

Estudio de la mejora de la eficiencia en amplificadores de potencia mediante técnicas de conmutación de polarización

Yolanda Jato Llano⁽¹⁾, Amparo Herrera Guardado⁽¹⁾, Francis C. Huin⁽²⁾

jatoy@unican.es, amparo.herrera@unican.es, francis.huin@acco-semi.com

⁽¹⁾ Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Plaza de la Ciencia s/n. Santander

⁽²⁾ ACCO Semiconductors. 36-38 Rue de la Princesse. Louveciennes. Francia

Abstract- This article presents a study of the Class G amplifiers used to improve the efficiency versus back-off characteristic of power amplifiers. With this technique, the amplifier's drain bias is switched between two or three values depending on the detected envelope magnitude in order to improve the efficiency when the signal level is lower and the power amplifier needs less biasing voltage. Several options will be presented, comparing the performance in terms of efficiency and linearity for each case.

Using a 3GPP signal, a great improvement of the PAE vs. back-off is obtained, with a value of 40.3 % at 20 dBm of output power instead of 27 %, value obtained with a fixed biasing voltage of 3.5 V.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones inalámbricas actuales usan señales moduladas con grandes anchos de banda y valores elevados en la relación pico a valor medio de la señal ó PAPR [1] (peak-to-average power ratio). Si usamos éstas señales en un amplificador de potencia, y queremos obtener un comportamiento lineal, deberemos trabajar en un valor de potencia por debajo de la potencia de saturación, en “back-off”.

El problema de trabajar en “back-off” es que la eficiencia del amplificador se ve seriamente degradada respecto a su valor óptimo, por lo que se han desarrollado distintas técnicas para tratar de solucionar este problema aumentando la eficiencia frente al back-off del amplificador. Las técnicas más empleadas son la modulación de carga y la modulación de la tensión de polarización. La modulación de carga se realiza con un amplificador Doherty [2]-[3] o bien con un sistema de “outphasing” [4]-[5]. Por otro lado, la llamada modulación de tensión o de polarización está presente sobre todo en seguimiento de envolvente ó “Envelope Tracking” (ET) [6], en eliminación y restauración de envolvente (EET) [7] así como en los llamados amplificadores de Clase G que son los que trataremos en este artículo.

La principal diferencia existente entre ET, EET y los amplificadores clase G es que en los dos primeros, la tensión de drenador se varía proporcionalmente a la envolvente de radiofrecuencia de la señal de entrada, mientras que en el Clase G, la tensión de drenador toma únicamente valores discretos dependiendo de un circuito de control como se puede ver en la Fig.1 . La principal ventaja de esta técnica es que utiliza un conmutador para cambiar entre los distintos valores de tensión de drenador en lugar de utilizar un convertor DC-

DC de alta velocidad, lo que hace al diseño más simple y que además pueda ser utilizado en aplicaciones de mayor ancho de banda [8].

En el apartado II se presentará el funcionamiento general de un amplificador de Clase G con un umbral para la elección de la tensión de drenador. En el apartado III se presenta el amplificador Clase G con dos umbrales con el fin de comparar sus prestaciones. En el apartado IV se desarrolla una posible solución para solucionar el problema de la linealidad. Por último en el apartado V se muestran las conclusiones.

II. CLASE G CON UN UMBRAL

Como se ha comentado brevemente en la introducción, la técnica de conmutación de polarización se basa en cambiar la tensión de drenador del amplificador de manera dinámica monitorizando para ello la envolvente de la señal de entrada de RF. Cuando el valor de la envolvente se encuentra por debajo de un determinado umbral, la señal de salida será más pequeña por lo que podemos utilizar un valor de tensión de drenador más pequeño para polarizar el amplificador, con el consiguiente mejor consumo y mejora de la PAE. Para valores de envolvente por encima del umbral, se utilizará la tensión de polarización convencional.

A. Estudio de la eficiencia

En este primer estudio, utilizamos un amplificador clase AB con una tensión de drenador inicial de 3.5 V. Mediante la inspección de sus curvas Pin/Pout y PAE frente a back-off, establecemos el valor umbral de decisión 3V de tensión de envolvente, que se corresponde con una potencia de entrada.

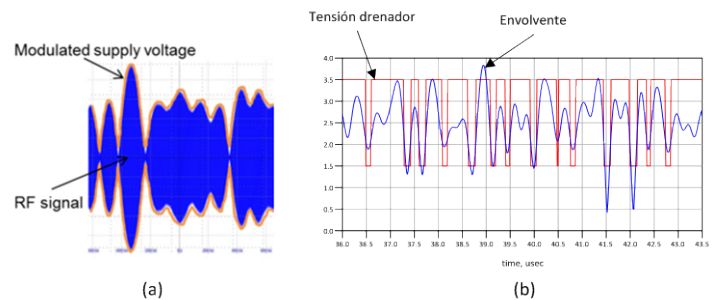


Fig.1 Diferencia de la señal de polarización entre Envelope tracking y conmutación de polarización.

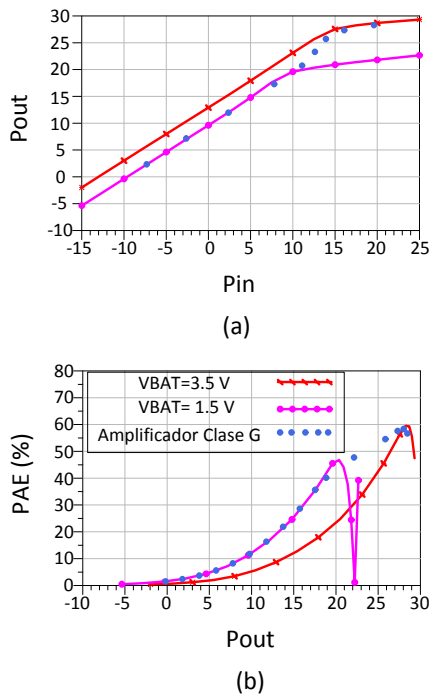


Fig.2 Relación Pin/Pout (a) y PAE/Pout (b) para el amplificador solo con VBAT 3.5 V y 1.5 V comparado con el amplificador Clase G.

de 10 dBm. Para valores de envolvente menores que ese umbral, la tensión de drenador se establece en 1.5 V, valor pequeño pero que conserva una potencia de salida aceptable. Para tensiones de envolvente superiores al umbral, la polarización será de 3.5 V.

En la Fig. 2, se representan las gráficas de potencia de entrada frente a potencia de salida, así como de PAE vs. potencia de salida de nuestro amplificador. Por un lado se representa la respuesta del amplificador independiente para dos valores de tensión de drenador, 1.5 V y 3.5 V. Sobre estas curvas se superpone el resultado obtenido mediante la técnica de conmutación de polarización.

Como se puede comprobar, para valores de potencia de entrada por debajo del umbral, la potencia de salida y la PAE siguen la curva del amplificador correspondiente a 1.5 V de tensión de drenador, en cambio, cuando se realiza la conmutación y se cambia a la tensión de 3.5 V, se siguen las curvas correspondientes al amplificador alimentado con esta tensión.

El resultado final se presenta también en la Fig.2. Se puede comprobar la gran mejora que se obtiene. Para una potencia de salida de 10 dBm, la PAE se incrementa del 6% al 11.7 %, mientras que para 20 dBm la mejora es aún mayor, del 27% al 40.3%. Estos resultados de PAE nos permitirán trabajar con un back-off mayor sin perder eficiencia con el fin de cumplir los requisitos de linealidad especificados en el estándar.

B. Estudio de la linealidad.

Además de la eficiencia del sistema, también nos interesa conocer el efecto de la variación de la tensión de polarización en la linealidad del amplificador. Los resultados se presentan en la Fig.3. Como se puede comprobar, la curva de ACLR del amplificador con polarización dinámica para potencias de entrada inferiores a 10 dBm, sigue la misma forma que la del

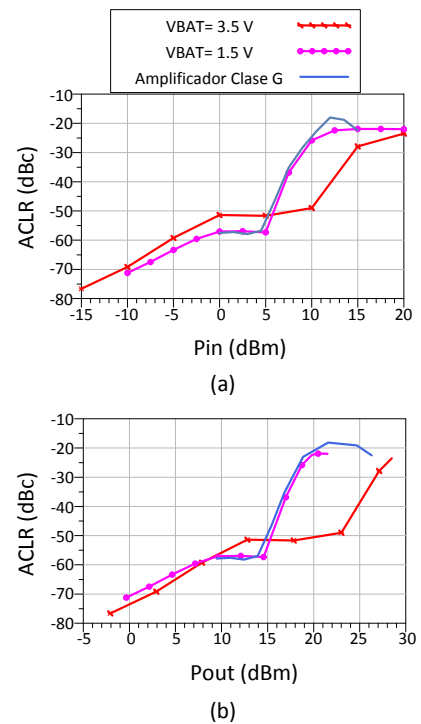


Fig.3. ACLR frente a potencia de entrada y potencia de salida.

amplificador con tensión de drenador de 1.5 V, ya que esa es la tensión de alimentación que tiene el amplificador para esas potencias. A partir de 15 dBm de potencia de entrada la curva de ACLR trata de seguir la correspondiente a 3.5 V. Se comprueba que el resultado de linealidad ha empeorado respecto al que presentaba el amplificador solo con una única tensión de drenador de 3.5 V.

Este empeoramiento de la linealidad se debe principalmente al cambio brusco de valor de la ganancia para las diferentes tensiones de polarización utilizadas. Para solucionar este problema se tendrán que emplear técnicas de predistorsión digital con el fin de recuperar la linealidad perdida.

III. CLASE G CON DOS UMBRALES

En este caso se utiliza el mismo amplificador que en el apartado anterior, pero establecemos dos umbrales de decisión, que se corresponderán con el funcionamiento del amplificador con tres tensiones de polarización distintas: 0.5 V, 1.5 V y 3.5 V.

A. Estudio de la eficiencia.

Se representan de nuevo las curvas de potencia de salida respecto a potencia de entrada y PAE respecto a la potencia de salida del amplificador para las tres tensiones de polarización en las que trabajará. A partir de estos resultados se establecerán los umbrales necesarios para que dependiendo del valor de la envolvente, la tensión de drenador tome un valor u otro.

El primer umbral correspondiente a la tensión de 0.5 V se fijará para una potencia de entrada de 4 dBm, que es donde la PAE del amplificador alcanza su valor máximo para esa tensión de drenador. El umbral correspondiente a esa potencia de entrada es de 1.6 V. El segundo umbral coincide con el del apartado anterior, fijado para una potencia de entrada de 10 dBm y con un valor de 3 V. Para esa potencia de entrada, la

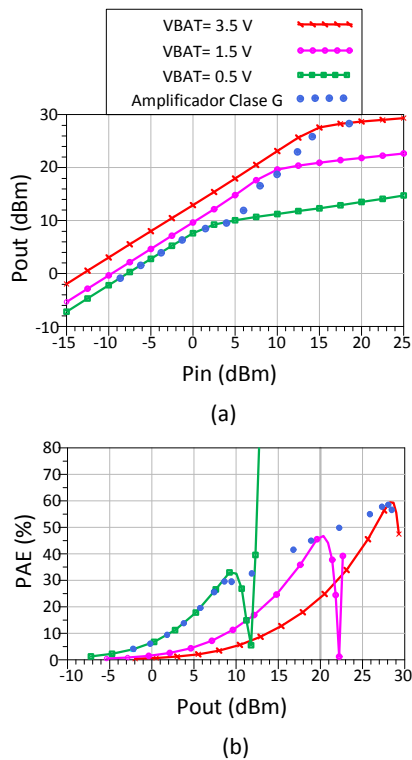


Fig.4. Relación Pin/Pout (a) y PAE/Pout (b) para el amplificador solo con VBAT 3.5 V, 1.5 V y 0.5 V comparado con el amplificador Clase G.

PAE para la tensión de polarización de 2.5 V es máxima antes de empezar a disminuir.

En la Fig.4, se presentan por un lado los resultados de Pout frente a Pin y PAE frente a la potencia de salida, para el amplificador independiente con polarizaciones de 0.5 V, 1.5 V, y 3.5 V. Superpuesta a estas curvas (en línea continua) está la respuesta del amplificador Clase G. Como se puede comprobar, se produce una gran mejora en la característica PAE frente al back-off respecto a los valores que obtiene el amplificador con una tensión de drenador fija a 3.5 V.

Por ejemplo, para una potencia de salida de 10 dBm, la PAE se incrementa del 5.6 % hasta el 29.7%, y para una potencia de salida de 20 dBm, con el amplificador solo se obtenía una PAE del 24.8 %, mientras que con el Clase G el valor aumenta hasta el 46.7%.

B. Estudio de la linealidad.

Al igual que ocurría en el caso anterior con un único umbral, y debido a los cambios en la ganancia del amplificador para cada valor de tensión de polarización, la linealidad del amplificador empeora de manera notable. En la Fig.5, se presentan los resultados obtenidos para este caso. Como se puede ver, el resultado es aún peor que en el caso anterior, manteniéndose el amplificador con un ACLR por debajo de -40 dBc solo hasta 5 dBm de potencia de salida. Además, también se ha observado como la envolvente de la señal a la salida del amplificador está distorsionada, aumentando esta distorsión al aumentar la potencia de entrada.

IV. MEJORA DE LA LINEALIDAD

Una de las razones del empeoramiento de la linealidad en los amplificadores con conmutación de polarización es la

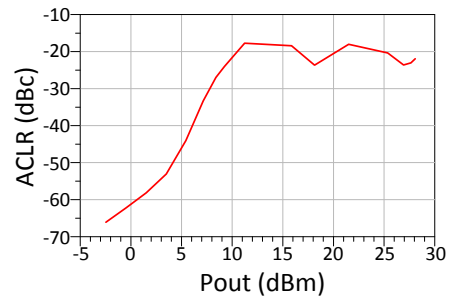


Fig.5. ACLR frente a potencia de entrada y potencia de salida.

variación del valor de la ganancia con los cambios de la tensión de drenador, ya que cada vez que la amplitud de la envolvente cambia, la ganancia cambia también dando lugar a una modulación en amplitud adicional que distorsiona la señal.

Con el fin de mejorar la linealidad conseguida con el amplificador Clase G, se trata de conseguir un aplanamiento de la ganancia para las distintas tensiones de polarización para así eliminar una de las fuentes de distorsión. Para ello nos basamos en el caso de un único umbral, donde cambiaremos el punto de polarización del amplificador a 1.5 V de tensión de drenador para que su ganancia sea la misma que con una tensión de drenador de 3.5 V. En la Fig.6 se representa la curva de ganancia frente a la potencia de salida en el caso inicial, con las ganancias de distinto valor para las dos tensiones de polarización, y para el caso de la ganancia aplanada.

Una vez conseguido un mismo valor de ganancia para las dos tensiones de polarización presentes en el circuito, se realiza la simulación de la eficiencia así como de la linealidad del mismo, con el fin de comprobar si se ha producido la mejora que esperábamos. En este caso, se establece el umbral en 1.6 V de amplitud de envolvente, que se corresponde con una potencia de entrada de 4 dBm. El cambio en el umbral ha sido necesario debido a la modificación de la respuesta del amplificador a 1.5 V al cambiar el punto de polarización del mismo.

Como se puede comprobar en la Fig.7, donde se compara la eficiencia del amplificador Clase AB inicial con el amplificador Clase G con la ganancia plana, no se produce ninguna mejora en la eficiencia. Esto es debido a que para conseguir la misma ganancia con 1.5 V de tensión de drenador que con 3.5 V, ha sido necesario incrementar de manera considerable una de las tensiones de puerta del amplificador

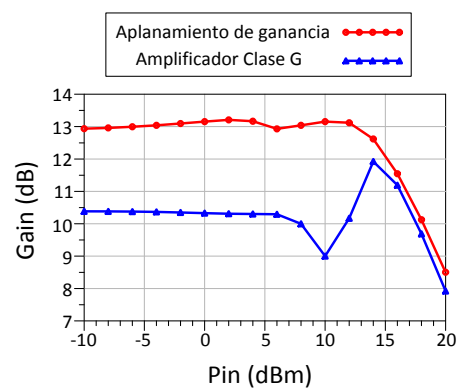


Fig.6. Ganancia del amplificador Clase G con y sin aplanamiento de ganancia.

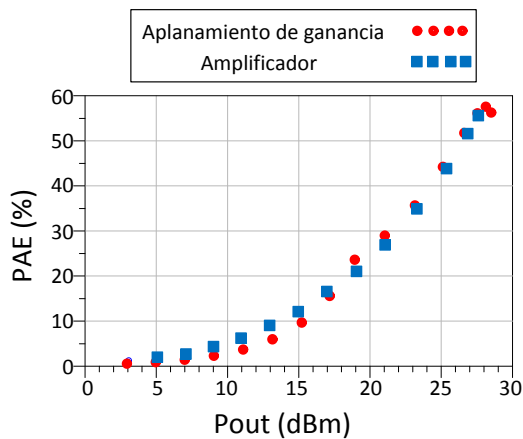


Fig.7. Eficiencia frente a potencia de salida del amplificador solo y del Clase G con aplanamiento de ganancia.

con el consiguiente aumento del consumo del mismo. Este aumento del consumo es el que hace que baje la eficiencia y que desaparezca toda la mejora introducida por la conmutación de polarización.

De todas formas, vamos a obtener el ACLR del amplificador para comprobar si la linealidad de éste ha mejorado o no. En la Fig.8 se presentan los resultados obtenidos. Se puede ver como aun obteniéndose resultados que no cumplen las especificaciones deseadas, sí que se observa una mejora del ACLR al aplanar la ganancia total.

Como conclusión, esta solución no parece la idónea para mejorar la linealidad del amplificador, ya que además de no conseguir una mejora suficiente para cumplir las especificaciones del estándar, el cambio del punto de polarización necesario para conseguir el aplanamiento de ganancia produce un empeoramiento de la eficiencia del amplificador tal que el uso del Clase G no introduce ninguna mejora en la solución final.

Se debe buscar por tanto alguna otra solución que conserve la mejora de la eficiencia y que al mismo tiempo mejore la linealidad. Por ejemplo, se podría implementar el aplanamiento de ganancia en banda base, de esta forma se evitaría cambiar el punto de polarización del amplificador. Otra solución, que suele ser la más utilizada es aplicar técnicas de predistorsión en banda base.

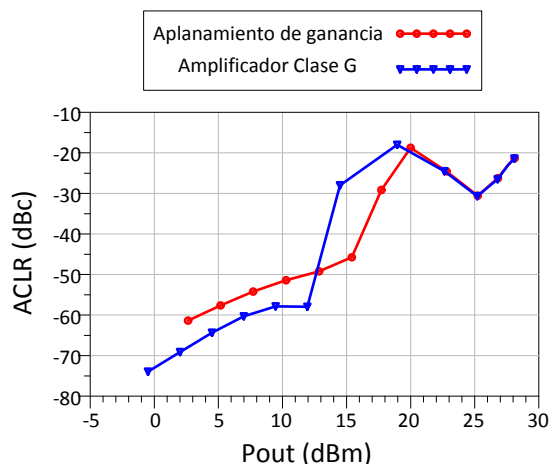


Fig.8. ACLR frente a potencia de entrada y potencia de salida.

V. CONCLUSIONES

Se ha presentado el estudio de un amplificador Clase G o de polarización conmutada para el caso de establecer dos o tres tensiones de drenador distintas. En ambos casos se comprueba la mejora obtenida en la eficiencia respecto a la potencia de salida. Para el caso de dos tensiones de polarización distintas se obtiene para una potencia de salida de 20 dBm una mejora del 27% al 40.3%. Si se usan tres tensiones distintas, para la misma potencia de salida de 20 dBm el incremento de la eficiencia es del 24.8% al 46.7%. Las simulaciones se han realizado utilizando el simulador ADS de Keysight.

En contrapartida, se produce un empeoramiento de la linealidad del amplificador, por lo que será necesario utilizar técnicas de predistorsión digital para conseguir cumplir las especificaciones del estándar.

REFERENCIAS

- [1] D. Wulich, "Definition of efficient PAPR in OFDM," in *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 9, pp. 832-834, Sep 2005.
- [2] B. Kim, J. Kim, I. Kim and J. Cha, "The Doherty power amplifier," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 7, no. 5, pp. 42-50, Oct. 2006.
- [3] N. Srirattana, A. Raghavan, D. Heo, P. E. Allen and J. Laskar, "Analysis and design of a high-efficiency multistage Doherty power amplifier for wireless communications," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 3, pp. 852-860, March 2005.
- [4] F. Raab, "Efficiency of Outphasing RF Power-Amplifier Systems," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 33, no. 10, pp. 1094-1099, Oct 1985.
- [5] A. Birafane and A. B. Kouki, "On the linearity and efficiency of outphasing microwave amplifiers," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 7, pp. 1702-1708, July 2004.
- [6] Feipeng Wang, A. H. Yang, D. F. Kimball, L. E. Larson and P. M. Asbeck, "Design of wide-bandwidth envelope-tracking power amplifiers for OFDM applications," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 4, pp. 1244-1255, April 2005.
- [7] D. K. Su and W. J. McFarland, "An IC for linearizing RF power amplifiers using envelope elimination and restoration," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 12, pp. 2252-2258, Dec 1998.
- [8] J. S. Walling, S. S. Taylor and D. J. Allstot, "A Class-G Supply Modulator and Class-E PA in 130 nm CMOS," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 9, pp. 2339-2347, Sept. 2009.