

Comparación entre dos Topologías para la Implementación de un Convertidor Multinivel para un Amplificador de Envolvente de Alta Eficiencia

D. Diaz, M. Vasic, P. Alou, O. García, J. A. Oliver, J. A. Cobos

Centro de Electrónica Industrial
Universidad Politécnica de Madrid
c/José Gutiérrez Abascal N°2
28006 Madrid, España

Abstract — Recientemente ha sido presentada una solución que combina un convertidor multinivel en serie con un regulador lineal para obtener un amplificador de envolvente. Este convertidor se emplea para la mejora de la eficiencia en amplificadores de RF mediante la implementación de la técnica de eliminación y restauración de envolvente (EER). La solución propuesta puede reproducir cualquier señal con componentes espectrales de hasta 2 MHz con una potencia instantánea máxima de salida de 50 W.

En este artículo se presenta una importante modificación del convertidor multinivel basada en una arquitectura de celda de tres estados. Se presenta una comparación entre estas dos posibles implementaciones de la celda multinivel. La topología de celda de tres estados tiene varias ventajas sobre la de dos estados: menor número de celdas y entradas de tensión y un diseño físico y eléctrico más sencillo. Se ha realizado una comparación de la energía manejada por cada topología de celda para diferentes señales de entrada. Se analiza su influencia en la eficiencia de cada topología de celda y en la optimización del diseño del amplificador de envolvente para ambas topologías. Adicionalmente se ha construido un prototipo para validar los estudios teóricos presentados y poder comparar más detalladamente ambas soluciones.

I. INTRODUCCIÓN

La autonomía de los sistemas móviles y de comunicación modernos está directamente relacionada con la potencia consumida y su eficiencia. Una baja eficiencia en estos sistemas implica una menor duración de la batería y un incremento de la disipación de calor. En un satélite de comunicaciones, hasta el 50% de la potencia total puede ser consumida por el amplificador de potencia en el transmisor [1]. Los transmisores usan habitualmente modulaciones digitales como QPSK combinada con técnicas de espectro extendido como CDMA o WCDMA. Las señales moduladas son amplificadas posteriormente usando amplificadores lineales de clase A o B, altamente lineales pero de baja eficiencia. Las señales transmitidas tienen alta relación potencia de pico-potencia media y tienen la mayor probabilidad en la zona donde los amplificadores lineales presentan muy baja eficiencia (aproximadamente un 15% para la clase B). Este es el

motivo principal de la baja eficiencia de estos amplificadores de potencia aplicados en sistemas de RF.

La técnica de Khan de eliminación y restauración de envolvente (EER) se usa para mejorar la eficiencia de los transmisores de RF. La Figura 1 muestra el diagrama de bloques de un transmisor de EER. Esta técnica combina un amplificador de potencia de radiofrecuencia (RFPA) (clase D o clase E por ejemplo) con un amplificador de envolvente (convertidor cc-cc) para implementar un RFPA lineal de alta eficiencia [2].

El amplificador de envolvente debería tener una respuesta dinámica rápida, una alta eficiencia y una mínima interferencia con el espectro de salida del transmisor. En el estado del arte, pueden encontrarse varias soluciones para el amplificador de envolvente: un convertidor sencillo como el reductor (modulador clase S), en [3], [4], un convertidor reductor multifase en [5], un convertidor de tres niveles en [6] o un amplificador conmutado asistido linealmente [7], [8]. Estas soluciones no superan un ancho de banda de unos pocos kHz y la potencia de salida está en el rango de unos pocos mW hasta varias decenas de vatios [9]. En [10] y [11] se presenta un convertidor reductor integrado cuya frecuencia de conmutación es de varios MHz, pero de baja potencia, en el rango de mW.

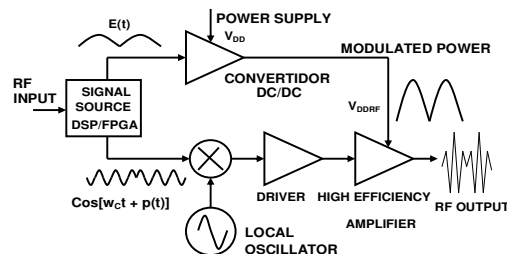


Figura 1 - Diagrama de bloques del transmisor de Khan

El amplificador de envolvente necesita tener alta eficiencia y, por consiguiente, un convertidor cc-cc sería una primera idea como solución. En cualquier caso, para poder proporcionar el alto ancho de banda necesario para seguir la referencia de la envolvente, estos convertidores deben tener una frecuencia de

conmutación hasta cinco veces mayor que el ancho de banda requerido (para un ancho de banda de 1 MHz sería necesario aplicar una frecuencia de conmutación de al menos 5 MHz [12]).

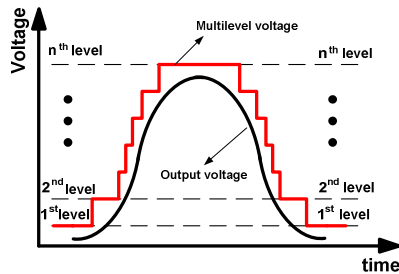


Figura 2 - Diagrama tensión(V)-tiempo(s) del amplificador de envolvente

La eficiencia de los convertidores cc-cc decrece ampliamente cuando la frecuencia de conmutación aumenta; por lo tanto, la eficiencia del sistema completo disminuye también. El segundo problema es el filtro de salida del convertidor, ya que su diseño puede ser muy complicado debido a las fuertes restricciones relativas a la tensión de salida y a las interferencias espectrales. En algunos artículos se propone el uso de un doble filtro LC [3], pero su uso podría disminuir el ancho de banda.

La solución presentada en [13] no necesita un diseño complicado del filtro de salida y no necesita una alta frecuencia de conmutación para obtener un ancho de banda de varios MHz. El sistema presentado puede reproducir una forma de onda sinusoidal o cualquier otra referencia cuya máxima componente espectral no supere los 2 MHz, con una potencia instantánea máxima de 50 W.

II. TOPOLOGÍA PROPUESTA

La topología propuesta consiste en un convertidor multinivel en serie con un regulador lineal con buena respuesta dinámica. La idea principal de la solución presentada en [13] puede verse en la Figura 2. El convertidor multinivel tiene que alimentar al regulador lineal y tiene que proporcionar niveles de tensión discretos tan próximos como sea posible a la tensión de salida del amplificador de envolvente. Si se cumplen estas condiciones, las pérdidas de potencia en el regulador lineal serán mínimas, ya que son directamente proporcionales a la diferencia entre la tensión de entrada y la de salida. En cualquier caso, para garantizar el correcto funcionamiento del regulador lineal, la tensión de salida del convertidor multinivel siempre debe ser mayor que la tensión de salida del regulador lineal.

El regulador lineal puede ser diseñado para tener un ancho de banda muy grande, y debería filtrar todo el ruido que viene desde el convertidor multinivel. Dicha etapa solo maneja una pequeña fracción de la potencia de salida. Por lo tanto, el convertidor multinivel no

necesita ningún filtro de salida y el diseño de un filtro complejo, como en los convertidores conmutados, puede ser suprimido.

El diagrama de bloques del sistema propuesto en [13] puede verse en la Figura 3. Dicho sistema puede ser implementado de diversas maneras. La solución presentada en [13] consta de celdas de tensión independientes que se posicionan en serie para generar una tensión de salida como combinación de sus tensiones. Estas celdas pueden implementarse para tener un nivel de tensión positivo o cero voltios (celdas de dos estados) o para que su salida tome un valor de tensión positivo, negativo o cero voltios (celda de tres estados), Figura 4. Cada celda lleva asociada una entrada de tensión que se generará en la primera etapa mediante un convertidor cc-cc.

La celda de dos estados, cuando esta encendida, da a su salida el valor de tensión de su entrada correspondiente y cero voltios cuando está apagada. La salida del convertidor multinivel puede expresarse de manera general como:

$$V_o = \sum_{i=1}^N a_i V_i$$

donde N es el número total de celdas, a_i toma el valor 0 cuando la celda número "i" está apagada y 1 cuando está encendida y V_i es la tensión de entrada de dicha celda. Para la celda de tres estados, además de 0 y 1, a_i puede tomar el valor -1 y, por lo tanto, aplicar la tensión de dicha celda con signo negativo respecto a la carga. Debido al tercer estado de la celda, es necesario que la primera etapa de esta solución sea bidireccional, ya que dependiendo de la señal de entrada la potencia media que cede el convertidor cc-cc que genera esa tensión de entrada podría ser negativa.

Usando la optimización presente en [13] para un convertidor de tres niveles, las tensiones obtenidas son 12V, 18V y 24V. Con las celdas de dos estados, las entradas de tensión necesarias son: una principal de 12V y dos celdas de 6V. Con la celda de tres estados se necesitan solamente dos entradas, de 18V y 6V. Los niveles optimizados de tensión se obtienen sumando, restando o no conectando la entrada de 6V a la de 18V mediante una celda de tres estados.

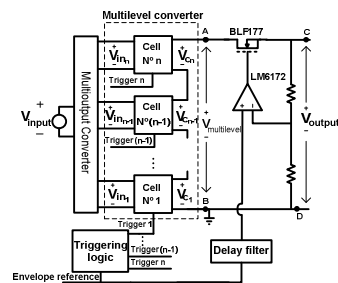


Figura 3 - Diagrama de Bloques del Amplificador de Envolvente Empleado

El regulador lineal se alimenta desde el convertidor multinivel y, dependiendo del nivel de tensión existente en su entrada y en su salida, su eficiencia variará. Si la codificación de la señal transmitida es conocida (CDMA por ejemplo) [14], es posible optimizar el número de niveles y su valor de tensión.

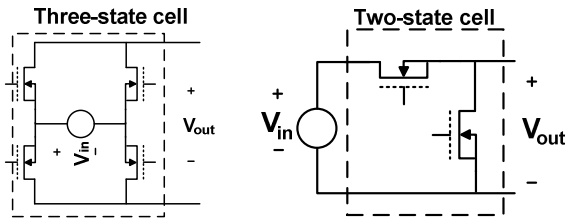


Figura 4 - Celdas de tensión que podrían utilizarse como solución para implementar el convertidor multinivel.

III. COMPARACIÓN ENTRE LAS CELDAS DE DOS Y TRES ESTADOS

Las especificaciones usadas para esta comparación son: una componente espectral máxima en frecuencia de 2 MHz, una potencia máxima de salida de 50 W y una tensión de salida de 0 V a 24 V.

Llamamos entrada principal a la de mayor tensión, que estará conectada siempre a la carga.

Las principales ventajas de la celda de tres estados sobre la de dos estados son las siguientes:

- Menor número de celdas.
- El número de entradas necesarias para obtener la misma configuración de niveles es menor. Generalizando este concepto para n niveles ($n > 2$), si el número de niveles es impar, se ahorran $(n-1)/2$ entradas respecto al diseño con celdas de dos niveles. Para una configuración con un número impar, una celda de dos estados se añadiría al diseño, ahorrándose en este caso $(n-2)/2$ entradas.
- Como resultado de un convertidor multinivel con menor número de entradas (menos componentes y volumen), el diseño eléctrico y físico será más sencillo.

Desventajas:

- Las entradas de las celdas de tres estados deben ser bidireccionales. Esto implica un diseño más complejo de la etapa de control y el uso de rectificación síncrona. Por otro lado, como resultado del uso de rectificación síncrona, se podría mejorar la eficiencia.
- Hay mayor número de MOSFETs en cada celda.

Ambos tipos de implementación no difieren en la calidad de la señal, en la etapa del regulador lineal y en el número total de MOSFETs de la etapa multinivel.

Para optimizar el rendimiento del convertidor multinivel, se ha analizado la energía que maneja cada celda en ambos tipos de configuración, de dos y de tres estados. Se ha considerado un prototipo con tres niveles, cuyos valores optimizados son, para ambos tipos de celda, 12V, 18V y 24V. Los resultados pueden verse en la Tabla I.

TABLA I

POTENCIA MANEJADA POR CADA TOPOLOGÍA DE CELDA PARA DIFERENTES SEÑALES DE REFERENCIA

Señal	Topología de celda	Tensiones de entrada (V)	Potencia Media Celda (W)	% de potencia manejada por las entradas auxiliares
CDMA	Dos estados	6	0.35	22.2
		6	2.95	
		12	11.53	
	Tres estados	± 6	-2.62	13.05
		18	17.45	
Forma de onda sinusoidal	Dos estados	6	3.81	41.6
		6	5.11	
		12	12.5	
	Tres estados	± 6	2.67	12.46
		18	18.75	

Puede verse, para ambas topologías de celda, que la entrada principal de cada tipo de celda (la de mayor tensión) maneja un alto porcentaje de la potencia total. Este efecto ocurre en las dos topologías de multinivel para los dos ejemplos de señal, ya que dicha celda será en ambos casos la de mayor tensión y la corriente es la misma en todas las celdas. Al no requerirse aislamiento para esta entrada, se puede generar mediante un convertidor independiente, simple y de alto rendimiento. Puede verse que las entradas auxiliares, además de necesitar aislamiento, deben ser bidireccionales, ya que la potencia media aportada puede ser negativa.

Dependiendo de la señal de entrada, la potencia media de las entradas auxiliares puede ser negativa. Esto aumenta la potencia total manejada por la configuración de tres etapas, lo cual significa mayores pérdidas en los casos en que eso ocurra.

Por lo tanto, la señal a transmitir debe ser conocida para poder realizar una optimización de la topología a utilizar y del número y tensión de entradas del convertidor multinivel.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En las Figuras 5 y 6 se muestran una fotografía y formas de onda de la topología multinivel con celdas de dos niveles y en las Figuras 7 y 8 de la topología con celdas de tres niveles.

Como no se disponía de una señal CDMA para las pruebas de ambos prototipos, se ha medido la eficiencia del sistema para varias formas de onda sinusoidales de 500 kHz y de 2 MHz, con una carga resistiva de 12 Ω .

Comparando ambos diseños, puede observarse que existe una reducción en el tamaño de los componentes magnéticos en el prototipo de tres niveles respecto al de dos. Esto es debido a a la aplicación de los resultados presentados en la Tabla I para la optimización de la primera etapa.

Se han construido para la implementación de la primera etapa dos convertidores: un convertidor reductor para proporcionar la entrada de 18V y un convertidor flyback para la celda de tres estados de 6V. En el caso del convertidor multinivel con celdas de dos estados un único componente magnético, de mayor tamaño y peso, procesa toda la potencia de la primera etapa (un convertidor flyback multisalida).



Figura 5 - Fotografía del convertidor multinivel implementado con celdas de dos estados (en la parte superior módulo con las etapas segunda y tercera y en la inferior el convertidor multisalida que constituye la primera etapa)

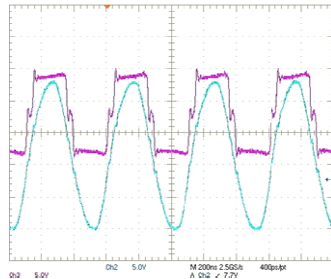


Figura 6 - Formas de onda del convertidor multinivel con celdas de dos estados. Tensión de salida de la etapa multinivel (forma de onda superior, 5V/div) y tensión de salida del regulador lineal (forma de onda inferior, 5V/div) a 2 MHz. Escala de tiempo 200ns/div

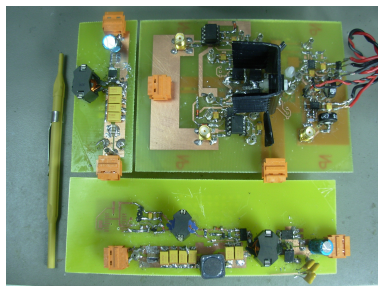


Figura 7 - Fotografía del convertidor multinivel implementado con celdas de tres niveles. En la parte superior izquierda y en la inferior los módulos de la primera etapa y en la parte superior derecha las etapas segunda y tercera en mismo módulo

El prototipo del multinivel implementado con celdas de tres niveles tiene un tamaño en planta de 144x138 mm, mientras que la implementación con celdas de dos estados, bajo las mismas especificaciones, tiene un tamaño de 194x179 mm.

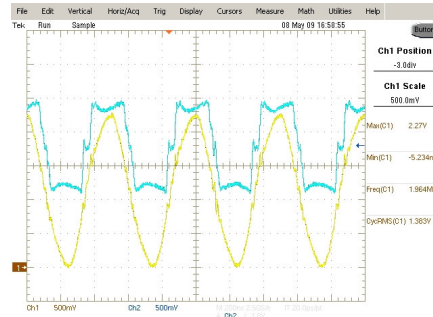


Figura 8 - Formas de onda del convertidor multinivel con celdas de tres estados. Tensión de salida de la etapa multinivel (forma de onda superior 5V/div) y tensión de salida del regulador lineal (forma de onda inferior 5V/div) a 2 MHz. Escala de tiempo 200ns/div.

TABLA II

MEDIDAS DE RENDIMIENTO DEL AMPLIFICADOR DE ENVOLVENTE CON CELDAS DE DOS ESTADOS PARA DIFERENTES FORMAS DE ONDA SINUSOIDALES Y COMPARACIÓN CON EL RENDIMIENTO TEÓRICO DE UN REGULADOR LINEAL ALIMENTADO A 23V

$V_{sin}(V)$	Sine wave frequency (MHz)	Measured efficiency of the flyback converter	Measured efficiency of the envelope amplifier	Theoretical efficiency of an ideal linear regulator supplied by 23V
0-9	2	94%	43.7%	29.3%
5-14	2	93%	58.8%	45.9%
0-22.5	2	91%	68.3%	73.4%
0-9	0.5	91%	43.3%	29.3%
5-14	0.5	91%	58.9%	45.9%
0-22.5	0.5	94%	69.7%	73.4%

TABLA III

COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL AMPLIFICADOR DE ENVOLVENTE CON CELDAS DE DOS Y TRES ESTADOS PARA DIFERENTES FORMAS DE ONDA SINUSOIDALES

$V_{sin}(V)$	Frecuencia forma de onda sinusoidal (MHz)	Eficiencia medida del amplificador de envolvente con celdas de tres estados	Eficiencia medida del amplificador de envolvente con celdas de dos estados
0-9	2	48,4%	43,7%
5-14	2	53,4%	58,8%
0-22,5	2	63,6%	68,3%
0-9	0,5	47,6%	43,3%
5-14	0,5	59,5%	58,9%
0-22,5	0,5	71,8%	69,7%

El amplificador de envolvente implementado con celdas de tres estados se ha construido en su primera versión en una placa de dos capas, mientras que la

implementación con celdas de dos estados, en su tercera versión, esta implementada en una PCB de seis capas. Debido a la menor optimización del prototipo de tres niveles y a la tecnología utilizada en la implementación de la placa de circuito impreso, los componentes parásitos adicionales perjudican la calidad de la señal, fundamentalmente a altas frecuencias. Para garantizar la calidad de la señal, y realizar la comparación entre ambos prototipos adecuadamente, se ha añadido una red snubber RC para cada MOSFET, más disipativa que la implementada en el convertidor con celdas de dos niveles. Debido a este factor, a alta frecuencia puede verse como el rendimiento se ve afectado. La excepción es el caso de la tensión de 0V-9V, en el cual la salida del multinivel es de 12V, no existiendo conmutaciones. En este caso, debido a una mayor eficiencia de la primera etapa, la eficiencia del amplificador de envolvente es mayor para el diseño con celdas de tres estados. A 500kHz, la influencia de la red de snubber es menor, obteniéndose unas eficiencias similares para ambos prototipos.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta una modificación importante de una solución para un amplificador de envolvente para EER. La solución consiste en un convertidor multinivel en serie con un regulador lineal. Se presenta una nueva topología para el convertidor multinivel, y su comparación con otra solución existente. Para llevar a cabo la comparación, se ha realizado un estudio de la energía manejada por cada entrada para diferentes señales de entrada para los dos tipos de arquitectura del convertidor multinivel para validar las ventajas de la topología de tres celdas. Se han realizado dos prototipos y se ha medido la eficiencia del sistema para varias formas de onda sinusoidales a 500 kHz y a 2 MHz y una potencia instantánea máxima de 50W. Se ha realizado una comparación de los rendimientos y el tamaño de ambos prototipos. Comparando la eficiencia medida con la del regulador lineal, que se usa normalmente como un amplificador de envolvente, la solución propuesta mejora su eficiencia en hasta un 18%.

REFERENCIAS

- [1] G. D. Gordon and W. L. Morgan, "Principles of Communications Satellites", NY: Wiley, 1993.
- [2] F.H. Raab, P. Asbeck, S. Cripps, P.B. Kenington, Z.B. Popovic, N.Pothecary, J.F. Sevic, N.O. Sokal, "Power Amplifiers and Transmitters for RF and Microwave"
- [3] P. Midya, K. Haddad, L. Connell, S. Bergstedt, B. Roeckner, "Tracking power converter for supply modulation of RF power amplifiers," IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 2001, Vol. 3, Pages: 1540-1545.
- [4] J. Staudinger, B. Gilsdorf, D. Newman, G. Norris, G. Sadowiczak, R.Sherman, T. Quach, "High efficiency

- CDMA RF power amplifier using dynamic envelope tracking technique," Microwave Symposium Digest., IEEE MTT-S International, Vol. 2, June 2000, Pages: 873-876
- [5] A. Soto, J.A. Oliver, J.A. Cobos, J. Cezon, F. Arevalo, "Power supply for a radio transmitter with modulated supply voltage", Applied Power Electronics Conference, APEC '04, Volume: 1, Feb. 2004 Pages:392 – 398.
- [6] V. Yousefzadeh, E. Alarcon, D. Maksimovic, "Three-level buck converter for envelope tracking in RF power amplifiers," IEEE Trans. on Power Electronics, Volume: 21, Issue: 2, March 2006, Pages:549 – 552.
- [7] US Patent No. 6084468, Method and Apparatus for High Efficiency Wideband Power Amplification, July 2000.
- [8] V. Yousefzadeh, E. Alarcon, D. Maksimovic, "Efficiency optimization in linear assisted switching power converters for envelope tracking in RF power amplifiers", IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS 2005, 23-26 May, pages:1302-1305 Vol. 2.
- [9] F.H. Raab, B.E.Sigmon, R.G.Myers, R.M. Jackson, "L-Band Transmitter Using Kahn EER Technique", Transactions on Microwave Theories and Techniques, Volume 46, Issue 12, Part 2, Pages: 2220-2225, December 1998.
- [10] V. Pinon, F. Hasbani, A. Giry, D. Pache, C. Gamier, "A Single-Chip WCDMA Envelope Reconstruction LDMOS PA with 130MHz Switched-Mode Power Supply" Solid-State Circuits Conference, 2008. ISSCC 2008. Digest of Technical Papers. IEEE International, pp. 564-636, 3-7, Feb. 2008.
- [11] P.G. Blanken, R. Karadi, H.J. Bergveld, "A 50MHz Bandwidth Multi-Mode PA Supply Modulator for GSM, EDGE and UMTS Application", IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, RFIC 2008, 15-17 June 2008.
- [12] L.Marco, E. Alarcon, D. Maksimovic, "Effects of switching power converter nonidealities in Envelope Elimination and Restoration technique", IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS 2006, 21-24 May 2006.
- [13] M. Vasic, O. García, J. A. Oliver, P. Alou, D. Díaz, J. A. Cobos, "Multilevel Power Supply for High Efficiency RF Amplifiers" IEEE Applied Power Electronics Conference, February 2009.
- [14] V. Yousefzadeh, "Digitally Controlled Power Converters for RF Power Amplifiers", PhD Thesis, August 2006.