVE PROPUESTO

La topología general que se muestra en la Figura 3.1 contempla su conexión para cargas rápidas con conexión de entrada AC trifásica, luego las señales de entrada deben pasar por un filtro RL que se conecta al primer convertidor. El rectificador trifásico está compuesto por conmutadores IGBT, que permiten pasar de una señal AC a una DC para control del nivel de tensión en el DC-Link. El segundo convertidor DC/DC controla el nivel de potencia de carga hacia

las baterías mediante el filtro RLC y los conmutadores IGBT, mediante el control de corriente y tensión constante de acuerdo al perfil de carga de las baterías.

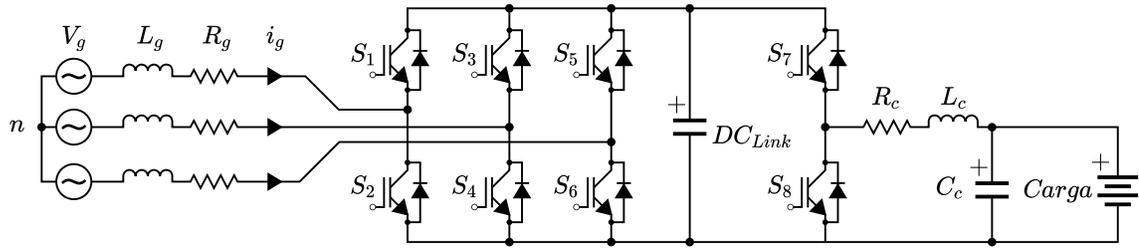


Figura 3.1. Topología general de CCVE.

### 3.3 MODELAMIENTO DEL CCVE

El primer convertidor, un rectificador controlado trifásico, se utiliza para pasar de AC trifásica a DC monofásica. Este rectificador es un convertidor con seis transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) de dos niveles, también permite el control del voltaje y de la potencia reactiva Q.

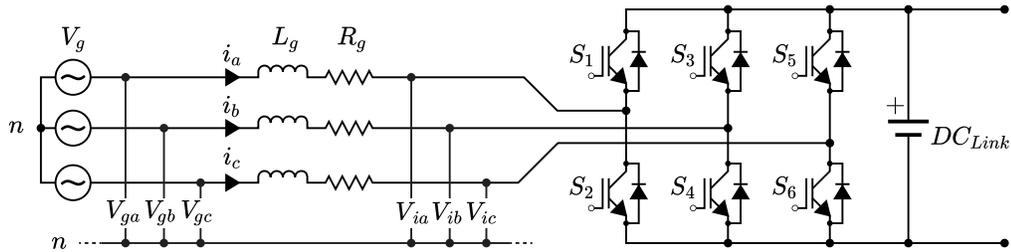


Figura 3.2. Topología de rectificador trifásico.

#### 3.3.1 Modelamiento rectificador trifásico

En la Figura 3.2 la tensión de la fuente  $V_g$  refiere las señales  $V_{ga}$ ,  $V_{gb}$  y  $V_{gc}$  y las corriente de línea son las señales  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ , respectivamente. En tanto,  $R_g$  y  $L_g$  son resistencias e inductancias. La ecuación equivalente al circuito se describe con las señales mencionadas:

$$\begin{aligned}
 V_{ga} &= Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + V_{ia} \\
 V_{gb} &= Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + V_{ib} \\
 V_{gc} &= Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + V_{ic}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Las ecuaciones de 3.1 se transforman a eje  $\alpha - \beta$  usando Clarke, obteniendo ecuaciones en  $\alpha - \beta$ . Luego, para efectuar el control vectorial es fundamental conocer el ángulo de la red  $\theta_e$  utilizando un *phase locked loop* (PLL).

Luego, al transformar las ecuaciones de tensión a coordenadas  $d - q$  usando el ángulo  $\theta_e$ , queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} v_d &= Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_e Li_q + v_{id} \\ 0 &= Ri_q + L \frac{di_q}{dt} - \omega_e Li_d + v_{iq} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Si se asume que la amplitud del voltaje de la red es constante y que por lo tanto  $v_{1d}$  también es constante, se tiene que la potencia activa y reactiva son proporcionales a  $i_d$  e  $i_q$ , respectivamente. Esto se puede ver a continuación en el desarrollo de la fórmula de potencia compleja en coordenadas  $d - q$ :

$$S = k(v_d + jv_q)(i_d + ji_q)^* = (v_d i_d + v_q i_q) + j(v_q i_d - v_d i_q) \quad (3.3)$$

Donde  $k$  es una constante que depende del tipo de transformada utilizada:

$$\begin{aligned} P &= k(v_d i_d + v_q i_q) \\ Q &= k(v_q i_d - v_d i_q) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Considerando orientación en el vector de la tensión de la red, se tiene que  $v_q = 0$  y por lo tanto:

$$\begin{aligned} P &= kv_d i_d \\ Q &= -kv_d i_q \end{aligned} \quad (3.5)$$

Por tanto, la potencia activa y reactiva pueden ser reguladas independientemente de las corrientes que controla el convertidor front-end.

En consecuencia el esquema de control para desacoplar potencia activa de reactiva se ve en la Figura 3.3 y de esa forma es posible obtener  $V_{dq}$  e  $I_{dq}$  en forma desacoplada.

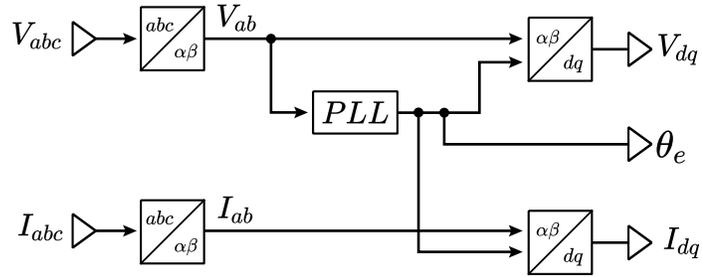


Figura 3.3. Esquema de control front-end en rectificador trifásico con transformada de Clarke  $\alpha - \beta$  y de Park  $d - q$ .

### 3.3.1.1 Esquema de control

En el esquema de control se contemplan dos controladores Proporcionales-Integrales (en adelante PI o PIs), configurados de acuerdo a la estrategia a utilizar:

- **Estrategia rectificador AC/DC:** Se utilizan lazos anidados de PI tensión y PI corriente activa, en paralelo se utiliza solo lazo de PI corriente reactiva.
- **Estrategia convertidor DC/DC:** Se utiliza lazo anidado de PI tensión y PI corriente.

### 3.3.1.2 Diseño de controladores PIs

En el diseño de control existen dos lazos; uno de flujo de corriente, donde la respuesta es más rápida que en el segundo lazo de tensión *DC-Link*. Para calcular la frecuencia de trabajo de los controles y  $f_{sw}$ , se empleará el teorema de Shannon y Hartley, el cual establece la capacidad del canal de Shannon, teorema que no se describe en este proyecto de título, solo se hace referencia a las frecuencias de trabajo que se utilizaron para el diseño de controladores y  $f_{sw}$ , respectivamente (Tabla 3.1 ).

Tabla 3.1. Frecuencias de control:  $w_n$  utilizados para el diseño de control.

$f_{sw}$	$f_{lazo-I} = f_{sw}/10$	$f_{lazo-V_{dc}} = f_{lazo-I}/10$
1000 – 10000 hz	100 hz	10 hz

Las ecuaciones del convertidor front-end en eje  $d - q$  son:

$$\begin{aligned}
v_d &= Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_e Li_q + v_{1d} \\
0 &= Ri_q + L \frac{di_q}{dt} - \omega_e Li_d + v_{1q}
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Para desacoplar las ecuaciones de los ejes  $d$  y  $q$ , se introducen los siguientes términos de compensación:

$$\begin{aligned}
v_{1d} &= -v'_d + (\omega_e Li_d + v_d) \\
v_{1q} &= -v'_q - (\omega_e Li_d)
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Reemplazando:

$$\begin{aligned}
v'_d &= Ri_d + L \frac{di_d}{dt} \\
v'_q &= Ri_q + L \frac{di_q}{dt}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Aplicando la transformada de *Laplace*, se obtiene la función de transferencia de la planta, quedando:

$$\frac{I_d(S)}{V'_d(S)} = \frac{I_q(S)}{V'_q(S)} = \frac{1}{Ls + R} \tag{3.9}$$

Por otra parte, los valores de tensión para ser sintetizados por el algoritmo de modulación son:

$$\begin{aligned}
v^*_{1d} &= -v'_d + (\omega_e Li_d + v_d) \\
v^*_{1q} &= -v'_q - (\omega_e Li_d)
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Haciendo un balance de potencias entre la entrada  $P_{in}$  de la fuente, la salida  $P_{out}$  del convertidor y despreciando las pérdidas de éste, se plantea la siguiente ecuación:

$$Ei_{os} = k(i_d v_{1d} + i_q v_{1q}) \tag{3.11}$$

Ahora bien, suponiendo que la resistencia y la inductancia del filtro de salida del convertidor front-end son pequeñas, se tiene que  $v_d + jv_q \approx v_{1d} + jv_{1q}$ . Además, si se considera que

está orientado y que por lo tanto  $v_q = 0$ , se obtiene:

$$Ei_{os} = kv_d i_d \quad (3.12)$$

Por balance de energía se puede deducir que:

$$Ei_{os} = kv_d i_d \quad (3.13)$$

Además la relación entre la tensión  $V_d$  con la tensión del *DC-Link* es:

$$v_d = \frac{m_1}{2} E \quad (3.14)$$

Donde  $m_1$  es la relación entre el voltaje de la red y el voltaje en el *DC-Link* que se conecta al rectificador (el índice de modulación  $m_1$  se calcula con mayor profundidad en ecuación 3.22).

Combinando las ecuaciones previas:

$$i_{os} = \frac{k}{2} m_1 i_d \quad (3.15)$$

Aplicando Ley de Kirchhoff de corriente, se deduce la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} C \frac{dE}{dt} &= i_{os} - i_{or} \\ C \frac{dE}{dt} &= \frac{k}{2} m_1 i_d - i_{or} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Entonces se considera  $i_{or}$  una perturbación externa como se puede ver en la Figura 3.4. La planta para el diseño del controlador del lazo externo de voltaje queda como se ve en la ecuación 3.17:

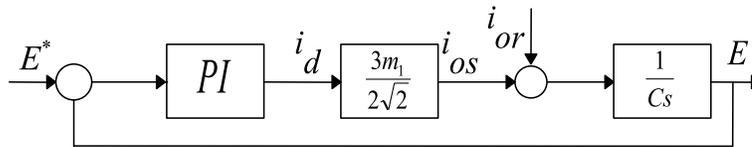


Figura 3.4. Esquema lazo DC-Link con perturbación.

$$\frac{E(S)}{I_d(S)} = \frac{km_1}{2C_s} \quad (3.17)$$

### 3.3.1.3 Controlador PI de corriente

Para realizar el control de corriente se establece el circuito equivalente con los componentes RL de la Figura 3.5 tomando los valores de la Tabla 3.2.

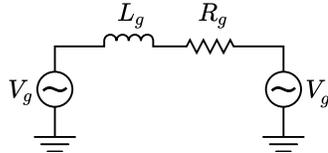


Figura 3.5. Circuito equivalente planta de corriente.

Al reemplazar los datos de la ecuación 3.9, se obtiene la planta equivalente de la ecuación 3.18:

$$\frac{I_s}{V_s(s) - V_o[s]} = \frac{1}{Ls + R} = \frac{1}{0,005s + 0,1} \quad (3.18)$$

Para el diseño de los lazos, el flujo de corriente debe establecer una respuesta más rápida que el lazo de tensión. Para calcular la frecuencia natural ( $\omega_w$ ) de los controladores, se empleará el teorema de Shannon y Hartley, el cual menciona la capacidad del canal de Shannon. Este teorema no se describe en profundidad en este trabajo, solo se mencionan las frecuencias de trabajo como se muestra en la Tabla 3.2 y posteriormente en el lazo de tensión en la Tabla 3.3.

Para el factor de amortiguamiento relativo del sistema ( $\xi$ ), se debe considerar una respuesta subamortiguada, estableciendo el valor de  $\xi$  entre los 0,5 y 0,8, logrando un tiempo de asentamiento adecuado sin presentar una sobreelongación de mayor magnitud como un sistema críticamente amortiguado o con una respuesta mas lenta como un sistema sobreamortiguado. [30].

Los valores de los parámetros de  $\omega_w$  y  $\xi$  se pueden ver en las Tablas 3.2 y 3.3, los cuales se utilizarán para el diseño del control de corriente y tensión en el software *Matlab*.

Tabla 3.2. Datos para diseño de PI de corriente en *Matlab* para etapa AC/DC.

$L_g$	$R_g$	$\xi$	$\omega_n$
0,005 H	0,1 $\Omega$	0,707	100 hz

Al diseñar el control del PI con la herramienta *rtool* en el software *Matlab*, se obtiene el Lugar Geométrico de la Raíz (en adelante *LGR*), obteniendo los siguientes resultados:

$$k = 4,3455; p = 1; i = 454 \quad (3.19)$$

### 3.3.1.4 Controlador PI de tensión

El circuito equivalente de la planta de tensión se puede ver en la Figura 3.6, la cual relaciona el producto de una fuente de tensión por el factor de modulación y el condensador del  $DC_{Link}$ :

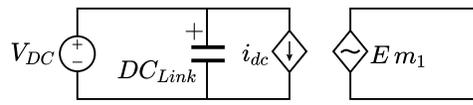


Figura 3.6. Circuito equivalente planta de tensión.

Al reemplazar los datos de la ecuación 3.17, se obtiene:

$$\frac{E(S)}{I_d(S)} = \frac{km_1}{2C_S} = \frac{1}{2 * 0,001_s} \quad (3.20)$$

Ingresando los valores de la Tabla 3.3 a *Matlab*, se pueden obtener los valores de nuestro PI de Corriente:

Tabla 3.3. Datos para diseño de PI de tensión en *Matlab* para etapa AC/DC.

$C_{DC_{Link}}$	$\xi$	$\omega_n$
$1e - 3 F$	0,707	10 hz

Al diseñar el control del PI con la herramienta *rtool* en el software *Matlab*, se obtiene el *LGR* con los siguientes valores:

$$k = 0,17772; p = 1; i = 44,4 \quad (3.21)$$

### 3.3.1.5 Control de lazo anidado rectificador

Se considera el lazo anidado con respecto a las plantas y controladores PI previamente diseñados, como se muestra en la Figura 4.5. El lazo interno corresponde al lazo de corriente, el cual debe responder mas rápido que el lazo externo de tensión:

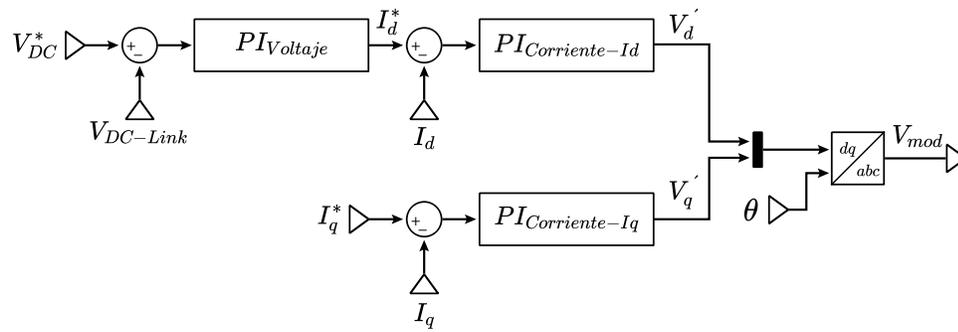


Figura 3.7. Esquema lazo anidado PIs del rectificador.

### 3.3.1.6 Modulación PWM del rectificador trifásico

El índice de modulación ( $m_1$ ) se calcula con los parámetros de entrada desde la transformada  $\alpha\beta - dq$ :

$$m_1 = \frac{V'_{1abc}}{\frac{E}{2}} = \frac{2(V'_{1abc})}{E} \quad (3.22)$$

Si se reemplaza  $V'_{1abc} = V_m$ , el índice de modulación queda de la siguiente manera:

$$m_1 = \frac{2V_m}{E} \quad (3.23)$$

En el caso del muestreo natural la implementación es analógica y las señales que se envían a los interruptores de una determinada pierna son complementarias. Es decir cuando se dispara el interruptor “S1”, el interruptor “S2” se apaga, de forma de evitar cortocircuitar el enlace de señal continua.

Los pulsos de disparo se obtienen comparando las señales fase-FS (Valor pico de la señal sinusoidal de entrada), al sintetizar con una onda triangular de frecuencia  $f_{sw}$ , donde  $f_{sw}$  es denominada “frecuencia de switching”. En general, para reducir la distorsión armónica en la corriente de línea,  $f_{sw}$  debe ser muy superior a la frecuencia  $f_e$  de la señal fundamental para los rectificadores. Sin embargo, las pérdidas de conmutación en altos rango de potencia, están limitadas por el valor máximo de  $f_{sw}$  a utilizar.

### 3.3.2 Modelamiento convertidor medio puente

Mediante el estudio de los cuadrantes de operación de la Tabla 2.3, se menciona que los convertidores de 2 cuadrantes clase C permiten cambios de polaridad de corriente para servicio V2G, logrando un cambio de dirección de la corriente y tensión positiva. El tipo de convertidor de medio puente de la Figura 3.8 está dentro de estos cuadrantes de operación, permitiendo funcionar como reductor y elevador de tensión de dos niveles.

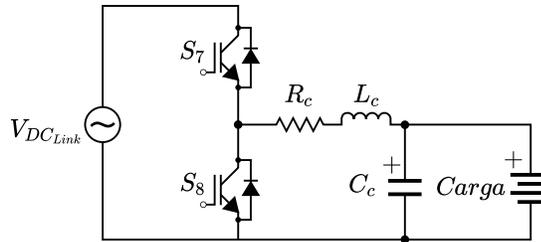


Figura 3.8. Topología de convertidor medio puente.

Para este convertidor se utiliza el transistor IGBT el cual es utilizado en el rectificador, particularmente su elección se debe a que puede operar a mayor potencia que un mosfet, posee un diodo antiparalelo el cual permite bidireccionalidad contemplando un control fácil, rápido y de bajas pérdidas.

#### 3.3.2.1 Etapa de control anidado de corriente y tensión con modulación PWM

El circuito equivalente de la etapa DC/DC que se presenta en la Figura 3.8 es equivalente a un circuito RL para control de corriente y un circuito C para control de tensión como se puede ver en la Figura 3.9 a) y b) respectivamente. Con el método presentado en la sección 3.3.1.2 se puede determinar el controlador de corriente PI para ambos casos.



Figura 3.9. Circuitos equivalentes planta I-V convertidor DC/DC: a) Planta de corriente y b) Planta de Tensión.

Para el controlador PI de corriente se consideran los valores de RL de la Tabla 3.4:

Tabla 3.4. Datos para diseño de PI de corriente en *Matlab* para etapa DC/DC.

$R_c$	$L_c$	$\xi$	$\omega_n$
0,1 $\Omega$	1e - 3 H	0,707	100 hz

Para el controlador PI de tensión se considera el valor del condensador  $C_c$  de la Tabla 3.5:

Tabla 3.5. Datos para diseño de PI de tensión en *Matlab* para etapa DC/DC.

$C_c$	$\xi$	$\omega_n$
1500e - 6 F	0,707	10 hz

Los valores de las Tablas 3.4 y 3.5 se utilizan en el software *Matlab* utilizando la herramienta *rltool* para encontrar el LGR, obteniendo los siguientes valores de Kp y Ki para el control de corriente:

$$k = 0,78857; p = 1; i = 501 \quad (3.24)$$

Para el control de tensión se obtienen los siguientes valores:

$$k = 0,58619; p = 1; i = 44,5 \quad (3.25)$$

Los resultados de los valores de Kp y Ki son dispuestos para los controladores PI de corriente y tensión, los cuales configuran el control de lazo anidado como se puede ver en la Figura 3.10.

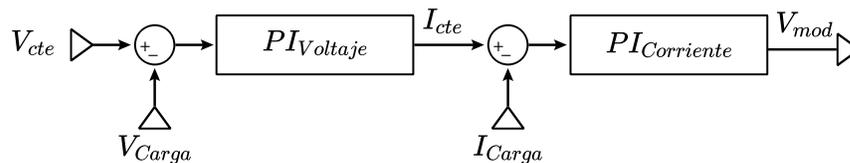


Figura 3.10. Control anidado de controladores PI de tensión y corriente.

### 3.3.2.2 Modulación PWM del convertidor DC/DC

La modulación PWM del convertidor DC/DC tiene características similares al PWM del rectificador mencionado en la sección 3.3.1.6. En ambos casos se utiliza la modulación bipolar que permite mediante una señal de control ( $v_m$ ) determinar todas las señales de disparo, tanto de los seis interruptores en el caso del rectificador, como en los dos interruptores del convertidor DC/DC.

## CAPÍTULO 4

---

# SIMULACIÓN DEL CCVE

---

### 4.1 INTRODUCCIÓN

La simulación del CCVE se realiza en el software *Plecs* en la cual se obtienen respuestas aproximadas a una implementación real. En el software se establecen los valores de los diferentes componentes del cargador, compuesto por la conexión de los convertidores y sus respectivos sistemas de control. Por tal razón se considera necesario abordar los siguientes temas:

- Etapa de potencia del CCVE propuesto.
- Etapa de control del CCVE propuesto.

### 4.2 ETAPA DE POTENCIA DEL CCVE PROPUESTO

La etapa de potencia se compone de dos partes, la primera es el rectificador AC/DC de la Figura 4.1, contemplando en la entrada de la fuente trifásica de 380 Vac-50 hz, un filtro RL utilizado como planta para la estrategia de control del PI de corriente, el rectificador configurado con seis transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) de dos niveles y en la salida un DC-Link utilizado como planta para la estrategia de control del PI de tensión.

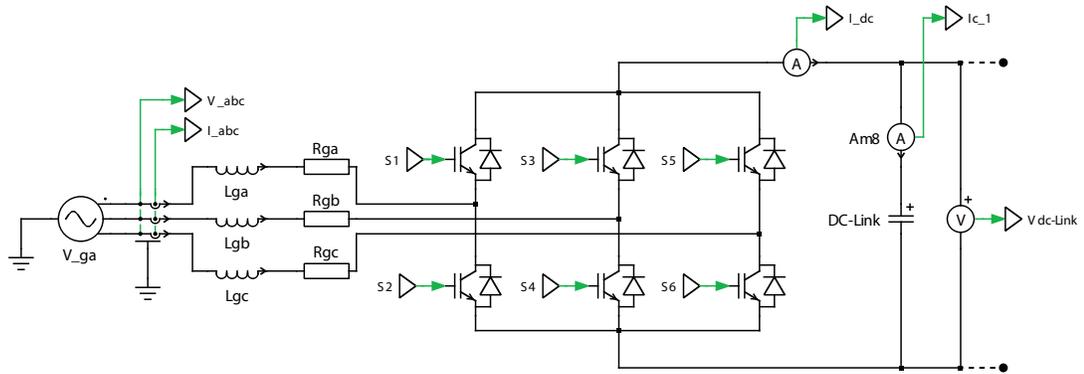


Figura 4.1. Etapa de potencia del rectificador AC/DC.

El segundo es el convertidor DC/DC de la figura 4.2, contemplando en la entrada el voltaje del DC-Link como fuente de tensión, el convertidor configurado con dos transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) de dos niveles, un filtro RLC utilizado como planta para la estrategia de control de los PIs de I-V y en la salida se conecta la carga para los diferentes casos de estudio.

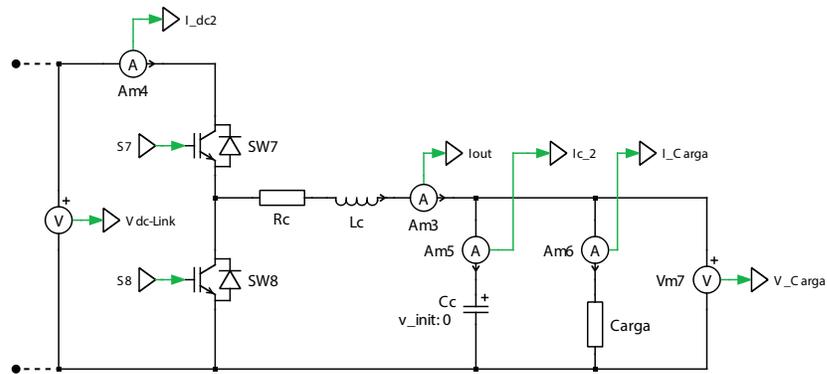


Figura 4.2. Etapa de potencia del convertidor DC/DC.

### 4.3 ETAPA DE CONTROL DEL CCVE PROPUESTO

Los convertidores contemplan sus etapas de control por separado. En el caso del rectificador se utiliza inicialmente el control front-end, luego el lazo anidado del rectificador con su respectiva modulación PWM de la Figura 4.3 a) y b) respectivamente, para luego dar los pulsos de disparo hacia los IGBTs  $S_1$  a  $S_6$ . El convertidor DC/DC en su estrategia solo utiliza el control del lazo anidado de la Figura 4.3 c), ya que las señales de control medidas son continuas (DC), por lo tanto no requiere la transformación de AC a DC como sucede en el rectificador, luego al igual que el rectificador envía los pulsos de disparo hacia los IGBTs  $S_7$  y  $S_8$ .

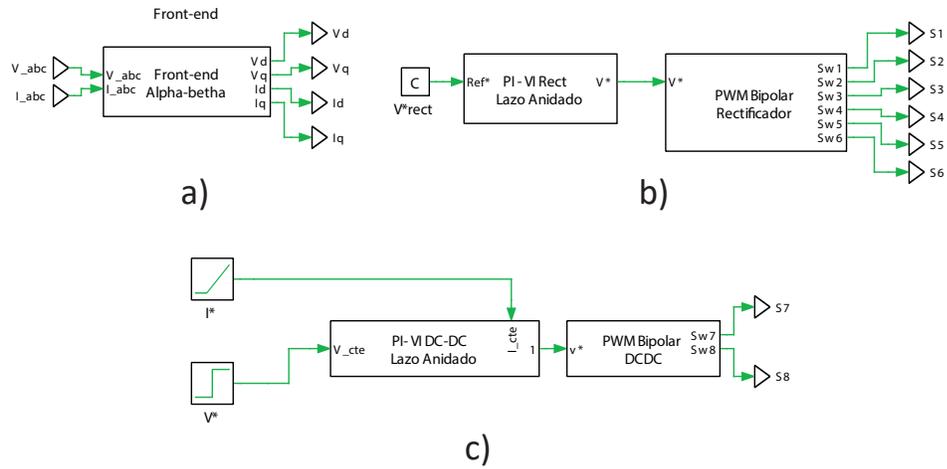


Figura 4.3. Etapa de control del CCVE: a) control front-end, asociado a control Clark y Park. b) Controladores PI de V-I y modulación PWM de Rectificador trifásico. c) Controladores PI de V-I y modulación PWM de Convertidor DC-DC.

### 4.3.1 Estrategia de control rectificador AC/DC

Para realizar el control en los controladores PIs del rectificador se utilizan las señales  $d - q$ , las cuales se deben calcular mediante el control front-end de la Figura 4.4. El objetivo es tomar las señales de entrada  $V_{abc}$  e  $I_{abc}$  para transformar estas mediciones mediante módulos establecidos en el software *Plecs*, obteniendo la señal de corriente y voltaje  $abc$  a  $\alpha - \beta$  y finalmente a  $d - q$ . Es importante el cálculo del ángulo de la red  $\theta$  de la ecuación ??, para realizar este cálculo en la simulación se utiliza el módulo función  $(f(u))$  arco-tangente como se muestra en la Figura 4.4:

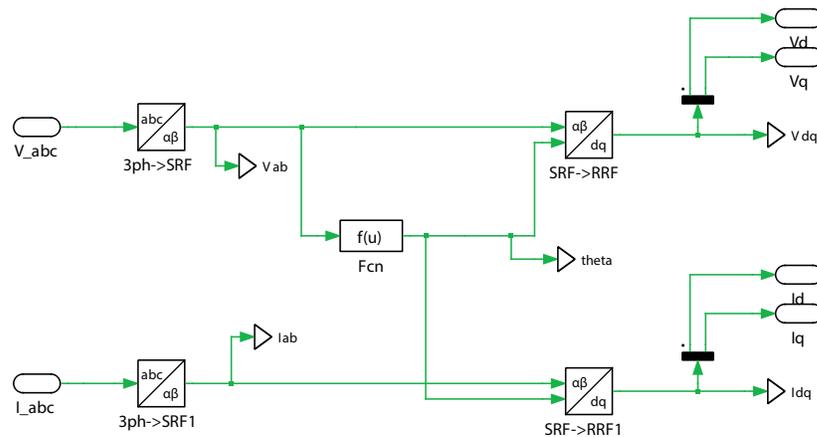


Figura 4.4. Esquema de control front-end en rectificador trifásico con transformada de Clarke  $\alpha - \beta$  y de Park  $d - q$ .

Las señales de salida del controlador front-end  $V_d$  e  $I_{dq}$  son utilizadas para compararlas con las señales medidas del sistema como se ve en la Figura 4.5, tomando en cuenta que los controladores PIs deben establecer los niveles de tensión y corriente necesarios para seguir la señales de referencias solicitadas.

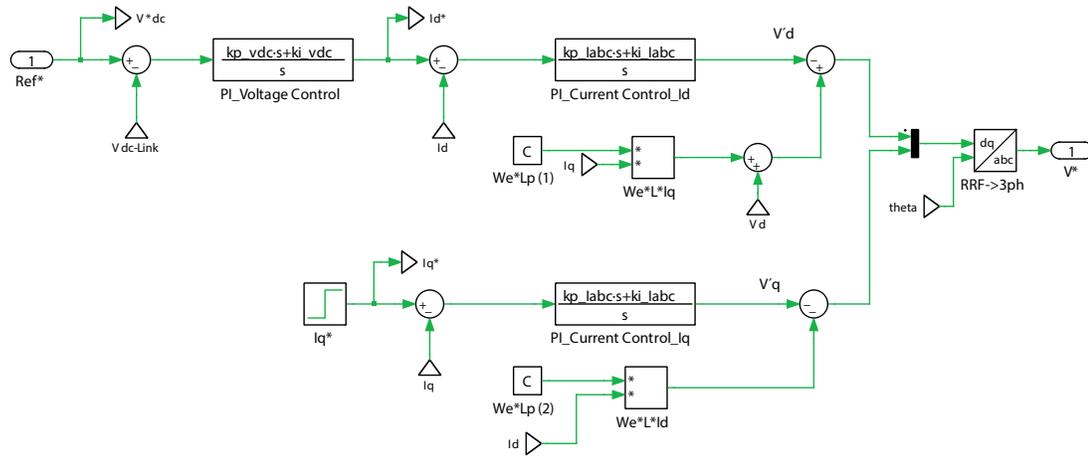


Figura 4.5. Lazo anidado de sistema de control tensión (10hz) y corriente (100hz).

La señal de salida de los convertidores PIs es un voltaje trifásico el cual es utilizado y dividido en la estrategia de modulación PWM bipolar con la señal del  $V_{DC-Link}$  como se muestra en la Figura 4.6, obteniendo un resultado entre -1 y 1 oscilatorio, esta respuesta se compara con la señal triangular, la cual tiene un valor entre -1 y 1 con una frecuencia de conmutación de 10 kHz. Se considera esta frecuencia para minimizar el ruido en la señal de salida.

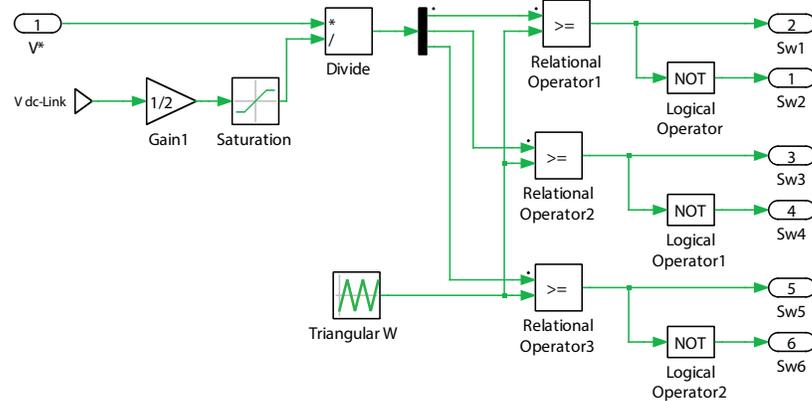


Figura 4.6. Etapa de modulación PWM del rectificador trifásico para control mediante señales de pulsos para conmutación de IGBT.

Las señales de salida del PWM son los pulsos de disparo que van hacia los IGBTs del  $S_1$  al  $S_6$  como se puede ver en la etapa de potencia del rectificador de la figura 4.1.

### 4.3.2 Estrategia de control del convertidor DC/DC

Los resultados de los valores de  $K_p$  y  $K_i$  son dispuestos para los controladores PI de corriente y tensión, los cuales configuran el control de lazo anidado como se puede ver en la Figura 4.7.

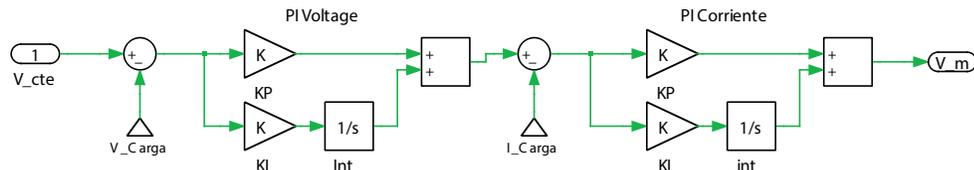


Figura 4.7. Control anidado de controladores PI de tensión y corriente.

El perfil de carga de una batería de Ion litio contempla cambios en los tiempos de respuestas de cada uno de los controladores, de esta forma se aplica una configuración para la estrategia de control que se sitúan en el contexto de microrredes denominado Grid Following o Feeding (Control de corriente) y Grid Forming (Control de Voltaje) [31]. Bajo el contexto de carga de baterías, solo se debe contemplar la configuración del lazo anidado y proponer una estrategia que logre establecer las etapas de control de corriente y voltaje constantes adecuados.

Al modificar la estrategia y adaptarla al contexto de carga de baterías de Ion Litio, se establece una propuesta de control como se puede ver en la Figura 4.8.

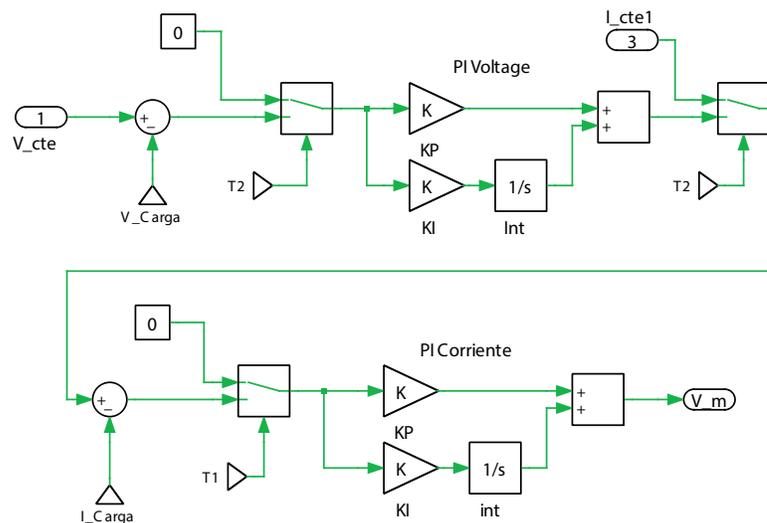


Figura 4.8. Estrategia de control para I-V constante asumiendo perfil de carga de batería de Ion Litio.

Según el perfil de carga de la Figura 2.12, la cual establece un suministro de carga que se separa en cuatro etapas. Para la simulación se establece un nivel de carga del modelo de batería

de Ion litio comenzando con un 20 %, se inicia la carga de corriente constante. En esta etapa solo se utiliza el control de corriente, dejando con respuesta cero al control de tensión.

Llegando al 80 % del SoC se cambia a tensión constante, lo cual deja contemplar una referencia de corriente y se empieza a utilizar el lazo anidado, quedando en operación tanto el controlador PI de corriente como el de tensión.

La modulación PWM del convertidor DC/DC tiene características similares al PWM del rectificador de la Figura 4.6. En ambos casos se utiliza la modulación bipolar, la que mediante una señal de control ( $v_m$ ) determina todas las señales de disparo de los seis interruptores en el caso del rectificador y de los dos interruptores en el caso del convertidor DC/DC como se puede ver en la Figura 4.9.

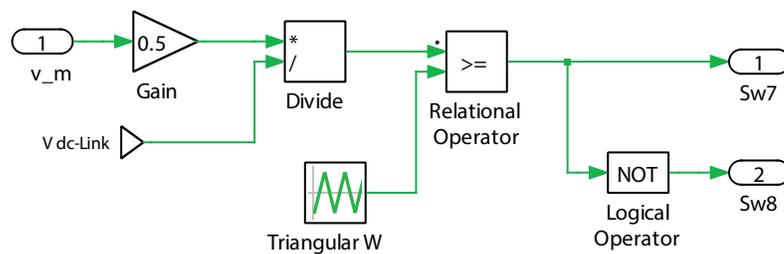


Figura 4.9. Etapa de modulación PWM del convertidor DC/DC para control mediante señales de pulsos para conmutación de IGBT.

# CAPÍTULO 5

---

## RESULTADOS OBTENIDOS

---

### 5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan el CCVE configurado para tres casos de estudio:

- **Prueba 1 - carga resistiva:** Es la primera y establece una carga de 50 kW de potencia para una carga resistiva, en la cual se realiza la estrategia de control de corriente y tensión constante.
- **Prueba 2 - carga batería Ion Litio:** La segunda prueba del CCVE considera el perfil de carga para suministrar energía al modelo de batería de Ion Litio. Se inicia con un SoC del 20% con carga de corriente constante. Luego al llegar al 80% de carga la batería pasa a control de tensión constante. La prueba se realiza con una capacidad de batería baja para establecer una contracción temporal de simulación.
- **Prueba 3 - aplicación V2G:** Es la tercera prueba del CCVE y se establece una aplicación bidireccional, de esta forma se garantiza que la propuesta cumple con servicios para V2G.

### 5.2 PARÁMETROS RECTIFICADOR TRIFÁSICO

Los parámetros del rectificador trifásico de la Figura 3.2 para las 3 pruebas son los que se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Parámetros del rectificador trifásico para las tres pruebas.

$V_{ac3\phi}$	f	$L_g$	$R_g$	$C_{DCLink}$	$V_{oDC-Link}$	$V_{Control}$
380 V	50 Hz	0,005 H	0.1 $\Omega$	0.001 F	538 Vdc	930 Vdc

Se establece que para cada una de las tres pruebas de la etapa de rectificación los parámetros son los mismos, de tal forma de variar solo el CCVE con respecto a alguna estrategia de control que se utilice en el convertidor DC/DC o a la carga en cada uno de los casos de estudio.

### 5.3 PRUEBA 1: CARGA RESISTIVA

La primera prueba se realiza con el CCVE con una carga resistiva ( $R_{carga}$ ) como se muestra en la Figura 5.1, circuito de prueba que debe operar a 50kW de potencia. Para esto se consideran los parámetros de la Tabla 5.2, calculados en base a las fórmula de potencia  $P = I^2R$ :

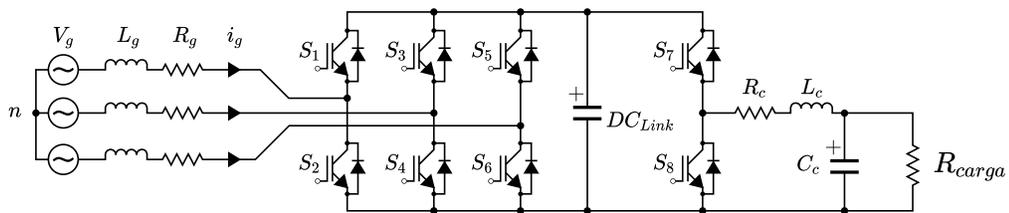


Figura 5.1. Circuito de prueba 1 con carga resistiva.

Tabla 5.2. Parámetros de componentes de prueba 1 con carga resistiva.

$P_{carga}$	$V_{carga}$	$I_{carga}$	$R_{carga}$	Tiempo $I_{cte}$	Tiempo $V_{cte}$
50 kW	400 V	125 A	3,2 $\Omega$	0,2 - 1,2 seg	1,2 - 1,8 seg

La respuesta de las señales de corriente, voltaje y potencia de carga se pueden ver en la Figura 5.2:

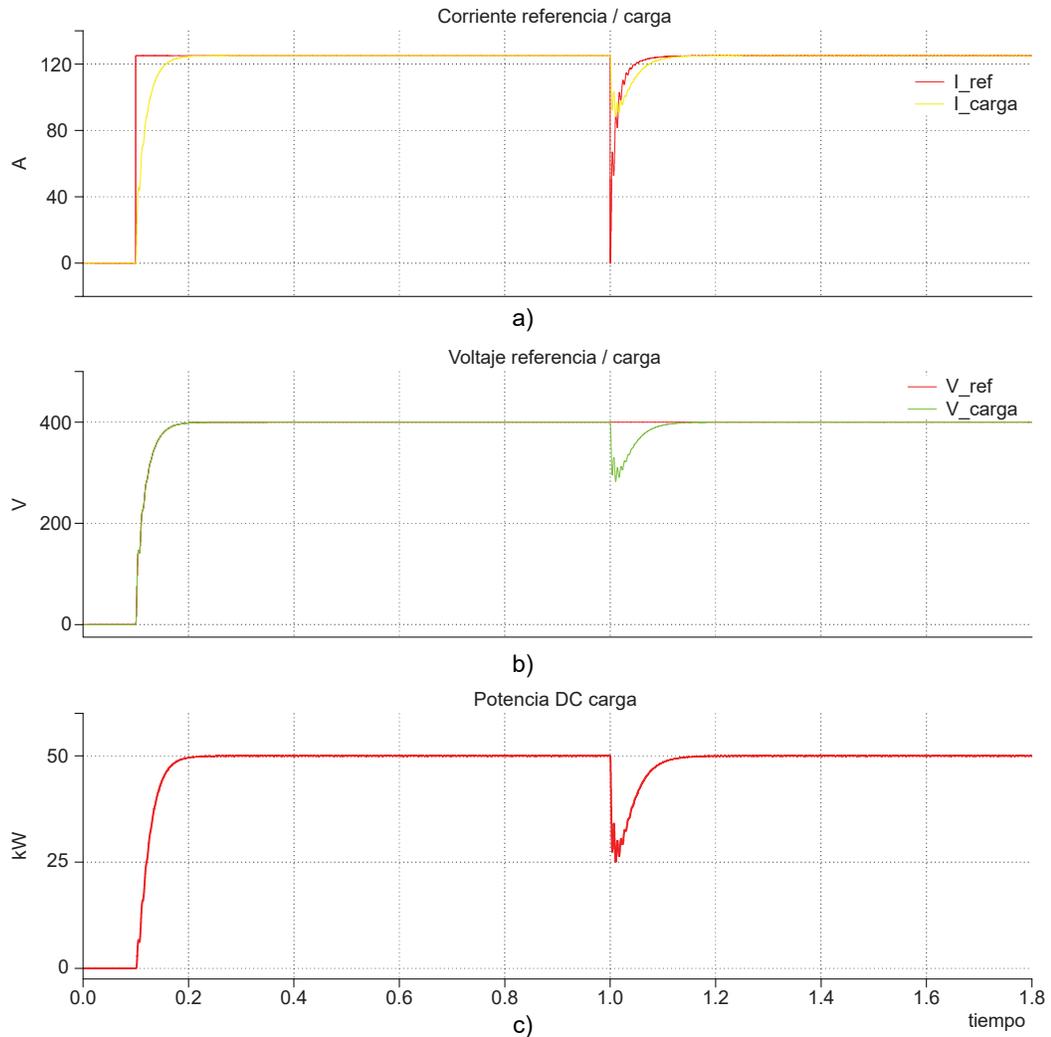


Figura 5.2. Respuesta del CCVE con respecto a voltaje, corriente y potencia de la prueba 1 con carga resistiva: a) Corriente de carga constante DC a 125 A entre 0,2 a 1,2 segundos. b) Voltaje de carga constante DC a 400 V entre 1,2 a 1,8 segundos. c) Simulación con respuesta de 50 kW potencia de carga DC.

La prueba 1 al contemplar los parámetros establecidos, logra controlar 50 kW de potencia de carga hacia la carga R. En vez de un escalón (bloque Step en el software) de referencia de corriente, se incluye una señal tipo rampa, la cual entrega una respuesta más pausada, de tal forma de no tener cambios tan bruscos de corriente o voltaje. En 1,2 segundos se realiza el cambio de referencia de corriente a tensión constante. Se puede observar una caída de tensión que el control logra estabilizar en 0,1 segundos. Una vez estabilizada la señal, se logra cero error en estado estacionario (0 $_{eee}$ ).

## 5.4 PRUEBA 2: CARGA BATERÍA ION LITIO

En la segunda prueba del CCVE se contempla el modelo equivalente de Thevenin Runtime de batería de Ion Litio de la Figura 2.13, reemplazando la  $R_{carga}$  de la Figura 5.1. Esta prueba tiene en cuenta los parámetros que se observan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Parámetros de componentes de prueba 2 con modelo batería Ion Litio.

$V_{bat_{max}}$	$I_{carga_{max}}$	$SoC_o$	$SoCCambio$	$C_{cap}$	$Celdas_{par}$	$Celas_{ser}$
318 V	125 A	0.2	0.8	0.02	10	75

La respuesta del CCVE con respecto a las señales de voltaje, corriente y sus señales de referencias se pueden observar en la Figura 5.3:

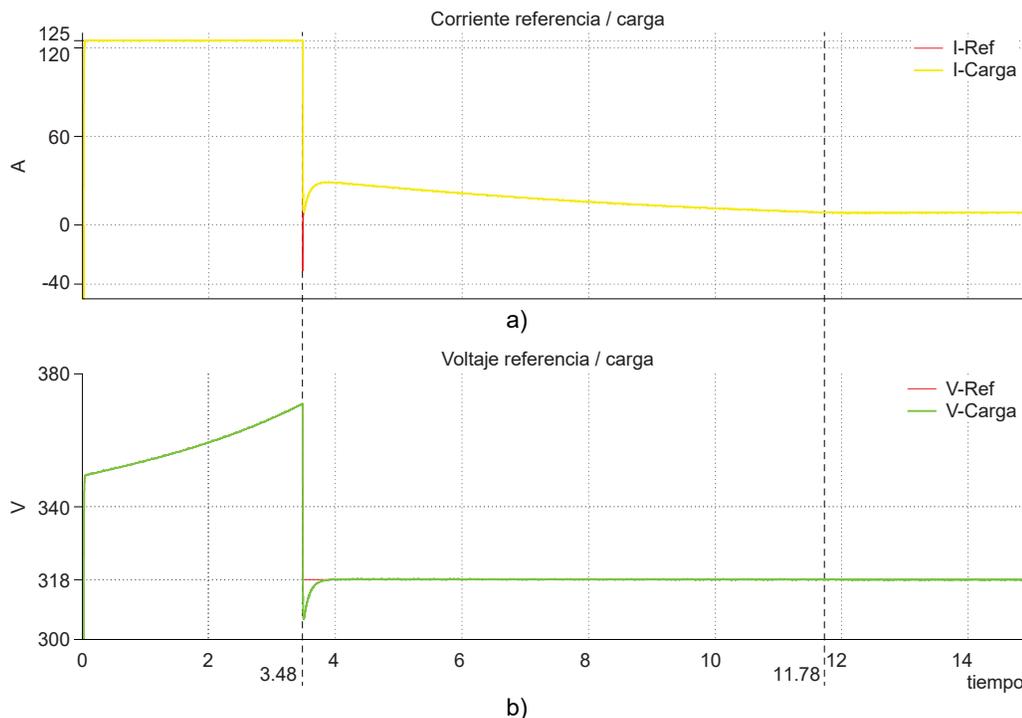


Figura 5.3. Respuesta de corriente y voltaje constante del CCVE para la prueba 2 con modelo de batería de Ion Litio: a) Etapa de corriente constante de 125 A DC entre 0,02 a 3,48 segundos. b) Etapa de voltaje constante a 318 V DC entre 3,48 a 11,78 segundos.

Las primeras respuestas de la Figura 5.3 a) de corriente de referencia y de carga, están dentro de los parámetros que se establecieron en el control de corriente constante. Al realizar una simulación con una capacidad de batería pequeña y contemplando que el  $C_{capacity}$  del modelo de batería es de un valor mínimo, la pendiente de carga es bastante inclinada o rápida.

Esta prueba contempla un parámetro adicional, el cual es el State of Charge (SoC) como

se puede ver en la Figura 5.4 a) que se encuentra entre los valores 0 a 1. La prueba considera un SoC inicial del 20 %, osea, un 0,2. En el inicio de la prueba el control establece 125 A de corriente de carga constante que se puede ver en la Figura 5.3 a), suministrando potencia hasta que el SoC llega al 80 % de carga o 0,8. Luego el control pasa a una etapa de tensión constante en 319 V como se puede ver en la Figura 5.4 a) . El 20 % de carga faltante lo realiza de forma lenta ya que la tensión del  $V_{SoC}$  se trata de estabilizar al nivel de voltaje de referencia que establece el control.

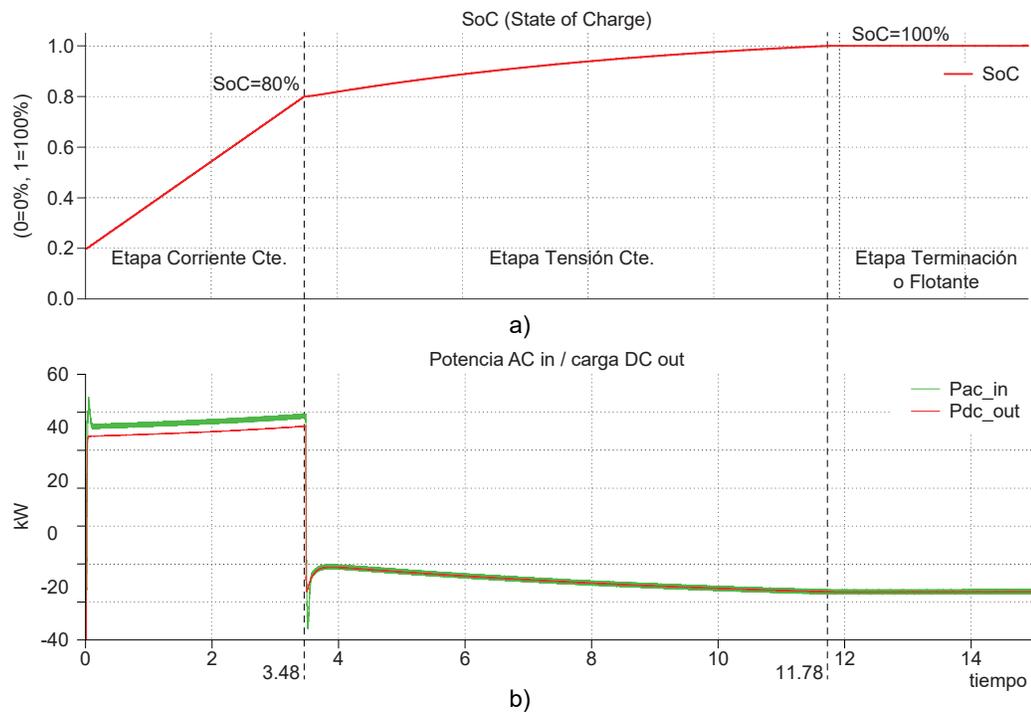


Figura 5.4. Respuesta de SoC y potencia del CCVE para la prueba 2 con modelo de batería de Ion Litio: a) SoC con carga inicial de 20 % visualizando etapas de perfil de carga. b) Potencia de entrada AC y salida DC de carga.

Los niveles de potencia de entrada AC y DC de carga se pueden ver en la Figura 5.4 b). Cuando el CCVE se encuentra en la etapa de corriente constante, se puede ver que el nivel de potencia de carga es cercano a los 50 kW. Al pasar a la etapa de tensión constante es posible identificar que el nivel de potencia es decreciente y/o muy bajo, alrededor de los 3 kW de potencia de carga. Cuando pasa a la etapa de flotación la potencia de carga es cercana a 0 kW, ya que se contempla que la batería está totalmente cargada y solo está en un estado de carga estable, ya que la diferencia de potencial es casi nula.

### 5.5 PRUEBA 3: APLICACIÓN V2G

La prueba 3 del CCVE consiste en reemplazar la  $R_{carga}$  de la Figura 5.1 por una fuente de tensión controlada, la cual contempla 350 Vdc. Los parámetros a utilizar se pueden ver en la Tabla 5.4. El control que se realiza es en el controlador DC/DC en el cual solo se utiliza el PI de corriente, desacoplando o anulando el PI de tensión que está anidado al primer controlador. Al PI de corriente se le suministra una referencia tipo escalón (Step) cada un segundo. Los dos primeros escalones contemplan corriente positiva, los cuales son un símil a una carga positiva o hacia la batería. Luego, desde los 4 hasta los 5 segundos se suministra corriente negativa y la respuesta tanto de corriente como de potencia negativa, esto indica que el flujo de corriente y potencia es hacia la red. Luego en el último segundo se establece un nivel de corriente igual a 0, el cual no contempla flujo de potencia. Esta variabilidad de potencia y corriente es la que se menciona como corriente y potencia variable en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Parámetros de componentes de prueba 3 bidireccional con control de corriente bipolar.

$P_{carga}$	$I_{carga}$	$V_{carga}$	$t_{simulación}$
Variable (+/-)	Variable (+/-)	350 V	6 seg

La respuesta del CCVE con respecto a las señales de corriente y potencia de carga bidireccional se pueden observar en la Figura 5.5.

Esta prueba coloca al CCVE en un contexto de servicio V2G, el cual se puede contemplar en un caso práctico de suministro de potencia hacia la red. La respuesta de los niveles de corriente se pueden ver en el gráfico de la Figura 5.5 a), el cual nos muestra una respuesta dinámica de flujo de potencia positiva y negativa, teniendo en cuenta que el nivel de tensión de la fuente y control es siempre positiva, lo que demuestra que es coherente con la elección del convertidor dentro del análisis de los cuadrantes de operación de la Tabla 2.3, estableciendo el de clase C como idóneo para este tipo de cargador.

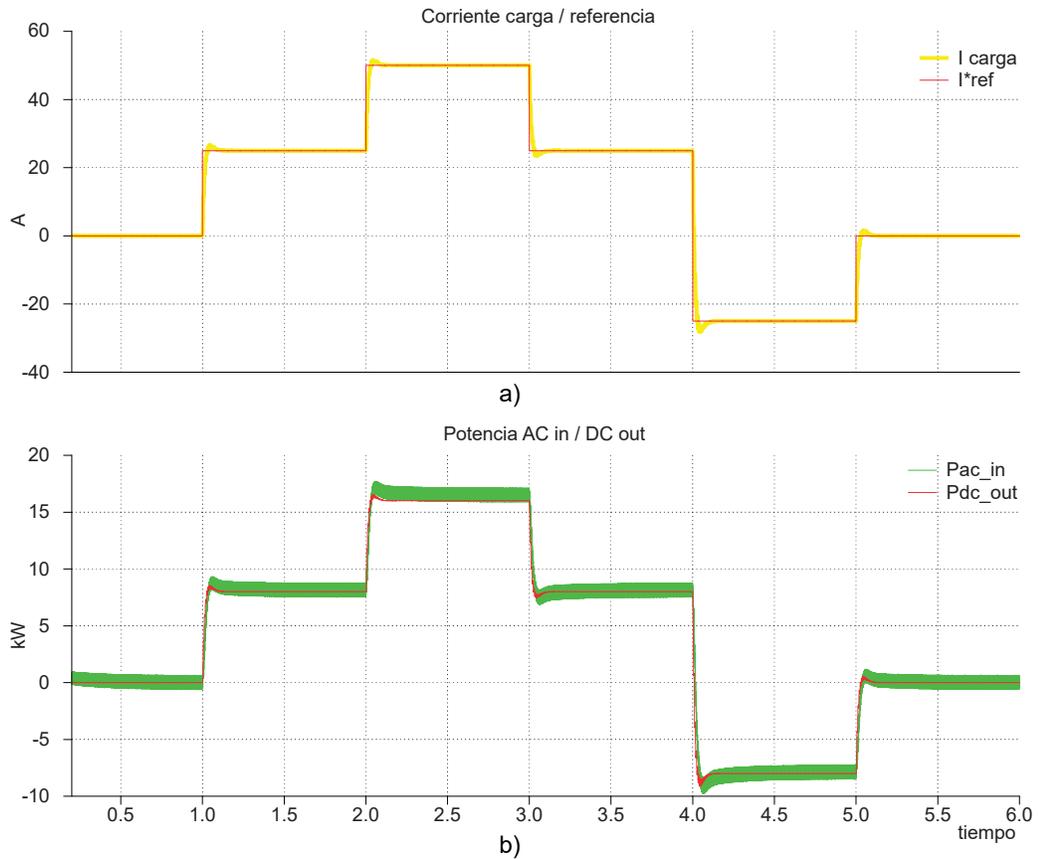


Figura 5.5. Respuesta del CCVE con respecto a corriente y potencia de la prueba 3 bidireccional: a) Escalones de control de corriente positiva y negativa en convertidor DC/DC. b) Respuesta de potencia AC entrada y salida DC de carga.

Los niveles de potencia presentados en la 5.5 b) son correspondientes al tipo de control variable en escalones de control de corriente que se establecen en esta prueba, identificando que el CCVE opera con flujo de potencia bidireccional.

## CAPÍTULO 6

---

### CONCLUSIONES

---

#### 6.1 CONCLUSIÓN GENERAL

Luego de realizar el presente estudio y analizar los resultados obtenidos, de acuerdo al objetivo propuesto sobre “Desarrollar simulación de etapas de potencia y control de Cargador Compacto de Vehículos Eléctricos (CCVE) con capacidad V2G para operación en redes trifásicas”, se ha podido constatar la importancia de la electromovilidad a nivel global y el estado en que se encuentra su avance en vehículos eléctricos y la infraestructura de carga principalmente en nuestro país.

Producto de lo anterior, se ha buscado definir etapas de control y potencia para CCVE con conexión a redes trifásicas y habilitación de capacidades V2G, a través de simulaciones en software *Plecs* que permitan validar la operación del CCVE propuesto en modo de carga de corriente constante, tensión constante y operación para servicios V2G.

La simulación ha sido una herramienta favorable para la consecución de resultados al momento de verificar si el CCVE cumple con los requisitos para su viabilidad, no obstante su implementación puede variar significativamente los resultados, ya que se contemplan factores de contexto específico, calidad de componentes y operación que fueron aplicados.

Este proyecto ha contemplado de entrada el diseño de un cargador compacto sin transformador de aislación entre el rectificador trifásico AC/DC y el convertidor DC/DC, asumiendo aislación en la entrada del cargador hacia la red, lo cual permite conexión directa o conductiva entre convertidores, estableciendo parámetros de carga máxima de 50 kW de potencia, magnitud

superior a los cargadores comerciales de modo 3 que solo llegan hasta los 24 kW, esto permite una estructura de carga rápida consecuente con el modo de carga 4, a la vez coherente con el perfil de baterías de Ion Litio y flexibilidad con suministros de potencia bidireccional.

Para conseguir resultados se ha modulado el sistema en cada una de las pruebas comportándose de manera diferente en cada una de ellas, sin embargo, los parámetros del convertidor son iguales en su estructura general. Las respuestas al aplicar cargas distintas en cada caso indican que el CCVE funciona de manera correcta y que su comportamiento es bastante flexible. La modulación permite la variación de filtros, en el caso del convertidor DC/DC y el estudio realizado al filtro RLC evidencian una complejidad mayor al tener en cuenta el perfil de carga de la batería, estos establecen una estrategia de control no tan solo variable en las referencias, sino que también en los tiempos de operación con respecto a los lazos de corriente y tensión.

En consecuencia, el CCVE ha sido evaluado, contrastado y sometido a simulaciones de carga y/o descarga aplicando una topología configurada con dos convertidores de potencia, para comprobar la rectificación del voltaje alterno a continuo con AC/DC y un DC/DC que permite controlar corriente y tensión constante, en ambos casos con módulos IGBTs.

Es importante destacar que el desarrollo de pruebas ha permitido comprobar el comportamiento de la topología y definir el CCVE con una cantidad acotada de componentes y no contemplando el transformador de aislamiento, consiguiendo dar respuesta al Perfil de Carga necesario para el suministro de energía a un modelo electroquímico equivalente de batería de Ion Litio, con etapas de corriente a tensión constante y flexible, que permite establecer potencia bidireccional para aplicación V2G, respondiendo en forma eficiente a la operación de carga de un Vehículo Eléctrico.

### **6.1.1 Conclusiones específicas de los casos estudiados**

A partir de los objetivos planteados y de los resultados obtenidos mediante los tres casos de estudio simulados en el software *Plecs*, se ha podido llegar a conocer importantes conclusiones en cada una de las pruebas, deducciones que se recapitulan de acuerdo a los hallazgos evidenciados:

Respecto a la Prueba 1 del CCVE con carga resistiva se concluye que:

- El control de corriente constante presento una respuesta coherente y logró seguir la referencia establecida por el controlador PI de corriente con una referencia de 125 A y posteriormente también con el lazo de control anidado asumiendo una referencia de voltaje

de 400 Vdc.

- El cambio de control de corriente a tensión constante se realiza de forma correcta en el tiempo dispuesto en 1,2 segundos, logrando establecer el 0eee en un tiempo acotado.
- El CCVE funciona de manera efectiva para suministrar 50 kW de potencia.

En relación a la prueba 2 del CCVE con carga al modelo equivalente de la batería electroquímica Thevenin Runtime, se ha concluido lo siguiente:

- A partir de la contracción en el tiempo de simulación, variando el valor de  $C_{capacity}$  a 0,02 del modelo de batería, se logró simular en un tiempo acotado la carga completa de la batería incluyendo todas las etapas del perfil de carga. No obstante si se requiere una simulación con tiempos de carga más cercanos a una aplicación real, se contempla como observación calcular el  $C_{capacity}$  indicado en la cita [29].
- El perfil de carga de la batería de Ion Litio se cumple con respecto a la referencia teórica, lo cual indica que el diseño del control del CCVE es correcto.

Las respuestas de la prueba 3 del CCVE con aplicación bidireccional, han permitido concluir lo siguiente:

- El control de corriente bipolar funciona de forma óptima para establecer flujos de corriente desde la red hacia la carga y también de forma inversa.
- Los niveles de potencia bidireccional se cumplen con respecto a lo establecido con el control de corriente bidireccional.
- La señales de respuesta contemplan unos overshoot de hasta 3.42 A sobre la corriente de referencia que duran aproximadamente 0.05 segundos hasta llegar a 0eee, el cual es el objetivo del controlador.

### **6.1.2 Conclusiones generales**

Finalmente, el presente estudio, su análisis y resultados permiten por una parte constatar la realidad de la electromovilidad en el mundo y nos advierte de su implementación a gran escala en los próximos años siendo el foco de atención a nivel nacional, y por otro que es pertinente y aporta a la consecución de objetivos país, abriendo y dinamizando el campo de investigación, para que esta área sea complementada y desarrollada optimizando su utilidad.

## 6.2 TRABAJOS FUTUROS

A la luz de los de los resultados se sugieren los siguientes futuros trabajos o líneas de investigación, acciones específicas que se sustentan en la presente experiencia:

- Simular la prueba 2 con la carga del modelo de batería de Ion Litio, calculando el  $C_{capacity}$  para una respuesta con tiempos más cercanos a la realidad como se presenta en la cita [29], de esta forma se podrá mejorar la metodología utilizada en este estudio y validar en simulación un modelo más cercano a la realidad para futuras implementaciones.
- Los resultados de la experiencia realizada recomiendan determinar los componentes necesarios para la implementación experimental del CCVE en laboratorio, ello con el fin de analizar las variables con componentes tangibles y tener respuestas reales del sistema propuesto.
- Las conclusiones permiten sugerir una línea investigativa que permita la Implementación experimental del CCVE propuesto, para aquello se aconseja desarrollar un prototipo de laboratorio que evidencie mayor cercanía con la operatividad.
- Un futuro trabajo sobre el tema será pertinente que proponga validar experimentalmente el CCVE propuesto, considerando un prototipo de laboratorio, lo cual permitirá demostrar la operación en diferentes escenarios.

---

## REFERENCIAS

---

- [1] “Electricidad - Comisión Nacional de Energía.” [Online]. Available: <https://www.cne.cl/estudios/electricidad/>
- [2] European Union, “Acuerdo de París — Acción por el Clima,” 2015. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es)
- [3] Ministerio de Energía, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, and Ministerio del Medio Ambiente, “Estrategia Nacional de Electromovilidad,” p. 56, 2017. [Online]. Available: [http://www.minenergia.cl/archivos\\_bajar/2018/electromovilidad/estrategia\\_electromovilidad-27dic.pdf](http://www.minenergia.cl/archivos_bajar/2018/electromovilidad/estrategia_electromovilidad-27dic.pdf)
- [4] O. Veneri, *Technologies and applications for smart charging of electric and plug-in hybrid vehicles*, 2016.
- [5] M. Yilmaz and P. T. Krein, “Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5673–5689, 2013.
- [6] S. Dearborn, “Charging Li-ion Batteries for Maximum Run Times An understanding of battery-charging fundamentals and system requirements enable designers to choose a suitable linear or switch-mode charging topology and optimize battery performance in the application,” Tech. Rep., 2005. [Online]. Available: [www.powerelectronics.com](http://www.powerelectronics.com)
- [7] I. Mercado Automot, “Informe del Mercado Automotor,” Tech. Rep., 2019.
- [8] “BNEF EVO Report 2020 — BloombergNEF — Bloomberg Finance LP.” [Online]. Available: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>

- [9] “Electric vehicles – Tracking Transport 2019 – Analysis - IEA.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2019/electric-vehicles>
- [10] “Plataforma de Electromovilidad.” [Online]. Available: <https://em.consumovehicular.cl/orientaciones-de-politicas-publicas>
- [11] D. K. Ramalingam, “(92) (PDF) Plug in Electric Vehicles in Smart Grid — Dr K. Ramalingam - Academia.edu.” [Online]. Available: [https://www.academia.edu/10828273/Plug\\_in\\_Electric\\_Vehicles\\_in\\_Smart\\_Grid?auto=download](https://www.academia.edu/10828273/Plug_in_Electric_Vehicles_in_Smart_Grid?auto=download)
- [12] M. de Energía, “Plan de mitigación de gases de efecto invernadero para el sector energía.” [Online]. Available: <https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/plan-mitigacion-gei-sector-energia-2017.pdf>
- [13] Ministerio de Energía, “Ruta energética 2018-2022,” p. 90, 2018. [Online]. Available: <http://www.energia.gob.cl/rutaenergetica2018-2022.pdf>
- [14] “Generadoras de Chile - Se inaugura primer cargador bidireccional para vehículos eléctricos en América Latina.” [Online]. Available: <http://generadoras.cl/prensa/se-inaugura-primer-cargador-bidireccional-para-vehiculos-electricos-en-america-latina>
- [15] AVEC, “ELECTROMOVILIDAD EN CHILE 2019. Informe del Estado Actual de la Industria,” Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: [www.avec.cl](http://www.avec.cl)
- [16] “Conoce los puntos de carga de autos eléctricos en Chile - La Tercera.” [Online]. Available: <https://www.latercera.com/mtonline/noticia/puntos-de-carga-electricos/713190/>
- [17] S. S. Williamson, A. K. Rathore, and F. Musavi, “Industrial Electronics for Electric Transportation: Current State-of-the-Art and Future Challenges,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 3021–3032, 2015.
- [18] D. Hanauer, “Mode 2 charging-testing and certification for international market access,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 1–9, 2018.
- [19] “J1772: SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler - SAE International.” [Online]. Available: [https://www.sae.org/standards/content/j1772\\_201210/](https://www.sae.org/standards/content/j1772_201210/)
- [20] “IEC 62196-1:2014 — IEC Webstore — LVDC.” [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/6582>
- [21] G. de Chile, “Guía de Buenas Prácticas en Movilidad Eléctrica,” vol. 1, pp. 1–34, 2018.
- [22] H. Akagi, S.-i. Kinouchi, and Y. Miyazaki, “Bidirectional Isolated Dual-Active-Bridge (DAB) DC-DC Converters Using 1.2-kV 400-A SiC-MOSFET Dual Modules,” *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 1, no. 1, pp. 33–40, 2016.

- [23] “The Future of Battery Technologies: A General Overview & Focus on Lithium Ion - In Compliance Magazine.” [Online]. Available: <https://incompliancemag.com/the-future-of-battery-technologies-a-general-overview-a-focus-on-lithium-ion/>
- [24] M. Meeus, “Overview of Battery Cell Technologies Overview of battery technologies Bridging the Innovation Gap,” 2019.
- [25] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. Mollah, and E. Hossain, “A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development,” *Energies*, vol. 10, no. 8, p. 1217, aug 2017. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/8/1217>
- [26] T. Royal Swedish Academy of Sciences, “Nobel Prize ® and the Nobel Prize ® medal design mark are registrated trademarks of the Nobel Foundation,” Tech. Rep., 2019.
- [27] B. Xu, A. Oudalov, A. Ulbig, G. Andersson, and D. S. Kirschen, “Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1131–1140, 2018.
- [28] C. D. B. Mellado, “Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman,” p. 131, 2013.
- [29] M. Chen and G. A. Rincon-Mora, “Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 504–511, 2006.
- [30] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación, 2003.
- [31] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, “Control of power converters in AC microgrids,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, 2012.