



# **UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA**

**Master en ingeniería de sistemas electrónicos.**

**Departamento ingeniería electrónica.**

## ***EVALUACIÓN DE CONVERTIDORES DC- DC PARA CONEXION DE PANELES FOTOVOLTAICOS AL BUS DE DISTRIBUCIÓN DE CONTINUA EN MICRORREDES MIXTAS***

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**

**AUTOR/A**

**Àngel Monte Ferrer**

**DIRECTOR/A**

**Dr. Emilio Figueres Amorós**

**Dr. Gabriel Garcerá Sanfelú**

**Valencia, Julio de 2016**



***EVALUACIÓN DE CONVERTIDORES DC-DC PARA  
CONEXION DE PANELES FOTOVOLTAICOS AL BUS DE  
DISTRIBUCION DE CONTINUA EN MICRORREDES MIXTAS***

Autor: Àngel Monte Ferrer

Director: Dr. Emilio Figueres Amorós

Dr. Gabriel Garcerá Sanfelíu



Agradecimientos:

A los profesores y personas que han ayudado desde la universidad,  
a los de casa, a los que están en la distancia, y a los amigos.



## Índice:

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
1.1. Objetivo.....	9
1.2. Justificación .....	11
<b>2. DESCRIPCIÓN DE LAS DIFERENTES TOPOLOGÍAS DE CONVERTIDORES DC-DC.....</b>	<b>12</b>
2.1. Boost:.....	12
2.2. Boost con multiplicador de tensión:.....	17
2.3. Buck:.....	19
2.4. Puentes H, semipuentes y Push-Pull:.....	20
2.5. ZVZCS: .....	28
2.6. Multiplicador de tensión.....	28
2.7. Flyback:.....	29
<b>3. SELECCIÓN DE LOS MEJORES CONVERTIDORES.....</b>	<b>33</b>
3.1. Profundización de las características de los convertidores.....	33
3.1.1. Boost:.....	34
3.1.2. Buck:.....	37
3.1.3. Push-Pull:.....	39
3.2. Comparativa .....	52
3.3. Selección de los mejores rangos para las diferentes tipologías presentadas.....	59
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>61</b>
<b>5. RESUMEN.....</b>	<b>62</b>
<b>6. TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>65</b>



# 1. Introducción

Año tras año la demanda de energía eléctrica de la sociedad española, y mundial en general, va en aumento, lo cual crea la necesidad de disponer de la energía eléctrica suficiente para satisfacer las demandas de consumo. Tanto o más importante como la producción energética, es lograr un máximo aprovechamiento de ésta mejorando el rendimiento de los equipos y de los propios receptores o instalaciones que consumen energía.

## 1.1. Objetivo

Dado que los paneles fotovoltaicos no entregan una potencia constante, ni corriente constante, ni tensión constante, mostrando como ejemplo las curvas de un panel fotovoltaico típico en las Figura 1-1 a Figura 1-4 [1], hace falta un circuito que pueda manejarse bien dentro de ciertas variaciones.

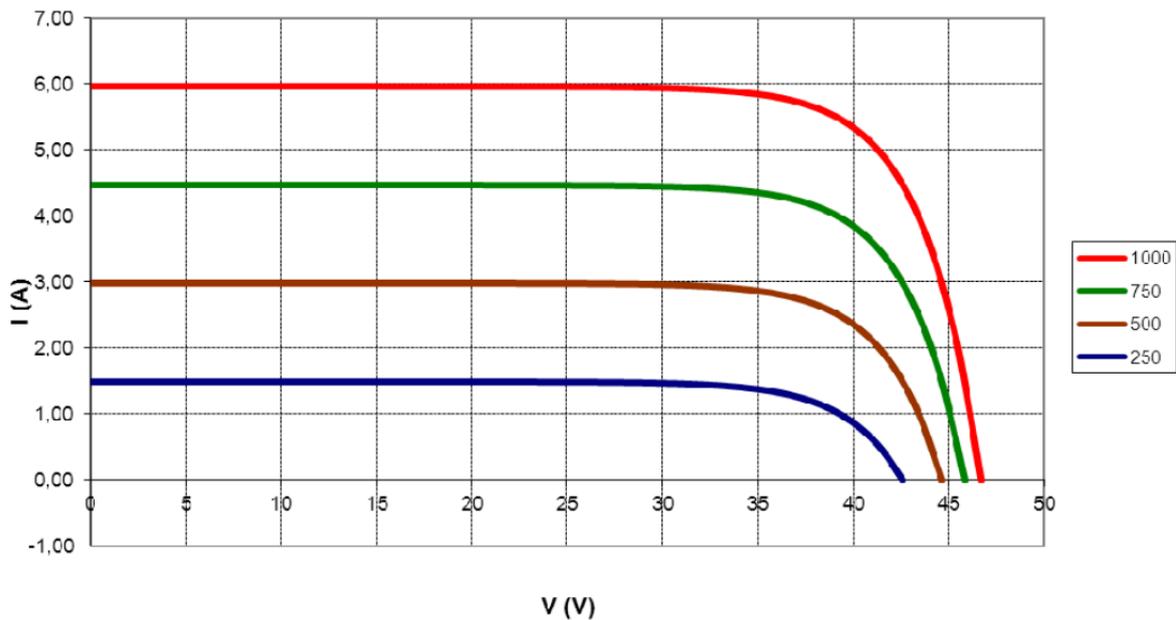


Figura 1-1 Panel solar. Curvas I-V a diferentes Irradiancias.

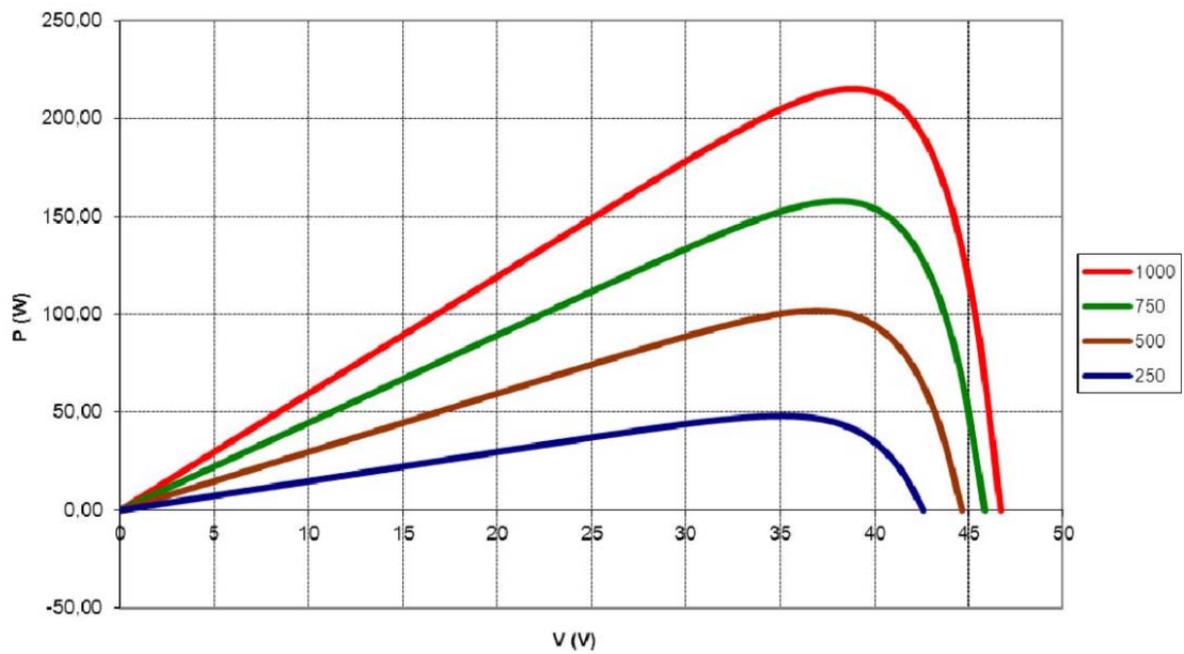


Figura 1-2 Panel Solar. Curvas P-V a diferentes Irradiancias.

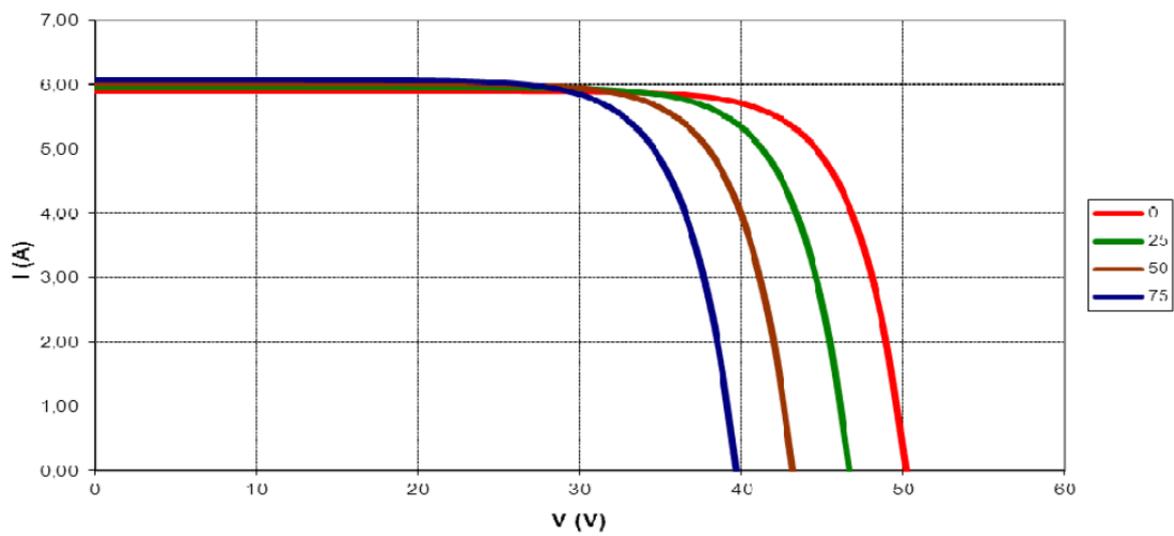
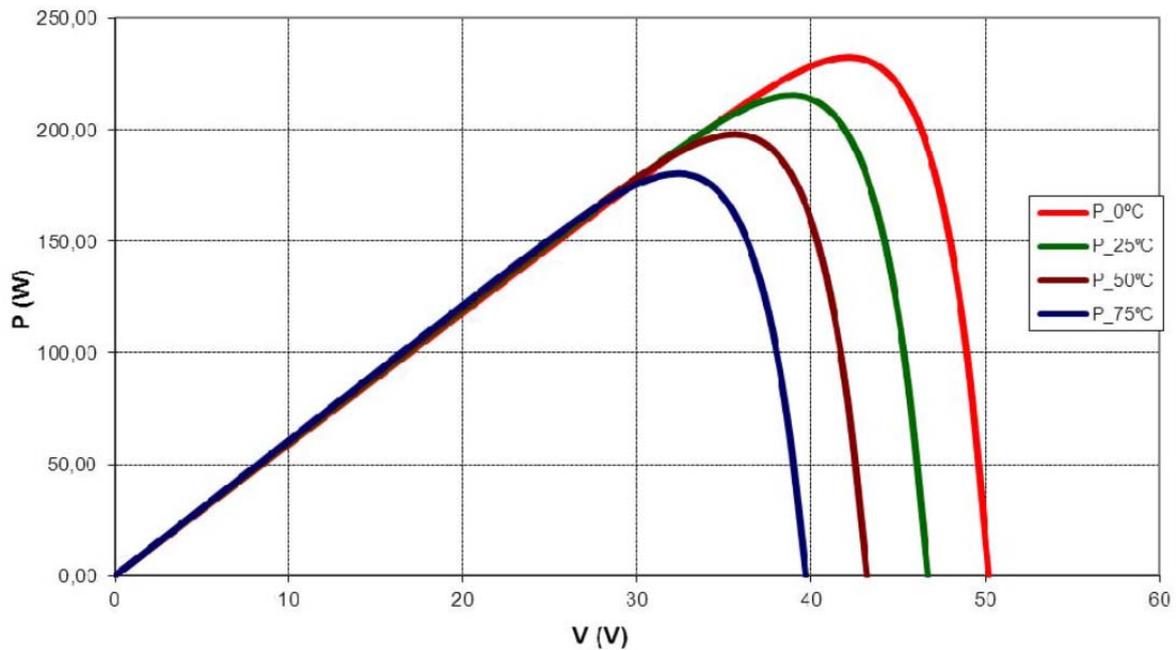


Figura 1-3 Panel Solar. Curvas I-V a diferentes temperaturas.



**Figura 1-4 Panel Solar. Curvas P-V a diferentes temperaturas.**

El objetivo de este trabajo es, de entre todas las tecnologías y topologías de convertidores electrónicos, seleccionar la más apropiada, que pueda funcionar adaptándose a las variaciones de los paneles fotovoltaicos, y que sea la más eficiente para campos fotovoltaicos de alrededor de 5kWp y quede dispuesta para que otro convertidor la inyecte a red o utilizar en DC. Como objetivo final se pretende que continúen las investigaciones y llegar a desarrollar un convertidor completo hasta probarlo en laboratorios y posteriormente en casos reales.

## 1.2. Justificación

En los últimos años se ha despertado un creciente interés por el estudio de los problemas que afectan a la red eléctrica y que degradan la calidad del suministro que reciben los usuarios de la misma. La problemática es muy variada dando lugar a un amplio campo de estudio que, entre otros muchos temas incluye los efectos de la creciente deslocalización de los sistemas de generación, debido a la gran expansión de las energías renovables, y el desarrollo de equipos de compensación activa para la mejora de la calidad del suministro y el ahorro energético.

En este trabajo se pretende aproximarse a una solución para abastecer redes de corriente continua, así como abastecer un inversor desde la red de corriente continua.

---

[1] Fco. J. Gimeno, S. Orts, S. Seguí, Apuntes de Sistemas de generación en Energías Renovables. Universidad Politécnica de Valencia.

## 2. Descripción de las diferentes topologías de convertidores DC-DC.

Para este estudio, se empieza haciendo una descripción de las diferentes topologías encontradas que se utilizan o se han probado para aplicaciones fotovoltaicas, o relacionada, comentando algunas bondades y el rango de potencia en que se utiliza.

### 2.1. Boost:

- Boost simple: [2][3][4]

Este tipo de topología es no aislada, consiste en un elevador de tensión. Encontrándose convertidores comerciales para potencias entre 2kW y 5kW. Se trata de una topología sencilla y probada, con una buena densidad de componentes en el circuito.

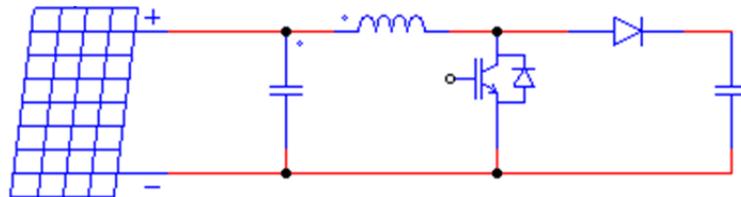


Figura 2-1 Convertidor Boost simple

- Soft Switching Boost: [5]

Este convertidor es útil en el mismo rango que el conversor Boost, en características similares. Es no aislado.

Este tipo de convertidores, es muy similar al anterior, pero incluyendo alguna mejora que repercute en los picos de tensión y de corriente a costa de añadir complejidad en el circuito de potencia y en la programación del control. Este circuito añadido, también puede mejorar la eficiencia del convertidor respecto el convertidor Boost clásico.

Diseñando bien los circuitos de ayuda a la conmutación (red Snubber, red Clamp) se puede llegar a un buen punto en cuanto a sobretensiones, sobrecorrientes, y pérdidas. Sin embargo, dadas las complejidades añadidas respecto al Boost clásico se concluye dejar este convertidor Soft Switching Boost de lado, en favor del Boost simple.

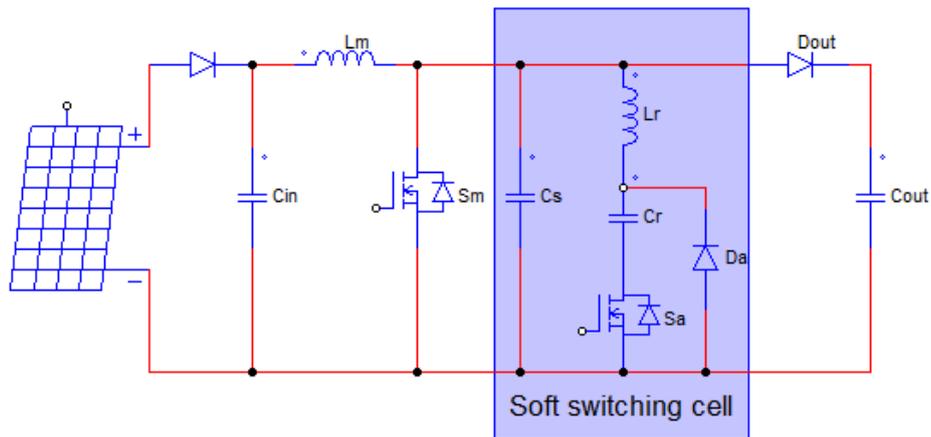


Figura 2-2: Convertidor Soft switching Boost

- Dual Partial Power Boost dc/dc converter, utilizando múltiples convertidores para mayores potencias: [6]

En este circuito se representan dos convertidores Boost en paralelo, donde el condensador de salida se divide en el de entrada y otro en serie. Se pueden hacer buenos diseños para potencias entre 1.5kW y 6kW, incluso algo más. No es complicado montar la placa electrónica debido a que no hay demasiados componentes juntos.

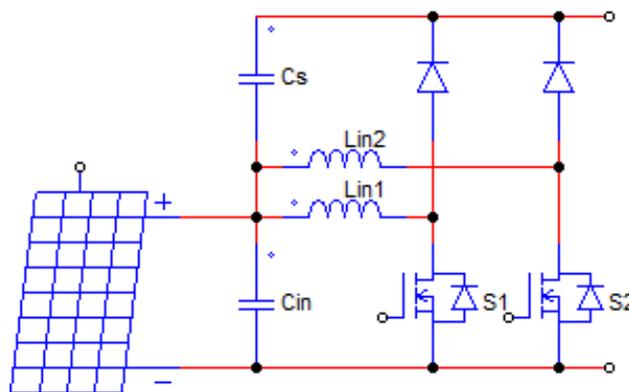


Figura 2-3 Convertidor Dual Partial Power Boost DC/DC

- Three-phase Buck-Boost: [7]

Este circuito consiste en tres Buck-Boost no inversor en paralelo, encontrando un ejemplo de una potencia de 40kW cada rama, con un salto de tensiones muy bajo (de 350~500V en los paneles se pasa a 480V, un salto máximo de 130V).

La topología está bien concebida para un rango de potencia medio – alto, con bobinas no muy grandes (el salto de tensión es pequeño y el rizado de corriente será pequeño), pero

para el rango de potencia en el que se contempla que funcione el pre-diseño que se está llevando a cabo este convertidor no tiene demasiado sentido.

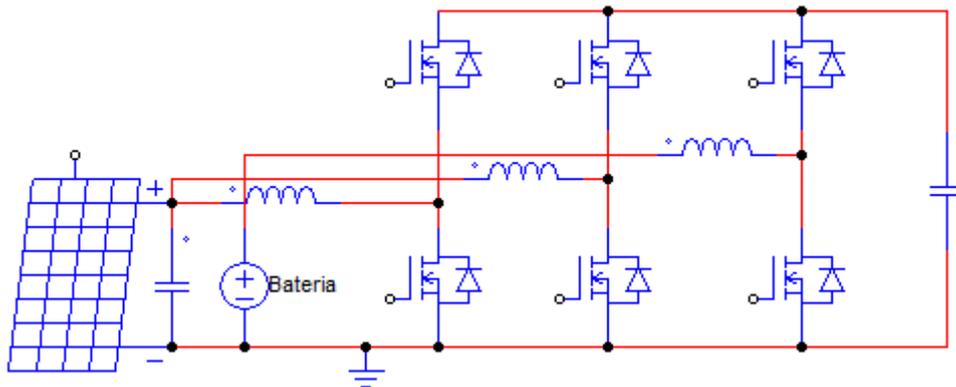


Figura 2-4 Convertidor Three-Phase Buck-Boost

- Dual Three-Phase Boost: [8][9]

En este caso, se observa un Boost trifásico, una topología derivada del primer caso, con lo que las características son similares, y la potencia a manejar puede ir desde la menor de un Boost (2kW), hasta el triple de la máxima (15kW). Con dos Boost trifásicos se duplican las potencias, obteniéndose como ventaja la reducción del rizado de las corrientes de salida, siendo cero cuando ambos convertidores manejan la misma potencia.

Con esta topología, se pueden optimizar las pérdidas, dado que con muy bajas potencias puede funcionar solo un Boost de los tres que hay en el circuito, y a medida que aumente la potencia ir entrando a funcionar los otros transistores del circuito. Aunque el objetivo de este circuito sea reducir el rizado de salida, esta sería otra opción a contemplar.

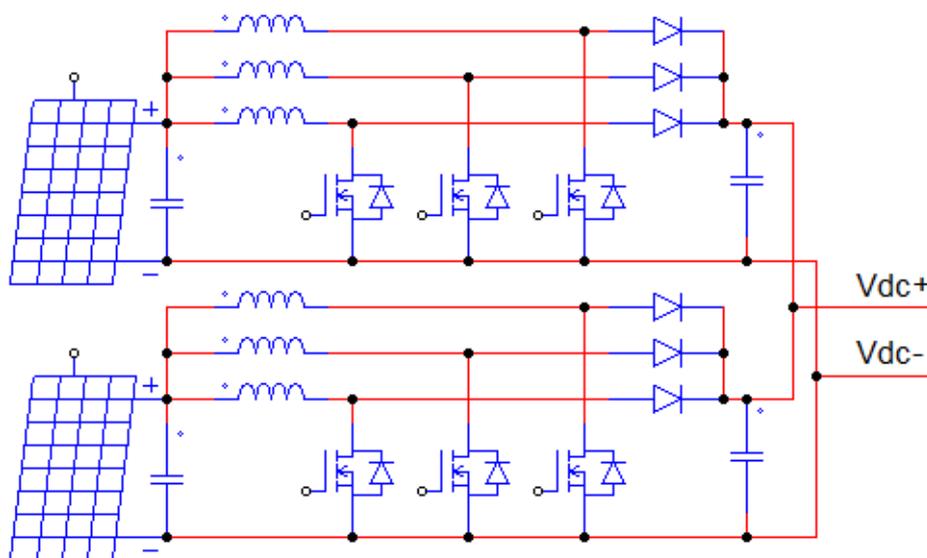


Figura 2-5 Convertidor Dual Three-Phase Boost

- Dual Soft Switching Boost: [10]

Este caso es un convertidor derivado del Soft Switching Boost, añadiéndole complejidad, aumentando el número de diodos y reduciendo el número de transistores (elementos con pérdidas). Se podrían conseguir convertidores para potencias entre 1kW y 10kW.

Como se observa claramente en el esquema, la complejidad del circuito de control es notable dada la cantidad de componentes, el circuito de control no lo sería tanto dado que solo hay que controlar dos transistores a partir de dos corrientes (normalmente  $I_L$ ), pero la programación del control sí que es compleja dado que la conmutación tiene que ser precisa para minimizar sobrecorrientes, sobretensiones y pérdidas.

Igual que en el caso comentado anteriormente, este quedaría descartado por complejidad, dado que los beneficios no son sustanciales en comparación con circuitos Boost con buenas redes Snubber y Clamp.

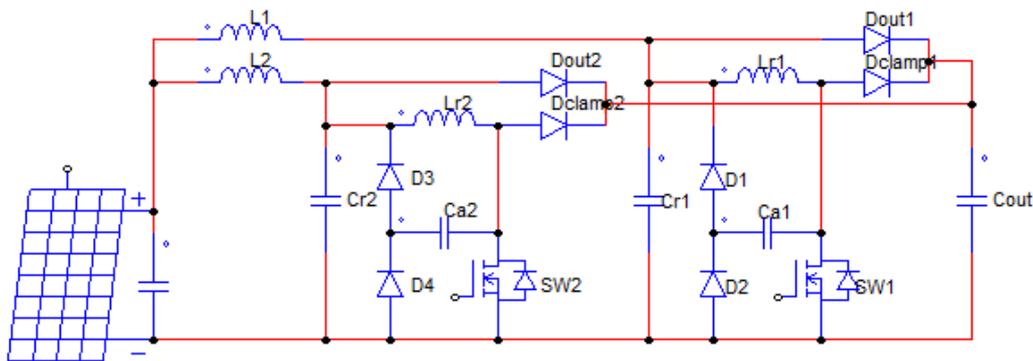


Figura 2-6 Convertidor Dual Soft Switching Boost

- Soft Swiching Interleaved Boost: [11]

Este convertidor es muy similar al anterior, reestructurándolo, encontrado para 3kW. Con lo cual no se va a entrar más en detalle en este capítulo, y como el anterior caso, queda descartado por los mismos motivos.

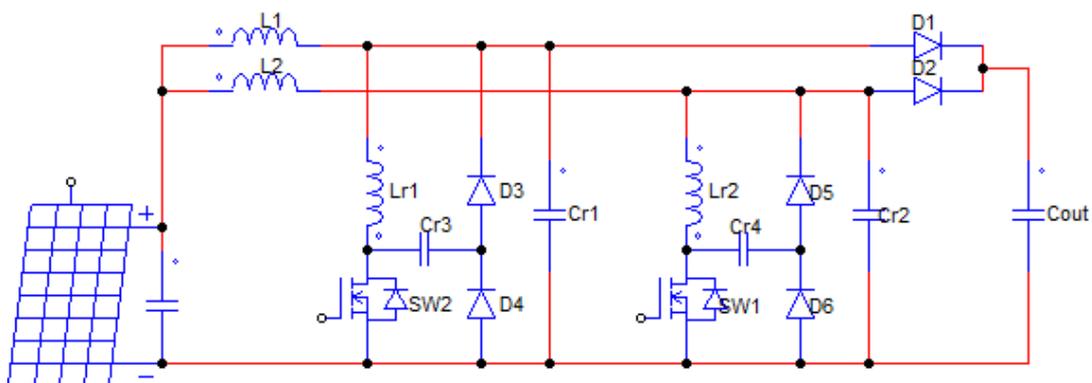


Figura 2-7 Convertidor Soft swiching Interleaved Boost

- Three Level DC-DC converter: [12][13]

Este tipo de convertidor está en el rango de los 6kW, y es similar a dos convertidores Boost. Es no aislado, y se puede utilizar para bus de continua bipolar. Tiene un rango de tensiones de entrada amplio (200~600V → 600V)

Tiene una buena densidad de componentes en la placa. Sería una buena opción para estudiar.

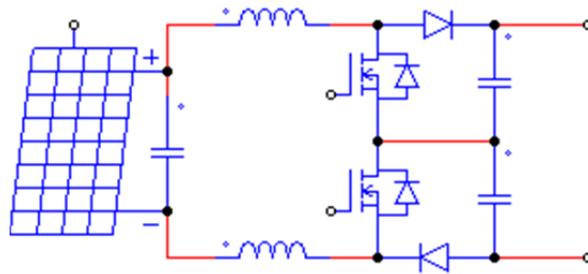


Figura 2-8 Convertidor Three level DC-DC converter

- Hybrid Boost Three-Level DC-DC converter: [14]

Con esta topología se consigue un gran salto de tensión entre la entrada y la salida. Utilizado en un prototipo de 1kW, se podría diseñar para potencias desde los 300W a los 3kW.

No deseable para potencias altas por las grandes corrientes en la parte de baja tensión y los grandes cables necesarios al poner todos los paneles en paralelo. Aceptable para potencias bajas, para uno o dos paneles en paralelo. Con lo cual, esta topología sería aceptable si se decide poner un convertidor cada pocos paneles, con su respectivo MPPT, y de esta forma hacer una red fotovoltaica descentralizada, pero es una topología complicada para fabricar muchos convertidores pequeños.

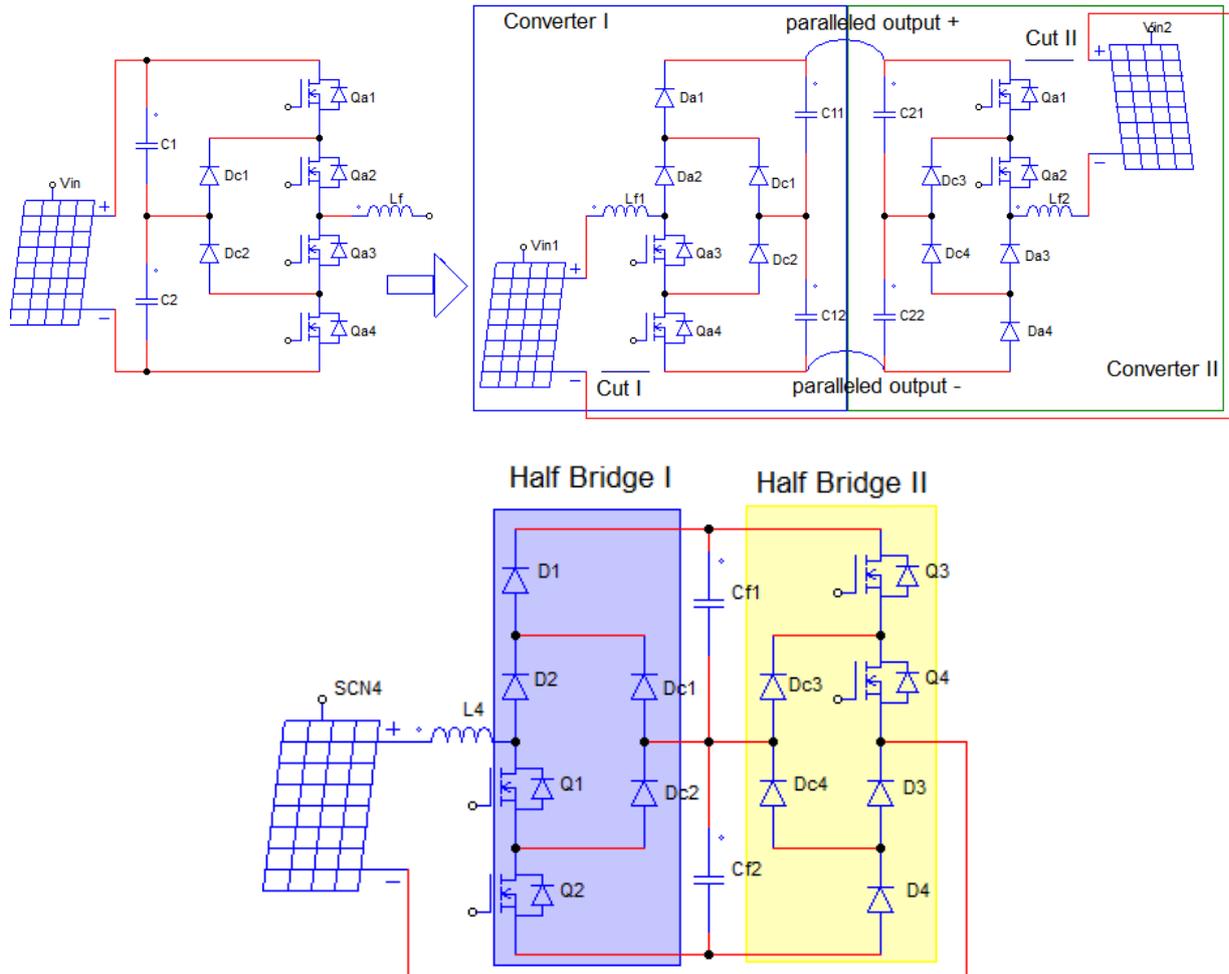


Figura 2-9 Convertidor Hybrid Boost Three-Level DC-DC

## 2.2. Boost con multiplicador de tensión:

- Boost con multiplicador de voltaje (IBVM): [15]

Este tipo de circuito, basado en un Boost, se ha visto en un prototipo de 1.2kW, consiguiendo ganancias de tensión superiores a 10. Con lo que, estas tensiones tan bajas (20~40V) con niveles de potencia superiores a 1kW no son necesarios para generación fotovoltaica, dado que la asociación de paneles en serie es posible y muy habitual, reduciendo las corrientes y las pérdidas en los cables.

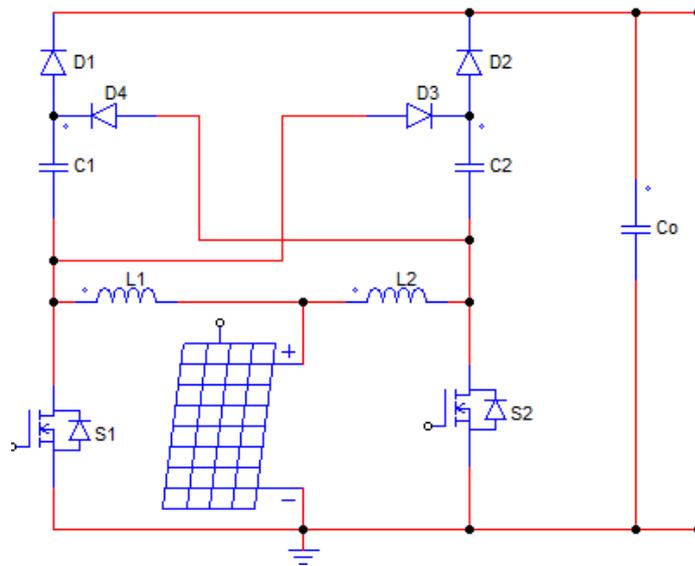


Figura 2-10 Convertidor Boost con multiplicador de voltaje (IBVM)

- Boost más multiplicador de voltaje: [16]

Con este circuito, no aislado, se consiguen ganancias de tensión de 5~20, y se han visto convertidores de 3kW. Con unos 140V de entrada (unos 4 paneles en serie), corresponden 21A, excesiva corriente circulando por el cableado del campo fotovoltaico para este rango de potencias, por lo que esta topología no se considera estudiar en profundidad.

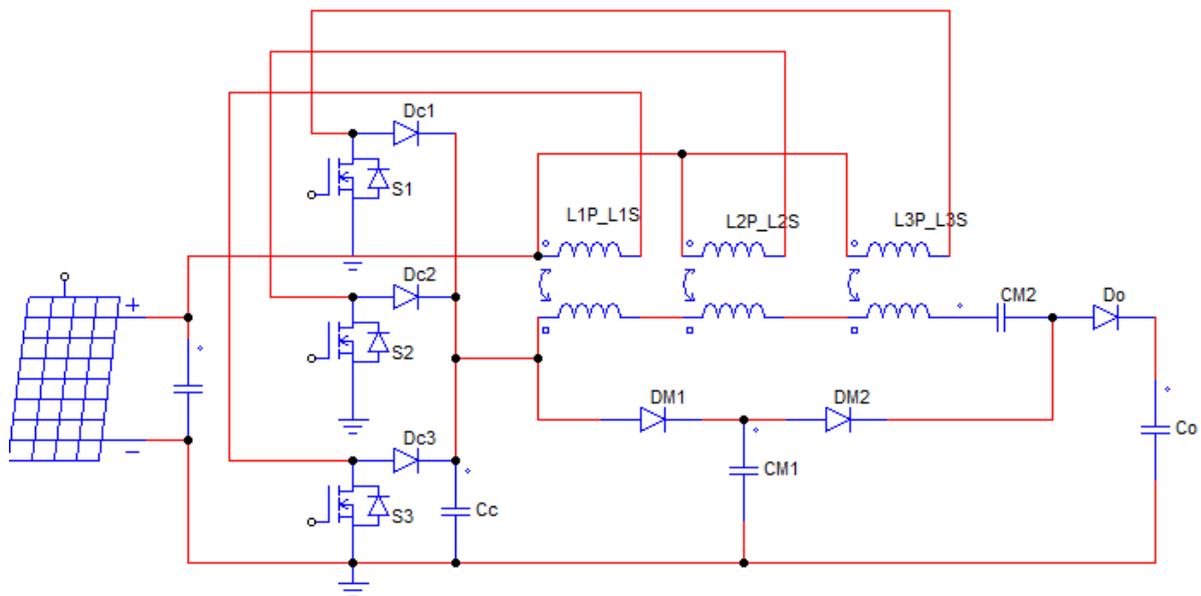


Figura 2-11 Convertidor Boost más multiplicador de voltaje

### 2.3. Buck:

- Buck simple: [17]

Configuración muy sencilla, no aislada, rizado reducido a la salida a cambio de un gran rizado a la entrada. Este reductor de tensión es muy apropiado para tener el máximo de paneles en serie y las mínimas corrientes circulando por el campo fotovoltaico. Está un poco en el límite de potencia que se busca.

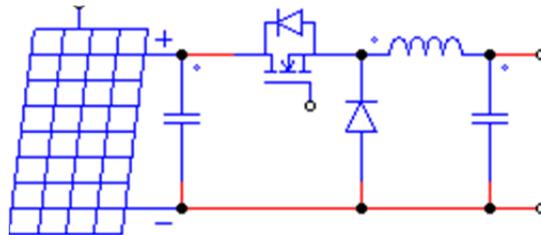


Figura 2-12 Convertidor Buck

- Buck/Boost no inversor: [18]

Esa configuración no aislada permite un gran rango de tensiones de entrada, encontrado comercialmente para arrais de paneles de 2.5kW. El circuito y el control no es complicado, siendo más sencillo un Boost o un Buck para una tensión de entrada (configuración de paneles) más estricta. Es una opción a estudiar si se desea un gran rango de tensiones de entrada. Para la potencia de estudio, se considerarán dos convertidores en paralelo, a dos arrais independientes, mejorando así el rizado de la tensión de salida y el posible filtrado posterior.

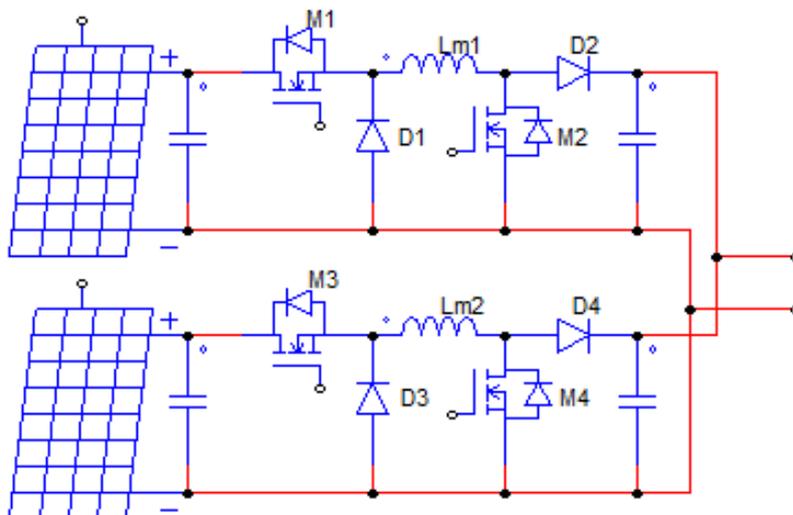


Figura 2-13 Convertidor Buck/Boost no inversor

## 2.4. Puentes H, semipuentes y Push-Pull:

- Puentes H Buck/Boost: [19]

Esta topología se ha encontrado tanto en convertidores aislados como en no aislados, encontrada para aplicaciones fotovoltaicas en una potencia de 30kW, con un gran rango de tensiones de entrada. Dada la potencia, este tipo de convertidor queda fuera del estudio.

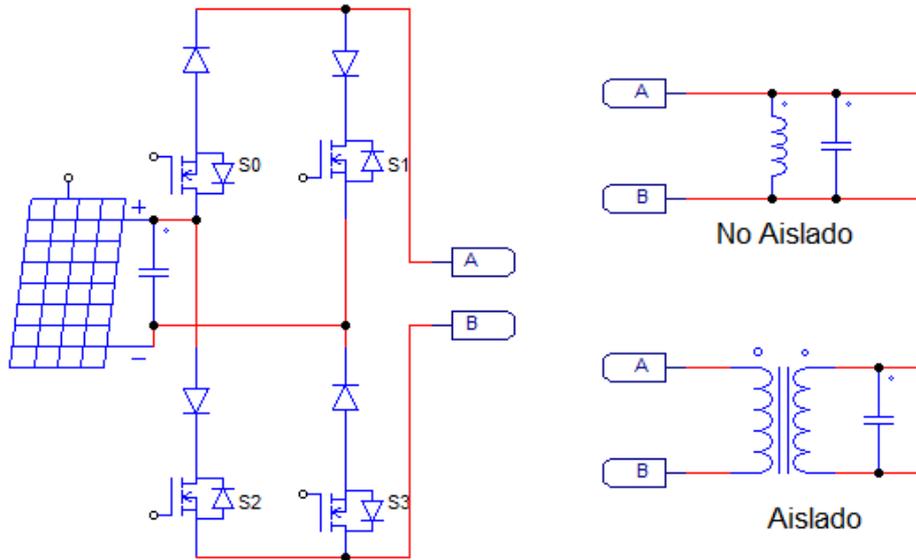


Figura 2-14 Convertidor Puente H Buck/Boost

- Dual active bridge: [20]

Este tipo de convertidor es utilizado cuando se necesita que sea bidireccional, es decir, la potencia pueda ir en las dos direcciones. Esto conlleva transistores en la parte de alta tensión, y más complejidad tanto en el control como en la electrónica de potencia.

Dado estas circunstancias, se considera más apropiado un puente completo en vez de un dual active bridge.

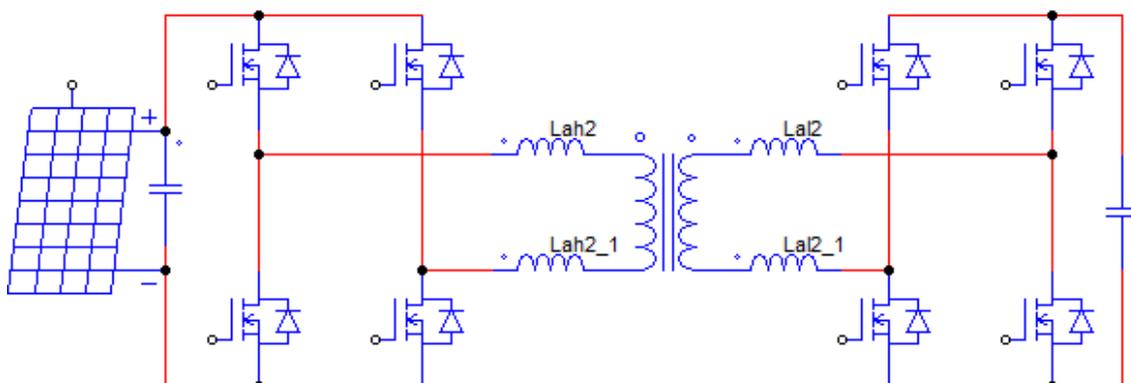


Figura 2-15 Convertidor Dual active Bridge

- Dual active bridge modificado: [21]

Este caso es similar al anterior. En este caso se aumenta la tensión de salida hasta los 800V, y la de entrada entre los 100V y los 200V, encontrado para 5kW. Como el anterior, no se considera estudiar.

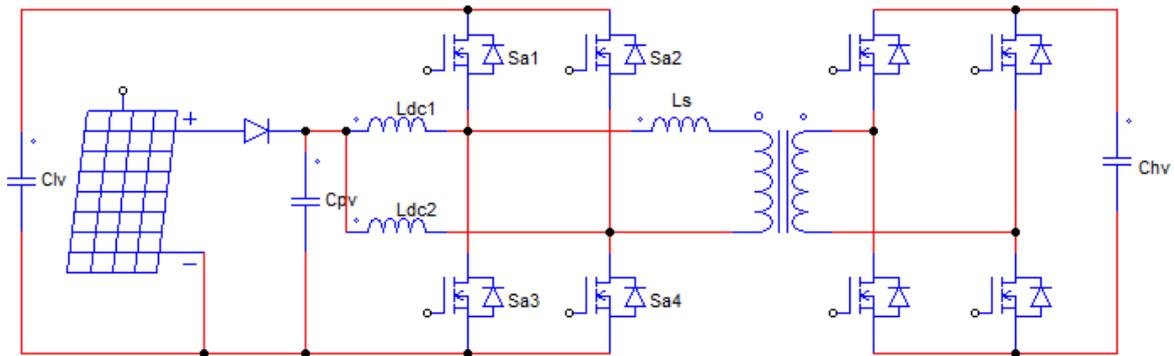


Figura 2-16 Convertidor Dual active Bridge modificado.

- Boost + Full-bridge H: [22][23]

Esta topología aislada, se ha encontrado en convertidores entre 1.5kW y 5.5kW, con tensiones de entrada en el rango de 10V a 60V, y salida de 400V. Como se ha comentado en otras topologías, en fotovoltaica no es necesaria esta ganancia en tensión con estos niveles de potencia, dado que es habitual asociar paneles solares en serie. También tiene transistores en el secundario, lo que la convierte en bidireccional, innecesario en el caso que nos ocupa.

Esta topología queda descartada, pese a su baja complejidad.

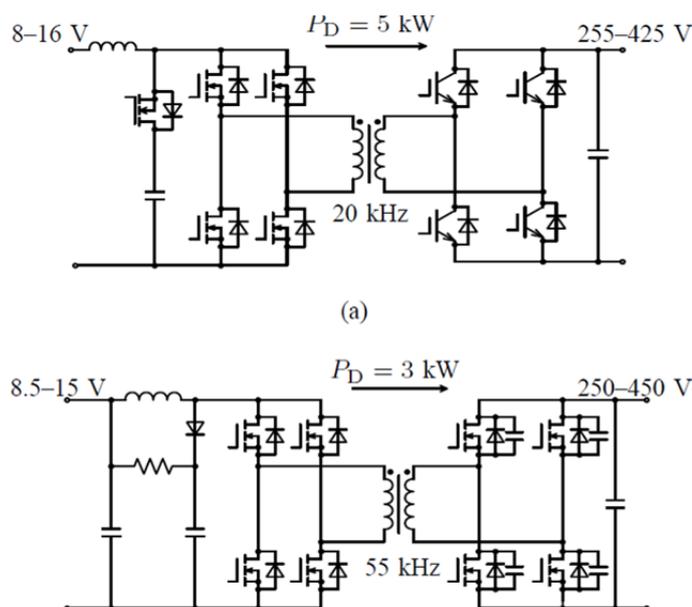


Figura 2-17 Convertidor Boost + Full-bridge H

- Push-Pull monofásico: [24]

Convertidor aislado con ganancia de tensión hasta 20. Se han visto convertidores comerciales de 440W, con esta potencia el convertidor sería destinado a controlar uno o dos paneles en serie. Instalados de forma distribuida, sería una buena opción para sitios con posibles sombreados parciales de los paneles, dado que es sabido que con un solo panel que este sombreado baja notablemente la potencia de todo el campo solar.

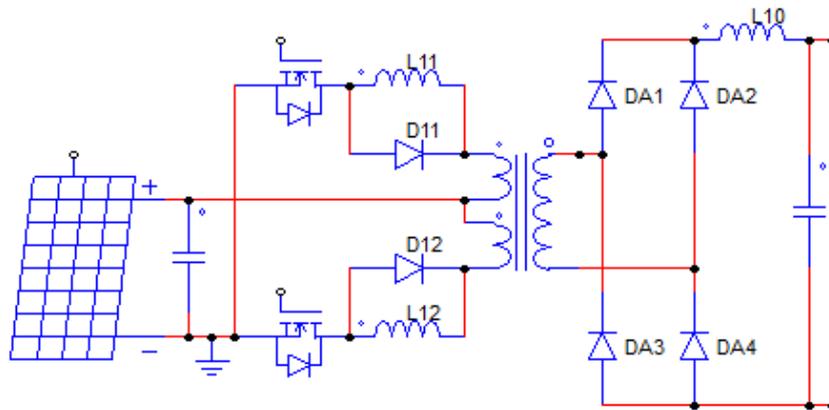


Figura 2-18 Convertidor Push-Pull monofásico

- Three-Phase Step-Up DC-DC converter with a Three-Phase High Frequency Transformer: [25][26]

Esta es una topología aislada, basada en elevador de tensión más transformador. Se ha encontrado para aplicaciones industriales con tensiones de entrada de 30V a 50V, y potencias alrededor de 6.5kW.

Es una topología de fácil construcción, con tensiones en los transistores relativamente bajas pero corrientes altas. Es una buena opción si se considera un diseño para trabajar a mayores tensiones, tanto de entrada como de salida. Aun así este queda descartado frente al Push-Pull trifásico que se ve en el apartado 2.4, dado que este último tiene menos elementos inductores que suponen mucho peso para el equipo y más pérdidas.

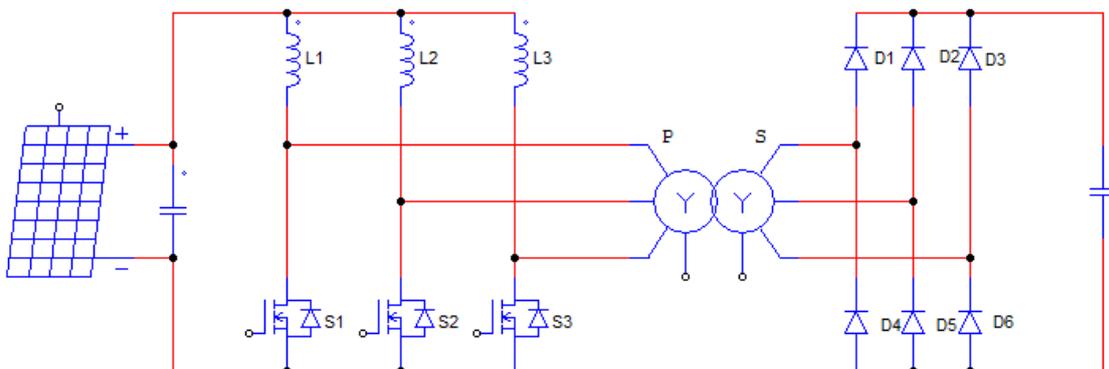
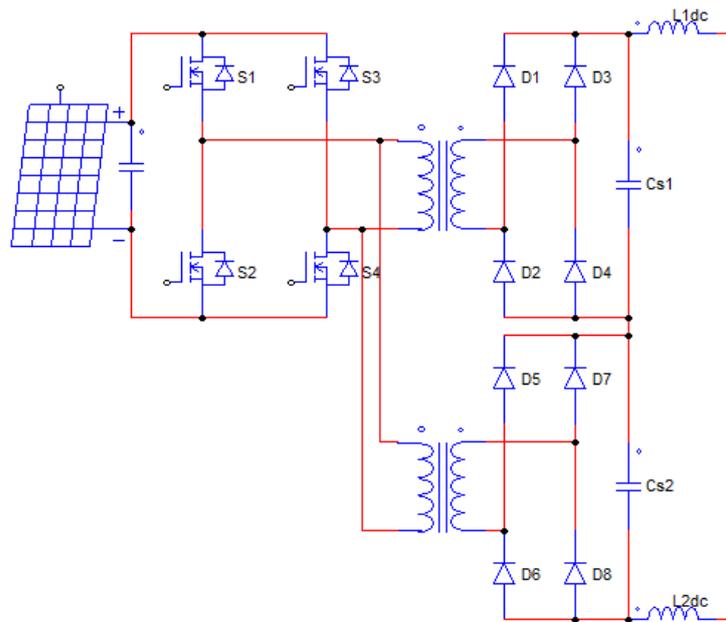


Figura 2-19 Convertidor Three-phase step-up DC-DC

- Puente en H, transformador distribuido. Primarios paralelo, secundarios en serie: [27]

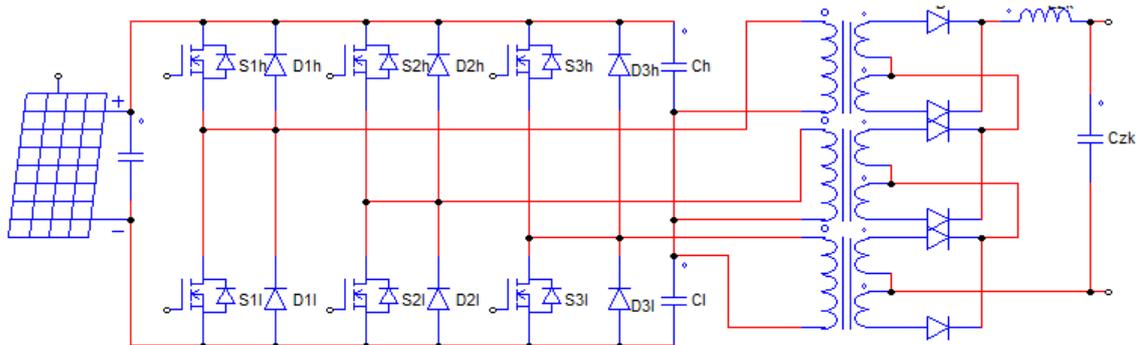
Esta topología se utiliza para tener dos transformadores, dado que es más fácil de situar dentro de la envoltura del convertidor. Se conectan los primarios en paralelo y los secundarios en serie para asegurarse que ambos transformadores manejan la misma potencia. Se ha encontrado para potencias entre 5kW y 10kW, con un buen rango de tensiones, tanto de entrada como de salida ( $200\sim 450V \rightarrow 600\sim 700V$ ),



**Figura 2-20 Convertidor Puente en H, transformador distribuido**

- Tres puentes H, secundarios en serie: [28]

Esta topología es similar a la anterior, pero al tener cada transformador sus transistores se pueden activar los transistores de uno, dos o los tres transformadores según la tensión de entrada para obtener siempre la misma tensión a la salida, con esto se amplía por tres el rango de entrada a costa de que los devanados primarios y transistores puedan manejar toda la corriente. Estas condiciones de trabajo no son necesarias para fotovoltaica, dado que los paneles se mantienen funcionando en un rango bastante estrecho de tensiones, lo que varía mucho son las corrientes, con lo cual no se continuará estudiando esta topología.



**Figura 2-21 Convertidor con Tres puentes H, secundarios en serie**

- Soft-Switching Full-Bridge: [29]

Convertidor aislado de puente complemento, al cual se le pone en el secundario un condensador y una bobina en serie para mejorar las condiciones de conmutación de los diodos y reducir las pérdidas de estos. Encontrado para 5.5kW, sería una opción a tener en cuenta, pero se descarta por la complejidad de diseño del control para conseguir los puntos de conmutación con alta eficiencia.

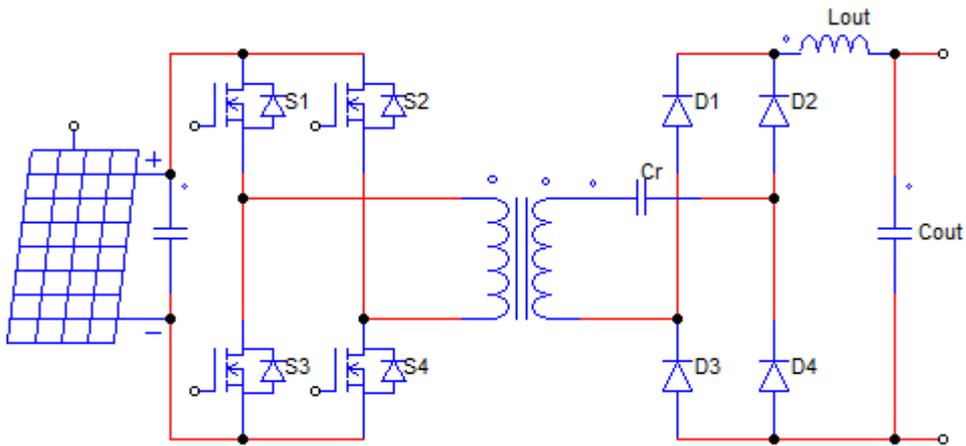


Figura 2-22 Convertidor Soft-Switching Full-Bridge

- Three-port dc-dc converter: [30]

Esta topología consiste en tres convertidores en uno, con lo que si realmente no es necesario un gran salto de tensiones ( $32V \rightarrow 270V$  o se puede adaptar a  $65V \rightarrow 550V$ ) no es demasiado útil. Y dado que los paneles solares se pueden asociar en serie, esta topología resulta excesiva para lo que se busca.

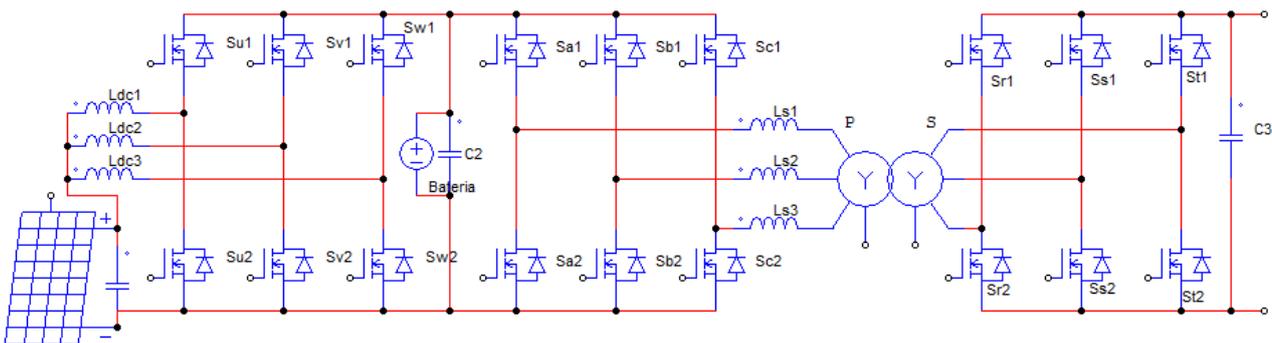
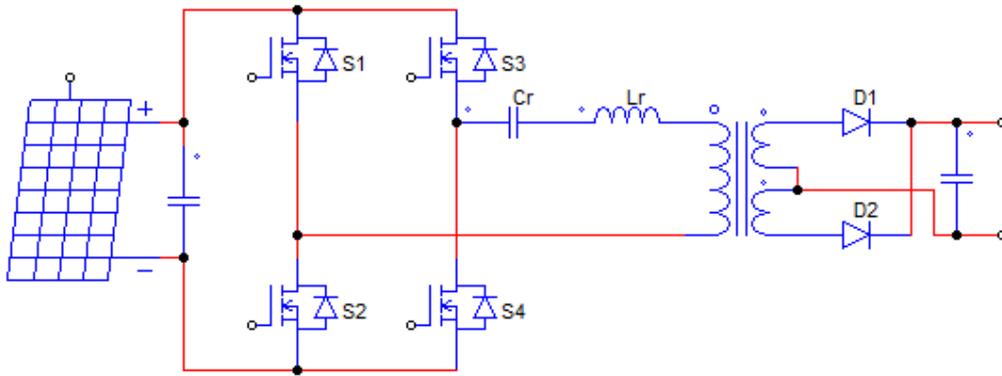


Figura 2-23 Convertidor Three-port DC-DC

- “HYBRID BRIDGE” RESONANT DC/DC CONVERTER: [31]

Topología aislada que según las necesidades funciona como semipuente o como puente completo, con un enorme rango de tensiones de entrada, encontrado con una potencia de 2kW. El enorme rango de tensiones de entrada permite trabajar con una gran variedad de

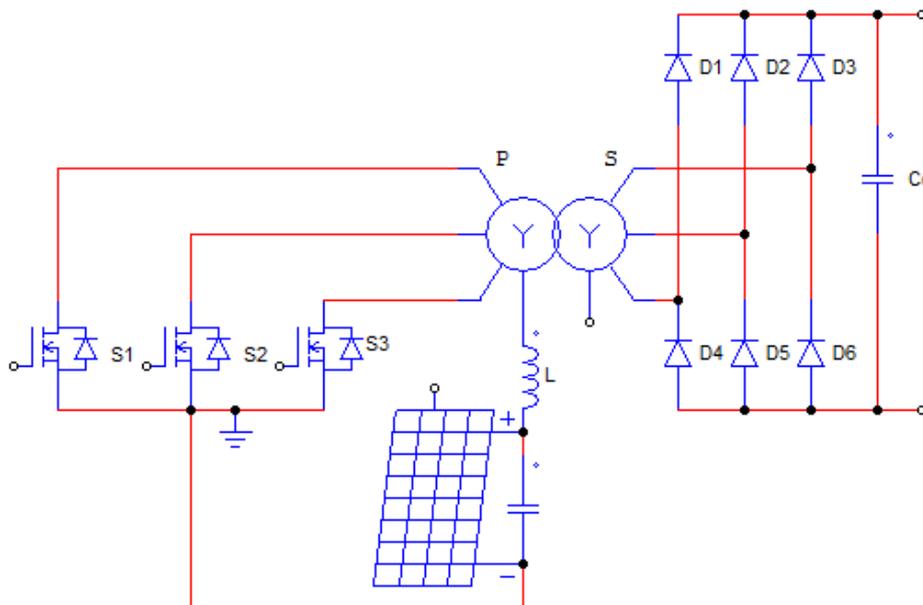
topologías de campos fotovoltaicos, cosa innecesaria si este se mantiene cerca de la potencia del convertidor, a parte de la dificultad de controlar un convertidor a veces como puente completo y otras como semipuente. Este caso no se va a estudiar en los siguientes capítulos.



**Figura 2-24** Convertidor “HYBRID BRIDGE” RESONANT DC/DC

- Push-Pull Trifásico: [32][33]

Esta es una variante trifásica de una topología muy utilizada, aislada, con pocos transistores, encontrado en prototipo de 1kW y simulación de 6.8kW. Parece una buena opción a considerar.



**Figura 2-25** Convertidor Push-Pull Trifásico

- Push-Pull monofásico + Buck: [34]

Topología conocida, aislada, y en el rango de potencias que se desean manejar. Con una ganancia en tensión algo mayor a 2 según el prototipo encontrado, ofrece unas buenas características para seguir estudiándolo.

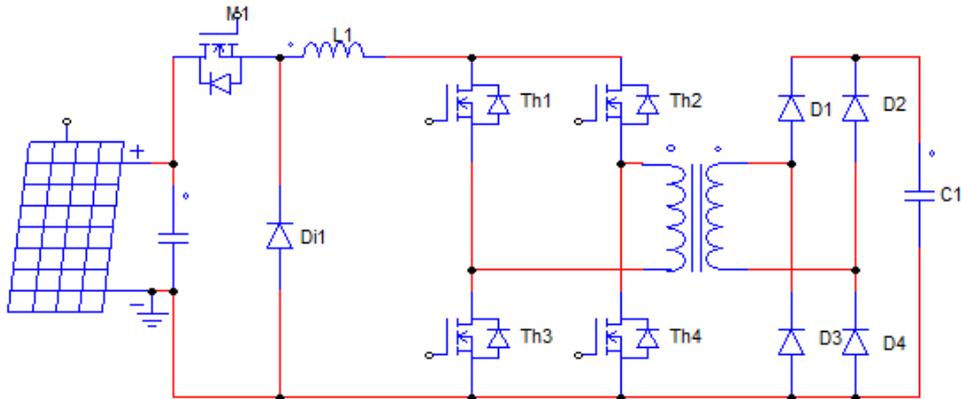


Figura 2-26 Convertidor Push-Pull monofásico + Buck

- Boost + Semipunto multinivel en cascada: [35]

Topología aislada encontrada para potencias alrededor de 250kW. Se podría adaptar a potencias inferiores, pero excesivo para el fin que se busca.

- Simulación para 263kW
- 7 niveles, 3fases.
- 800V → 2000V

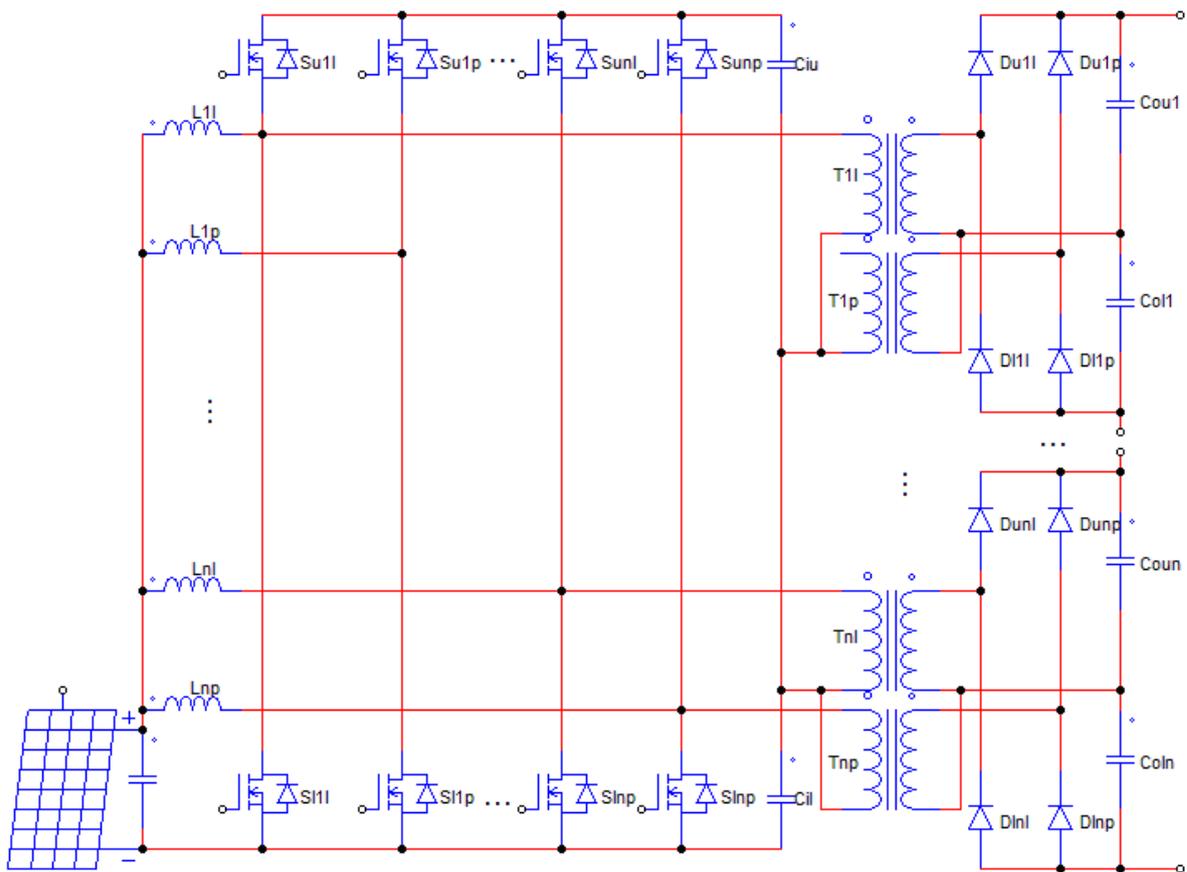


Figura 2-27 Convertidor Boost + Semipunte multinivel en cascada

- Dual inductor current-fed Push-Pull topology: [36]

Topología aislada, encontrado para potencias alrededor de 500W, con pocos transistores. Esta topología sería útil para montar un convertidor por cada panel solar o cada dos paneles solares, lo que mejora la eficiencia del campo fotovoltaico cuando hay sombreados, pero empeora dado que los convertidores pequeños tienen menor eficiencia que uno grande. Dado que se busca un único convertidor para conectar de forma concentrada, se descartan este tipo de opciones distribuidas.

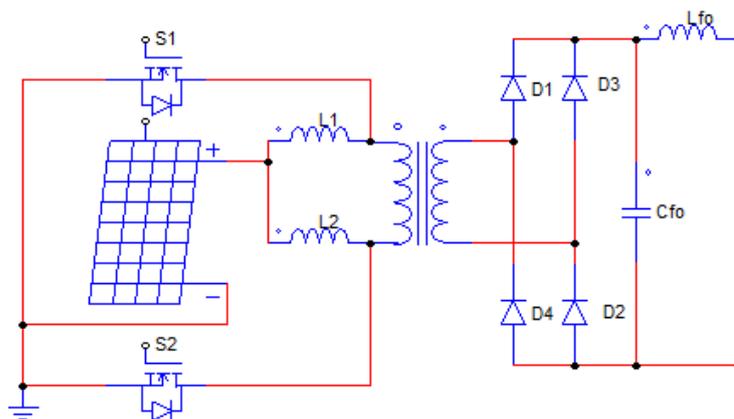


Figura 2-28 Convertidor Dual inductor current-fed push-pull

## 2.5. ZVZCS:

- Boost Dual ZVZCS (Zero Voltage Zero Current Switching) resonante: [37]

Este inversor no aislado permite un salto de tensiones de 70V  $\rightarrow$  400V, encontrándose un prototipo de 2kW. Al ser una topología resonante se reducen las pérdidas a costa de complicar el control. Se ha encontrado en UPS o vehículos eléctricos. Dado el salto de tensiones y el no haber sido utilizado antes en fotovoltaica, no se va a contemplar para el estudio.

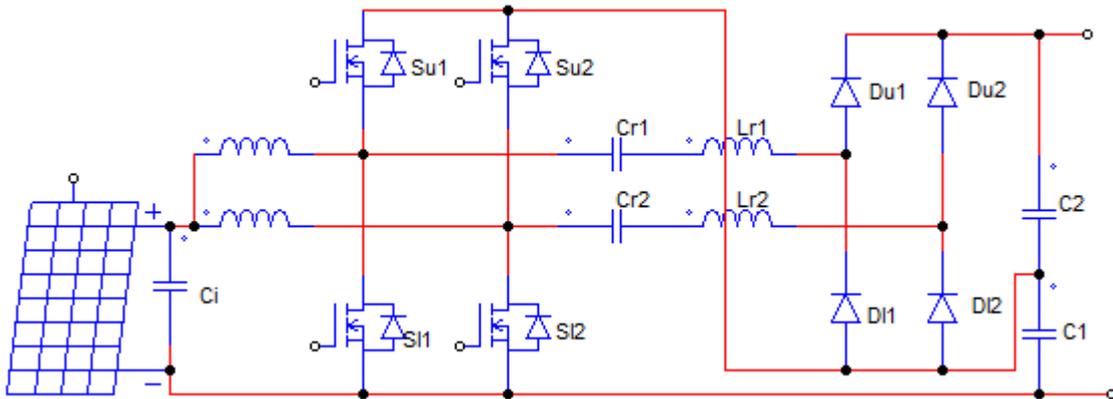


Figura 2-29 Convertidor Boost Dual ZVZCS

## 2.6. Multiplicador de tensión.

- Multiplicador de tensión derivado de Boost: [38]

Este tipo de convertidor, es para bajas potencias (100W), no aislado, y solo sería útil en este contexto con un convertidor en cada panel solar. Con lo cual, con tan poco margen, queda muy restringido su uso.

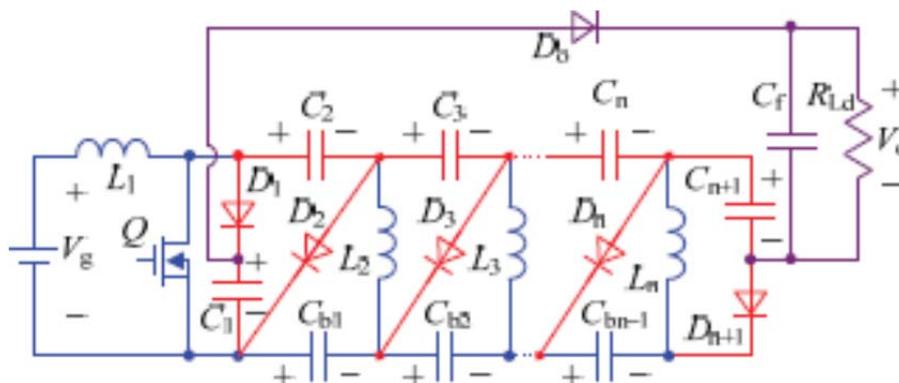


Figura 2-30 Multiplicador de tensión derivado de Boost

## 2.7. Flyback:

- Three interleaved Flyback: [39]

En este caso son tres Flyback en paralelo con los ciclos de trabajo desfasados para reducir el uso de los condensadores. Esta es una topología tradicionalmente para potencias bajas (menor a 300W), dado que el transformador tiene que almacenar la energía a transmitir en cada ciclo. Dadas las circunstancias, y que los transformadores de esta topología suelen ser más grandes que los de otras para potencias similares, queda descartada.

---

[2] Andoni Urtasun, Pablo Sanchis, and Luis Marroyo. Adaptive Voltage Control of the DC/DC Boost Stage in PV Converters With Small Input Capacitor. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 28, NO. 11, NOVEMBER 2013.

[3] Taekyun Kim, Minsoo Hang and Vassilios G. Ageñidis. Comparative Thermal Performance Evaluation of SiC Mosfet and Si Mosfet for 1.2kW 300kHz DC-DC Boost Converter as a Solar Preregulator. The 2014 International Power Electronics Conference.

[4] Anupsingh Chandel, Amit Patel, Vinod Ptel, Pranav Surti. Design calculation and simulation verification dor 2kW grid connected transformerless photovoltaic inverter. 2012 NIRMA University International Conference on Engineering, NUiCONE-2012, 06-08-December 2012.

[5] 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia. May 30-June 3, 2011, The Shilla Jeju, Korea. A Soft Switching Boost Converter using an Auxiliary Resonant Circuit for a PV System. In-beom Song, Doo-yong Jung, Young-hyok Ji, Seong-chon Choi, Yong-chae Jung and Chung-yuen Won.

[6] Ídem. anterior.

[7] Hybrid Solar Inverter Based on a Standard Power Electronic Cell for Microgrids Applications. Luis Arnedo, Suman Dwari, and Vladimir Blasko. Albert Kroeber.

[8] Design and Implementation of 50kW Multi-String Photovoltaic PCS using three-phase interleaved DC-DC converters. Hanju Cha Woojong Lee Tae-pung An. CHUNGNAM NATIOAL UNIVERSITY ENTEC Electric & Electronic Co.

[9] Vishwas K, Suryanarayana K, N.M. Renukappa, L.V. Prabhu. Modeling of multiphase boost converter for battery charging system. 2014 IEEE Students conference on electrical, electronics and computer science.

[10] IEEE: The 2010 International Power Electronics Conference. Ripple Analysis of Interleaved Soft Switching Boost Converter for Photovoltaic Applications. Doo-Yong Jung\*, Young-Hyok Ji\*, Jun-Ho Kim\*, Chung-Yuen Won\* and Yong-Chae Jung\*\*. \* School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, 300 Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon, Kyunggi-Do, Korea \*\* Department of Electronic Engineering, Namseoul University, Seonghwan-eup, Chonan, Korea.

- 
- [11] Jun-Ho Kim, Doo-Yong Jung, Jae-Hyung Kim, Su-Won Lee, Yong-Chae Jung, Chung-Yuen Won. Soft Switching Interleaved Boost Converter for Photovoltaic Power Generation System.
- [12] Kevork Haddad, Member, IEEE. "Three Level DC-DC Converters as Efficient Interface in Two Stage PV Power Systems"
- [13] Mohammed S. Agamy, Maja Harfman-Todorovic, Ahmed Elasser, Song Chi, Robert L. Steigerwald, Juan A. Sabate, Adam J. McCann, Li Zhang, and Frank J. Mueller. "An Efficient Partial Power Processing DC/DC Converter for Distributed PV Architectures". IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 29, NO. 2, FEBRUARY 2014
- [14] Hybrid Boost Three-Level DC-DC Converter With High Voltage Gain for Photovoltaic Generation Systems. Yun Zhang, Jian-Tao Sun, and Yi-Feng Wang. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 28, NO. 8, AUGUST 2013
- [15] Small-Signal Modeling of the Interleaved Boost with Voltage Multiplier. G. Spiazzi, S. Buso, F. Sichirollo, L. Corradini. Department of Information Engineering, University of Padova.
- [16] B. Sri Revathi, Dr. M. Prabhaka. High Gain High Power DC-DC Converter for Photovoltaic Application. International conference on microelectronics, communication and renewable energy (ICMiCR-2013)
- [17] IEEE: Design and Analysis of 6KW Photovoltaic Power System. Xinggui Wang, Yaowen Lu, Department of Electrical and information Engineering, Lanzhou University of Science and Technology. Lanzhou, China.
- [18] Integration and operation of a single-phase bidirectional inverter with two buck/boost MPPTs for DC-distribution applications. Tsai-Fu Wu, Chia-Ling Kuo, Kun-Han Sun, Yu-Kai Chen, Yung-Ruei Chang, Yih-Der Lee. IEEE transactions on power electronics, Vol 28 n° 11, novembre 2013.
- [19] Mahshid Amirabadi, Anan Balakrishnan, Hamid A. Toliyat, William C. Alexander. High-Frequency AC-Line PV Inverter. IEEE transactions on industrial electronics, Vol 61, N° 1, January 2014.
- [20] 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia. May 30-June 3, 2011, The Shilla Jeju, Korea. Topology and Application of Bidirectional Isolated DC-DC Converters. Nadia M. L. Tan, Takahiro Abe, and Hirofumi Akagi. Universiti Tenaga Nasional, Selangor, MALAYSIA. JFE Steel Corporation, Tokyo, JAPAN
- [21] Yuxiang Shi, Liming Liu, Hui Li, Yaosuo Xue. A Single-phase Grid-connected PV Converter with Minimal DC-link Capacitor and Low-frequency Ripple-free Maximum Power Point Tracking.
- [22] Ídem. anterior.
- [23] Topology and application of bidirectional isolated DC-DC converters. Nadia M. L. Tan, Takahiro Abe, Hirofumi Akagi. 8<sup>th</sup> International conference on power electronics – ECCE Asia, May 30-June 3, 2011, The Shilla Jeju, Korea.
- [24] 2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010 - Desenvolvimento de um Multiconversor CC-CC Push-pull de Elevada Potencia para Aplicacao em Sistemas Fotovoltaicos. A. C. Pinto, R. R. de Lima, C. S. Barbosa, D. M. C. Xavier. Universidade Federal do Vale do São Francisco.

- 
- [25] IEEE: FUZZY CONTROL OF A THREE-PHASE STEP-UP DC-DC CONVERTER WITH A THREE-PHASE HIGH FREQUENCY TRANSFORMER. Fabrício Hoff Dupont; Adriano Péres; Sérgio Vidal Garcia Oliveira. Universidade Regional de Blumenau – FURB. Departamento de Engenharia Elétrica e Telecomunicações – DEET. Blumenau – Brasil.
- [26] Sérgio Vidal Garcia Olivera, Ivo Barbi. A three-phase step-up DC-DC converter with a three-phase high-frequency transformer for DC renewable power source applications. IEEE transactions on industrial electronics, Vol 58 N° 9, August 2011
- [27] Development of 10kW grid-connected photovoltaic inverter with high frequency transformer. Young Hoon Son, Young Roc Kim, Byung Hun Ra, Sung Hwon Kim, Seok Ki Kim. The 7<sup>th</sup> International conference on power electronics, October 22-26, 2007 I EXCO, Daegu, Korea.
- [28] Improved 2kW solar inverter with wide input voltage range. K. H. Edelmoser. 10<sup>th</sup> Mediterranean electromechanical conference, MEleCon, Vol II 2000 IEEE.
- [29] A New 98% Soft-Switching Full-Bridge DC-DC Converter based on Secondary-Side LC Resonant Principle for PV Generation Systems. IEEE PEDS 2011, Singapore, 5 - 8 December 2011. Daisuke Tsukiyama, Yasuhiko Fukuda, Shuji Miyake, Saad Mekhilef, Soon-Kurl Kwon and Mutsuo Nakaoka.
- [30] An integrated three-port bidirectional DC-DC converter for PV application on a DC distribution system. Zhan Wang, Hui Li. IEEE Transactions on power electronics, Vol 28, N° 10, October 2013.
- [31] A New Wide Input Range High Efficiency Photovoltaic Inverter. Zhigang Liang, Rong Guo, Gangyao Wang, Alex Huang.
- [32] IEEE Transactions on power electronics, vol. 24, no. 2, february 2009. A Three-Phase Current-Fed Push–Pull DC–DC Converter. Romero Leandro Andersen and Ivo Barbi.
- [33] A Three-Phase Step-Up DC–DC Converter With a Three-Phase High-Frequency Transformer for DC Renewable Power Source Applications. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 58, NO. 8, AUGUST 2011. Sérgio Vidal Garcia Oliveira, Ivo Barbi.
- [34] IEEE: Small Signal Modeling of a Novel Single-Phase Photovoltaic Inverter. Pan Geng, Weimin Wu, Yinzong Ye, and Yijian Liu
- [35] 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG) 2012. Cascaded H-bridge Multilevel Converter for Large-scale PV Grid-Integration with Isolated DC-DC stage. Wei Zhao, Hyuntae Choi, Georgios Konstantinou, Mihai Ciobotaru, Vassilios G. Agelidis.
- [36] Vishal Vekhande and B. G. Fernandes. Central Multilevel Current-fed Inverter with Module Integrated DC-DC Converters for Grid-connected PV plant.
- [37] Nonisolated ZVZCS Resonant PWM DC–DC Converter for High Step-Up and High-Power Applications. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 27, NO. 8, AUGUST 2012. Yohan Park, Byoungkil Jung, and Sewan Choi.
- [38] Non-isolated High step-up DC-DC converters adopting switched-capacitor cell. Gang Wu, Xinbo Ruan, Zhihong Ye. IEEE transactions on industrial electronics.
- [39] Bunyamin Tamyurek and Bilgehan Kirimer. An Interleaved Flyback Inverter for Residential Photovoltaic Applications.



### 3. Selección de los mejores convertidores.

Después de la descripción de las diferentes topologías que pueden estar relacionadas con la generación fotovoltaica, se quedan 6 aisladas y 6 no aisladas, que pueden ser aptas para generación doméstica.

En este capítulo se hace una comparativa de los convertidores que no se han desechado en el capítulo anterior, para después seleccionar los mejores. De esta selección se hará unas pequeñas simulaciones para ver el convertidor que más interesa para trabajar el rango de potencia y tensiones que se pretende hacer el estudio.

Para poder comparar las diferentes topologías en el siguiente capítulo, se utilizan las siguientes definiciones [40]:

- Stress de los interruptores:

$$S = \sum_{j=1}^k V_j I_j \quad (3-1)$$

$j = \text{transistores}$

- Utilización de los interruptores:

$$GU = \frac{P_{load}}{S} \quad (3-2)$$

Para convertidores con un rendimiento alto:

$$GU = \frac{P_{load}}{S} \approx \frac{P_{in}}{S} \quad (3-3)$$

Hay dos criterios para calcular S, uno con la tensión de pico y la corriente de pico que soporta el transistor [41], y otro con la tensión de pico y la corriente media que soporta el transistor [42]. Se ha elegido el criterio con la corriente de pico.

#### 3.1. Profundización de las características de los convertidores.

Ahora se detallan zonas de funcionamiento de los convertidores que se analizan. También se presentan gráficas de simulación de funcionamiento en el tiempo de los inversores, haciendo un barrido de  $V_i$ , con una carga de 12.5Ohm (5000W a 400V), se ha establecido para los controladores una referencia de  $V_o=400V$ . Se representa  $V_{cel}$  (V del campo fotovoltaico),  $V_o$  (V del bus de continua de salida del convertidor),  $D$ ,  $V_{sw\_pico}$ ,  $I_{sw\_pico}$ . Posteriormente, a partir de estas simulaciones se analizan los datos, calculando y graficando GU.

### 3.1.1. Boost:

- Boost simple:

- Encontrado inversor comercial de 4~5kW, o 2x2.5kW.
- 140~340V → 350~400V
- 16kHz ~ 300kHz para convertidores de alta densidad de potencia.

Para este convertidor no se representa la tensión de pico ni la corriente de pico, dado que se relacionan directamente con el resto de magnitudes representadas ( $V_{sw\ pico}=V_o$ ,  $I_{sw}=I_o/D$ ). Para una potencia de salida de 5kW, una tensión de salida alrededor de 400V, se obtienen los siguientes resultados en función de la tensión de entrada:

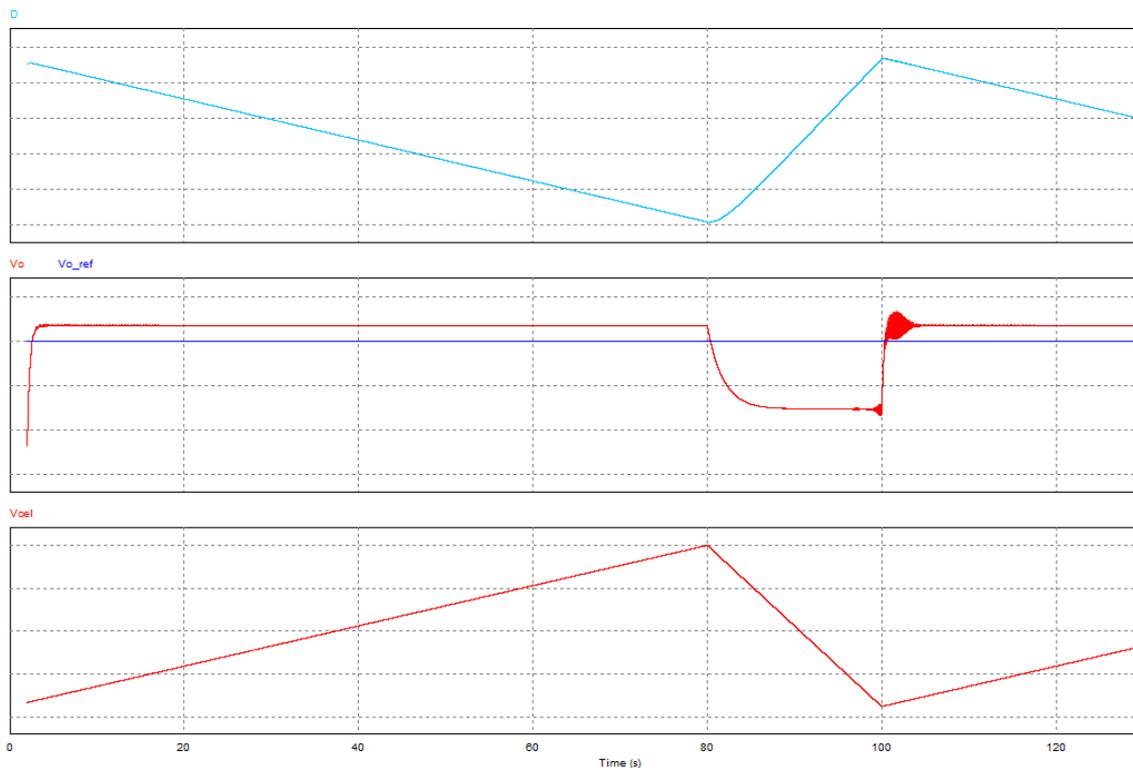


Figura 3-1 Resultado Simulación convertidor Boost, con barrido de  $V_i$

- Dual Partial Power Boost dc/dc converter, utilizando múltiples convertidores para mayores potencias:

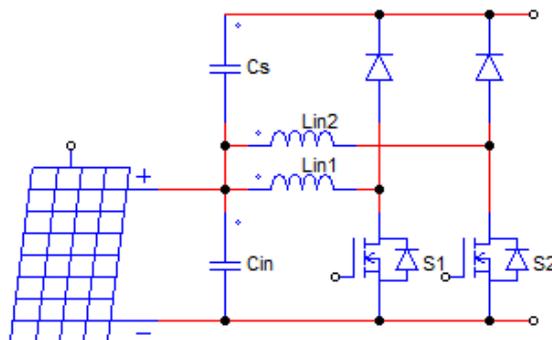


Figura 3-2 Convertidor Dual Partial Power Boost DC/DC

- 3.5kW (1.5~6kW)
- 200~600V → 600V

Igual que en el caso anterior, no se representa la tensión de pico ni la corriente de pico, dado que se relacionan directamente con el resto de magnitudes representadas ( $V_{sw} \text{ pico} = V_o$ ,  $I_{sw} = I_o/D$ ). Para una potencia de salida de 5kW, una tensión de salida alrededor de 400V, se obtienen los siguientes resultados en función de la tensión de entrada:

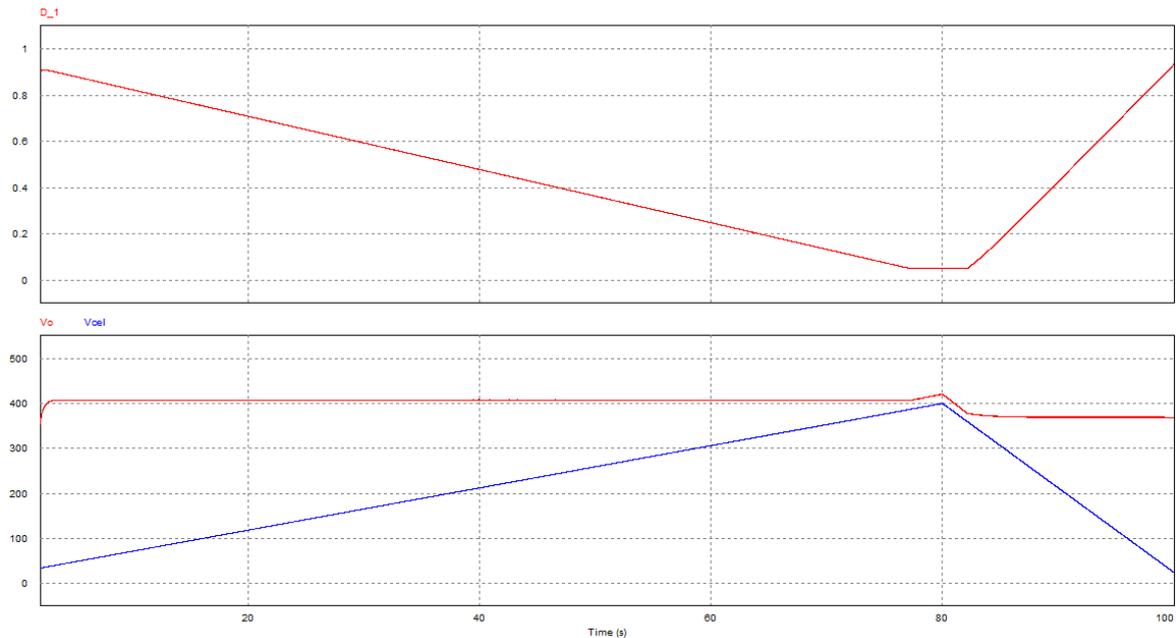


Figura 3-3 Resultado Simulación convertidor Dual Partial power Boost, con barrido de  $V_i$

- Dual Three-phase boost:

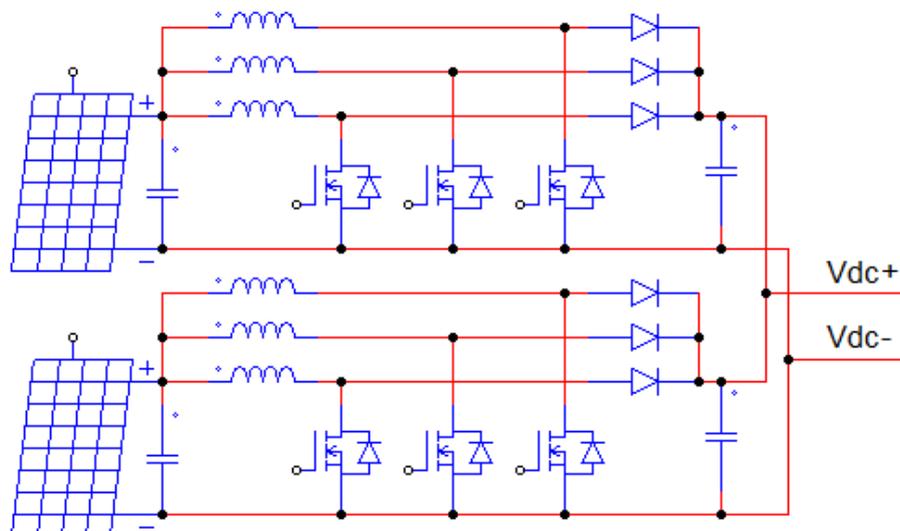
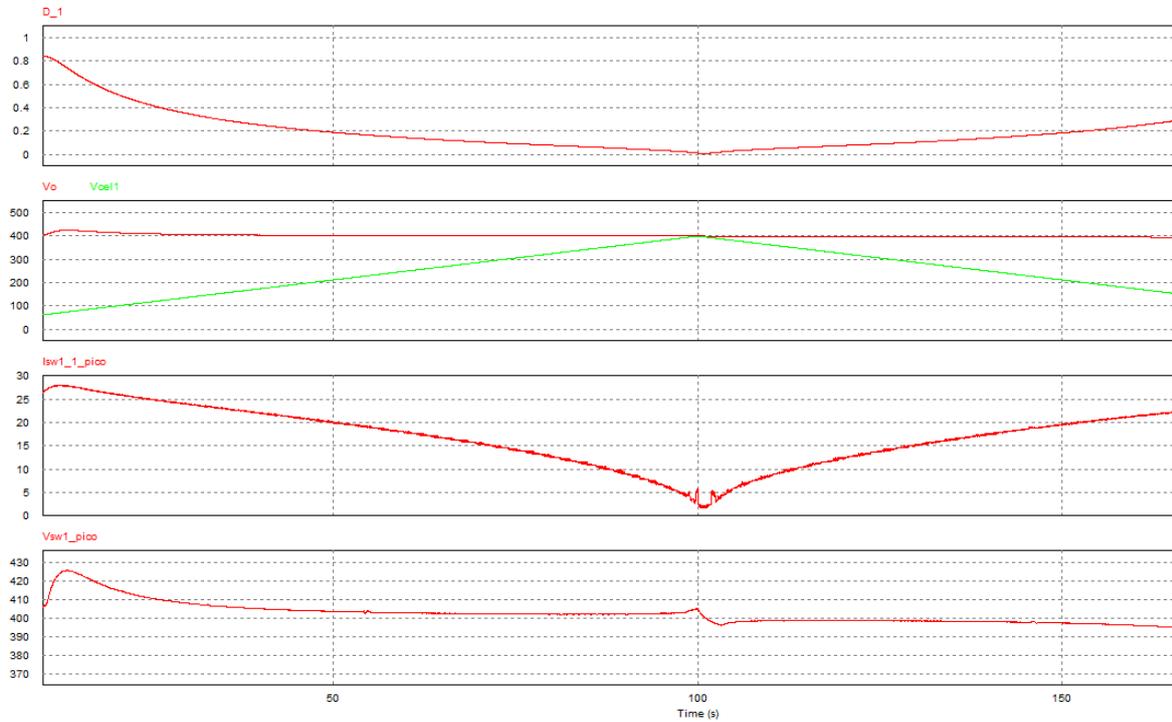


Figura 3-4 Convertidor Dual Three-Phase Boost

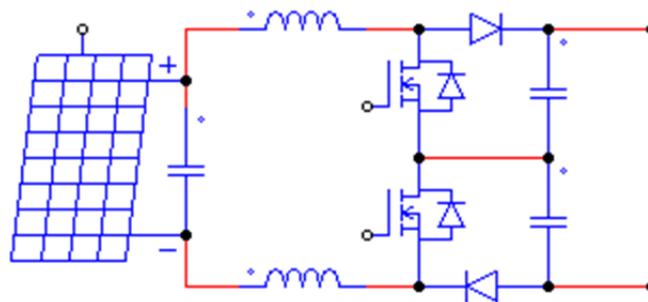
- 2x10kW a 6x10kW // 4.8kW
- 100~200V → 700V // 50~80V → 90~100V

Para una potencia de salida de 5kW, una tensión de salida alrededor de 400V, se obtienen los siguientes resultados en función de la tensión de entrada:



**Figura 3-5 Resultado Simulación convertidor Dual Three-Phase Boost, con barrido de Vi**

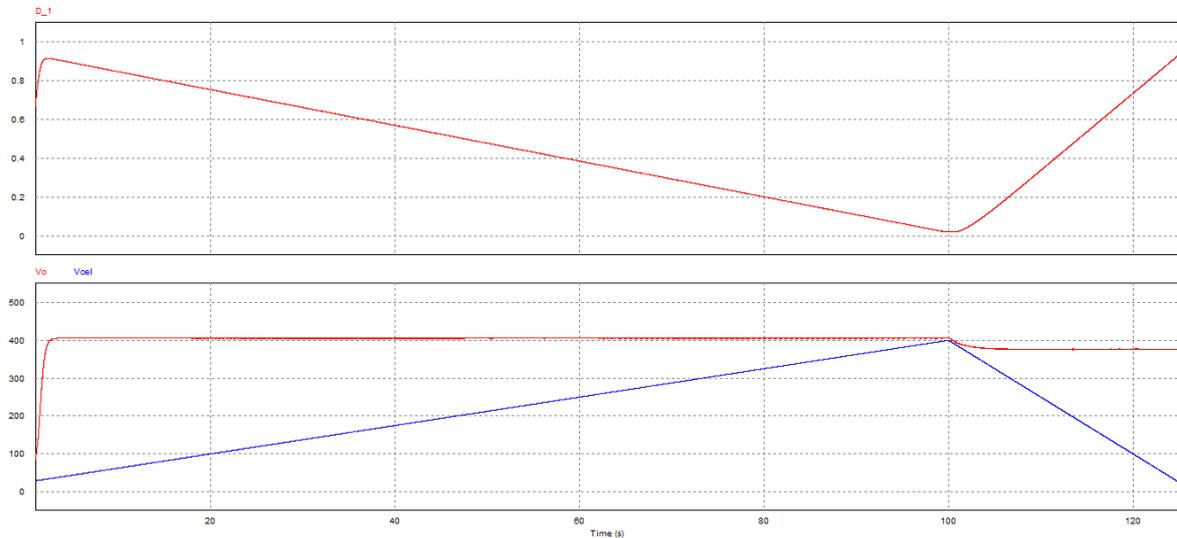
- Three level DC-DC converter:



**Figura 3-6 Convertidor Three level DC-DC**

- 500kW // 6kW
- 400~800V → 1050V // 200~600V → 600V
- 2kHz // 15kHz

Igual que en casos anteriores, no se representa la tensión de pico ni la corriente de pico, dado que se relacionan directamente con el resto de magnitudes representadas ( $V_{sw\ pico}=V_o$ ,  $I_{sw}=I_o/D$ ). Para una potencia de salida de 5kW, una tensión de salida alrededor de 400V, se obtienen los siguientes resultados en función de la tensión de entrada:

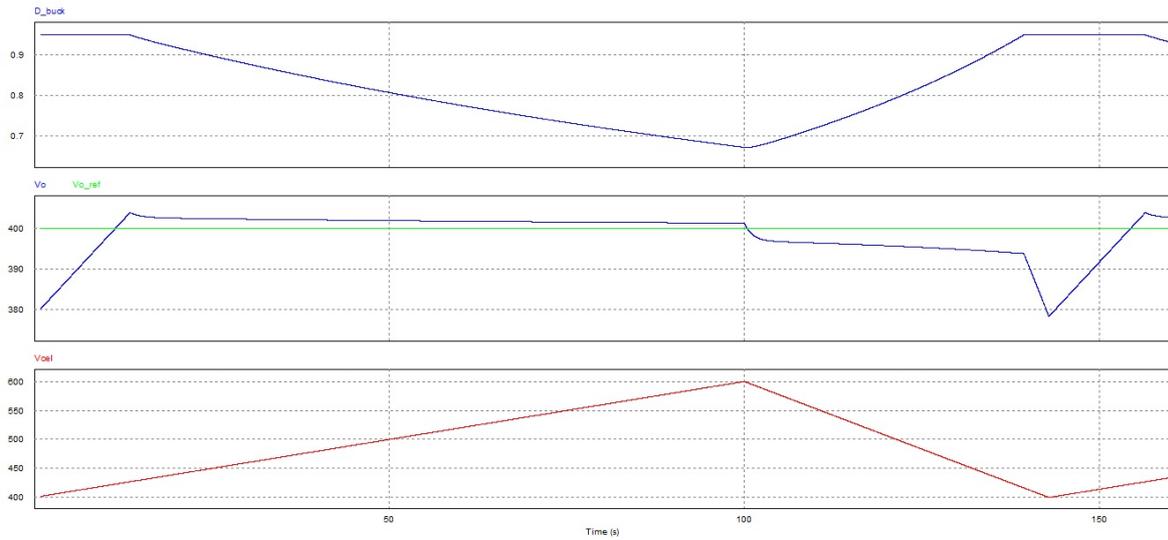


**Figura 3-7 Resultado Simulación convertidor Three level DC-DC, con barrido de  $V_i$**

### 3.1.2. Buck:

- Buck simple: quedaría fuera si las tensiones de trabajo fuesen solo hasta 300V
  - 6.6kW.
  - 350-440V  $\rightarrow$  220-250V
  - Rizado elevado a la entrada.

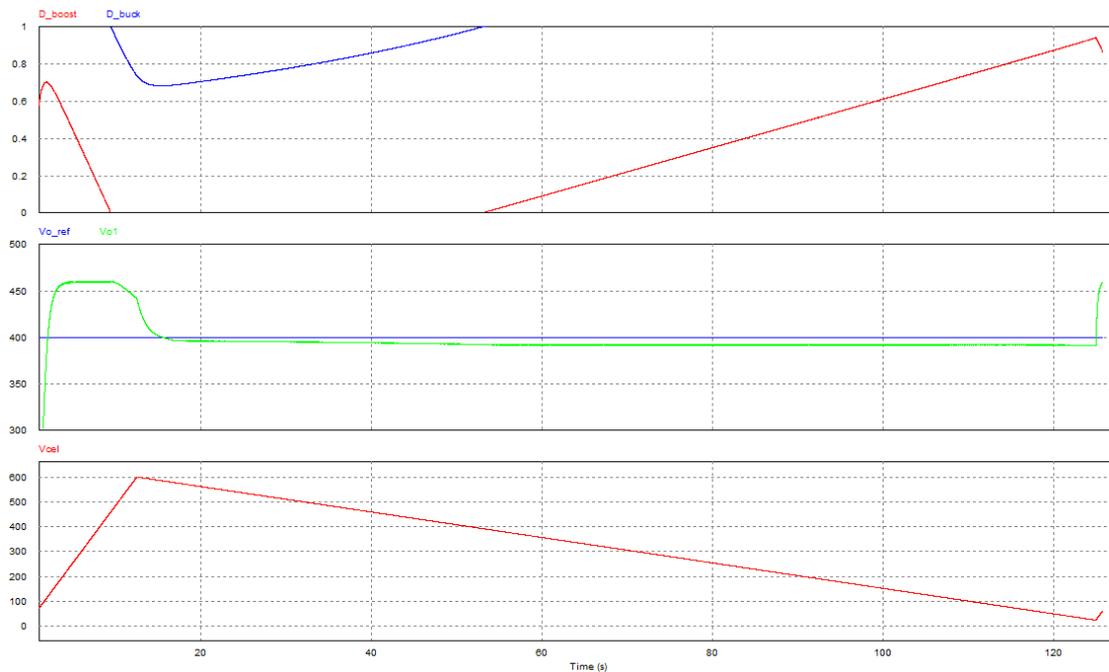
Igual que en casos anteriores, no se representa la tensión de pico ni la corriente de pico, dado que se relacionan directamente con el resto de magnitudes representadas ( $V_{sw\ pico}=V_o$ ,  $I_{sw}=I_o/D$ ). Para una potencia de salida de 5kW, una tensión de salida alrededor de 400V, se obtienen los siguientes resultados en función de la tensión de entrada:



**Figura 3-8 Resultado Simulación convertidor Buck, con barrido de Vi**

- Buck/Boost no inversor:
  - 2x2.5kW
  - 100~600V → 380V
  - 25kHz

Igual que en casos anteriores, no se representa la tensión de pico ni la corriente de pico, dado que se relacionan directamente con el resto de magnitudes representadas ( $V_{sw\ pico}=V_o$ ,  $I_{sw}=I_o/D$ ). Para una potencia de salida de 5kW, una tensión de salida alrededor de 400V, se obtienen los siguientes resultados en función de la tensión de entrada:



**Figura 3-9 Resultado Simulación convertidor Buck/ Boost no inversor, con barrido de Vi**

### 3.1.3. Push-Pull:

- Push-Pull monofásico:

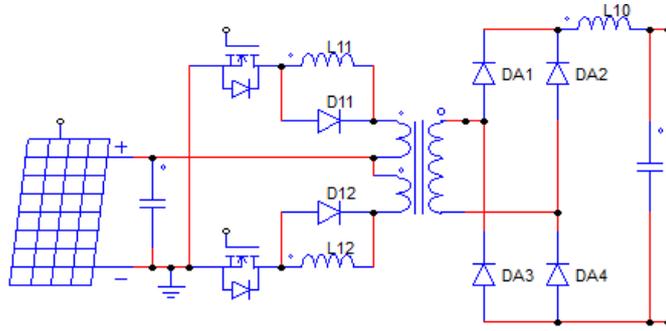


Figura 3-10 Convertidor Push-Pull monofásico

- 10~(12)~20V  $\rightarrow$  220V, se adaptaría el diseño para 100~150V  $\rightarrow$  400~500V
- 50kHz.

Para una potencia de salida de 5kW, una tensión de salida alrededor de 400V, se obtienen los siguientes resultados en función de la tensión de entrada:

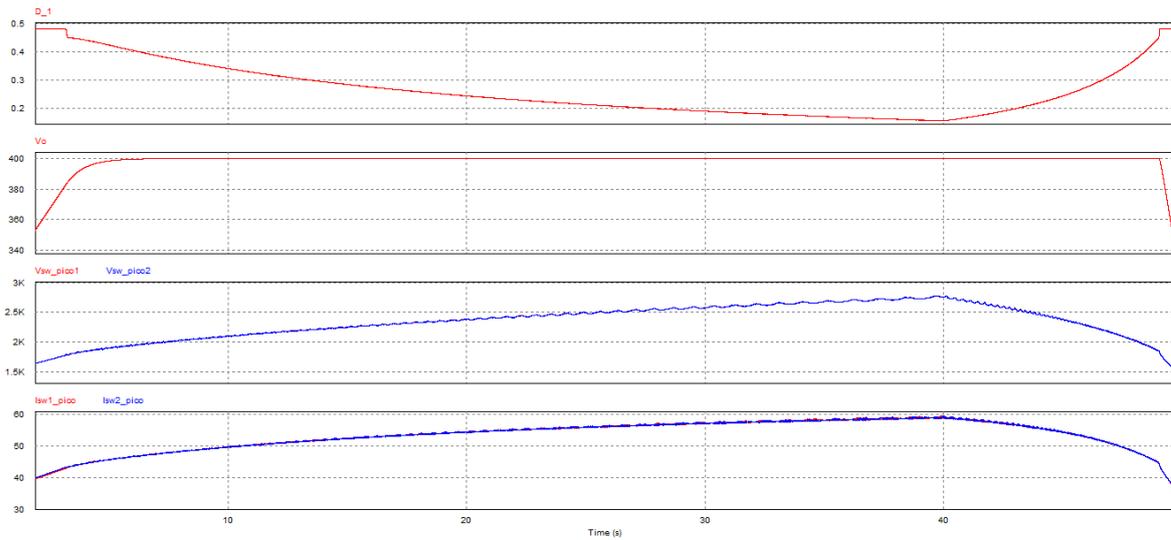
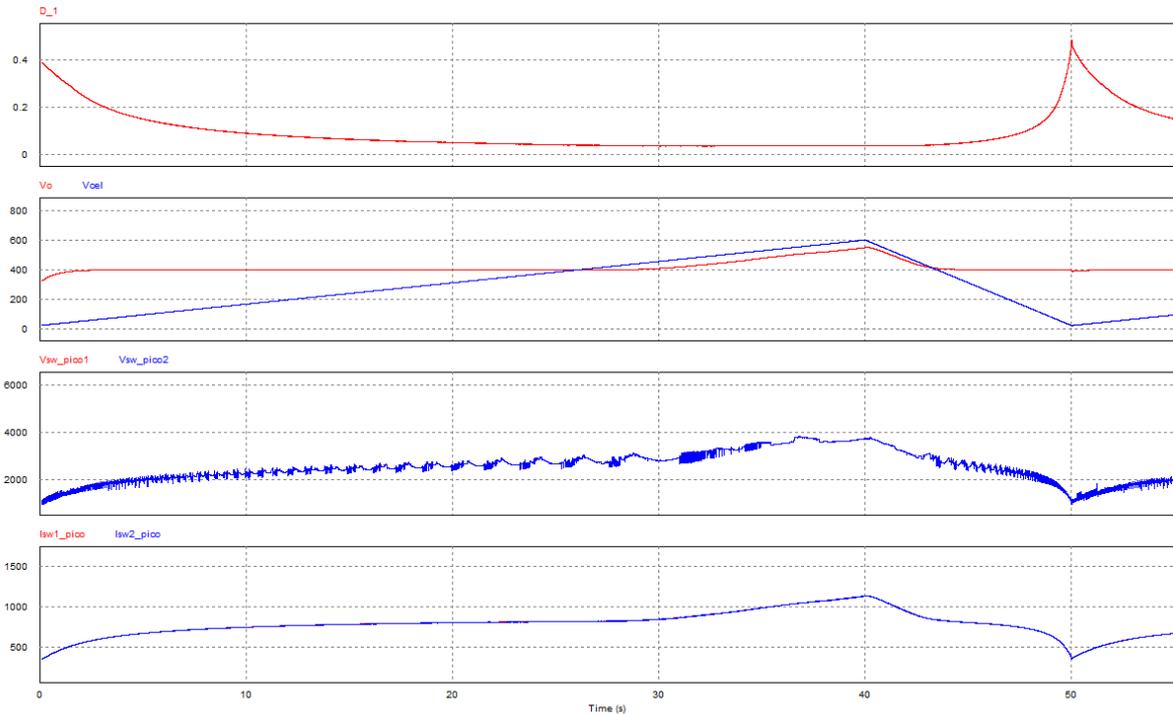


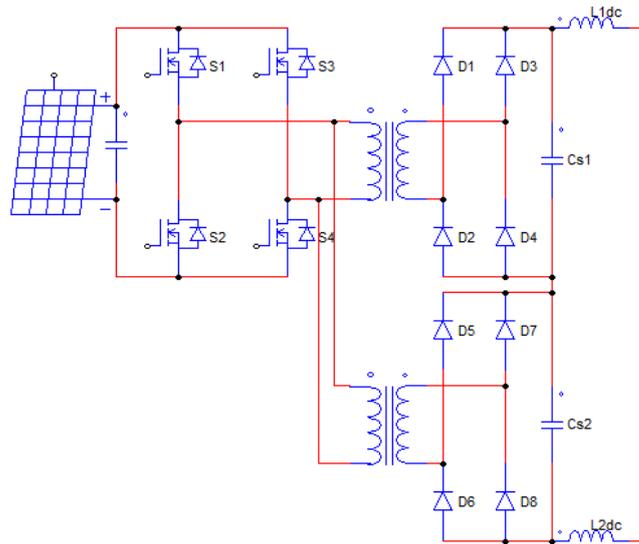
Figura 3-11 Resultado Simulación convertidor Push-Pull, n=3, con barrido de Vi



**Figura 3-12 Resultado Simulación convertidor Push-Pull, n=10, con barrido de Vi**

El rizado que se observa en Vsw\_pico, se debe a una falta de ajuste del controlador, ya que si se amplía la gráfica de D también aparece un pequeño rizado, esto se mejoraría al hacer el diseño definitivo.

- Puente en H, transformador distribuido. Primarios paralelo, secundarios en serie.



**Figura 3-13 Convertidor puente H, transformador distribuido**

- 200~450V → 600~700V
- 5~10kW

Para una potencia de salida de 5kW, una tensión de salida alrededor de 400V, se obtienen los siguientes resultados en función de la tensión de entrada:

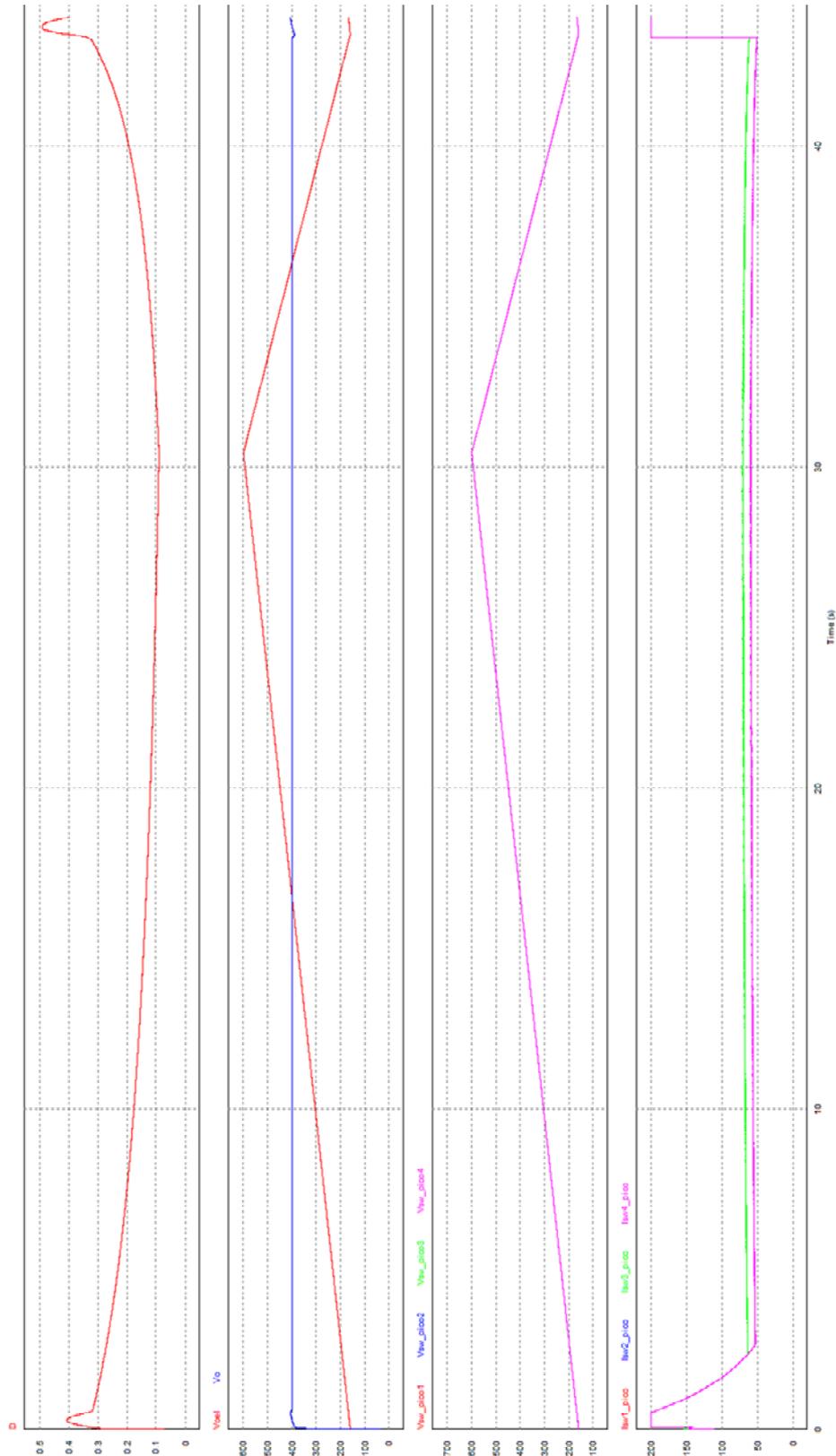


Figura 3-14 Resultado Simulación Puente H, transformador distribuido, n=2, con barrido de Vi

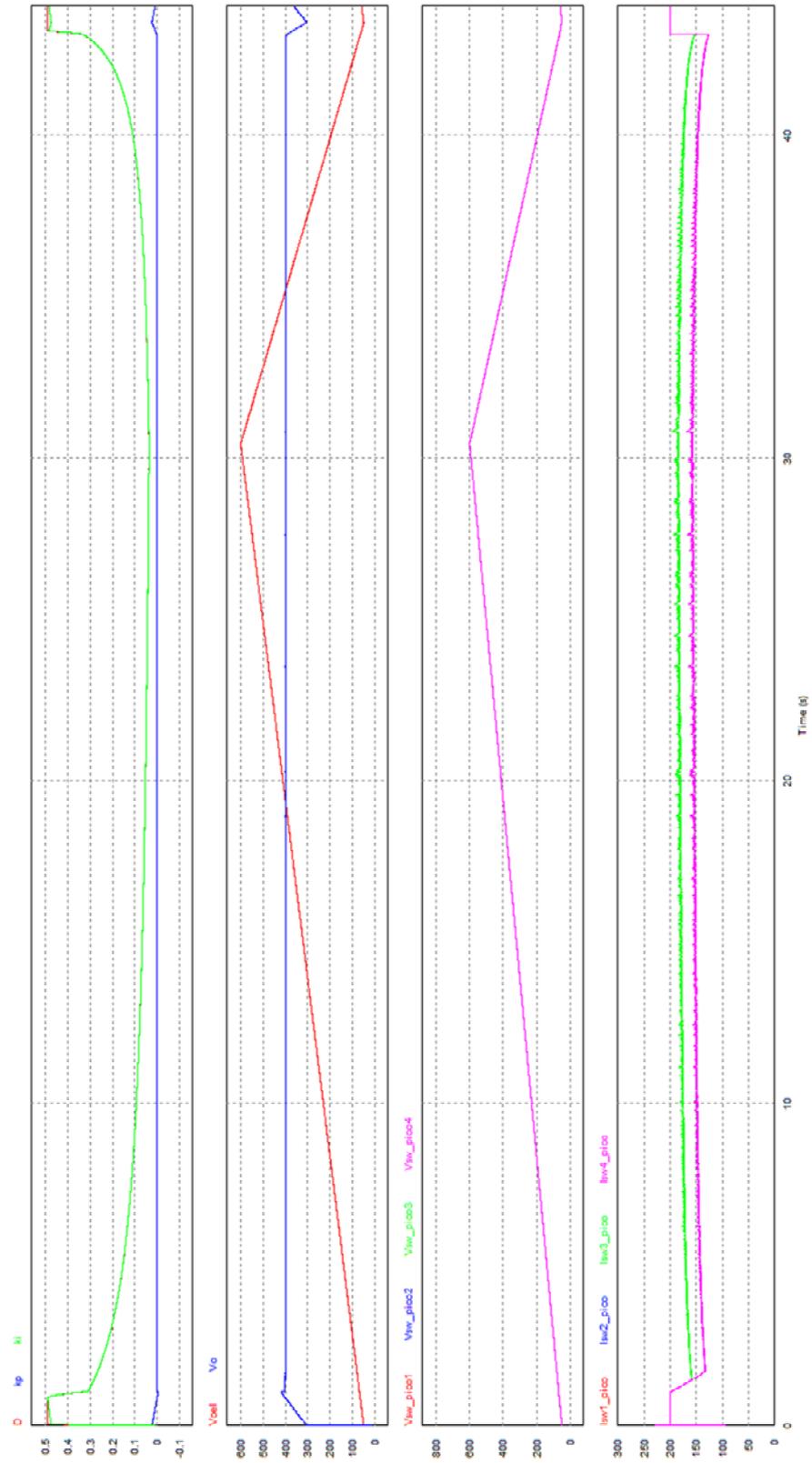
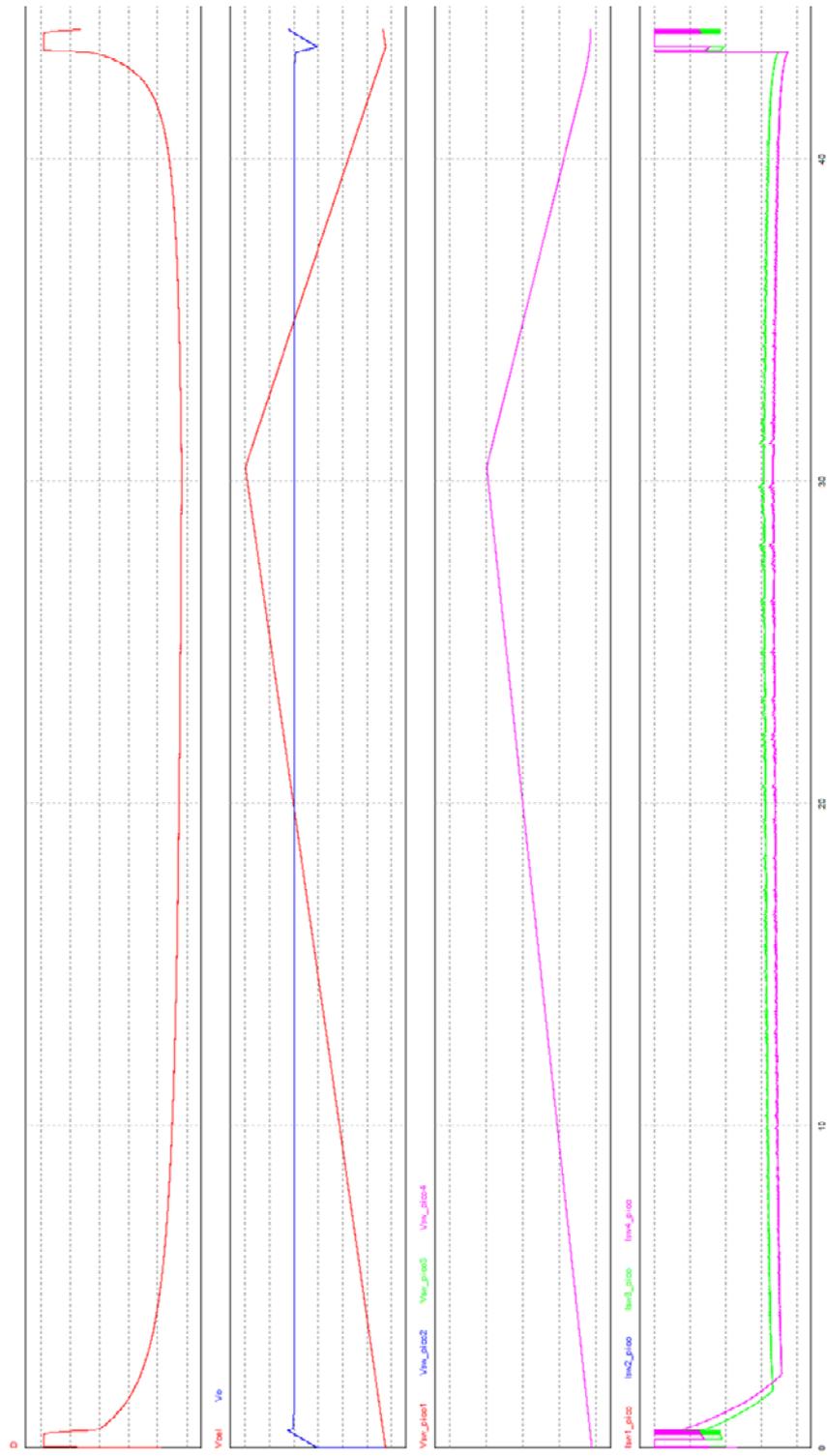


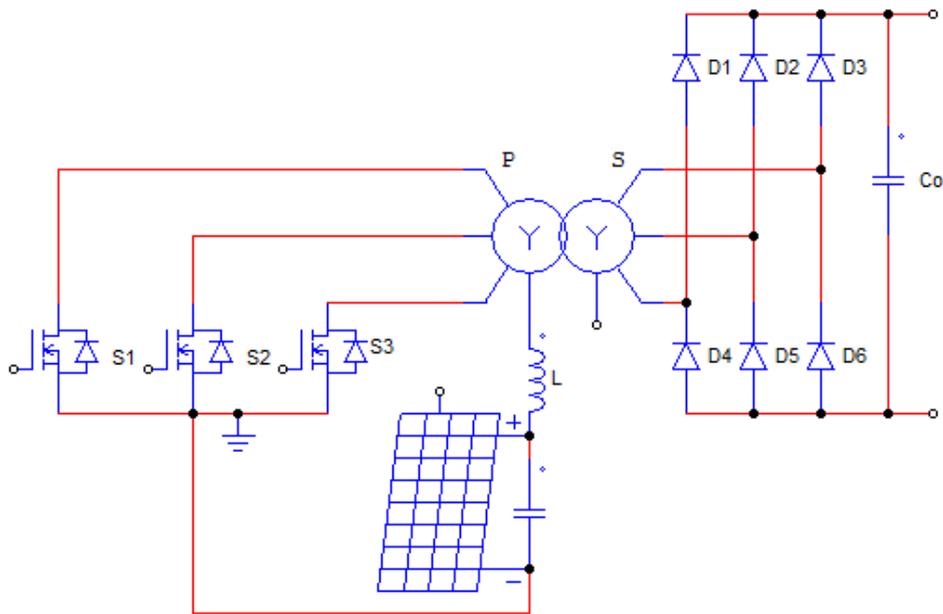
Figura 3-15 Resultado Simulación Puente H, transformador distribuido, n=5, con barrido de  $V_i$



**Figura 3-16 Resultado Simulación Puente H, transformador distribuido, n=10, con barrido de Vi**

De igual forma que con los demás convertidores, aunque en estas gráficas aparezcan zonas con inestabilidades o con la tensión de salida alejada de la tensión objetivo, estas zonas son eliminadas ya que distorsionarían los resultados.

- Push-Pull Trifásico:



**Figura 3-17 Convertidor Push-Pull Trifásico**

- Bajo rizado a la entrada y a la salida.
- $120V \rightarrow 400V$
- $40kHz$
- Transformador de alta frecuencia trifásico y rectificador trifásico, redundan en un menor tamaño (volumen y peso) y coste. Reducción del tamaño de los filtros necesarios.

Para una potencia de salida de  $5kW$ , una tensión de salida alrededor de  $400V$ , se obtienen los siguientes resultados en función de la tensión de entrada:

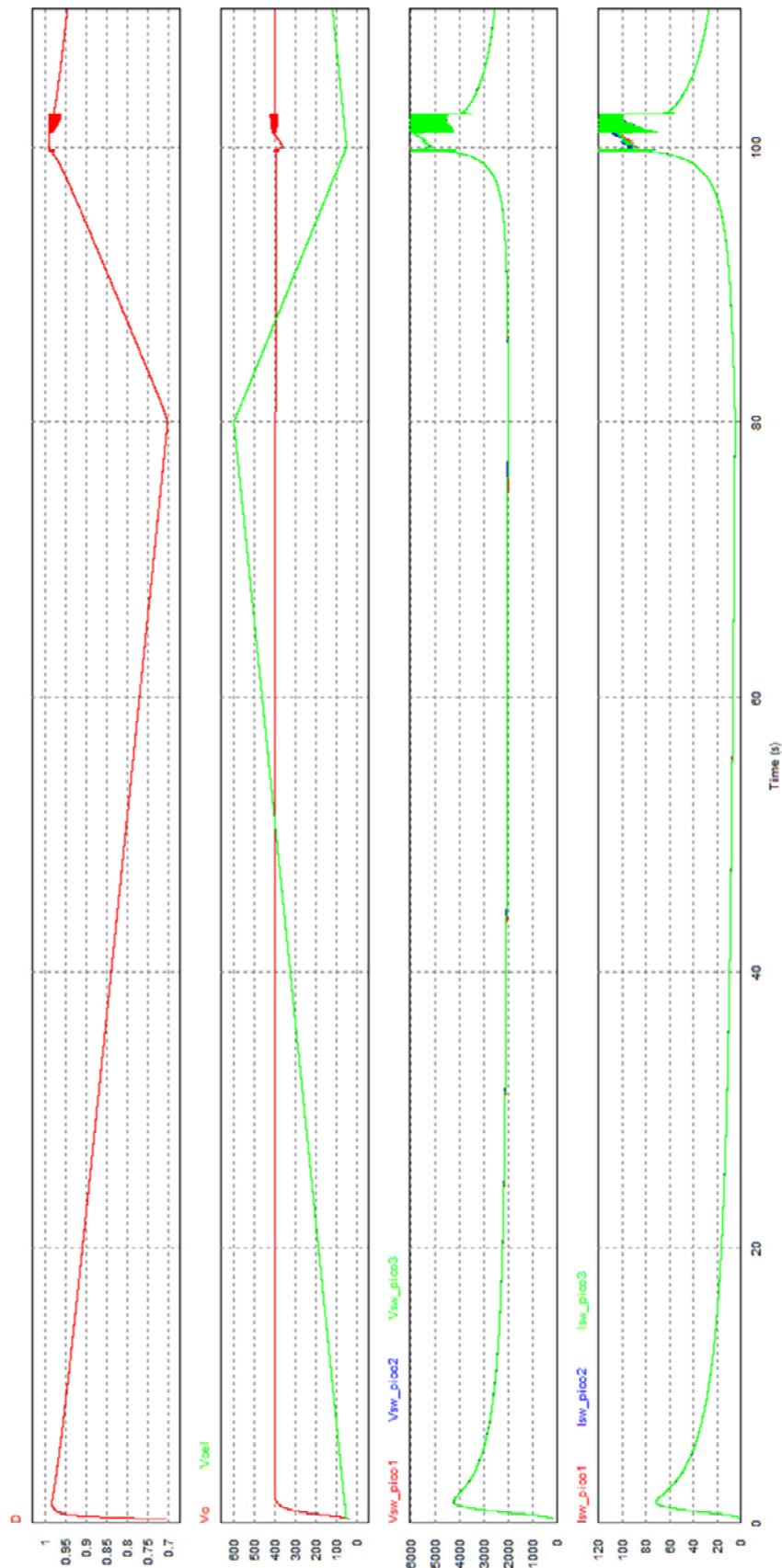


Figura 3-18 Resultado Simulación convertidor Push-Pull trifásico,  $n=0.2$ , con barrido de  $V_i$

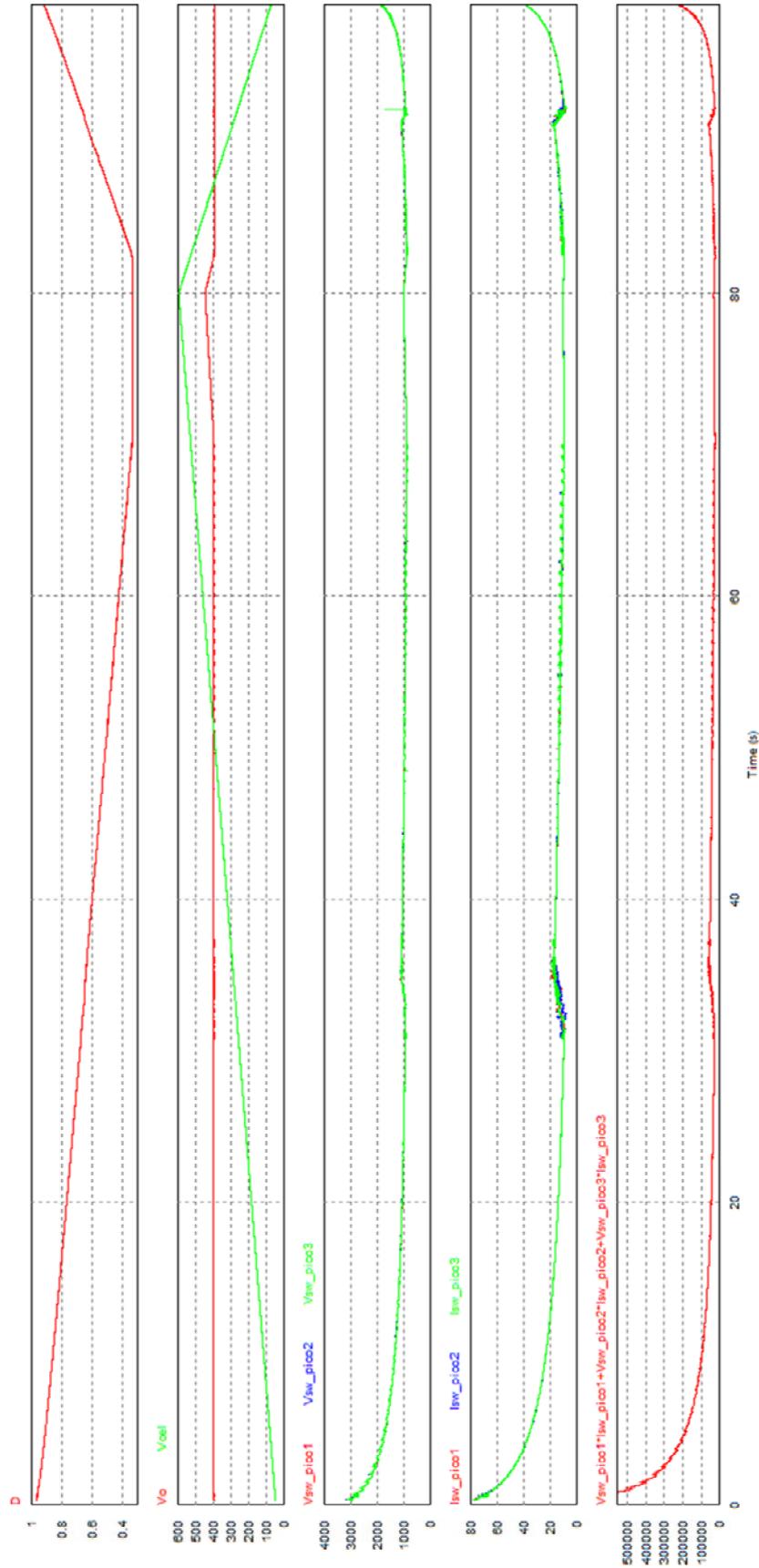


Figura 3-19 Resultado Simulación convertidor Push-Pull trifásico,  $n=0.5$ , con barrido de  $V_i$

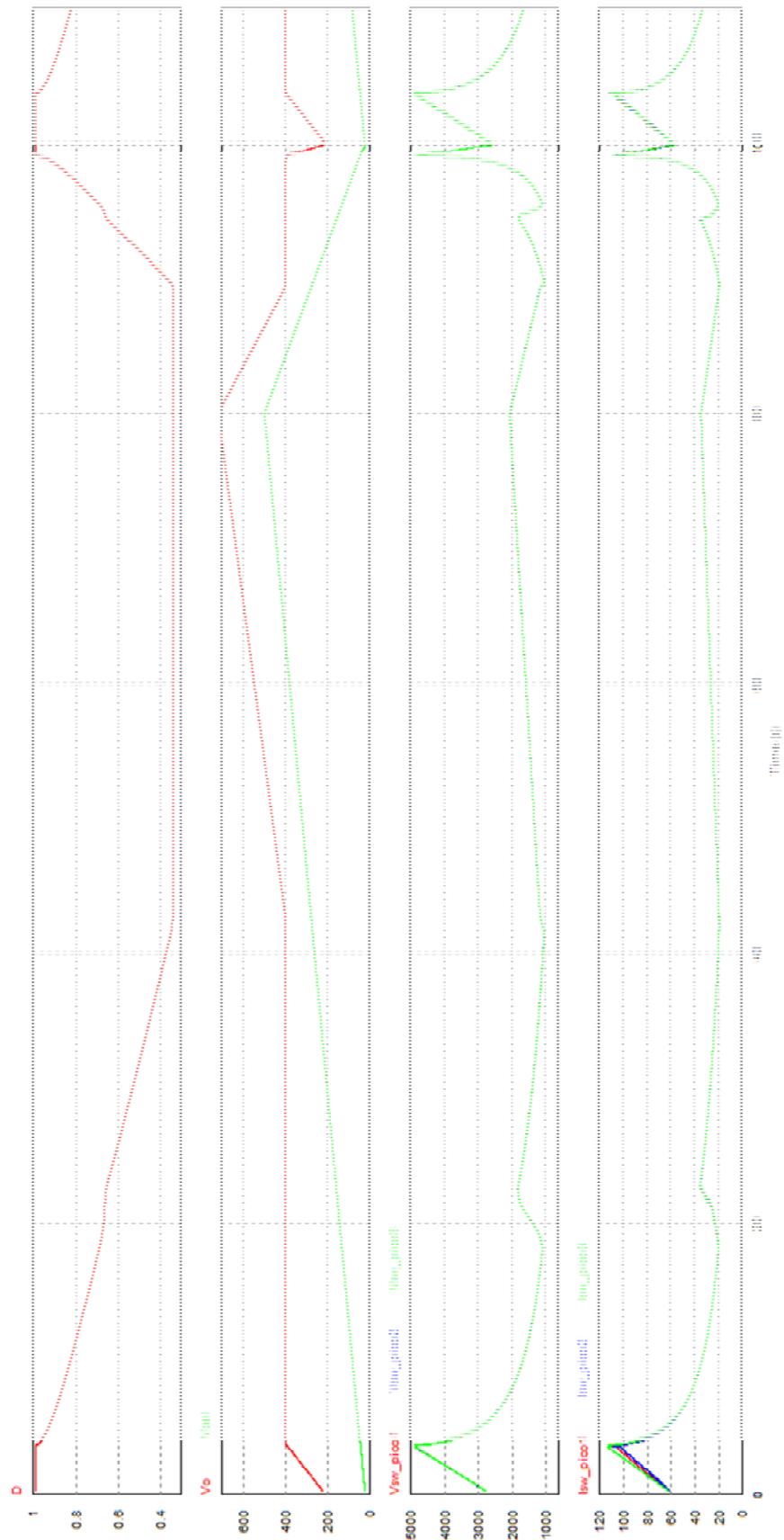


Figura 3-20 Resultado Simulación convertidor Push-Pull trifásico,  $n=1$ , con barrido de  $V_i$

Se observa en estas gráficas, que hay zonas donde la tensión de salida ( $V_o$ ) no llega o se pasa de su objetivo de 400V, estas zonas aparecen tanto en la teoría como en los artículos, por lo que no son caso de estudio y quedan fuera del funcionamiento de estos convertidores. Estas zonas, corresponderían a zonas fuera del rango funcionamiento del convertidor real.

En cuanto al cambio de tendencia que aparece en las tensiones de pico y las corrientes de pico de los transistores cuando sí que es estable  $V_o$ , se debe al cambio de región (de R2 a R3), donde pasa de haber uno o dos transistores en conducción, a dos o tres.

- Puente H + Buck:

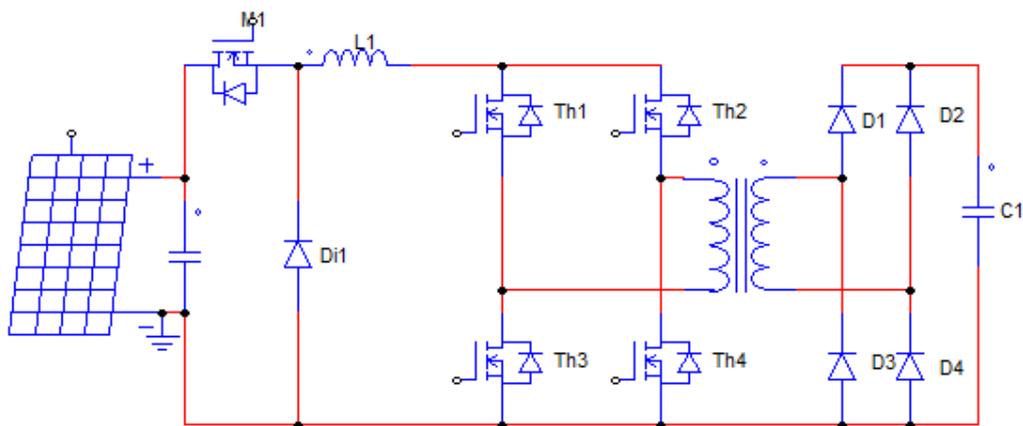


Figura 3-21 Convertidor Puente H + Buck

- Prototipo 1kW.
- 80V  $\rightarrow$  180V
- 45k~108Hz

Para una potencia de salida de 5kW, una tensión de salida alrededor de 400V, se obtienen los siguientes resultados en función de la tensión de entrada:

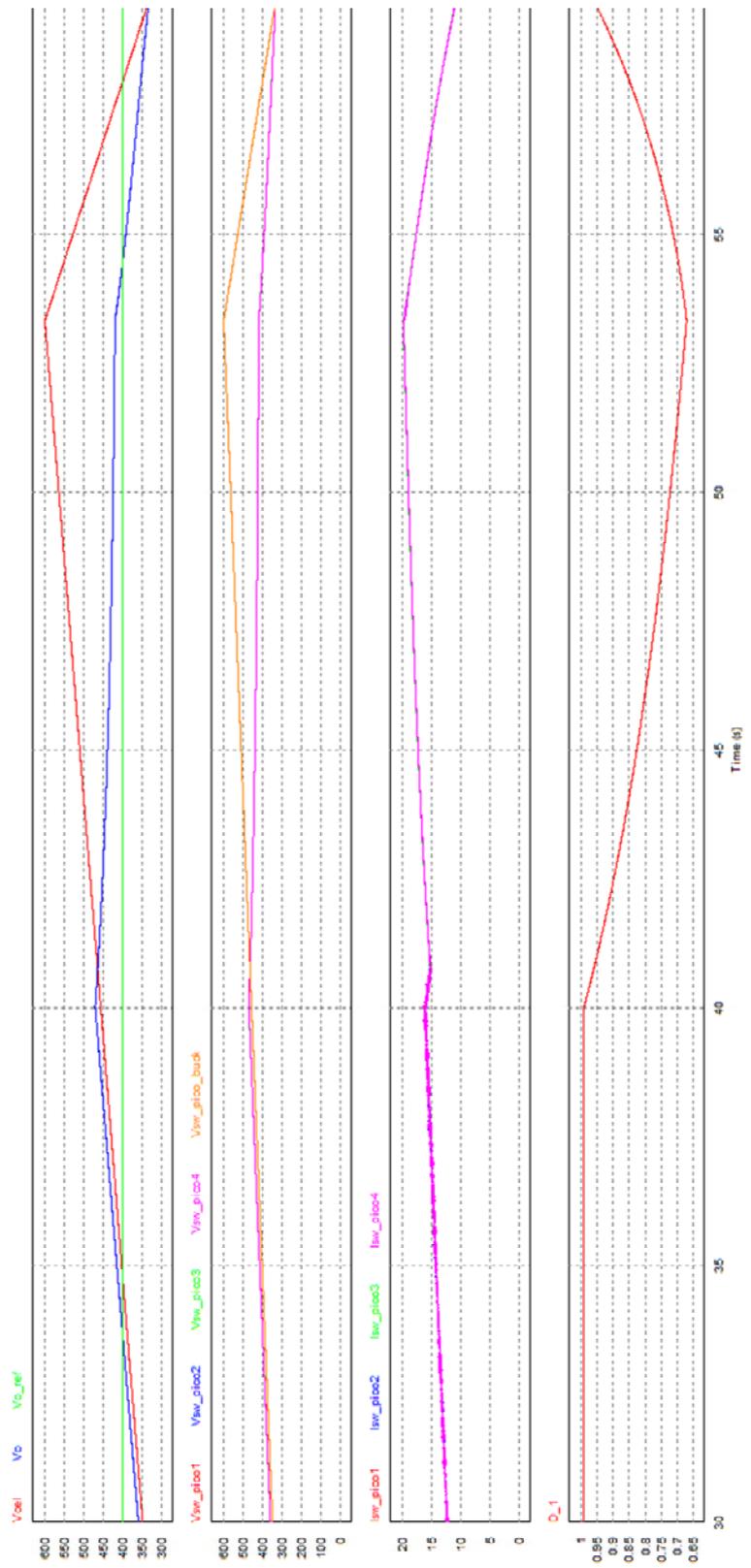


Figura 3-22 Resultado Simulación convertidor Puente H + Buck, n=1, con barrido de Vi

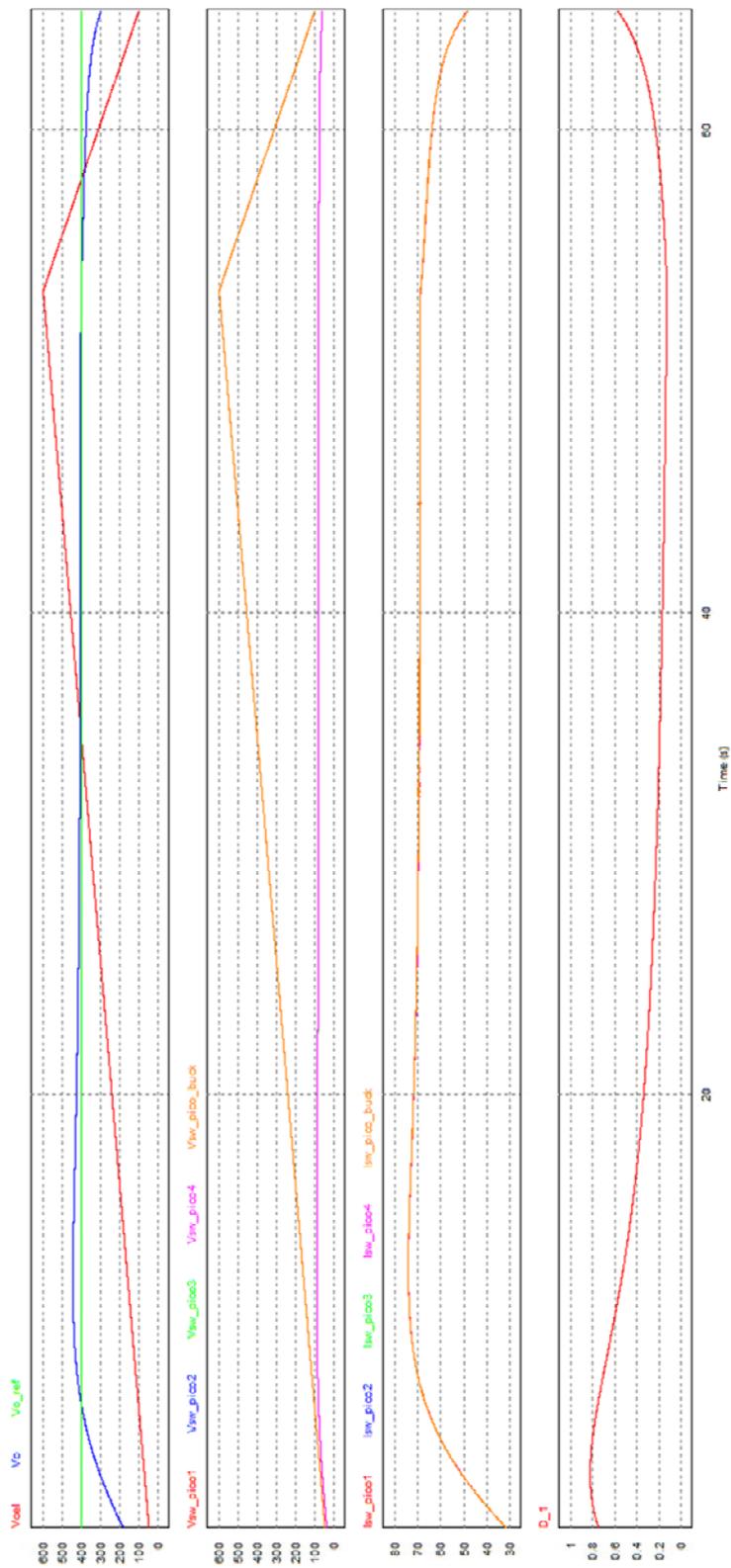


Figura 3-23 Resultado Simulación convertidor Puente H + Buck, n=5, con barrido de  $V_i$

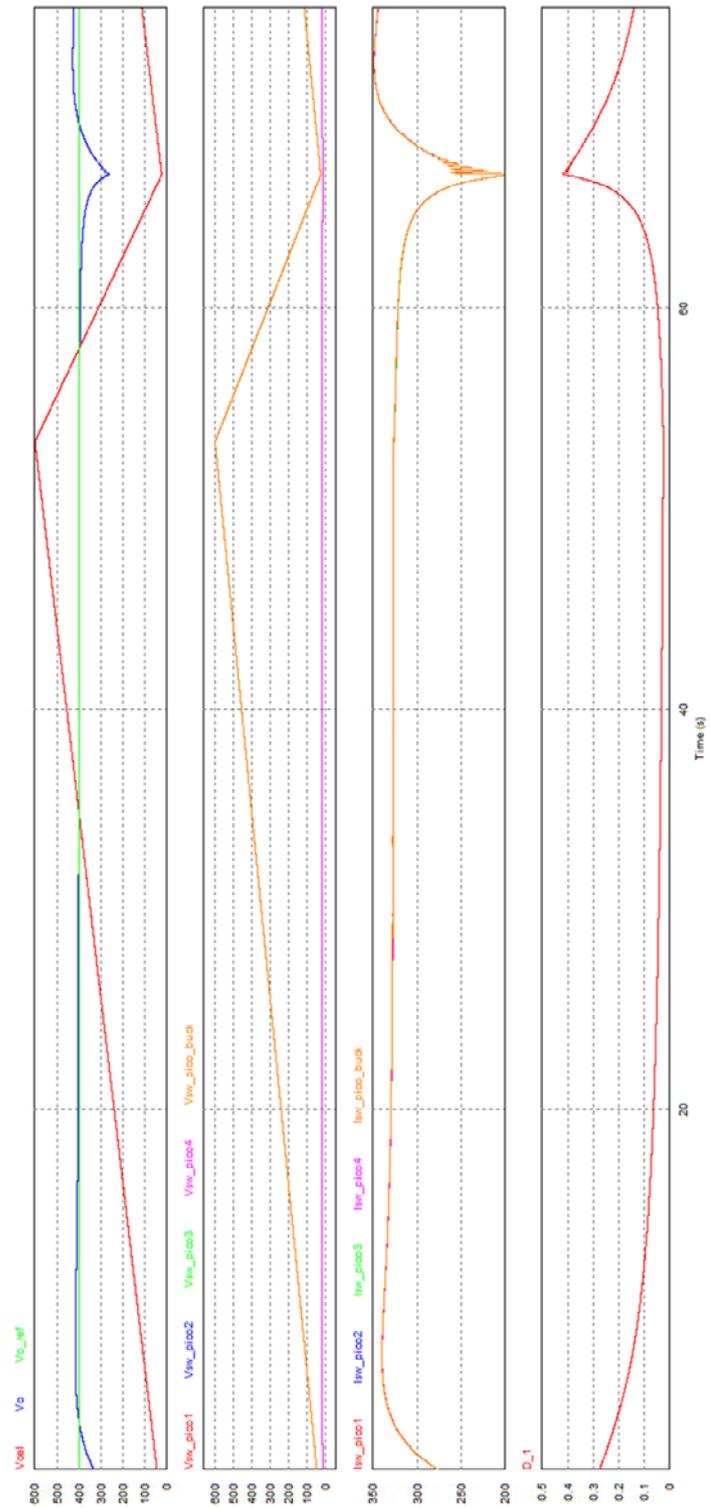


Figura 3-24 Resultado Simulación convertidor Puente H + Buck, n=25, con barrido de Vi

Teóricamente,  $U_{Buck} = \sqrt{D}$ ,  $U_{Puente H} = \frac{D'}{2\sqrt{1+D}}$  ( $D=0.2$ ,  $D'=0.5$ ), y como  $U = P/S$ , y la potencia se maneja entre todo el circuito,  $U = P/(V*I+V*I+...)$ , con lo que  $GU = \frac{0.5}{2 \cdot \sqrt{1+0.2}} \sqrt{Dbuck}$ .

### 3.2. Comparativa

Aquí se presenta una tabla que compara algunas de las características más significativas de los convertidores que se han visto más útiles. El dato de utilización de los interruptores (GU) es orientativo, dado que con cada diseño diferente de un convertidor cambia, aunque sea la misma topología.

Topología	Aislada	Concentrada / Distribuida
Boost simple	No aislada	Concentrada
Dual parcial power Boost	No aislada	Concentrada
Dual Three-phase Boost	No aislada	Concentrada
Three level DC-DC converter	No aislada	Concentrada
Buck simple	No aislada	Concentrada
Buck/Boost no inversor	No aislada	Concentrada
Push-Pull	Aislada	Concentrada
Dos puentes H, secundarios en serie	Aislada	Concentrada
Push-Pull trifásico	Aislada	Concentrada
Push-Pull monofásico + Buck	Aislada	Concentrada

**Tabla 3-1** Tabla resumen de las topologías mostradas.

La utilización de los transistores interesa que sea lo mayor posible, para aprovechar al máximo la tecnología disponible. Dado esto, las mejores topologías que se presentan son, para una conexión no aislada el Boost simple o el dual Three-phase Boost, para conexión aislada se prefiere un Push-Pull monofásico + Buck respecto al active-clamp step-up por su sencillez de control para grados de utilización similares, y para una conexión distribuida la mejor topología es la dual inductor-feed Push-Pull.

Ahora, se comparan los convertidores no aislados, tipo Buck y Boost, centrándonos en el GU, ya que este interesa que sea el más alto posible, para reducir el coste de la electrónica.

En las curvas teóricas, de convertidores aislados, se han estimado el GU a partir de la corriente media de la bobina, asumiendo un error que hace aumentar el GU, ya que con esta aproximación no se considera el rizado de la corriente.

Se presentan simulaciones con resistencia en los transistores y las bobinas, y sin estas resistencias internas, para intentar observar diferencias. En los convertidores Push-Pull, Puente H con transformador distribuido, y Push-Pull trifásico no se ha podido eliminar las resistencias que reducen las sobretensiones en ningún caso, en estos casos se ha utilizado la potencia de entrada y no la potencia de salida.

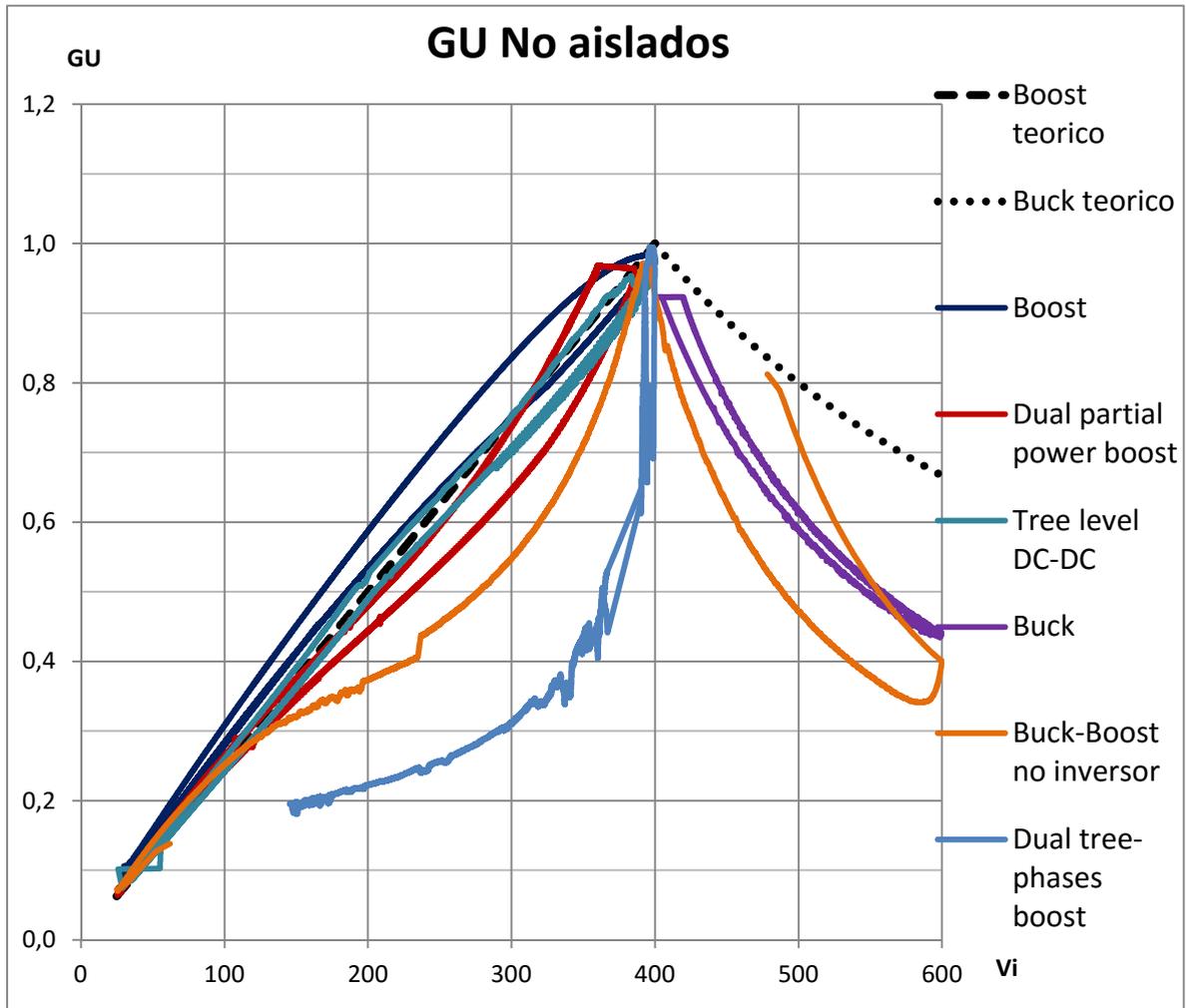


Figura 3-25: Comparativa GU de convertidores tipo Buck y Boost

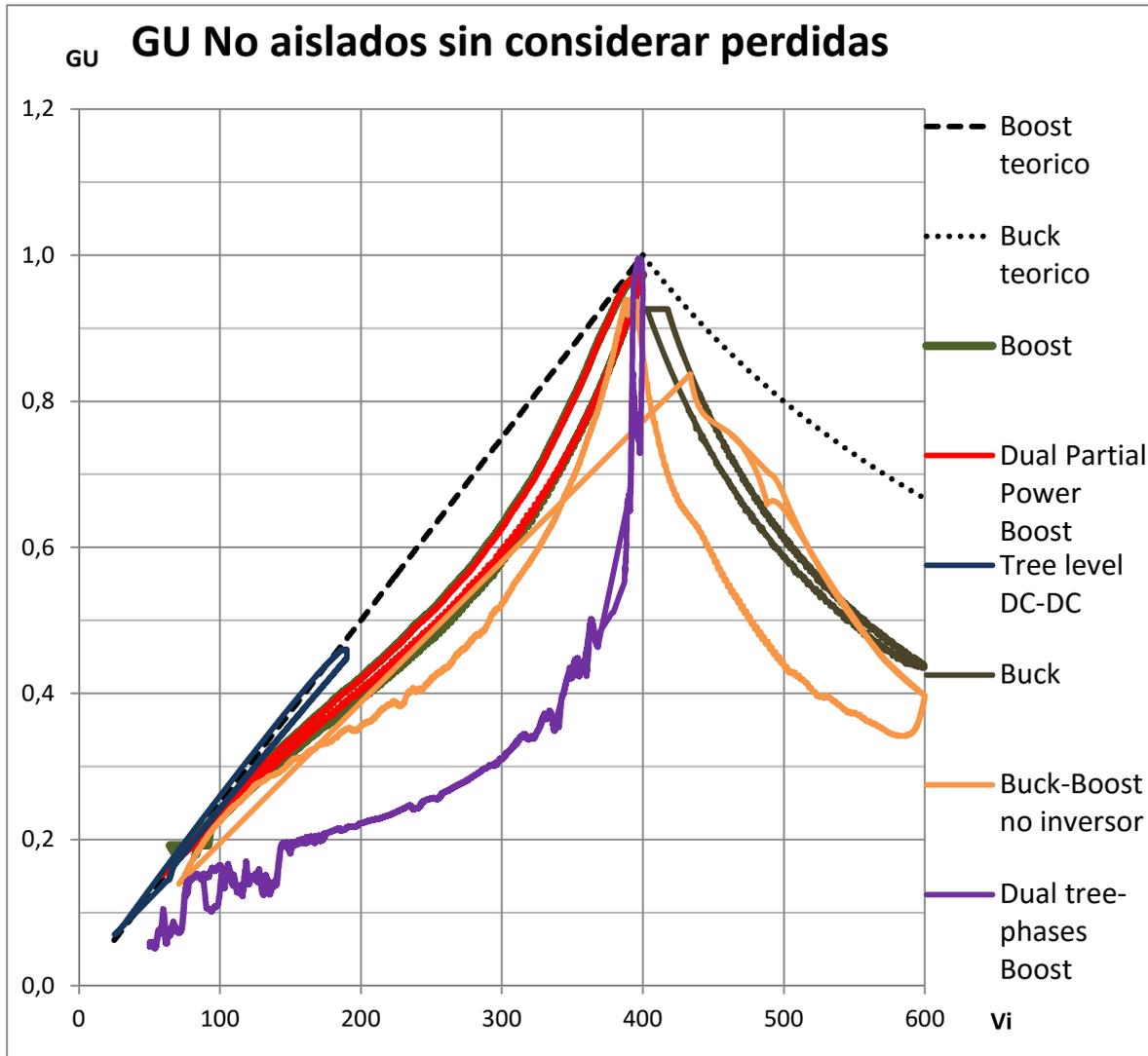


Figura 3-26: Comparativa GU de convertidores tipo Buck y Boost con elementos ideales.

Para convertidores no aislados, todos se comportan muy similar, y bastante ajustados a las curvas teóricas, tanto con elementos ideales como con elementos con resistencia interna, viéndose leves mejorías con elementos ideales.

El caso del convertidor Dual Tree-Phases Boost, se distancia más de la curva teórica debido a que son dos convertidores en paralelo, y al no tomarse medidas para que ambos trasieguen la misma corriente, esta es diferente entre los convertidores, lo que hace que sea más inestable y parezca menos eficiente. En un diseño final se aplicaría un control en modo corriente, de forma que se mitigaría este problema y el GU se acercará al teórico.

Para el convertidor Tree Level DC-DC, en el caso con elementos ideales, no se completó la simulación debido a inestabilidades en el controlador. Esto sería objeto de mejora en un diseño más avanzado. Aun así se observa una leve mejoría.

Ahora se expondrán los convertidores aislados, tipología por tipología, ya que al contemplar varias relaciones de transformación para cada convertidor sería complicado hacer observaciones con muchas gráficas en el mismo espacio.

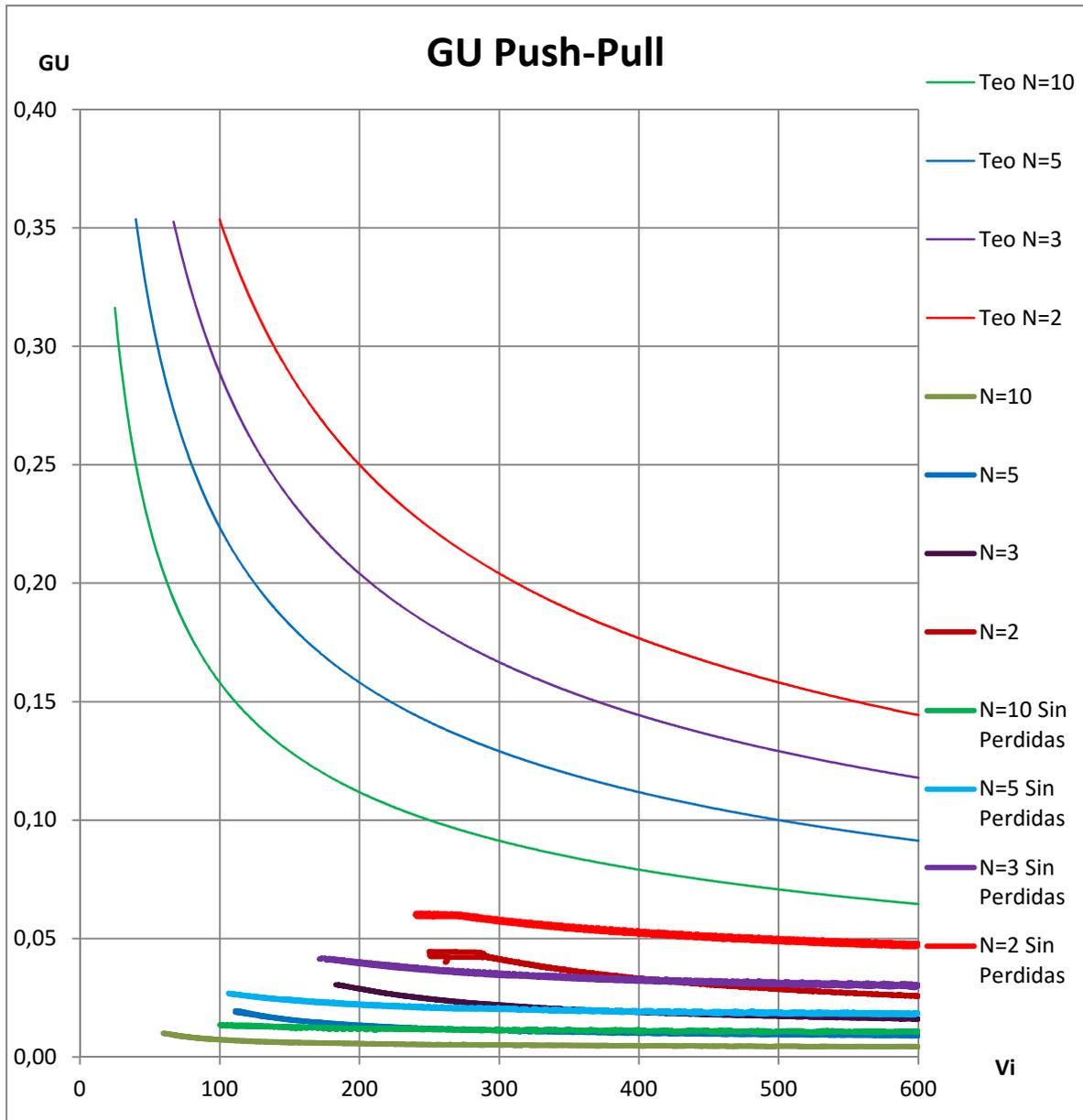


Figura 3-27: Comparativa convertidores Push-Pull monofásicos

Para los convertidores Push-Pull monofásicos, se observa poca diferencia entre las simulaciones con elementos ideales y con elementos con resistencia interna.

La diferencia entre las curvas teóricas y las obtenidas a partir de simulaciones son debidas a las pérdidas en las redes Snubber de protección contra sobretensiones y a posibles parásitos.

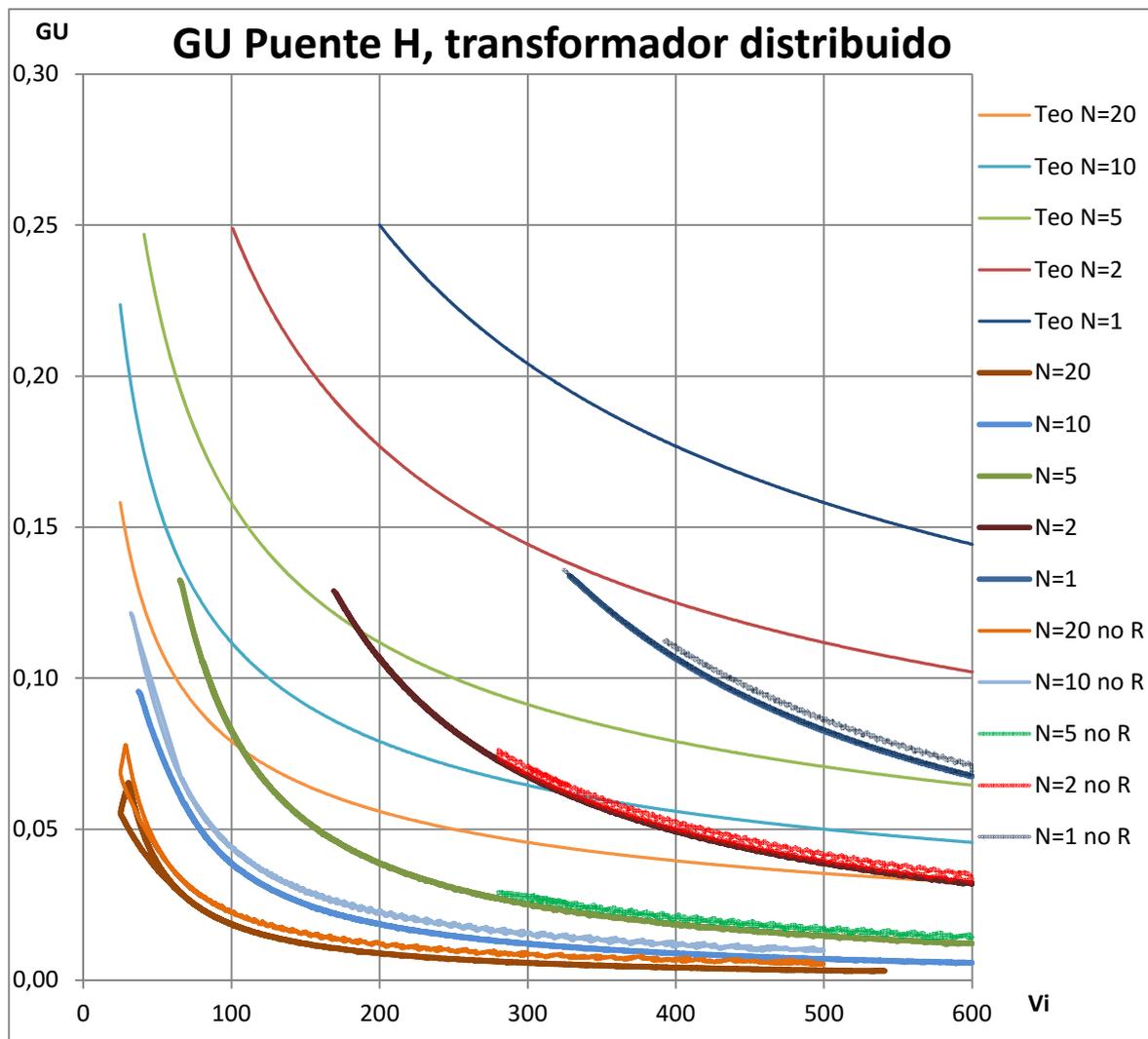


Figura 3-28: Comparativa de convertidores Puentes en H con transformador distribuido.

Para los convertidores tipo Puente en H con transformador distribuido, no ha sido posible en ningún caso eliminar una resistencia en paralelo con el secundario del transformador que evita picos de tensión y la ruptura de los diodos rectificadores. Esta tiene que soportar la tensión del campo de paneles fotovoltaicos multiplicada por la relación de transformación, durante los tiempos de conducción de los transistores. Esto supone unas pérdidas importantes, y debería revisarse en un diseño final.

Dada la influencia de esta resistencia, no se nota apenas diferencia entre las simulaciones con elementos con resistencia interna y las simulaciones con elementos ideales.

En estos convertidores, las curvas de las simulaciones se corresponden en forma con las curvas teóricas, pero discrepan en magnitud.

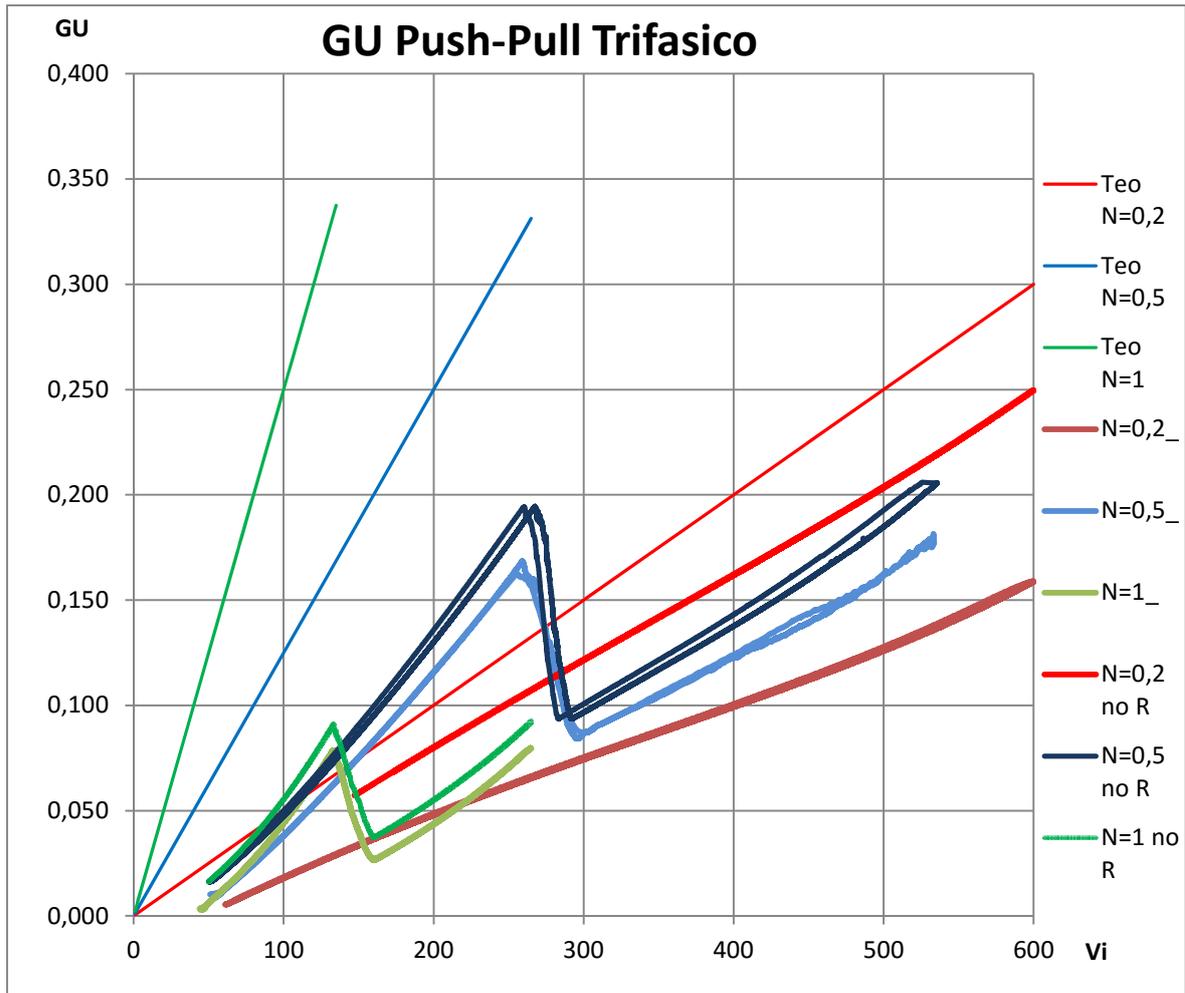
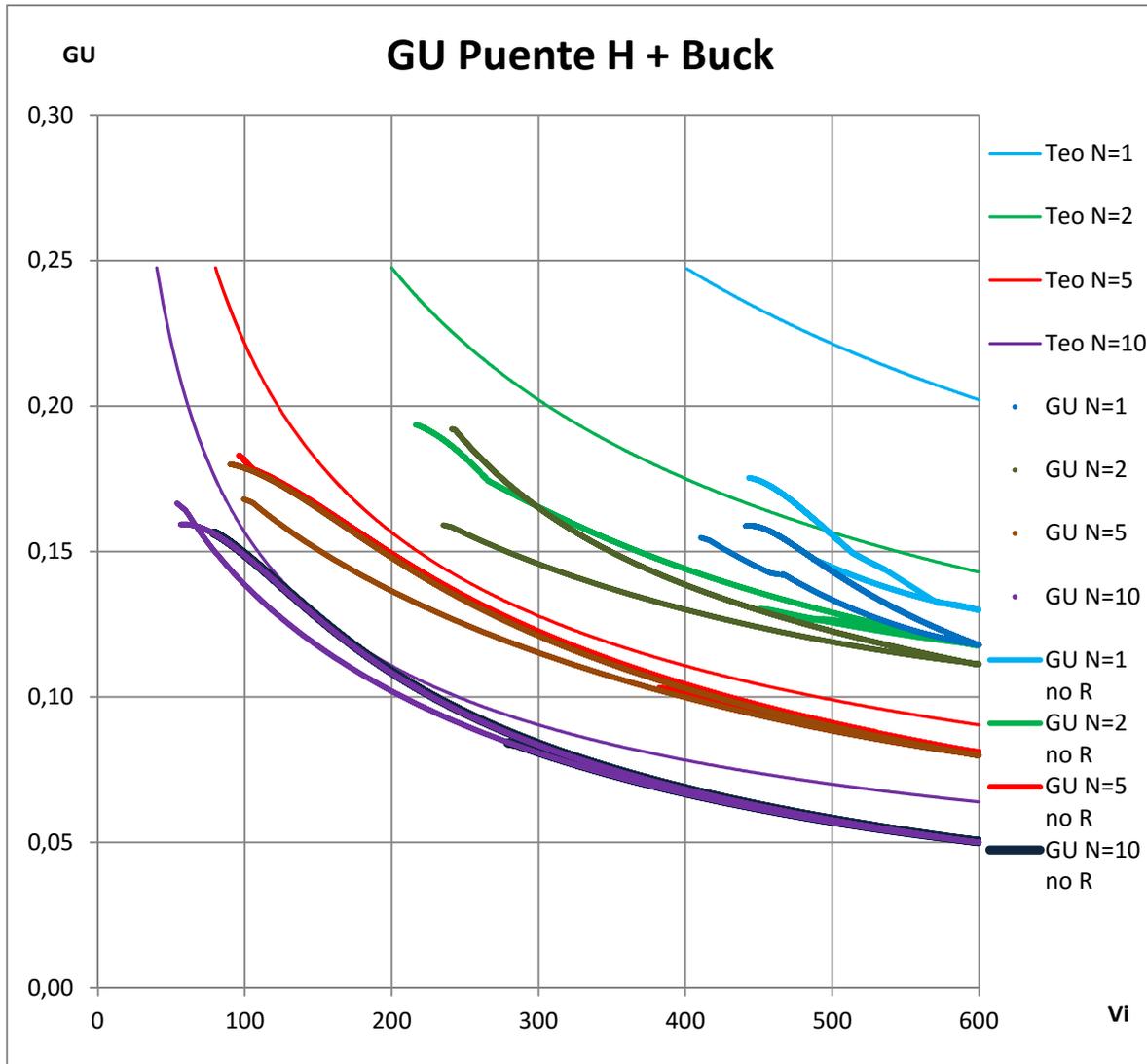


Figura 3-29: Comparativa de convertidores Push-Pull trifásicos

Para convertidores Push-Pull Trifásicos derivados de Boost (Figura 3-29), se observa una correlación de tendencias entre las curvas teóricas y la parte izquierda (antes de la bajada abrupta) de las curvas obtenidas a partir de simulación. En las curvas de simulación la caída abrupta que se da, se debe a que el convertidor entra a funcionar en conducción discontinua, este fenómeno se puede mitigar aumentando la inductancia de bobina (y su tamaño) a costa de reducir tiempo de respuesta.

Las simulaciones obtenidas sin resistencia en los elementos son muy similares a las que consideran pequeñas resistencias.

Las redes Snubber de protección frente sobretensiones introducen pérdidas en los convertidores. Estas redes de protección no es objeto de este trabajo, por lo que sería objeto de mejora en un diseño final, reduciéndose notablemente las pérdidas y aumentando la eficiencia y el GU.



**Figura 3-30: Comparativa de convertidores Puente H + Buck**

En estos convertidores, se evalúa el GU conjunto del Buck con el puente completo, si se evaluaran por separado, el GU obtenido sería mejor. Se ha presentado de esta forma por aglutinar datos y simplificar la presentación.

En los convertidores tipo Puente en H + Buck, se observa que a medida que crece N se asemejan más las curvas obtenidas de las simulaciones a las curvas teóricas. Las curvas correspondientes a simulaciones con elementos ideales, mejoran un poco, sobretudo en relaciones de transformación bajas. Por todo esto se deduce que estas discrepancias son debidas a parásitos, ya que donde se dan mayores diferencias es para relaciones de transformación pequeñas, que es donde los transistores están conectados mayor tiempo (D cercano a 0.5) y puede que no esté llegando nunca a desmagnetizarse el transformador entre ciclo y ciclo.

### 3.3. Selección de los mejores rangos para las diferentes tipologías presentadas.

Tras las observaciones hechas en el apartado anterior, recordando que el GU es un indicador del stress del conjunto de transistores, y considerando que el coste de la electrónica es inversamente proporcional al GU (“*converter switch utilization*” en la formula (3-4) ), se ha obtenido la siguiente gráfica donde se resumen las mejores zonas de trabajo de cada convertidor estudiado.

$$\left( \begin{array}{c} \text{semiconductor cost} \\ \text{per kW} \\ \text{output power} \end{array} \right) = \frac{\left( \begin{array}{c} \text{semiconductor device cost} \\ \text{per rated kVA} \end{array} \right)}{\left( \begin{array}{c} \text{voltage} \\ \text{derating} \\ \text{factor} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{current} \\ \text{derating} \\ \text{factor} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{converter} \\ \text{switch} \\ \text{utilization} \end{array} \right)} \quad [43] \quad (3-4)$$

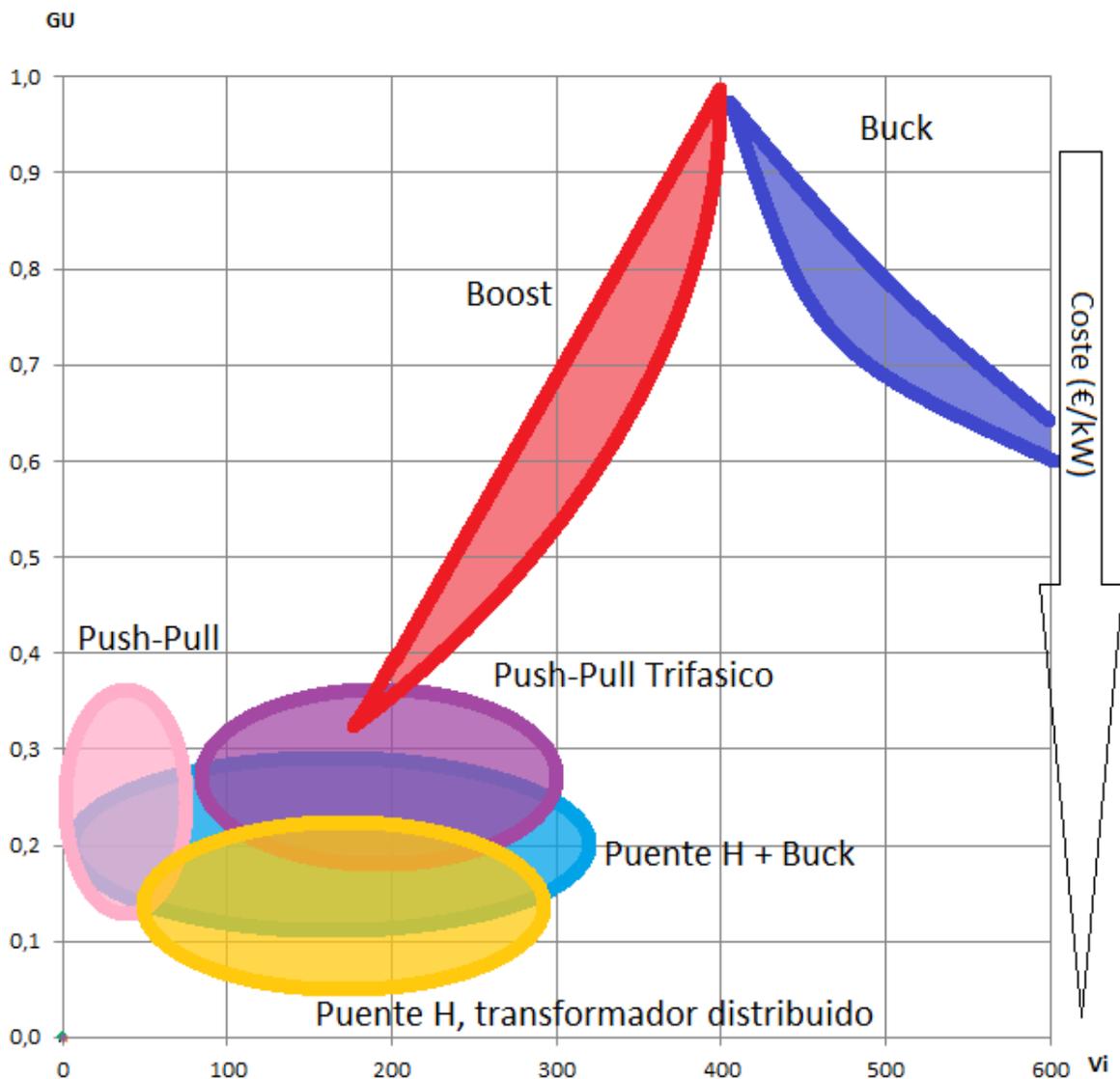


Figura 3-31: Mejores zonas de trabajo de cada tipo de convertidor.

En la Figura 3-31 se presentan las mejores zonas de trabajo para convertidores no aislados, convertidores tipo Puente en H + Buck, y convertidores tipo Puente en H con transformador distribuido. Para los convertidores tipo Push-Pull y Push-Pull Trifásico tipo Boost se ha presentado una zona más cercana al teórico que al obtenido por simulación porque se entiende que por falta de ajustes las simulaciones han quedado muy lejos de las posibilidades reales.

---

[40] Gabriel Garcerá Sanfelú, Emilio Figueres Amorós, Antonio Abellán García. Convertidores conmutados: Circuitos de potencia y control. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALENCIA, Servicio de Publicaciones.

[41] Gabriel Garcerá Sanfelú, Emilio Figueres Amorós, Antonio Abellán García. Convertidores conmutados: Circuitos de potencia y control. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALENCIA, Servicio de Publicaciones.

[42] Robert w. Erickson, Dragan Maksimovic. Fundamentals of Power Electronics. University of Colorado, Boulder, Colorado. Ed Springer

[43] Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic. Fundamentals of Power Electronics. University of Colorado, Boulder, Colorado. Ed Springer.

## 4. Conclusiones.

Dado lo visto en el apartado anterior, y remitiéndonos a la Figura 3-31, es evidente que para tensiones en el campo fotovoltaico superiores a 200V van a ser más eficientes y económicas topologías no aisladas, siempre que no haya ningún impedimento técnico o legal. En caso contrario, para ese rango de tensiones se recomienda un Puente H + Buck, ya que tanto teóricamente como prácticamente tiene un GU superior a los demás.

Dentro de los convertidores no aislados, se desaconseja el convertidor Buck-Boost no inversor, ya que es poner un convertidor Buck en serie con un Boost aprovechando la misma inductancia para ambos. Esto supone más electrónica, y por lo tanto más coste y más dificultad.

Siguiendo con los convertidores no aislados, se recomienda desarrollar el convertidor Dual Tree-Phases Boost. Este tipo de convertidor, al ser dual permite tener el campo fotovoltaico dividido en dos, con dos MPPT (Max Power Point Tracking) que mejoran la eficiencia del conjunto ya que si cada parte del campo fotovoltaico está en unas condiciones diferentes (por alguna sombra, por diferencias de temperatura, etc.) cada MPPT optimizará la forma de extraer la máxima potencia de lo que tenga conectado. Como ventaja, al ser un Boost trifásico se reducen mucho el rizado de entrada y el rizado de salida, reduciéndose el stress y el tamaño de los condensadores, y de los posibles filtros. Además, al repartirse la corriente total entre 6 transistores, diodos y bobinas, no habrá la necesidad de buscar transistores y diodos de gamas de altas corrientes que encarecen el precio, y se construirían 6 bobinas más pequeñas que ocupan menos volumen, disipan mejor el calor, y es más fácil colocarlas dentro de la envolvente del convertidor.

Para tensiones entre 100V y 200V, aunque teóricamente el convertidor Push-Pull Trifásico podría funcionar, se ha observado que subiendo la tensión de entrada cambia de modo de funcionamiento a uno con un GU bastante más bajo y con menor rendimiento, por lo que se prefiere un Puente H + Buck, y además de no presentar esa problemática, prácticamente sí que se ha llegado en algunos casos al GU teórico, y la variación de GU que tiene no es abrupta, por lo que se espera que para un diseño concreto centrado en un rango de tensiones del campo fotovoltaico estrecho (una variación de 50V) no va a presentar grandes cambios de GU, y por tanto tampoco va a presentar grandes variaciones de rendimiento dentro del rango. Como añadido, el puente en H o puente completo se presenta como una topología conocida y utilizada para potencias del orden con la que se ha hecho el estudio y potencias superiores, y el conjunto de Puente en H + Buck no tiene un control complicado.

No se considera viable ningún campo fotovoltaico con tensión nominal por debajo de 100V, para potencias nominales alrededor de 5000W. Esto supondría tener 50A o más por el cableado del campo fotovoltaico, lo que conlleva muchas pérdidas.

## 5. Resumen.

Para las circunstancias en las que se ha hecho el estudio, que son alrededor de 400Vdc de salida y 5000W de potencia pico del campo fotovoltaico, se ha empezado estudiando multitud de artículos científicos y técnicos sobre convertidores y sus topologías, descartando muchos por no poder trabajar en los rangos en que se pide, otros por ofrecer funciones irrelevantes para el fin que se quiere destinar, y otros por razones técnicas.

A la hora de hacer los estudios, quedaban 10 tipos de convertidores, sobre los que se han hecho simulaciones con unos esquemas y controles básicos de los convertidores, para comprobar que son capaces de funcionar en las circunstancias que se requieren y también para obtener datos sobre su funcionamiento y sus bondades.

A continuación se ha utilizado un indicador, GU, que hace referencia al grado de aprovechamiento de los transistores, y a la vez es inversamente proporcional al coste. Mediante gráficas, se ha comparado este indicador entre su valor teórico y su valor obtenido de las simulaciones, para cada punto, y entre los convertidores seleccionados, obteniéndose unos abanicos de curvas donde se observa claramente en qué condiciones trabaja mejor cada convertidor.

Con todos estos datos, se ha seleccionado los siguientes convertidores, cada uno para una zona de trabajo.

- a) No se considera viable tener campos fotovoltaicos con tensiones nominales por debajo de 100V, para una potencia nominal alrededor de 5000W. Para este fin, se deriva a etapas DC-DC de microinversores que trabajan en el rango de 200W a 400W, y de 50V a 150V.
- b) Para tensiones entre 100V y 200V se selecciona el convertidor tipo Puente H + Buck.

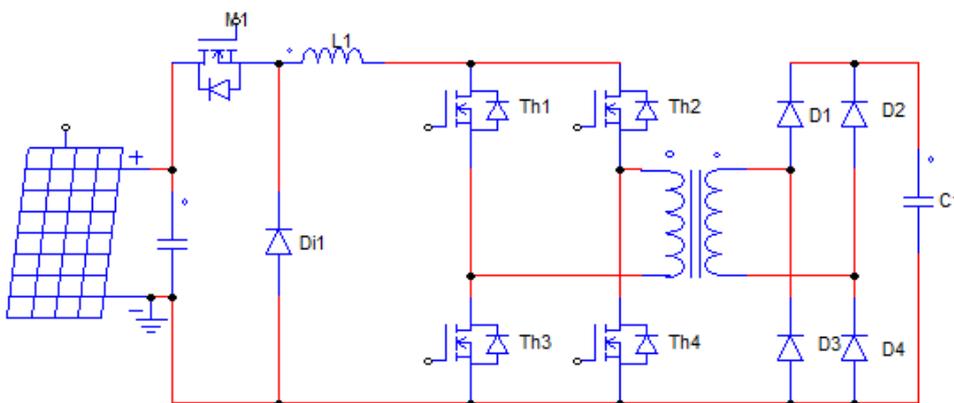


Figura 5-1 Convertidor Push-Pull monofásico + Buck

- c) Para tensiones entre 200V y 400V se selecciona un convertidor tipo Dual Tree-Phases Boost.

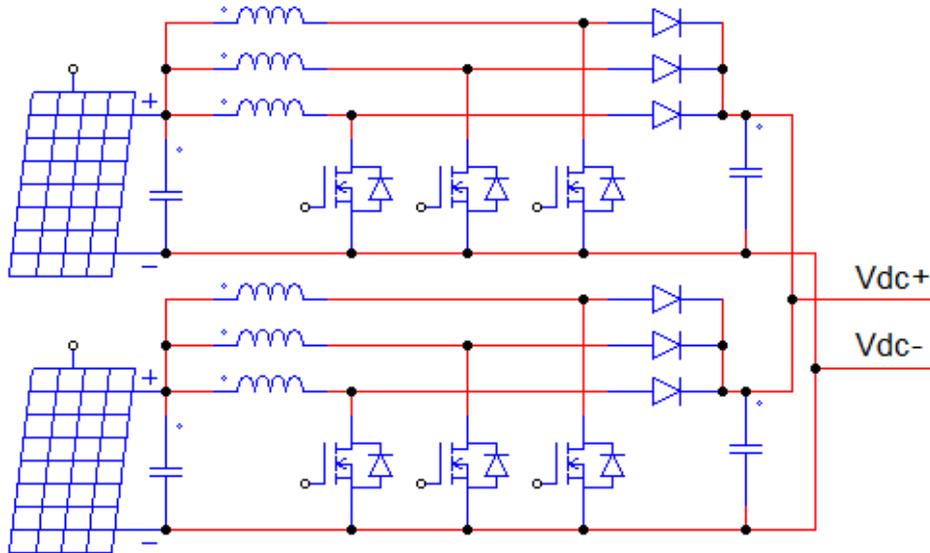


Figura 5-2 Convertidor Dual three-phase boost

- d) Para tensiones entre 400V y 600V se selecciona un convertidor tipo Buck.

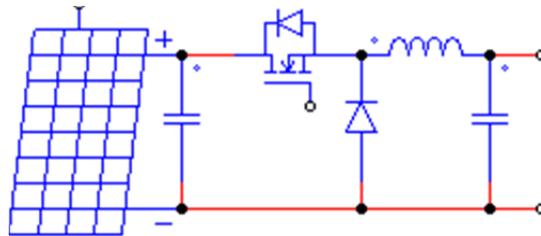


Figura 5-3 Convertidor Buck



## **6. Trabajos futuros.**

Para un futuro cercano, se debería calcular cual es la relación de transformación, y la inductancia ideal para cada caso, hacer más simulaciones y hacer un diseño optimizado de los controladores y de las redes de protección.

Para un futuro a medio plazo, desarrollar prototipos de los inversores, probarlos en laboratorio para obtener curvas de rendimiento en función de la potencia manejada y de la tensión de entrada o del ratio tensión de salida dividido por la tensión de entrada ( $V_o/V_{in}$ ). También sería interesante obtener y analizar capturas del osciloscopio con las tensiones y corrientes en los transistores, diodos, bobinas y transformadores, sobre todo cerca de los límites donde puede funcionar.

Finalmente, quedaría montar prototipos de los convertidores en una instalación fotovoltaica real, y analizar su funcionamiento a lo largo de un año como mínimo, para poder obtener datos en la máxima variedad de situaciones posibles, ya que las características de los paneles fotovoltaicos hacen que la tensión y la corriente cambien en función de las condiciones ambientales.