

Consideraciones sobre el amplificador distribuido como amplificador de potencia

F. Yak Ng Molina*, Teresa M. Martín Guerrero, y Carlos Camacho Peñalosa
yakng@ic.uma.es, teresa@ic.uma.es, ccp@ic.uma.es

Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación, Universidad de Málaga, E-29071 Málaga.

Abstract—In this contribution, a short review of independent research activities on distributed power amplification is presented. An analysis of the intrinsic limitations of distributed power amplifiers serves as a guideline to present some solutions available in the literature. This analysis shows that a distributed amplifier can work as an optimum class-A power combiner for a discrete set of frequency values determined by the selected active devices, and the phase shift and characteristic impedances between stages. The solutions proposed over the years present several circuit configurations that offer different options for the distribution of the available gain-bandwidth product, which are briefly reviewed in this contribution.

I. INTRODUCCIÓN

Los amplificadores distribuidos hicieron su primera aparición en 1936 a través de una patente de Percival [1]. Percival descubrió que el producto ganancia-ancho de banda se encontraba directamente relacionado con la capacidad de salida de los dispositivos activos y propuso una solución basada en la absorción de dichas capacidades por una línea de transmisión artificial. El trabajo de Percival no se apreció en su totalidad hasta una década más tarde cuando Ginzton *et al.* [2] publicaron una extensión de su trabajo. En dicha publicación, se detallan la mayoría de las limitaciones asociadas a los amplificadores distribuidos en términos de ganancia y ancho de banda y distintas estrategias para solventarlas. Ginzton *et al.* también fueron capaces de crear los primeros prototipos con buenos resultados [3]. El concepto de amplificador distribuido fue rápidamente aceptado por la industria, gracias, en parte, a la creciente demanda de ancho de banda propia del momento en el campo de la electrónica, y se ha utilizado desde entonces como una potente herramienta para el diseño de amplificadores de banda ultra ancha.

En contraposición al rápido desarrollo de los amplificadores distribuidos como amplificadores de pequeña señal, no fue hasta 1984 cuando se empezó a estudiar el comportamiento en gran señal de tales amplificadores. En ese año, Gamand *et al.* publicaron un trabajo [4], en el cual se llevó a cabo un análisis de la distorsión para intentar explicar el comportamiento de los amplificadores distribuidos en condiciones de gran señal. En ese mismo año, Ayaşlı [5] presentó un artículo donde resumía las principales características de los amplificadores distribuidos y algunos resultados experimentales. En dicho artículo, dedicó una sección completa a la amplificación de potencia y señaló los factores limitantes en régimen de gran señal de la estructura clásica de amplificador distribuido. Este trabajo puso de manifiesto que la principal desventaja de la

arquitectura clásica es su baja eficiencia. Cabe señalar dos puntos importantes como causa principal: una contribución desigual por parte de los dispositivos activos a la potencia de salida y la potencia que se disipa en el puerto adaptado de salida. El desarrollo de nuevos estándares de comunicaciones, que hacen uso de complejos esquemas de modulación, ha propiciado una evolución de la etapa amplificadora, y con ello una revisión de los amplificadores distribuidos en términos de eficiencia y linealidad. Hay que tener claro que, en general, un incremento en la potencia de salida supone un sacrificio en el ancho de banda, por lo tanto es necesario llegar a un compromiso entre estos dos términos.

A lo largo de los años diversos autores han aportado diferentes soluciones al problema de la amplificación distribuida de potencia. Los amplificadores distribuidos de potencia que se analizan en esta contribución no abarcan toda la literatura, sin embargo, permiten ilustrar las limitaciones intrínsecas de estos amplificadores, así como las características más relevantes de las diferentes soluciones propuestas.

II. LIMITACIONES INTRÍNSECAS

La estructura genérica de un amplificador distribuido se ha representado en la Fig. 1. El comportamiento en régimen de gran señal de un dispositivo activo está determinado fundamentalmente por la impedancia de carga. Análisis previos [6]–[8] de la contribución de cada dispositivo a la potencia de salida de un amplificador distribuido han permitido concluir que esta contribución es, en general, diferente para cada uno de ellos y que es, además, dependiente de la frecuencia de trabajo. La razón para ello es el diferente nivel de impedancia que la estructura distribuida presenta en el plano intrínseco de cada dispositivo. En consecuencia, sólo es posible que los dispositivos proporcionen su máxima potencia en aquellos casos en los que las impedancias en los planos intrínsecos son todas idénticas e iguales al valor óptimo. En el caso de dispositivos funcionando en clase A, esta impedancia óptima es real y está determinada por su característica tensión-corriente.

En las Figuras 2 y 3 se han representado las impedancias intrínsecas que se tendrían en el caso de sendos amplificadores distribuidos de 5 etapas con respuesta paso-bajo y paso-banda, respectivamente. En ambas figuras se aprecia que tan sólo para ciertos valores de frecuencia los niveles de impedancia intrínsecas son coincidentes para todos los dispositivos activos que constituyen el amplificador, esto es, sólo es posible extraer la máxima potencia de todos los dispositivos a frecuencias

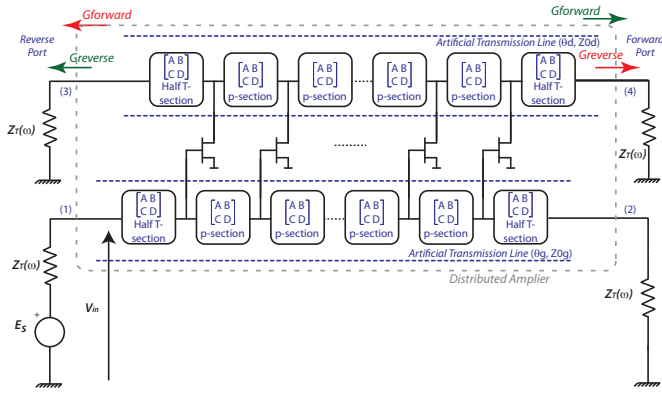


Fig. 1. Amplificador distribuido genérico.

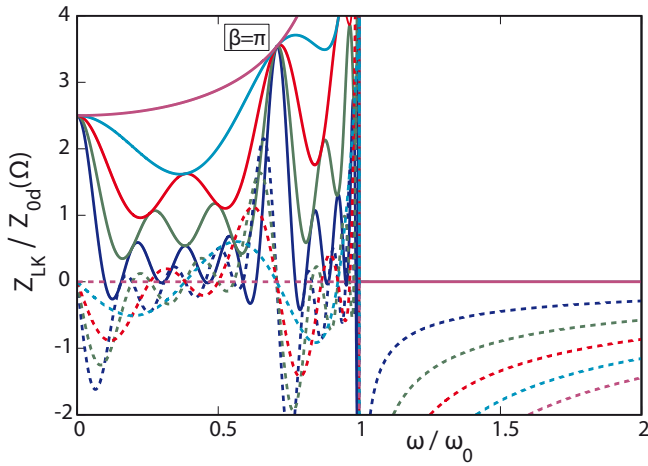


Fig. 2. Impedancias de carga para un amplificador distribuido paso-bajo.

discretas. También es interesante observar que fuera de la correspondiente banda de paso las impedancias intrínsecas son imaginarias.

No obstante, incluso a estas frecuencias discretas la eficiencia del amplificador distribuido es la mitad del máximo teórico ya que, en estas condiciones, la mitad de la potencia disponible se desaprovecha en el extremo de la línea de drenador que no se emplea como puerto de salida.

III. AMPLIFICADORES DISTRIBUIDOS DE POTENCIA

Las soluciones propuestas para incrementar la eficiencia de los amplificadores distribuidos se han orientado a recuperar la potencia desaprovechada en la carga de la línea de drenador y/o a intentar conseguir que todos los dispositivos vean simultáneamente su impedancia óptima en el plano intrínseco.

Una primera propuesta consistió en utilizar un combinator a la salida de manera que se recuperase la potencia disipada en la carga de drenador. Al mismo tiempo, la inyección simultánea de la señal en los dos puertos de la línea de puerta permitió incrementar la ganancia total del amplificador, al utilizar los cuatro caminos de amplificación que presenta todo amplificador distribuido. Esta idea fue presentada por

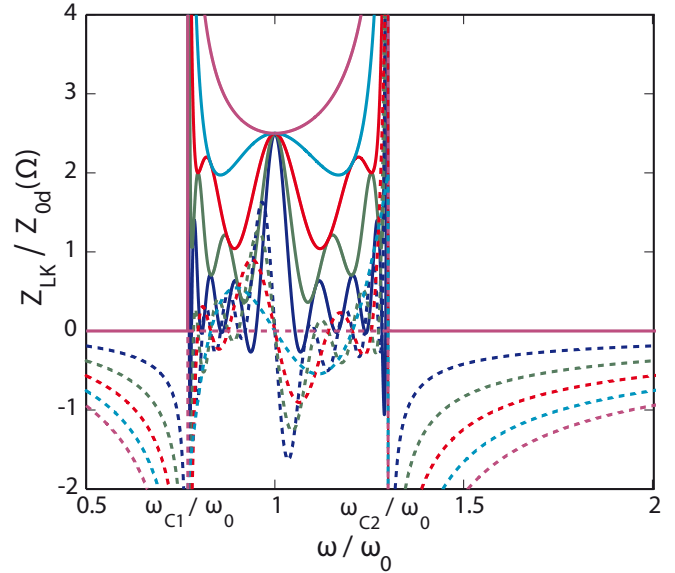


Fig. 3. Impedancias de carga para un amplificador distribuido paso-banda.

Aitchison *et al.* en 1988 [9], [10] y se denominó amplificador distribuido *dual-fed*. Con esta configuración la ganancia del amplificador se incrementaba en 6 dB y se duplicaba la potencia de salida, si bien estas mejoras sólo se obtienen, en sentido estricto, a frecuencias discretas. No obstante, esta configuración cuenta con una importante desventaja: el amplificador distribuido resultante tiene la entrada intrínsecamente desadaptada. El propio Aitchison propuso una solución a este problema mediante el empleo de una arquitectura balanceada a partir de dos amplificadores *dual-fed*. Sin embargo, esta solución presenta una notable complejidad circuital, lo que quizá explica la ausencia de implementaciones físicas de esta solución.

El concepto de amplificador distribuido '*dual-fed*' fue retomado en 1999 por Eccleston *et. al.*, pero desde un punto de vista de gran señal [6]. Con este enfoque, Eccleston pretendió dar solución a los dos problemas principales de los amplificadores distribuidos cuando trabajan en régimen de potencia: la potencia disipada en la carga de salida y la contribución desigual a la potencia de salida por parte de los transistores. Para poder abordar este problema, estudió las condiciones de carga de cada uno de los dispositivos activos, y demostró que es posible implementar un combinator óptimo en clase A, si se seleccionan ciertos valores de impedancias características y longitudes eléctricas dentro de un conjunto discreto de posibles valores [11]. Sin embargo, para llevar a cabo una implementación física, Eccleston utilizó tramos de línea de transmisión con longitudes eléctricas entre dispositivos activos de 180°, derivando, por tanto, en circuitos de gran tamaño. Además, quedaba por solventar el problema de la desadaptación a la entrada.

En 2005 Eccleston planteó un par de soluciones para reducir el tamaño físico de los circuitos. La primera se basa en la

inclusión de líneas cargadas periódicamente para aumentar el desfase entre etapas. En dicho artículo presentó resultados experimentales de un prototipo que exhibía una eficiencia mayor al 35 % para un ancho de banda del 15 % [12]. Como segunda opción, propuso el uso de líneas de transmisión zurdas que reemplazarían a los tramos de línea diestros de longitud eléctrica 180° [13]. Dicho planteamiento es la primera referencia, desde que Minnis sugiriera el uso de estructuras paso banda para extender el rango de funcionamiento en 1989 [14], en la que se intentaba combinar el uso de líneas de transmisión con respuestas paso banda con amplificadores distribuidos de potencia [15].

Este enfoque sería extendido por los autores de esta contribución en 2010 [7] en un artículo donde se estudiaban las condiciones de carga en el plano intrínseco de los transistores para un caso general, considerando también los diagramas de dispersión de líneas zurdas tanto para una excitación 'single-fed' como para la excitación 'dual-fed'. En el mismo trabajo aparece, también, la primera implementación física de un amplificador distribuido 'dual-fed' con líneas de transmisión diestras-zurdas tanto en la línea de puerta como en la de drenador. Los resultados experimentales corroboraron su funcionamiento como un combinador óptimo en clase-A, presentando valores de potencia y eficiencia próximos al límite teórico, con una PAE entre el 40 % – 45 % en un ancho de banda del 60 %.

Un enfoque alternativo es el iniciado por Campovecchio *et. al* [16], quienes propusieron, en 1994, una técnica de diseño para ecualizar las impedancias de carga de los dispositivos activos trabajando en clase A y conseguir que toda la potencia se entregue a una única carga en drenador. Dicho trabajo, se basa en una estructura distribuida no uniforme y en la correcta selección de las impedancias características y de las longitudes eléctricas de los distintos tramos que separan los dispositivos activos. La misma filosofía fue empleada en 2001 por Duperrier *et. al* [17], y más tarde por Ciccognani *et. al* [18] utilizando líneas en 'taper' en lugar de líneas de transmisión artificiales. En ambos casos, se han conseguido buenos resultados experimentales con valores de PAE mayores al 27 % en un ancho de banda de 2 a 6 GHz para dispositivos trabajando en Clase AB. Implementaciones más recientes, como la de Shastry e Ibrahim [19], también emplean una estructura no uniforme basada en 'tapers' terminando uno de los extremos de la línea de drenador en abierto, pero a costa de una degradación en las pérdidas de retorno a la salida.

En 2012 Narendra *et. al* [8] han profundizado en las posibilidades de los amplificadores distribuidos no uniformes. En su análisis han introducido consideraciones de 'load-pull' en el diseño, consiguiendo eficiencias mayores al 32 % para un rango de frecuencias de hasta 2 GHz.

Recientemente, inspirado por el concepto de reutilización de potencia 'power recycling' publicado por Nguyen *et al.* [20] y Wu *et al.* [21] para la maximización de la eficiencia en antenas, se ha propuesto por los autores de esta contribución un sistema que aplica el mismo principio a los amplificadores distribuidos. Dicha configuración permite un control de la ganancia sobre

un combinador óptimo en clase A que puede ser, teóricamente, tan grande como se desee manteniendo al mismo tiempo condiciones de adaptación perfectas sobre un ancho de banda limitado [22]. De esta manera se han conseguido, mediante amplificadores distribuidos de potencia uniformes, eficiencias en torno al 30 % con niveles de ganancia de 18dB a 1 GHz. El concepto de 'power recycling' también es aplicable a los amplificadores distribuidos de potencia no uniformes. Esta idea podría ser de utilidad en aquellos casos en los que el amplificador de potencia no proporcionara suficiente ganancia.

IV. CONCLUSIONES

En esta contribución se han analizado las limitaciones intrínsecas de los amplificadores distribuidos como amplificadores de potencia, así como algunas de las soluciones planteadas para mejorar su eficiencia.

Del análisis se desprende que las condiciones que permiten obtener la máxima eficiencia en clase A sólo se pueden satisfacer a frecuencias discretas, por lo que las soluciones planteadas implican una inevitable reducción del ancho de banda y/o de la ganancia. No obstante, las soluciones propuestas hasta la fecha sugieren que es posible obtener niveles de eficiencia próximos al 50 % con anchos de banda y niveles de ganancia significativos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Programa Consolider-Ingenio 2010) en el marco del proyecto CSD2008-00066 ('EMET'-Engineering Metamaterials) y por la Junta de Andalucía por medio del proyecto P10-TIC-6883.

REFERENCIAS

- [1] W. S. Percival, "Thermionic valve circuit," Sep. 5 1939, uS Patent 2,171,671.
- [2] E. Ginzton, W. Hewlett, J. Jasberg, and J. Noe, "Distributed amplification," *Proceedings of the IRE*, vol. 36, no. 8, pp. 956–969, 1948.
- [3] W. Horton, J. Jasberg, and J. Noe, "Distributed amplifiers: practical considerations and experimental results," *Proceedings of the IRE*, vol. 38, no. 7, pp. 748–753, 1950.
- [4] P. Gamand, Y. Crosnier, and P. Gelin, "Potential power performances of the distributed amplifiers," in *Microwave Conference, 1984. 14th European*. IEEE, 1984, pp. 395–397.
- [5] Y. Ayasli, "Decade bandwidth amplification at microwave frequencies," *Microwave Journal*, vol. 27, p. 71, 1984.
- [6] K. Eccleston, L. Ong, P. Kooi, and B. Ooi, "Analysis of the dual-fed distributed power amplifier," in *Microwave Conference, 1999 Asia Pacific*, vol. 3. IEEE, 1999, pp. 638–641.
- [7] F. Ng-Molina, T. Martin-Guerrero, and C. Camacho-Penalosa, "Power and gain considerations in distributed amplifiers based on composite right/left-handed transmission lines," *Microwaves, Antennas & Propagation, IET*, vol. 4, no. 8, pp. 1000–1006, 2010.
- [8] K. Narendra, E. Limiti, C. Paoloni, J.-M. Collantes, R. Jansen, and S. Yarman, "Vectorially combined distributed power amplifiers for software-defined radio applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, pp. 3189–3200, 2012.
- [9] C. Aitchison, N. Bukhari, C. Law, and N. Nazoa-Ruiz, "The dual-fed distributed amplifier," in *Microwave Symposium Digest, 1988., IEEE MTT-S International*. IEEE, 1988, pp. 911–914.
- [10] C. Aitchison, M. Bukhari, and O. Tang, "The enhanced power performance of the dual-fed distributed amplifier," in *Microwave Conference, 1989. 19th European*. IEEE, 1989, pp. 439–444.

- [11] K. Eccleston, "Output power performance of dual-fed and single-fed distributed amplifiers," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 27, no. 4, pp. 281–284, 2000.
- [12] —, "Compact dual-fed distributed power amplifier," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 3, pp. 825–831, 2005.
- [13] —, "Application of left-handed media in distributed amplifiers," *Microwave and Optical technology letters*, vol. 44, no. 6, pp. 527–530, 2005.
- [14] B. Minnis, "Extending the frequency range of distributed amplifiers with bandpass filter structures," *Microwave Journal*, vol. 32, pp. 109–112, 1989.
- [15] C. Camacho-Penaloza and T. Martin-Guerrero, "Meta-distributed amplifiers: a historical perspective," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Microwave and Optical Technology (ISMOT 2007)*, pp. 643–647, Villa Mondragone, Monte Porzio Catone, Italy, 17–21 December 2007 (ISBN 978-88-548-1476-9), 2007.
- [16] M. Campovecchio, R. Hilal, B. Le Bras, M. Lajugie, and J. Obregon, "Large signal design criteria of distributed power amplifiers applied to a 2 -18 ghz gaas chip yielding high power density performances," in *Third International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimeterwave Circuits*, 1994.
- [17] C. Duperrier, M. Campovecchio, L. Roussel, M. Lajugie, and R. Quéré, "New design method of uniform and nonuniform distributed power amplifiers," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 12, pp. 2494–2500, 2001.
- [18] W. Ciccognani, G. Giolo, E. Limiti, and P. Longhi, "Split gate line distributed power amplifier using tapered drain line approach and active broadband input power divider," in *Microwave Conference, 2009. EuMC 2009. European*. IEEE, 2009, pp. 1425–1428.
- [19] P. Shastry and A. Ibrahim, "Design guidelines for a novel tapered drain line distributed power amplifier," in *Microwave Conference, 2006. 36th European*. IEEE, 2006, pp. 1274–1277.
- [20] H. Nguyen, A. Parsa, and C. Caloz, "Power-recycling feedback system for maximization of leaky-wave antennas' radiation efficiency," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 7, pp. 1641–1650, 2010.
- [21] C. Wu and T. Itoh, "Combined gain-enhanced power recycling feedbacks for distributed amplifier-based crlh-leaky wave antennas," in *Microwave Conference (EuMC), 2011 41st European*. IEEE, 2011, pp. 499–502.
- [22] F. Ng-Molina, T. Martín-Guerrero, and C. Camacho-Penaloza, "The power recycling concept applied to distributed amplification," *submitted to IET Microw., Antennas Propag. on 4 April 2013*.