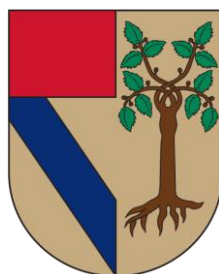


UNIVERSIDAD PANAMERICANA
CAMPUS GUADALAJARA

POSGRADOS DE INGENIERÍA



Título de tesis
Estudio de los convertidores de CD-CD
elevadores de alta ganancia

Tesis que presenta:
Julio Cesar Hernández Ochoa

Para obtener el Grado de
Doctor en Ingeniería

Director de Tesis
Dr. Julio César Rosas Caro

Codirector de Tesis
Dr. Antonio Valderrábano González

Zapopan, Jalisco, marzo 2026

Esta tesis fue revisada y aprobada por el siguiente comité:

Director de Tesis:

Dr. Julio César Rosas Caro

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Universidad Panamericana Campus Guadalajara

Codirector de Tesis:

Dr. Antonio Valderrábano González

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Universidad Panamericana Campus Guadalajara

Sinodal:

Dr. Héctor Rogelio Robles Campos

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Universidad

Sinodal:

Dr. Juan Miguel González López

Facultad de Ingeniería Electromecánica

Universidad de Colima

Sinodal:

Dr. Pedro Martín García Vite

TecNM-Campus Instituto Tecnológico

Cd. Madero

Resumen

La presente tesis doctoral aborda el análisis, diseño, implementación y validación experimental de convertidores CD-CD de alto rendimiento orientados a su aplicación en sistemas fotovoltaicos. El estudio se enfoca en el desarrollo de una topología elevadora innovadora capaz de ofrecer simultáneamente una elevada ganancia de voltaje, disminución del rizado en la salida y una mejora en la respuesta dinámica del sistema. Estos objetivos se logran mediante la integración de técnicas de operación intercalada, herramientas avanzadas de modelado y el empleo de dispositivos semiconductores de última generación.

En una primera etapa, se llevó a cabo una revisión detallada del estado del arte de las distintas topologías de convertidores CD-CD utilizadas en aplicaciones fotovoltaicas, identificando sus principales limitaciones en términos de rizado de voltaje, esfuerzos eléctricos sobre los componentes y velocidad de respuesta frente a cambios en la carga y en las condiciones de operación. Posteriormente, se estudió el impacto de los parámetros parásitos presentes en los dispositivos activos y pasivos sobre el comportamiento real de los convertidores. Este análisis se realizó mediante simulaciones en PLECS y fue complementado con validación experimental utilizando un convertidor Buck. Los resultados muestran que elementos como el retardo de propagación en los circuitos de disparo, el voltaje de saturación de los dispositivos de conmutación y las resistencias parásitas (ESR/DCR) de los componentes pasivos tienen un efecto considerable en la regulación del voltaje y en la respuesta dinámica del sistema, lo que resalta la importancia de incluir estos factores durante el proceso de diseño de convertidores de alto desempeño.

Como parte fundamental del trabajo, se desarrolló e implementó experimentalmente un convertidor elevador LVC (Low Voltage Converter) basado en tecnología GaN-FET, el cual fue evaluado tanto en operación convencional como bajo una estrategia de operación intercalada. Los resultados experimentales obtenidos demuestran que la topología propuesta permite alcanzar elevados niveles de ganancia de voltaje sin aumentar proporcionalmente el estrés eléctrico sobre los dispositivos semiconductores. De igual forma, la operación intercalada posibilitó

una reducción aproximada del 50 % en el rizado del voltaje de salida, lo que contribuye significativamente a mejorar la calidad de la energía suministrada.

Los resultados obtenidos confirman la hipótesis planteada y evidencian que la integración de topologías innovadoras, estrategias avanzadas de control y semiconductores modernos representa una alternativa eficaz para incrementar la eficiencia, estabilidad y confiabilidad de los convertidores CD-CD aplicados a sistemas fotovoltaicos. En este sentido, la investigación aporta contribuciones originales tanto en el ámbito académico como tecnológico, favoreciendo el desarrollo de sistemas de conversión de potencia más eficientes y adecuados para aplicaciones de generación de energía renovable.

Palabras clave: Convertidores CD-CD; alta ganancia de voltaje; reducción de rizado; convertidor elevador; operación intercalada; semiconductores GaN; parámetros parásitos; electrónica de potencia.

Índice

Resumen	3
Índice	5
Lista de figuras.....	8
Lista de tablas	11
Agradecimientos	12
Dedicatoria	14
Capítulo 1 Introducción	
1.1 Motivación e introducción	15
1.2 Hipótesis	17
1.3 Justificación.....	17
1.4 Objetivos y contribuciones.....	19
1.5 Organización de la tesis	19
Referencias de capítulo 1	22
Capítulo 2. Electrónica de potencia	
2.1 Electrónica de potencia	24
2.1.1 Tipos de potencia eléctrica	26
2.1.2 Tipos de convertidores de potencia.....	29
2.2 Energías renovables	
2.2.1 ¿Qué es la energía renovable?	30
2.2.2 Tipos de energía renovable	31
2.2.3 Electrónica de potencia y su relación con energías renovables	33
Referencias de capítulo 2	35
Capítulo 3. Convertidores CD-CD tradicionales.....	37
3.1 Convertidor reductor	41
3.2 Convertidor elevador	43
3.3 Convertidor elevador-reductor	46
Referencias de capítulo 3	48

Capítulo 4. Topologías novedosas para elevar el voltaje	50
4.1 Convertidores CD-CD con acoplamientos magnéticos	51
4.2 Convertidores CD-CD con capacitores conmutados	52
4.3 Convertidores CD-CD con topologías híbridas	53
4.4 Convertidores CD-CD con topologías cuadráticas	55
Referencias de capítulo 4	57
 Capítulo 5. Convertidor doble dual	
5.1 Principio de operación del convertidor doble dual	59
5.2 Convertidor doble dual con bajo voltaje en los capacitores (LVC)	62
5.3 Modelado matemático del convertidor con bajo voltaje en los capacitores (LVC)	64
Referencias de capítulo 5	66
 Capítulo 6. Análisis de sensibilidad de parámetros parásitos en convertidores CD- CD.....	67
6.1 Metodología	68
6.1.1 Retardo de propagación	69
6.1.2 Voltaje de saturación	72
6.1.3 Influencia de la resistencia en serie equivalente (ESR) y la resistencia de corriente directa (DCR) en convertidores CD-CD	74
Referencias del capítulo 6	75
 Capítulo 7. Funcionamiento mejorado del convertidor elevador con alta ganancia de voltaje y bajo voltaje en los capacitores.	
7.1 Aplicaciones y efectos de la técnica de intercalamiento de señales de control en topologías actuales	76
7.2 Aplicación de la técnica de intercalamiento de señales de control al convertidor doble dual con bajo voltaje en los capacitores (LVC)	78
Referencias de capítulo 7	83

Capítulo 8. Simulaciones y resultados experimentales	
8.1 Sensibilidad de parámetros parásitos en los convertidores CD-CD	85
8.2 Análisis del funcionamiento mejorado del convertidor elevador LVC	92
Referencias de capítulo 8	96
Capítulo 9 Conclusiones	
9.1 Conclusiones	97

Lista de Figuras

Fig. 1.1 Esquema de la metodología implementada	19
Fig. 2.1 Símbolos de dispositivos semiconductores de potencia e interruptores	24
Fig. 2.2 Antiguo eliminador de baterías vs cargador moderno.	25
Fig. 2.3 Símbolos de los convertidores de potencia	29
Fig. 2.4 Campo eólico de La Venta en Oaxaca y Central Fotovoltaica en Santa Rosalía en Baja California.....	33
Fig. 2.5 Sistemas fotovoltaicos de generación de energía en (a) el museo de historia natural en Chicago (b) en el museo Peggy Notebaert en Chicago	33
Fig. 2.6 Diagrama a bloques de un sistema de generación fotovoltaico conectado a la red	34
Fig. 2.7 Dos tipos de sistemas fotovoltaicos	35
Fig. 3.1 Elementos básicos de un convertidor CD-CD (de izquierda a derecha: fuente de alimentación, interruptor, diodo, inductor, capacitor, resistencia de carga)	37
Fig. 3.2 Ciclo de trabajo o señal de control para la conmutación de un convertidor CD-CD	38
Fig. 3.3 Gráfica de la corriente de el inductor de un convertidor CD-CD, modo continuo (izquierda), modo discontinuo (derecha)	39
Fig. 3.4 Rizo de voltaje en una señal de corriente directa	40
Fig.3.5 Convertidor Buck (reductor) en modo de conducción continua con $D=0.5$	41
Fig. 3.6 Circuitos equivalentes Buck de acuerdo con la conmutación del interruptor. Interruptor cerrado(a), interruptor abierto (b)	42
Fig.3.7 Convertidor Boost (elevador) en modo de conducción continua con $D=0.5$	44
Fig. 3.8 Circuitos equivalentes Boost de acuerdo con la conmutación del interruptor. Interruptor cerrado(a), interruptor abierto (b)	44
Fig.3.9 Convertidor Buck-Boost (elevador-reductor) en modo de conducción continua con $D=0.5$	46

Fig. 3.10 Circuitos equivalentes Buck-Boost de acuerdo con la conmutación del interruptor. Interruptor cerrado (a), interruptor abierto (b)	47
Fig. 4.1 Ejemplo de un convertidor CD-CD con transformadores acoplados	51
Fig. 4.2 Ejemplo de un convertidor CD-CD con capacitores conmutados	52
Fig. 4.3 Ejemplo de un convertidor CD-CD con una topología híbrida	54
Fig. 4.4 Ejemplo de un convertidor CD-CD cuadrático	56
Fig. 5.1 Convertidor boost doble dual.....	60
Fig. 5.2 Convertidor boost doble dual LVC	63
Fig. 5.3 Circuitos equivalentes, según el estado de conmutación, (a) cuando los transistores están cerrados y (b) cuando los transistores están abiertos	63
Fig. 6.1 Retardo de transporte	69
Fig. 6.2 Variación del ciclo de trabajo con la frecuencia	72
Fig. 7.1. Circuitos equivalentes, según el estado de conmutación, (a) cuando los transistores están cerrados y (b) cuando los transistores están abiertos	79
Fig. 7.2. Señales de voltaje del convertidor LVC, (arriba) señal de la fuente de alimentación, (abajo) señal de la salida del convertidor. $f = 20\text{KHz}$, $D=0.5$	79
Fig. 7.3. Generador PWM con dos señales de conmutación utilizando dos comparadores ideales	80
Fig. 7.4. Estados de conmutación del convertidor con dos señales de disparo: (a) $\{s_1, s_2\} = \{0, 0\}$, (b) $\{s_1, s_2\} = \{0, 1\}$, (c) $\{s_1, s_2\} = \{1, 0\}$, y (d) $\{s_1, s_2\} = \{1, 1\}$	81
Fig. 7.5. Formas de onda relevantes del generador PWM con los ciclos de trabajo: (a) $D=0.4$, (b) $D=0.5$, (c) $D=0.6$	82
Fig. 8.1. Implementación del convertidor Buck	85
Fig. 8.2. Diagrama de los optoacopladores utilizados (izquierda) HCPL 4503, (derecha) HCPL 3120	87
Fig. 8.3. Circuito de acoplamiento para el disparo del IGBT	88
Fig. 8.4. Señales medidas en el osciloscopio, arriba la concerniente al circuito que utiliza el optoacoplador HPCL-4503, abajo la referente al optoacoplador HPCL-3120	89
Fig. 8.5. Resultados del voltaje obtenido en las simulaciones e implementación del convertidor Buck	91
Fig. 8.6. Medio puente modelo TDHB-65H070L-DC-ND de la compañía Transphorm	92

Fig. 8.7. Prototipo experimental con las sondas activas de medición de corriente	93
Fig. 8.8. Señales en la operación tradicional del convertidor LVC (no intercalada)	94
Fig. 8.9. Señales del convertidor LVC en la operación intercalada	95

Lista de Tablas

Tabla 6.1 Comparación de ciclo de trabajo al aumentar la frecuencia	71
Tabla 6.2 Parámetros típicos del IGBT IRG4BC10UD	73
Tabla 8.1 Comparativa de algunas características de los optoacopladores utilizados	87

Agradecimientos

La culminación de esta tesis doctoral representa no solo un logro académico, sino también un proceso de crecimiento personal y profesional que no habría sido posible sin el apoyo de muchas personas e instituciones. Por ello, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todos quienes, de distintas maneras, contribuyeron a la realización de este trabajo.

En primer lugar, agradezco a Dios, por brindarme la fortaleza, la constancia y la claridad necesarias para enfrentar los retos de este camino. Su guía fue fundamental en los momentos de dificultad y su presencia constante me permitió perseverar hasta alcanzar esta meta.

Expreso un profundo agradecimiento a mi director y coordinador de tesis Dr. Julio César Rosas Caro y Dr. Antonio Valderrábano González, por su orientación, paciencia y compromiso a lo largo de todo el proceso de investigación. Su rigor académico, sus consejos oportunos y su confianza en mi trabajo fueron determinantes para el desarrollo y consolidación de esta tesis, así como para mi formación como investigador.

Agradezco también a los miembros del comité tutorial y del jurado evaluador, por el tiempo dedicado a la revisión de este manuscrito y por sus valiosas observaciones, las cuales contribuyeron de manera significativa a mejorar la calidad científica y la claridad de los resultados presentados.

De manera especial, deseo agradecer al maestro Lorenzo Ángel González Ruiz, por el apoyo, la comprensión y la flexibilidad brindados durante el desarrollo de mis estudios doctorales. Su confianza y respaldo hicieron posible compaginar las responsabilidades profesionales con las exigencias académicas de este doctorado, lo cual fue clave para la culminación de este proyecto.

Asimismo, agradezco a la Universidad Panamericana, por el espacio, la infraestructura y los recursos necesarios para llevar a cabo la parte experimental de esta investigación. El acceso a equipos especializados y a un entorno académico adecuado fue fundamental para la validación de los resultados obtenidos.

A mis compañeros, colegas y amigos, gracias por las discusiones técnicas, el intercambio de ideas y el apoyo constante. Compartir este camino con ustedes enriqueció tanto el trabajo académico como la experiencia personal.

Finalmente, agradezco de manera muy especial a mi familia, por su amor, paciencia y apoyo incondicional. Su comprensión y aliento constante fueron el motor que me permitió seguir adelante en los momentos más exigentes de este proceso. A todos ellos, y a quienes de alguna forma contribuyeron directa o indirectamente a la realización de esta tesis, expreso mi más profundo agradecimiento.

Dedicatoria

A mi familia,
por su amor incondicional, su paciencia y su apoyo constante a lo largo de este camino. Ustedes han sido mi fortaleza en los momentos difíciles y la inspiración que me impulsó a seguir adelante. Este logro también les pertenece.

A mi nieta Amara (y futuros nietos),
fuente de alegría, esperanza y motivación constante. Que este trabajo sea para ti un recordatorio de que el esfuerzo, la constancia y el amor abren caminos y hacen posibles los sueños.

A mis alumnos,
razón y sentido de mi vocación docente. Que esta tesis sea testimonio de que el aprendizaje es un proceso continuo y que el compromiso con la educación y la ciencia tiene el poder de transformar vidas.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación e Introducción.

En la actualidad, los convertidores CD-CD se han convertido en elementos clave dentro de múltiples aplicaciones de conversión de energía, especialmente en sistemas que utilizan fuentes renovables como la energía fotovoltaica. Su propósito principal es adecuar los niveles de voltaje suministrados por la fuente a los requerimientos específicos de las cargas o de los sistemas de almacenamiento energético. No obstante, a pesar de su amplia utilización, todavía existen retos técnicos que afectan su desempeño global, particularmente en lo relacionado con la reducción del rizado, el incremento de la ganancia de voltaje y la mejora de la respuesta dinámica ante variaciones inesperadas en las condiciones de operación del sistema. Estas limitaciones representan una oportunidad para la investigación y el desarrollo de nuevas topologías y estrategias de control que permitan optimizar el funcionamiento de estos convertidores.

En lo que respecta a la disminución del rizado, diversos estudios recientes han propuesto soluciones innovadoras orientadas a reducir las fluctuaciones de voltaje y corriente en la salida. Entre estas propuestas se encuentran convertidores tipo buck con rizado prácticamente nulo, obtenidos mediante el uso de autotransformadores de dos devanados, lo que permite obtener una salida libre de ondulaciones sin afectar significativamente la eficiencia [1.1]. De igual manera, la aplicación de técnicas de operación intercalada en convertidores boost trifásicos ha demostrado ser efectiva para disminuir tanto el rizado de corriente en la entrada como el rizado de voltaje en la salida en comparación con configuraciones convencionales [1.2][1.3]. Adicionalmente, se han investigado enfoques más

avanzados que incorporan gemelos digitales y redes neuronales para supervisar el envejecimiento de los componentes, al mismo tiempo que contribuyen a reducir las variaciones de voltaje y corriente [1.4]. Estos desarrollos reflejan el creciente interés por mejorar la calidad de la energía suministrada, aunque en muchos casos no abordan simultáneamente otras limitaciones importantes del sistema.

Por otra parte, la ganancia de voltaje constituye un reto central en aplicaciones donde la fuente entrega bajos niveles de tensión, como ocurre en paneles fotovoltaicos, que usualmente generan entre 20 y 40 V, mientras que las cargas o sistemas de almacenamiento demandan valores superiores. Se han propuesto topologías intercaladas con unidades capacitor-diodo y devanados acoplados que permiten escalar la ganancia de manera flexible sin imponer altos esfuerzos sobre los interruptores [1.5]. Adicionalmente, se han desarrollado convertidores sin transformador que combinan inductores y capacitores conmutados, alcanzando altos factores de ganancia, con una sola etapa de conversión y corrientes de entrada continuas, lo cual beneficia la vida útil de los paneles solares [1.6]. Estas propuestas demuestran que el aumento de ganancia es posible sin recurrir a ciclos de trabajo extremos, pero aún es necesario equilibrar dicha ganancia con una operación estable y confiable.

Finalmente, la dinámica de respuesta de los convertidores también resulta crucial. Una respuesta rápida ante cambios en la tensión de entrada o en la carga asegura un mejor desempeño del sistema global, particularmente en aplicaciones fotovoltaicas, donde las condiciones de irradiancia pueden variar de forma abrupta. Estudios recientes han evidenciado que el reemplazo de interruptores basados en silicio por dispositivos fabricados con tecnología GaN (nitruro de galio), combinado con estrategias de control digital, permite disminuir de manera considerable los tiempos de respuesta cuando el sistema opera bajo control de tensión [1.7]. De manera similar, en aplicaciones fotovoltaicas se han propuesto esquemas de control en cascada que incorporan lazos robustos de rechazo a perturbaciones. Estos métodos integran técnicas como el control por modo deslizante junto con controladores PID fraccionarios, lo que contribuye a mejorar la estabilidad del sistema frente a variaciones externas [1.8].

En términos generales, aunque los progresos alcanzados en la reducción del rizado, el aumento de la ganancia de voltaje y la mejora del tiempo de respuesta son significativos, gran parte de los trabajos reportados en la literatura abordan cada uno de estos aspectos de forma independiente. La integración simultánea de estos tres elementos dentro de una misma topología representa una oportunidad importante de innovación, ya que podría conducir al desarrollo de convertidores más eficientes, estables y apropiados para su implementación en sistemas de generación basados en energías renovables.

En este contexto, la presente investigación surge de la necesidad de diseñar un convertidor CD-CD que incorpore de manera conjunta dichas mejoras, contribuyendo así al progreso tecnológico en el ámbito de la conversión de potencia y al fortalecimiento de sistemas energéticos más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Para alcanzar este objetivo, resulta indispensable optimizar las arquitecturas existentes y evaluar experimentalmente la efectividad de una solución integral. Bajo esta premisa, y considerando la evidencia de las problemáticas actuales, se plantea que la combinación de principios avanzados de diseño permitirá obtener un desempeño superior, lo que conduce a la formulación de los siguientes planteamientos.

1.2 Hipótesis

La implementación de una nueva topología de convertidor CD-CD, que combine técnicas de reducción de rizado, incremento de ganancia de voltaje y mejora en la respuesta dinámica mediante el uso de semiconductores avanzados, permitirá obtener un dispositivo más eficiente, estable y confiable para su aplicación en sistemas fotovoltaicos, mejorando significativamente la calidad de energía entregada en comparación con los convertidores convencionales.

1.3 Justificación.

El impulso hacia el desarrollo de tecnologías energéticas limpias y sostenibles se ha vuelto una prioridad a nivel global, impulsado tanto por el incremento continuo en la demanda de electricidad como por la necesidad de reducir los impactos asociados al cambio climático. En este escenario, los sistemas fotovoltaicos

se posicionan como una de las opciones más atractivas para la generación distribuida de energía. No obstante, el desempeño y la confiabilidad de estos sistemas dependen en gran medida del funcionamiento de los convertidores CD-CD, los cuales tienen la tarea de ajustar el nivel de voltaje producido por los paneles solares a los requerimientos específicos de las cargas o de los sistemas de almacenamiento.

A pesar de los avances presentados en diversos estudios, los convertidores CD-CD todavía enfrentan varios desafíos relevantes. En primer lugar, la presencia de rizado en el voltaje y la corriente de salida puede deteriorar la calidad de la energía suministrada y, en consecuencia, afectar la vida útil de los dispositivos conectados al sistema. Además, debido a que los módulos fotovoltaicos suelen proporcionar niveles de tensión relativamente bajos, se requieren convertidores capaces de ofrecer una elevada ganancia de voltaje sin incrementar el esfuerzo eléctrico sobre los dispositivos semiconductores ni comprometer la eficiencia del sistema. Finalmente, la rapidez de respuesta de estos convertidores frente a cambios bruscos en la carga o en la irradiancia continúa siendo un aspecto crítico, ya que una respuesta dinámica insuficiente puede provocar inestabilidades en el sistema y pérdidas de energía.

Resolver estas tres problemáticas de manera conjunta representa un desafío científico y tecnológico. Si bien existen investigaciones que han propuesto soluciones parciales —como la implementación de técnicas intercaladas para reducir el rizado [1.1], el uso de topologías cuadráticas o capacitor-diodo para mejorar la ganancia [1.5], o la incorporación de dispositivos GaN con control digital para acelerar la dinámica [1.7]—, la literatura muestra que estas mejoras rara vez se integran en un solo diseño.

En este sentido, la presente investigación se justifica porque busca desarrollar una topología de convertidor CD-CD innovadora que integre simultáneamente la reducción del rizado, el aumento de ganancia y la mejora en el tiempo de respuesta. Con ello, se pretende ofrecer una solución integral que supere las limitaciones de los convertidores tradicionales, contribuyendo no solo al avance académico en el campo de la conversión de potencia, sino también al fortalecimiento de los sistemas de energía renovable.

El impacto esperado de esta investigación es doble:

Académico, al generar conocimiento novedoso y aportar a la literatura especializada en topologías de convertidores de alto rendimiento.

Tecnológico, al ofrecer un diseño más eficiente, confiable y sostenible, que pueda ser aplicado en sistemas fotovoltaicos y en otros esquemas de generación limpia, ayudando a incrementar la penetración de las energías renovables en la matriz energética.

En consecuencia, esta investigación responde a una necesidad real del sector energético y constituye un aporte relevante para la transición hacia fuentes de energía más limpias y eficientes.

1.4 Objetivos y contribuciones.

Objetivos generales.

Analizar las topologías que utilizan actualmente los convertidores CD-CD, así como los mecanismos y algoritmos de mejora y optimización que se usan en estos y otros dispositivos, con la finalidad de proponer una solución que optimice su desempeño. El enfoque principal del proyecto es tener una alta ganancia de voltaje, principalmente en topologías que puedan ser utilizadas en un sistema fotovoltaico de generación de energía eléctrica. El punto inicial es un convertidor novedoso, y la aplicación de diversas técnicas a dicha topología.

Objetivos particulares

- Estudiar los mecanismos de mejora en la operación de los convertidores de CD-CD, particularmente mecanismos que permitan mejorar (aumentar) la ganancia de voltaje.
- Implementar las técnicas descritas en el estado del arte al convertidor seleccionado y a algunos otros para seleccionar el modelo más adecuado.
- Publicar al menos un artículo en revistas indizadas en el SCI-E del JCR.

1.5 Organización de la tesis.

El presente trabajo consiste en una investigación experimental-descriptiva aplicada, pues utilizando el conocimiento de la electrónica, matemáticas y ciencias computacionales, se desarrolla un prototipo experimental que se pone a prueba en el laboratorio, cuyas condiciones experimentales, equipo, experimentos y acontecimientos son descritos a detalle en las próximas páginas.

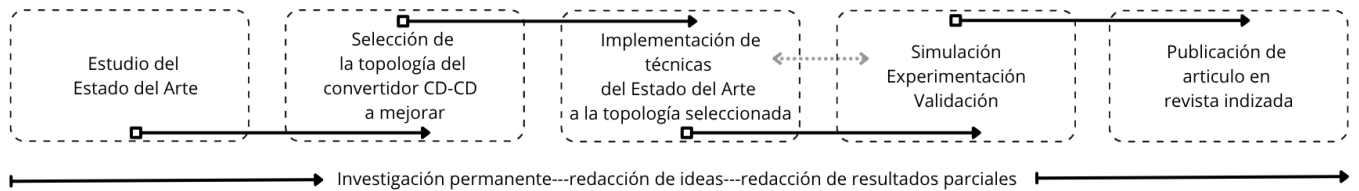


Fig. 1.1 Esquema de la metodología implementada.

La metodología se divide en cinco etapas (Fig. 1.1), comienza con el estudio del estado del arte, analizando de manera teórica varias topologías de convertidores CD-CD (conexión intercalada, conexión en paralelo con una modulación particular, conexión doble dual de convertidores modificados, conexión en cascada con modulación especial), para seleccionar la topología y el algoritmo más conveniente. Tras la selección de una topología inicial, se genera el modelo matemático usando el método del promediado [1.9], posteriormente se realiza simulación por computadora, con comprobación experimental mediante el prototipado del convertidor, y la medición de variables con equipos especializados de laboratorio de electrónica de potencia de la UP, con la finalidad de demostrar la hipótesis.

Una vez probada la validez de la hipótesis se registra el avance y redacta los resultados, al ser refutada es necesario reformular una nueva que permita mejorar la eficiencia de los convertidores CD-CD para su mayor aprovechamiento en los sistemas fotovoltaicos de generación de energía eléctrica.

La presente tesis se encuentra estructurada en **nueve** capítulos, además de las secciones de referencias y anexos. A continuación, se describe el contenido de cada capítulo:

- **Capítulo 2. Electrónica de potencia:** Se presentan los fundamentos de la electrónica de potencia y su papel dentro de los sistemas eléctricos modernos. Se explican los diferentes tipos de potencia eléctrica, los convertidores de potencia más relevantes y su relación con las energías renovables. Este capítulo busca proporcionar el marco conceptual necesario para comprender la importancia de la conversión de energía en aplicaciones limpias y sostenibles.
- **Capítulo 3. Convertidores CD-CD tradicionales:** Se analizan las topologías básicas de convertidores CD-CD, incluyendo el reductor (*buck*), el elevador (*boost*) y el elevador-reductor (*buck-boost*). Se describe su principio de funcionamiento, características principales, ventajas y limitaciones, estableciendo la base para la comparación con topologías más avanzadas.
- **Capítulo 4. Topologías novedosas para elevar el voltaje:** En este capítulo se estudian diferentes técnicas y topologías propuestas en la literatura para incrementar la ganancia de voltaje en los convertidores CD-CD. Se incluyen convertidores con acoplamientos magnéticos, topologías basadas en capacitores conmutados, configuraciones híbridas y convertidores cuadráticos. Se analiza el estado del arte, sus beneficios y las limitaciones que presentan para aplicaciones de alta eficiencia.
- **Capítulo 5. Convertidor doble dual:** Se explica el principio de operación general de los convertidores doble dual, se analizan sus características de desempeño y se desarrolla el modelado matemático que permite evaluar su comportamiento en condiciones reales de operación. Se analiza a detalle las características del convertidor doble dual con bajo voltaje en los capacitores (*Low Voltage on Capacitors – LVC*). Se desarrolla su modelo matemático, con el fin de establecer las bases para su análisis y optimización.
- **Capítulo 6. Análisis de sensibilidad de parámetros parásitos en convertidores CD-CD:** Se estudia la influencia de los parámetros parásitos (como resistencias de conmutación, inductancias de fuga y resistencias serie en capacitores) en el desempeño de los convertidores CD-CD. Este análisis permite identificar los elementos que impactan de manera más significativa en la eficiencia y estabilidad del sistema, así como establecer criterios de diseño más robustos.
- **Capítulo 7. Funcionamiento mejorado del convertidor elevador con alta ganancia de voltaje y bajo voltaje en los capacitores:** Se propone un

convertidor tipo *boost* modificado que integra una alta ganancia de voltaje con la ventaja de mantener bajo voltaje en los capacitores. Se describe su principio de operación y se desarrolla su modelado matemático, resaltando las mejoras obtenidas frente a topologías convencionales.

- **Capítulo 8. Simulaciones y resultados experimentales:** Se presentan los resultados obtenidos mediante simulaciones y pruebas experimentales. Se incluyen tanto los resultados propios como los obtenidos a partir de publicaciones en *journals* y conferencias. Se analizan las respuestas dinámicas, la ganancia de voltaje alcanzada, la reducción de rizado y la validación del modelo matemático frente a los prototipos experimentales.
- **Capítulo 9. Conclusiones, discusión y trabajos futuros:** Se exponen las conclusiones generales de la investigación, destacando los principales logros alcanzados y su relevancia dentro del campo de la electrónica de potencia aplicada a energías renovables. Asimismo, se realiza una discusión crítica de los resultados, se incluyen las publicaciones derivadas del trabajo de investigación y se proponen líneas futuras que permitan extender y consolidar los avances presentados.

Referencias del Capítulo 1

[1.1] Ayachit, A., Saini, D. K., Salvatierra, T., & Kazimierczuk, M. K., "Analysis, design, and performance evaluation of zero-voltage-ripple (ZVR) buck dc-dc converter," *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 3, pp. 415-423, 2019. doi: 10.1049/iet-pel.2018.5455.

[1.2] M. A. Harimon, A. Ponniran, A. N. Kasiran, y H. H. Hamzah, "A Study on 3-phase Interleaved DC-DC Boost Converter Structure and Operation for Input Current Stress Reduction," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 8, no. 4, pp. 1948-1953, 2017, doi:10.11591/ijpeds.v8.i4.pp1948-1953.

[1.3] L. Pirashanthiyah, H. N. Edirisinghe, W. M. P. De Silva, S. R. A. Bolonne, V. Logeeshan, y C. Wanigasekara, "Design and Analysis of a Three-Phase Interleaved

DC-DC Boost Converter with an Energy Storage System for a PV System,” *Energies*, vol. 17, no. 1, Art. 250, 2024, doi:10.3390/en17010250.

[1.4] S. Kumar, A. Sharma, R. Gupta, y P. Verma, “Digital twin-based ripple minimization in DC-DC converters using deep learning and SMO,” arXiv preprint arXiv:2509.06279, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2509.06279>

[1.5] K. A. Park y H. Lee, “Interleaved high-gain DC-DC converter using coupled inductors and capacitor-diode units,” en *Proc. Int. Conf. on Power Electronics*, Springer, 2024, pp. 745–752. [Online]. Disponible: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-981-97-6091-6.pdf>

[1.6] A. S. Roy y B. K. Singh, “Transformerless quadratic boost DC-DC converter for PV applications,” *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 11, no. 4, pp. 2122–2133, 2022.

[1.7] K. Kroičs, K. Gaspersons y A. Elkhateb, “Response Time Reduction of DC–DC Converter in Voltage Mode with Application of GaN Transistors and Digital Control,” *Electronics*, vol. 13, no. 5, art. 901, 2024.

[1.8] E. B. Tashiro, A. I. Smirnov, “Robust cascaded control of PV DC-DC converters using fractional PID and sliding mode,” *Automatic Control and Computer Sciences*, vol. 56, no. 5, pp. 441–452, 2022.

[1.9] R. W. Erickson y D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*, 3.^a ed., Cham, Suiza: Springer, 2020.

Capítulo 2

Electrónica de potencia.

2.1 Electrónica de potencia.

La electrónica de potencia constituye una disciplina fundamental dentro de la ingeniería eléctrica, enfocada en el estudio de los procesos de conversión, control y gestión eficiente de la energía eléctrica mediante el uso de dispositivos semiconductores. Su objetivo principal es modificar y regular los niveles de voltaje y corriente a través de circuitos electrónicos especializados, permitiendo adaptar la energía eléctrica a los requerimientos específicos de una amplia variedad de aplicaciones industriales, comerciales y de generación de energía.

En este campo, los dispositivos semiconductores desempeñan un papel esencial, ya que están diseñados para operar con elevados niveles de voltaje y corriente. Estos componentes funcionan principalmente como interruptores electrónicos o rectificadores, operando en régimen de conmutación, es decir, alternando entre estados de conducción y bloqueo, en lugar de trabajar en la región lineal de operación. Este modo de funcionamiento permite alcanzar mayores niveles de eficiencia en los procesos de conversión de energía. Entre los dispositivos semiconductores más empleados en la electrónica de potencia se encuentran los diodos, los transistores de potencia y los tiristores, así como diversas variantes avanzadas como los transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT) y los tiristores de apagado por compuerta (GTO), los cuales se ilustran en la Fig. 2.1.

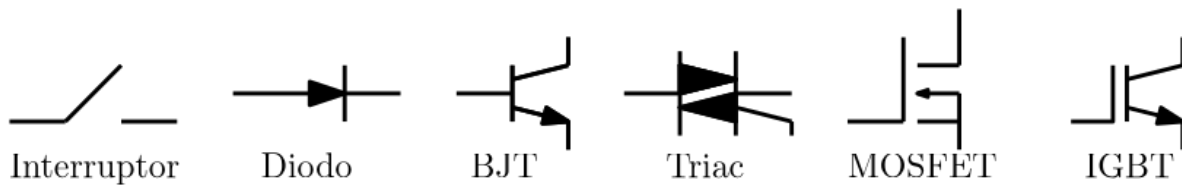


Fig. 2.1 Símbolos de dispositivos semiconductores de potencia e interruptores.

La electrónica de potencia se aplica en una amplia variedad de sectores debido a su capacidad para gestionar y transformar la energía eléctrica de manera eficiente. Entre sus principales áreas de aplicación destacan las siguientes:

- Energías renovables: En sistemas de generación fotovoltaica y eólica, los inversores de potencia desempeñan un papel esencial al convertir la energía producida en corriente directa (DC) a corriente alterna (CA), permitiendo así su integración con la red eléctrica o su uso en distintas aplicaciones energéticas.
- Sector automotriz: En el caso de los vehículos eléctricos, la electrónica de potencia se encarga de controlar la conversión y distribución de la energía almacenada en las baterías hacia los motores eléctricos, lo que contribuye a optimizar tanto el rendimiento del sistema como su eficiencia energética.
- Industria: En procesos industriales, se utilizan para controlar la velocidad de motores, regular la iluminación y gestionar sistemas de calefacción, mejorando la eficiencia energética y reduciendo costos.
- Electrodomésticos: Dispositivos como aires acondicionados y cocinas de inducción emplean electrónica de potencia para optimizar su funcionamiento y eficiencia energética.

Un ejemplo de electrónica de potencia son los cargadores de batería para teléfonos celulares (Fig. 2.2), los cuales convierten los 120V de corriente alterna (CA) de la línea de distribución de baja tensión de energía eléctrica en diversos niveles,

mucho más bajos de corriente directa CD, por ejemplo, 5V o 3.3V, necesarios para operar los equipos electrónicos. Estos dispositivos demuestran la constante evolución de la electrónica de potencia, pues cada vez son más pequeños, más potentes, funcionan con un amplio rango de voltajes de entrada (por ejemplo, se pueden utilizar aquí y en Europa en donde el voltaje de la red es 220V CA), además de ser cada vez más económicos.



Fig. 2.2 Antiguo eliminador de baterías vs cargador moderno.

2.1.1 Tipos de potencia eléctrica.

En los sistemas eléctricos de CA, la potencia eléctrica se clasifica en tres tipos fundamentales: potencia activa, reactiva y aparente. Estos conceptos son esenciales para la comprensión del flujo de energía en los sistemas de potencia, el diseño de dispositivos y la optimización del consumo energético [2.1].

Potencia Activa (P)

La potencia activa, también conocida como potencia real, es la que realiza trabajo útil en un sistema eléctrico. Se mide en vatios (W) y representa la energía convertida en calor, luz o trabajo mecánico. En un circuito puramente resistivo, la corriente y el voltaje están en fase, lo que significa que toda la energía suministrada se convierte en trabajo útil. La potencia activa se calcula como el producto de la tensión y la corriente multiplicado por el coseno del ángulo de fase entre ellos:

$$P = (V_{rms})(I_{rms})(\cos \theta) \quad (2.1)$$

Esta potencia es consumida por cargas resistivas puras y es la que realmente realiza trabajo en el sistema [2.1].

Potencia Reactiva (Q)

La potencia reactiva es la que oscila entre la fuente y la carga sin realizar trabajo útil. Se mide en volt-amperios reactivos (VAR) y es esencial para mantener los campos magnéticos en dispositivos como motores y transformadores. En circuitos inductivos, la corriente se retrasa respecto al voltaje, mientras que, en circuitos capacitivos, la corriente adelanta al voltaje. La potencia reactiva se calcula como:

$$Q = (V_{rms})(I_{rms})(\sin \theta) \quad (2.2)$$

Esta potencia es especialmente relevante en la presencia de distorsión armónica [2.2].

Potencia Aparente (S)

La potencia aparente es la combinación vectorial de la potencia activa y reactiva. Se mide en volt-amperios (VA) y representa la carga total que un sistema debe suministrar. Se calcula como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la potencia activa y reactiva:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.3)$$

Esta medida es crucial para dimensionar adecuadamente los equipos eléctricos, como generadores y transformadores.

La relación entre estas potencias se expresa mediante el **factor de potencia** (FP), que es el coseno del ángulo de fase entre la corriente y el voltaje:

$$FP = \cos \theta = \frac{P}{S} \quad (2.4)$$

Un factor de potencia cercano a 1 indica una utilización eficiente de la energía, mientras que valores bajos sugieren una mayor presencia de potencia reactiva. Esto generalmente se debe al efecto inductivo, presente en elementos como motores, transformadores o bobinas, que provoca que la corriente se retrase respecto al voltaje, generando un desfase y disminuyendo el factor de potencia. La presencia de potencia reactiva en un sistema eléctrico puede generar pérdidas adicionales que afectan su desempeño global. Para mitigar este efecto, es común emplear bancos de capacitores que permitan compensar el desfase entre la tensión y la corriente, contribuyendo así a mejorar la eficiencia energética del sistema [2.3].

En este sentido, la comprensión y correcta gestión de las distintas formas de potencia resulta esencial para el diseño y la operación eficiente de los sistemas eléctricos. Una elevada proporción de potencia reactiva puede provocar sobrecargas en los equipos, además de incrementar las caídas de tensión a lo largo de la red eléctrica. Por esta razón, la implementación de técnicas de corrección del factor de potencia, como la incorporación de bancos de capacitores, es una práctica habitual para optimizar el desempeño del sistema y reducir los costos de operación.

Por otro lado, en los sistemas eléctricos de corriente directa (CD), el análisis de la potencia resulta más sencillo en comparación con los sistemas de corriente alterna (CA), debido a que no existe desfase entre la tensión y la corriente. Esto permite expresar la potencia eléctrica de forma directa como el producto entre ambas magnitudes [2.4]. En este contexto, la potencia eléctrica en sistemas de CD se describe principalmente mediante dos formas: la potencia instantánea y la potencia media.

Potencia Instantánea (P_i)

Es la potencia en un instante dado. En corriente continua, donde el voltaje y la corriente son constantes (o varían lentamente), la potencia instantánea se expresa simplemente como:

$$P(t) = V(t) * I(t) \quad (2.5)$$

En sistemas DC puros, si V e I son constantes, entonces

$$P = VI \quad (2.6)$$

Potencia Media

Cuando en un sistema de corriente continua existen variaciones (por ejemplo, por cargas pulsantes o convertidores), se puede calcular la potencia media durante un intervalo de tiempo T :

$$P_{media} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) * I(t) dt \quad (2.7)$$

Esto es útil en electrónica de potencia donde, aunque el sistema es de CD, el comportamiento puede incluir pulsos o conmutaciones.

Aunque en corriente continua no se habla de potencia reactiva ni aparente como en AC, sí se pueden considerar otras formas de describir la potencia dependiendo del tipo de carga:

Potencia útil o activa (P)

Es la única forma de potencia relevante en corriente continua en condiciones normales. Toda la energía se convierte en trabajo útil, como calor, movimiento o luz.

$$P = VI \quad (2.8)$$

Pérdidas por efecto Joule

Aunque no es una "potencia" en el sentido estricto como una categoría separada, es importante en CD considerar las pérdidas por resistencia en los conductores:

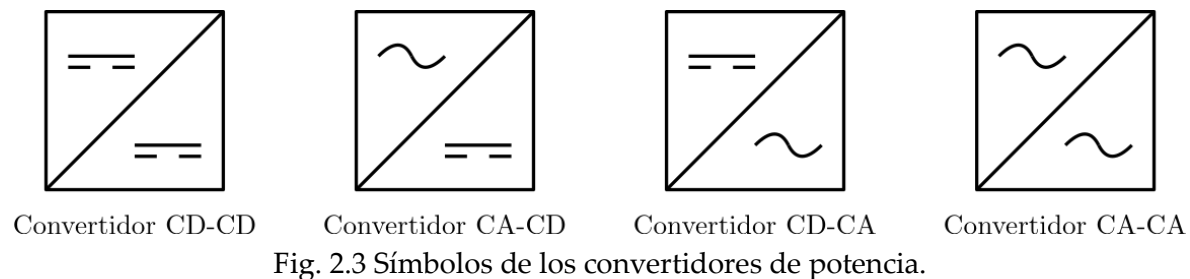
$$P_{perdida} = I^2 R \quad (2.9)$$

La comprensión de la potencia en CD es esencial en múltiples campos de la ingeniería eléctrica, especialmente en electrónica de potencia y sistemas de energía renovable. En convertidores CD-CD, vehículos eléctricos y sistemas de

almacenamiento energético, un control preciso de la potencia garantiza eficiencia y fiabilidad del sistema [2.5].

2.1.2 Tipos de convertidores de potencia

Los convertidores de potencia son dispositivos electrónicos que transforman una forma de energía eléctrica en otra. Se clasifican según el tipo de energía de entrada y salida a continuación se describen brevemente cada tipo (Fig. 2.3):



Convertidores CD-CD. Estos convertidores se utilizan para ajustar o modificar el nivel de tensión en sistemas de corriente continua. Entre las topologías más comunes se encuentran el convertidor buck, que permite reducir el nivel de voltaje; el boost, que se emplea para incrementarlo; y el buck-boost, capaz de operar tanto en modo reductor como elevador. Debido a su versatilidad, estos convertidores desempeñan un papel fundamental en diversas aplicaciones, como sistemas de alimentación electrónica y dispositivos portátiles [2.5].

Convertidores CA-CD (Rectificadores). Estos dispositivos se encargan de convertir corriente alterna en corriente continua. Son ampliamente utilizados en fuentes de alimentación y sistemas de carga de baterías. Dependiendo de su principio de operación, pueden clasificarse en rectificadores no controlados, que emplean diodos, y rectificadores controlados, basados en dispositivos como tiristores que permiten regular el proceso de conversión [2.6].

Convertidores CD-CA (Inversores). Su función es transformar corriente continua en corriente alterna. Estos convertidores resultan indispensables en aplicaciones como sistemas de energía renovable, vehículos eléctricos y sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS). De acuerdo con la forma de onda generada en la salida, los

inversores pueden clasificarse en inversores de onda cuadrada, de onda modificada o de onda senoidal pura [2.7].

Convertidores CA–CA. Este tipo de convertidores permite transformar una señal de corriente alterna en otra señal de corriente alterna con diferentes características, tales como frecuencia, amplitud de voltaje o fase. Pueden operar como convertidores de frecuencia variable o de voltaje variable y se emplean principalmente en el control de motores eléctricos y en diversas aplicaciones industriales [2.8].

En los sistemas de corriente continua, el análisis de la potencia eléctrica presenta una mayor simplicidad en comparación con los sistemas de corriente alterna, debido a la ausencia de desfase entre el voltaje y la corriente. Como consecuencia, no se generan componentes asociadas a potencia reactiva, lo que favorece una mayor eficiencia en los procesos de conversión. Esta característica resulta particularmente relevante en aplicaciones modernas que requieren un control directo y preciso del flujo de energía. En este contexto, los convertidores de potencia desempeñan un papel fundamental al permitir la adaptación de las características eléctricas a los requerimientos específicos de cada sistema, facilitando la integración de tecnologías actuales como la movilidad eléctrica, los sistemas de generación renovable y la automatización industrial [2.5]–[2.8].

2.2 Energías renovables.

2.2.1 ¿Qué es la energía renovable?

La energía renovable se refiere a aquella que proviene de recursos naturales capaces de regenerarse de forma continua y que, a escala humana, pueden considerarse prácticamente inagotables. Entre estas fuentes se encuentran la radiación solar, el viento, el agua, la biomasa y la energía geotérmica. A diferencia de los combustibles fósiles, su aprovechamiento genera emisiones contaminantes muy reducidas durante la operación, lo que contribuye de manera significativa a la mitigación del cambio climático y a la disminución de la huella de carbono a nivel global.

Adicionalmente, la utilización de energías renovables favorece la independencia energética y promueve la diversificación de la matriz energética, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y la vulnerabilidad ante las variaciones en sus precios. En este contexto, el avance y la adopción de estas tecnologías se encuentran estrechamente vinculados con el progreso en áreas como la electrónica de potencia, los sistemas de almacenamiento de energía y las redes eléctricas inteligentes, que permiten integrar estas fuentes de forma eficiente y confiable dentro de los sistemas eléctricos modernos.

Asimismo, la implementación de energías renovables tiene impactos positivos en el ámbito económico y social, ya que impulsa la generación de empleo, fomenta la innovación tecnológica y contribuye a fortalecer la resiliencia de las comunidades frente a posibles interrupciones en el suministro eléctrico.

2.2.2 Tipos de energía renovable

Las energías renovables constituyen una alternativa sostenible frente a las fuentes tradicionales basadas en combustibles fósiles. Entre las tecnologías más representativas se encuentran las siguientes:

Energía solar fotovoltaica: Esta tecnología permite convertir directamente la radiación solar en energía eléctrica mediante el uso de celdas fotovoltaicas. Su crecimiento en los últimos años ha sido impulsado por la disminución en los costos de los sistemas, el incremento en la eficiencia de los paneles y los avances en los inversores conectados a la red, los cuales facilitan la inyección de energía de forma segura y confiable [2.9]. Además, los sistemas fotovoltaicos pueden complementarse con dispositivos de almacenamiento energético, lo que permite garantizar el suministro incluso en periodos en los que no se dispone de radiación solar.

Energía eólica: Esta fuente aprovecha la energía cinética del viento para producir electricidad mediante aerogeneradores acoplados a convertidores de potencia. Estos dispositivos permiten adaptar la energía generada a las condiciones de la red eléctrica, contribuyendo a mantener la estabilidad del sistema [2.10]. Los sistemas eólicos actuales incorporan tecnologías avanzadas como control activo de velocidad,

optimización de curvas de potencia e integración con redes inteligentes, lo que incrementa su eficiencia y confiabilidad.

Energía hidráulica: Se basa en el aprovechamiento del movimiento del agua en ríos, presas, embalses o mareas para generar energía eléctrica. Una de sus principales ventajas es la capacidad de proporcionar una generación relativamente constante y predecible, lo que resulta útil para compensar la variabilidad de otras fuentes renovables intermitentes. Asimismo, la incorporación de sistemas de electrónica de potencia permite regular la entrega de energía a la red y mejorar la calidad del suministro eléctrico.

Biomasa: Esta tecnología utiliza materia orgánica, como residuos agrícolas, forestales o industriales, para producir energía térmica o eléctrica mediante procesos como combustión, digestión anaerobia o gasificación. Además de generar energía, su uso contribuye a una gestión más sostenible de los residuos, transformando materiales orgánicos en recursos energéticos aprovechables.

Energía geotérmica: Consiste en la utilización del calor proveniente del interior de la Tierra, aprovechando los gradientes térmicos presentes en el subsuelo para la generación de electricidad o para aplicaciones de calefacción directa. A diferencia de otras fuentes renovables, la geotermia ofrece una producción relativamente constante, lo que la convierte en un complemento adecuado para tecnologías intermitentes como la solar o la eólica.

La integración de estas fuentes renovables en los sistemas eléctricos modernos requiere el uso de convertidores y sistemas de electrónica de potencia capaces de adaptar la energía generada a los niveles de tensión, frecuencia y calidad exigidos por la red eléctrica [2.9][2.10]. En este contexto, los sistemas híbridos —que combinan diferentes fuentes renovables junto con dispositivos de almacenamiento energético y convertidores inteligentes— han demostrado mejorar significativamente la confiabilidad y estabilidad del suministro eléctrico.

Este enfoque resulta particularmente relevante en zonas aisladas o en microrredes, donde la combinación de múltiples fuentes de generación permite compensar las fluctuaciones tanto de la demanda como de la producción energética,

optimizando el aprovechamiento de los recursos disponibles y reduciendo pérdidas en el sistema [2.10]. Además, los sistemas híbridos facilitan la gestión energética al permitir priorizar el uso de fuentes renovables, optimizar los procesos de carga y descarga de baterías, mantener la calidad de la potencia y aumentar la eficiencia global del sistema. Como resultado, las microrredes y redes inteligentes basadas en tecnologías híbridas presentan una mayor resiliencia frente a eventos climáticos extremos o interrupciones en el suministro energético convencional.

2.2.3 Electrónica de potencia y su relación con energías renovables

Un área de oportunidad que tiene la electrónica de potencia es en los sistemas de generación de energía eléctrica con fuentes renovables: como la solar y la eólica (Fig. 2.4). Sabemos que, al utilizar estos sistemas, se reduce la emisión de gases de efecto invernadero y con ello el calentamiento global, con lo cual disminuye el cambio climático, e indirectamente la posibilidad de afectación por sus efectos colaterales: como huracanes e inundaciones que podrían causar una catástrofe al dañar una central nuclear. En estas tecnologías, la producción no se realiza con generadores de gran tamaño sino por pequeños generadores que se agrupan para producir una gran cantidad de energía.



Fig. 2.4 Campo eólico de La Venta en Oaxaca y Central Fotovoltaica en Santa Rosalía en Baja California. Obtenidas de: <http://www.cfe.gob.mx/expo/galeria/index.html>

Los convertidores de CD-CD son dispositivos electrónicos de potencia cuya función principal es modificar el nivel de tensión eléctrica, manteniendo la corriente directa, con la posibilidad de regular tanto el voltaje como la corriente de salida de acuerdo con los requerimientos de la carga. Estos convertidores permiten una

gestión eficiente de la energía, mejorando el desempeño y la compatibilidad entre distintas fuentes y sistemas eléctricos.

Entre sus múltiples aplicaciones, los convertidores de CD-CD desempeñan un papel fundamental en sistemas de generación de energía renovable, particularmente en aquellos que emplean paneles solares. En este tipo de sistemas, los convertidores permiten adaptar la energía generada por los módulos fotovoltaicos a los niveles de tensión requeridos por los sistemas de almacenamiento, inversores o cargas finales, además de facilitar la implementación de estrategias de control como el seguimiento del punto de máxima potencia. La Figura 2.5 muestra un par de ejemplos de sistemas de generación fotovoltaica instalados en techos de edificios, donde este tipo de convertidores resulta indispensable para garantizar una operación eficiente y confiable.



Fig. 2.5 Sistemas fotovoltaicos de generación de energía en (a) el museo de historia natural en Chicago (b) en el museo Peggy Notebaert en Chicago (Aranda E.D. et al, 2019).

El voltaje (CD) producido por un panel solar (Fig. 4) es relativamente bajo y no se encuentra regulado, es decir, no se garantiza que siempre tenga el mismo valor o rango de valores, su amplitud depende de la irradiancia solar. Para que la energía eléctrica producida por un panel solar sea útil, se usan convertidores basados en electrónica de potencia, en donde el bajo voltaje producido por las celdas solares es elevado a tensiones adecuadas para alimentar un circuito inversor, donde es transformado a CA, para finalmente conectarse a la red o a los aparatos que se desean alimentar (Fig.2.6). La primera estación de conversión de energía se denomina conversión CD-CD dado que tanto la entrada como la salida contienen corriente directa. Este convertidor intermedio debe de tener alta ganancia de voltaje, esto hace que la investigación en convertidores con alta ganancia de voltaje sea un tema de investigación muy activo e importante.

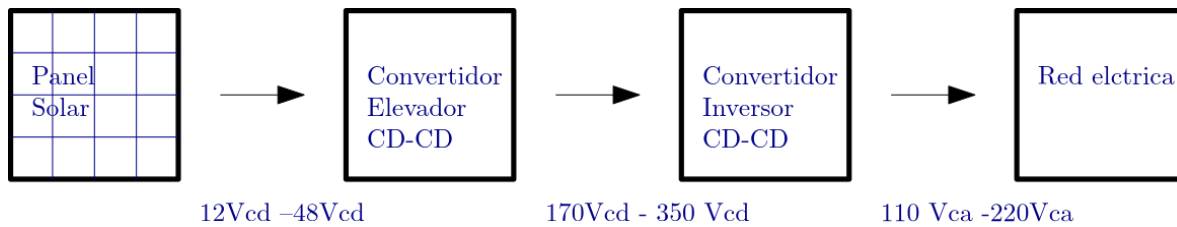


Fig. 2.6 Diagrama a bloques de un sistema de generación fotovoltaico conectado a la red.

Dentro de los pasos de acondicionamiento de energía para los sistemas de generación con celdas solares, la conversión de CD-CD juega un papel fundamental, el voltaje de las celdas suele estar dado en niveles como 12V, 24V, 48V de CD, los cuales deben convertirse en 120V o 220V, de CA, la forma usual de realizar dicha conversión consiste en inicialmente elevar el voltaje de CD a 200V, 300V de CD y posteriormente convertirla a CA mediante un inversor. La figura 2.7 muestra una clasificación realizada (S. B. Kjaer, et al, 2005) sobre las posibles formas de acondicionar la energía de celdas fotovoltaicas (PV por sus siglas en inglés) mediante convertidores CD-CD y CD-CA.

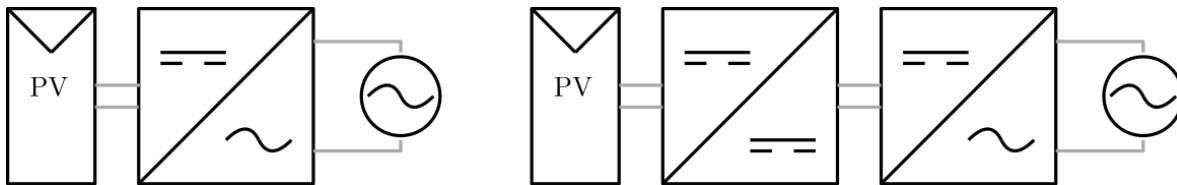


Fig. 2.7 Dos tipos de sistemas fotovoltaicos.

Dado que en la mayoría de los casos está presente un convertidor CD-CD, el desarrollo de dichos convertidores es un tópico de investigación de gran interés en el estado del arte.

Referencias del capítulo 2

- [2.1] H. Akagi, "Active Harmonic Filters for Power Conditioning," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 3, pp. 601–607, May/Jun 1996. doi: 10.1109/28.502161.
- [2.2] "Powers and Power Factor in Non-Sinusoidal and Non-Symmetrical Regimes in Three-Phase Systems," *Energies*, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/journal/energies>

- [2.3] B. Singh, K. Al-Haddad, y A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, pp. 960–971, Oct. 1999. doi: 10.1109/41.793345.
- [2.4] T. K. Vrana, "A classification of DC node voltage control methods for HVDC grids," *Energy*, vol. 63, pp. 1–10, 2013. doi: 10.1016/j.energy.2013.10.019.
- [2.5] R. W. Erickson y D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd ed. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001.
- [2.6] N. Mohan, T. M. Undeland, y W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2002.
- [2.7] A. O. Ali y A. A. Ali, "Energy management of photovoltaic-battery system using hybrid controller," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1–11, 2022. doi: 10.1016/j.egyr.2021.11.043. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X220185399>
- [2.8] S. Buso y P. Mattavelli, *Digital Control in Power Electronics*. San Rafael, CA: Morgan & Claypool Publishers, 2006.
- [2.9] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galván, R. C. Portillo, M. A. M. Prats, J. I. León, y N. Moreno-Alfonso, "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, Aug. 2006. doi: 10.1109/TIE.2006.878356.
- [2.10] M. A. Mostafa, E. A. El-Hay, y M. M. Elkholy, "Recent Trends in Wind Energy Conversion System with Grid Integration Based on Soft Computing Methods: Comprehensive Review, Comparisons and Insights," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 1–24, 2023. doi: 10.1007/s11831-022-09842-4. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-022-09842-4>
- [2.11] A. Khan, M. Bressel, A. Davigny, D. Abbes, y B. Ould Bouamama, "Comprehensive Review of Hybrid Energy Systems: Challenges, Applications, and Optimization Strategies," *Energies*, vol. 18, no. 10, p. 2612, 2025. doi: 10.3390/en18102612. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/10/2612>

Capítulo 3

Convertidores CD-CD tradicionales.

Un convertidor CD-CD, es un dispositivo que permite transformar un determinado voltaje que se suministra en su entrada, aumentándolo o reduciéndolo en su salida. Para dicho fin el circuito de un convertidor CD-CD se compone en su forma básica (Fig. 3.1), por cuatro componentes, dos de ellos almacenan energía: el inductor, que lo hace en forma de campo magnético y el capacitor como campo eléctrico; y los otros dos permiten activar o desactivar el circuito: uno de ellos es un interruptor controlado, que puedes ser un MOSFET (del inglés *metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*) o IGBT (del inglés *insulated-gate bipolar transistor*), entre otras opciones, y el otro es un diodo, conectado con polarización inversa, que sirve como un segundo interruptor que se abre cuando el primero está cerrado y se cierra cuando el primero se abre, permitiendo hacer un subcircuito para que la energía fluya en todo instante, suministrándola en todo momento al sistema que tiene conectado o en su defecto a una resistencia que lo emula, el cual se conoce como resistencia de carga R_L (por sus siglas en inglés Load Resistance).

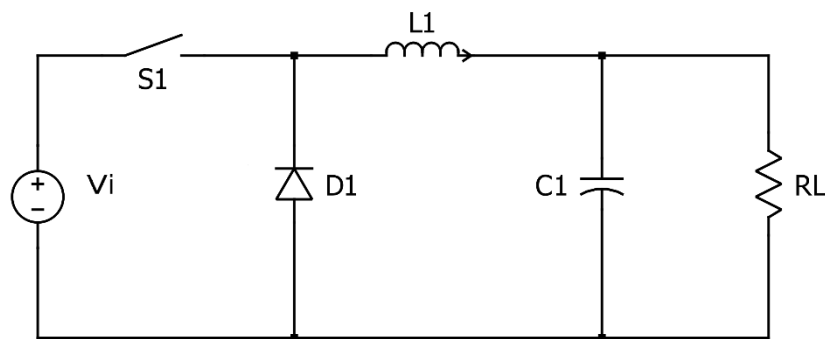


Fig. 3.1 Elementos básicos de un convertidor CD-CD (de izquierda a derecha: fuente de alimentación, interruptor, diodo, inductor, capacitor, resistencia de carga).

Para obtener un cierto nivel de voltaje (medio) en la salida de un convertidor CD-CD es necesario controlar los tiempos de encendido (t_{on}) y apagado (t_{off}) del interruptor principal en un periodo de tiempo determinado (T), mismo que se define por la suma de los estos (ecuación 3.1). Por practicidad, es común realizar el control de dicha conmutación mediante la modulación de ancho de pulsos (PWM del inglés Pulse Wide Modulation) de un microcontrolador, pero también puede hacerse con un generador de funciones. La salida del microcontrolador es una señal cuadrada (Fig 3.2), cuyo tiempo de encendido dividido entre el periodo de la señal (ecuación 3.2) se conoce como ciclo de trabajo, comúnmente identificada por la letra D (por sus siglas en inglés duty cycle), esta variable puede ser expresada como un número decimal o como porcentaje. Otro factor determinante para en esta señal de control y para el funcionamiento de los convertidores cd-cd consiste en la frecuencia (f), esta magnitud mide las ocasiones que la forma completa de una señal periódica ocurre en un determinado tiempo, se mide en Hertz, y matemáticamente podemos relacionarlo como el inverso del periodo (ecuación 3.3), la frecuencia es determinante para el tamaño de los componentes y la eficiencia de un convertidor.

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (3.1)$$

$$D = t_{on}/T \quad (3.2)$$

$$f = 1/T \quad (3.3)$$

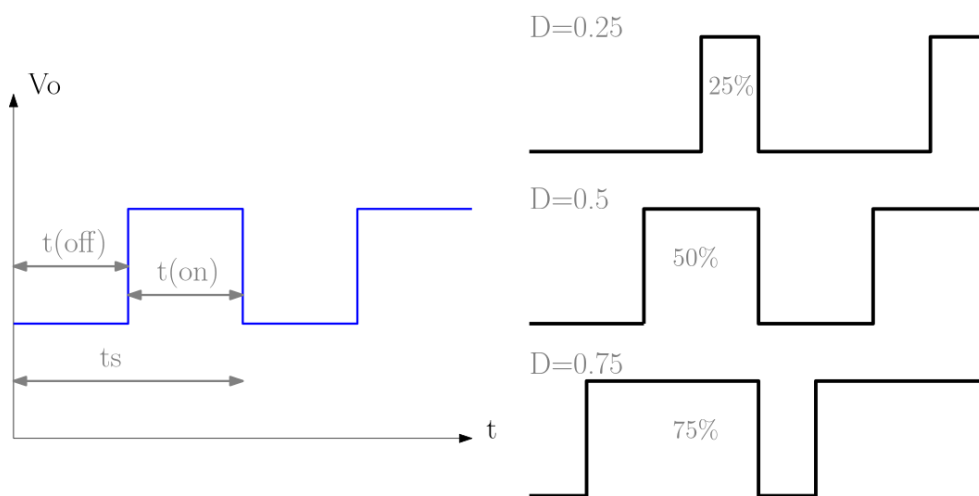


Fig. 3.2 Ciclo de trabajo o señal de control para la conmutación de un convertidor CD-CD.

Los convertidores pueden trabajar en dos modos de conducción de corriente: conducción continua y conducción discontinua [3.2]. Podemos determinar en que modo de conducción se encuentra un convertidor de acuerdo al comportamiento que la corriente tiene en el inductor. Si la corriente nunca llega a cero o solo toca el cero en un instante, se dice que el convertidor se encuentra en modo continuo de conducción, pero si la corriente se mantiene cierto tiempo en cero, el modo de conducción es discontinuo (Fig. 3.3).

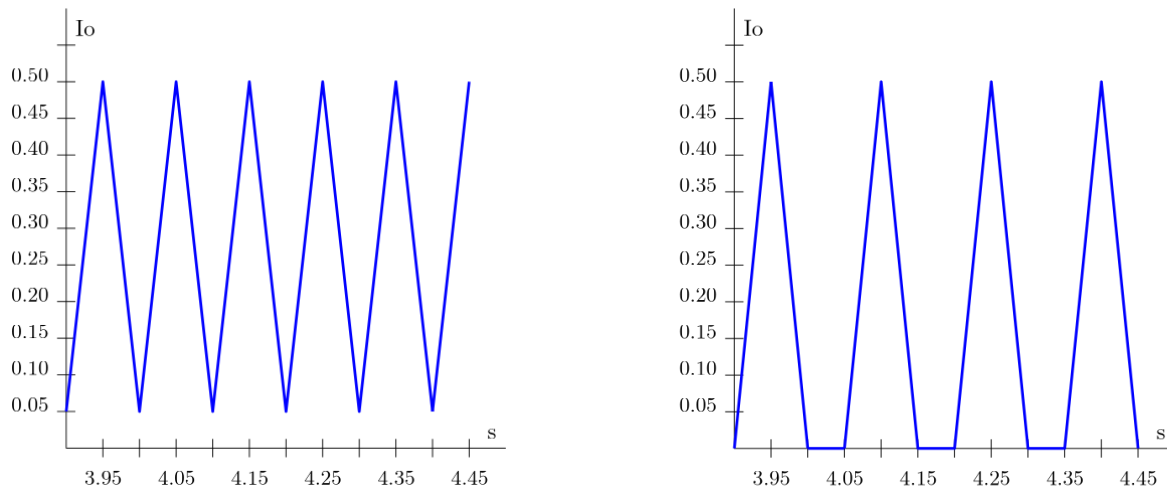


Fig. 3.3 Gráfica de la corriente de el inductor de un convertidor CD-CD, modo continuo de conducción (izquierda), modo discontinuo de conducción (derecha).

Se busca que el voltaje de salida de un convertidor CD-CD sea un valor constante, pero debido a las perturbaciones y variaciones en el sistema es difícil lograrlo en todo momento, ya que, al realizar el diseño del dispositivo sus componentes deben seleccionarse de acuerdo a un rango determinado de condiciones, y cuando el sistema se sale de dichos parámetros, el resultado esperado cambia. Por tal motivo, el voltaje de salida comúnmente no es una recta horizontal perfecta, sino que tiene pequeñas ondulaciones respecto a la señal esperada, que se conoce como “rizo” (Fig 3.4). El rizo de voltaje es uno de los parámetros que se desea disminuir en un convertidor CD-CD.

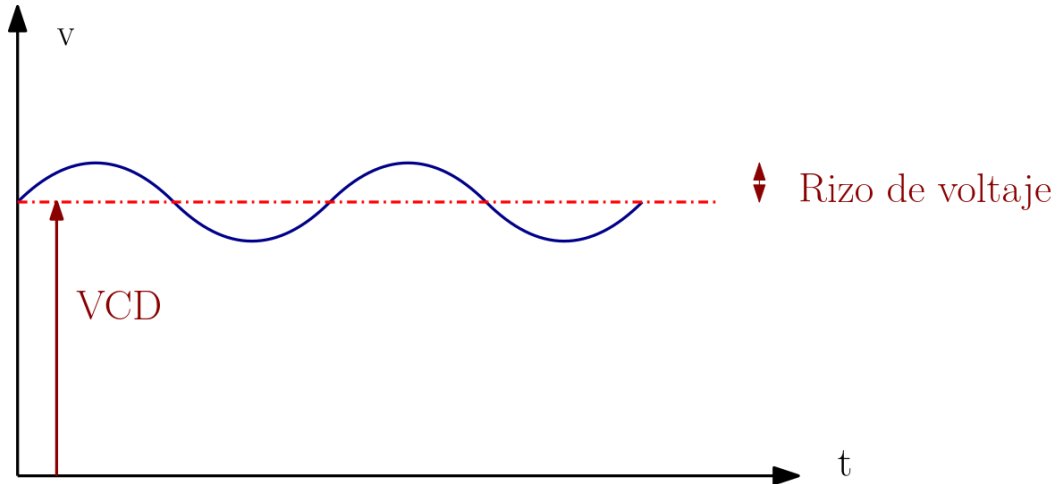


Fig. 3.4 Rizo de voltaje en una señal de corriente directa.

Para conocer cómo funcionará y cuál es la ganancia de un convertidor CD-CD es necesario obtener un modelo matemático basado en el comportamiento que tiene a partir del accionamiento de sus interruptores, utilizando también los modelos dinámicos del capacitor (ecuación 3.4) y el inductor (ecuación 3.5), lo que genera una ecuación diferencial.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.4)$$

$$i_C = C \frac{dV_C}{dt} \quad (3.5)$$

Para simplificar la esquematización de los convertidores, Middlebrook y Ćuk en los años 70, propusieron el método del promediado, cuyo objetivo es desarrollar modelos que capturen con precisión la dinámica de los convertidores sin recurrir a simulaciones transitorias conmutadas [3.3]. El modelo promediado se basa en promediar las ecuaciones diferenciales del circuito durante un periodo de conmutación, obteniendo expresiones que describen la evolución de variables como la tensión y la corriente en estado dinámico. Para ello, es necesario reemplazar el comportamiento conmutado de los componentes activos (interruptores y diodos) por representaciones continuas, lo que divide el circuito original en varios subcircuitos en distinto momento, permitiendo así el análisis dinámico en el dominio del tiempo o la frecuencia. Para la aplicación del método es necesario establecer el comportamiento del circuito en su estado estacionario, ya que sin

cambios en el tiempo el valor de la derivada es cero, lo que permite trabajar las ecuaciones utilizando algebra convencional.

Una de sus principales ventajas es que facilita el diseño de controladores analógicos o digitales mediante técnicas clásicas o modernas de control. Además, su implementación es adecuada para herramientas de simulación como MATLAB/Simulink [3.4]. En este proyecto se utiliza la versión 2024b.

3.1 Convertidor reductor.

El convertidor reductor (Fig. 3.5), conocido en inglés como buck converter, es una de las topologías más comunes y fundamentales dentro de los convertidores CD-CD. Su principal función consiste en reducir el nivel de tensión de entrada (V_i), para obtener un voltaje medio de salida (V_o) menor o igual que el aplicado en la entrada. Este tipo de convertidor es ampliamente utilizado en fuentes de alimentación conmutadas, sistemas fotovoltaicos, controladores de motores y aplicaciones electrónicas donde se requiere una conversión eficiente de energía.

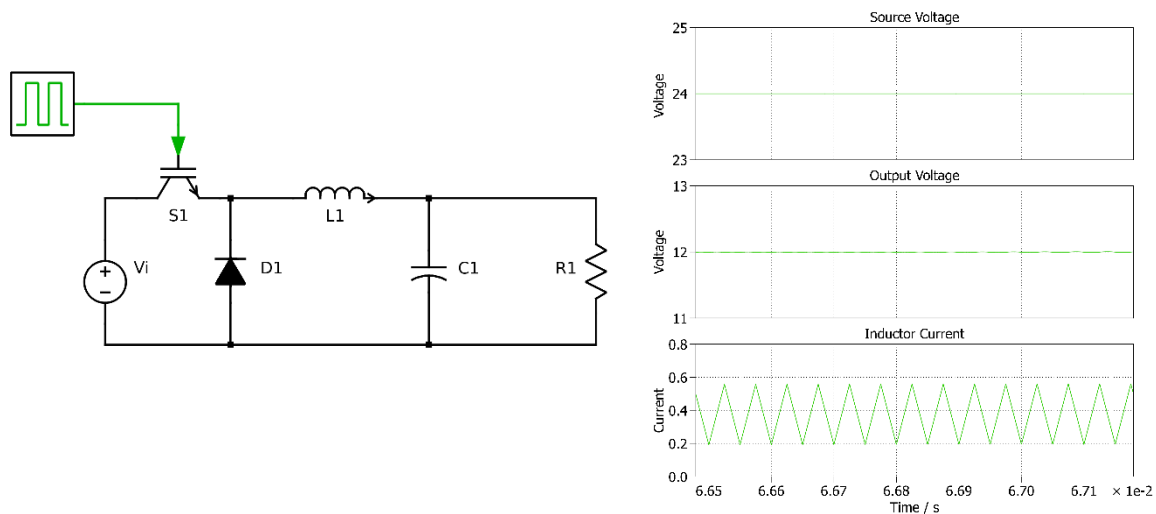


Fig.3.5 Convertidor Buck (reductor) en modo de conducción continua con $D=0.5$.

El principio de funcionamiento del convertidor reductor se basa en el accionamiento periódico del interruptor (generalmente un transistor MOSFET o IGBT), el diodo, el inductor y el capacitor de salida, los cuales trabajan de manera coordinada para regular el flujo de energía hacia la carga.

Cuando la señal de control se encuentra en nivel alto (Fig. 3.6a), el interruptor se cierra, permitiendo el paso de la corriente desde la fuente hacia la bobina. En este instante, el diodo queda polarizado inversamente, bloqueando el flujo de corriente en sentido contrario. Durante esta fase, el inductor almacena energía en forma de campo magnético, mientras que el capacitor se carga, contribuyendo a mantener estable el voltaje de salida. La corriente a través de la bobina aumenta de manera lineal debido a la diferencia de potencial entre V_i y V_o .

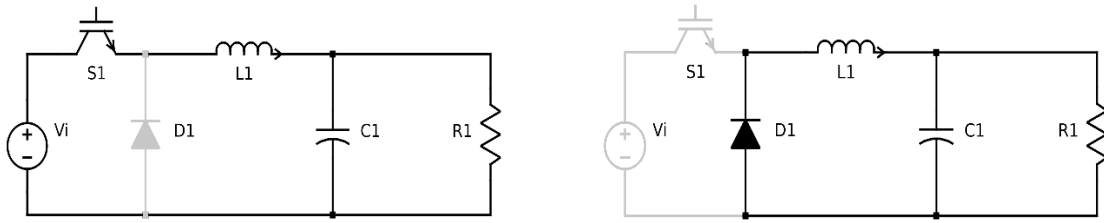


Fig. 3.6 Circuitos equivalentes Buck de acuerdo con la conmutación del interruptor.
Interruptor cerrado(a), interruptor abierto (b).

Posteriormente, cuando la señal de control cambia a nivel bajo (Fig. 3.6b), el interruptor se abre, interrumpiendo el paso directo de corriente desde la fuente. En esta etapa, el campo magnético del inductor colapsa y la energía almacenada se libera a través del diodo, el cual ahora se encuentra polarizado directamente. Esta corriente continua suministrando energía a la carga y al capacitor, garantizando la continuidad del voltaje de salida incluso cuando el interruptor está abierto.

En condiciones de conducción continua, la corriente en el inductor nunca cae a cero, lo que mejora la eficiencia y reduce las ondulaciones de corriente (ripple). En cambio, si el inductor se descarga completamente durante parte del ciclo, el convertidor opera en modo de conducción discontinua, lo cual modifica el comportamiento dinámico del sistema.

Calculando el voltaje medio de salida en términos del ciclo de trabajo del interruptor podemos definir el siguiente modelo:

$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_o(t) dt = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{t_{on}} V_i dt + \int_{t_{on}}^{T_s} 0 dt \right) = \frac{t_{on}}{T_s} V_i = D V_i \quad (3.6)$$

Lo que en CCM se traduce como

$$T_s = t_{on} + t_{off} \quad (3.7)$$

$$\int_0^{T_s} V_L dt = \int_0^{t_{on}} V_L dt + \int_{t_{on}}^{T_s} V_L dt = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{t_{on}}{T_s} = D \quad (3.9)$$

$$P_d = P_o \quad (3.10)$$

$$V_i I_i = V_o I_o \quad (3.11)$$

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{D} \quad (3.12)$$

A partir de lo anterior es posible definir la ecuación del voltaje de salida del convertidor Buck, como:

$$V_o = \frac{V_i}{D} \quad (3.13)$$

3.2 Convertidor elevador

El convertidor elevador (Fig. 3.7), conocido en inglés como boost converter, es una topología de convertidor CD-CD cuya función principal consiste en aumentar el nivel de voltaje de salida (V_o) por encima del voltaje de entrada (V_i). Este tipo de convertidor se emplea ampliamente en sistemas donde es necesario elevar el nivel de tensión para optimizar el aprovechamiento energético, como en fuentes de alimentación reguladas, sistemas fotovoltaicos, vehículos eléctricos y aplicaciones de almacenamiento de energía.

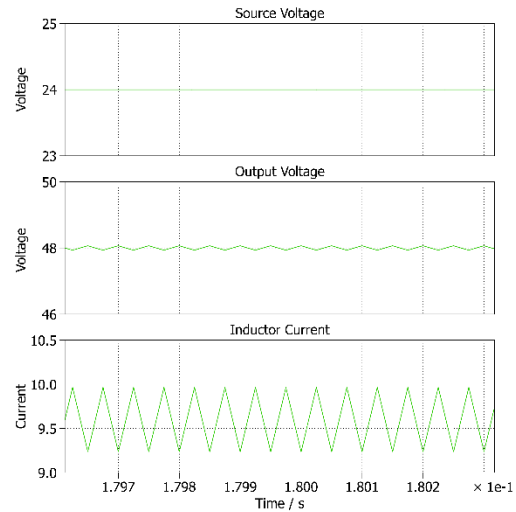
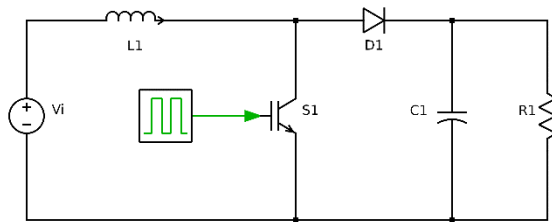


Fig.3.7 Convertidor Boost (elevador) en modo de conducción continua con $D=0.5$.

El principio de funcionamiento del convertidor elevador se basa en la conmutación controlada de un interruptor, un diodo, un inductor y un capacitor de salida. Estos elementos trabajan en conjunto para transferir energía de la fuente hacia la carga, aprovechando la capacidad del inductor para almacenar y liberar energía de forma controlada.

Durante la primera etapa de operación, cuando la señal de control está en nivel alto (Fig. 3.8a), el interruptor se cierra, permitiendo que la corriente fluya desde la fuente de entrada a través del inductor. En este periodo, el diodo se encuentra polarizado inversamente, impidiendo el paso de corriente hacia la carga. La energía proporcionada por la fuente se almacena en el campo magnético del inductor, y la corriente por este componente crece de forma lineal con el tiempo.

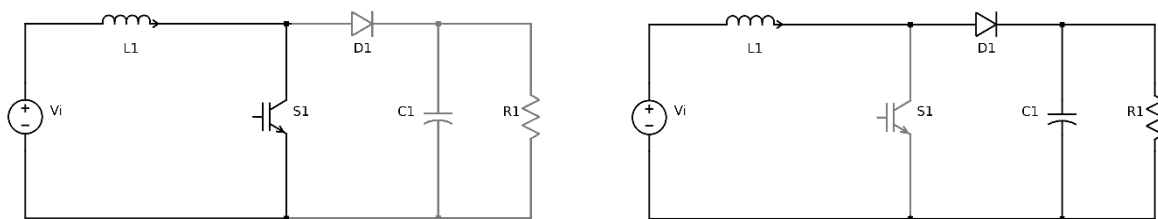


Fig. 3.8 Circuitos equivalentes Boost de acuerdo con la conmutación del interruptor. Interruptor cerrado(a), interruptor abierto (b).

En la segunda etapa, cuando la señal de control pasa a nivel bajo (Fig. 3.8b), el interruptor se abre y el diodo se polariza directamente. En este momento, el inductor intenta mantener la corriente fluyendo en el mismo sentido y, para ello, libera la energía previamente almacenada. Esta energía se suma al voltaje de la fuente de entrada, provocando que el voltaje de salida sea mayor que el voltaje de entrada. El capacitor, por su parte, se encarga de filtrar las ondulaciones y mantener un voltaje de salida estable, suministrando energía a la carga de manera continua.

En el modo de conducción continua, la corriente a través del inductor nunca cae a cero, lo cual proporciona una operación más estable y eficiente. Por otro lado, en el modo de conducción discontinua, la corriente del inductor llega a cero durante una parte del ciclo de conmutación, lo que modifica la relación entre el voltaje de salida y la entrada, así como la dinámica del convertidor.

Utilizando el método del promediado tenemos que

$$L \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{T_s} (dT_s(V_o) + (1 - d)T_s(V_o - V_c)) \quad (3.14)$$

Simplificando y despejando tenemos:

$$L \frac{di_L}{dt} = dV_o + (1 - d)(V_o - V_c) \quad (3.15)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V_o - (1 - d)V_c \quad (3.16)$$

$$V_o = (1 - D)V_c \quad (3.17)$$

Por lo cual el voltaje de salida del convertidor Boost podemos obtenerlo con:

$$V_o = \frac{V_c}{1-D} \quad (3.18)$$

3.3 Convertidor elevador reductor.

El convertidor Buck-Boost (Fig. 3.9) es una topología de conversión CD-CD que combina las características de los convertidores reductor (Buck) y elevador (Boost), permitiendo obtener un voltaje de salida (V_o) mayor o menor que el voltaje de entrada (V_i), dependiendo del ciclo de trabajo (D) aplicado al interruptor. Esta versatilidad lo hace especialmente útil en aplicaciones donde el voltaje de entrada puede variar ampliamente, como en sistemas fotovoltaicos, dispositivos portátiles, fuentes de alimentación automotrices y convertidores para almacenamiento de energía. Cuando $D < 0.5$, el convertidor opera en modo reductor ($|V_o| < V_i$); mientras que para $D > 0.5$, opera como elevador ($|V_o| > V_i$).

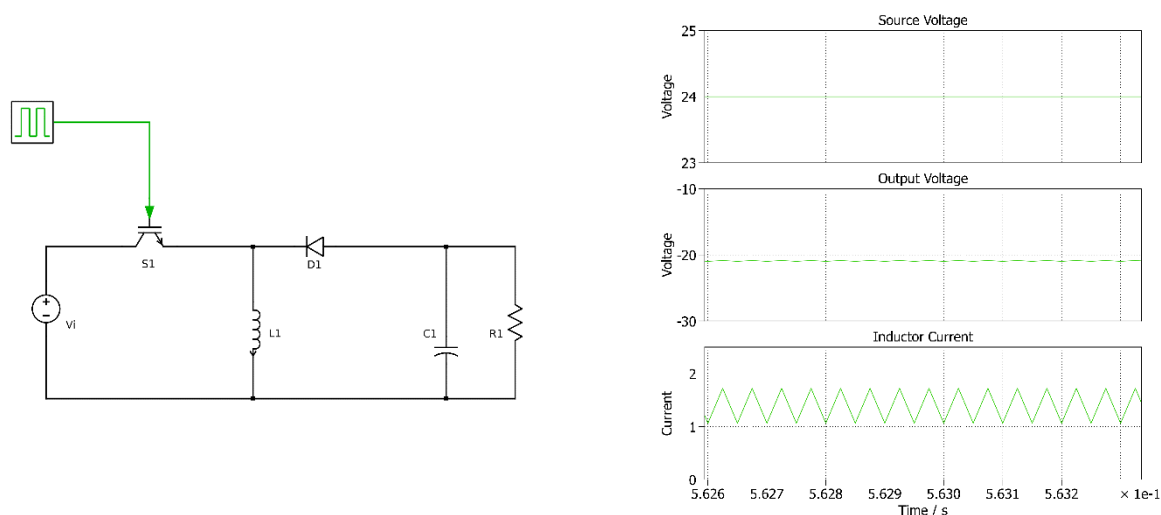


Fig.3.9 Convertidor Buck-Boost (elevador-reductor) en modo de conducción continua con $D=0.5$.

El circuito básico del convertidor Buck-Boost consta de un interruptor semiconductor, un diodo, un inductor, un capacitor de salida y una carga resistiva. Su principio de funcionamiento se basa en la conmutación periódica del interruptor, alternando entre los modos de almacenamiento y transferencia de energía del inductor.

Durante la etapa de conducción (Fig. 3.10a), el interruptor se cierra, conectando la fuente de entrada directamente al inductor. En esta condición, el diodo se encuentra polarizado inversamente, evitando el paso de corriente hacia la

carga. La corriente a través del inductor aumenta linealmente y la energía se almacena en su campo magnético, mientras que el capacitor se descarga parcialmente suministrando energía a la carga.

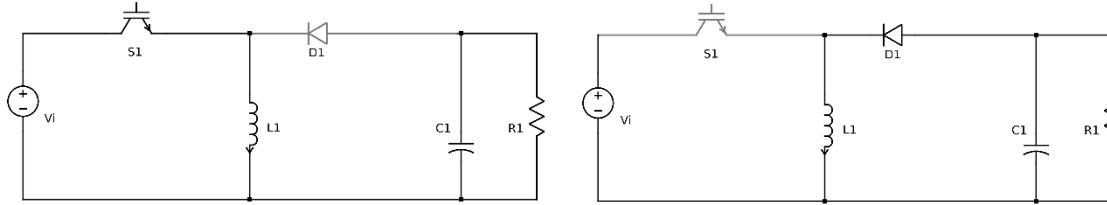


Fig. 3.10 Circuitos equivalentes Buck-Boost de acuerdo con la conmutación del interruptor. Interruptor cerrado (a), interruptor abierto (b).

Cuando la señal de control cambia a nivel bajo (switch OFF, Fig. 3.10b), el interruptor se abre y el diodo se polariza directamente, estableciendo un camino de conducción entre el inductor, el capacitor y la carga. En este instante, la energía almacenada en el inductor se transfiere a la carga y al capacitor, pero con polaridad invertida respecto a la entrada. Este comportamiento provoca que el voltaje de salida sea negativo en relación con el polo de referencia de la fuente, característica distintiva del convertidor Buck-Boost en su configuración no inversora simple.

Utilizando el método del promediado tenemos que

$$L \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{T_s} (dT_s(V_o) + (1 - d)V_c) \quad (3.19)$$

Simplificando y despejando tenemos:

$$L \frac{di_L}{dt} = dV_o + (1 - d)(-V_c) \quad (3.20)$$

$$dV_o = (1 - d)V_c \quad (3.21)$$

Por lo cual el voltaje de salida del convertidor Buck-Boost podemos obtenerlo con:

$$V_o = \frac{V_c(1-D)}{D} \quad (3.22)$$

Referencias del Capítulo 3

[3.1] L. B. Schwarz, "The economic order-quantity (EOQ) model," in *Building Intuition: Insights from Basic Operations Management Models and Principles*, 2008, pp. 135–154.

[3.2] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Electrónica de potencia: convertidores, aplicaciones y diseño*, McGraw-Hill Educación, 2009.

[3.3] R. D. Middlebrook and S. Ćuk, "A general unified approach to modeling switching-converter power stages," in *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, 1976, pp. 18–34, doi: 10.1109/PESC.1976.708113.

[3.4] D. Maksimović and R. Erickson, "Modeling and simulation of power electronic converters," *Proc. IEEE*, vol. 89, no. 6, pp. 898–912, Jun. 2001, doi: 10.1109/5.939927.

[3.5] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2002.

[3.6] R. Bausière, F. Labrique, y G. Séguier, *Power Electronic Converters: DC-DC Conversion*, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1993.
SpringerLink

[3.7] R. W. Erickson y D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*, 2ª ed., New York, NY, USA: Springer Science & Business Media, 2001.
SpringerLink
+1

[3.8] M. K. Kazimierczuk, *Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters*, 1ª ed., New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2008.
Icchiku

[3.9] D. Czarkowski (Editor), *Power Electronics Handbook*, 3ª ed., Burlington, MA, USA: Elsevier (Academic Press), 2006.
O'Reilly Media

[3.10] J. B. Holm-Nielsen, S. Padmanaban y S. Sanjeevikumar (eds.), *Power Electronic Converter Configuration and Control for DC Microgrid Systems*, Basel, Switzerland: MDPI Books, 2020.

Capítulo 4

Topologías novedosas para elevar el voltaje

Las topologías convencionales representan el fundamento para el estudio, análisis y desarrollo de los convertidores CD-CD utilizados en la actualidad. A lo largo del tiempo, configuraciones clásicas como los convertidores boost, buck-boost y flyback han demostrado ser eficaces en diversas aplicaciones dentro de la electrónica de potencia. No obstante, el avance de los sistemas eléctricos modernos —especialmente aquellos vinculados a fuentes de energía renovable de bajo nivel de tensión, como los módulos fotovoltaicos y las celdas de combustible— ha generado la necesidad de desarrollar estructuras capaces de proporcionar mayores niveles de ganancia de voltaje sin afectar negativamente la eficiencia, el tamaño ni la confiabilidad del sistema.

En muchos sistemas de conversión actuales se requiere que el voltaje de salida supere varias veces el nivel de voltaje de entrada, en algunos casos alcanzando relaciones de al menos cuatro a uno. Este tipo de requerimientos resulta difícil de cumplir de forma eficiente mediante convertidores tradicionales, debido a limitaciones asociadas a la conmutación, al incremento del esfuerzo eléctrico sobre los dispositivos semiconductores y a las pérdidas derivadas de ciclos de trabajo elevados [4.1]. Frente a estas restricciones, se han propuesto nuevas topologías orientadas a obtener mayores relaciones de ganancia sin incrementar significativamente la complejidad del diseño ni comprometer la densidad de potencia del sistema. Entre las alternativas más relevantes se encuentran aquellas que emplean acoplamientos magnéticos, capacitores conmutados, configuraciones híbridas y topologías cuadráticas. Estas arquitecturas representan una nueva generación de convertidores CD-CD diseñados para satisfacer las demandas actuales de alta eficiencia en aplicaciones energéticas.

4.1 Convertidores CD-CD con acoplamientos magnéticos

Los convertidores CD-CD que emplean acoplamientos magnéticos, comúnmente denominados convertidores aislados, utilizan transformadores de alta frecuencia para transferir energía entre la etapa de entrada y la de salida, proporcionando aislamiento galvánico entre ambos lados del circuito (Fig. 4.1). Esta característica resulta particularmente importante en aplicaciones donde la seguridad eléctrica es un requisito fundamental o donde existen diferentes referencias de tierra, como ocurre en sistemas fotovoltaicos conectados a la red, cargadores de baterías y fuentes de alimentación utilizadas en equipos médicos.

En este tipo de convertidores, la energía suministrada por una fuente de corriente directa se transforma inicialmente en una señal de corriente alterna mediante un conjunto de interruptores electrónicos que operan a alta frecuencia. Dicha señal se aplica al devanado primario del transformador, generando por inducción una tensión proporcional en el devanado secundario. Posteriormente, esta señal alterna es rectificadora y filtrada con el fin de obtener una salida en corriente continua con las características deseadas [4.2], [4.3]. Este proceso permite ajustar la relación de voltaje mediante la relación de espiras del transformador, lo que proporciona una considerable flexibilidad en el diseño del convertido

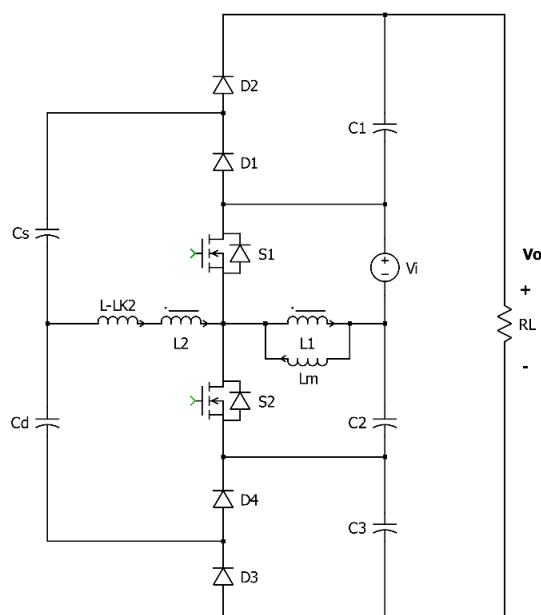


Fig. 4.1 Ejemplo de un convertidor CD-CD con transformadores acoplados [4.5].

El funcionamiento de estos convertidores puede analizarse a partir de tres etapas principales: conmutación, transferencia de energía a través del acoplamiento magnético y rectificación junto con el filtrado de la señal de salida. Entre las ventajas más destacadas de estas topologías se encuentra su capacidad para proporcionar altas relaciones de ganancia de voltaje, así como la posibilidad de disminuir la cantidad de componentes magnéticos mediante el empleo de inductores acoplados. Además, estas configuraciones resultan especialmente adecuadas para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos, donde la variabilidad del voltaje de entrada exige etapas de conversión con alto grado de flexibilidad. Otro aspecto favorable es la reducción del esfuerzo eléctrico en los dispositivos semiconductores, ya que las tensiones de conmutación pueden distribuirse entre distintas etapas del convertidor, lo que disminuye la necesidad de incorporar circuitos amortiguadores adicionales [4.4], [4.5].

No obstante, estas topologías también presentan ciertas limitaciones. Una de las principales está asociada a la inductancia de fuga del transformador, la cual puede provocar picos de tensión en los dispositivos semiconductores y afectar la confiabilidad del sistema. Asimismo, el diseño de transformadores que operan a alta frecuencia requiere un equilibrio cuidadoso entre el tamaño físico del componente, las pérdidas por histéresis del material magnético y la eficiencia global del convertidor. Desde el punto de vista práctico, estas configuraciones suelen implicar mayores costos y dimensiones, debido al incremento en el número de devanados y a la complejidad del diseño magnético, lo que puede restringir su implementación en dispositivos portátiles o en aplicaciones de bajo costo [4.5]. Entre las topologías más representativas dentro de esta categoría se encuentran los convertidores Forward, Flyback, Half-Bridge y Full-Bridge [4.6].

4.2 Convertidores CD-CD con capacitores conmutados.

Los convertidores CD-CD basados en **capacitores conmutados** constituyen una alternativa innovadora frente a las topologías tradicionales que emplean elementos inductivos. Su principio de operación se basa en la transferencia de energía a través de una red formada por capacitores y dispositivos de conmutación electrónicos, lo que permite prescindir completamente de inductores o

transformadores como elementos principales de almacenamiento de energía (Fig. 4.2) [4.7].

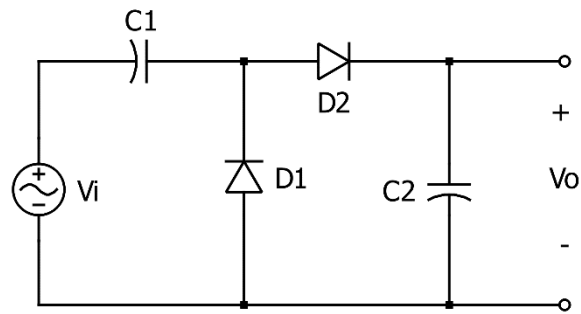


Fig. 4.2 Ejemplo de un convertidor CD-CD con capacitores conmutados [4.7].

El principio de operación de estos convertidores, comúnmente denominado bomba de carga, se basa en dos etapas principales de funcionamiento. Durante la primera etapa, conocida como fase de carga, los capacitores se conectan en paralelo con la fuente de alimentación, permitiendo el almacenamiento de energía eléctrica. Posteriormente, en la fase de transferencia, dichos capacitores se reconfiguran en serie entre sí o en combinación con la fuente de entrada, de modo que sus tensiones se suman para generar un voltaje de salida mayor. Este mecanismo de multiplicación de tensión permite alcanzar elevadas ganancias de voltaje mediante una arquitectura compacta que no requiere el uso de componentes magnéticos [4.8].

Entre las principales ventajas de estas topologías se encuentran la reducción del tamaño del convertidor, la disminución de la tensión de conmutación en los interruptores, lo cual reduce el esfuerzo eléctrico sobre los dispositivos semiconductores, y la posibilidad de alcanzar altas densidades de potencia en aplicaciones de baja y media potencia. Asimismo, al prescindir de elementos magnéticos, se eliminan las pérdidas asociadas a fenómenos como la histéresis y se simplifica el diseño relacionado con núcleos ferromagnéticos.

Sin embargo, estas configuraciones también presentan ciertas limitaciones. La conmutación rápida de los capacitores puede originar pulsos de corriente elevados y un rizado considerable en la tensión de salida, lo que generalmente requiere la incorporación de etapas adicionales de filtrado. Además, las pérdidas asociadas a la resistencia serie equivalente (ESR) de los capacitores y a las caídas de tensión en los dispositivos de conmutación pueden reducir la eficiencia del convertidor,

especialmente cuando se opera en aplicaciones de mayor potencia [4.9], [4.10]. En la práctica, estas configuraciones suelen ser más adecuadas para potencias moderadas o como etapas intermedias dentro de estructuras más complejas.

4.3 Convertidores CD-CD con topologías híbridas.

Las topologías híbridas surgen como una respuesta a las limitaciones individuales de los convertidores puramente inductivos o capacitivos. Estas configuraciones combinan ambos mecanismos de elevación de tensión —los inductores conmutados y los capacitores conmutados—, aprovechando sus ventajas complementarias para alcanzar altas ganancias de conversión con menores relaciones de ciclo de trabajo [4.11].

En los convertidores híbridos, la energía se almacena de manera simultánea en los inductores y capacitores durante una primera etapa de conmutación. Posteriormente, en la etapa de transferencia, la energía acumulada se redistribuye: los inductores descargan su energía hacia los capacitores, los cuales se conectan en serie para aumentar el voltaje de salida. Este mecanismo combina el efecto de elevación inductiva tipo boost con el efecto multiplicador de tensión capacitivo, logrando ganancias totales significativamente superiores a las de cada mecanismo individual [4.7], [4.11].

Un ejemplo representativo es el convertidor híbrido propuesto por Nguyen et al (Fig. 4.3), que utiliza un solo interruptor para controlar simultáneamente la red inductiva y la capacitiva, alcanzando una ganancia de hasta 21.6 veces la tensión de entrada sin necesidad de transformadores [4.11]. Este tipo de arquitectura simplifica el control, reduce pérdidas por conmutación y mantiene una estructura compacta.

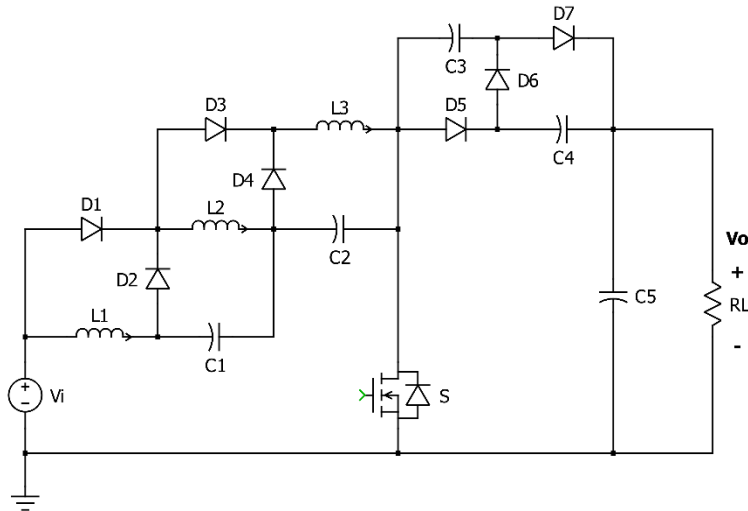


Fig. 4.3 Ejemplo de un convertidor CD-CD con una topología híbrida [4.11].

Entre las ventajas más relevantes se incluyen la alta ganancia sin transformador, lo que resulta ideal para sistemas de conversión de energía fotovoltaica y almacenamiento en baterías; la reducción del ciclo de trabajo necesario para alcanzar altas tensiones, lo que disminuye las pérdidas de conmutación; y la corriente de entrada más continua en comparación con los convertidores puramente capacitivos, lo que mejora la calidad de la energía [4.9], [4.12].

En cuanto a sus desventajas, las topologías híbridas presentan una mayor complejidad de diseño y control, especialmente en la sincronización de los modos de operación. También pueden experimentar pérdidas adicionales asociadas a la ESR de los capacitores y la caída de tensión en los diodos, lo que afecta la eficiencia a potencias elevadas. Además, la necesidad de coordinar múltiples etapas hace que la estabilidad dinámica del sistema requiera técnicas avanzadas de control [4.12].

4.4 Convertidores CD-CD con topologías cuadráticas

Las topologías cuadráticas constituyen una familia de convertidores que buscan amplificar la ganancia de conversión del convertidor boost clásico mediante la combinación de múltiples etapas de elevación en una sola estructura (Fig. 4.4). El principio de operación se basa en lograr una relación de ganancia que crece

cuadráticamente con el ciclo de trabajo, es decir, proporcional a $(1-D)^2$, en lugar del comportamiento lineal de un boost convencional [4.13].

La ganancia ideal de un convertidor cuadrático puede expresarse matemáticamente como:

$$G_{ideal} = \frac{1}{(1-D)^2} \quad (4.1)$$

Este comportamiento cuadrático permite obtener elevadas tensiones de salida sin recurrir a relaciones de ciclo de trabajo extremas, lo que reduce tanto las pérdidas por conducción como el esfuerzo de conmutación en los dispositivos [4.14].

El funcionamiento se desarrolla en dos etapas principales. En la primera etapa, el interruptor se cierra y las ramas del circuito se conectan a la fuente, cargando los inductores y capacitores en paralelo. En la segunda etapa, al abrir el interruptor, la energía almacenada se transfiere hacia la carga, sumándose las tensiones de los elementos reactivos. La configuración interna de los elementos permite que la ganancia resultante se multiplique, generando el comportamiento cuadrático característico [4.13], [4.14].

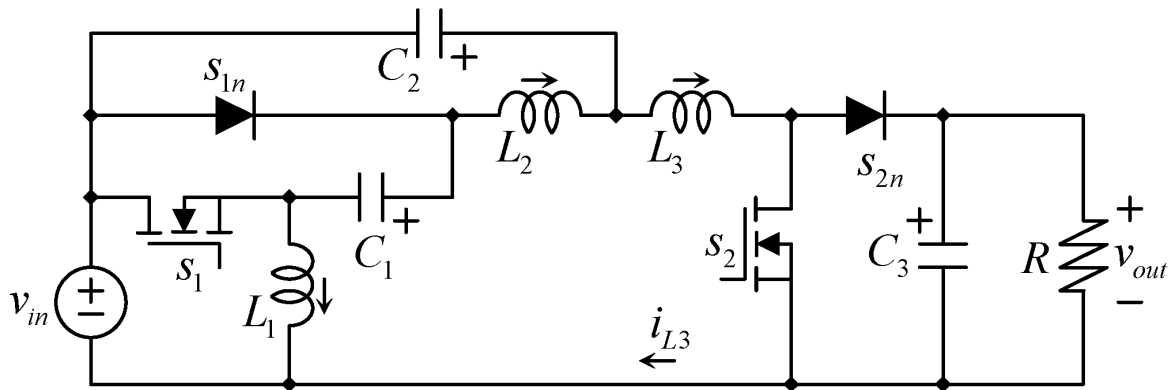


Fig. 4.4 Ejemplo de un convertidor CD-CD cuadrático [4.14].

Las ventajas más destacadas de estas topologías son su alta ganancia sin necesidad de transformador, la reducción del estrés eléctrico en los semiconductores debido a la distribución del voltaje entre etapas, y su compatibilidad con fuentes renovables que entregan tensiones bajas, como paneles solares o sistemas de baterías

[4.15]. Asimismo, la corriente de entrada más suave reduce las pérdidas por rizado y mejora la eficiencia global [4.14].

Entre las desventajas, destacan el mayor número de componentes requeridos, lo que incrementa las pérdidas por conducción y el tamaño del convertidor; la complejidad de control asociada a las múltiples etapas; y la sensibilidad a las pérdidas no ideales en los diodos y capacitores, las cuales reducen la ganancia real respecto a la ideal teórica [4.13], [4.15].

En síntesis, las cuatro topologías analizadas —con acoplamientos magnéticos, capacitores conmutados, estructuras híbridas y cuadráticas— representan enfoques complementarios en la búsqueda de convertidores CD-CD de alta ganancia y alta eficiencia. Mientras las estructuras con acoplamientos magnéticos ofrecen aislamiento y robustez para potencias elevadas, las de capacitores conmutados y las híbridas destacan por su compacidad y eficiencia a bajas y medias potencias. Por su parte, las topologías cuadráticas ofrecen una solución elegante para obtener altos niveles de conversión con esfuerzos de conmutación moderados.

La tendencia actual en el diseño de convertidores de potencia se dirige hacia la hibridación y optimización de estas configuraciones, buscando combinar sus ventajas para lograr una mayor densidad de potencia, eficiencia energética y compatibilidad con fuentes renovables de próxima generación.

Referencias del Capítulo 4

- [4.1] P. A. Dahono, "Derivation of High Voltage-Gain Step-Up DC-DC Power Converters," *International Journal on Electrical Engineering & Informatics*, vol. 11, no. 2, pp. 236-249, June 2019. doi: 10.15676/ijeei.2019.11.2.1
- [4.2] A New Ultra-High Voltage Gain DC/DC Converter Based on Coupled-Inductor (Hosseini S.JA. et al., *Scientific Reports*, vol. 15, Art. 5330, 2025)
- [4.3] Balsamo, F.; Lauria, D.; Mottola, F. Design and Control of Coupled Inductor DC–DC Converters for MVDC Ship Power Systems. *Energies* 2019, 12, 751. <https://doi.org/10.3390/en12040751>

- [4.4] C. Rani, "A Review on Non-Isolated Inductor Coupled DC-DC Converter for Photovoltaic Grid-Connected Applications," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 7, no. 2, pp. "???" [Online]. Available: <https://www.ijrer.com/index.php/ijrer/article/view/6158>
- [4.5] V.-T. Duong, Z. Waheed, and W. Choi, "Non-Isolated Ultra-High Step-Up DC-DC Converter Topology Using Coupled-Inductor-Based Inverting Buck-Boost and Voltage Multipliers," *Electronics*, vol. 14, no. 13, art. 2519, 2025. doi:10.3390/electronics14132519.
- [4.6] J. U. Guerrero-Barajas et al., "Estudio del convertidor Push-Pull para aplicaciones en amplificadores de audio," *Ideas en Ciencias de la Ingeniería*, vol. 5, no. 1, pp. 75-84, 2018.
- [4.7] A. F. de Souza, F. L. Tofoli, E. R. Ribeiro, "Switched Capacitor DC-DC Converters: A Survey on the Main Topologies, Design Characteristics, and Applications," *Energies*, vol. 14, no. 8, art. 2231, 2021. doi:10.3390/en14082231.
- [4.8] R. M. Varona, *Reguladores de voltaje basados en convertidores con capacitores conmutados*, Tesis de Doctorado, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí, S.L.P., México, 2019. [En línea]. Disponible: <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/2265/1/TDIPICYTM6R42019.pdf>
- [4.9] M. D. Seeman, "A Design Methodology for Switched-Capacitor DC-DC Power Converters," Ph.D. dissertation, Dept. of Electrical Eng. & Computer Sciences, Univ. of California, Berkeley, 2009. [En línea]. Disponible: <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2009/EECS-2009-78.pdf>.
- [4.10] Z. Waradzyń (Waradzyn), "A Cost-Effective Resonant Switched-Capacitor DC-DC Converter," (PDF), 2018. [En línea]. Disponible: <https://bibliotekanauki.pl/articles/1193543.pdf>
- [4.11] V. H. Nguyen, T. D. Do, and J. Y. Park, "A Hybrid Switched-Inductor/Switched-Capacitor DC-DC Converter with High Voltage Gain Using a Single Switch for Photovoltaic Application," *Energies*, vol. 16, no. 14, art. 5524, 2023. doi: 10.3390/en16145524. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/14/5524>
- [4.12] Z. Waradzyń, "A Cost-Effective Resonant Switched-Capacitor DC-DC Converter," *Energies*, vol. 11, no. 11, art. 3082, 2018. doi: 10.3390/en11113082. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/3082>

- [4.13] K. Karimi, V. Marzang, M. Karimi, S. H. Hosseini, and M. R. Feyzi, "High-step-up quadratic DC–DC converter based on switched capacitor and coupled inductor techniques," *Scientific Reports*, vol. 15, 2025. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11923078/>
- [4.14] B. Babaiahgari, "Quadratic Boost Converter with Reduced Input Current Ripple," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 19, art. 10815, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/19/10815>
- [4.15] S. Hasanpour, M. Khazaei, and A. Rahmati, "A New Coupled-Inductor-Based Quadratic DC–DC Converter with Low Current Stress," *ResearchGate Preprint*, 2025. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/388841676>

Capítulo 5

Convertidor doble dual

5.1 Principio de operación del convertidor doble dual

En el desarrollo reciente de la electrónica de potencia, las topologías de convertidores CD-CD han experimentado una evolución significativa orientada a satisfacer las crecientes demandas de eficiencia, densidad de potencia y capacidad de elevación de voltaje requeridas por sistemas modernos de conversión energética. En particular, los convertidores de alta ganancia se han convertido en una pieza esencial dentro de aplicaciones como sistemas fotovoltaicos, almacenamiento en baterías, redes de microgeneración y vehículos eléctricos. Las topologías convencionales —como el boost o el buck-boost— presentan limitaciones prácticas cuando se requiere alcanzar una relación de conversión elevada, ya que el aumento excesivo del ciclo de trabajo provoca estrés en los semiconductores, mayores pérdidas por conmutación y un deterioro significativo de la eficiencia global [5.1]. Frente a esta problemática, se han desarrollado diversas estrategias orientadas a incrementar la ganancia de voltaje sin necesidad de emplear transformadores. Entre las alternativas más estudiadas se encuentran el uso de inductores acoplados, redes de capacitores conmutados, configuraciones cuadráticas y estructuras híbridas que combinan diferentes principios de conversión. No obstante, una de las propuestas más recientes y prometedoras corresponde al convertidor CD-CD doble dual (Double Dual DC-DC Converter), una topología emergente que integra características de simetría estructural, operación intercalada y transferencia de carga mediante capacitores flotantes (Fig. 5.1).

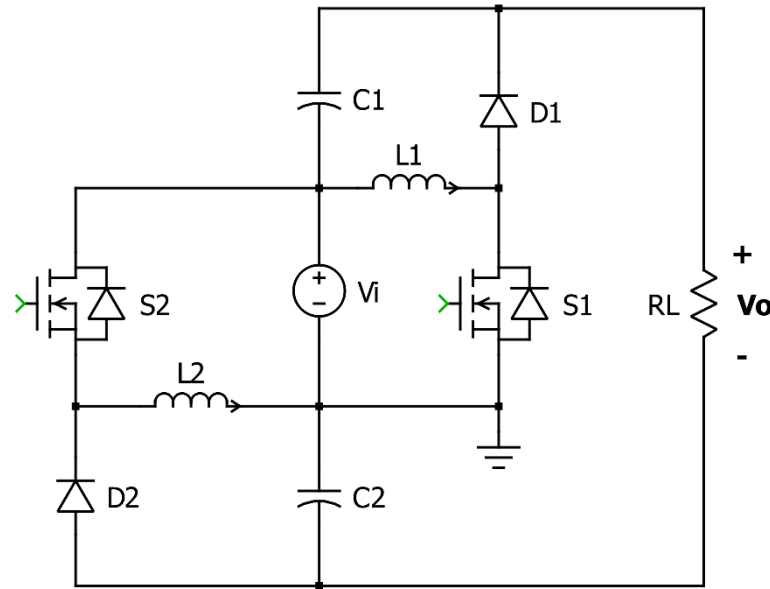


Fig. 5.1 Convertidor boost doble dual [5.2].

El convertidor doble dual se origina como una evolución del concepto de convertidores duales intercalados, en los cuales dos celdas boost idénticas operan con un desfase de 180° en sus señales de conmutación. Esta estrategia permite disminuir el rizado de corriente y repartir la carga entre ambas ramas del convertidor. En la configuración doble dual, este principio se amplía mediante la incorporación de un capacitor flotante que conecta las dos ramas del circuito, posibilitando el intercambio de energía entre ellas y generando un efecto multiplicador en la ganancia de voltaje. Como resultado, se obtiene un convertidor cuya relación de conversión presenta un comportamiento cuadrático en comparación con el convertidor dual convencional, lo que permite alcanzar niveles elevados de tensión de salida manteniendo valores moderados del ciclo de trabajo [5.2].

El principio de operación del convertidor CD-CD doble dual puede entenderse a partir de dos intervalos fundamentales dentro de cada periodo de conmutación. Durante la primera fase, un interruptor (S_1) se encuentra en conducción mientras el otro (S_2) permanece apagado. En este intervalo, el inductor de la primera celda (L_1) se carga directamente desde la fuente de entrada, almacenando energía magnética, mientras que el inductor de la segunda celda (L_2) transfiere su energía hacia el capacitor flotante y la carga. En la segunda fase, los

estados de los interruptores se invierten: S_2 conduce y S_1 se apaga, de modo que L_2 se carga desde la fuente y L_1 descarga su energía hacia la salida a través del capacitor flotante. Este proceso cíclico de carga y descarga intercalada permite que la energía se transfiera de forma balanceada entre ambas ramas, logrando una salida con rizado reducido y una ganancia de tensión superior [5.2].

En términos analíticos, y considerando un régimen de operación ideal, la ganancia de voltaje del convertidor doble dual puede expresarse como:

$$\frac{V_0}{V_{in}} = \left(\frac{1+D}{1-D}\right)^2 \quad (5.1)$$

Donde D representa el ciclo de trabajo. Esta relación cuadrática evidencia la principal ventaja de la topología: obtener una ganancia considerablemente mayor que la de un convertidor boost clásico sin incrementar el esfuerzo de conmutación ni el valor de D . Por ejemplo, con un ciclo de trabajo de 0.5, la ganancia teórica alcanza 9 veces la tensión de entrada, mientras que en un boost convencional apenas se logra una relación de 3:1 [5.3]. Además, debido a su estructura simétrica, el convertidor distribuye las corrientes de entrada entre las dos ramas, reduciendo las pérdidas por conducción y mejorando la disipación térmica en los dispositivos semiconductores.

Una característica distintiva del convertidor doble dual es el empleo de un capacitor flotante o flying capacitor, que actúa como medio de acoplamiento energético entre ambas celdas. Este capacitor no sólo transfiere energía, sino que también contribuye a estabilizar las tensiones intermedias, mejorando el desempeño dinámico del sistema. El uso de dos etapas intercaladas en oposición de fase genera, además, una corriente de entrada con menor contenido armónico, reduciendo la necesidad de filtros voluminosos y mejorando la compatibilidad electromagnética [5.2], [5.3].

En cuanto a sus ventajas, diversos estudios han demostrado que la topología doble dual ofrece alta ganancia de conversión con tensiones moderadas sobre los interruptores, operación balanceada de los elementos pasivos, baja ondulación de corriente de entrada y alta eficiencia global. Por ejemplo, en la propuesta

experimental desarrollada por García-Vite et al. (2024), publicada en Electronics, el convertidor mostró eficiencias superiores al 94% para tensiones de salida mayores a 15 veces la de entrada, con un control simple basado en modulación de ancho de pulso desfasada [5.2].

No obstante, la topología también presenta limitaciones. El incremento en el número de componentes pasivos implica una mayor complejidad de diseño y un tamaño físico superior al de un convertidor boost tradicional. Además, el equilibrio de tensiones en el capacitor flotante requiere estrategias de control precisas para evitar desbalances que puedan afectar la estabilidad del sistema. En condiciones de operación a potencia elevada, las pérdidas asociadas a la resistencia serie de los capacitores y la caída de tensión en los diodos pueden reducir la ganancia efectiva respecto al modelo ideal [5.3]. A pesar de estas limitaciones, la topología doble dual representa una alternativa eficiente y escalable para aplicaciones de conversión de alta ganancia, especialmente en sistemas fotovoltaicos, donde la densidad de potencia y la eficiencia energética son factores determinantes [5.1].

5.2 Convertidor doble dual con bajo voltaje en los capacitores (LVC)

Para superar las limitaciones de los tradicionales convertidores CD-CD, Ramírez-Carrillo et al [5.4], propone un convertidor elevador con gran ganancia y bajo voltaje en los capacitores (LVC) (Fig. 5.2). La idea central es reducir las tensiones sobre los componentes pasivos sin comprometer la ganancia global del sistema, lo que se traduce en mayor eficiencia, menor tamaño y mejor confiabilidad.

El convertidor propuesto combina las características de topologías boost acopladas con redes de multiplicación de voltaje (voltage multiplier cells, VMCs), en un diseño que permite obtener una ganancia muy alta con condensadores de baja tensión.

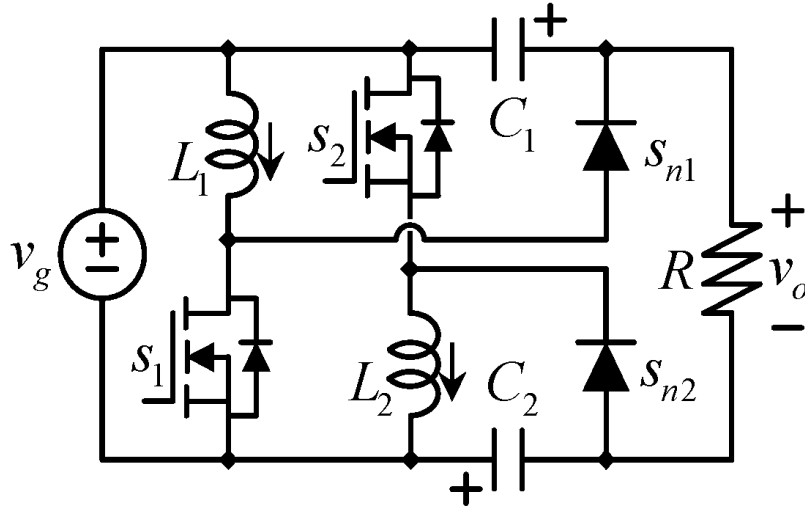


Fig. 5.2 Convertidor boost doble dual LVC [5.4].

El principio de funcionamiento se basa en dos etapas fundamentales (Fig. 5.3):

- Fase de carga (modo ON del interruptor principal): El inductor principal almacena energía desde la fuente de entrada mientras los condensadores se cargan parcialmente mediante el acoplamiento de diodos en la red multiplicadora.
- Fase de descarga (modo OFF): La energía acumulada en el inductor se transfiere hacia la carga y los condensadores conectados en cascada, generando una suma de tensiones. La combinación serie de los capacitores permite obtener una ganancia de voltaje significativamente mayor que la de un convertidor boost convencional.

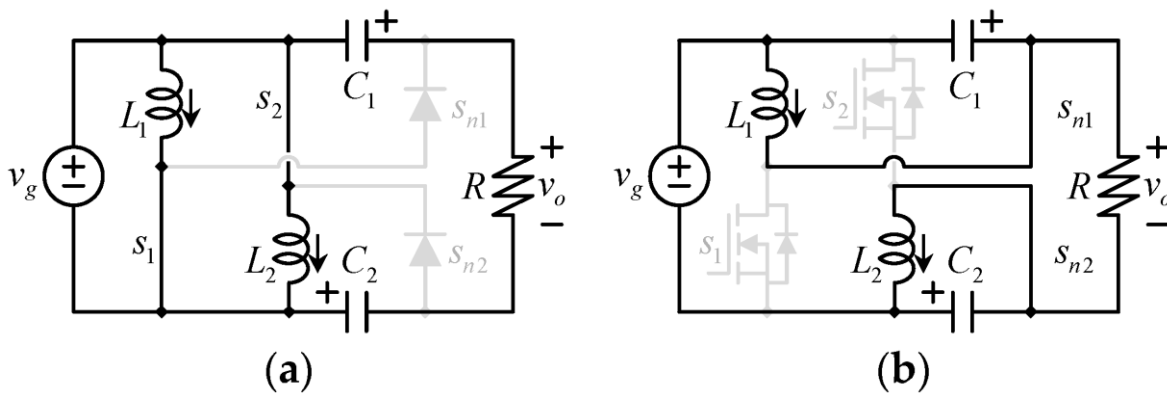


Fig. 5.3 Circuitos equivalentes, según el estado de conmutación, (a) cuando los transistores están cerrados y (b) cuando los transistores están abiertos.

Una de las innovaciones clave del diseño es que cada capacitor opera a un voltaje reducido, típicamente una fracción del voltaje de salida total. Esto se logra mediante una configuración simétrica en la red de multiplicación, lo que permite usar capacitores y diodos con baja tensión nominal, reduciendo el costo y las pérdidas asociadas.

5.3 Modelado matemático del convertidor con bajo voltaje en los capacitores (LVC)

Tras lo descrito hasta ahora y aplicando el método del promediado, es posible expresar los voltajes medios en los inductores L_1 y L_2 durante un ciclo de conmutación de acuerdo a (5.2) y (5.3), respectivamente.

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = d(v_g) + (1 - d)(-v_{C1}) \quad (5.2)$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = d(v_g) + (1 - d)(-v_{C2}) \quad (5.3)$$

De manera similar, la técnica de promediado se puede aplicar a la corriente que circula por los capacitores. La corriente promedio que circula por los capacitores C_1 y C_2 se puede expresar como (5.4) y (5.5), respectivamente.

$$C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} = d\left(-\frac{v_o}{R}\right) + (1 - d)(i_{L1} - \frac{v_o}{R}) \quad (5.4)$$

$$C_2 \frac{dv_{C2}}{dt} = d\left(-\frac{v_o}{R}\right) + (1 - d)(i_{L2} - \frac{v_o}{R}) \quad (5.5)$$

Mismas que se pueden simplificar dando lugar a:

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = dv_g - (1 - d)v_{C1} \quad (5.6)$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = dv_g - (1 - d)v_{C2} \quad (5.7)$$

$$C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} = (1 - d)i_{L1} - i_0 \quad (5.8)$$

$$C_2 \frac{dv_{C2}}{dt} = (1 - d)i_{L2} - i_0 \quad (5.9)$$

A partir de las ecuaciones dinámicas (5.6) a (5.9), el punto de operación en equilibrio puede determinarse aplicando la aproximación de rizado pequeño [5.5]. Esta aproximación asume que las variaciones en las variables de estado son mínimas durante un ciclo de conmutación, lo que se logra mediante una adecuada selección de la frecuencia de conmutación, la capacitancia de los condensadores y la inductancia de los inductores. Bajo condiciones de estado estable, las derivadas de las variables de estado se anulan, por lo que al igualar las ecuaciones (5.5) a cero y aplicar dicha aproximación, se obtiene la expresión del voltaje en el capacitor C1 mostradas en las ecuaciones 5.9 y 5.10.

$$V_{C1} = \frac{D}{1-D} V_g \quad (5.9)$$

$$V_{C2} = \frac{D}{1-D} V_g \quad (5.10)$$

Con lo cual, la ecuación de ganancia del convertidor LVC en estado estable puede ser expresada como:

$$V_o = V_g \frac{1+D}{1-D} \quad (5.11)$$

Los autores comparan su propuesta con varios convertidores de alta ganancia, como el *Quadratic boost*, *Dual boost*, *Switched-capacitor (SC)*, *Coupled inductor step-up*. Donde el convertidor LVC logra una mayor relación de ganancia-eficiencia, evitando el problema de alto voltaje en los capacitores de los convertidores SC tradicionales y el exceso de componentes magnéticos en los acoplados. Además, la propuesta reduce el volumen total del sistema en más de un 20% en comparación con convertidores intercalados o basados en transformadores acoplados.

Por otro lado, destacan su utilidad en:

- Sistemas fotovoltaicos de baja tensión, donde se requiere elevar tensiones de 24–48 V a niveles de 200–400 V.
- Vehículos eléctricos, en los que la etapa de conversión de batería a bus CD necesita alta ganancia con bajo rizado.
- Conversión en microrredes CD o sistemas de respaldo con almacenamiento energético.

Tras lo anterior, podemos concluir que el Convertidor elevador con alta ganancia de voltaje y baja voltaje en los capacitores (*Step-Up Converter with Large Voltage Gain and Low Voltage Rating on Capacitors*) constituye una contribución relevante al diseño de convertidores de alta ganancia, pues logra una relación de ganancia superior a 10×, bajo voltaje en los capacitores, alta eficiencia y una estructura compacta y modular.

Su diseño es especialmente adecuado para aplicaciones donde se busca reducir esfuerzos eléctricos en componentes y mantener la simplicidad de control, sin recurrir a transformadores o acoplamientos magnéticos.

Referencias del capítulo 5

- [5.1] M. Forouzesh, Y. P. Siwakoti, S. A. Gorji, F. Blaabjerg, and B. Lehman, “Step-Up DC-DC Converters: A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques, Topologies, and Applications,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9143–9178, Dec. 2017.
- [5.2] P. M. García-Vite, C. H. Ortiz-Acosta, H. R. Torres-Sánchez, and D. Cárdenas-García, “Flying Capacitor Double Dual Boost DC-DC Converter,” *Electronics*, vol. 13, no. 17, art. 3451, 2024.
- [5.3] C. Liu, J. Zhang, and Z. Zhao, “Quadratic Boost-Derived DC–DC Converters With High Voltage Gain,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 9, pp. 6057–6067, 2016.
- [5.4] M. Ramírez-Carrillo, S. Ortega-Cisneros, J. C. Rosas-Caro, J. Rivera, J. E. Valdez-Resendiz, J. C. Mayo-Maldonado, and A. Valderrabano-Gonzalez, “A Step-Up

- Converter with Large Voltage Gain and Low Voltage Rating on Capacitors,"
Energies, vol. 15, no. 21, art. 7944, Nov. 2022. doi: 10.3390/en15217944
- [5.5] Erickson, R.W.; Maksimovic, D. Fundamentals of Power Electronics; Springer:
New York, NY, USA, 2001.

Capítulo 6

Análisis de sensibilidad de parámetros parásitos en convertidores CD-CD

En aplicaciones que requieren conmutación a alta velocidad, el retardo de propagación en los dispositivos de potencia se vuelve un factor determinante para obtener una temporización adecuada. Por ejemplo, en un circuito de accionamiento de motor que utiliza un IGBT, existe un desfase entre la aplicación de la señal de compuerta y el inicio efectivo de conducción del dispositivo. Dicho retardo originado por la capacitancia de compuerta, el movimiento interno de portadores y las limitaciones del driver, provoca que la corriente de salida se atrase respecto a la señal de control. En sistemas basados en modulación por ancho de pulso (PWM) operando a 20 kHz, un retardo tan pequeño como 200 ns puede distorsionar la conmutación y generar pérdidas adicionales. En configuraciones con múltiples interruptores, los retrasos de transporte desbalanceados pueden provocar fallos de cortocircuito o reducir la eficiencia del sistema.

El uso de optoacopladores para proporcionar aislamiento galvanizado al sistema, incrementa aún más esta problemática, ya que introducen retardos de propagación que deben ser considerados durante el diseño del algoritmo de control. La correcta modelación y compensación de estos retardos permite sincronizar la conmutación, reducir interferencias electromagnéticas y disminuir el estrés en los dispositivos.

Otro aspecto relevante es el voltaje de saturación asociado a los dispositivos de conmutación. Este parámetro, definido como la caída de tensión residual cuando el dispositivo está completamente encendido, influye directamente en las pérdidas por conducción y en la generación de calor. En dispositivos BJT e IGBT, este valor se

conoce como tensión de saturación colector- emisor $V_{CE(sat)}$, mientras que en transistores de efecto de campo de metal-óxido-semiconductor (MOSFETs) aparece como el dren de voltaje de estado de encendido de la fuente $V_{DS(on)}$. Valores más bajos de voltaje resultan en menores pérdidas por conducción, lo que mejora el rendimiento del sistema especialmente en aplicaciones de alta corriente como accionamientos de motores y fuentes de alimentación conmutadas. Estudios técnicos demuestran que la selección adecuada del dispositivo, considerando su comportamiento de saturación, es fundamental para conservar la estabilidad térmica y la operación confiable dentro del área segura de funcionamiento [6.1] [6.2]. Adicionalmente, la resistencia serie equivalente (ESR) presente en capacitores e inductores tiene un impacto considerable en el desempeño global del convertidor. En inductores, esta resistencia —conocida como resistencia de corriente continua (DCR)— incrementa las pérdidas por conducción y afecta la regulación de voltaje. En capacitores, el ESR determina el rizado de salida y puede comprometer la estabilidad del lazo de control. Investigaciones recientes muestran que valores excesivos de ESR en los capacitores de salida reducen la capacidad de respuesta ante transitorios y afectan la estabilidad, particularmente en convertidores con compensación interna [6.3][6.4].

El análisis de estas no idealidades permite comprender cómo parámetros presentes en dispositivos reales generan desviaciones respecto al comportamiento teórico y reducen el rango dinámico del convertidor, especialmente cuando se busca abarcar amplias relaciones de conversión. La inclusión explícita de estos elementos parasitarios permite identificar qué variables influyen en mayor medida en la respuesta del sistema, facilitando el desarrollo de controladores robustos.

6.1 Metodología

Con el fin de evaluar la influencia de las no idealidades en el desempeño de los convertidores CD-CD, se plantea una metodología enfocada en el análisis de tres efectos parasitarios principales: (1) el retardo de propagación, (2) el voltaje de saturación, y (3) la resistencia en serie equivalente (ESR/DCR) presente en capacitores e inductores. Cada uno de estos elementos introduce desviaciones

respecto al comportamiento ideal, afectando la eficiencia, la respuesta dinámica y la regulación de salida.

El estudio se basa en técnicas de modelado y validaciones mediante simulación, con el propósito de cuantificar el impacto individual y combinado de los parámetros parasitarios. Para ilustrar la metodología se utiliza un convertidor Buck convencional, mostrado en la Fig. 1, el cual sirve como base para extender el análisis a otras topologías CD-CD.

6.1.1 Retardo de propagación

Cualquier dispositivo de conmutación requiere condiciones específicas de voltaje y corriente tanto para encender como para apagarse. Debido a que estos dispositivos deben conducir corrientes elevadas y bloquear tensiones significativas, es necesario implementar esquemas de aislamiento entre el microcontrolador y el interruptor, mismos que normalmente basados en optoacopladores.

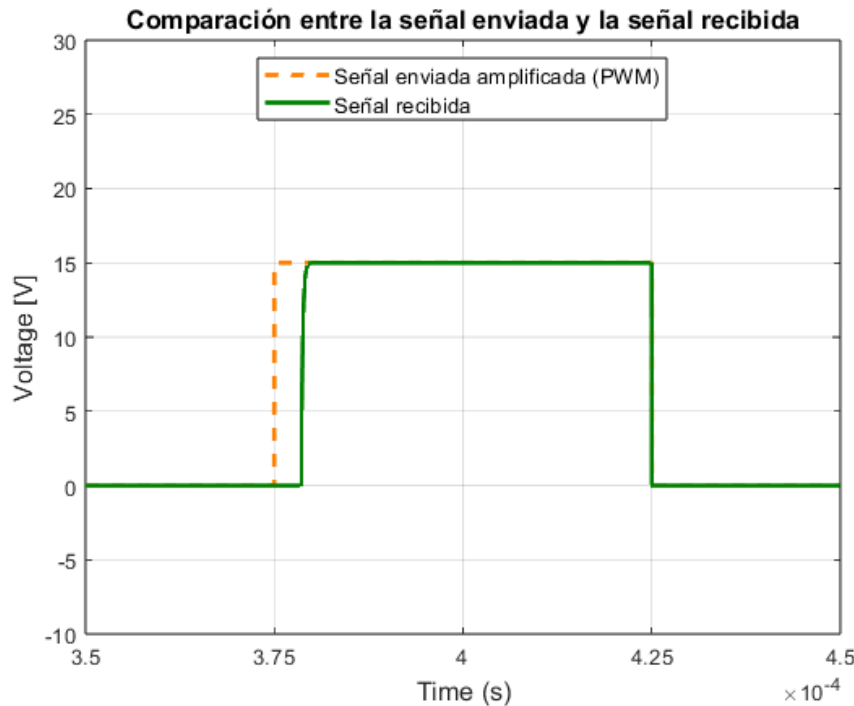


Fig. 6.1 Retardo de transporte

La señal PWM (*del inglés Pulse Width Modulation*) generada por el microcontrolador puede considerarse ideal; sin embargo, al pasar por el optoacoplador se comporta como si hubiese atravesado un circuito equivalente RC (fig 6.1). Las hojas de datos de estos componentes [6.5], especifican los retardos clave: tPLH (bajo a alto) y tPHL (alto a bajo), los cuales permiten estimar el retardo total:

$$t_{retardo} = tPLH + tPHL \quad (6.1)$$

Este retardo es prácticamente independiente de la frecuencia de conmutación, lo que significa que, al incrementar la frecuencia, la variación relativa se vuelve más significativa. Además, es común incluir un circuito RC adicional para evitar falsos disparos, aumentando aún más el retraso de la señal de compuerta. El tiempo requerido para que el capacitor del circuito RC alcance el 85% del voltaje de salida del opto acoplador se calcula mediante:

$$V_C = V_0(1 - e^{-t/\tau}) \quad (6.2)$$

Donde $\tau=RC$, V_C es el voltaje del capacitor y V_0 el voltaje de la fuente conectada a la salida del optoacoplador. Al ser un circuito RC su solución general (ecuación 6.3) involucra τ como constante de tiempo [6.6]. Si estimamos un porcentaje de voltaje aceptable para el capacitor respecto a la fuente (ecuación 6.4), sustituimos en la ecuación 6.3 y resolvemos para t (ecuaciones 6.5 y 6.6), podemos obtener una ecuación que nos permite determinar el tiempo en que el sistema alcanza el voltaje deseado (ecuación 6.7).

$$V_C(t) = V_0(1 - e^{-t/\tau}) \quad (6.3)$$

$$V_C = 85\%V_0 \quad (6.4)$$

$$0.85 = 1 - e^{-t/\tau} \quad (6.5)$$

$$t = -\ln(0.15) \quad (6.6)$$

$$t_{85\%} = 1.89712\tau \quad (6.7)$$

Obteniendo entonces que en total el retardo de transporte será igual a:

$$t_{retardo} = t_{PLH} + t_{PHL} + t_{85\%s} \quad (6.8)$$

Como consecuencia, el ciclo de trabajo que anteriormente habíamos dicho que se definía por el tiempo en que el interruptor esta encendido dividido entre el periodo de la señal ($D = t_{on}/T$) debe ajustarse según:

$$D_1 = \frac{t_{on} - t_{retardo}}{T} \quad (6.9)$$

Por lo que en un sistema conformado por una resistencia de 15kΩ y un capacitor de 100pF, con una frecuencia de 20KHz, tomando los valores más bajos tanto del t_{PHL} (200ns) como del t_{PLH} (600ns), tendríamos, al sustituir en las ecuaciones 6.7 a 6.9, un ciclo de trabajo real del 42.7% y no el 50% esperado. Y al trabajar con frecuencias más altas la variación aumenta, como podemos observar en la tabla 6.1 y en la figura 6.2.

Frecuencia	Ciclo de trabajo real
20 kHz	42.71%
30 kHz	39.06%
40 kHz	35.42%
50 kHz	31.77%
60 kHz	28.13%
70 kHz	24.48%
80 kHz	20.83%
90 kHz	17.19%
100 kHz	13.54%

Tabla 6.1 Comparación de ciclo de trabajo al aumentar la frecuencia.

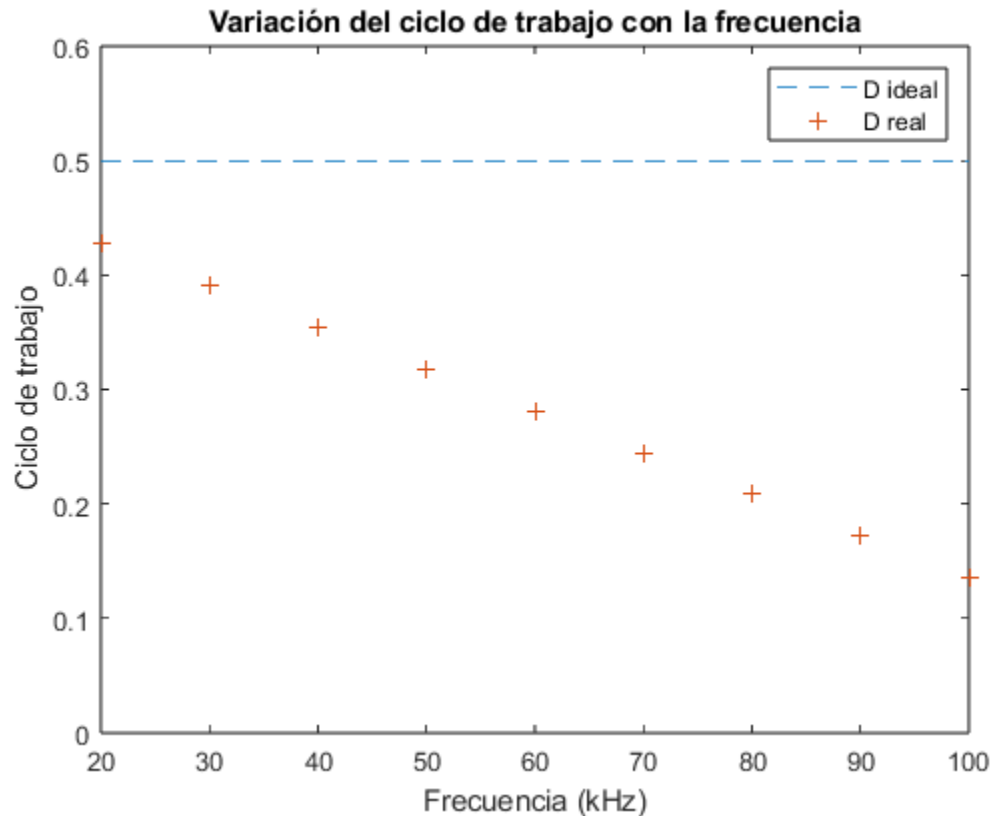


Fig. 6.2 Variación del ciclo de trabajo con la frecuencia.

6.1.2 Voltaje de saturación.

El modelado y análisis del voltaje de saturación en dispositivos semiconductores permite estimar el comportamiento térmico del circuito al igual que las pérdidas en este. Dependiendo del dispositivo que se utilice, el voltaje de saturación colector-emisor $V_{CE(sat)}$ varía. Para un IGBT oscila entre 0.2 V y 0.3 V, en condiciones comunes [6.7], pero aumenta si consideramos dispositivos capaces de gestionar alta potencia, que puede ser 10 veces mayor o incluso más. Mientras que para un transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET), debido a que el dispositivo opera en la región lineal cuando se utiliza como interruptor, y el voltaje en estado encendido se expresa de acuerdo a la ecuación 6.10, donde $R_{DS(on)}$ es la resistencia de encendido de drenaje-fuente [6.8].

$$V_{DS(on)} = i_D * R_{DS(on)} \quad (6.10)$$

En el caso de los Transistores Bipolares de Puerta Aislada (IGBTs), el comportamiento es similar al de los BJTs, con valores típicos de saturación entre 1.5 y 2.5 V dependiendo de la corriente y la temperatura [6.2]. Características determinantes para definir su uso en esta investigación, cuyas especificaciones se resumen en la Tabla 6.2.

Parámetro	Símbolo	Valor típico
Collector-Emissor On Voltage	$V_{CE(on)}$	2.15 V
Diode Forward Voltage Drop	V_{FM}	1.5 V
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	40 ns
Rise Time	t_r	16 ns
Turn-Off Delay time	$t_{d(off)}$	87 ns
Fall Time	t_f	140 ns
Input Capacitance	C_{ies}	270 ns

Tabla 6.2 Parámetros típicos del IGBT IRG4BC10UD [6.9].

Para los diodos, su voltaje de saturación —generalmente entre 0.6 y 0.7 V en silicio y de 0.2 a 0.4 V en Schottky— se modela mediante la ecuación de Shockley (6.11). Donde I_0 es la corriente de saturación inversa, q es la carga elemental, k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta y n es el factor de idealidad. El modelado preciso de I_0 y V es esencial para predecir el rendimiento de los diodos en aplicaciones de electrónica de potencia y procesamiento de señales.

$$I = I_0(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1) \quad (6.11)$$

6.1.3 Influencia de la resistencia en serie equivalente (ESR) y la resistencia de corriente directa (DCR) en convertidores CD-CD.

Los capacitores e inductores utilizados en aplicaciones de potencia presentan una resistencia serie equivalente que afecta directamente la eficiencia y la regulación del convertidor. En el caso de los condensadores, la resistencia serie equivalente (ESR) se origina principalmente debido a las pérdidas dieléctricas, los materiales empleados en los electrodos y las conexiones de los terminales. Estos factores influyen directamente en el nivel de ondulación de la tensión y en la capacidad de atenuación del filtro asociado [6.10]. En los modelos eléctricos, la ESR del capacitor suele representarse como una resistencia conectada en serie con la capacitancia ideal, tal como se expresa en la ecuación 6.12. Por otra parte, en los inductores aparece un fenómeno equivalente denominado también resistencia serie equivalente, frecuentemente identificado como resistencia de corriente directa (DCR). Esta resistencia se origina por la oposición eléctrica del devanado, así como por efectos asociados a altas frecuencias, como el efecto pelicular, además de las pérdidas propias del material del núcleo magnético. Estos factores generan pérdidas por conducción y un incremento de la temperatura en los inductores, especialmente cuando operan en aplicaciones de alta corriente [6.11].

$$Z_{C(\omega)} = ESR + \frac{1}{j\omega C} \quad (6.12)$$

$$Z_{L(\omega)} = ESR + j\omega L \quad (6.13)$$

La resistencia serie equivalente (ESR) del inductor suele describirse mediante la ecuación 6.13 y puede determinarse experimentalmente a través de diferentes técnicas de medición, como el método óhmico de cuatro hilos o mediante barridos de impedancia en el dominio de la frecuencia. Una adecuada caracterización y modelado de la ESR en estos componentes resulta fundamental para reducir las pérdidas energéticas, estimar de forma precisa el comportamiento térmico y asegurar la estabilidad operativa del convertidor. En la mayoría de los convertidores de potencia CD-CD, los condensadores e inductores presentan valores de ESR que generalmente se sitúan en un rango que va desde unos pocos mili-ohmios ($m\Omega$)

hasta aproximadamente $10\ \Omega$, dependiendo del tipo de componente y de las condiciones de operación. La ondulación del voltaje de salida generada por la ESR del condensador puede estimarse a partir de la ecuación 6.14, donde I_{ripple} representa la corriente de rizado que circula a través del condensador de salida. De manera similar, la resistencia de corriente directa (DCR) del inductor produce una caída de tensión adicional, la cual se describe mediante la ecuación 6.15.

$$V_{ripple} = I_{ripple} + R_{ESR} \quad (6.14)$$

$$V_{drop} = I_{load} + R_{DCR} \quad (6.15)$$

Esta caída reduce la eficiencia del convertidor y afecta el rendimiento térmico. La ESR tiene un efecto dominante en la ondulación de salida, mientras que la DCR influye principalmente en la eficiencia. Un modelado preciso de estos parámetros es esencial para un diseño fiable del convertidor.

Referencias del capítulo 6

- [6.1] O. Semiconductor, "Understanding mosfet operation in saturation," ON Semiconductor, Tech. Rep. AND90187-D, 2014. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pub/collateral/and90187-d.pdf>
- [6.2] R. Dunipace, "Test saturation voltage to achieve high efficiency," 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/265072722_Test_Saturation_Voltage_to_Achieve_High_Efficiency
- [6.3] G. Park and K. Lee, "Analytical study of esr constraints for output voltage ripple control," Journal of Power Electronics, vol. 15, no. 1, pp. 166–175, 2015. [Online]. Available: https://www.jpels.org/digital-library/manuscript/file/16965/2_JPE-15-01-166.pdf
- [6.4] T. Zhao and Y. Lin, "Online esr estimation in buck converters via inductor ripple analysis," Electronics, vol. 14, no. 5, 2025.
- [6.5] Broadcom Inc., HCPL-4503 High CMR, High-Speed Optocoupler Datasheet, 2019, AV02-0761EN.
- [6.6] Hart, D. W., Electrónica de potencia. Madrid, España: Pearson Educación, 2001. ISBN 8420531790.

- [6.7] E. Tutorials, "Transistor as a switch," 2022. [Online]. Available: <https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran4.html>
- [6.8] O. Semiconductor, "Understanding mosfet operation in saturation," ON Semiconductor, Tech. Rep. AND90187-D, 2023. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pub/collateral/and90187-d.pdf>
- [6.9] International Rectifier, "IRG4BC10UD insulated gate bipolar transistor (igbt) datasheet," 2004, available online: <https://www.infineon.com/dgdl/irg4bc10ud.pdf>.
- [6.10] C. Digest, "Understanding esr and esl in capacitors," 2021. [Online]. Available: <https://circuitdigest.com/tutorial/understanding-esr-and-esl-in-capacitors>
- [6.11] A. A. C. Forum, "Inductor series resistance," 2020. [Online]. Available: <https://forum.allaboutcircuits.com/threads/inductor-series-resistance.59822/>

Capítulo 7

Funcionamiento mejorado del convertidor elevador con alta ganancia de voltaje y bajo voltaje en los capacitores.

7.1 Aplicaciones y efectos de la técnica de intercalamiento de señales de control en topologías actuales.

El uso de técnicas de intercalación de señales (interleaving) en convertidores DC-DC se ha consolidado como una estrategia fundamental para mejorar el desempeño en sistemas de conversión de potencia modernos. La intercalación consiste en operar múltiples fases de un convertidor en paralelo, cada una modulada mediante señales PWM desfasadas entre sí. Esta técnica no solo permite repartir la corriente entre varias ramas del convertidor, sino que además contribuye a disminuir de manera significativa el rizado (ripple) tanto en la corriente de entrada como en el voltaje de salida. Gracias a ello, es posible mejorar la eficiencia global del sistema sin necesidad de aumentar la frecuencia de conmutación.

Diversos estudios recientes han demostrado que las señales intercaladas (interleaving) no solo forman parte de la configuración topológica del convertidor, sino que también desempeñan un papel fundamental dentro del sistema de control. Por ejemplo, en [7.1] se presenta un convertidor Quadratic Boost intercalado, en el cual el desfase entre las fases permite alcanzar una mayor ganancia de voltaje, reducir el estrés eléctrico en los interruptores y lograr eficiencias superiores al 95 %.

De forma similar, Chang et al. [7.2] muestran que la intercalación de dos convertidores boost tipo voltage doubler permite disminuir el rizado en la salida, lo cual resulta particularmente importante en aplicaciones con celdas de combustible, donde se manejan corrientes elevadas y el control del rizado es un aspecto crítico.

Por otra parte, en [7.3] se señala que, aunque la intercalación contribuye a reducir el rizado total del sistema, también puede generar corrientes circulantes entre fases cuando el sistema de control no se diseña adecuadamente. En dicho estudio se propone una estrategia basada en la regulación dinámica del voltaje del enlace DC, con el objetivo de establecer un punto de operación que minimice el rizado en los inductores. Este enfoque demuestra que el concepto de interleaving debe abordarse tanto desde la perspectiva del diseño topológico como desde el diseño del control. En este sentido, la intercalación se consolida como una herramienta clave para optimizar el desempeño dinámico del convertidor.

Asimismo, investigaciones más recientes, como la presentada en [7.4], exploran el desarrollo de un convertidor bidireccional con intercalación de multiplicidad variable. En esta arquitectura, el controlador determina en tiempo real cuántas fases deben operar de forma intercalada según el valor del ciclo de trabajo, lo que permite optimizar simultáneamente el rizado y la eficiencia del sistema. Este planteamiento evidencia que la intercalación puede utilizarse también como un mecanismo de control adaptativo e inteligente.

Finalmente, en [7.5] se demuestra que los beneficios de la intercalación no se limitan a las topologías tipo boost, sino que también se aplican a convertidores buck multiphase empleados en aplicaciones de electrónica de potencia de alta velocidad, donde el control del rizado resulta determinante para el desempeño del sistema.

En conjunto, estos estudios evidencian que la intercalación de señales constituye una técnica robusta y versátil que permite mejorar la eficiencia, reducir el rizado, disminuir el esfuerzo en los componentes y optimizar el comportamiento dinámico del convertidor. Por ello, su análisis y aplicación resultan fundamentales para el desarrollo de sistemas de conversión de potencia cada vez más compactos, eficientes y confiables.

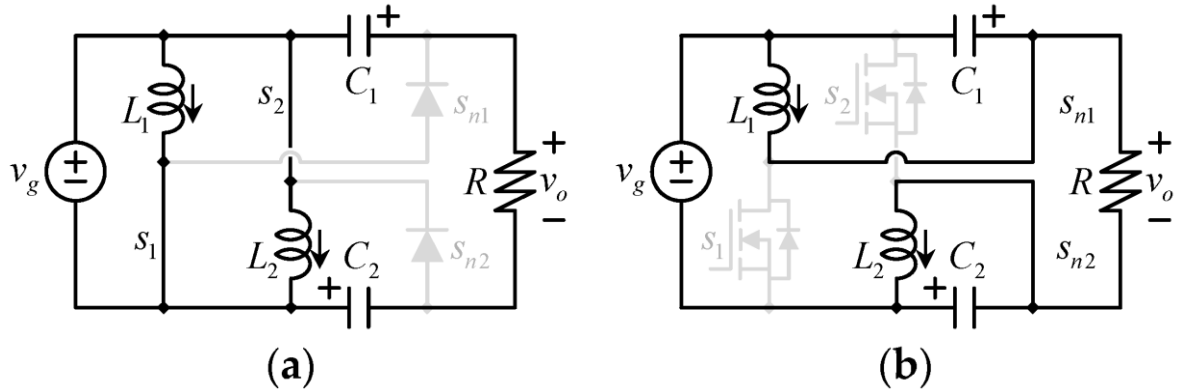
7.2 Aplicación de la técnica de intercalamiento de señales de control al convertidor doble dual con bajo voltaje en los capacitores (LVC)

Los convertidores de corriente continua a corriente continua (DC-DC) de tipo elevador desempeñan un papel fundamental en aplicaciones donde es necesario incrementar el nivel de voltaje disponible a partir de fuentes de baja tensión. Este tipo de convertidores se emplea ampliamente en sistemas fotovoltaicos, vehículos eléctricos, microrredes, dispositivos electrónicos portátiles y múltiples aplicaciones industriales. No obstante, cuando se requieren altas relaciones de ganancia de voltaje, las topologías convencionales presentan diversas limitaciones, entre las que destacan la reducción de la eficiencia, el incremento del rizado en la tensión de salida y el aumento del esfuerzo eléctrico en los componentes del convertidor.

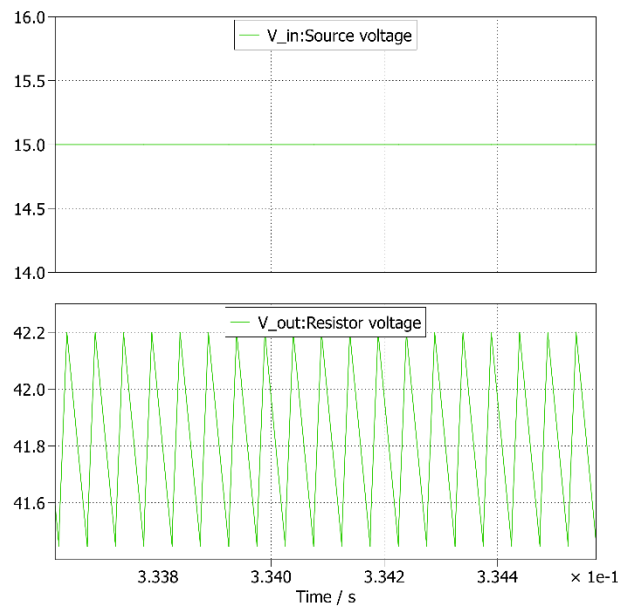
En respuesta a estas limitaciones, han surgido nuevas topologías orientadas a obtener alta ganancia sin comprometer el rendimiento. Entre ellas destaca el convertidor Low-Voltage in Capacitors (LVC), el cual reduce el voltaje requerido en los capacitores internos y permite el uso de componentes más compactos y económicos.

En el capítulo 5 se mostró que el principio de funcionamiento del convertidor LVC se basa en dos etapas fundamentales (Fig. 7.1):

- Fase de carga (modo ON del interruptor principal): El inductor principal almacena energía desde la fuente de entrada mientras los condensadores se cargan parcialmente mediante el acoplamiento de diodos en la red multiplicadora.
- Fase de descarga (modo OFF): La energía acumulada en el inductor se transfiere hacia la carga y los condensadores conectados en cascada, generando una suma de tensiones. La combinación serie de los capacitores permite obtener una ganancia de voltaje significativamente mayor que la de un convertidor boost convencional.



Una de las ventajas del convertidor LVC consiste en el empleo de capacitores que operan a un voltaje menor que el voltaje de salida, reduciendo la energía almacenada y permitiendo seleccionar capacitores de menor tamaño físico. Esto lo convierte en una opción atractiva para aplicaciones de alta densidad de potencia. Sin embargo, en su operación tradicional, el convertidor experimenta rizado significativo debido a la forma en que se cargan y descargan los capacitores, como podemos observar en la figura 7.2, que al voltaje aumenta de 15V a 42 V, pero el rizo de la salida es alto.



En la operación anterior, los transistores conmutan de manera sincronizada; es decir, se cierran y se abren al mismo tiempo, lo que implica que comparten la misma función de conmutación y el mismo ciclo de trabajo. La mejora propuesta consiste en reemplazar la señal PWM única que controla los interruptores por dos señales PWM desfasadas 180 grados, con el mismo ciclo de trabajo. Estas señales son generadas utilizando dos señales portadoras triangulares desplazadas en fase 180°. Podemos denominar s_1 y s_2 a las dos señales de conmutación, y s_{1tr} y s_{2tr} a las señales portadoras triangulares correspondientes. Este esquema PWM puede generarse mediante dos comparadores, como se muestra en la Fig. 7.3. Las señales triangulares portadoras tienen una amplitud unitaria.

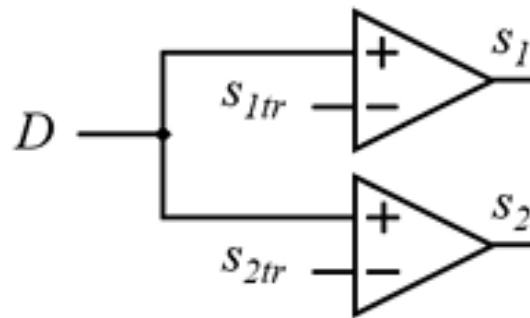


Fig. 7.3. Generador PWM con dos señales de conmutación utilizando dos comparadores ideales.

A diferencia de los dos estados generados por la operación tradicional. En la operación intercalada, dado que los transistores tienen funciones de conmutación diferentes, pueden presentarse las cuatro combinaciones posibles de dos señales digitales, lo que significa que el conjunto $\{s_1, s_2\}$ puede tomar los valores $\{0, 0\}$, $\{0, 1\}$, $\{1, 0\}$ o $\{1, 1\}$. La Fig. 7.4 muestra los circuitos equivalentes del convertidor de acuerdo con este conjunto de posibles valores para las funciones de conmutación.

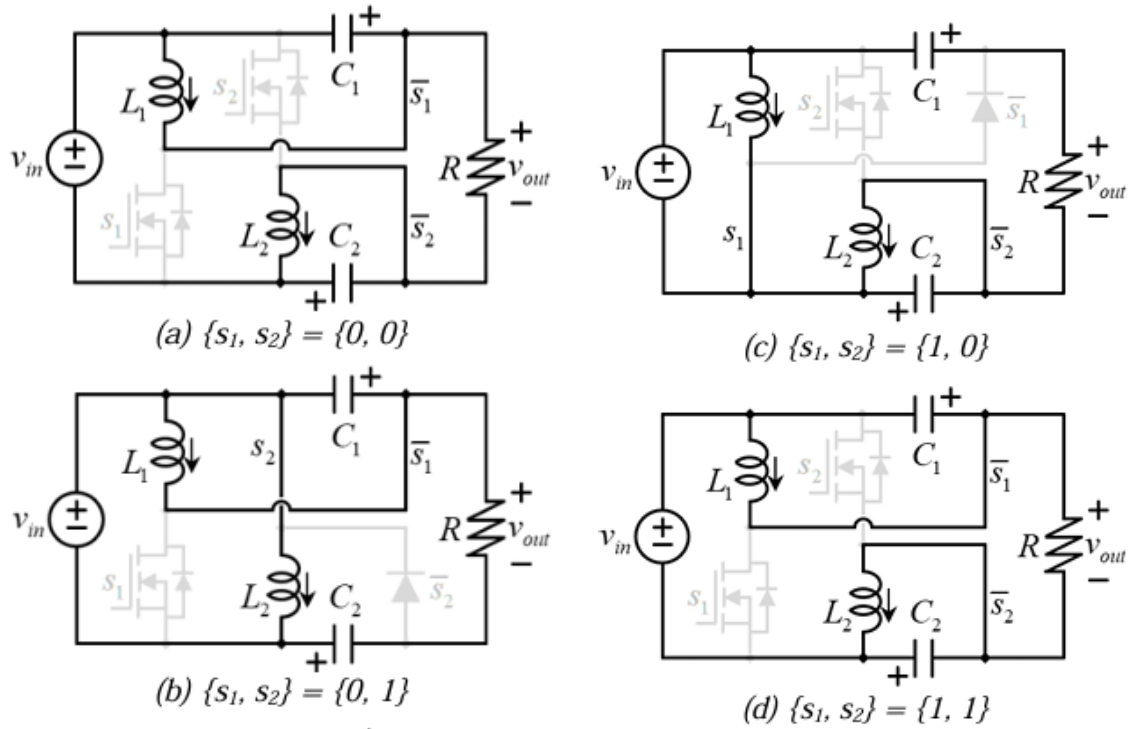


Fig. 7.4. Estados de conmutación del convertidor con dos señales de disparo: (a) $\{s_1, s_2\} = \{0, 0\}$, (b) $\{s_1, s_2\} = \{0, 1\}$, (c) $\{s_1, s_2\} = \{1, 0\}$, y (d) $\{s_1, s_2\} = \{1, 1\}$

Podemos clasificar la operación en tres situaciones: cuando el ciclo de trabajo es mayor que 0.5 ($D > 0.5$), cuando $D < 0.5$, y el caso particular en que el ciclo de trabajo es exactamente 0.5. Las formas de onda asociadas a las dos señales PWM de conmutación se muestran en la Fig. 7.5. Estas señales se generan con la lógica mostrada en la Fig. 7.3.

En la Fig. 7.5, la señal de conmutación s_1 y la señal portadora triangular s_{1tr} se representan en color negro, mientras que las correspondientes a s_2 se muestran en gris oscuro. La Fig. 7.5(a) muestra el caso cuando $D=0.4$ ($D < 0.5$), en esta condición, se presentan las combinaciones $\{0, 0\}$, $\{0, 1\}$, y $\{1, 0\}$ para $\{s_1, s_2\}$. En esta condición de operación, las señales de conmutación no coinciden en alto en ningún instante.

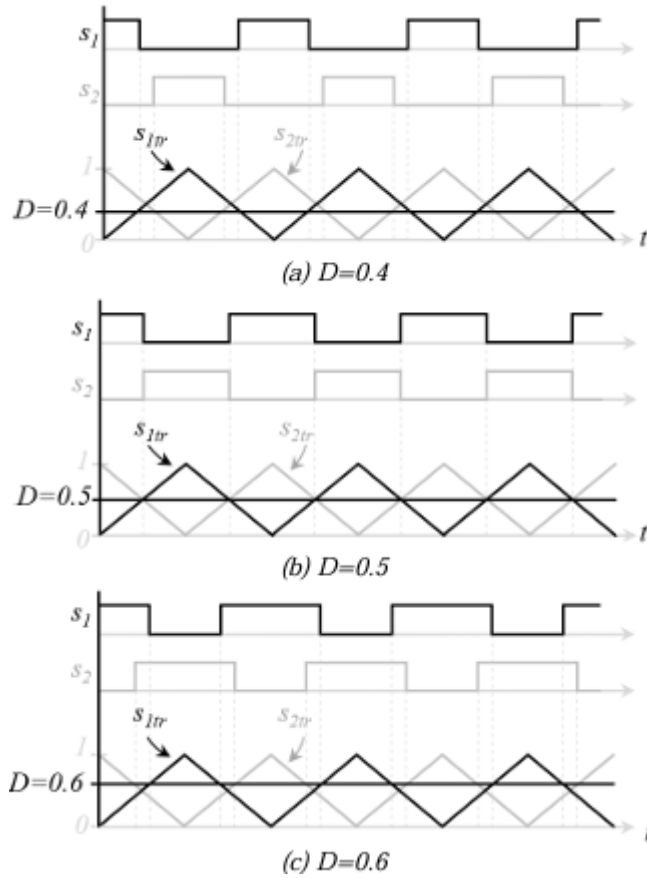


Fig. 7.5. Formas de onda relevantes del generador PWM con los ciclos de trabajo: (a) $D=0.4$, (b) $D=0.5$, (c) $D=0.6$.

La Fig. 7.5(b) muestra el ejemplo cuando $D=0.5$, en esta situación, se presentan las combinaciones $\{0, 1\}$ y $\{1, 0\}$ para $\{s_1, s_2\}$. Las señales de conmutación no coinciden en nivel alto ni en nivel bajo en ningún momento (7.5(b)). La Fig. 7.5(c) muestra el ejemplo cuando $D=0.6$, en este caso, se presentan las combinaciones $\{0, 1\}$, $\{1, 0\}$ y $\{1, 1\}$ para $\{s_1, s_2\}$. Aquí ambas señales de disparo (s_1 y s_2) no están en bajo al mismo tiempo en ningún instante. A pesar de las distintas combinaciones de señales de disparo, el esquema PWM intercalado no modifica el ciclo de trabajo. Como se puede observar en la Fig. 7.4, el voltaje en los inductores depende únicamente del estado de su transistor correspondiente. De manera similar, la corriente que circula por los capacitores depende únicamente del estado de su respectivo transistor. Esto implica que el modelo matemático previamente derivado sigue representando el comportamiento del convertidor, al menos en términos de dinámica y estado estacionario de las ecuaciones de estado. No obstante, existe una diferencia importante: el cálculo del rizo de voltaje en la salida.

La operación intercalada tiene la ventaja de presentar un rizo de voltaje menor en la salida del convertidor en comparación con la operación tradicional. En la operación tradicional, ambos transistores se encienden y apagan al mismo tiempo, lo que provoca que ambos capacitores se carguen o descarguen simultáneamente, generando una suma de los rizados de voltaje. En cambio, en la operación intercalada existen estados en los que un capacitor se está cargando por medio de su inductor respectivo, mientras que el otro se descarga a través de la corriente de salida, lo cual conduce a un cambio más lento en el voltaje de salida. Esto ocurre cuando un transistor está cerrado y el otro abierto.

El rizo de voltaje en la salida puede calcularse en los distintos circuitos equivalentes; consideremos el cálculo durante el intervalo de tiempo en que un capacitor se está cargando y el otro se está descargando, lo cual ocurre durante un cierto periodo según el ciclo de trabajo. El rizo de voltaje en la salida puede expresarse como en la ecuación 7.1, tomando en cuenta que ambos capacitores son iguales y que ambos inductores conducen la misma corriente [7.6]. En la ecuación 7.1, hay un componente negativo que provoca una disminución en el voltaje, mientras que el otro componente, positivo, genera un incremento. Esta diferencia funciona como una especie de cancelación en la derivada del voltaje de salida.

$$\Delta V_{out} = \begin{cases} \frac{(1-D)T_s}{2} \left(\frac{I_L - 2I_{out}}{C} \right) & \text{if } D > 0.5 \\ \frac{DT_s}{2} \left(\frac{I_L - 2I_{out}}{C} \right) & \text{if } D < 0.5 \end{cases} \quad (7.1)$$

Referencias del capítulo 7

- [7.1] M. P. Varghese and S. M. S. Kumar, "Interleaved quadratic boost DC–DC converter with extended voltage gain and reduced switch voltage stress for photovoltaic applications," *Open Research Europe*, vol. 5, 2025.
- [7.2] L.-Y. Chang, K.-H. Chao, and T.-C. Chang, "A high voltage ratio and low ripple interleaved DC–DC converter," *The Scientific World Journal*, vol. 2012, Article ID 843427, 2012.
- [7.3] H.-J. Kim et al., "The DC inductor current ripple reduction method for a two-stage power conversion system," *Electronics*, vol. 12, no. 14, pp. 1–15, 2023.

- [7.4] S. Wang, Y. Xu, Z. Liu, and Y. Li, "Variable multiple interleaved bi-directional DC/DC converter with current ripple optimization," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 3, pp. 1–14, 2023.
- [7.5] M. P. Varghese, "Design and analysis of a multiphase buck converter," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 5325–5335, 2022.
- [7.6] J.-S. Yoo, J.-O. Baek, and T.-Y. Ahn, "A High-Efficiency QR Flyback DC–DC Converter with Reduced Switch Voltage Stress Realized by Applying a Self-Driven Active Snubber (SDAS)," *Energies*, vol. 16, p. 1068, 2023.

Capítulo 8

Simulaciones y resultados experimentales

8.1 Sensibilidad de parámetros parásitos en los convertidores CD-CD

Para evaluar de manera rigurosa cómo la sensibilidad asociada a los parámetros parásitos de los componentes empleados en sistemas electrónicos influye en el desempeño global de los convertidores CD-CD, se desarrolló un estudio combinado que integra simulaciones y validación experimental. La fase de simulación se implementó utilizando la plataforma PLECS [8.1], mientras que la fase experimental se realizó sobre un convertidor Buck físico, cuya implementación se ilustra en la Figura 8.1.

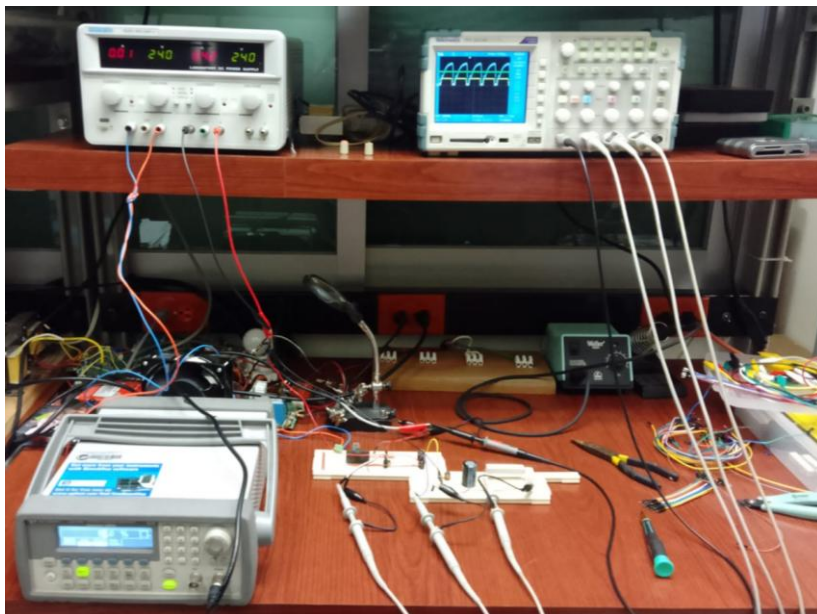


Fig. 8.1. Implementación del convertidor Buck.

En esta etapa preliminar, el análisis se centró particularmente en el circuito de accionamiento encargado de controlar los interruptores de potencia y su respectivo ciclo de trabajo. La relevancia de este bloque radica en que, dentro de él, pueden manifestarse fenómenos que afectan directamente la calidad del control, tales como el **retardo de propagación** y el **voltaje de saturación** de los elementos de conmutación o aislamiento. Dichas variables, aunque con frecuencia se consideran secundarias, pueden introducir distorsiones temporales y pérdidas adicionales que alteran el rendimiento del convertidor, especialmente cuando se opera a altas frecuencias de conmutación.

El accionamiento del interruptor puede ser suministrado por un microcontrolador, un generador de funciones u otro sistema digital. Sin embargo, para garantizar una correcta adaptación, protección y aislamiento entre la electrónica de control (bajo voltaje) y la etapa de potencia (alto voltaje), es indispensable incorporar un circuito intermedio. Este subsistema es responsable de acondicionar las señales y proteger la circuitería sensible; no obstante, suele recibir una atención limitada en la literatura técnica especializada.

En este trabajo se seleccionó un **optoacoplador** como dispositivo principal para lograr el aislamiento galvánico entre ambos dominios del sistema. Los optoacopladores permiten preservar la integridad de la señal al tiempo que evitan que picos de voltaje, ruido eléctrico o transitorios provenientes del lado de potencia afecten la etapa de control, función que resulta esencial en aplicaciones donde se requiere robustez y precisión [8.2]. De esta manera, es posible accionar de manera segura los interruptores del convertidor utilizando únicamente señales de baja energía.

Con el fin de estudiar las variaciones asociadas al retardo de propagación, se seleccionaron dos optoacopladores de características similares en cuanto a encapsulado y configuración de pines: el **HCPL-4503** [8.3] y el **HCPL-3120** [8.4]. Como se aprecia en la Figura 8.2, ambos dispositivos comparten una estructura física comparable, lo cual facilita su integración en el circuito. No obstante, emplean tecnologías internas distintas, el primero es un dispositivo de arseniuro de galio y aluminio (AlGaAs) de modelo HCPL4503 y el segundo constituido de fosfuro de arseniuro de galio (GaAsP), lo que los

convierte en candidatos idóneos para analizar cómo estas diferencias se reflejan en el desempeño temporal del sistema. La Tabla 8.1 presenta una comparación detallada de sus principales parámetros eléctricos, permitiendo identificar sus capacidades de aislamiento, velocidad de respuesta y niveles de corriente requeridos.

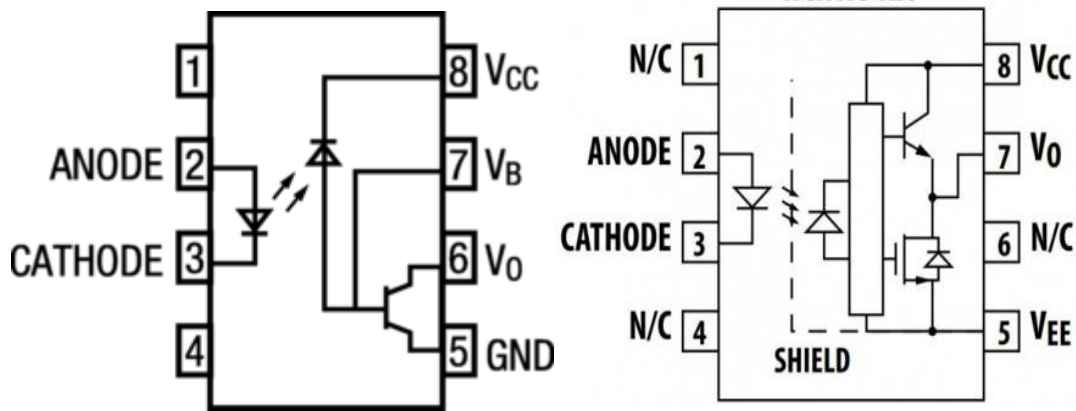


Fig. 8.2. Diagrama de los optoacopladores utilizados (izquierda) HCPL 4503, (derecha) HCPL 3120

Parámetro / Característica	HCPL-3120	HCPL-4503
Tipo / propósito	Gate-driver para IGBT/MOSFET	Optoacoplador lógico / señal
Corriente de salida	Pico ≈ 2.5 A	Corriente colector ≈ 8 Ma
VCC salida	15–30 V	—
Velocidad de conmutación	≈ 500 ns	≈ 1 Mb/s
Tipo de salida	Push-pull	Transistor colector abierto
Inmunidad modo común	≥ 25 kV/ μ s	≥ 15 kV/ μ s
Temperatura operación	-40 °C a $+100$ °C	0 °C a $+70$ °C

Tabla 8.1 Comparativa de algunas características de los optoacopladores utilizados.

El circuito experimental completo se muestra en la Figura 8.3, donde se especifican los valores de los componentes y los elementos utilizados. Entre estos se incluyen:

- una fuente de 24 V,
- un regulador lineal **7805** para la conversión local a 5 V [8.5],

- Esta configuración permite reproducir de manera controlada los efectos asociados a las variaciones de los dispositivos y realizar mediciones precisas del comportamiento dinámico del convertidor.



91

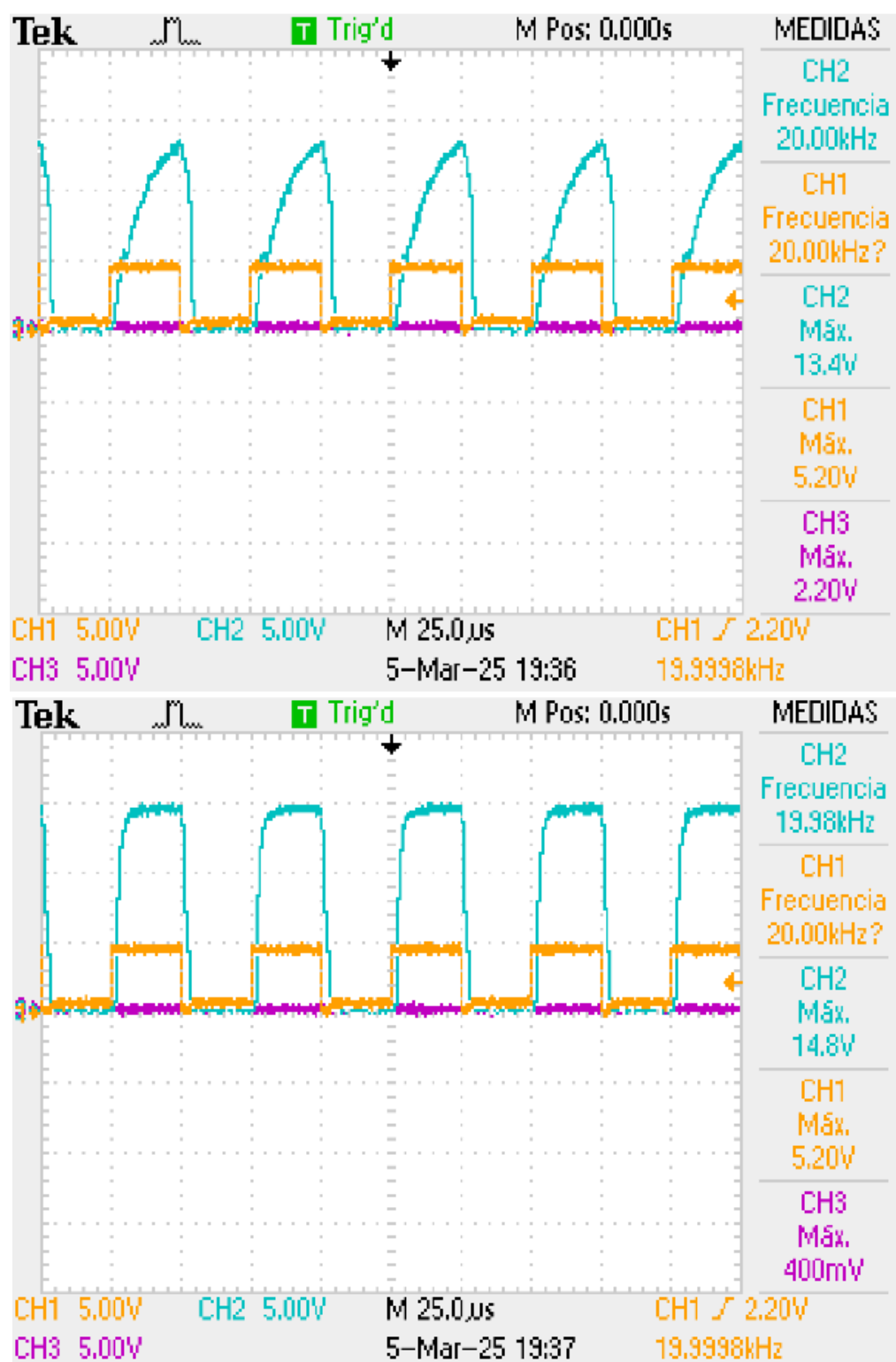


Fig. 8.4. Señales medidas en el osciloscopio, arriba la concerniente al circuito que utiliza el optoacoplador HPCL-4503, abajo la referente al optoacoplador HPCL-3120.

Con el propósito de analizar de manera detallada la influencia que ejercen el voltaje de saturación de los dispositivos de conmutación y la resistencia en serie equivalente (ESR/DCR) de los componentes pasivos sobre el comportamiento de los convertidores CD-CD, se diseñó y ejecutó una serie de experimentos complementados con simulaciones en PLECs. Este análisis resulta fundamental, ya que dichos parámetros parásitos suelen introducir pérdidas adicionales, variaciones en la forma de onda y desviaciones en los puntos de operación que pueden deteriorar el desempeño del convertidor, especialmente en aplicaciones donde se requiere alta eficiencia o precisión regulatoria.

Para ello, se definió una metodología sistemática en la cual se modificó el ciclo de trabajo del convertidor en un rango comprendido entre 20 % y 80 %, aplicando incrementos uniformes de 5 % en cada iteración. Este procedimiento permitió observar de manera progresiva cómo el convertidor respondía a distinta demanda de energía transferida, manteniendo en todos los casos una frecuencia de conmutación fija de 20 kHz, valor representativo en aplicaciones industriales y que posibilita una comparación directa entre condiciones experimentales y simuladas.

El convertidor analizado fue diseñado siguiendo las recomendaciones de la guía propuesta por A. Gastli [8.8], dimensionando sus componentes para garantizar estabilidad y operación adecuada en el rango de trabajo seleccionado, en modo de conducción continua. Los valores utilizados para la etapa de potencia fueron los siguientes:

- **Inductor:** 820 μH
- **Capacitor:** 220 μF
- **Carga resistiva:** 10 Ω

Estos elementos fueron escogidos considerando el compromiso entre ondulación permisible, respuesta dinámica y eficiencia del sistema. Además, la presencia de ESR en el capacitor y DCR en el inductor permite estudiar de manera directa cómo estos parámetros influyen en la regulación de voltaje bajo diferentes condiciones de conmutación.

Durante cada prueba se registró el voltaje de salida del convertidor, que constituye la variable principal para evaluar el impacto de los efectos parásitos y del

voltaje de saturación en los dispositivos de conmutación. Los resultados obtenidos se recopilaron y se representan gráficamente en la Figura 8.5, donde es posible visualizar las variaciones del voltaje en función del ciclo de trabajo y comparar el comportamiento experimental con el previsto por las simulaciones.

Este análisis conjunto permite identificar discrepancias entre el modelo ideal y el comportamiento real del convertidor, proporcionando una base sólida para comprender la importancia de considerar los parámetros parásitos en el diseño y selección de componentes en sistemas CD-CD.

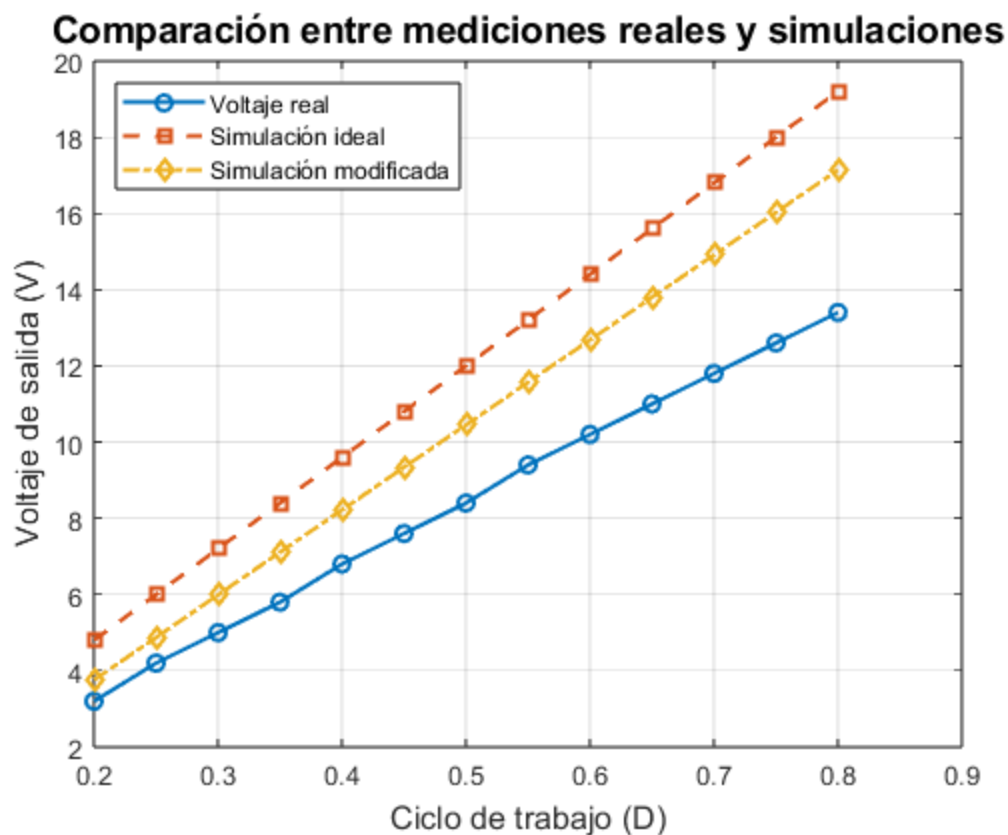


Fig. 8.5. Resultados del voltaje obtenido en las simulaciones e implementación del convertidor Buck.

8.2 Análisis del funcionamiento mejorado del convertidor elevador LVC

Para validar experimentalmente el comportamiento del convertidor LVC (Low Voltage Converter) con la mejora propuesta, se construyó un prototipo funcional empleando como base el kit de medio puente TDHB-65H070L-DC-ND, diseñado y comercializado por la empresa Transphorm. Este módulo incorpora transistores TPH3212PS, los cuales están fabricados con tecnología de nitruro de galio (GaN-FET), una alternativa ampliamente reconocida en aplicaciones de electrónica de potencia por su alta velocidad de conmutación, menores pérdidas y elevada densidad de potencia. Las placas necesarias para el prototipo fueron adquiridas a través del distribuidor Digi-Key, como se muestra en la figura 8.6.



Fig. 8.6. Medio puente modelo TDHB-65H070L-DC-ND de la compañía Transphorm.

El convertidor LVC fue evaluado bajo dos estrategias de operación: modo tradicional y modo intercalado (interleaved). Ambas metodologías fueron implementadas manteniendo los mismos valores de los componentes y las mismas condiciones de operación, con el objetivo de aislar los efectos propios del esquema de control. Los resultados experimentales evidencian que el convertidor funciona

correctamente en ambos casos. No obstante, la operación intercalada presenta una ventaja significativa: la reducción del rizo de voltaje en la salida, lo que se traduce en una mejor calidad de energía y un menor estrés para los componentes del filtro.

Los parámetros eléctricos y componentes utilizados en el prototipo del convertidor LVC son los siguientes:

- **Inductores:** $L1=L2=250\ \mu\text{H}$
- **Capacitores:** $C1=C2=10\ \mu\text{F}$
- **Frecuencia de conmutación:** $f_s=20\ \text{kHz}$
- **Ciclo de trabajo:** $D=0.6$
- **Voltaje de entrada:** $V_{in}=15\ \text{V}$
- **Carga resistiva:** $R=200\ \Omega$

La **Figura 8.7** presenta una fotografía del prototipo implementado, donde se observan tanto el módulo de conmutación como los inductores, capacitores y la etapa de control.



Fig. 8.7. Prototipo experimental con las sondas activas de medición de corriente.

Las Figuras 8.8 y 8.9 muestran las principales formas de onda medidas durante la operación del convertidor en modo tradicional e intercalado, respectivamente. En ambas gráficas, la señal mostrada en color dorado oscuro corresponde al voltaje en el interruptor S1, con una escala de 20 V/div, evidenciando una forma de onda cuadrada con un valor pico aproximado de 40 V. Cabe destacar

que, aunque el convertidor eleva el voltaje de salida hasta aproximadamente 60 V, los transistores únicamente requieren bloquear tensiones inferiores a dicho valor, lo que constituye una ventaja importante frente a otras arquitecturas elevadoras como el convertidor boost convencional, donde los semiconductores deben soportar directamente el voltaje de salida.

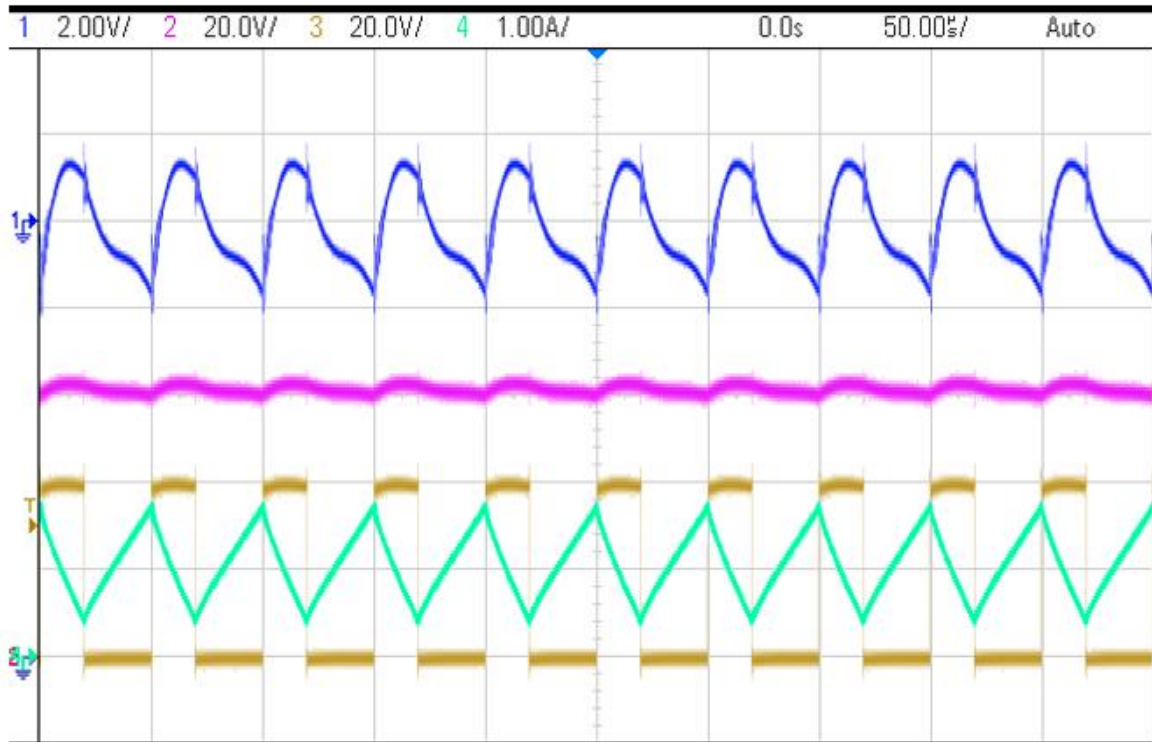


Fig. 8.8. Señales en la operación tradicional del convertidor LVC (no intercalada)

La señal verde, representada con una escala de 1 A/div, corresponde a la corriente en el inductor L1. Su forma presenta la clásica ondulación triangular asociada a la conmutación, con un valor promedio cercano a 1 A. Por su parte, la señal rosa muestra el voltaje de salida, escalado a 20 V/div, cuyo valor nominal se encuentra alrededor de 60 V. Finalmente, la señal azul representa una ampliación del rizo presente en el voltaje de salida, con un acercamiento configurado a 2 V/div, permitiendo una observación precisa de su magnitud.

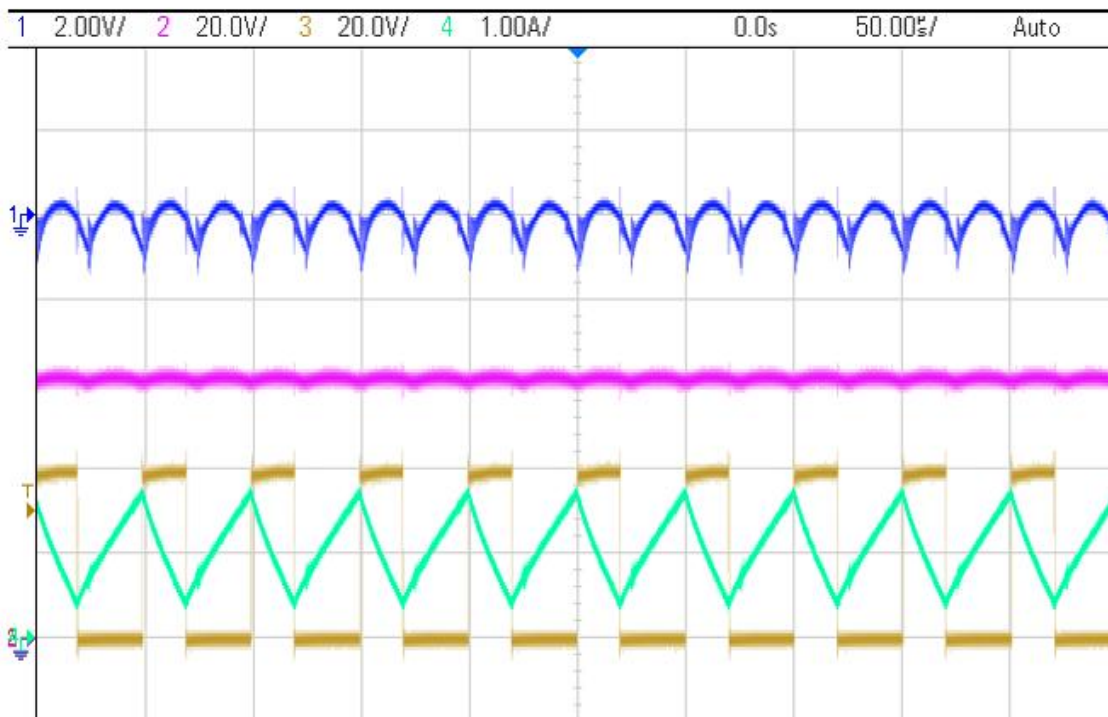


Fig. 8.9. Señales del convertidor LVC en la operación intercalada.

Una de las características sobresalientes del convertidor LVC es la reducción de los niveles de voltaje que deben soportar los componentes, lo que contribuye a disminuir costos, reducir pérdidas y facilitar la selección de dispositivos. Sin embargo, además de esta ventaja intrínseca, los resultados demuestran que el modo intercalado reduce aún más el rizo del voltaje de salida en comparación con el esquema tradicional. Específicamente, se observó que el rizo se reduce aproximadamente en un 50 %, pasando de 1.8 V en la operación tradicional a alrededor de 0.9 V cuando se emplea la operación intercalada. Esta disminución es consecuencia directa del desfase entre las corrientes de los inductores, lo cual mitiga la ondulación neta que aparece en el capacitor de salida.

Cabe señalar que la operación intercalada es que requiere el uso de dos señales de disparo independientes, por lo que el microcontrolador debe generar dos modulaciones PWM sincronizadas con un desfase adecuado. Este requerimiento incrementa ligeramente la complejidad del sistema de control, aunque no representa un impedimento significativo gracias a las capacidades actuales de los microcontroladores destinados a aplicaciones de electrónica de potencia.

Referencias del capítulo 8

- [8.1] Plexim GmbH, PLECS – Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation Software, versión X.X, Suiza. [Software]. Disponible en: <https://www.plexim.com>
- [8.2] J. Jung, A. Selerowicz, J. Ulanski, R. Udovytska, B. Luszczynska, A. Zawadzki y A. Rybak, “Organic Optocoupler with Simple Construction as an Effective Linear Current Transceiver,” *Materials*, vol. 18, no. 1, art. 152, 2025, doi: 10.3390/ma18010152.
- [8.3] Broadcom (Avago Technologies), HCPL-4503 Single-Channel High-Speed Optocoupler — Data Sheet, 16-page PDF, (última versión disponible online).
- [8.4] Broadcom (Avago Technologies), HCPL-3120: 2.5 Amp Output Current IGBT Gate Drive Optocoupler — Data Sheet, Rev. V02-0161EN, Mar. 21, 2016.
- [8.5] Texas Instruments, *LM7805 — 5-V Positive Voltage Regulator (Datasheet)*, LM7805. [En línea]. Disponible: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7805.pdf>. Accedido: 8 dic. 2025.
- [8.6] Powerex Inc., *VLA106-24151 Isolated DC/DC Converter — Datasheet*, documento técnico, 2011. [En línea]. Disponible: https://www.pwr.com/pwr/docs/vla106_24151.pdf. Accedido: 8 dic. 2025.
- [8.7] International Rectifier, “G4BC10 IGBT Datasheet,” AllDataSheet. Accedido: 8 dic. 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=G4BC10>
- [8.8] A. Gastli, DC-DC Converters (Power Electronics Lecture Notes). Open access. Disponible: pdfcoffee.com/dc-dc-converters-pdf-free.html. Accedido: 8 dic. 2025.

Capítulo 9

Conclusiones

9.1 Conclusiones

La presente investigación doctoral abordó de manera integral el análisis, diseño, implementación y validación experimental de convertidores CD-CD de alto desempeño orientados a aplicaciones en sistemas fotovoltaicos. Partiendo de la hipótesis central, se postuló que la implementación de una topología innovadora, combinada con técnicas avanzadas de reducción de rizado, incremento de ganancia de voltaje y mejora en la respuesta dinámica mediante el uso de semiconductores de nueva generación, permitiría superar las limitaciones inherentes a los convertidores convencionales, mejorando significativamente la eficiencia, estabilidad y calidad de la energía entregada.

Los resultados obtenidos a lo largo de la investigación permiten confirmar que la hipótesis planteada ha sido validada. El trabajo demuestra que es posible integrar de forma efectiva diversas estrategias de mejora dentro de un mismo esquema de conversión, obteniendo beneficios simultáneos que en gran parte de la literatura existente suelen analizarse de manera independiente.

En una primera etapa, el análisis de sensibilidad frente a parámetros parásitos evidenció que el comportamiento real de los convertidores CD-CD está fuertemente condicionado por la presencia de efectos no ideales, los cuales con frecuencia se simplifican o incluso se omiten en los modelos analíticos convencionales. El estudio experimental del circuito de accionamiento, particularmente del retardo de propagación asociado a los optoacopladores, reveló que pequeñas variaciones en el tiempo de respuesta de los dispositivos de aislamiento pueden generar diferencias apreciables en la calidad del proceso de conmutación. Estas variaciones repercuten directamente en la respuesta dinámica del convertidor y en el nivel de pérdidas asociadas al proceso de conmutación. La comparación entre los dispositivos HCPL-4503 y HCPL-3120 permitió demostrar que una selección adecuada del circuito de

disparo es determinante para maximizar el desempeño del sistema, especialmente en escenarios de conmutación a frecuencias medias y altas.

Adicionalmente, el análisis del impacto del voltaje de saturación de los dispositivos de conmutación y de la ESR/DCR de los componentes pasivos confirmó que estos parámetros influyen de forma directa en la regulación de voltaje y en la desviación respecto al comportamiento ideal previsto por los modelos promediados. La correlación entre los resultados de simulación y los datos experimentales no solo valida la metodología empleada, sino que también proporciona evidencia sólida de la necesidad de incorporar modelos más completos que contemplen los efectos parásitos para el diseño de convertidores de alto rendimiento.

En una segunda etapa del estudio, se llevó a cabo la implementación y evaluación experimental de un convertidor elevador LVC basado en semiconductores de nitruro de galio (GaN-FET), lo que permitió examinar el impacto del uso de tecnologías emergentes en sistemas de conversión de potencia. Los resultados obtenidos evidencian que los dispositivos GaN presentan ventajas significativas en términos de mayor velocidad de conmutación, disminución de pérdidas y mejor gestión de los niveles de voltaje soportados por los interruptores. A diferencia de las topologías elevadoras convencionales, el convertidor LVC analizado permite alcanzar altas ganancias de voltaje sin generar un incremento proporcional en el estrés eléctrico aplicado a los semiconductores, lo cual constituye una contribución relevante para aplicaciones fotovoltaicas caracterizadas por bajos niveles de voltaje de entrada.

Uno de los aportes más destacados de esta investigación corresponde al análisis comparativo entre la operación convencional y la operación intercalada del convertidor LVC. Los resultados experimentales demostraron de manera consistente que la estrategia de intercalación permite reducir el rizado de voltaje de salida en aproximadamente un 50 %, lo que mejora significativamente la calidad de la energía suministrada y reduce el esfuerzo sobre los componentes del filtro de salida. Este hallazgo confirma experimentalmente la eficacia de las técnicas intercaladas cuando se integran con topologías elevadoras y dispositivos de conmutación de alta velocidad, configurando así una solución integral que aborda simultáneamente las tres problemáticas principales planteadas en la investigación: reducción del rizado, aumento de la ganancia de voltaje y mejora de la respuesta dinámica.

En términos generales, la investigación no solo cumple con los objetivos establecidos, sino que los supera al proponer una solución que articula de manera

coherente análisis teórico, simulación avanzada y validación experimental. Desde el punto de vista académico, el trabajo aporta conocimiento original acerca de la influencia de los parámetros parásitos y del circuito de accionamiento en el desempeño de los convertidores CD-CD, así como evidencia experimental sobre el potencial de las topologías LVC intercaladas basadas en dispositivos GaN. Desde una perspectiva tecnológica, los resultados obtenidos posicionan esta propuesta como una alternativa viable y escalable para sistemas fotovoltaicos y otras aplicaciones de generación distribuida, contribuyendo al desarrollo de sistemas energéticos más eficientes, confiables y sostenibles.

Como resultado directo de la investigación desarrollada en esta tesis doctoral, se generaron contribuciones científicas que han sido difundidas en foros académicos de reconocido prestigio. En particular, se publicó el artículo *“Improved Operation of the Step-Up Converter with Large Voltage Gain and Low Voltage on Capacitors”* en la revista Applied Sciences, validando parte de los aportes teóricos y experimentales relacionados con la mejora en la ganancia de voltaje y la reducción del esfuerzo eléctrico en los componentes. Asimismo, los resultados experimentales asociados a la operación de bajo rizado del convertidor LVC fueron presentados en el artículo *“Experimental Verification of the LVC Converter under Reduced Ripple Operation”*, expuesto en el 2025 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC 2025), celebrado en Ixtapa, México. De manera complementaria, actualmente se encuentra en desarrollo el manuscrito titulado *“Sensitivity Analysis of Parasitic Parameters on DC-DC Converters”*, el cual amplía y consolida los hallazgos relacionados con la influencia de los parámetros no ideales en el desempeño de los convertidores CD-CD.

Finalmente, los resultados obtenidos en esta investigación evidencian que las estrategias de diseño y operación propuestas no solo impactan positivamente en variables clásicas como la ganancia de voltaje, el rizo de salida y la respuesta dinámica, sino que también presentan una relación directa con la potencia procesada por el convertidor. La reducción del rizo y del esfuerzo eléctrico sobre los componentes contribuye a una disminución de las pérdidas por conducción y conmutación, lo que se traduce en una mejora del rendimiento energético conforme aumenta el nivel de potencia transferida. Asimismo, el uso de topologías como el convertidor LVC, combinado con operación intercalada y dispositivos GaN, permite distribuir la potencia entre múltiples ramas, reduciendo las corrientes pico y favoreciendo una escalabilidad eficiente hacia niveles de potencia mayores, característica especialmente relevante en sistemas fotovoltaicos de media potencia y generación distribuida. De este modo, las soluciones propuestas no solo son válidas

a nivel funcional, sino que muestran un potencial claro para aplicaciones donde la densidad de potencia y la eficiencia global del sistema son parámetros críticos.

Además del trabajo presentado en este documento, también se colaboró con el artículo titulado “*A Neuroadaptive Position-Sensorless Robust Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System with Uncertain Disturbance*”, publicado en 2024 en la revista *Energies*. Dicho trabajo presenta el desarrollo de una estrategia de control robusto y neuroadaptativo para sistemas de accionamiento de motores síncronos de imanes permanentes, la cual prescinde del uso de sensores de posición. La propuesta permite compensar perturbaciones inciertas y variaciones paramétricas, mejorando el desempeño dinámico y la robustez del sistema mediante técnicas de adaptación basadas en redes neuronales.

Como trabajo futuro, se plantea la evaluación de convertidores intercalados operando con diferentes ciclos de trabajo, así como la aplicación de técnicas de control que permitan garantizar la robustez de dichos convertidores ante variaciones en el voltaje de entrada y en las condiciones de carga. Asimismo, se propone integrar los fenómenos identificados en el análisis de sensibilidad dentro de los modelos desarrollados, con el fin de mejorar su precisión y capacidad predictiva.