

# Series capacitor tapped buck para aplicaciones en imanes superconductores

Alberto Otero-Olavarrieta , Iñigo Martínez de Alegria , Estefania Planas , Edorta Ibarra ,  
Asier Matallana 

Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)  
alberto.otero@ehu.eus

**Resumen**—Durante la última década las aplicaciones que requieren una gran reducción de tensión, se han convertido en un tema emergente en la electrónica de potencia. Entre algunos ejemplos están el suministro de energía a los sistemas embebidos modernos, así como la mejora de la eficiencia en instalaciones que demandan corrientes altas y una tensión baja, como las máquinas de soldadura o los imanes superconductores. Este es el caso de la actualización de Alta Luminosidad del Gran Colisionador de Hadrones en el CERN, que implica la instalación de nuevos imanes superconductores para aumentar el número de colisiones en el acelerador y producir nuevos descubrimientos. En este trabajo se presenta un análisis de una de las topologías novedosas en este campo, el convertidor *series capacitor buck*, con diferentes configuraciones de bobinas *tapped*, que permiten ampliar el rango de la tensión de salida y adaptarla mejor al acelerador. Las modificaciones propuestas en la topología se han validado a través de resultados experimentales en un prototipo.

**Index Terms**—Tapped, bobina, inductor, tapped-inductor, series, capacitor, DC-DC, convertidor, rizado, corriente, conversion, ratio.

## I. INTRODUCCIÓN

En la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN), se encuentra el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), el mayor acelerador de partículas y una de las mayores instalaciones de investigación del mundo [1]. Con sus 27 km de longitud circular, acelera haces de hadrones (protones) al 99.99% de la velocidad de la luz, lo que genera nuevas partículas como resultado de las colisiones de dichos protones. Uno de los mayores méritos del LHC es la detección del bosón de Higgs a 125 GeV en los experimentos ATLAS [2] y CMS [3], confirmando la existencia del campo de Higgs predicho por el modelo estándar de la física de partículas. Para ampliar su capacidad de detección, el LHC requiere un elevado número de innovaciones en múltiples tecnologías. Por ello, se está llevando a cabo la actualización de Alta Luminosidad (HL-LHC), que tiene como objetivo mejorar el número de colisiones que se producen, así como incrementar la disponibilidad del acelerador. Entre las mejoras, se encuentran nuevos colimadores, criotecnología de vanguardia, nuevos enlaces superconductores e imanes [4], [5].

En este artículo se discute la forma en que se podría proporcionar energía a los nuevos imanes cuadrupolares superconductores de  $Nb_3Sn$ , situados junto a ATLAS y CMS. Estos imanes de última generación funcionarán a una temperatura de 1.9 K, produciendo un campo magnético máximo de 11.4 T [5], [6]. La estrategia de alimentación prevista para

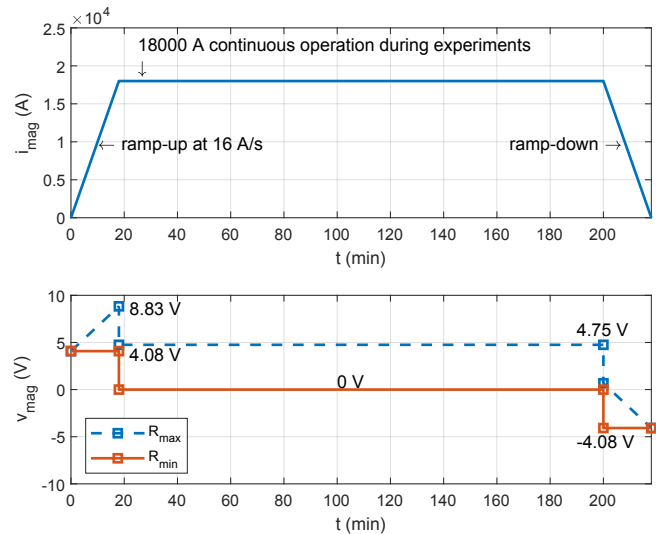


Figura 1: Formas de tensión y corriente durante el ciclo de operación de los imanes HL-LHC.

estos imanes requiere una fuente de alimentación de 18 kA y  $\pm 10 \text{ V}$  [5] [6] (Fig. 1). Incluirá convertidores DC / DC multifase de dos cuadrantes, que recibirán la energía de una batería intermedia de 24 V, haciéndola independiente de la red eléctrica (Fig. 2).

Se está desarrollando una solución convencional para esta aplicación basada en una topología de puente completo bidireccional [7] [8], que funciona alternativamente como un convertidor *buck* o *boost*. El bajo valor de resistencia en los enlaces superconductores impone un funcionamiento de baja tensión y muy alta corriente. Esto implica una reducción muy alta de la tensión de entrada durante el funcionamiento en régimen permanente, "meseta", del acelerador (Fig. 1). Cuando se inicia el ciclo de alimentación de los imanes, se requiere una breve rampa que sube hasta 8.83 V para el caso de máxima resistencia de los enlaces superconductores (Fig. 1). Sin embargo, esto es considerando el peor caso ( $R_{max}$ ), y un período de tiempo que sólo representa una fracción de las 12 horas de funcionamiento del acelerador. Los avances en los enlaces superconductores por sí mismos [6] pueden acabar eliminando este procedimiento, y requerir una tensión de rampa más baja, de 4.08 V o menos.

En este contexto, el convertidor *series capacitor buck* (SCB) (Fig. 3) se presentó para mejorar las limitaciones en regulación

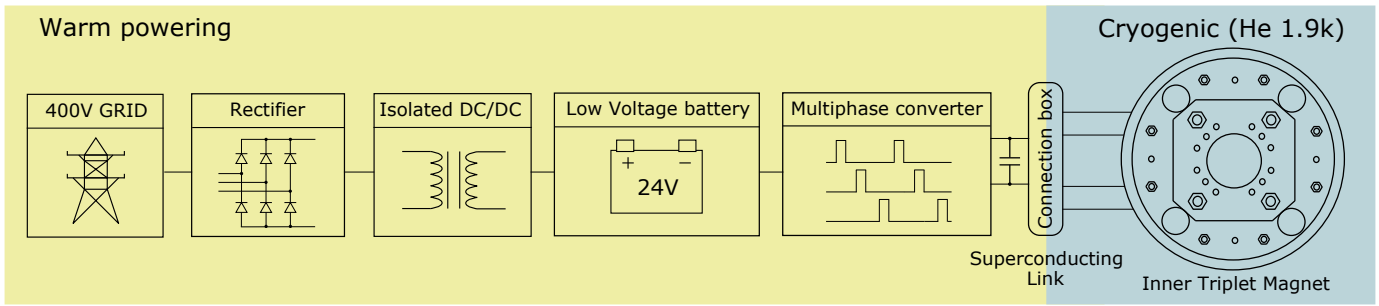


Figura 2: Estrategia de alimentación para los imanes HL-LHC.

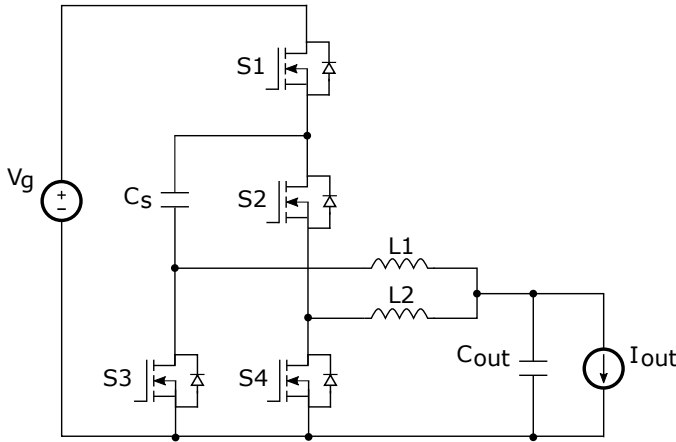


Figura 3: Series capacitor buck (SCB) convencional.

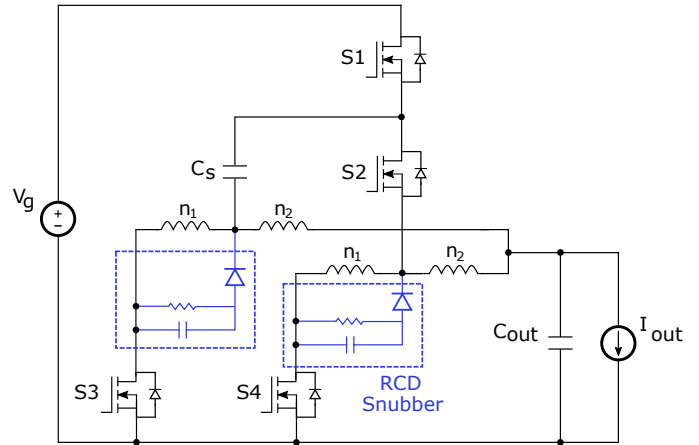


Figura 4: Configuración SCB *tapped* (SCB-TCS).

precisa y rizado de la salida en el *buck* tradicional [9], [10], en aplicaciones *point-of-load* (POL). En general, los convertidores *buck* presentan una buena regulación y eficiencia [11]. Sin embargo, la obtención de tensiones de salida muy bajas impone mucho estrés en los semiconductores de potencia y la eficiencia global a frecuencias de conmutación altas disminuye. El SCB se introdujo para abordar estos problemas. La principal diferencia con un convertidor *buck* es que introduce un condensador en serie  $C_s$ , entre los dos interruptores de la primera rama, que divide la tensión de entrada por dos (Fig. 3). Esto hace que todos los semiconductores del convertidor funcionen con una tensión de drenador-fuente de  $V_g/2$ . En consecuencia, se reduce la corriente de la bobina y las pérdidas de conmutación, además de conseguir un equilibrio automático de las corrientes en las fases. Las principales ventajas de esta topología pueden resumirse en:

- Para una referencia de tensión dada, el ciclo de trabajo ( $D$ ) se duplica, ya que la salida cambia con  $D \cdot V_g/2$ . De este modo, se mejora el rendimiento del convertidor en condiciones de alta reducción de tensión.
- Las pérdidas de conmutación se reducen considerablemente, ya que la tensión aplicada en los terminales de los semiconductores, es también la mitad de la tensión de entrada.
- La corriente en ambas fases del convertidor se equilibra automáticamente, mientras que los convertidores *buck* entrelazados requieren lógica de control y sensores adicionales.

Sin embargo, también presenta desventajas, como una ten-

sión de salida máxima reducida de  $V_g/4$  debido a un ciclo de trabajo limitado del 50 %. En este caso, no es suficiente para el escenario de la resistencia máxima en los imanes HL-LHC. Se han realizado varios estudios sobre los convertidores *series capacitor tapped buck* [12]–[15]. Sin embargo, estas topologías alternativas utilizan interruptores adicionales que aumentan el coste global del convertidor. Por lo tanto, en este artículo, se presenta una topología *tapped* derivada del SCB original (Fig. 4), que mantiene el mismo número de dispositivos de conmutación y hace uso de circuitos *snubber* para eliminar de los picos de tensión.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección II, se presenta y analiza la topología propuesta, y se discuten las consideraciones sobre su diseño. En la sección III, se explican los resultados experimentales obtenidos en el prototipo, y se resumen los componentes utilizados para ello. Finalmente, en la sección IV, se discuten las conclusiones obtenidas de los ensayos, además de los futuros trabajos en esta línea de investigación.

## II. CONFIGURACIÓN DE BOBINAS *tapped* EN *series capacitor buck*

A partir del SCB convencional (Fig. 3) se puede derivar una configuración con bobinas *tapped*, denominada SCB con toma en el condensador serie (SCB-TCS), que conecta las patas inferiores del condensador en serie  $C_s$  y S2, al terminal central de la bobina (Fig. 4). Para eliminar los picos de tensión producidos en las topologías *tapped*, se ha colocado una red de circuitos *snubber* a través de uno de los devanados (Fig. 6). La principal ventaja de las bobinas *tapped* es que, con la

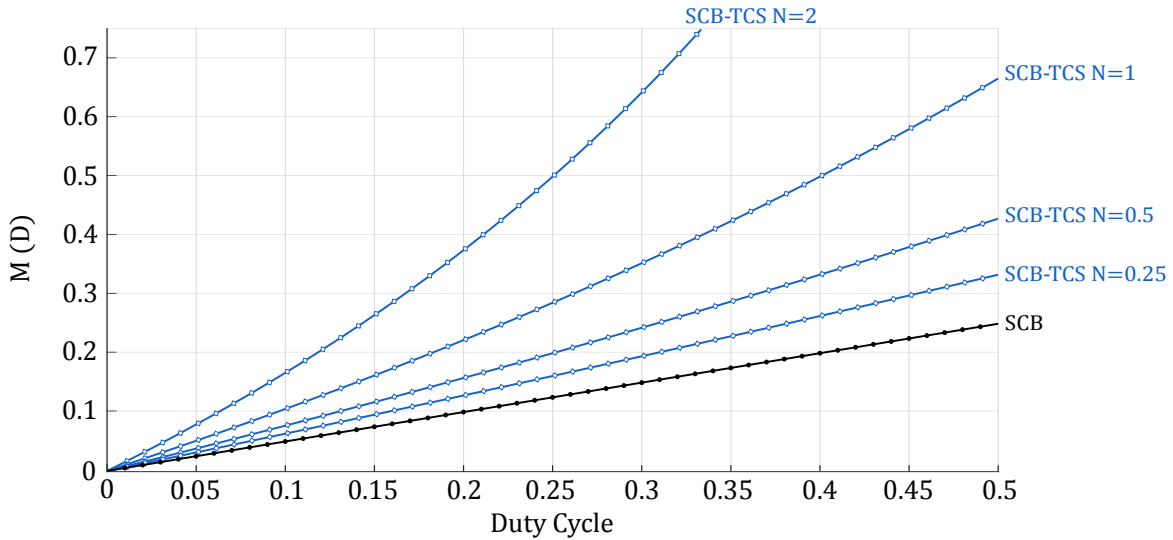


Figura 5: Relación de conversión ( $M$ ) de los convertidores propuestos.

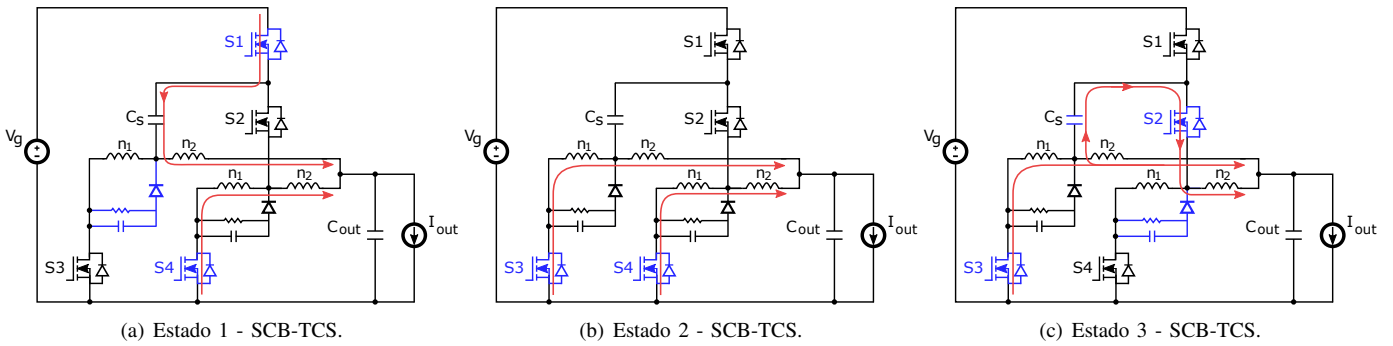


Figura 6: Estados de operación en el SCB-TCS.

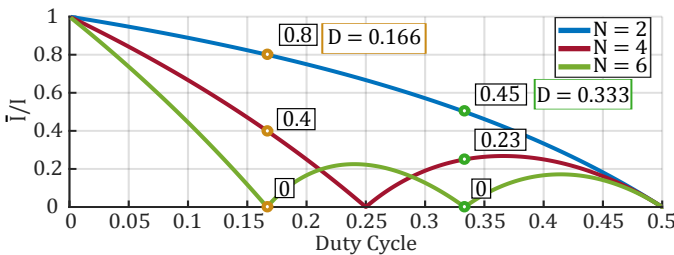


Figura 7: Reducción normalizada de cancelación del rizado en función del ciclo de trabajo y el número de fases.

misma configuración de interruptores que el SCB, se puede ajustar la relación de conversión del convertidor en función del número de espiras ( $N$ ) entre los devanados primario ( $n_1$ ) y secundario ( $n_2$ ) de la bobina *tapped*:

$$N = \frac{n_1}{n_2}. \quad (1)$$

Por lo tanto, una configuración *tapped* con valores precisos de  $n_1$  y  $n_2$  permite adaptar la topología SCB a los requisitos de alimentación de los imanes del HL-LHC, donde ya se ha probado un SCB convencional [16]. Las bobinas *tapped* permiten proporcionar una tensión más alta durante el proceso de energización de los imanes, y así, garantizar una pendiente de corriente controlada. Una vez se alcanza la corriente

nominal, la tensión se reduce a un nivel inferior que mantenga esta corriente. Las ventajas se resumen en las siguientes:

- La amplitud del rizado de la corriente en las bobinas depende de la relación de espiras en las bobinas *tapped*. En función de la tensión de salida deseada, la relación de espiras puede ajustarse para trabajar con un rizado de la corriente en las bobinas deseable.
- Se pueden conseguir configuraciones con tensiones de salida superiores a  $V_{DC}/4$ , cercanas a  $V_{DC}/2$  (Fig. 5).
- En aplicaciones de alta corriente y que exijan mantener un valor contenido de rizado, es común entrelazar múltiples convertidores para cumplir con estos requisitos. En dichos convertidores, el rizado de la corriente se reduce en función del número de fases entrelazadas y del ciclo de trabajo aplicado [17], [18]. Para un número determinado de fases, con el uso de bobinas *tapped* y el ajuste de la relación de espiras, se puede lograr una mayor reducción del rizado de la corriente (Fig. 7).

## II-A. Principios de operación de la topología propuesta

El SCB funciona de la misma manera que un buck convencional. En el caso de este último, la tensión de salida varía proporcionalmente al ciclo de trabajo:

$$M(\text{Buck}) = D \cdot V_g. \quad (2)$$

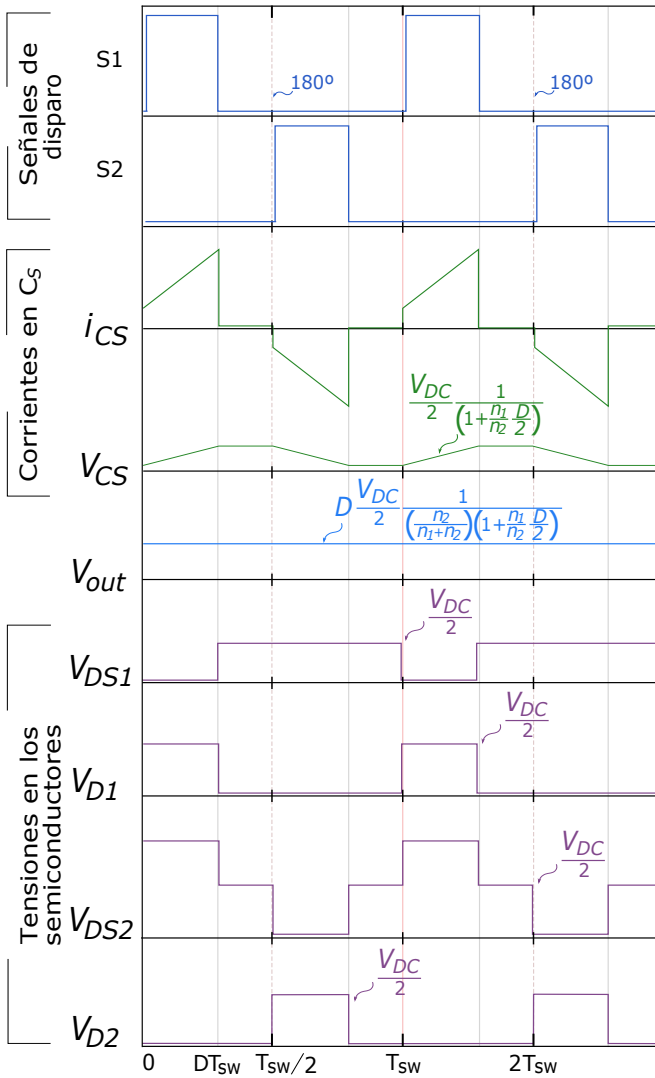


Figura 8: Formas de onda en el SCB-TCS.

Sin embargo, en el SCB, cuando el condensador serie  $C_s$  alcanza el equilibrio alrededor de  $V_g/2$ , la relación de conversión ( $M$ ) es limitada por este nivel de tensión:

$$M(SCB) = \frac{V_g D}{2}. \quad (3)$$

En el caso de las configuraciones *tapped* del SCB, la relación de espiras de las bobinas modifica el funcionamiento de los convertidores (Fig. 6) lo que afecta a su relación de conversión ( $M$ ), ampliando o reduciendo la tensión máxima de salida (Fig. 5):

$$M_{(SCB-TCS)} = \frac{V_g D}{2} \frac{1}{\left(\frac{n_2}{n_1+n_2}\right) \left(1 + \frac{n_1 D}{n_2}\right)}. \quad (4)$$

Esto viene dictado por el equilibrio de la tensión en  $C_s$ , que también está definido por este parámetro (Fig. 8) y el ciclo de trabajo aplicado al convertidor:

$$V_{C_s}(SCB-TSW) = \frac{V_g}{2} \frac{1}{1 - \left(\frac{n_1}{n_1+n_2}\right) \frac{D}{2}}. \quad (5)$$

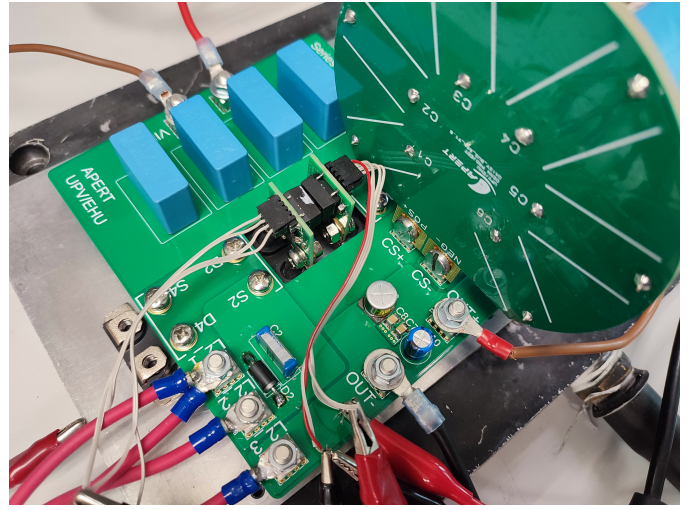


Figura 9: Plataforma experimental SCB-TCS.

## II-B. Rizado en la corriente de las bobinas

En el SCB, la ecuación de rizado de la corriente de la bobina es la misma que en el *buck* tradicional, pero hay que tener en cuenta el efecto de la tensión en  $C_s$ :

$$\Delta i_L(SCB) = \frac{V_o(1-2D)}{L}. \quad (6)$$

En función de la tensión de salida, el convertidor SCB ofrece una reducción del rizado de la corriente de salida [19]. Las ecuaciones del rizado de la corriente de la bobina para el convertidor SCB-TCS incluyen una relación para los diferentes devanados:

$$\Delta i_L(SCB-TSW) = \frac{\left(\frac{n_1}{n_2}\right) V_o(1-2D)}{L}, \quad (7)$$

$$\Delta i_L(SCB-TCS) = \frac{\left(\frac{n_1}{n_1+n_2}\right) V_o(1-2D)}{L}. \quad (8)$$

Al trabajar con ciertas tensiones de salida, esto puede ayudar a obtener una mayor reducción en el rizado la corriente de la bobina y, por lo tanto, a reducir también las pérdidas en el hierro.

## II-C. Consideraciones de diseño de las bobinas *tapped*

En los convertidores con bobinas *tapped*, se producen picos de tensión durante el apagado de los semiconductores de potencia. En algunas de estas transiciones, uno de los terminales de los devanados de la bobina, se queda flotando, lo que genera inmediatamente una fuerza magnetomotriz en sentido contrario (MMF) que cambia la polaridad de la corriente de la bobina. Produciendo, por lo tanto, un pico de tensión a través de los terminales de dicho devanado. Este efecto se debe a la energía almacenada en la inductancia de fugas de la bobina ( $L_{leak}$ ). Puede mitigarse con el diseño adecuado de la bobina [20], [21] y el uso de circuitos *snubber*. Estos elementos disipan dicha energía en forma de calor y generan pérdidas de potencia que afectan a la eficiencia global del convertidor, pero, al mismo tiempo, ofrecen una solución económica y sencilla a este problema.

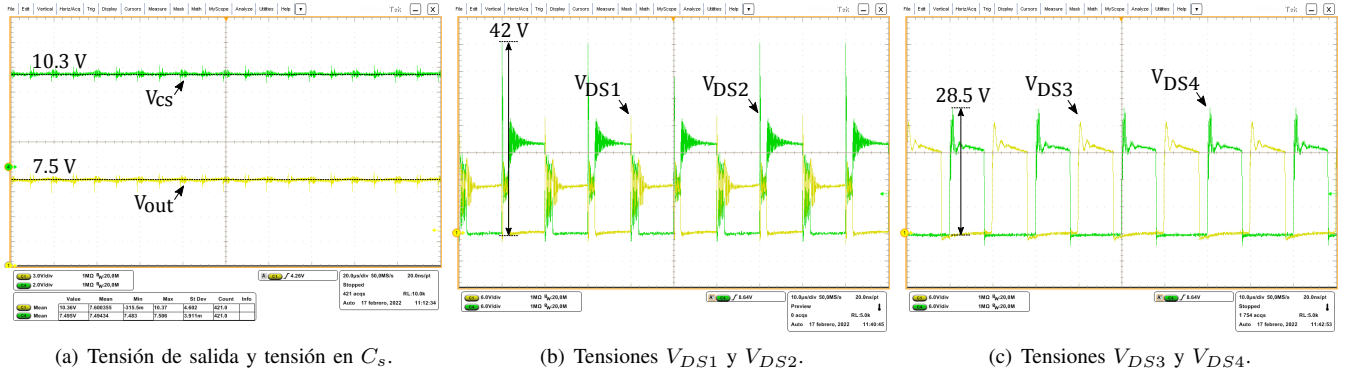


Figura 10: Formas de onda de la tensión en el convertidor SCB-TCS. 7.5 V y 10 A en la salida.

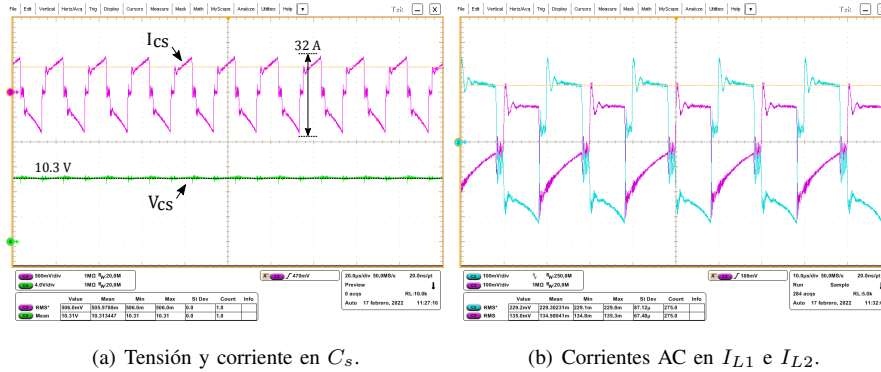


Figura 11: Formas de onda de la corriente en el convertidor SCB-TCS. 7.5 V y 10 A en la salida.

### III. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Con el objetivo de probar la funcionalidad del convertidor SCB-TCS, se ha construido un prototipo experimental (Fig. 9). Los componentes y valores utilizados se han enumerado en la Tabla I. Se han utilizado diodos en lugar de MOSFETs como rectificadores síncronos para reducir el número de señales de disparo y la complejidad del prototipo. En las Figs. 10 y 11 se puede encontrar un resumen de los experimentos realizados en este trabajo, así como las formas de onda y resultados obtenidos. La Tabla II, muestra las diferentes configuraciones de tensión de entrada, inductancia, relación de espiras, resistencia en conducción del MOSFET, frecuencias de conmutación y valores del circuito *snubber* RCD que se han utilizado en este trabajo. También sirve como comparación entre el convertidor propuesto y el SCB convencional. Se muestran las diferentes tensiones de salida que se pueden alcanzar con cada topología, así como los ciclos de trabajo requeridos para validar su uso en diferentes escenarios de resistencia en los imanes superconductores. También se incluyen las pérdidas de potencia y las eficiencias obtenidas para analizar las implicaciones de la red *snubber* adicional.

#### III-A. Resultados experimentales del convertidor SCB-TCS

Los resultados experimentales obtenidos del convertidor SCB-TCS, muestran que la tensión en el condensador serie  $C_s$  disminuye en función de la relación de espiras y del ciclo de trabajo aplicado (Fig. 10(a)). Los experimentos se llevaron a cabo con una tensión de entrada de 24 V y una relación de espiras ( $N$ ) de 0,5 y 1. La tensión de salida del convertidor se ajustó a 2,5, 5 y 7,5 V con una corriente de salida de 10 A,

Tabla I: Componentes hardware utilizados.

Component	Parameter
Inductance ( $L$ )	$15 \mu H$
Input Capacitance ( $C_{in}$ )	$100 \mu F$
Output Capacitance ( $C_o$ )	$100 \mu F$
Series Capacitance ( $C_s$ )	$400 \mu F$
Power MOSFET	IXFN520N075T2
Power diode	DSS2X121-0045B
Gate driver	1C20H12A
Inductor core material	3C92
Inductor core dimensions	$64 \times 51 \times 10 \text{ mm}$

lo que demuestra la capacidad del convertidor de ir más allá de  $V_{DC}/4$ , lo que amplía el rango de aplicaciones del SCB. La corriente en el condensador  $C_s$  se mantiene equilibrada en torno a  $32 A_{pk-pk}$  (Fig. 11(a)). Se observan picos de tensión de  $42 V_{pk-pk}$  y  $28 V_{pk-pk}$  en S2 y S4, respectivamente (Figs. 10(b) y 10(c)). Para mitigar este efecto es necesario optimizar el diseño de la bobina, así como ajustar los valores de la red *snubber*.

De la eficiencia obtenida de ambas topologías, se observa que el SCB está pensado para trabajar con tasas de conversión muy altas, ya que su eficiencia no se ve afectada incluso niveles muy bajos de tensión de salida (Tabla II). Este no es el caso del SCB-TCS, cuya eficiencia cae a 72.33 % y 71.3 % con relaciones de espiras de 0.5 y 1, respectivamente con 2.5 V a la salida. Esto se debe a que el SCB trabaja con un ciclo de trabajo más alto en este escenario y se beneficia de ello. Sin embargo, cuando la tensión de salida se acerca a  $V_{DC}/4$ , el SCB alcanza su máxima tensión de salida y eficiencia, mientras que el SCB-TCS puede seguir aumentando el ciclo de trabajo y alcanzar su máxima eficiencia, del 86.8 % a 7.5 V, alrededor del 40.3 % de ciclo de trabajo.

Tabla II: Resumen de resultados ( $V_g = 24 V$ ,  $f_{sw} = 50 kHz$ ,  $R_{DS(ON)} = 1,9 m\Omega$ ,  $R_{snubber} = 6,8 \Omega$ ,  $C_{snubber} = 1 \mu F$ ).

Topology	$V_{out}$ (V)	$I_{out}$ (A)	$N$	$L_{mag}$ ( $\mu H$ )	$D$ (%)	$P_{out}$ (W)	$P_{in}$ (W)	$P_{loss}$ (W)	$\eta$ (%)
SCB	2,5	10	–	15	23,5	25	30	5	83,33
SCB – TCS	2,5	10	0,5	15	17	25	34,56	9,56	72,33
SCB – TCS	2,5	10	1	15	13,7	25	35,04	10,04	71,3
SCB	5	10	–	15	44	50	56,4	6,4	89,4
SCB – TCS	5	10	0,5	15	31	50	60,72	10,72	82,34
SCB – TCS	5	10	1	15	26	50	61,2	11,2	81,7
SCB – TCS	7,5	10	1	15	40,3	75	86,4	11,4	86,8

#### IV. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

El convertidor *series capacitor buck* es una topología que ofrece varias ventajas sobre el *buck* tradicional, tales como un ciclo de trabajo extendido y una elevada relación de conversión. Sin embargo, presenta una tensión de salida máxima teórica de  $V_{DC}/4$ , lo que impide su uso en algunas aplicaciones. En este artículo se ha discutido una configuración de bobinas *tapped* de esta topología, que permiten un ajuste preciso de la tensión de salida y del rizado de corriente necesario en algunas aplicaciones. Los resultados experimentales confirman la funcionalidad teórica de esta topología. El SCB, ofrece tensiones muy bajas a la salida con un ciclo de trabajo extendido, lo que permite una mejor regulación y una buena eficiencia. Por su parte, el convertidor SCB-TCS, se puede establecer una tensión de salida superior a  $V_{DC}/4$ , ampliando el rango de tensión del SCB convencional, lo que le permite adaptarse mejor a los requisitos de alimentación del HL-LHC.

Se pueden llevar a cabo optimizaciones adicionales sobre la plataforma experimental de este artículo, como el ajuste preciso de la relación de espiras en las bobinas *tapped*, que permita obtener una tensión de salida con un ciclo de trabajo y un rizado deseados. Entre las maneras de aumentar la eficiencia del convertidor, se encuentran utilizar una red *snubber* optimizada, así como el uso de MOSFETs como rectificadores síncronos. Además, con el objetivo de reducir los picos de tensión, se pueden diseñar componentes magnéticos con baja inductancia de fugas. Así, se pueden utilizar semiconductores de potencia de menor tensión, reduciendo aún más las pérdidas de potencia del convertidor.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado en parte por el Gobierno del País Vasco, dentro del fondo para grupos de investigación del sistema universitario vasco IT978-16, y por el programa de investigación ELKARTEK (proyecto ENSOL2-KK-2020/00077). Además del MCIN/AEI/10.13039/501100011033 dentro del proyecto PID2020-115126RB-I00. Financiación *open-access* proporcionada por la Universidad del País Vasco.

#### REFERENCIAS

- [1] L. Evans, "Particle accelerators at CERN: from the early days to the LHC and beyond," *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 112, no. 4-12, 2016.
- [2] ATLAS Collaboration, "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at LHC," *Physics Letters B*, vol. 716, no. 1-29, 2012.
- [3] CMS Collaboration, "Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC," *Physics Letters B*, vol. 716, pp. 30-61, 2012.

- [4] F. Bordry and H. Thiesen, "LHC inner triplet powering strategy," in *Proc. of the 2001 Particle Accelerator Conference*, 2001, pp. 633-635.
- [5] I. Apollinari, G. Bejar Alonso, O. Bruning, P. Fessia, M. Lamont, L. Rossi, and L. Tavian, "High-luminosity large hadron collider (HL-LHC), technical design report V.01," CERN Yellow Reports: Monograph, vol. 4/2017, CERN-2017-007-M, Tech. Rep., 2017.
- [6] F. Savary, M. Bajko, B. Bordini, L. Bottura, L. Fiscarelli, J. Fleiter, A. Foussat, S. I. Bermudez, M. Karppinen, F. Lackner, C. H. Loffler, E. Nilsson, C. Perez, H. Prin, R. Principe, D. Ramos, G. de Rijk, L. Rossi, and D. Smekens, "Progress on the development of the nb3sn 11t dipole for the high luminosity upgrade of lhc," *IEEE*, 2016.
- [7] E. Coulinge, J.-P. Burnet, S. Pittet, and D. Dujic, "Comparative study of two-quadrant dc-dc stage in power supply for superconducting magnets," *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2018.
- [8] E. Coulinge, S. Pittet, and D. Dujic, "Design optimization of two-quadrant high-current low-voltage power supply," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. PP, pp. 1-1, 04 2020.
- [9] K. Nishijima, K. Harada, T. Nakano, T. Nabeshima, and T. Sato, "A double step-down two-phase buck converter for VRM," in *Proc. of the EPE Conference*, 2005, pp. 1-8.
- [10] P. Shenoy, M. Amaro, J. Morroni, and D. Freeman, "Comparison of a buck converter and a series capacitor buck converter for high-frequency, high-conversion-ratio voltage regulators," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 10, pp. 7006-7015, 2016.
- [11] A. M. Damerdashy, M. Aly, and E. M. Ahmed, "Design and analysis of multi-phase buck dc-dc converters for li-fi atocell drivers," *International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering*, 2019.
- [12] L. Zhang and S. Chakraborty, "An interleaved series-capacitor tapped buck converter for high step-down dc/dc application," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 7, pp. 6565-6574, 2019.
- [13] H. Chen, Y. Guan, T. Yao, Y. Wang, W. Wang, and D. Xu, "A novel high step-down dc-dc converter based on tsc buck converter," in *2020 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia)*, 2020, pp. 1444-1451.
- [14] K. I. Hwu, W. Z. Jiang, and P. Y. Wu, "An expandable two-phase interleaved ultrahigh step-down converter with automatic current balance," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9223-9237, 2017.
- [15] Y. Guan, C. Cecati, J. M. Alonso, and Z. Zhang, "Review of high-frequency high-voltage-conversion-ratio dc-dc converters," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 2, no. 4, pp. 374-389, 2021.
- [16] E. Ibarra, A. Arias, I. Martinez de Alegria, A. Otero-Olavarrieta, and L. De Mallac, "Digital control of multiphase series capacitor buck converter prototype for the powering of hl-lhc inner triplet magnets," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 1-10, 2021.
- [17] B. B. Johnson and P. T. Krein, "An analytical time-domain expression for the net ripple produced by parallel interleaved converters," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 64, no. 3, pp. 289-293, 2017.
- [18] S. Zhang and X. Yu, "A unified analytical modeling of the interleaved pulse width modulation (pwm) dc-dc converter and its applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 11, pp. 5147-5158, 2013.
- [19] P. S. Shenoy and M. Amaro, "Improving light load efficiency in a series capacitor buck converter by uneven phase interleaving," in *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2015, pp. 2784-2789.
- [20] T. Strous and G. Simonelli, "Improved power transformer performance using leakage inductance shielding," in *2019 European Space Power Conference (ESPC)*, 2019, pp. 1-6.
- [21] W. Tan, X. Margueron, L. Taylor, and N. Idir, "Leakage inductance analytical calculation for planar components with leakage layers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 6, pp. 4462-4473, 2016.