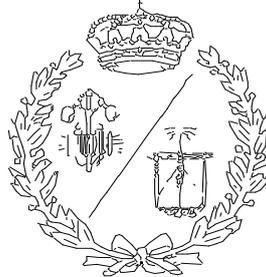


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**REVISIÓN Y MODELADO DE LOS
CONVERTIDORES DC-DC BIDIRECCIONALES
PRINCIPALES**

**Review and modelling of the main bidirectional
DC-DC converters**

Para acceder al Título de

**GRADUADA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

Autor: Olga Posada Álvarez

Septiembre-2022

RESUMEN

En este trabajo se realiza una revisión del estado del arte de los convertidores de electrónica de potencia principales, centrando el estudio en la obtención de modelos con los que obtener resultados de simulación. Se plantea un estudio sobre las diferentes topologías de convertidores DC-DC bidireccionales con aislamiento y sin aislamiento, que se utilizan habitualmente en aplicaciones en las que se empleen sistemas de almacenamiento eléctrico con baterías y supercondensadores. Ejemplos de aplicación de estas topologías se pueden encontrar en el vehículo eléctrico, el frenado regenerativo de motores y las energías renovables.

El principal foco de estudio estará en la utilización de estos convertidores para sistemas híbridos de almacenamiento (baterías y supercondensadores), en los que el convertidor DC-DC actúa como interfaz entre ambas tecnologías de almacenamiento, formando un sistema híbrido de almacenamiento (HESS, Hybrid Energy Storage System). También, existen aplicaciones de almacenamiento de energía basadas en la topología de transformadores de estado sólido (SST, Solid-State Transformer), que utilizan como elemento principal de procesamiento de energía el convertidor Dual Active-Bridge (DAB).

Una vez analizados los convertidores más interesantes para estas aplicaciones, se obtendrán sus modelos con los que obtener resultados de simulación para la verificación de su funcionamiento.

ABSTRACT

In this project, a review of the state of the art and simulation of the main power electronics converter models will be developed. A study on the different topologies of bidirectional DC-DC converters with isolation and without isolation, which are commonly used in applications where electrical storage systems with batteries and supercapacitors are used, will be proposed. Application examples of these topologies can be found in electric vehicles, regenerative braking of motors and renewable energies.

The focus of the study will be on the use of these converters for hybrid storage systems (batteries and supercapacitors), in which the DC-DC converter acts as an interface between both storage technologies, forming what is called a Hybrid Energy Storage System (HESS). There are also energy storage applications based on Solid-State Transformer (SST) topology, which use the Dual Active-Bridge (DAB) converter as the main energy processing element.

Once the most interesting converters for these applications have been analyzed, their models will be obtained to get simulation results for the verification of their operation.

ÍNDICE GLOBAL

1. DOCUMENTO 1. MEMORIA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura general de un convertidor DC-DC bidireccional.	12
Figura 2. Clasificación de los convertidores DC-DC bidireccionales según su topología.	12
Figura 3. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado Buck y Boost [1].	13
Figura 4. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado Buck-Boost [1].	14
Figura 5. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado Cuk [1].	14
Figura 6. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado SEPIC-Zeta [1].	15
Figura 7. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado en cascada [1].	15
Figura 8. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado con condensador conmutado [1].	16
Figura 9. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado intercalado [1].	16
Figura 10. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado multinivel [1].	16
Figura 11. Convertidor DC-DC bidireccional aislado Flyback [1].	18
Figura 12. Convertidor DC-DC bidireccional aislado Cuk [1].	18
Figura 13. Convertidor DC-DC bidireccional aislado Push-Pull [1].	19
Figura 14. Convertidor DC-DC bidireccional aislado Forward [1].	19
Figura 15. Convertidor DC-DC bidireccional aislado DAB [1].	20
Figura 16. Estructuras del resonador [4].	20
Figura 17. Convertidor DC-DC bidireccional aislado Dual Half Bridge [1].	21
Figura 18. Convertidor DC-DC bidireccional aislado Half-Full Bridge [1].	22
Figura 19. Convertidor DC-DC bidireccional aislado multipuerto [1].	22
Figura 20. Topología pasiva del HESS [3].	26
Figura 21. Topología semiactiva de SC del HESS [3].	27
Figura 22. Topología semiactiva de batería del HESS [3].	27
Figura 23. Topología activa del HESS [3].	27
Figura 24. Arquitectura topología semiactiva de SC del HESS [3].	28
Figura 25. Topología TAB [11].	31
Figura 26. Red de impedancia DC-DC bidireccional de tres niveles [4].	33
Figura 27. Estructura del frenado regenerativo.	35
Figura 28. Convertidor DC-DC bidireccional multientrada para frenado regenerativo [12].	36
Figura 29. Convertidor DC-DC bidireccional de medio puente para frenado regenerativo de una e-bike [13]. ...	36
Figura 30. Convertidor DC-DC bidireccional multipuerto para su aplicación en una microrred [15].	38
Figura 31. Estructura del HESS con una topología DAB y una Buck-Boost [18].	38
Figura 32. Topología SST [19].	40
Figura 33. Circuito convertidor híbrido [20].	41
Figura 34. Circuito Buck-Boost para V2G [21].	41
Figura 35. Comparativa DHB condicional y DHB con inductor adaptativo [22].	42
Figura 36. Esquema de simulación del convertidor Boost con aceleración positiva.	45
Figura 37. Esquema de simulación del convertidor Boost con frenado regenerativo.	45
Figura 38. Simulación de las señales de modulación.	46
Figura 39. Simulación de la tensión del bus.	46
Figura 40. Simulación de la tensión media del bus.	46
Figura 41. Simulación de la tensión de la batería.	47
Figura 42. Simulación de la corriente de la inductancia en aceleración positiva.	47
Figura 43. Simulación de la corriente de la inductancia en frenado regenerativo.	47
Figura 44. Esquemático del convertidor Buck-Boost [23].	48
Figura 45. Esquemático del convertidor Buck-Boost trabajando en Buck.	51
Figura 46. Esquemático del convertidor Buck-Boost trabajando en Boost.	51
Figura 47. Tensión de salida del convertidor Buck-Boost trabajando en modo Buck.	52

Figura 48. Corriente de salida del convertidor Buck-Boost trabajando en modo Buck.....	52
Figura 49. Tensión de la bobina del convertidor Buck-Boost trabajando en modo Buck.....	52
Figura 50. Corriente de la bobina del convertidor Buck-Boost trabajando en modo Buck.	53
Figura 51. Tensión de salida del convertidor Buck-Boost trabajando en modo Boost.....	53
Figura 52. Corriente de salida del convertidor Buck-Boost trabajando en modo Boost.	53
Figura 53. Tensión de la inductancia del convertidor Buck-Boost trabajando en modo Boost.....	54
Figura 54. Esquemático del diseño del convertidor Cuk.	55
Figura 55. Esquemático del diseño del convertidor Cuk de izquierda a derecha.	57
Figura 56. Esquemático del diseño del convertidor Cuk de derecha a izquierda.	57
Figura 57. Tensión y corriente de salida del convertidor Cuk fluyendo la energía de izquierda a derecha.	58
Figura 58. Valor de la corriente de salida del convertidor Cuk fluyendo la energía de izquierda a derecha.	58
Figura 59. Valor de la tensión de salida del convertidor Cuk fluyendo la energía de izquierda a derecha.	58
Figura 60. Tensión y corriente de salida del convertidor Cuk fluyendo la energía de derecha a izquierda.	58
Figura 61. Valor de la tensión de salida del convertidor Cuk fluyendo la energía de derecha a izquierda.	59
Figura 62. Valor de la corriente de salida del convertidor Cuk fluyendo la energía de derecha a izquierda.	59
Figura 63. Rendimiento del convertidor Cuk.	59
Figura 64. Rendimiento máximo del convertidor Cuk.	59
Figura 65. Señales de conmutación modo Boost del convertidor DAB [28].	60
Figura 66. Señales de conmutación modo Buck del convertidor DAB [28].	60
Figura 67. Esquemático de la simulación del convertidor DAB.	62
Figura 68. Fuentes de pulso del convertidor DAB.	62
Figura 69. Tensiones alternas del convertidor DAB [28].	63
Figura 70. Tensiones alternas del convertidor DAB.	63
Figura 71. Señales de conmutación del convertidor DAB en LV.	63
Figura 72. Señales de conmutación del convertidor DAB en HV.	63
Figura 73. Tensión de salida del convertidor DAB.	64
Figura 74. Valor de la tensión de salida del convertidor DAB.	64

ÍNDICE DE ECUACIONES

(1) Ciclo de trabajo del convertidor Boost.....	43
(2) Obtención de la inductancia del convertidor Boost	43
(3) Obtención del condensador de salida del convertidor Boost.	43
(4) Tensión de la inductancia en Buck en el primer intervalo de tiempo del convertidor Buck-Boost.....	48
(5) Corriente de la inductancia en Buck en el primer intervalo de tiempo del convertidor Buck-Boost.....	48
(6) Tensión de la inductancia en Buck en el segundo intervalo de tiempo y en Boost en el primer intervalo de tiempo del convertidor Buck-Boost.....	48
(7) Corriente de la inductancia en Boost en el segundo intervalo de tiempo del convertidor Buck-Boost.....	48
(8) Función de transferencia del convertidor Buck-Boost.....	48
(9) Corriente de la inductancia en Buck en el primer intervalo de tiempo del convertidor Buck-Boost.....	49
(10) Tensión de la inductancia en Boost en el segundo intervalo de tiempo del convertidor Buck-Boost.....	49
(11) Corriente de la inductancia en Buck en el segundo intervalo de tiempo del convertidor Buck-Boost.....	49
(12) Tensión de salida del convertidor Cuk.....	56
(13) Ciclo de trabajo del convertidor Cuk.....	56
(14) Inductancia 1 del convertidor Cuk.....	57
(15) Inductancia 2 del convertidor Cuk.....	57
(16) Condensador 2 del convertidor Cuk.....	57
(17) Condensador 1 del convertidor Cuk.....	57
(18) Potencia del convertidor DAB.....	62
(19) Cambio de fase del convertidor DAB.....	62
(20) Condensador del convertidor DAB.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Síntesis de los convertidores bidireccionales sin aislamiento.	17
Tabla 2. Síntesis de los convertidores bidireccionales con aislamiento.	22
Tabla 3. Síntesis de las topologías de convertidores DC-DC bidireccionales aisladas para HESS de VE.	31
Tabla 4. Síntesis de las topologías de convertidores DC-DC bidireccionales no aisladas para HESS de VE.	33
Tabla 5. Datos generales Boost	43
Tabla 6. Datos generales del convertidor Boost [23].	44
Tabla 7. Datos del convertidor en modo Buck [26]	49
Tabla 8. Datos del convertidor en modo Boost [26].....	50
Tabla 9. Datos generales del convertidor Cuk.	55
Tabla 10. Datos del convertidor Cuk [27].	56
Tabla 11. Datos del convertidor DAB [28]	61
Tabla 12. Rendimientos de los convertidores simulados.	66

DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

En este apartado que se expone, se recogen las definiciones de términos y abreviaturas que se utilizan en la Memoria del proyecto. Se enumeran por orden alfabético acompañadas del término al que se refiere.

DAB *Dual Active-Bridge* (Puente activo dual)

DC *Direct Current* *Corriente Continua* (Corriente continua)

DHB *Dual Half Bridge* (Puente medio dual)

EMI *ElectroMagnetic Interference* (Interferencias electromagnéticas)

FC *Fuel Cell* (Pila de combustible)

HESS *Hibrid Energy Storage System* (Sistema híbrido de almacenamiento de energía)

IoT *Internet of Everything* (Internet de las cosas)

PWM *Pulse-Width Modulation* (Modulación por ancho de pulso)

SC *Switched-Capacitor* (Supercondensador)

SOC *State of Charge* (Estado de carga)

SST *Solid-State Transformer* (Transformadores de estado sólido)

TAB *Triple-Active Bridge* (Triple Puente activo)

V2G *Vehicle to grid* (Del vehículo a la red)

VE *Vehículos Eléctricos*.

ZCS *Zero Current Switching* (Conmutación a corriente cero)

ZVS *Zero Voltage Switching* (Conmutación a tensión cero)

CCM *Continuous Conduction Mode* (Modo de conducción continuo)

LV *Low Voltage* (Baja tensión)

HV *High Voltage* (Alta tensión)

DOCUMENTO 1.

MEMORIA

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	11
1.1	OBJETIVOS	11
2	CONVERTIDORES DC-DC BIDIRECCIONALES	12
2.1	TOPOLOGÍAS	12
2.1.1	CONVERTIDORES BIDIRECCIONALES SIN AISLAMIENTO	13
2.1.2	CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL CON AISLAMIENTO	17
3	SISTEMA HÍBRIDO DE ALMACENAMIENTO	24
3.1	SUPERCONDENSADORES Y BATERÍAS	24
3.2	APLICACIONES	24
3.2.1	VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	25
3.2.2	FRENADO REGENERATIVO	34
3.2.3	ENERGÍAS RENOVABLES	37
4	TRANSFORMADORES DE ESTADO SOLIDO	39
4.1	INTRODUCCIÓN	39
4.2	TOPOLOGÍAS DE CONVERTIDORES UTILIZADAS	40
5	SIMULACIONES	43
5.1	BOOST	43
5.1.1	DISEÑO DEL CONVERTIDOR	43
5.1.1	SIMULACIÓN	45
5.2	BUCK – BOOST	48
5.2.1	DISEÑO DEL CONVERTIDOR	48
5.2.2	SIMULACIÓN	51
5.3	CUK	54
5.3.1	DISEÑO DEL CONVERTIDOR	54
5.3.2	SIMULACIÓN	58
5.4	DAB	60
5.4.1	DISEÑO DEL CONVERTIDOR	60
5.4.2	SIMULACIÓN	62
6.	CONCLUSIONES	65

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, con la necesidad de ahorro energético y al agotamiento de los combustibles fósiles debido a la creciente demanda de energía, se ha impulsado la búsqueda de alternativas de generación de energía renovable. La electrónica de potencia es una parte esencial en este aspecto debido a que proporciona las herramientas necesarias para poder aprovechar nuevos esquemas de generación de energía. El carácter intermitente de la mayoría de las fuentes de energía no permite disponer de energía de forma continua, por lo que, mediante el uso de dispositivos de almacenamiento, se podrá disponer de energía almacenada, para suministrarla a los consumidores en momentos de mayor demanda.

El estudio de los convertidores de potencia DC-DC bidireccionales se ha convertido en un importante campo de investigación en la electrónica de potencia actual. Desde el punto de vista de la topología, estos convertidores se dividen en dos categorías principales; - configuraciones aisladas y no aisladas. Estos últimos, se benefician de una configuración más sencilla y no tienen las desventajas del aislamiento galvánico, como las interferencias magnéticas o el elevado peso. En cambio, con las topologías aisladas se consigue aislar la etapa de entrada de la salida, siendo muy beneficioso para alimentar cargas sensibles que son vulnerables a los fallos y al ruido. Por ello son una gran opción para ciertas aplicaciones que se desarrollan en el presente trabajo.

Ejemplos de algunas de sus aplicaciones son los sistemas de almacenamiento de energía (baterías y supercondensadores), los vehículos eléctricos, el frenado regenerativo de motores y los sistemas de energías renovables.

1.1 OBJETIVOS

Los principales objetivos de este trabajo son:

- Realizar un estudio sobre las diferentes topologías de convertidores DC-DC bidireccionales.
- Analizar la utilización de estos convertidores para sistemas híbridos de almacenamiento.
- Comentar las diferentes aplicaciones de las topologías.
- Modelar y simular para verificar el funcionamiento de los convertidores.

2 CONVERTIDORES DC-DC BIDIRECCIONALES

En este capítulo se presentan los principales convertidores DC-DC bidireccionales utilizados para las aplicaciones que se desarrollan en este trabajo.

2.1 TOPOLOGÍAS

Un convertidor bidireccional permite transferir energía en ambas direcciones, efectuando un cambio de sentido en la corriente, mientras que su tensión de entrada y salida es constante. Los convertidores DC-DC bidireccionales pueden clasificarse en dos grandes grupos generales de configuraciones: topologías aisladas y no aisladas.

La estructura general de estos convertidores se representa en la Figura 1. El sistema de control se utiliza para regular la tensión o la corriente del sistema.

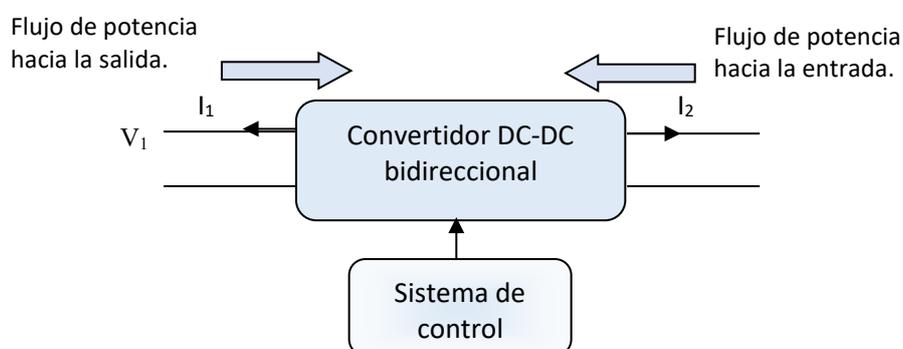


Figura 1. Estructura general de un convertidor DC-DC bidireccional.

Generalmente, casi cualquier convertidor puede ser capaz de transferir energía en ambos sentidos. Para ello, será necesario cambiar los diodos rectificadores del convertidor por transistores MOSFETs controlados, y así se consigue un flujo de corriente en ambas direcciones.

En el esquema mostrado en la Figura 2 se muestra un resumen de los diferentes convertidores DC-DC bidireccionales según su topología. Estos, se desarrollarán más adelante junto con sus aplicaciones para los sistemas de almacenamiento eléctrico, vehículos eléctricos o frenado regenerativo de motores.

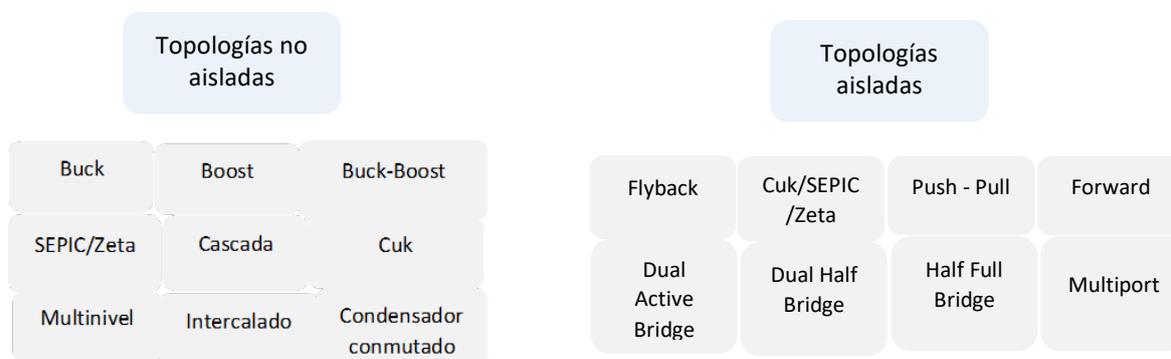


Figura 2. Clasificación de los convertidores DC-DC bidireccionales según su topología.

2.1.1 CONVERTIDORES BIDIRECCIONALES SIN AISLAMIENTO

Las topologías no aisladas no utilizan transformador y transfieren la potencia sin aislamiento galvánico, lo que hace que carezcan de ventajas como una elevada relación de ganancia de tensión de paso. Sin embargo, se benefician de una configuración más sencilla, y no sufren de desventajas de emplear núcleos magnéticos, como las interferencias magnéticas o el elevado peso. Estas características los hacen adecuados cuando el tamaño y el peso son requerimientos importantes para aplicaciones concretas, y existe una única referencia en el convertidor.

En la Figura 2, se presentan algunas configuraciones no aisladas basadas en los convertidores DC-DC básicos como: Buck, Boost, etc. También se muestran otras que se diseñan esencialmente en base a las técnicas de refuerzo de tensión, como el convertidor multinivel, el intercalado, etc.

Convertidor DC-DC bidireccional Buck y Boost

Esta topología bidireccional, que se representa en la Figura 3, se realiza mediante la combinación del convertidor Buck y Boost unidireccional. Esto significa que los interruptores de potencia bidireccionales sustituyen a los interruptores unidireccionales del convertidor Buck y Boost tradicionales. Este convertidor funciona como Boost desde la tensión V_L hasta la V_H , mientras que cuando opera en la dirección inversa se comporta como un convertidor Buck.

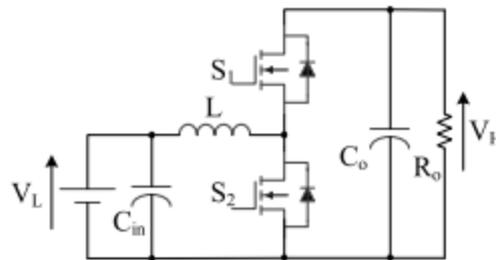


Figura 3. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado Buck y Boost [1].

Convertidor DC-DC bidireccional Buck-Boost

En este caso, además de la característica del convertidor Buck-Boost tradicional, es decir, la capacidad de aumentar o reducir el nivel de tensión, el convertidor Buck-Boost bidireccional se beneficia de la capacidad de proporcionar esta característica en ambas direcciones del flujo de potencia con una tensión de salida negativa. En la Figura 4 se muestra su topología.

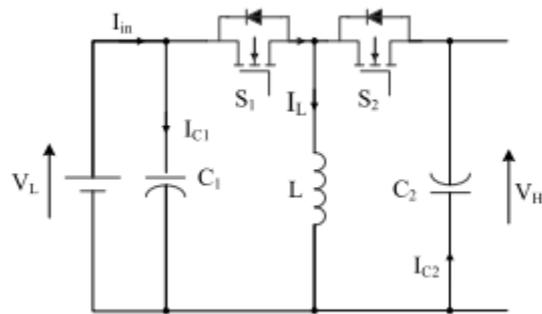


Figura 4. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado Buck-Boost [1].

Convertidor DC-DC bidireccional Cuk

El convertidor Cuk tiene como principales ventajas la continuidad de la corriente de entrada y la corriente de salida. Se logra la bidireccionalidad mediante la sustitución de dos interruptores de potencia bidireccionales, como se puede observar en la figura 5, por el interruptor de potencia y el diodo del circuito original. Al igual que en el convertidor unidireccional, el convertidor Cuk se utiliza para eliminar las ondulaciones de la corriente de entrada y salida.

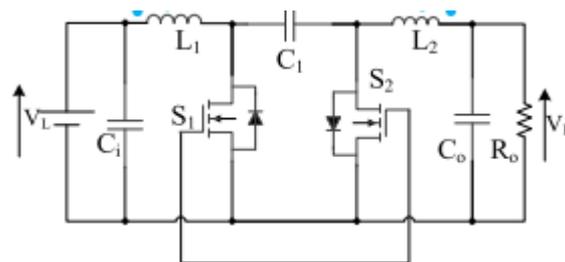


Figura 5. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado Cuk [1].

Convertidor DC-DC bidireccional SEPIC - Zeta

Este tipo de convertidor se realiza mediante la reordenación de los elementos del convertidor Cuk para obtener una tensión de salida positiva. Esta topología actúa como un convertidor SEPIC cuando la potencia fluye de los terminales V_L hacia V_H , y como Zeta cuando fluye a la inversa. Como se puede observar en la Figura 6, el circuito consta de una rama auxiliar, esta sirve para que la potencia fluya directamente entre la entrada y la salida y así reducir las ondulaciones de la corriente.

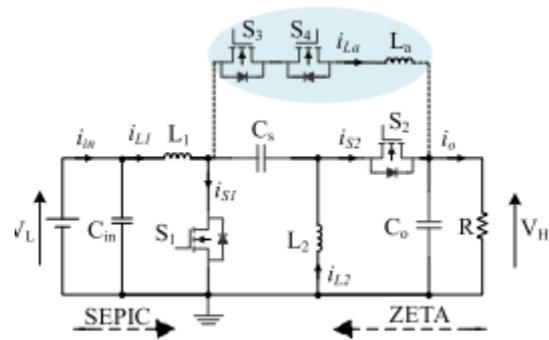


Figura 6. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado SEPIC-Zeta [1].

Convertidor DC-DC bidireccional en cascada

Mediante la conexión en cascada de dos convertidores bidireccionales Buck-Boost se consigue este tipo de topología, aumentándose así la capacidad de manejar mayores niveles de tensión y reduciéndose nivel de corriente en los dispositivos. Este tipo de configuración, que se muestra en la Figura 7, tiene como principal ventaja una mayor relación de ganancia de tensión con el mismo ciclo de trabajo del interruptor del Buck-Boost. Logra funcionar con potencias muy elevadas debido a que se consiguen reducir las ondulaciones de corriente y la tensión de corriente del inductor, interruptores, condensadores y diodos.

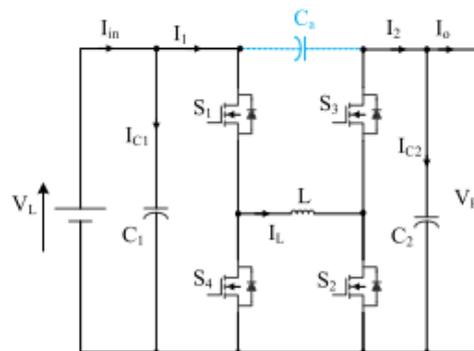


Figura 7. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado en cascada [1].

Convertidor DC-DC bidireccional con condensador conmutado

Con esta topología se mejora la capacidad de refuerzo de tensión del convertidor. La Figura 8 muestra un convertidor bidireccional que utiliza una célula SC (*Switched-Capacitor*) para mejorar la relación de conversión de la tensión. En este caso no hay inductor, y, por tanto, se evita la utilización magnética y el elevado peso impuesto debido al inductor. Aunque no se utilice, el convertidor puede poseer una corriente continua de entada conectando en paralelo dos cadenas similares de células y haciéndolas funcionar en anti-fase.

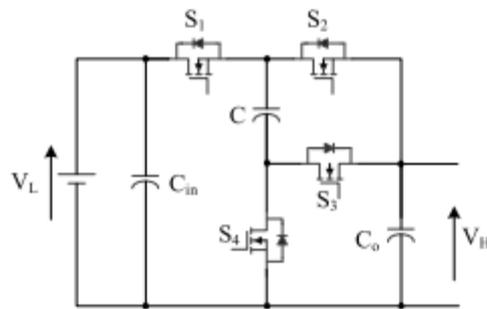


Figura 8. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado con condensador conmutado [1].

Convertidor DC-DC bidireccional intercalado

Con la técnica de intercalado se consigue disminuir la ondulación de la corriente de la frecuencia de conmutación, lo que conduce a un filtro EMI (Filtro de interferencia electromagnética) más pequeño. Como se comentará más adelante, esta topología ha sido usada en aplicaciones de automoción, demostrándose que puede reducir significativamente el tamaño del filtro y dar una mejor respuesta dinámica. En la Figura 9, se muestra un esquema de esta topología.

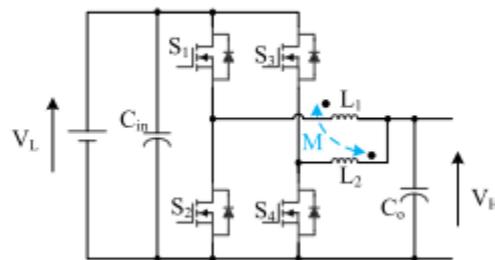


Figura 9. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado intercalado [1].

Convertidor DC-DC bidireccional multinivel

Como se puede observar en la Figura 10, se utiliza un módulo de conmutación como patrón de repetición en cada nivel, lo que proporciona una alta ganancia de tensión, y un menor esfuerzo en los dispositivos de potencia. Este tipo de convertidor tampoco consta de inductor, por lo que el peso y el tamaño son considerablemente menores que los que utilizan elementos magnéticos.

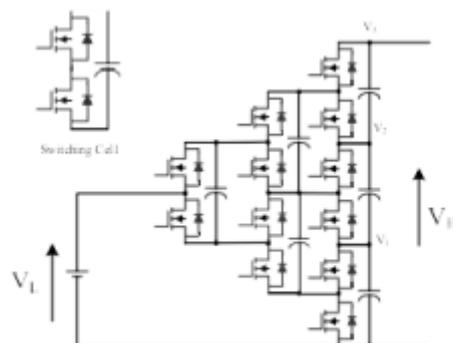


Figura 10. Convertidor DC-DC bidireccional no aislado multinivel [1].

Una vez se han introducido algunas de las topologías de convertidores bidireccionales sin aislamiento más empleadas, se presenta una síntesis de las características y aplicaciones de cada una de ellas, en la Tabla 1. Sin embargo, se explicarán posteriormente las aplicaciones más propicias para este trabajo.

Tabla 1. Síntesis de los convertidores bidireccionales sin aislamiento.

TOPOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS	APLICACIONES
Buck y Boost	- Menor número de elementos.	- Sistemas fotovoltaicos. - Sistema de alimentación interrumpida.
Buck – Boost	- Tensión de salida negativa. - Capacidad de aumentar o disminuir el voltaje.	- Vehículos eléctricos.
Cuk	- Corriente de entrada y salida continua. - Eliminación de las ondulaciones de la corriente de entrada con inductores.	- Sistemas de almacenamiento con baterías.
SEPIC/Zeta	- Tensión de salida positiva. - Eliminación de las ondulaciones con el uso de una rama auxiliar.	- Sistemas de energía distribuida.
Cascada	- Alta ganancia de tensión. - Menor tensión de corriente.	- Vehículos eléctricos. - Red inteligente.
Condensador conmutado	- Menor tamaño y peso debido a la no presencia de inductor. - Corriente de entrada continua.	- Recursos energéticos distribuidos.
Intercalado	- Se requiere de un filtro EMI menor. - Disminución de las ondulaciones de la corriente de la frecuencia de conmutación.	- Aplicaciones que requieran alta potencia.
Multinivel	- Menor tamaño y peso debido a la no presencia de inductor. - Auto equilibrio de la tensión.	- Sistemas automovilísticos (arquitectura de doble voltaje).

2.1.2 CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL CON AISLAMIENTO

Mediante la utilización de aislamiento galvánico se logran aislar etapas del convertidor, evitando posibles problemas con las referencias de los convertidores, además, se puede conseguir un aumento de la ganancia añadiendo un grado de libertad adicional en el diseño del convertidor, convirtiéndose así en una topología idónea para aplicaciones que requieran amplios intervalos de tensión de entrada y regulación en la carga.

Los convertidores DC-DC con aislamiento se utilizan habitualmente en los cargadores de baterías de los vehículos eléctricos (VE). Estos convertidores se interconectan entre un enlace de tensión de corriente continua, que suele ser la salida de una etapa de corrección del factor de potencia, y una

unidad de almacenamiento de energía. Por ejemplo, el convertidor Dual Active Bridge puede alcanzar una alta densidad de potencia, una alta eficiencia energética y un amplio rango de ganancia. Por lo tanto, tiene un gran potencial para utilizarse como convertidores DC-DC para sistemas de carga bidireccional de vehículos eléctricos.

En la Figura 2 se muestra un esquema de las principales topologías de los convertidores bidireccionales con aislamiento.

Convertidor DC-DC bidireccional Flyback

El convertidor Flyback se forma sustituyendo el inductor del convertidor Buck-Boost por un transformador. Sin embargo, será necesario un snubber para evitar las sobretensiones en la conmutación de ON a OFF. Las aplicaciones de este convertidor varían dependiendo de las potencias y tensiones, llegando a ser utilizados desde cargadores de baterías a circuitos para control de motores.

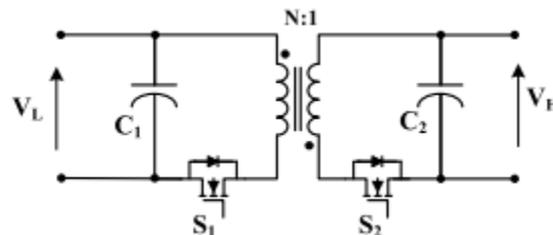


Figura 11. Convertidor DC-DC bidireccional aislado Flyback [1].

Convertidor DC-DC bidireccional Cuk y SEPIC/Zeta

A partir del convertidor Cuk bidireccional no aislado, se realiza un convertidor Cuk aislado para así contar con las ventajas del aislamiento magnético en la versión original. El nuevo convertidor posee una corriente continua de entrada y de salida y proporciona una alta relación de ganancia de tensión que incorpora la relación de giro del transformador. También, al introducir una bobina de entrada y salida, se consigue reducir el rizado de la corriente de estas, lo cual, es muy beneficioso para, por ejemplo, sistemas de energías renovables. La misma técnica se utiliza en los convertidores bidireccionales SEPIC/Zeta.

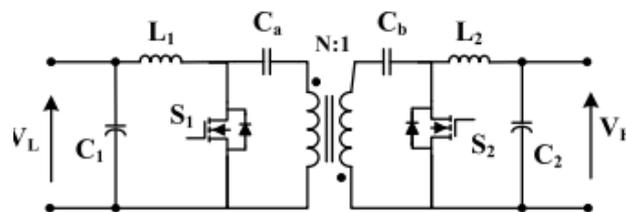


Figura 12. Convertidor DC-DC bidireccional aislado Cuk [1].

Convertidor DC-DC bidireccional Push-Pull

Al igual que en los convertidores Push-Pull unidireccionales, esta topología utiliza un transformador multibobinado para controlar la potencia. En el caso de que se requiera este convertidor para aplicaciones de alta potencia, se utilizaría un convertidor Push-Pull bidireccional trifásico. Esto significa

que utiliza un transformador trifásico de alta frecuencia que proporciona aislamiento entre la fuente de alimentación y la carga.

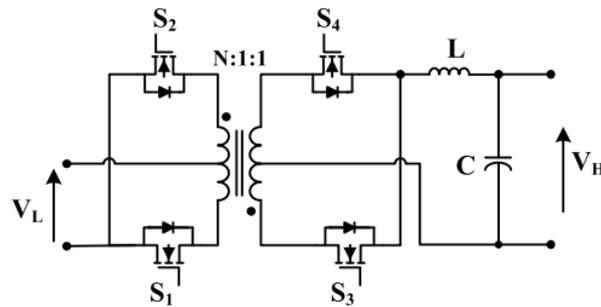


Figura 13. Convertidor DC-DC bidireccional aislado Push-Pull [1].

Convertidor DC-DC bidireccional Forward

En este caso, tal como se muestra en la Figura 14, se puede utilizar un circuito de sujeción para conseguir una conmutación a tensión cero (ZVS, *Zero Voltage Switching*) en el convertidor. Además, se puede utilizar la inductancia de fuga del transformador como inductor resonante para así conseguir la versión resonante del convertidor. Con esto, el convertidor puede conmutar a frecuencias más elevadas en comparación con otras topologías de convertidores, pudiendo por consiguiente reducir el volumen de los componentes pasivos.

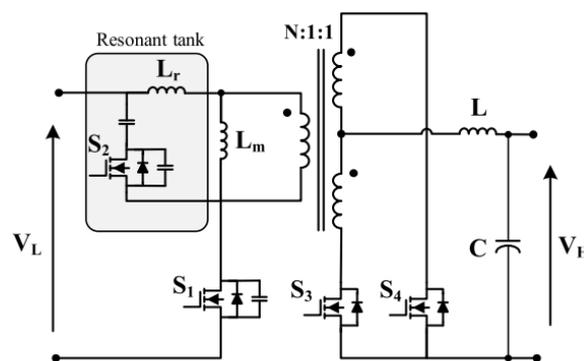


Figura 14. Convertidor DC-DC bidireccional aislado Forward [1].

Convertidor DC-DC bidireccional Dual-Active Bridge (DAB)

La Figura 15 muestra la topología básica del convertidor DAB, que utiliza dos topologías de puente completo en ambos lados del transformador. La transmisión de potencia de los convertidores bidireccionales es proporcional al número de interruptores, por tanto, tener ocho interruptores de potencia junto con el aislamiento galvánico, hace a este convertidor idóneo para aplicaciones de alta potencia con una relación de ganancia de tensión elevada, como en los sistemas de automoción. La transferencia de energía de este convertidor, se controla ajustando el desplazamiento de fase entre las formas de onda de tensión alterna de los devanados primario/secundario del transformador.

Sin embargo, una de las desventajas es, que puede haber pérdidas debido a la cantidad de interruptores. Esto se puede solucionar utilizando interruptores de potencia de carburo de silicio (SiC) o de nitruro de galio (GaN) de bajas pérdidas.

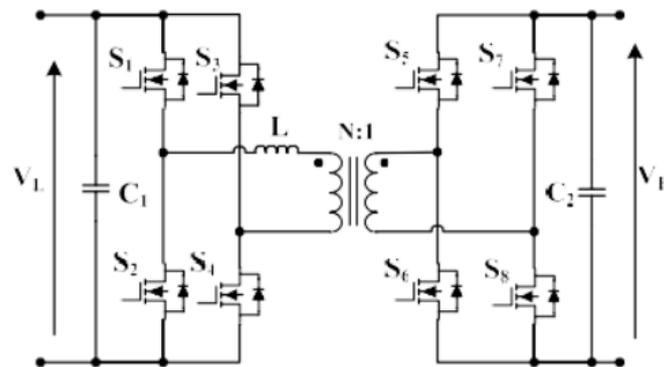


Figura 15. Convertidor DC-DC bidireccional aislado DAB [1].

Según las diferentes configuraciones de los lados primario y secundario del transformador, los convertidores DAB pueden clasificarse en tipos resonantes y no resonantes. En los DAB de tipo resonante, el transformador está conectado en serie con un circuito resonante, que tiene buenas características de conmutación suave. Esta topología está en auge debido a sus ventajas en la reducción de las pérdidas de conmutación.

La estructura del resonador puede formarse como se muestra en la Figura 16. En (a) el resonante está formado por un inductor y un condensador en serie, suprimiendo así la polarización en DC. Añadiendo el inductor magnetizador al circuito LC se construye una estructura LLC, la cual tiene dos métodos de control: modulación de frecuencia y PWM, como se muestra en la Figura 16 (b). la estructura LLC puede suprimir los armónicos de corriente, mejorar la frecuencia de funcionamiento y reducir la corriente de apagado de los interruptores. En los convertidores DAB no resonantes, el transformador tiene solo un inductor en serie. En general, los convertidores DAB se refieren a los convertidores DAB no resonantes.

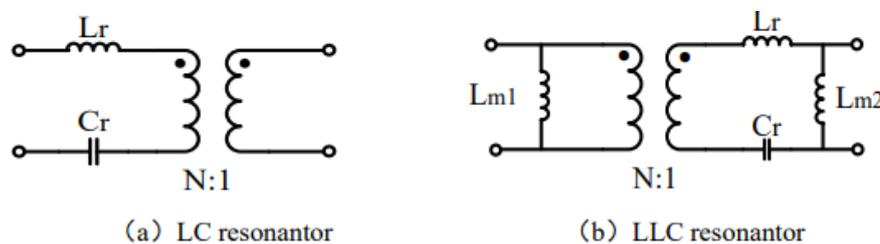


Figura 16. Estructuras del resonador [4].

El funcionamiento de esta topología consta de un lado de baja tensión (*Low Voltage, LV*) hacia un lado de alta tensión (*High Voltage, HV*), siendo la conversión DC-AC-AC-DC, permitiendo la transferencia de energía a través de un transformador de alta frecuencia. Este transformador, puede integrar diferentes niveles de tensión con respecto a la relación de sus espiras. Puede trabajar tanto en modo convertidor Boost, como Buck.

En su funcionamiento en el modo Boost, al principio sólo se activan dos interruptores del HV y otros dos del LV, siendo estos activados de forma diagonal en cada rama. Al no activarse dos interruptores de la parte superior o inferior a la vez se evita que la carga no tenga potencial. Al activarse, la tensión del inductor se iguala a la fuente de entrada del LV, aumentando su corriente proporcionalmente. Al mismo tiempo, almacena energía para luego ser transferida al siguiente ciclo. La energía que se ha transferido del ciclo anterior se almacena en el HV ya que tiene un condensador paralelo.

A partir de la Figura 15, cuando S1 y S4 están activados y S2 y S3 apagados, la tensión será igual a la fuente más la previa que había sido almacenada en la inductancia y la relación de espiras del transformador de alta frecuencia, siendo más tarde modificada por el HV.

En cambio, en el modo Buck hay dos intervalos: uno cuando los interruptores sean activados diagonalmente, y otro cuando los otros dos restantes sean apagados. En el instante de que S5 y S8 se activen al mismo tiempo, se transferirá potencia desde HV hasta LV, aumentando la inductancia la corriente de manera proporcional a la salida de HV a LV.

La inductancia L, es necesaria para conseguir el apagado suave de los interruptores, una vez se haya aplicado el pulso y no de forma inmediata. Además, en este instante, el HV se alimentará por la energía almacenada en la inductancia, disminuyendo así la corriente de esta de manera proporcional a la tensión de salida.

Convertidor DC-DC bidireccional Dual Half Bridge (DHB)

En comparación con el DAB, esta topología es útil cuando el convertidor se aplica en aplicaciones de menor potencia, reduciéndose el número de interruptores de ocho a cuatro. La Figura 17 muestra un convertidor aislado bidireccional que utiliza esta topología alimentada por tensión en ambos lados del transformador.

El convertidor DHB tiene otra variante, la cual utiliza una topología alimentada por tensión en el lado del primario, y otra alimentada por corriente en el lado del secundario. Esta última permitirá la forma de onda de corriente continua que puede ser deseada en ciertas aplicaciones.

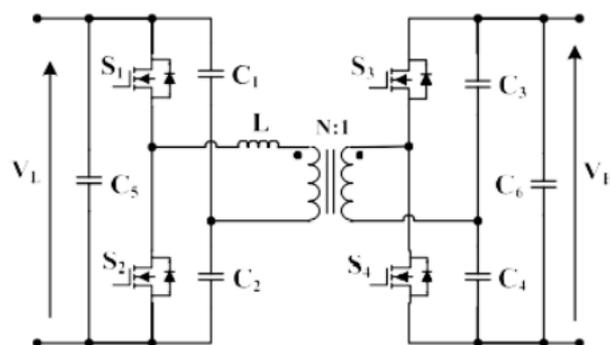


Figura 17. Convertidor DC-DC bidireccional aislado Dual Half Bridge [1].

Convertidor DC-DC bidireccional Half-Full Bridge

Este convertidor utiliza una topología de medio puente alimentado por tensión en el primario, y una topología de puente completo alimentado por tensión en el lado secundario del transformador, tal como se muestra en la Figura 18. Al tener un menor número de interruptores, permite unos requisitos de control más sencillos que el DAB. En concreto, es adecuada para integrar un convertidor Buck-Boost de dos interruptores en el lado del medio puente.

Hay otras variantes para esta configuración, como el convertidor DC-DC bidireccional de medio puente completo que se ha combinado con redes de impedancia para lograr un mejor rendimiento.

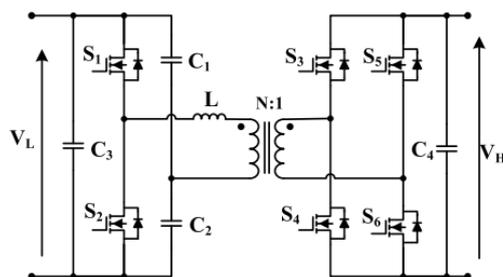


Figura 18. Convertidor DC-DC bidireccional aislado Half-Full Bridge [1].

Convertidor DC-DC bidireccional multipuerto

Los convertidores multientrada son una gran opción en caso de integrar múltiples fuentes de tensión de entrada en sistemas de energía renovable y vehículos eléctricos híbridos. En [1] se ha propuesto un convertidor DC-DC bidireccional aislado de múltiples entradas basado en DAB que utiliza un transformador de bobinado múltiple junto con la gestión del flujo de potencia desacoplado, tal como se muestra en la Figura 19.

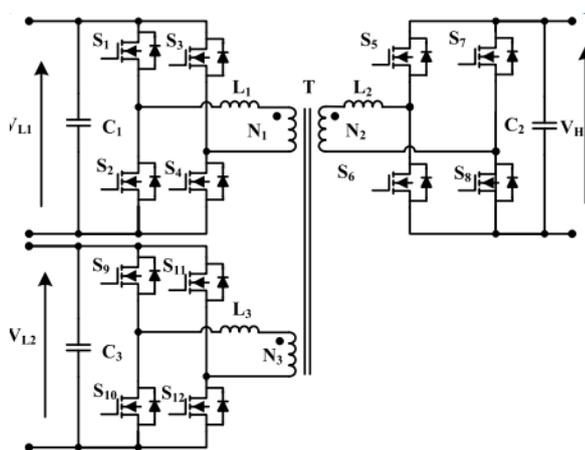


Figura 19. Convertidor DC-DC bidireccional aislado multipuerto [1].

Una vez se han introducido todas topologías de los convertidores bidireccionales con aislamiento más empleadas, se presenta, en la Tabla 2, una comparación de las características y aplicaciones de cada una de ellas.

Tabla 2. Síntesis de los convertidores bidireccionales con aislamiento.

TOPOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS	APLICACIONES
Flyback	- Menor número de elementos.	- Sistemas fotovoltaicos.

		- Sistema de alimentación interrumpida.
Cuk	- Tensión de salida negativa. - Capacidad de aumentar o disminuir el voltaje.	- Vehículos eléctricos.
Push-Pull	- Corriente de entrada y salida continua. - Eliminación de las ondulaciones de la corriente de entrada con inductores.	- Sistemas de almacenamiento con baterías.
Forward	- Tensión de salida positiva. - Eliminación de las ondulaciones con el uso de una rama auxiliar.	- Sistemas de energía distribuida.
DAB	- Alta ganancia de tensión. - Menor tensión de corriente.	- Vehículos eléctricos. - Red inteligente.
Dual Half-Bridge	- Menor tamaño y peso debido a la no presencia de inductor. - Corriente de entrada continua.	- Recursos energéticos distribuidos.
Half-Full Bridge	- Se requiere de un filtro EMI menor. - Disminución las ondulaciones de la corriente de la frecuencia de conmutación.	- Aplicaciones que requieran alta potencia.
Multipuerto	- Menor tamaño y peso debido a la no presencia de inductor. - Auto equilibrio de la tensión.	- Sistemas automovilísticos (arquitectura de doble voltaje).

3 SISTEMA HÍBRIDO DE ALMACENAMIENTO

El sistema de almacenamiento de energía (*HESS, Hybrid Energy Storage System*) es un sistema híbrido que combina las ventajas de alta velocidad de descarga y robustez de los supercondensadores con la alta densidad de almacenamiento energético de las baterías. Aunque el HESS puede utilizar varios tipos de almacenamiento electroquímico como complemento a los supercondensadores (SC), se utilizan mayormente las baterías de iones de litio (Li-ion).

3.1 SUPERCONDENSADORES Y BATERÍAS

La principal ventaja de los supercondensadores (condensadores de doble capa) es que tienen un rendimiento cercano al 95% y permiten una alta velocidad de ciclos de carga y descarga. Son muy utilizados en aplicaciones donde se requiera una estabilización de la frecuencia debido a su alta potencia. Además, son adecuados para altas temperaturas y no se ven perjudicados cuando ocurran sobrecargas. Sin embargo, en contraste a estas ventajas, los supercondensadores tienen una baja densidad energética y presentan un alto coste, por lo que no son útiles cuando se requieren grandes periodos de tiempo de almacenamiento.

En cambio, las baterías de Li-ion son baterías recargables donde los electrones negativos de los iones de litio se mueven a los electrones positivos durante la descarga, realizando el trayecto inverso durante la carga. Como ventajas, caben destacar su alta densidad energética (del orden de 400 Wh/l), lo que las hace un complemento idóneo para con los supercondensadores, y su rendimiento. El principal inconveniente de estas baterías es su alta degradación con altas temperaturas y sobrecargas, lo cual es bastante perjudicial para su vida útil.

A la hora de comparar las vidas útiles de los dos componentes, las de los supercondensadores son muy superiores a las de las baterías Li-ion, superando estas los 80.000 ciclos de carga/descarga. Con el HESS se pueden derivar operaciones de carga/descargas frecuentes hacia los supercondensadores favoreciendo así a la vida útil de las baterías. Sin embargo, para que esto suceda, estas operaciones no deben comprender elevadas energías, aunque sí podrían elevadas potencias. Como se ha mencionado anteriormente, otro de los inconvenientes de las baterías, es que se ven afectadas ante las altas temperaturas. Esta desventaja, se equilibra con la utilización de los supercondensadores, ya que permiten un margen de temperaturas mayor, por lo que la exposición a estas temperaturas de las baterías será reducida.

3.2 APLICACIONES

En este apartado, se desarrollan las aplicaciones que en la actualidad más emplean los sistemas híbridos de almacenamiento y las topologías de convertidores detalladas anteriormente, para combatir la creciente demanda de energía y conseguir convertirse en tecnologías más renovables.

3.2.1 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Al actual ritmo de consumo, los recursos petrolíferos mundiales podrán agotarse en 50 años. Se estima que el número mundial de vehículos pasará de 700 millones a 2.500 millones en los próximos 50 años [2], por lo que, los métodos para mejorar el ahorro de combustible de los vehículos han ganado especial importancia.

El HESS ha sido ampliamente estudiado para su uso en vehículos eléctricos (VE) debido a que se prolonga la vida útil de las baterías, por lo que se reduce el coste del funcionamiento del vehículo al evitar la sustitución del paquete de baterías durante su vida útil. El ahorro de combustible y la autonomía eléctrica de los vehículos eléctricos dependen en gran medida del HESS del vehículo, que no solo se utiliza para almacenar grandes cantidades de energía, sino que también, debe ser capaz de liberarla rápidamente según las demandas de carga. En este caso, los dispositivos de almacenamiento de energía se cargan cuando la demanda de potencia es baja, y se descargan cuando es alta, actuando como catalizadores para proporcionar un impulso de energía.

Las características más importantes de los HESS para vehículos son la densidad de carga, la densidad de potencia, la vida útil, el coste y el mantenimiento. Actualmente, los HESS integrados en la actual generación de VE se basan principalmente en las baterías de iones de litio y los supercondensadores. Como ha sido detallado anteriormente, las baterías suelen tener una alta densidad de energía y almacenan la mayor parte de la energía eléctrica a bordo, proporcionando una gran resistencia a los vehículos. Por otro lado, los supercondensadores tienen altas densidades de energía y presentan un largo ciclo de vida con alta eficiencia, al mismo tiempo que tienen una rápida respuesta para la carga/descarga. La corta duración de las cargas/descargas de la batería durante las aceleración y desaceleraciones bruscas pueden evitarse utilizando supercondensadores. Estos dos componentes serán necesarios para que los VE sean comparables a los vehículos de combustible en lo que respecta a la aceleración transitoria rápida, la energía y la resistencia a larga distancia.

Se ha demostrado que la temperatura del entorno influye significativamente en la optimización del HESS, debido a que la resistencia de la batería y la tasa de degradación varían con la temperatura. Como se ha mencionado anteriormente, la degradación de la batería es especialmente grave en entornos de baja temperatura debido al recubrimiento de litio del electrodo negativo, lo que incrementa considerablemente el coste. La eficiencia del HESS depende del rendimiento del convertidor DC-DC. Con el desarrollo de la electrónica de potencia, la eficiencia media de estos convertidores es de casi el 95%. La densidad de energía del SC es relativamente baja, por lo tanto, la cantidad de reducción del coste de degradación de la batería determina directamente la cantidad de DC que debe adoptarse y la frecuencia de funcionamiento de este. Además, el coste de degradación de la batería es proporcional al precio de esta, es decir, al precio del paquete de baterías. Cabe destacar la notable reducción del precio de las baterías de litio en los últimos años, por lo que la temperatura y el coste de la batería deben tenerse en cuenta en la optimización del HESS. Además, el rendimiento de este debe examinarse para verificar su correcto funcionamiento en aplicaciones de VE en los próximos años.

La pila de combustible (Fuel Cell, FC) es otra fuente de energía limpia, sin embargo, su larga constante de tiempo limita su rendimiento en los vehículos. En la actualidad, ningún dispositivo de

almacenamiento de energía puede satisfacer todos los requisitos de los vehículos eléctricos. Varias investigaciones han concluido que con el HESS formado por supercondensadores y baterías se mejora significativamente la autonomía y el rendimiento de los VE. Dicho rendimiento depende fundamentalmente de cómo se controle el flujo de energía entre la batería de iones de litio y el paquete de supercondensadores.

Principio general de funcionamiento

El tiempo de media de vida de la batería antes de que se descargue es de unos 10.500 ciclos de vida, mientras que el SC tiene un tiempo de vida de 500.000 ciclos. La vida de la batería se reduce aún más debido a las altas corrientes que se requieren en el arranque de los vehículos y las corrientes producidas debido al frenado. Para evitar estas altas corrientes se pueden utilizar supercondensadores, pero debido a que se descargan rápidamente no pueden ser utilizados como dispositivos de almacenamiento.

El SC actúa como fuente primaria de energía cuando el vehículo arranca, y la batería se convertirá en fuente primaria durante el tiempo de funcionamiento. Debido a la alta densidad del SC, este puede proporcionar suficiente corriente al motor de arranque sin disminuir el estado de carga de la batería. Además, la energía restante puede utilizarse para cargar el bajo estado de carga (*State of Charge, SOC*) de la batería mientras el vehículo está en marcha. El SC se conecta a una batería de bajo SOC con un convertidor DC-DC. Los paquetes de batería fabricados para aplicaciones de automoción deben tener una configuración de 48V y 10 A, los cuales consisten en 13 series de baterías conectadas en paralelo con otras 13 y el sistema de monitorización que supervisa y controla el SOC.

En el HESS se utilizan tres tipos de configuraciones: activa, semiactiva y pasiva. La Figura 20 muestra la configuración pasiva del HESS. La ventaja de esta topología es que no necesita convertidores electrónicos. Debido a que la tensión del bus DC está estabilizada por la batería, la energía almacenada por el SC no se puede utilizar suficientemente.

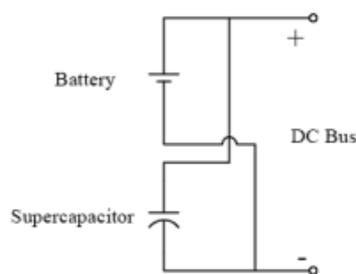


Figura 20. Topología pasiva del HESS [3].

En la topología semiactiva de supercondensadores, mostrada en la Figura 21, la batería se conecta directamente al bus DC, mientras que el SC utiliza un convertidor DC/DC bidireccional para interconectar el bus de DC. Como resultado, la tensión de este es igual a la tensión de salida de la batería, por lo que no puede variar demasiado. La desventaja de esta topología es que se necesita un convertidor DC/DC de gran tamaño. En cambio, en la configuración semiactiva de la batería, mostrada en la Figura 22, el SC se conecta directamente al bus de DC, mientras que la batería se conecta al convertidor para interconectar el bus. La ventaja en este caso es que la corriente de la batería puede mantenerse en un valor casi constante, por lo que la vida útil y la eficiencia de la batería pueden

mejorarse significativamente. El principal inconveniente, es que el voltaje del bus de DC variará durante el proceso de carga/descarga del SC.

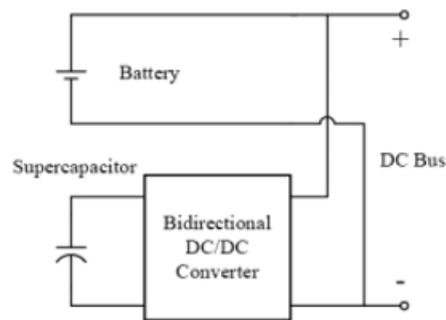


Figura 21. Topología semiactiva de SC del HESS [3].

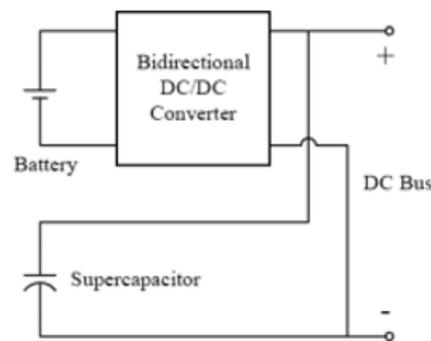


Figura 22. Topología semiactiva de batería del HESS [3].

La topología activa (Figura 23) es una opción óptima que puede resolver todos los problemas anteriores. Sin embargo, necesita de dos convertidores DC/DC, por lo que aumentará la complejidad, el coste y las pérdidas adicionales del sistema.

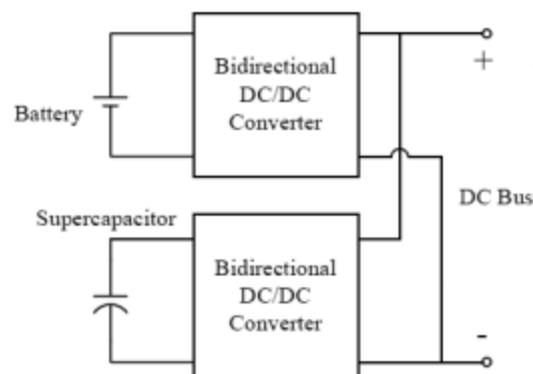


Figura 23. Topología activa del HESS [3].

Entre estas diversas topologías, la semiactiva con supercondensadores que utiliza baterías de litio como dispositivo de almacenamiento principal se considera una buena solución para los VE debido a su alta densidad de potencia y su bajo coste. La arquitectura de esta configuración se muestra en la Figura 24.

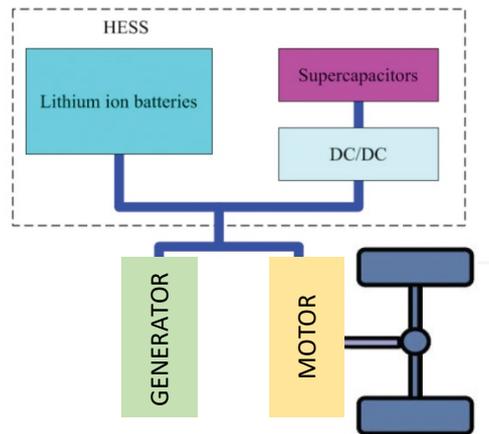


Figura 24. Arquitectura topología semiactiva de SC del HESS [3].

En este caso, los convertidores DC-DC bidireccionales se utilizan ampliamente para gestionar las direcciones del flujo de energía, ya sea desde la fuente hacia el lado de carga para la aceleración, o desde el lado de carga hacia las fuentes durante los periodos de desaceleración. Los SCs intercambian energía eléctrica con la línea de alta tensión a través del convertidor DC-DC bidireccional.

Los convertidores DC-DC bidireccionales aplicados a HESS de VE deben de reunir una serie de condiciones [4]:

- Amplio rango de conversión de tensión para garantizar que el voltaje de la batería o SC y el del bus del vehículo puedan ajustarse eficazmente cuando cambien las condiciones de trabajo.
- Teniendo en cuenta el espacio limitado del vehículo, el convertidor debe tener una alta densidad de potencia para ahorrar espacio de instalación.
- La entrada y salida del convertidor deben ser tierra común para evitar las interferencias electromagnéticas causadas por el pulso de tensión de alta frecuencia de modulación de anchura de pulso (*PWM*).
- La corriente del lado de la fuente de alimentación del convertidor debe ser continua para mejorar la durabilidad de la batería o del SC y así evitar los daños causados por ondulaciones de la corriente.
- Debe reducir las tensiones de los dispositivos tanto como sea posible para evitar la posibilidad de daños por altas tensiones. Hay que tener en cuenta que una tensión alta y una corriente elevada reducen la fiabilidad del sistema del convertidor.
- Debe tener una alta eficiencia de conversión para evitar el calentamiento y la disipación de energía causada por la pérdida en los dispositivos de potencia.

Cabe destacar, que la selección del convertidor también depende de las condiciones de conducción del vehículo, especialmente del tamaño del supercondensador.

A continuación, teniendo en cuenta las condiciones que deben de reunir los convertidores DC-DC bidireccionales para su aplicación en HESS de VE, se realiza una comparativa de los convertidores aislados y no aislados detallados en el Capítulo 2 del proyecto.

Topologías aisladas

En este tipo de topologías, el transformador de alta frecuencia puede garantizar el aislamiento galvánico de la entrada y de la salida para el HESS, que es capaz de ajustar el rango de conversión de tensión cambiando la relación de vueltas. Por lo tanto, las topologías DC-DC bidireccionales aisladas tienen una mayor relación de conversión de tensión, y pueden adaptarse a diferentes niveles de tensión para el HESS.

Los convertidores DC-DC aislados pueden dividirse en alimentados por tensión y alimentados por corriente según las diferentes fuentes de alimentación DC. Las principales diferencias son que los tipos de fuente DC y el convertidor alimentado por corriente necesitan añadir un inductor en el lado de la fuente de corriente de DC para suprimir el rizado de la corriente. Por lo tanto, este convertidor se utiliza menos en aplicaciones de vehículos. Además, la fuente de corriente puede sustituirse por una fuente de tensión y un inductor, por lo que los tipos de convertidores más usados en estos casos, y los explicados en este proyecto son únicamente del convertidor alimentado por tensión.

- **Flyback**

En la Figura 11 se muestra un convertidor Flyback bidireccional. La referencia [5] propuso un convertidor Flyback bidireccional que utiliza un transformador de alta frecuencia con excitación unidireccional. Se concluyó que los convertidores Flyback bidireccionales se utilizan en aplicaciones que requieren baja potencia debido a sus estructuras sencillas, su bajo número de dispositivos y su rápida respuesta dinámica. Dado que este tipo de topología tiene que lograr el aislamiento galvánico y almacenar energía simultáneamente, los interruptores tienen que soportar altas tensiones de tensión y corriente. Las pérdidas de conmutación son grandes y la eficiencia de conversión es baja. Estas razones, excluyen al convertidor DC-DC bidireccional Flyback como opción para el HESS de VE.

- **Push-Pull**

Del mismo modo, en [6] se analizó exhaustivamente el principio de funcionamiento, la capacidad de conversión y la realización de conmutación suave de 12 estados de funcionamiento del convertidor Push-Pull, que se muestra en la Figura 13. Además, debido a que esta topología tiene inductancia de fuga, se generará un gran pico de tensión. En este caso, el transformador tiene toma central, lo que aumenta la dificultad de diseño y reduce la fiabilidad del convertidor. Debido a esto, el convertidor DC-DC bidireccional Push-Pull no es una buena opción para el HESS de VE.

- **DAB**

En la Figura 15 se muestra el esquema del convertidor DAB. En este caso, la etapa intermedia del convertidor DAB no resonante es solo un inductor, que no solo puede realizar la transmisión bidireccional de energía, sino que tiene las ventajas de una baja tensión y un control flexible. El convertidor DAB DC-DC resonante, además de tener las ventajas del convertidor DAB, puede mejorar

la capacidad de conmutación suave y la eficiencia. Además, la estructura resonante puede seleccionarse según los diferentes requisitos de la aplicación. Sin embargo, con el aumento de los elementos resonantes, la complejidad del convertidor y la dificultad del diseño del controlador aumentan en consecuencia. Como conclusión, los convertidores bidireccionales de puente completo son adecuados para aplicaciones que requieran alto voltaje y potencia, es decir, son una buena opción para el HESS de los VE.

Estos convertidores pueden alcanzar una alta densidad de potencia, una alta eficiencia energética y un amplio rango de ganancia, y, por lo tanto, tienen aplicaciones potenciales como convertidores DC-DC para sistemas de carga bidireccional de VE.

- **Cuk**

En esta topología, cuyo esquema se muestra en la Figura 12, será necesario utilizar un circuito snubber activo para implementar la conmutación suave de todos los interruptores, así como para recuperar la energía almacenada de la inductancia de fuga. Será necesario recuperar dicha energía debido a que, con el aumento de tensión, es necesario utilizar un transformador, pero debido a su inductancia de fuga se pierde cierta energía en cada ciclo de conmutación. Este convertidor, es mucho más ventajoso que el DAB para aplicaciones de baja tensión y alta corriente. Esto es debido a que el convertidor Cuk tiene un solo interruptor tanto en el lado primario como en el secundario. Por lo que, para aplicaciones de alta corriente, en la que es necesaria la conexión en paralelo de los interruptores, el número de interruptores necesarios en el caso del convertidor DAB es enorme, y también lo será su coste.

- **Multipuerto**

En [10] se presentan diferentes estructuras de convertidores multipuerto para interconectar múltiples fuentes. Un ejemplo se muestra en la Figura 19. Estos convertidores se unen en el bus de DC y se controlan de forma independiente. Sin embargo, una desventaja de esta topología es que es inherentemente compleja y tiene un alto coste debido a las múltiples etapas de conversión. En esta estructura, tanto el enlace de DC como el acoplamiento magnético se combinan de forma que todo el sistema se trata como un único convertidor de potencia en el que se puede implementar un control centralizado con un número mínimo de etapas de conversión.

- **Triple puente activo completo (TAB)**

Esta topología se deriva de DAB. En [11] se ha desarrollado la estructura TAB resonante en serie, mostrada en la Figura 25, en la que la batería actúa como almacenamiento primario y el SC como almacenamiento transitorio. Los tres puertos consisten en un circuito de puente completo con cuatro interruptores. Se logra controlar el flujo de potencia entre los puertos mediante la resonancia en serie y el cambio de fase de las salidas de onda cuadrada de los tres puentes activos. Sin embargo, se obtienen como inconvenientes el rebasamiento de la tensión en el lado secundario debido al desajuste de la tensión entre la entrada y la salida de los puertos de entrada.

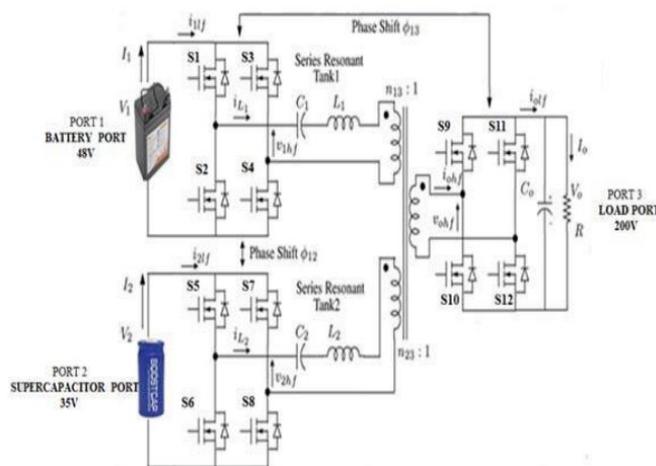


Figura 25. Topología TAB [11].

Una vez comentadas las topologías de convertidores DC-DC bidireccionales aislados más utilizados para aplicaciones de vehículos eléctricos, se hace una comparativa (Tabla 3), en la que se resumen sus ventajas y desventajas.

Tabla 3. Síntesis de las topologías de convertidores DC-DC bidireccionales aisladas para HESS de VE.

TOPOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS	APLICABLE PARA HESS
Flyback	<ul style="list-style-type: none"> - Estructura simple fácil de controlar. - Bajo número de elementos. - Gran pérdida de conmutación. 	No.
Push-Pull	<ul style="list-style-type: none"> - Para aplicaciones de baja potencia. 	
DAB	<ul style="list-style-type: none"> - Amplio rango de conversión de voltaje. - Baja tensión de los interruptores. - Estructura compleja difícil de controlar. - Alta densidad de potencia. - Gran volumen y coste. 	Si.
Cuk	<ul style="list-style-type: none"> - Un solo interruptor para el primario y secundario. - Requiere de un circuito snubber activo. - Para aplicaciones de baja tensión y alta corriente. 	Si.
Multipuerto	<ul style="list-style-type: none"> - Estructura muy compleja. - Alto coste. 	No es viable.
TAB	<ul style="list-style-type: none"> - Estructura muy compleja. 	No.

Topologías no aisladas

Teniendo en cuenta que los VE tienen altos requisitos para la tierra común de entrada y salida, y la ondulación de la corriente del lado de la fuente de alimentación de los convertidores DC-DC bidireccionales, hay pocas topologías que cumplan dichas características. En este caso, las topologías estudiadas serán las siguientes:

- **Topologías básicas DC-DC bidireccionales: Boost, Cuk y SEPIC**

Ejemplos de convertidores Boost, Cuk y SEPIC, se muestran en las Figuras 3, 7 y 6 respectivamente. Estas topologías tienen una estructura simple, un número bajo de dispositivos y un reducido coste. Sin embargo, cuando el convertidor básico funciona con un ciclo de trabajo extremo, los elementos parásitos reducirán significativamente la eficiencia de la conversión, limitando así el rango de conversión de la tensión. En los vehículos con baja tensión de salida de SC, estas topologías son difíciles de igualar eficazmente la tensión de SC y la tensión del bus del vehículo a la baja relación de conversión de tensión.

Con relación al convertidor Cuk, en [7] se realizó una comparativa entre este y el convertidor Boost para su aplicación en VE. Se comprobó que la salida del convertidor Boost contenía ondulaciones, mientras que la salida del convertidor Cuk presentaba una mejor salida. Por lo tanto, se concluyó que el convertidor Cuk es más eficiente que un Boost al funcionar en aplicaciones de VE.

- **Buck-Boost**

En la Figura 4 se muestra un esquema del convertidor Buck-Boost. Esta topología se escoge principalmente teniendo en cuenta que el voltaje del paquete de baterías puede ser mayor o menor que el paquete de SC, por lo que se utiliza un convertidor Boost o Buck para transferir energía entre ambos. Además, tiene pequeño volumen, peso ligero y alta eficiencia, formándose así un HESS compacto y eficiente. En [8] se hace un estudio de esta topología para su aplicación en HESS de VE y se consigue en el modo Buck un rendimiento máximo de casi el 91% a temperaturas de 85°C, mientras que en el modo Boost se consigue una eficiencia de casi el 98.1% a 85°C.

- **Cascada**

En la Figura 7 se muestra un ejemplo de convertidor en cascada. Las topologías DC-DC bidireccionales en cascada pueden obtenerse conectando en cascada dos o más topologías DC-DC bidireccionales según sea necesario. El método en cascada es una forma importante de construir convertidores DC-DC bidireccionales para HESS. Muchas topologías novedosas pueden considerarse como una estructura en cascada.

- **Intercalado**

En la Figura 9 se muestra un ejemplo de convertidores intercalados. Esta topología puede reducir significativamente la ondulación de la corriente en el lado de la fuente de alimentación de los convertidores, y mejorar la durabilidad de la batería de potencia o SC. Sin embargo, el número de

interruptores es grande, lo que da lugar a un mayor volumen. Además, varios interruptores se encienden a su vez, lo que también plantea elevados requisitos de precisión de control.

▪ **Condensador conmutado**

En la Figura 8 se muestra un convertidor con condensador conmutado. En el estudio [9] se propuso un convertidor DC-DC bidireccional de condensador conmutados intercalados con una alta relación de conversión de tensión. El convertidor adoptó la tecnología intercalada para reducir el rizado de corriente del lado de la fuente de alimentación, y utilizó condensadores conmutados en el lado del bus de DC del convertidor para obtener un amplio rango de tensión.

▪ **De tres niveles**

La topología DC-DC bidireccional de tres niveles puede reducir eficazmente la tensión en los dispositivos del lado de alta tensión, como se muestra en la Figura 26. La red de impedancia bidireccional de tres niveles es adecuada como estructura del lado del bus del convertidor DC-DC bidireccional para HESS.

Este tipo de convertidor puede reducir la tensión de los interruptores a la mitad de la tensión del lado de alta tensión, lo que puede mejorar la fiabilidad del convertidor cuando se utiliza en el HESS. Sin embargo, no puede ampliar significativamente el rango de conversión de tensión, tiene un gran número de interruptores, y la entrada y la salida generalmente no son tierra común. Además, se debe tener en cuenta la cuestión del equilibrio de la tensión de los condensadores, lo que aumenta la complejidad del diseño.

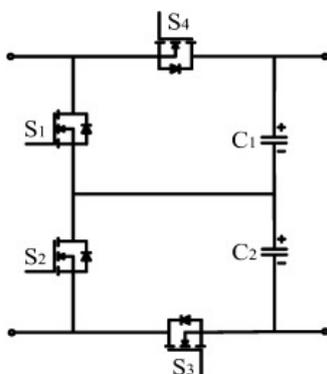


Figura 26. Red de impedancia DC-DC bidireccional de tres niveles [4].

Una vez comentadas las topologías de convertidores DC-DC bidireccionales no aislados más utilizados para aplicaciones de vehículos eléctricos, se hace una comparativa (Tabla 4), en la que se resumen sus ventajas y desventajas.

Tabla 4. Síntesis de las topologías de convertidores DC-DC bidireccionales no aisladas para HESS de VE.

TOPOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS	APLICABLE PARA HESS
Boost, Cuk y SEPIC	<ul style="list-style-type: none"> - Estructura simple fácil de controlar. - Facilidad para generar nuevas topologías. - Rango de conversión de voltaje pequeño. 	Si, aunque solo para el lado de baja tensión.

Buck-Boost	<ul style="list-style-type: none"> - Estructura simple. - Rango de conversión de voltaje pequeño. 	Si.
Intercalado	<ul style="list-style-type: none"> - Baja ondulación de la corriente del lado de la fuente de alimentación. - Tierra común entrada-salida. - Requiere alta precisión de control. 	Si, para el lado de baja tensión.
Condensador conmutado	<ul style="list-style-type: none"> - Amplio rango de conversión de voltaje. - Entrada-salida de tierra no común. 	No.
Cascada	<ul style="list-style-type: none"> - Facilidad para generar nuevas topologías. - Gran número de dispositivos. - Baja eficiencia de conversión. - Amplio rango de conversión de voltaje. 	Si.
Tres niveles	<ul style="list-style-type: none"> - Tensión baja en el lado de alta tensión. - Gran número de interruptores. - Entrada-salida de tierra no común. - Requiere una gran precisión de control. 	Si, para el lado de alta tensión.

Debido a que las fugas de flujo magnético en el transformador producirán picos de tensión en el convertidor, se necesitan circuitos de absorción adicionales para suprimir los picos de tensión, lo que aumenta el coste y el volumen del convertidor. Además, el transformador que funciona a alta frecuencia es una fuente de EMI, que afecta seriamente al funcionamiento seguro del convertidor DC-DC bidireccional. Por lo tanto, el convertidor DC-DC bidireccional sin transformador es más adecuado para los VE. Teniendo en cuenta la fiabilidad, el coste, el espacio de instalación y otros factores de los VE, los HESS existentes para estos utilizan principalmente la topología Boost y la estructura Buck-Boost. En escenarios donde se requiere aislamiento galvánico de la entrada y la salida, teniendo en cuenta la fiabilidad del sistema, se utilizan topologías bidireccionales de medio puente y de puente completo (DAB).

3.2.2 FRENADO REGENERATIVO

Uno de los principales focos de estudio a la hora de buscar alternativas a los combustibles fósiles, es desarrollar VE que tengan la capacidad de proporcionar energía en la aceleración, para recuperarla en el frenado, convirtiendo así la energía cinética del frenado en energía eléctrica. En este caso, se utiliza el HESS para almacenar esa energía y de esa forma poder ser reutilizada posteriormente.

En el frenado de los vehículos de combustible, el líquido hidráulico empuja las pastillas de freno contra los discos de freno de cada rueda. La fricción resultante reduce la velocidad del automóvil, generando calor y desgastando el material de las pastillas y de los discos. El frenado regenerativo almacena esa energía desperdiciada del proceso de desaceleración del vehículo, recargando las baterías.

En este caso, el motor eléctrico funciona en dos direcciones: una para impulsar las ruedas y mover el vehículo, y otra para recargar la batería. Al dejar de acelerar y empezar a frenar, el motor cambia de dirección y comienza a devolver energía a la batería. Al activar este proceso, el vehículo empezará a disminuir la velocidad. Es muy común utilizar dispositivos GaN como semiconductores en este tipo de aplicaciones. Así se conmuta a mayores niveles de intensidad, tensión, temperatura y frecuencias de conmutación. Además, se consigue un mayor rendimiento.

Las principales ventajas del frenado regenerativo están relacionadas con el uso de las baterías durante periodos más largos de tiempo, el funcionamiento del coche totalmente con la energía de la batería, la recuperación de la energía que de otra manera se perdería, el aumento de la eficiencia de hasta un 50%. Este tipo de frenos, no son únicamente usados en vehículos, sino también en bicicletas eléctricas, scooters, transporte ferroviario...

Básicamente, los frenos regenerativos se componen de un componente de almacenamiento de electricidad (una batería o un SC), un sistema electrónico de potencia (un convertidor DC-DC con inversor) y un motor/generador eléctrico. El componente principal del sistema electrónico de potencia es el convertidor DC-DC bidireccional. Esta unidad convierte la energía eléctrica de la batería al motor y viceversa. Es decir, durante el frenado regenerativo, al estar generando electricidad, la transmisión de energía será del motor a las baterías, cargándose.

En la Figura 27 se muestra el diagrama de bloques de un sistema de este tipo. Se compone fundamentalmente de una fuente de energía, un convertidor DC-DC, un inversor de potencia y un generador o motor. El bloque de la fuente de energía es un bus de DC o una batería o paquete de baterías que alimenta el motor eléctrico. El inversor solo se utilizaría cuando el motor es trifásico. El convertidor bidireccional, conduce la energía del bus al motor o la energía del motor en regeneración al componente de almacenamiento (baterías o SCs). Este, realiza la conexión entre cargas con diferentes niveles de tensión.

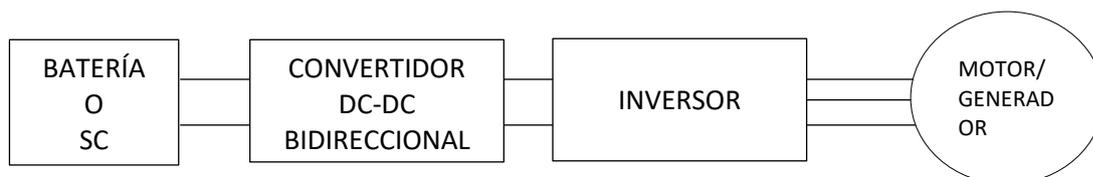


Figura 27. Estructura del frenado regenerativo.

La parte de control del convertidor está compuesta por un microprocesador/microcontrolador que establece el modo de control y envía señales de control. La estrategia de control se selecciona en función de los requisitos del sistema, como la potencia de entrada/salida, la dinámica de la carga, etc.

Las topologías más usadas en este tipo de aplicación son las no aisladas, ya que presentan una mayor simplicidad, flexibilidad y alta eficiencia.

- **Buck-Boost**

La topología más típica es la Buck-Boost, que trabaja en el modo Boost durante la aceleración, es decir, cuando el motor demanda energía, las baterías operan como fuente de tensión y el flujo de energía va de izquierda a derecha. Sin embargo, cuando el motor trabaja como generador, durante el frenado

regenerativo, se cargan las baterías y el convertidor trabaja en modo Buck, debido a que se transfiere la energía del motor a la batería.

▪ Multientrada

También, se ha planteado [12] un convertidor DC-DC bidireccional multientrada, como se muestra en la Figura 28. Esta topología tiene dos modos de funcionamiento: descarga y carga. Durante el modo de carga, la energía del frenado regenerativo carga los sistemas de almacenamiento de energía en función de sus niveles de tensión. En carga, el convertidor funciona en modo Buck, mientras que en descarga trabaja en modo Boost. En este estudio se probó experimentalmente este convertidor consiguiendo una eficiencia superior al 93% en todo el rango de potencia. También, se comprobó que la eficiencia en modo carga es mayor que la de modo descarga debido a la diferencia entre el número de interruptores controlados en estos dos modos.

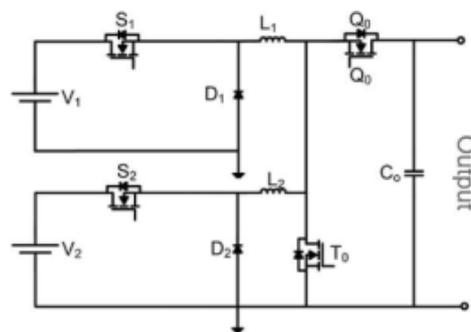


Figura 28. Convertidor DC-DC bidireccional multientrada para frenado regenerativo [12].

▪ Half-Bridge

En [13] se desarrolló un convertidor DC-DC bidireccional para mejorar la autonomía de las bicicletas eléctricas. El objetivo era desarrollar un convertidor que tuviese la capacidad de aumentar el voltaje de la batería de 12V a 24V durante la aceleración, y reducir el voltaje generado de 24V a 12V durante el frenado regenerativo, con el fin de cargar la batería. Se decidió optar por una topología de medio puente ya que requiere un menor número de componentes pasivos. Una vez experimentado se consiguió una eficiencia de 92.10% durante la aceleración, y de 92.68% durante el frenado regenerativo. La topología de medio puente, mostrada en la Figura 29, es una opción muy rentable debido a que solo emplea dos MOSFETs, dos condensadores y un inductor.

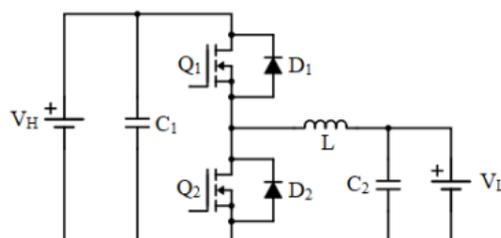


Figura 29. Convertidor DC-DC bidireccional de medio puente para frenado regenerativo de una e-bike [13].

3.2.3 ENERGÍAS RENOVABLES

Para lograr un sistema energético sostenible y completamente renovable, es necesaria una mayor y rápida difusión de la energía fotovoltaica o eólica. Las fluctuaciones de estas energías pueden gestionarse con el almacenamiento de energía, es decir, con la utilización de un HESS.

Para este tipo de aplicaciones, el hidrógeno renovable (H_2) y el metano (CH_4) son opciones muy prometedoras para el almacenamiento de energía a largo plazo. Además, el almacenamiento del calor producido a partir de un exceso de energía renovable (mediante la utilización por ejemplo de bombas de calor) aumentará la tasa de utilización de energías renovables. En este caso, el HESS tiene varias configuraciones [14]:

- Una combinación de una unidad de generación de calor y una batería. Esta configuración puede utilizarse para la generación y el almacenamiento de agua caliente a partir de un exceso de energía fotovoltaica o de electricidad procedente de la red en momentos de tarifas bajas.
- Unidad de generación de calor, una batería y una vía adicional de almacenamiento de H_2 . Este caso puede aplicarse a aplicaciones sostenibles de emisiones cero.
- Supercondensador y batería (de plomo, NaS, NaNiCl o de flujo redox) En este caso, el SC funciona como almacenamiento de alta potencia, aumentando la vida útil de la batería.
- Batería (de iones de litio) y batería de alta potencia (de plomo, NaS, NaNiCl o de flujo redox).

En aplicaciones basadas en sistemas fotovoltaicos, la mejor opción es la utilización de dos convertidores DC/DC en paralelo [14]. El convertidor DC/DC asociado del almacenamiento de alta potencia se encarga de la regulación de la tensión del bus de DC. Además de la topología en paralelo, es posible en serie y en cascada, aunque es más caro y difícil de controlar.

Otro método para reducir la contaminación y aumentar el consumo de la energía renovable, es la microrred. Esta, es un sistema compuesto por generaciones distribuidas, sistemas de almacenamiento de energía, convertidores electrónicos de potencia, cargas y sistemas de gestión de la energía. Consta de una estructura simple, fáciles estrategias de control y alta eficiencia. El almacenamiento de energía debe compensar el desequilibrio de energía en la microrred de DC para estabilidad la tensión del bus. El rendimiento de este sistema de almacenamiento depende del convertidor DC-DC bidireccional. La topología más utilizada en este método también es la Buck-Boost debido a su estructura sencilla, pocos componentes y un método de control sencillo. Sin embargo, la relación de tensión es pequeña y las pérdidas de conmutación son altas. Con el fin de mejorar la seguridad, las topologías aisladas están en auge.

Una propuesta reciente es la utilización de un convertidor DC-DC bidireccional de cuatro puertos para la integración de un HESS en una microrred de corriente continua [15]. El convertidor propuesto se utiliza para interconectar una turbina eólica, un panel fotovoltaico, un banco de baterías y la microrred de DC. El uso de un convertidor multipuerto puede conseguir una estructura más compacta y una mayor densidad de potencia, ya que se pueden compartir algunos componentes. Este convertidor, como se puede comprobar en la Figura 30, tiene dos puertos bidireccionales para la batería y el enlace de DC. La batería no solo puede suministrar la energía a la microrred, sino que también puede ser cargada por ambas fuentes de energía y por la microrred de DC. Los dos primeros puertos son de

entrada de la fuente, el tercer puerto es para la batería, y el cuarto el enlace DC. Gracias a la estructura integrada y a la conmutación suave, se consigue una eficiencia máxima del 95% al 50% de la carga nominal, tanto en el modo Buck como en el Boost.

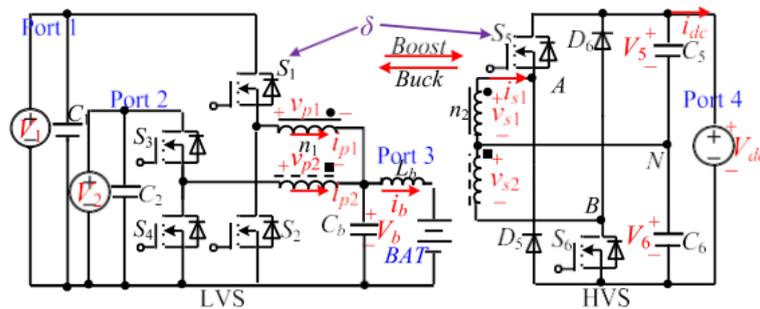


Figura 30. Convertidor DC-DC bidireccional multipuerto para su aplicación en una microrred [15].

La topología más utilizada en aplicaciones de sistemas fotovoltaicos es la Buck-Boost. En [16] se diseña un convertidor de este tipo para el almacenamiento de la energía requerida en los paneles fotovoltaicos a baja tensión. La topología, proporciona un flujo de energía bidireccional de la red a la batería. En modo Buck, se transfiere la energía de la red a la batería, mientras que en el modo Boost, la energía fluye de la batería a la red.

Sin embargo, por razones de seguridad, la tensión nominal del módulo de la batería es normalmente inferior a 48V, es decir, el convertidor entre la batería y el bus DC necesita cumplir con el requisito de alta ganancia de tensión que en la topología no aislada es más difícil de lograr. Por lo tanto, se prefiere la topología aislada por su mayor ganancia de tensión y su aislamiento eléctrico [17]. Una de las topologías que reúnen estos requisitos, además de conseguir una mayor eficiencia, es la DAB.

En [18] se propone una topología en cascada formada por un convertidor bidireccional DC-DC DAB y un Buck-Boost. El bus de DC está conectado a un SC mediante el DAB, mientras que la batería está conectada al SC a través del Buck-Boost, como se muestra en la Figura 31. Al conectar la topología DAB al extremo delantero del HESS se consigue aislamiento eléctrico entre el bus de DC y los dispositivos de almacenamiento de energía, lo que mejora el rendimiento. Debido a que la relación de conversión de este convertidor es mayor que la del Buck-Boost, no es necesario el uso de dispositivos de almacenamiento de energía de alta tensión nominal. El SC está conectado al bus de DC a través del DAB para así compensar directamente las fluctuaciones de alta frecuencia del bus de DC, mientras que la conexión directa de la batería con el SC a través del Buck-Boost compensa las fluctuaciones de baja frecuencia.

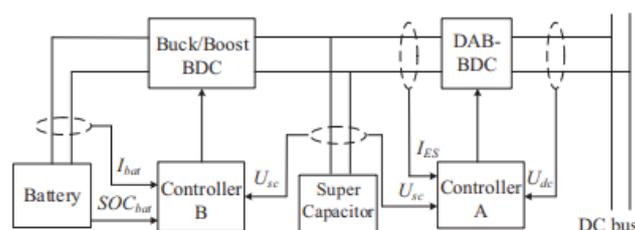


Figura 31. Estructura del HESS con una topología DAB y una Buck-Boost [18].

4 TRANSFORMADORES DE ESTADO SOLIDO

En este capítulo se introducen los transformadores de estado sólido, así como las topologías de convertidores DC-DC bidireccionales más utilizadas para sus aplicaciones.

4.1 INTRODUCCIÓN

El transformador de estado sólido (*Solid-State Transformer, SST*) es un circuito de potencia que permite manejar altos niveles de tensión y potencia. Estos dispositivos logran que el flujo de energía entre la empresa proveedora de energía y el consumidor sea bidireccional, permitiendo que este sea capaz de producir energía. Pueden ofrecer tanto CC como CA, y adecuar la frecuencia y la tensión a las requeridas por la red. Los SST constan de aislamiento galvánico tanto en la entrada como en la salida del convertidor, controlan el flujo de potencia bidireccionalmente y proveen interfaces para conectar generadores de potencia o sistemas de almacenamiento de energía. Cuando ocurren sobrecargas, estos dispositivos logran prevenirlas debido a su capacidad de procesamiento y comunicación.

El transformador de potencia tradicional de 50/60 Hz es reemplazado por el SST mediante una conversión CA-CA aislada por un transformador de alta frecuencia. El funcionamiento consta de tres pasos:

- i. Se cambia el voltaje de CA de 50/60Hz a uno de alta frecuencia, como por ejemplo de KHz.
- ii. Se aumenta o disminuye dicho voltaje con un transformador de alta frecuencia con volumen y peso reducidos.
- iii. Se alimenta la carga con una frecuencia de 50/60 Hz.

El SST está siendo una buena opción en la actualidad debido a sus diversas ventajas [19]:

- Protege al sistema de perturbaciones en la carga.
- Logra la compensación de armónicos en el voltaje.
- Puede proveer interfaces para conectar generadores de potencia o sistemas de almacenamiento de energía.
- Permite el control de flujo bidireccional.
- Sus dimensiones (peso y volumen) son reducidas.
- Se logra mejor calidad de energía.
- La tensión de salida no se ve afectada por la caída/subida de tensión en la entrada.
- Limita la corriente de falla de cortocircuito.

Sin embargo, debido a la ruptura térmica del diseño del SST es más complejo para aplicaciones de alta potencia y tensión. Además, se estima una vida útil menor de 20 años con el reemplazo del 20% de los interruptores electrónicos de potencia incorporados.

Los SST tienen 4 diferentes topologías, sin embargo, la más interesante para este proyecto es la mostrada en la Figura 32, ya que ofrece una combinación de las otras 3. Primero, se realiza una conversión de corriente alterna a continua en alta tensión. Mediante un transformador de alta

frecuencia se aísla la carga de la fuente, a la vez que se baja la tensión con un convertidor DC/DC. A continuación, esta tensión en continua se convierte a alterna en baja tensión. La principal diferencia entre esta topología y las demás es que esta configuración logra integrar sistemas de almacenamiento de energía y un flujo bidireccional, por lo que es una gran opción para aplicaciones de energías renovables. Además, tiene una gran capacidad de control y alta eficiencia. Por otro lado, para emplear un convertidor DC/DC con aislamiento de alta frecuencia, se necesita un convertidor AC/DC en la entrada y un convertidor DC/AC en la salida.

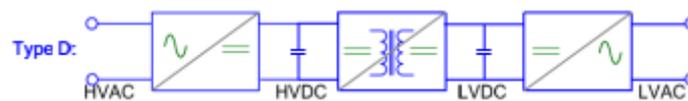


Figura 32. Topología SST [19].

Las aplicaciones de los SST son un pilar fundamental en la reducción de la contaminación al ser una energía limpia, por lo que es una gran opción para las tecnologías modernas como la energía eólica, la energía fotovoltaica y los VE. Además, con el auge del Internet de la energía (*Internet of Everything, IoT*), donde la energía puede ser compartida entre consumidores y empresas a través de transacciones energéticas, los SST están siendo foco principal de estudio para su aplicación en este mercado.

4.2 TOPOLOGÍAS DE CONVERTIDORES UTILIZADAS

Los SST contienen múltiples convertidores DC/DC bidireccionales con el transformador de alta frecuencia. Normalmente, la topología más usada es el convertidor DAB debido a su alta capacidad de potencia bidireccional y la conmutación ZVS de todos los interruptores. Sin embargo, la topología monofásica de este convertidor limita el rango ZVS y la eficiencia a baja carga. Estas desventajas se podrían mejorar con la topología bifásica o trifásica, pero son difíciles de implementar debido a su complejo control. Para evitar estos problemas, algunas topologías SST utilizan el convertidor resonante en serie LLC como módulo básico de la etapa DC/DC [20]. En cualquier condición de carga, el convertidor LLC consigue la ZVS del lado primario y la corriente cero del lado secundario (*Zero Current Switching, ZCS*).

En la actualidad el uso de los convertidores DC/DC bidireccionales de DAB están ganando cada vez más atención debido a su gran potencial para conseguir una conmutación suave. Sin embargo, el uso de DAB en SST puede plantear problemas como las corrientes negativas en el lado de DC, las cuales reducen la capacidad de transferencia de potencia del sistema y la transición no ZVS en la desconexión de los interruptores.

En [20] se propone un convertidor DC/DC híbrido LLC resonante y DAB lineal, mostrado en la Figura 33. Este, combina las ventajas de los dos convertidores con un método sencillo de control de la corriente de salida, lo cual mejora la estabilidad del control y consigue la conmutación suave de todos los dispositivos. Las principales ventajas de esta topología híbrida son: evita la zona de carga ligera del DAB, reduciendo así la dificultad de diseño del controlador y tiene una ganancia de tensión constante.

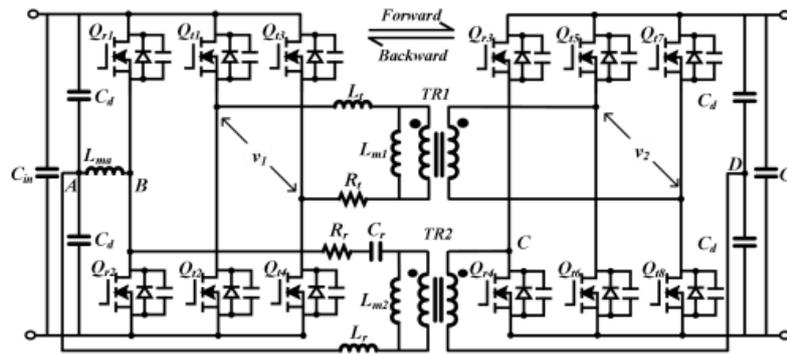


Figura 33. Circuito convertidor híbrido [20].

Este convertidor híbrido tiene dos direcciones de alimentación, Forward and Backward. En cualquiera de las dos hay dos modos de funcionamiento: modo de LLC simple y modo de LLC-DAB (ambos actúan en paralelo).

En [21] han propuesto un diseño de una SST para una aplicación de carga de baterías integrada en la red, es decir, V2G (Vehicle to grid) y así suplir estos inconvenientes. V2G es una tecnología que transforma los VE en grandes baterías móviles que interactúan con la red. Se utiliza un convertidor Buck-Boost aislado en modo shoot through, mostrado en la Figura 34. Cuando la energía fluye desde el lado de baja tensión hacia el de alta tensión, el convertidor funciona en modo de refuerzo para mantener la tensión del lado de alta tensión en un valor deseado. En el otro sentido, el convertidor funciona en modo Buck para recargar la batería desde la red. El puente completo del lado de baja tensión funciona como un convertidor Boost para elevar la tensión. También se ha añadido un condensador en paralelo con cada dispositivo de conmutación para así lograr la conmutación suave. El modo shoot though sirve para corregir el inconveniente de la imposibilidad del ciclo de trabajo para alcanzar la tensión deseada mencionado anteriormente.

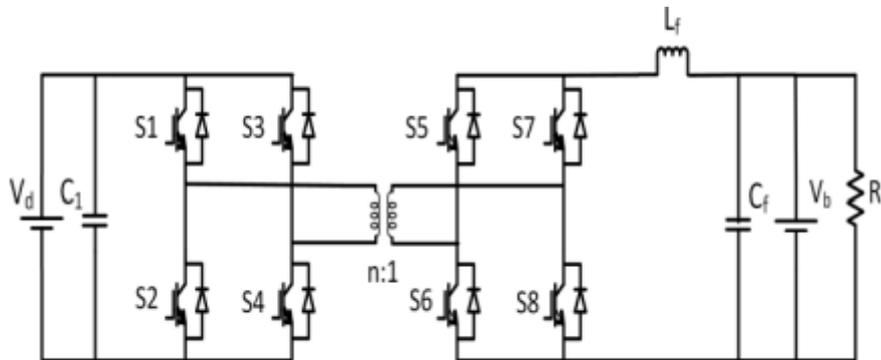


Figura 34. Circuito Buck-Boost para V2G [21].

El convertidor DHB con cambio de fase también es muy utilizado para el diseño de los SST. Sin embargo, el inconveniente es que no pueden trabajar en el modo ZVS dentro de una región limitada por la relación de tensión del convertidor entre la entrada y la salida y la condición de la carga, además de sufrir pérdidas de conducción adicionales debido a la energía circulante con carga pesada. En este estudio [22] se ha propuesto un DHB con cambio de fase y un inductor adaptativo para suplir dichas desventajas. Utilizando este dispositivo como elemento principal de transferencia de energía, la potencia de salida puede ser controlada no solo por el desplazamiento de fase, sino también por la inductancia de conmutación, lo que permite mantener el ZVS en condiciones de carga ligera y

minimizar las pérdidas de conducción con carga pesada. Esto permite mejorar la eficiencia tanto con carga ligera como pesada en comparación con el DHB convencional. La principal diferencia, como se muestra en la Figura 35 está en que este convertidor utiliza una inductancia adaptativa para adaptarse a la potencia de salida, mientras que en el DHB convencional la inductancia de conmutación es fija independientemente de la potencia de salida.

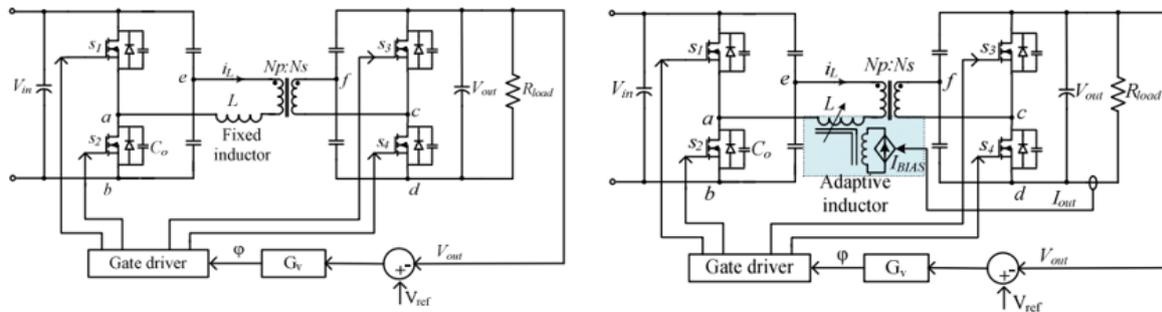


Figura 35. Comparativa DHB condicional y DHB con inductor adaptativo [22].

5 SIMULACIONES

En este capítulo se realizan las simulaciones de los convertidores DC-DC bidireccionales que, teniendo en cuenta las aplicaciones anteriormente mencionadas, se han encontrado más interesantes.

Para el modelado y simulación de los convertidores, se utiliza el entorno OrCAD y PSpice respectivamente. Estos son software empleados para la automatización de diseño electrónico, que permiten comprobar el funcionamiento de los circuitos, realizar un análisis y un estudio de los mismos.

Considerando lo explicado en los anteriores capítulos, los convertidores DC-DC bidireccionales más utilizados, y por ello más relevantes, para modelar y simular son el Buck y Boost, Buck-Boost, CUK y DAB.

5.1 BOOST

En este subapartado se diseña y simula un convertidor Boost y Buck, el cual, como se verá posteriormente, podría utilizarse para el frenado regenerativo de un vehículo. Como se ha explicado anteriormente, cuando se demande energía, es decir, haya una aceleración, el convertidor trabajará como Boost, mientras que cuando trabaje como generador será Buck.

5.1.1 DISEÑO DEL CONVERTIDOR

El convertidor Boost es un circuito elevador que utiliza a la inductancia y al condensador como elementos almacenadores de energía para elevar la corriente proveniente de la fuente de alimentación, llevando esa energía al condensador y aumentando los niveles de voltaje de la carga en comparación con los de la fuente. En cambio, en la topología Buck, las tensiones de salida serán menores que las de la entrada.

La Tabla 5 muestra los datos del convertidor utilizado como ejemplo para verificar su comportamiento como convertidor Boost.

Tabla 5. Datos generales Boost

DATOS GENERALES	
Frecuencia de conmutación	200 kHz
Tensión de entrada	24 V
Tensión de salida	36 V
Potencia de salida	720 W
Corriente máxima de la inductancia	33 A
Amplitud de rizado de la inductancia	10 %

Amplitud de rizado de la tensión de salida	5 %
---	-----

Primero, se deben de obtener los valores de los componentes del circuito. El ciclo de trabajo se logra mediante (1). Este será el requerido para convertir 24 V en 36 V.

$$\frac{V_{bus}}{V_{bat}} = \frac{1}{1-D} \quad (1)$$

Como se muestra en la Tabla 5, el valor de la amplitud del rizado, Δi_L , es del 10%. Y, sabiendo que la corriente máxima que debe circular por la inductancia es de 33 A, con (2) se obtiene el valor de la inductancia.

$$L = \frac{V_{bat} D T}{2 \Delta i_L} \quad (2)$$

Donde D es el ciclo de trabajo calculado con (1), T es el periodo de funcionamiento, el cual es la inversa de la frecuencia de conmutación y Δi_L el valor de la amplitud del rizado.

Igualmente, como se muestra en la Tabla 5, el requisito de la amplitud de rizado de la tensión de salida, ΔV_{bus} , es del 5%. Por lo que, el valor del condensador de la salida se obtendrá con (3).

$$C_{bus} = \frac{I_{bus} D T}{2 \Delta V_{bus}} \quad (3)$$

Donde D es el ciclo de trabajo, T la inversa de la frecuencia de conmutación, I_{bus} la intensidad de la carga y ΔV_{bus} la amplitud del rizado de la tensión.

La Tabla 6, que se obtiene con las ecuaciones anteriores, muestra los valores de elementos y la tensión de entrada y salida del convertidor a diseñar en OrCAD, necesarios para su simulación.

Tabla 6. Datos generales del convertidor Boost [23].

Datos del convertidor	
Ciclo de trabajo	33 %
Tensión de entrada (batería)	24 V
Inductancia	6,67 μH
Tensión de salida (bus)	36 V
Condensador	9,26 μF
Resistencia en la salida	1,8 Ω

5.1.1 SIMULACIÓN

Los esquemáticos del convertidor Boost diseñados, trabajando como Boost y como Buck, se muestran en las Figuras 36 y 37 respectivamente. En este caso, la batería se representa como una fuente ideal de tensión de 24 V y el bus como una fuente ideal de 36 V. Las gráficas obtenidas en el primer modo, cuando la energía fluya de izquierda a derecha, serían cuando se produjese una aceleración positiva, mientras que las obtenidas con la Figura 37 se refieren al frenado regenerativo.

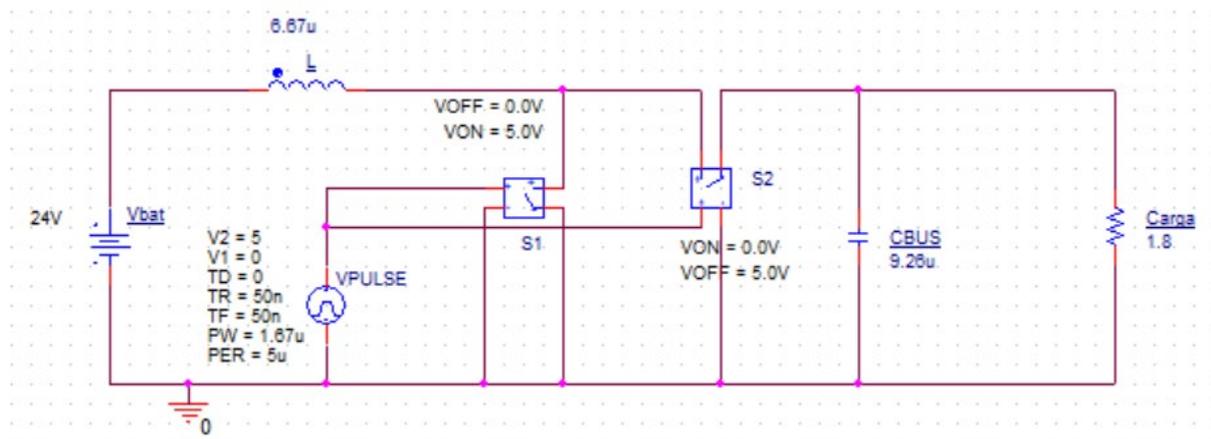


Figura 36. Esquema de simulación del convertidor Boost con aceleración positiva.

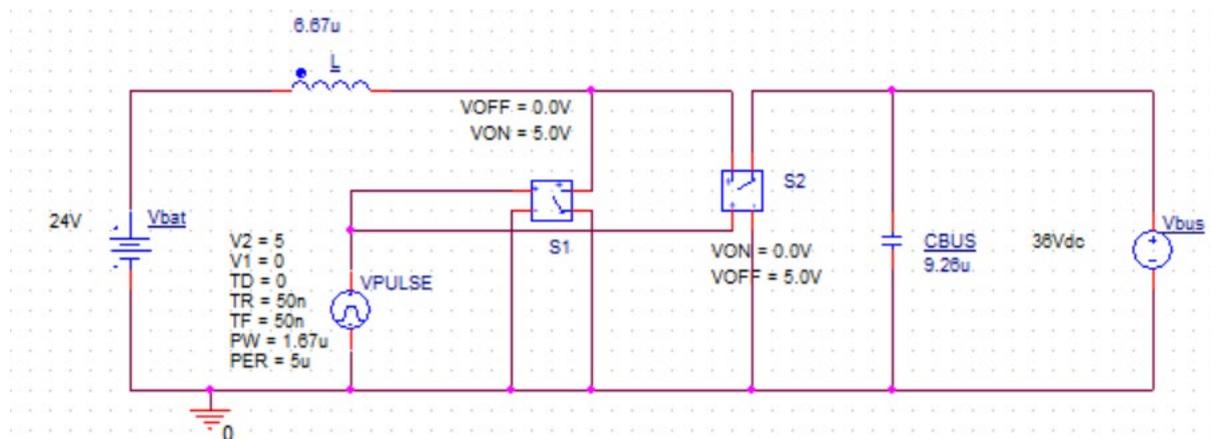


Figura 37. Esquema de simulación del convertidor Boost con frenado regenerativo.

Los transistores elegidos, son conmutadores ideales S1 y S2, los cuales están dirigidos por la fuente de pulsos. Como se ha optado por una frecuencia de conmutación, f_s , de 200 kHz, el periodo de señal de pulsos, T_s , será de 5 μ s. Sabiendo el periodo y el ciclo de trabajo obtenido antes se establece el PW. La simulación de las señales de modulación, se muestran en la Figura 38. Como se puede observar, la tensión de esta señal va desde los 0 V hasta los 5 V, correspondiendo estos con los valores preestablecidos en los parámetros V_1 y V_2 de la fuente de pulsos.

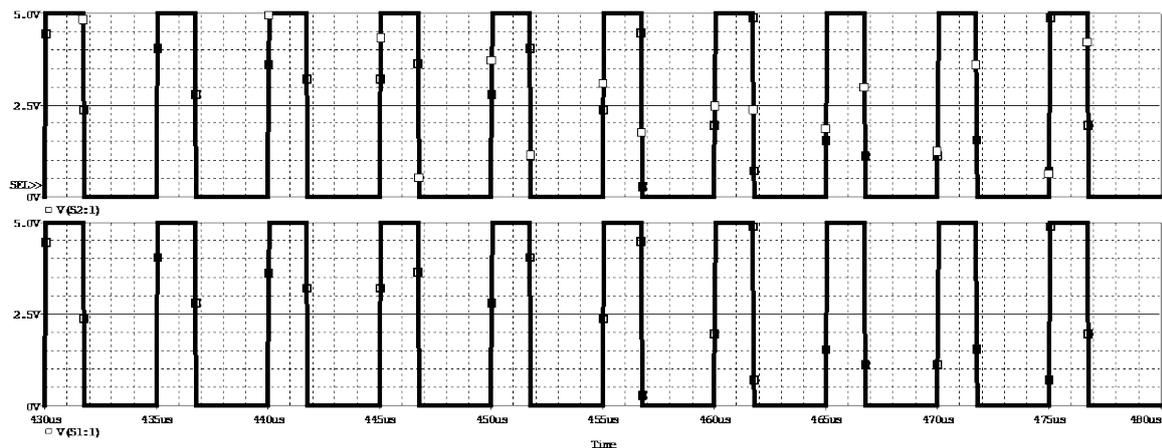


Figura 38. Simulación de las señales de modulación.

Cuando el convertidor funciona en aceleración positiva, es decir, la energía fluye de la batería al motor, la tensión de salida será la tensión del bus. Esta se muestra en la Figura 39, donde se puede ver que la tensión máxima es de 38 V con rizado, mientras que la tensión media, mostrada en la Figura 40, es de 36 V. Sin embargo, al trabajar en frenado regenerativo, y, por tanto, la energía fluye del motor a la batería, la tensión de salida será la de la batería, es decir, de 24 V, mostrada en la Figura 41.

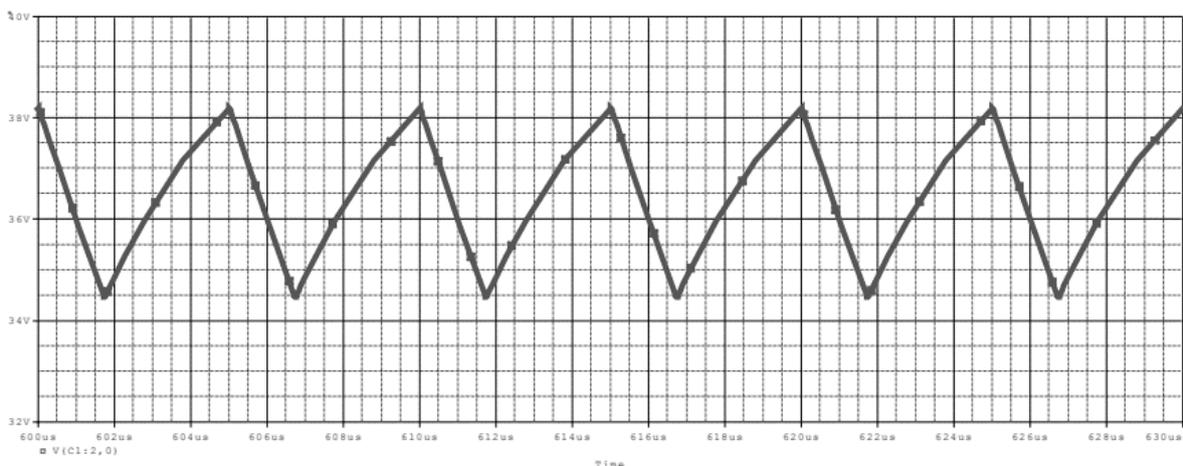


Figura 39. Simulación de la tensión del bus.

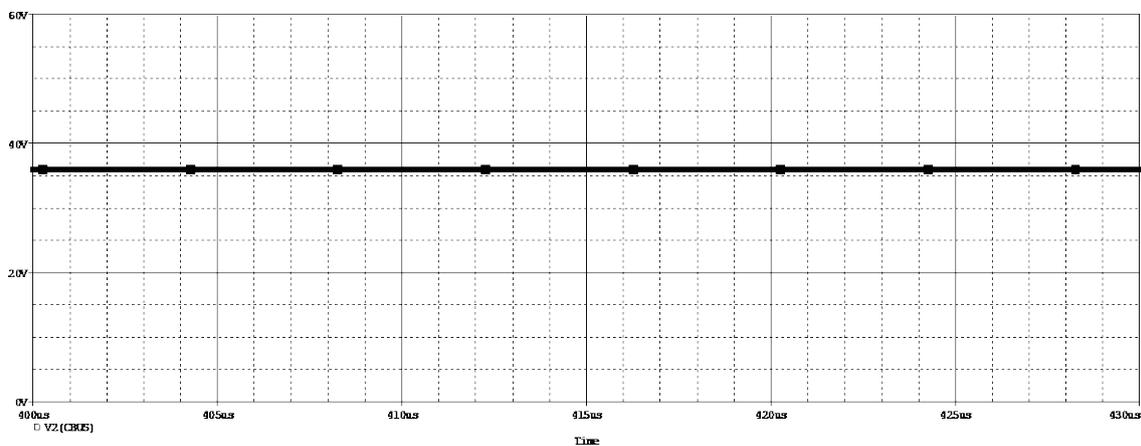


Figura 40. Simulación de la tensión media del bus.

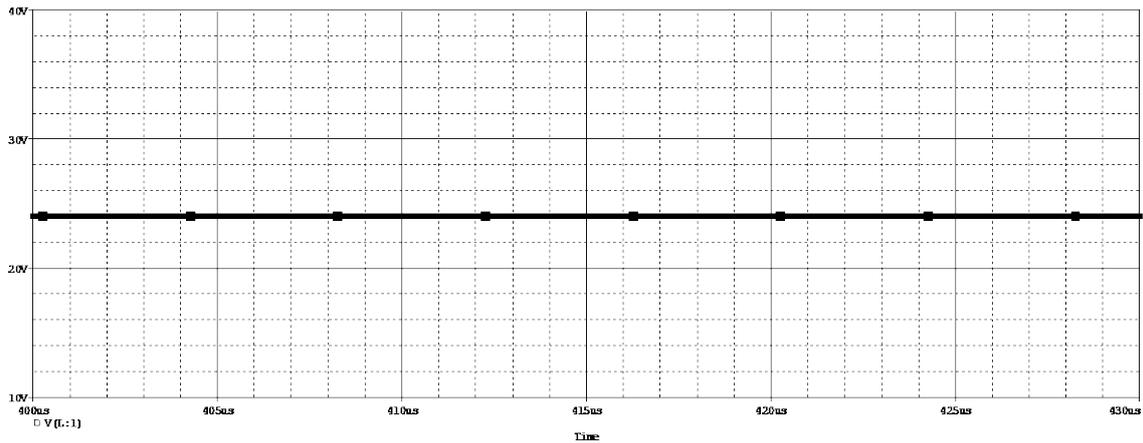


Figura 41. Simulación de la tensión de la batería.

Posteriormente, comprobaremos el correcto funcionamiento del convertidor midiendo la corriente que circula por la bobina, la cual debe de tener un valor medio de 30 A, siendo la corriente máxima de 33 A, como se ha explicado anteriormente. La Figura 42 muestra dicha corriente cuando la aceleración fuera positiva, en este caso la corriente también debe serlo, ya que la energía fluye hacia la derecha. Al contrario, la corriente de la bobina durante el frenado regenerativo debe ser negativo debido a que fluye hacia la izquierda, del motor a la batería, esta corriente se presenta en la Figura 43.

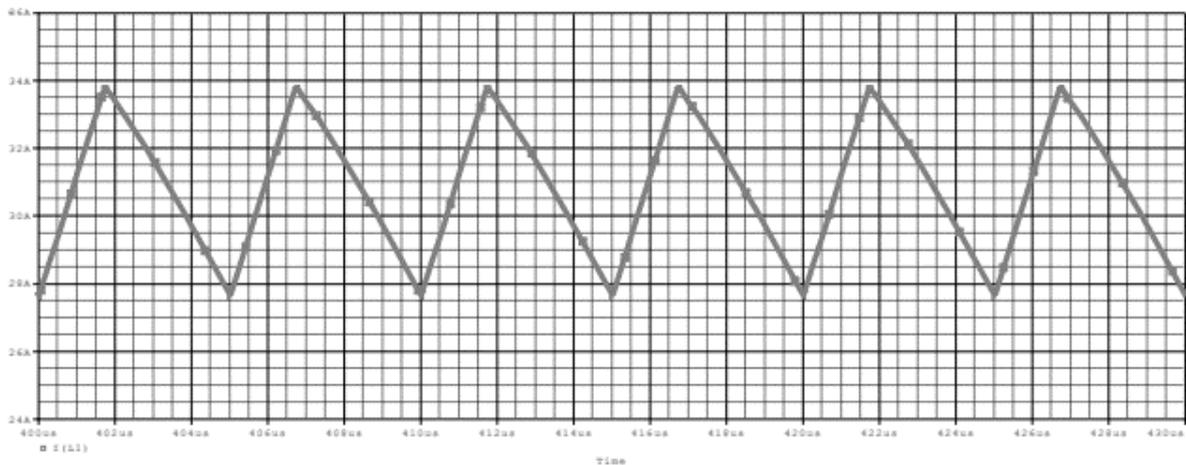


Figura 42. Simulación de la corriente de la inductancia en aceleración positiva.

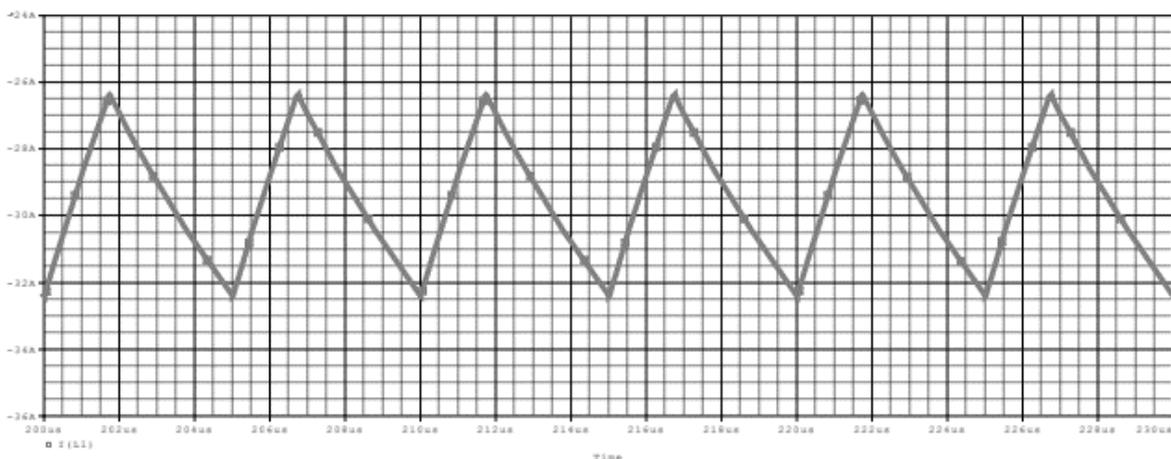


Figura 43. Simulación de la corriente de la inductancia en frenado regenerativo.

Como se ha podido observar con lo explicado anteriormente, el convertidor diseñado en este apartado cumple correctamente con la condición de bidireccionalidad. Cuando se opta por una aceleración positiva, es decir, cuando la energía fluya hacia delante, la tensión de entrada serán los 24 V de la batería, y la tensión de salida los 36 V del bus. Y cuando la energía fluya en sentido contrario, dicha tensión de entrada y de salida se intercambiará. Consecuentemente, este tipo de topología es muy adecuada para su aplicación en frenados regenerativos de vehículos, ya que como se ha explicado, cumple con sus requisitos. Además, el rendimiento de este convertidor, como se ha comentado en la revisión del estado del arte, es muy elevado, en concreto de 93,90 %.

5.2 BUCK – BOOST

En este subapartado se diseña y simula un convertidor Buck-Boost. Como se ha detallado en el subapartado 3.2, esta topología es la más utilizada en la mayoría de las aplicaciones ya que tiene una estructura muy simple y se obtiene un buen rendimiento.

5.2.1 DISEÑO DEL CONVERTIDOR

En la Figura 44 se muestra el modelo del convertidor Buck-Boost a diseñar. Para facilitar el flujo de potencia bidireccional, se emplean los diodos en antiparalelo que tienen por naturaleza, en el caso de utilizar MOSFET de potencia, o se añaden diodos de mejores prestaciones. Además, se emplean los condensadores de filtro C_1 y C_2 en la entrada y en la salida. Cuando la fuente de tensión continua V_1 se conecta en paralelo a C_1 , la energía fluye de izquierda a derecha hacia la carga conectada. Cuando la energía fluye en la dirección contraria, se conectará una fuente de tensión V_2 en paralelo a C_2 , a la vez que este se conecta a una carga.

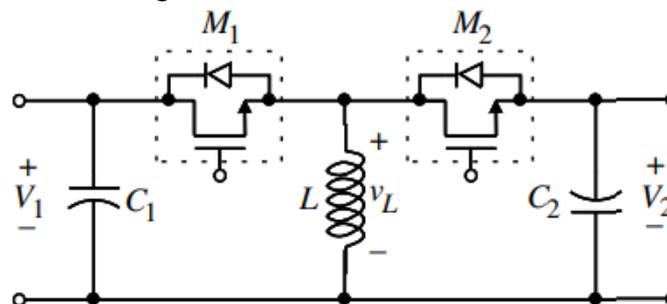


Figura 44. Esquemático del convertidor Buck-Boost [23].

Cuando se aplica V_1 como fuente de tensión continua de entrada, la potencia fluye de izquierda a derecha, alimentando la carga conectada con C_2 . En el primer intervalo de tiempo, el interruptor M_1 está encendido, y el interruptor M_2 apagado. En este caso, la tensión que circula por la bobina será la tensión de entrada, como se muestra en (4), y el valor de la corriente se verá dada por (5). Cuando los interruptores se intercambien de modo, la tensión y corriente de la bobina estarán en función de V_2 , como se puede apreciar en (6) y (7) respectivamente. En el caso del convertidor Buck-Boost, la función de transferencia de la tensión estará dada por (8).

$$V_L = V_1 \quad (4)$$

$$i_L(t) = \frac{V_1}{L} t + i_L(0) \tag{5}$$

$$V_L = V_2 \tag{6}$$

$$i_L(t) = \frac{V_2}{L} (t - D_1 T) + i_L(D_1 T) \tag{7}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = -\frac{-D_1}{1-D_1} \tag{8}$$

Donde D_1 es el ciclo de trabajo del interruptor M_1 .

Al fluir la energía de derecha a izquierda, será la tensión V_2 la fuente de tensión de entrada, y la carga estará conectada con C_1 . Al contrario que en el caso anterior, ahora será el interruptor M_2 el interruptor primario, y M_1 el secundario. En el primer intervalo de tiempo, es decir, cuando el interruptor primario esté encendido, la tensión de la bobina es V_2 , mostrada en la (6), y el valor de la corriente de esta en (9). Mientras que, en el segundo intervalo de tiempo, el valor de la tensión de la bobina será V_1 , y la corriente la mostrada en (10). Además, la función de transferencia se muestra en (11). Donde, en este caso, el ciclo de trabajo será el del segundo interruptor, y la tensión de salida y entrada al revés que anteriormente.

$$i_L(t) = \frac{V_2}{L} t + i_L(0) \tag{9}$$

$$i_L(t) = \frac{V_1}{L} (t - D_2 T) + i_L(D_2 T) \tag{10}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = -\frac{-D_2}{1-D_2} \tag{11}$$

En [26] hacen un estudio y simulación de un convertidor Buck-Boost bidireccional síncrono para una aplicación de fuentes de alimentación recargables. Los datos del convertidor trabajando en modo Buck y Boost se muestran en la Tabla 7 y 8 respectivamente.

Tabla 7. Datos del convertidor en modo Buck [26]

Datos del convertidor	
Tensión de la batería	$24 \pm 4 V$
Tensión de salida V_2	$-15 V$
Corriente de carga I_2	$1 A$
Potencia	$45 W$
Frecuencia de conmutación	$100 kHz$
Ciclo de trabajo 1	$0,361$
Ciclo de trabajo 2	$0,441$

Resistencia de carga	15Ω
Condensadores	$680 \mu F$
Valor de la inductancia	$30,6 \mu H$
Resistencias de los condensadores	$0,016 \Omega$
Resistencia de la inductancia	$0,037 A$

Tabla 8. Datos del convertidor en modo Boost [26].

Datos del convertidor	
Tensión de la batería	$28 V$
Tensión de salida V_2	$-15 V$
Corriente de carga I_1	$1 A$
Potencia	$45 W$
Frecuencia de conmutación	$100 kHz$
Ciclo de trabajo 2	$0,627$
Resistencia de carga	24Ω
Condensadores	$680 \mu F$
Valor de la inductancia	$100 \mu H$
Resistencias de los condensadores	$0,016 \Omega$
Resistencia de la inductancia	$0,037 \Omega$

La batería funcionará como fuente de alimentación auxiliar que proporciona una tensión de salida inversora de V_2 y una corriente de carga I_2 . Al descargarse la batería, la potencia fluirá de izquierda a derecha, trabajando como Buck. Cuando la V_2 alcance el valor de $-15 V$ suministrado, este se utilizará para cargar la batería con $24 V$ y $1 A$. En ese momento, el convertidor trabajará en modo Boost, fluyendo la energía de derecha a izquierda. La corriente máxima para I_2 debe ser de $3 A$, mientras que para I_1 , de $2,25 A$. En este caso, el convertidor se diseña intentando permanecer en el modo de conducción continua (*Continuous Conduction Mode, CCM*) [26] con una alta eficiencia durante los modos de carga y descarga de la batería. Además, en los cálculos teóricos se asume un rendimiento del 95 %.

Las Figuras 45 y 46 muestran los esquemáticos del convertidor trabajando en modo Buck y Boost respectivamente. Como se puede apreciar, al funcionar como Boost se deben de cambiar de posición la carga y la alimentación, ya que la energía fluye de derecha a izquierda.

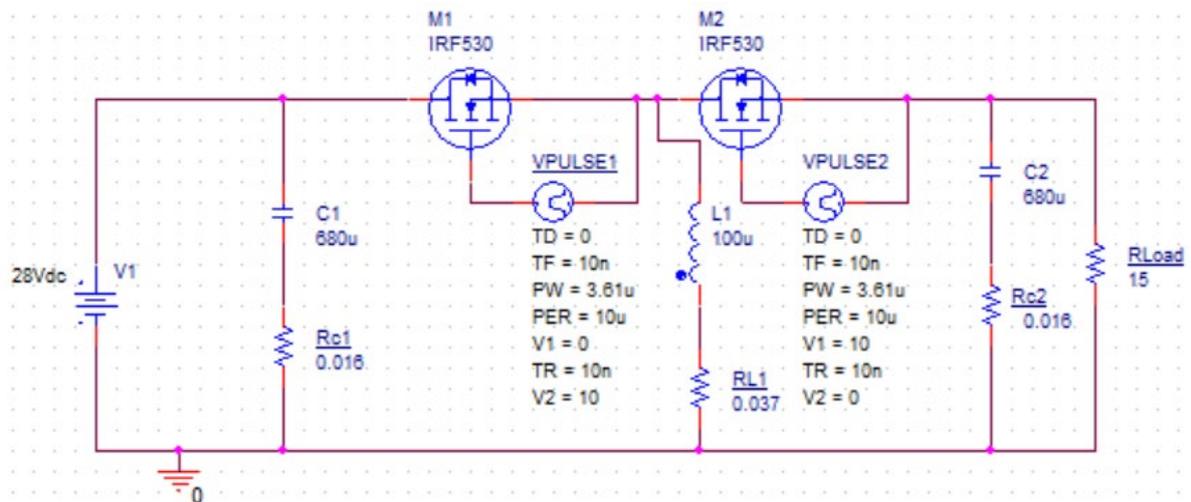


Figura 45. Esquemático del convertidor Buck-Boost trabajando en Buck.

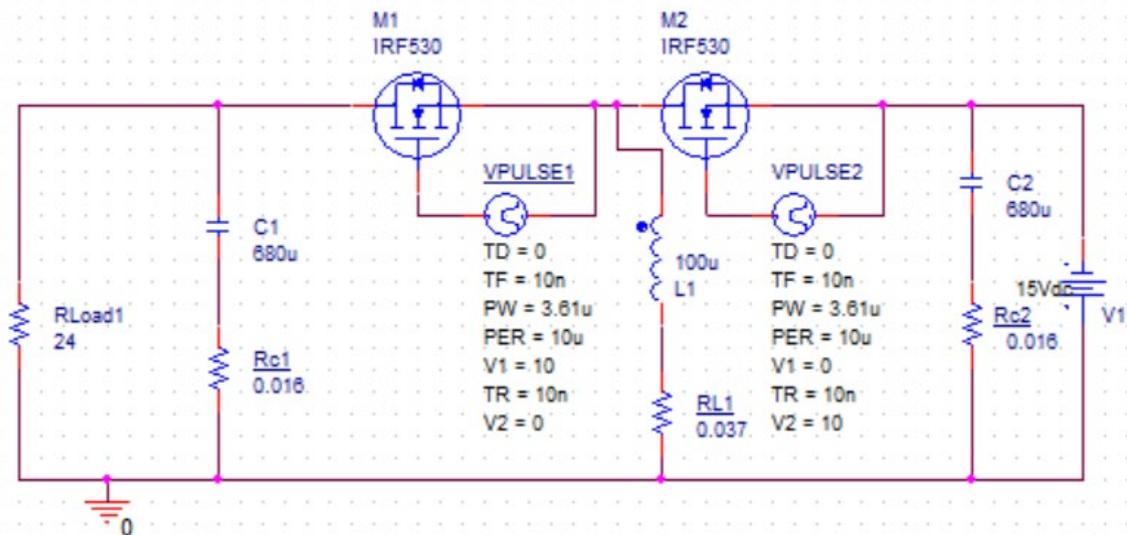


Figura 46. Esquemático del convertidor Buck-Boost trabajando en Boost.

5.2.2 SIMULACIÓN

Primero, se simulará el convertidor trabajando en modo Buck, mostrado en la Figura 44. Para comprobar su correcto funcionamiento, verificamos que la tensión de salida y la corriente de salida sean las deseadas, mostradas en las Figuras 47 y 48 respectivamente. Donde se puede observar, que efectivamente la tensión de salida tiene un valor medio de aproximadamente -15 V, y la corriente $1,1$ A.

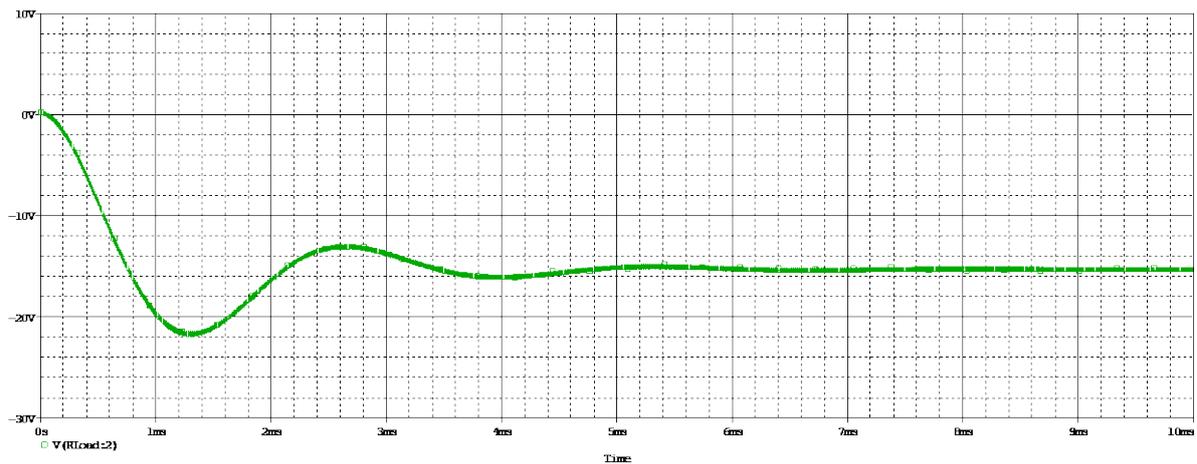


Figura 47. Tensión de salida del convertidor Buck-Boost trabajando en modo Buck.

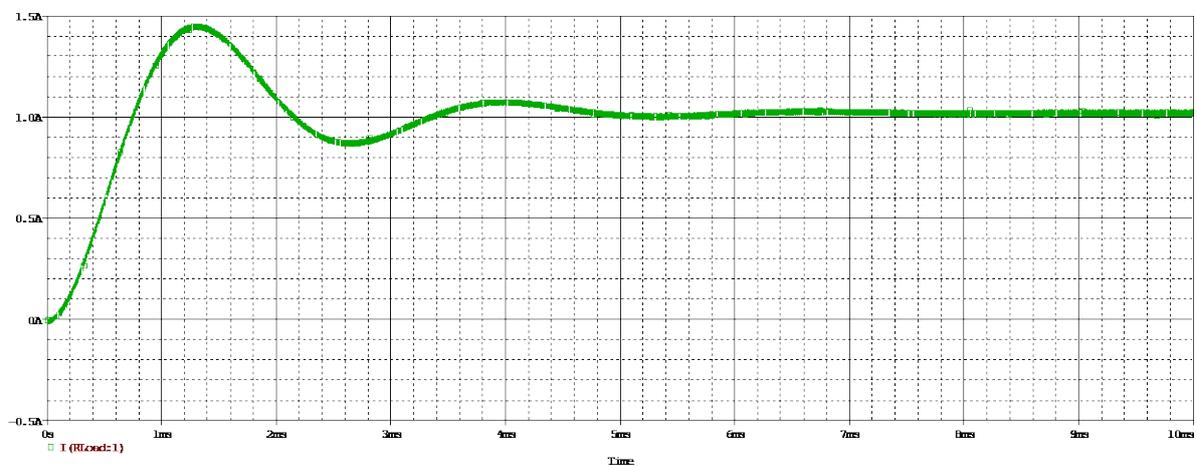


Figura 48. Corriente de salida del convertidor Buck-Boost trabajando en modo Buck.

Como se ha mencionado anteriormente, la tensión de la inductancia en este caso debe tener el mismo valor que V_1 , es decir, ser una señal de ancho de pulsos con un valor máximo de 24 V, como se puede apreciar en la Figura 49. Además, la gráfica de la corriente de la inductancia se puede observar en la Figura 50, donde se puede apreciar que la corriente llega a su valor máximo de 2,25 A.

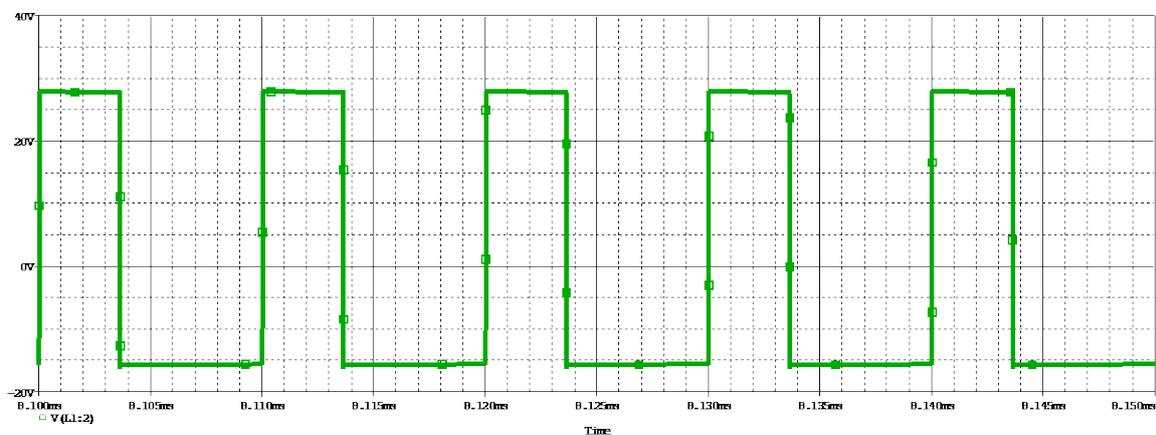


Figura 49. Tensión de la bobina del convertidor Buck-Boost trabajando en modo Buck.

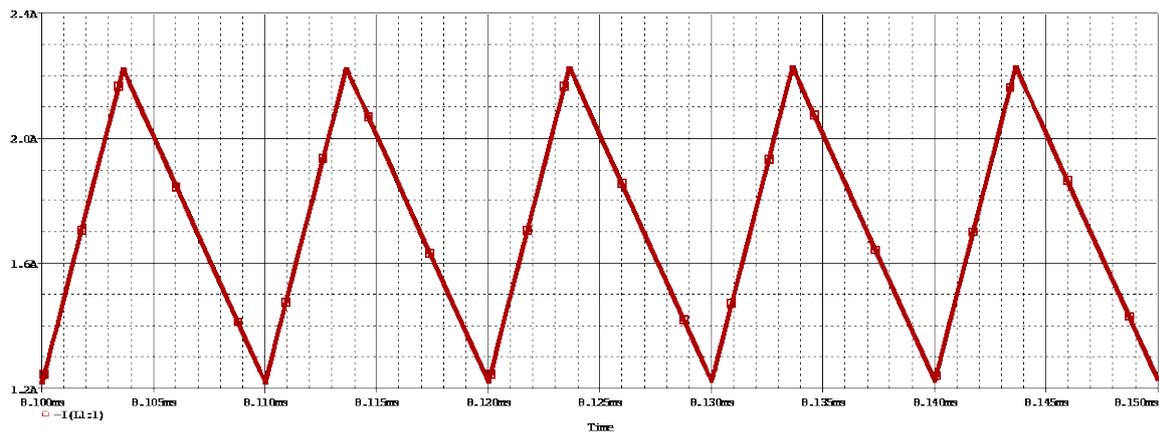


Figura 50. Corriente de la bobina del convertidor Buck-Boost trabajando en modo Buck.

Posteriormente, se simula el circuito mostrado en la Figura 45, es decir, funcionando en modo Boost. Como se ha realizado previamente, se procede a verificar su correcto funcionamiento en función de si cumple con lo establecido en la teoría. La Figura 51 y 52 muestran respectivamente la tensión y corriente de la carga, las cuales deben rondar entre 24 V y 1 A, y, como se puede comprobar lo cumple.

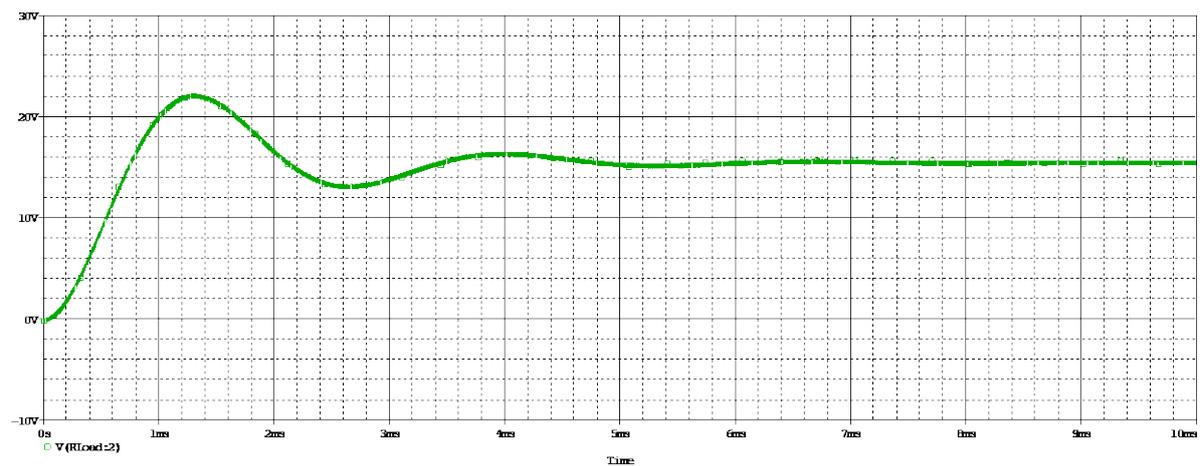


Figura 51. Tensión de salida del convertidor Buck-Boost trabajando en modo Boost.

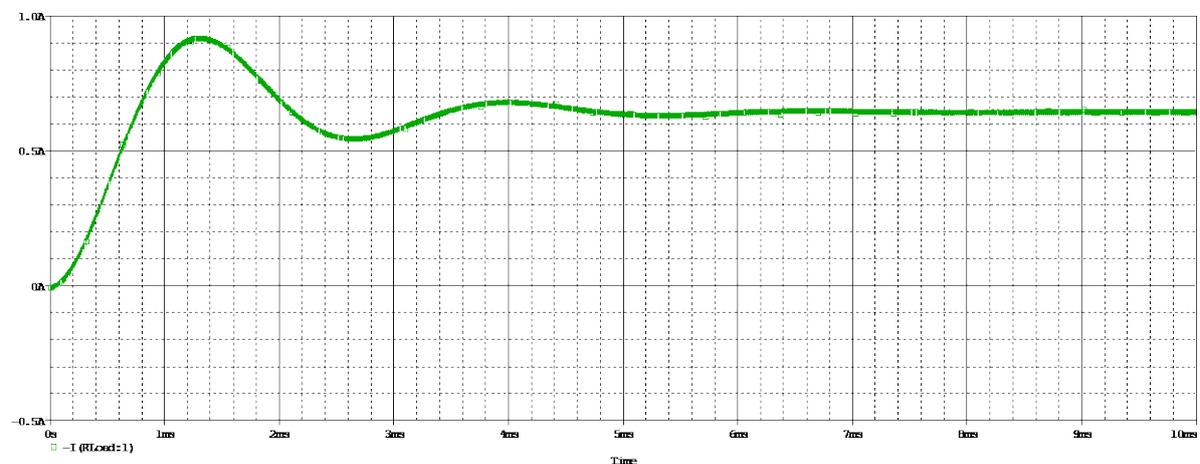


Figura 52. Corriente de salida del convertidor Buck-Boost trabajando en modo Boost.

En este caso, la tensión de la bobina debe ser de 15 V, que, como podemos observar en la Figura 53 se cumple.

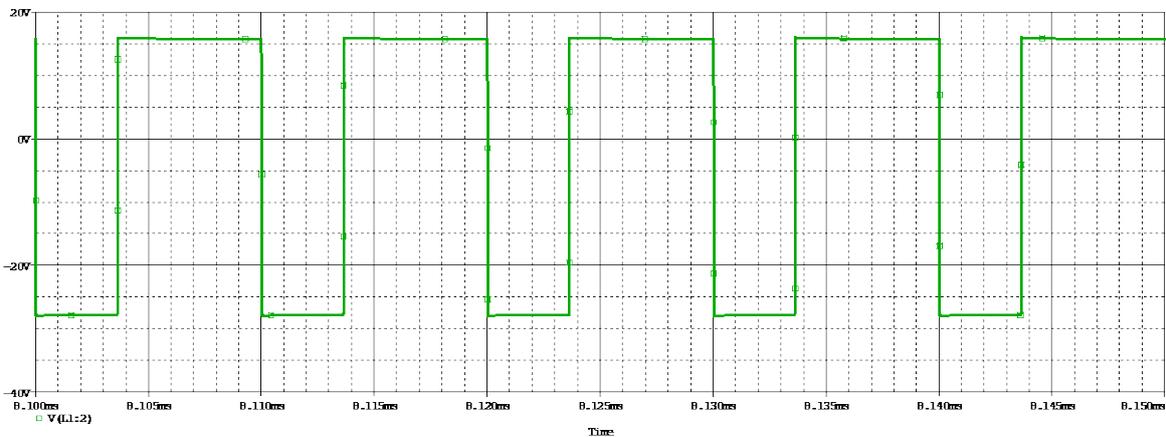


Figura 53. Tensión de la inductancia del convertidor Buck-Boost trabajando en modo Boost.

Como se ha podido observar a lo largo de la simulación, el diseño de este convertidor es sencillo y garantiza el funcionamiento de ambos modos. El circuito da una alta eficiencia, la cual oscila entre el 90% y el 96% [26]. En este caso se han utilizado MOSFET con diodos incorporados, los cuales facilitan el flujo de potencia bidireccional. Sin embargo, en casos experimentales reales, serán necesarios diodos de potencia antiparalelos adicionales, lo cual dará lugar a eficiencias más bajas. Además, de que pueden requerir una selección más cuidadosa de los componentes para reducir las pérdidas [26].

5.3 CUK

En este subapartado se modela y simula la topología CUK.

5.3.1 DISEÑO DEL CONVERTIDOR

Esta topología, mostrada en la Figura 54, sirve para minimizar el rizado de corriente en los extremos de entrada y de salida del convertidor. Como se ha mencionado anteriormente, el convertidor Cuk es una combinación de la topología Boost y Buck, que consiste en un condensador en serie con la función de almacenamiento de energía, donde la tensión de salida puede ajustarse por encima o por debajo de la tensión de entrada según el ciclo de trabajo. La carga y la fuente de tensión se conectarán a la entrada o salida dependiendo del funcionamiento que se requiera.

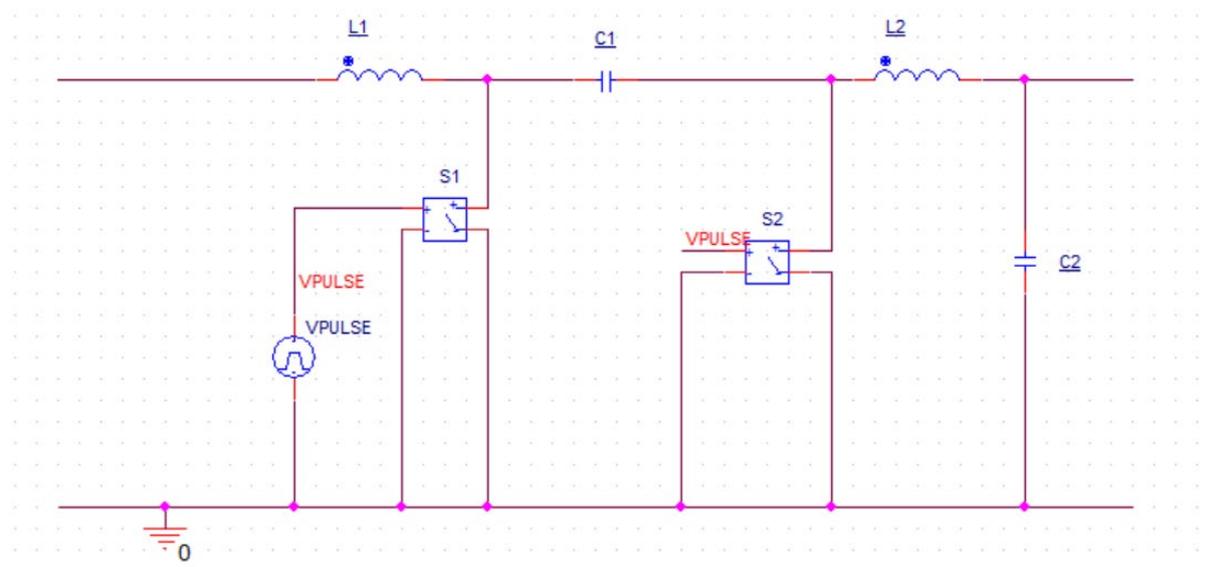


Figura 54. Esquemático del diseño del convertidor Cuk.

Al implementar este tipo de tecnología en aplicaciones como las anteriormente mencionadas, se experimentan pérdidas debido a las transiciones de conmutación. Con el objeto de combatir estos inconvenientes, se implementan técnicas de conmutación suave, como la ZVS y la ZCS. Esta técnica puede lograrse mediante la acción de sujeción, ya que los circuitos resonantes absorben casi toda la reactancia parasita de los interruptores, incluyendo las capacitancias de salida de los transistores, lo que hace que este convertidor sea adecuado para el funcionamiento a alta frecuencia.

El funcionamiento es muy sencillo; en el primer modo se cierra S1 cuando se aplica el pulso $t = 0$, durante el cual la corriente del inductor aumenta, siendo el condensador el encargado de proporcionar energía a la carga. Posteriormente, en el modo 2, S2 sería controlado por el generador de pulsos y S1 actuaría como un diodo normal. Es decir, el condensador C1 se carga desde la alimentación de entrada y la energía almacenada en el inductor L2 se transfiere a la carga. Al estar formado por la combinación de convertidor Boost y Buck, la energía de la tensión de entrada se almacena a través del condensador C1 antes de ser transferida a la tensión de salida.

Los datos del diseño del convertidor se muestran en la Tabla 9 [27].

Tabla 9. Datos generales del convertidor Cuk.

Datos del convertidor	
Tensión de entrada	155,57 V
Frecuencia de conmutación	50 Hz
Potencia media de salida	400 W
Resistencia de carga	50 Ω
Rizado de corriente pico a pico en la bobina de entrada	30 %

Rizado de tensión pico a pico en el condensador de salida	10 %
--	------

Conocidos los datos generales del convertidor, se procede a calcular los parámetros de este.

La tensión de salida se calcula con (12). Para obtener la corriente de la carga, se sustituirá en esta ecuación la tensión por su fórmula respecto a la corriente y la carga según la Ley de Ohm.

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_{load}} \quad (12)$$

Donde V_o es la tensión de salida, P_o la potencia de salida y R_{load} la carga del convertidor.

En este caso, el ciclo de trabajo se obtiene con (13). Donde V_o es la tensión de salida, V_{in} es la tensión de entrada y D es el ciclo de trabajo.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} \quad (13)$$

Los valores de los elementos requeridos para el convertidor Cuk se muestran en la Tabla 10. Los valores de dichos parámetros se obtienen de las siguientes ecuaciones.

Conociendo el rizado pico a pico de la bobina se puede obtener la corriente de entrada, I_{in} , y por tanto el cálculo de la inductancia, mostrado en la Ecuación 14 [27].

$$L_1 = \frac{V_{in}D}{\Delta i_L I_{inf}} \quad (14)$$

Aplicando la relación entre tensión de entrada y tensión de salida cuando el convertidor trabaje en el límite de DCM [27], se obtiene el cálculo de la segunda inductancia, mostrado en la Ecuación 15 [27]. Donde R_{load} es la carga del convertidor, y los demás parámetros los comentados anteriormente.

$$L_2 = \frac{\frac{R_{load}(1-D)^2}{2f} L_1}{L_1 - \frac{R_{load}(1-D)^2}{2f}} \quad (15)$$

Con relación a los condensadores, sus ecuaciones se muestran en la Ecuación 16 y 17 respectivamente [27].

$$C_2 = \frac{P_o}{2\pi 2f V_o \frac{\Delta V_o pp}{2}} \quad (16)$$

$$C_1 = \frac{I_o D}{0.2 (V_{in} + V_o) f} \quad (17)$$

Tabla 10. Datos del convertidor Cuk [27].

Datos del convertidor	
Tensión de salida	141,421 V

Corriente de la carga	2,8284 A
Ciclo de trabajo	0,476
Inductancia de entrada	810 μ H
Inductancia de salida	162 μ H
Condensador de salida	810 μ F
Condensador de entrada	481 μ F

Una vez obtenidos todos los datos necesarios para su diseño, se modela el convertidor. Como se ha explicado anteriormente, cuando el convertidor requiera que se trabaje de izquierda a derecha, la fuente de alimentación debe ir a la izquierda, mientras que la carga a la derecha, como se muestra en la Figura 55. Sin embargo, en caso de requerir lo contrario, se trabajará como Boost, fluyendo la energía de derecha a izquierda, por lo que la fuente y la carga se intercambiarán, como se puede observar en la Figura 56.

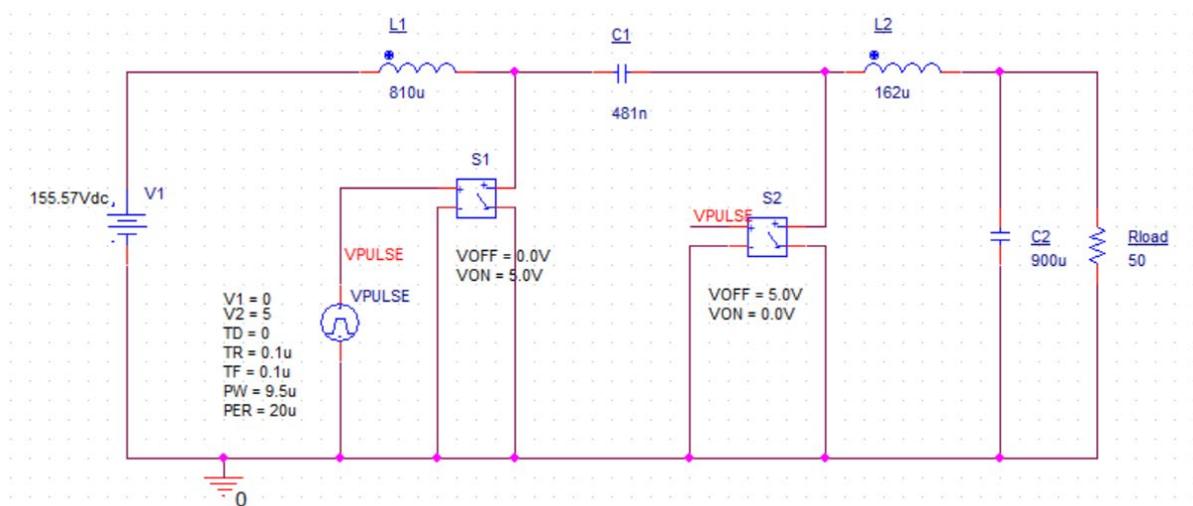


Figura 55. Esquemático del diseño del convertidor Cuk de izquierda a derecha.

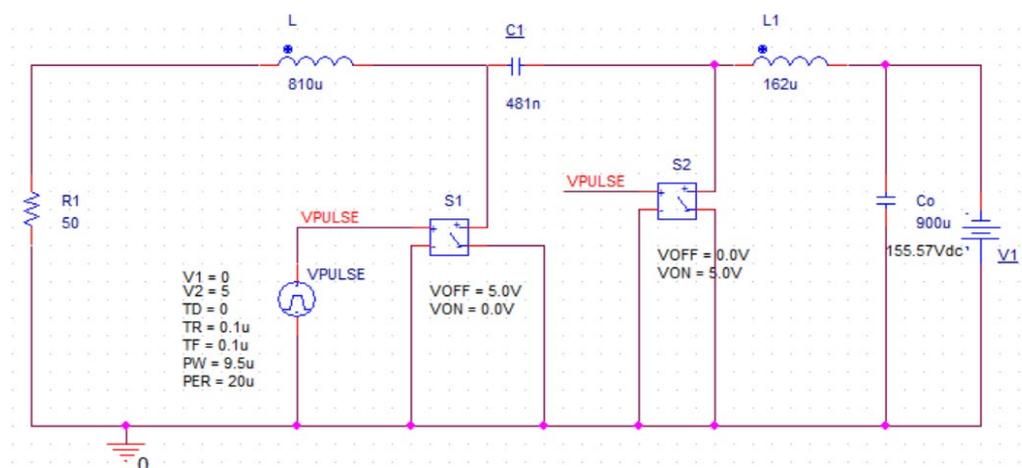


Figura 56. Esquemático del diseño del convertidor Cuk de derecha a izquierda.

5.3.2 SIMULACIÓN

Primero, se simulará el convertidor cuando la energía fluya de izquierda a derecha, mostrado en la Figura 55. Para comprobar su correcto funcionamiento, verificamos que la tensión de salida y la corriente de salida sean las deseadas, mostradas en las Figuras 57. En las Figuras 58 y 59 se puede observar el valor de estas.

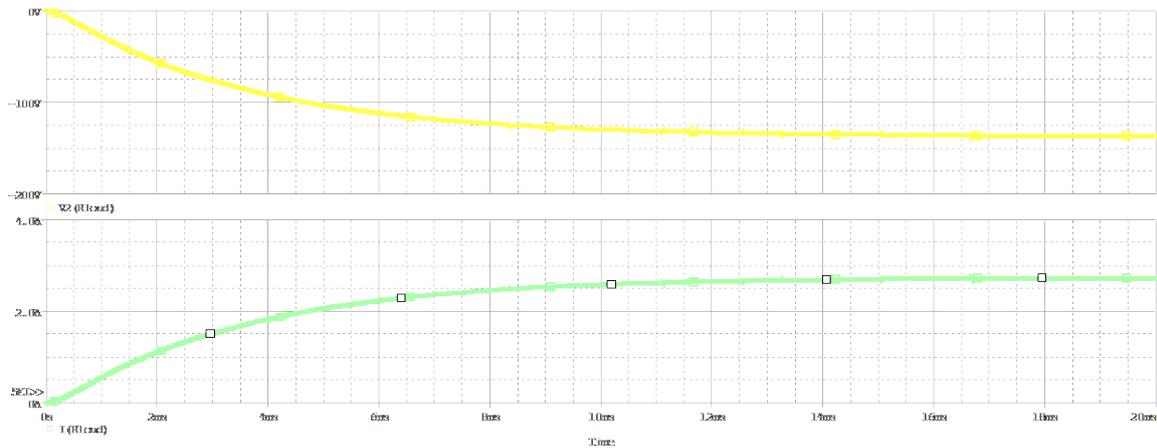


Figura 57. Tensión y corriente de salida del convertidor Cuk fluyendo la energía de izquierda a derecha.

X Values		19.182m
CURSOR 1,2	I(Rload)	2.7302

Figura 58. Valor de la corriente de salida del convertidor Cuk fluyendo la energía de izquierda a derecha.

X Values		17.958m
CURSOR 1,2	V2(Rload)	-136.304

Figura 59. Valor de la tensión de salida del convertidor Cuk fluyendo la energía de izquierda a derecha.

Para comprobar la bidireccionalidad, se comprueba el convertidor cambiando la fuente de alimentación por la carga, tal y como se muestra en la Figura 55. Igual que en el caso anterior, los valores de la tensión y corriente de salida tienen que coincidir con los datos del convertidor, es decir, sobre 141 V y 2,86 A. En este caso, las ondas quedarán en sentido contrario al anterior, como se puede observar en la Figura 60.

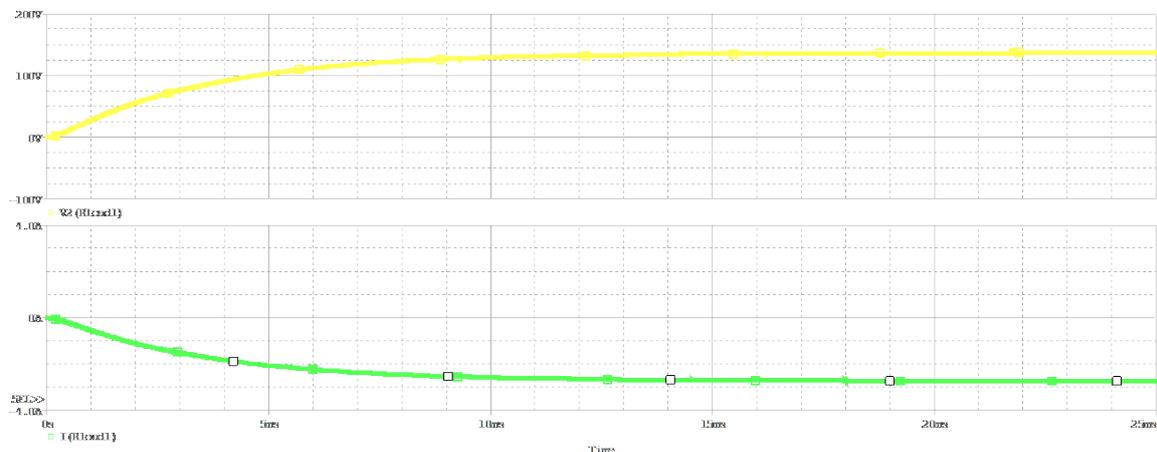


Figura 60. Tensión y corriente de salida del convertidor Cuk fluyendo la energía de derecha a izquierda.

En las Figuras 61 y 62 se puede observar el valor exacto de la tensión y corriente de salida respectivamente. Como se puede comprobar, son parecidos a los calculados en el otro modo de funcionamiento, los cuales eran de 136,304 V y 2,7304 A. Siendo los dados en los datos del convertidor 141 V y 2,86 A. Esta diferencia de 5 V y de 0.13 A puede deberse a la inexactitud con la que se obtienen los valores de los parámetros teóricamente.

CURSOR 1,2	V2(Rload1)	136.796 (
------------	------------	-----------

Figura 61. Valor de la tensión de salida del convertidor Cuk fluyendo la energía de derecha a izquierda.

	X Values	15.850m
CURSOR 1,2	I(Rload1)	-2.7130

Figura 62. Valor de la corriente de salida del convertidor Cuk fluyendo la energía de derecha a izquierda.

Como se ha podido observar a lo largo de la simulación, el diseño de este convertidor es sencillo, aunque no tanto como el Buck-Boost y garantiza el funcionamiento de ambos modos, cumpliendo la condición de bidireccionalidad. El circuito da una alta eficiencia, en los dos modos de funcionamiento, la cual se muestra en la Figura 63, la cual llega a un máximo de 90.87 %, como se puede observar en la Figura 64.

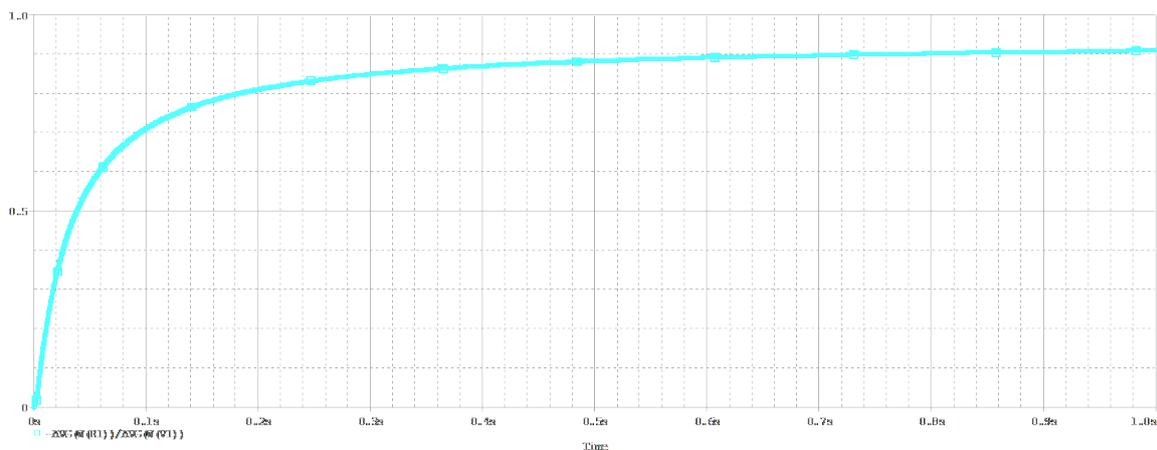


Figura 63. Rendimiento del convertidor Cuk.

Trace Color	Trace Name	Y1
	X Values	1.0000 (
CURSOR 1,2	-AVG(W(R1))/AVG(W(V1))	908.721m (

Figura 64. Rendimiento máximo del convertidor Cuk.

5.4 DAB

En el presente subapartado se desarrolla el modelado y simulación del convertidor DC-DC bidireccional DAB.

5.4.1 DISEÑO DEL CONVERTIDOR

Como se ha mencionado anteriormente, los convertidores de doble puente activo pueden alcanzar una alta densidad de potencia, una alta eficiencia energética y un amplio rango de ganancia. Esta topología puede diseñarse tanto de puente completo como de medio puente. Para garantizar una mayor eficiencia, los circuitos deben diseñarse para funcionar en condiciones de conmutación suave. El comportamiento del convertidor varía según el modo de trabajo. Es decir, se deben de tener en cuenta condiciones como la ubicación de la carga y la fuente.

El funcionamiento consta de un lado de baja tensión (*Low Voltage, LV*) hacia un lado de alta tensión (*High Voltage, HV*), siendo la conversión DC-AC-AC-DC, permitiendo la transferencia de energía a través de un transformador de alta frecuencia. Puede trabajar tanto como Boost, como Buck, como se ha explicado anteriormente. Las fuentes de pulso se diseñarán siguiendo los esquemas de las Figuras 65 y 66, los cuales concuerdan con la explicación de su funcionamiento dada en el Capítulo 2.

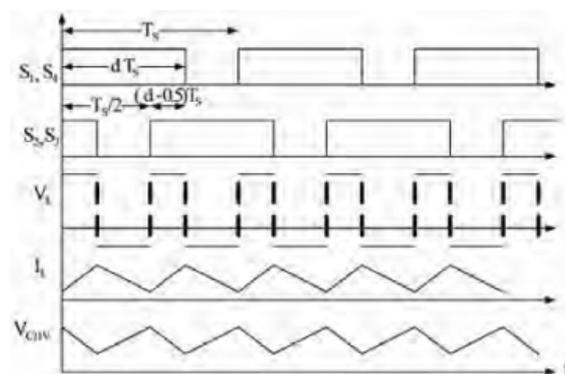


Figura 65. Señales de conmutación modo Boost del convertidor DAB [28].

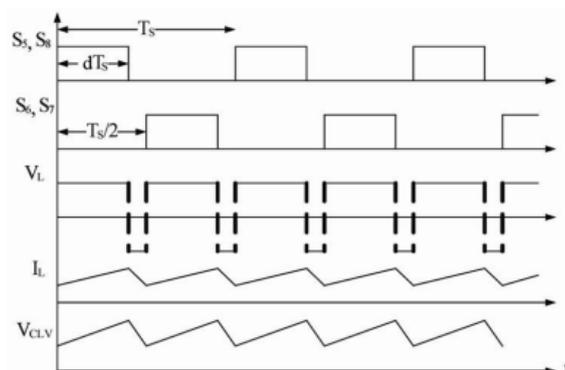


Figura 66. Señales de conmutación modo Buck del convertidor DAB [28].

Por lo tanto, cada interruptor debe ir conectado a una fuente de pulsos distinta, ya que no conmutan en los mismos instantes de tiempo y sus correspondientes fuentes no van conectadas al mismo nodo.

Es decir, como se puede ver en el esquema de la Figura 67, la fuente de M1 debe de ir conectada al nodo LV1 y a LV, y la de su interruptor diagonal, M4 debe de ir conectada a LV2 y a tierra.

Las siguientes ecuaciones muestran el procedimiento para obtener los diferentes parámetros del convertidor DAB.

La Ecuación 18 [29] muestra la inductancia de fuga, la cual es el parámetro más importante de esta topología. Esta ecuación significa que un valor bajo de inductancia conducirá a una alta capacidad de transferencia de potencia.

$$P = \frac{nV_1V_2(\pi-\Phi)}{2\pi^2fL} \quad (18)$$

Donde P es la potencia, V_1 y V_2 las tensiones de entrada y salida respectivamente, f la frecuencia de conmutación y Φ el cambio de fase.

El cambio de fase se obtiene con la Ecuación 19 [29] y depende del valor de la inductancia de fuga.

$$\Phi = \frac{\pi}{2} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{8 \times F_s \times L \times P_{out}}{n \times V_1 \times V_2}} \right) \quad (19)$$

La selección de los condensadores se debe hacer teniendo en cuenta el rizado, ya que este valor afecta al valor de la tensión de salida, se muestra en la Ecuación 20 [29].

$$C \frac{dV_2}{dt} = \frac{V_1}{X_L} \Phi \left(1 - \frac{\Phi}{\pi} \right) - \frac{V_2}{R} \quad (20)$$

Atendiendo a estas ecuaciones, en [29] se obtienen los siguientes datos del convertidor, mostrados en la Tabla 11.

Tabla 11. Datos del convertidor DAB [28]

Datos del convertidor	
Tensión de entrada	380 V
Tensión de salida	28 V
Ciclo de trabajo	0,3
Inductancia	41,454 μH
Condensador de salida	1000 μF
Condensador de entrada	1360 μF
Potencia de salida	5 kW

Ratio del transformador	<i>1:13</i>
Frecuencia de conmutación	<i>70 kHz</i>
MOSFET del lado primario	<i>SPW47N60C2</i>
MOSFET del lado secundario	<i>IRFP064V</i>

En la Figura 67 y 68 se muestra el esquemático de esta topología y las fuentes de pulsos de cada interruptor respectivamente.

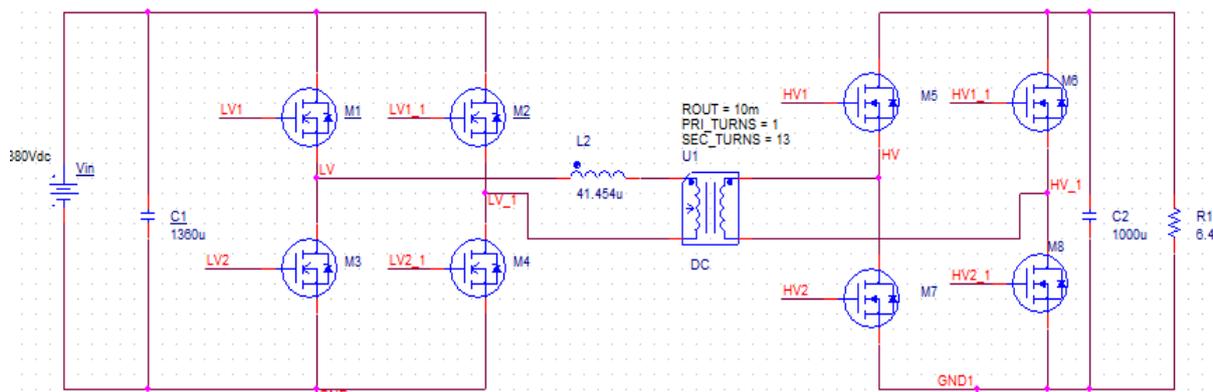


Figura 67. Esquemático de la simulación del convertidor DAB.

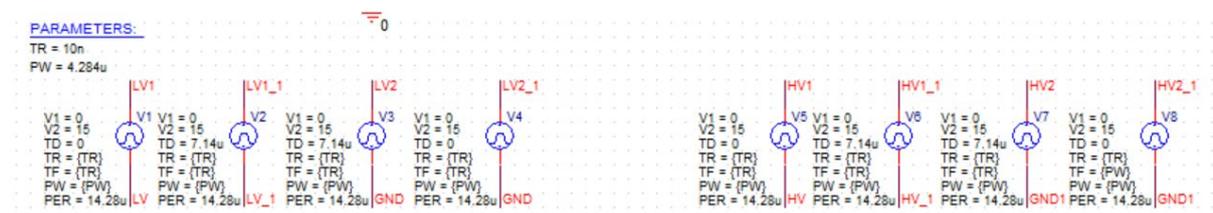


Figura 68. Fuentes de pulso del convertidor DAB.

5.4.2 SIMULACIÓN

Una vez diseñado el convertidor, se procede a comprobar su correcto funcionamiento, verificando que la tensión de salida y las tensiones alternas de cada lado del transformador sean las correctas en ambos modos de funcionamiento. En [28] se supone un rendimiento del 90%.

Primero simularemos el circuito cuando la energía fluya de izquierda a derecha. Las tensiones alternas mencionadas anteriormente deben ser como las mostradas en la Figura 69 [28], siendo 0,3 el ciclo de trabajo del convertidor. Como se puede observar en la Figura 70, ambas señales coinciden.

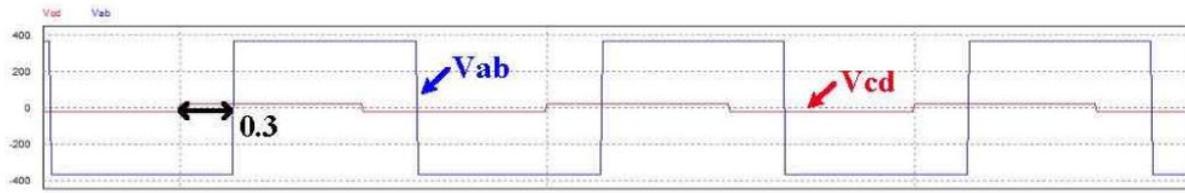


Figura 69. Tensiones alternas del convertidor DAB [28].

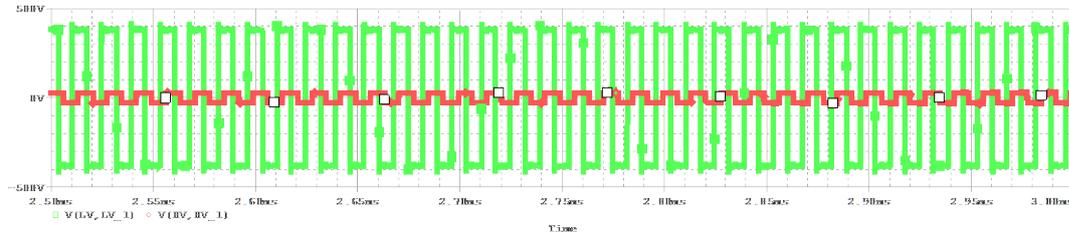


Figura 70. Tensiones alternas del convertidor DAB.

Como se ha explicado en el Capítulo 2, los MOSFET deben de activarse diagonalmente, es decir, la fuente de pulsos de M1 y M4 debe de ser igual, mientras que la de M2 y M3 estarán desfasadas. En la Figura 71 y 72 se muestran las señales de modulación de LV y HV respectivamente. Se puede observar que cada par de MOSFET es igual.

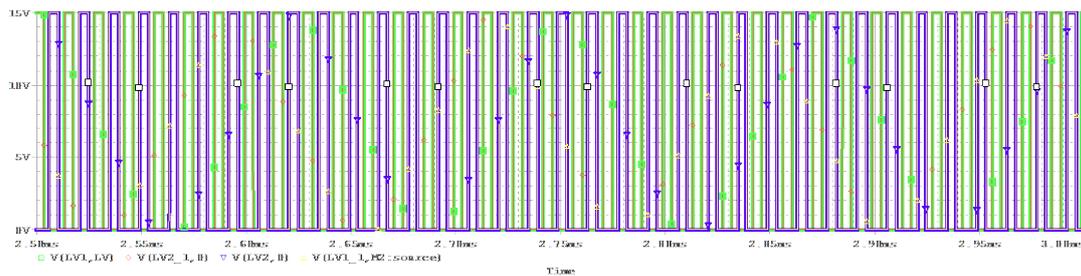


Figura 71. Señales de conmutación del convertidor DAB en LV.

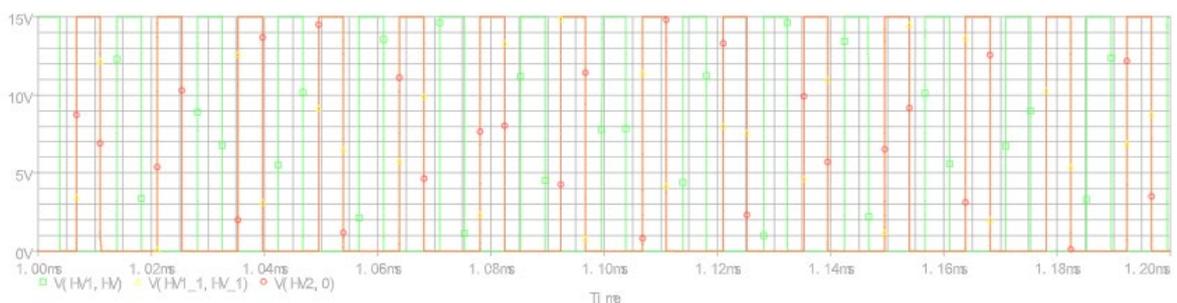


Figura 72. Señales de conmutación del convertidor DAB en HV.

En la Figura 73 se puede ver la tensión de salida del convertidor, la cual debe de tener un valor teórico de 28 V [28]. En esta simulación el valor es de 27,611, el cual se puede observar en la Figura 74.

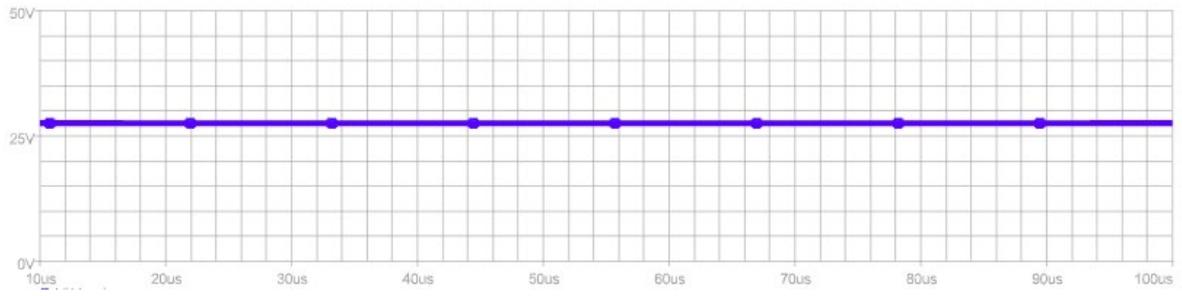


Figura 73. Tensión de salida del convertidor DAB.

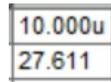


Figura 74. Valor de la tensión de salida del convertidor DAB.

6. CONCLUSIONES

La finalidad de este proyecto consiste en la revisión del estado del arte de los principales convertidores DC-DC bidireccionales. Además de su explicación teórica, se ha hecho un análisis de las aplicaciones más investigadas y empleadas actualmente, como son los sistemas híbridos de almacenamiento y los transformadores de estado sólido. Con respecto a los HESS, se ha analizado su importancia en los vehículos eléctricos, para baterías o frenados regenerativos, y en energías renovables. Como se ha explicado a lo largo del proyecto, estos sistemas emplean los convertidores revisados, además de baterías o supercondensadores. Una vez hecha la correspondiente revisión de estos convertidores, se han simulado los considerados más importantes en este proyecto, es decir, los más empleados en las aplicaciones comentadas.

A lo largo del proyecto, se ha realizado una comparativa de los principales convertidores DC-DC bidireccionales, explicando cómo obtener la bidireccionalidad y argumentando los beneficios de usarlos en según qué aplicaciones. Basándonos en esta comparativa, se han analizado diversos artículos en los que se emplean dichos convertidores en las aplicaciones mencionadas anteriormente. Se han seleccionados los mejores convertidores basándonos en el rendimiento y en la complejidad, optando por el Boost o Buck, Buck-Boost, Cuk y DAB.

Como se ha mencionado anteriormente, las principales ventajas del Boost o Buck y del Buck-Boost frente a los demás, es el menor número de elementos y su baja complejidad, lo que reduce considerablemente el gasto frente a por ejemplo el DAB, el cual tiene un gran número de interruptores, siendo así más complejo y caro. Sin embargo, con el convertidor DAB se consigue una alta ganancia de tensión y menores niveles de corriente. Con respecto a la topología CUK, su principal característica es la capacidad de eliminar las ondulaciones de la corriente de entrada con inductores. Por lo que estas topologías son óptimas para aplicaciones como las que se han mencionado en este trabajo.

Los sistemas híbridos de almacenamiento se componen de supercondensadores y/o baterías. La utilización de estos componentes junto con los convertidores DC-DC bidireccionales logran un rendimiento muy elevado y una alta velocidad de ciclos de carga y descarga. Estos dos componentes tienen ciertos inconvenientes, como la incapacidad de utilización de los supercondensadores cuando se requieren grandes periodos de tiempo de almacenamiento o la alta degradación de las baterías con altas temperaturas y sobrecargas, perjudicando así su vida útil. Estas desventajas se solucionan mediante su combinación, por ejemplo, los supercondensadores permiten un margen de temperaturas mayor, reduciendo la exposición de las baterías a altas temperaturas.

Se han utilizado los entornos OrCAD y PSpice para simular los convertidores Boost, Buck-Boost, Cuk y DAB, obteniendo los datos de estos de distintos artículos. Se ha comprobado el correcto funcionamiento de su bidireccionalidad simulando los distintos circuitos de dos modos, fluyendo su energía de izquierda a derecha, por ejemplo, de una batería a un motor, y fluyendo de derecha a izquierda, cambiando en este caso la fuente de alimentación y la carga de sitio una con otra. En todos los convertidores se ha conseguido. También, se han simulado las señales de las tensiones y corrientes

de salida para compararlas con los datos dados en las diferentes tablas. Al mismo tiempo, se han obtenido los rendimientos de los convertidores, los cuales se muestran en la Tabla 12:

Tabla 12. Rendimientos de los convertidores simulados.

Rendimientos	
Boost	<i>93,90 %</i>
Buck-Boost	<i>90% - 96 %</i>
CUK	<i>90,87 %</i>
DAB	<i>90%</i>

Como se puede comprobar, son los convertidores más simples los que han resultado unos mayores rendimientos. Debido a estos porcentajes de eficiencia y su bajo coste resultante de una poca complejidad, son los convertidores más utilizados actualmente para aplicaciones como por ejemplo frenado regenerativo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Saman A. Gorji, Hosein G. Sahebi, Mehran Ektesabi and Ahmad B. Rad, "Topologies and Control Schemes of Bidirectional DC-DC Power Converters: An Overview", IEEE, vol. 7, Sep. 2019
- [2] C. C. Chan y Y.S. Wong, "Electric vehicles charge forward", IEE Power Energy Mag, vol 2, nº6, pp, 24-33, Nov. 2004
- [3] E. Wang, F. Yang and M. Ouyang, "A Hybrid Energy Storage System for a Coaxial PowerSplit Hybrid Powertrain", vol 4, Jun. 2017
- [4] J. Wang, B. Wang, L. Zhang, J. Wang, N. I. Shchurov and B. V. Malozyomov, "Review of Bidirectional DC-DC Converter Topologies for Hybrid Energy Storage System of New Energy Vehicles", Journal of Science: Advanced Materials and Devices, Apr. 2022
- [5] A. Kumar, A. H. Bhat and P. Agarwal, "Comparative analysis of dual active bridge isolated DC-DC converter with flyback converters for bidirectional energy transfer", Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering, 2017, 382-387
- [7] S. Li, K. Xiangly and K. M. Smedley, "A Control Map for a Bidirectional PWM Plus Phase-Shift-Modulated Push-Pull DC-DC Converter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, no. 11, pp. 85144-8524, 2017
- [7] Reshma M. S, M. B. Alias, Haritha S. Nair, P. Jose, "Cuk Converter Fed Electric Vehicles", IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, pp. 12-27
- [8] C. Wang, R. Xong, H. He, X. Ding, W. Shen, "Efficiency analysis of a bidirectional DC/DC converter in a hybrid energystorage system for plug-in hybrid electric vehicles", Elsevier Ltd., 2016, pp.612-622
- [9] Y. Zhang, Y. Gao, J. Li, and M. Sumner, "Interleaved Switched-Capacitor Bidirectional DC-DC Converter With Wide Voltage-Gain Range for Energy Storage Systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 5, pp. 3852-3869, 2018.
- [10] H. Tao, A. Kotsopoulos, J.L. Duarte and M.A.M Hendrix, "Family of multiport bi-directional dc-dc converters", IEEE Trans. Power Electron, vol.22, no.1, pp.341-345, Jan. 2007.
- [11] K. Shreelekha, S. Arulmozhi, "Multiport isolated bidirectional DC-DC converter interfacing battery and supercapacitor", ICEEOT, 2016.
- [12] F. Akar, Y. Tavlasoglu, E. Ugur, B. Vural and I. Aksoy, "A bidirectional Non isolated Multi-input DC-DC converter for Hybrid Energy Storage Systems", IEEE transactions on vehicular technology, vol. 65, no. 10, Oct. 2016.
- [13] A. Sharma, R. Mishra, A. K. Yadav, A. Phukan, "Bidirectional DC-DC Converter for Incorporating Regenerative Braking in E-bikes", 8 Third International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECCOT), pp. 14-15, Dec. 2018.
- [14] Chemnitz University of Technology, "Hybrid energy storage systems for renewable energy renewable energy applications", Energy Procedia, pp. 103-111, 2015.

- [15] J. Zeng and X. Du, "A bidirectional multi-port DC-DC converter for the integration of hybrid renewable energy systems", IEEE transactions on power electronics, vol. 36, no. 11, Nov. 2021
- [16] S. Jadhav, N.Devdas, ShakilaNisar and V. Bajpai, "Bidirectional DC-DC converter in Solar PVSystem for Battery Charging Application", Proc. Int. Conf. Smart City Emerg. Technol. (ICSCET), Mumbai, India, Jan. 2018.
- [17] F. Shi, R. Li, J. Yang y W. Yu, "High efficiency bidirectional DC-DC converter with wide gain range for photovoltaic energy storage system utilization", Proc. IEEE Int. Power Electron. Appl. Expo. (PEAC), Shenzhen, China, Nov. 2018.
- [18] J. Tian, C. Ren, Y. Jia, X. Han and P. Wang, "Control Strategy of HESS with Dual Active Bridge Bidirectional DC/DC Converter in DC Microgrid", IEEE, pp. 1449-1453, 2017
- [19] A. S. Estrada, M. C. Murillo, J. D. Realpe, C. A. Santofimio, "Transformadores de estado sólido", Jul. 2022
- [20] H. Liu, S. Cui, H.Zhang, Y. Xue and C. Liu, "Hybrid Bidirectional DC/DC Converter: MutualControl and Stability Analysis", CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS, Mar, 2015
- [21] K. S. Alam, L. A. R. Tria, D. Zhang and M.F. Rahman, "Design of a bidirectional DC-DC converter for SST application by exploiting the shoot through mode", IEEE, pp. 275-286.
- [22] H. Fan and H. Lui, "A Novel Phase-Shift Bidirectional DC-DC Converter with an Extended High Efficiency Range for 20 kVA Solid State Transformer", IEEE, pp. 3870-3876, 2010
- [23] Lara Fernández Gutiérrez, "Convertidor bidireccional de potencia para aplicaciones de vehículos eléctricos".
- [24] Higa, S. Takuma, K. Orikawa y J.-I. Itoh, "Dual active bridge DCDC converter using both full and half bridge topologies to achieve high efficiency for wide load," in Proc. IEEE ECCE, Sep. 2015, pp. 6344-6351.
- [25] Peiwen He and A. Khaligh, "Comprehensive Analyses and Comparison of 1 kW Isolated DC-DC Converters for Bidirectional EV Charging Systems", IEEE TRANSACTIONS ON TRANSPORTATION ELECTRIFICATION, VOL. 3, NO. 1, Mar. 2017.
- [26] S. Sunkara and N. Kondrath, "Design and PSpice Simulation of Synchronous Bidirectional PWM DC-DC Buck-Boost Converter Operating in CCM", 2013 Annual IEEE India Conference (INDICON)
- [27] Ángela López López, "Convertidor Ćuk como emulador de resistencia".
- [28] D. Jeong, M. Ryu, H. Kim y H. Jim, "Optimized Design of Bi-Directional Dual Active Bridge Converter for Low-Voltage Battery Charger", Optimized Design of Bi-Directional Dual Active Bridge Converter for Low-Voltage Battery Charger
- [29] "Optimized Design of Bi-Directional Dual Active Bridge Converter for Low-Voltage Battery Charger", TIDUESOC – JUNE 2019 – REVISED JULY 2022