

## **Trasmisores LINC: Acercamiento al estado del arte.**

**Oliver Benavides Soto<sup>1</sup>, Leysi Rizo Salas<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Movitel. Ingeniero, [oliver@movitel.co](mailto:oliver@movitel.co). <sup>2</sup>ISPJAE. Dra.C., [leysi@electronica.cujae.edu.cu](mailto:leysi@electronica.cujae.edu.cu)

### **RESUMEN**

En este artículo se realiza un acercamiento a los fundamentos teóricos básicos del Transmisor Emergente con Arquitectura LINC. Se enfatiza en las bondades presentes en las arquitecturas emergentes para mejorar el compromiso linealidad-eficiencia con respecto a los transmisores inalámbricos actuales. Además se presenta el transmisor LINC como una de las alternativas tentadoras para lograrlo gracias a los altos niveles de eficiencia teórica que se pueden alcanzar con el uso de los transistores operando en régimen conmutado. Así mismo se introducen las limitaciones presentes en esta arquitectura y se da una panorámica del estado del arte en pos de mejorar las deficiencias aún presentes en los transmisores LINC y que atentan fundamentalmente contra la eficiencia de los mismos.

**PALABRAS CLAVES:** Eficiencia, Linealidad y Transmisor LINC.

### **ABSTRACT**

In this article an approach of the theoretic fundamental of emergent transmitter whit the LINC architecture is realized. Beside this, the advantages present in the emergent architectures to improve the linearity-efficiency compromise with respect to cordless transmitters in the actuality are emphasizing. Then, the LINC transmitter is presenting whit one of the temptress alternatives to reach the linearity-efficiency compromise, thanks to the high levels of theatrical efficiency that it can to reach with transistors working in commuted regimen. In this way, the limitations in this architecture are introducing and a general panorama of the art status is giving in the wake of improve the advantages present in the LINC transmitters yet and that degrade his efficiency fundamentally.

**KEYWORDS:** *Efficiency, linearity and LINC transmitter.*

## INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años las transmisiones inalámbricas han sido objeto de notables cambios en busca de lograr transmitir mayor cantidad de información con la mejor calidad posible. Esto, sin dudas, impone la necesidad de lograr tasas de transmisión más altas, exigiendo para ello sistemas más eficientes y con una respuesta transitoria más rápida. Por otro lado, existe la necesidad de realizar un uso eficiente del espectro radioeléctrico debido a que es un recurso muy limitado y actualmente saturado, lo que impide libres asignaciones del ancho de banda para los sistemas en determinadas bandas de frecuencia. Todas estas razones expuestas han traído consigo el desarrollo de técnicas de modulación cada vez más complejas y robustas, sean estas multinivel o multiportadoras de alta eficiencia espectral y elevado PAPR (“PeaktoAveragePower Ratio”), cuyas máscaras espectrales imponen restricciones muy importantes en términos de linealidad (p.e. WCDMA y LTE). En consecuencia, los transmisores convencionales están obligados a trabajar en un régimen de baja eficiencia para lograr la linealidad requerida.

Una de las líneas de estudio que ha ganado fuerza en la actualidad son las arquitecturas emergentes de transmisión. Estas estructuras están enfocadas hacia el uso eficiente de la energía, dotándolas de esta forma con la capacidad de superar con amplitud la limitación en cuanto al compromiso de linealidad-eficiencia presente en los transmisores actuales.

Dichas estructuras se basan en dos grandes principios: el ajuste dinámico de la alimentación y el ajuste de la impedancia (línea) de carga del amplificador de potencia, evitando así una alta degradación de la eficiencia mediante el seguimiento de la envolvente de la señal a transmitir.

Entre ellas la arquitectura LINC está actualmente en el centro de atención de la comunidad científica internacional, puesto que esta técnica permite una amplificación eficiente de la señal sin que ello resulte en una penalización de la linealidad de modo que se reduzca el consumo de potencia, la disipación de calor y con ello disminuir los altos costes operacionales que el compromiso linealidad-eficiencia trae asociado. Sin embargo el principal problema de esta arquitectura está relacionada con el proceso de combinación de las señales en el extremo receptor o transmisor, lo que repercute negativamente en términos de eficiencia. La otra limitante a controlar son los retardos que se pueden producir entre las dos ramas de amplificación antes del proceso de combinación. Esto factores obligan a los investigadores continuar trabajando en las variantes que mitiguen lo más posible estos inconvenientes.

### AMPLIFICACIÓN LINEAL CON COMPONENTES NO LINEALES: DEFINICIÓN

El concepto de amplificadores “outphasing” o LINC (Amplificación lineal con componentes no lineales) nació alrededor de 1935 cuando Chireix introdujo dicha técnica para modulaciones de amplitud lineal [1]. Posteriormente, en 1974 Cox propuso el amplificador “outphasing” que conocemos hoy en día [2] pero bajo las siglas de LINC (“linear amplification using nonlinear components”). Aunque las dificultades en su implementación hicieron que se dejaran de utilizar por aquella época, recientemente se han vuelto a emplear en una gran variedad de aplicaciones inalámbricas.

La tecnología LINC consiste en tomar una envolvente compleja con variaciones en amplitud y fase para separarlas con el separador de las componentes de la señal (SCS) en dos señales moduladas en fase y de envolvente constante como se muestra en la figura 1.

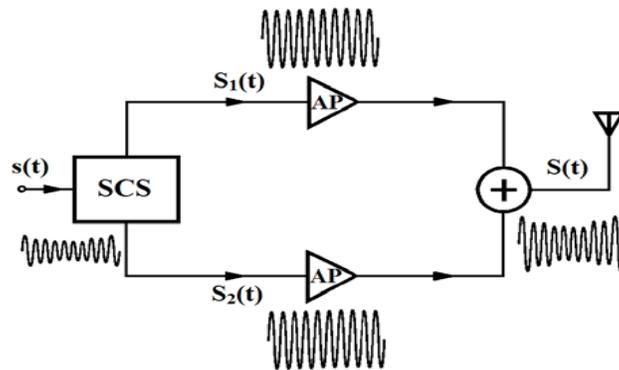


Figura 1 Diagrama en bloques de un LINC simplificado [3].

Estas dos señales son amplificadas de forma independiente por dos amplificadores de potencia de alta eficiencia y posteriormente unidas por un acoplador. Teóricamente las distorsiones a la salida estarán en contrafase y se cancelan en el combinador, mientras las señales de salida estarán en fase y se suman, obteniéndose una réplica amplificada de la señal de entrada.

Desde el punto de vista matemático se parte de la señal de entrada de envolvente compleja con variaciones de amplitud y fase [3]:

$$s(t) = a(t)\cos[w_c t + \phi(t)] \quad (1)$$

Una vez separadas por el SCS, se obtienen las dos señales de amplitud constante y modulada en fase:

$$s_1(t) = \frac{A_{\max}}{2} \cos[w_c t + \phi(t) + \varphi(t)] \quad (2)$$

$$s_2(t) = \frac{A_{\max}}{2} \cos[w_c t + \phi(t) - \varphi(t)] \quad (3)$$

Donde:

$$A_{\max} = \max |a(t)| \quad (4)$$

$$\varphi(t) = \cos^{-1}[a(t)/A_{\max}] \quad (5)$$

Uno de los problemas por los que se habían dejado de utilizar estos esquemas hasta la actualidad fue que mediante el procesamiento analógico de la señal era muy difícil la generación del coseno inverso con precisión [4]. Pero gracias al procesamiento digital de la señal se han empezado a utilizar de nuevo, pudiéndose definir también de la siguiente manera:

$$s(t) = a(t)e^{j\theta(t)}, \quad 0 \leq a(t) \leq V_m \quad (6)$$

La señal separada en sus dos componentes quedaría de la siguiente forma:

$$s_1 = s(t) - e(t) \quad (7)$$

$$s_1 = s(t) + e(t) \quad (8)$$

La señal de cuadratura es definida por:

$$e(t) = js(t) \sqrt{\frac{V_m^2}{a^2(t)}} - 1 \quad (9)$$

De manera general con estas estructuras se puede mejorar sustancialmente la eficiencia del sistema, ya que utilizan amplificadores de potencia no lineales que pueden alcanzar una eficiencia teórica del 100% y lograr una reproducción de la señal de entrada con muy bajos niveles de distorsión.

En esta arquitectura, el uso de amplificadores de potencia no lineales de alta eficiencia es posible gracias a la naturaleza de envolvente constante de las señales moduladas en fase. Sin embargo, el problema más crítico que presentan estos transmisores es el de maximizar la eficiencia al final del proceso de combinación RF. Una alternativa planteada en sus inicios fue el uso del combinador reactivo puro, como el planteado por Chireix[1] o un combinador tipo "T" sin pérdidas como en [5], sin embargo estos métodos se encuentran limitados por las variaciones de la impedancia de carga a la salida en los AP individuales. Este efecto depende del tipo de AP a utilizar por lo que la eficiencia característica del sistema "outphasing" depende de su selección. Además estas variaciones en la impedancia característica están ligadas al desfase que se produce entre las dos ramas de amplificación del LINC.

Otra alternativa para evitar la distorsión y preservar la eficiencia de los amplificadores conmutados, sería la de utilizar un combinador aislado como el Wilkinson o un Híbrido de 180° [2]. Estos dispositivos tienen adaptados sus tres puertos, con buen aislamiento entre los dos caminos de entrada. Dado que existe un buen aislamiento entre los puertos de entrada, los APs ven siempre una impedancia constante, lo que conduce a buenas características de linealidad a la salida, pero sólo se podrá alcanzar el 100% de eficiencia para la potencia de salida máxima. Pues esta alternativa tiene el inconveniente que la eficiencia tiende a degradarse rápidamente conforme aumenta el PAPR. Esto se debe a que cuando las entradas se desfasan para seguir las variaciones de amplitud, se pierde potencia en forma de calor a través de la resistencia de aislamiento.

La otra limitación importante consiste en la tolerancia extremadamente ajustada que hay que lograr para emparejar las dos ramas de amplificación y de esta forma lograr un aceptable rechazo del espectro fuera de banda de la señal de salida. En muchas de las aplicaciones prácticas, según plantean varios autores [3], los requerimientos típicos se encuentran aproximadamente entre 0.1-0.5 dB en el acoplamiento para el caso de la ganancia y 0.4°-2° para la fase.

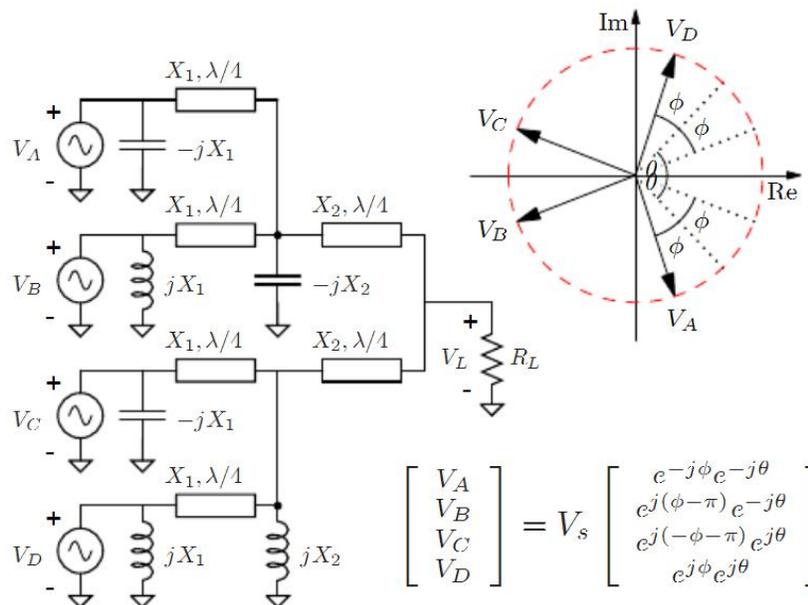
Entre las alternativas propuestas para minimizar la descompensación entre las ramas de amplificación se encuentra el uso de algunas clases de algoritmos de realimentación con los que se pueden compensar ambos desequilibrios [6]. Otras alternativas tratan de compensar el desequilibrio de fase mediante las técnicas de predistorsión[7]. También se han propuesto mecanismos de calibración de fase para mitigar ambos desequilibrios de fase y amplitud, usando solo un control de fase y sin requerir bloques de corrección de amplitud adicionales (p.e. convertidores DC/DC) [8].

No obstante a estas alternativas en la actualidad se sigue trabajando para minimizar estas limitantes en pos de lograr que puedan trabajar con señales con PAPR cada vez más altas.

## ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE

En [9] se describe una novedosa implementación del LINC, en el cual se pone a prueba el concepto de diseño de amplificadores de potencia “outphasing” dirigido para aplicaciones BTS (“base transceiver stations”) y basado en la propuesta original de Chireix[1]. Esta nueva propuesta muestra como un concepto operacional completamente diferente del AP del Chireix clásico, puede ayudar drásticamente al mejoramiento de la eficiencia, revelando un potencial decente en la región “Power Back Off” (PBO) donde las BTS operan la mayor parte del tiempo. Los resultados muestran un mejoramiento de la eficiencia de drenador mayor del 40% para un PBO de 10 dB.

En el combinador Chireix la parte real de la impedancia de carga vista por cada uno de los amplificadores de potencia depende del ángulo de desfase a la entrada de los AP. La desventaja fundamental de esta técnica radica en que la parte imaginaria de la carga del amplificador de potencia también varía significativamente con el ángulo de desfase. Con vista a mejorar este efecto, en [10] se muestra una nueva estructura “outphasig” de cuatro vías en la que la red de combinación sin pérdidas se implementa usando una combinación de secciones de líneas de transmisión “microstrip” y se utilizan elementos discretos para proporcionar las reactancias “shunt”. La figura 2 muestra la implementación del combinador de 4 vías propuesto donde los AP son representados como fuentes ideales de voltaje.



**Figura 2 Implementación del combinador de 4 vías usando reactancias “shunt” y una combinación de secciones de líneas de transmisión “microstrip” y la relación entre los fasores de las 4 entradas de los AP [10].**

Limitando el uso de los componentes discretos se puede eliminar la necesidad de una completa contabilidad para los comportamientos no ideales de estos elementos a las frecuencias de microondas. Estas no idealidades incluyen longitudes eléctricas distintas de cero y capacitancias parásitas a tierra. No

obstante, estos factores son fácilmente absorbidos dentro del valor de la reactancia, cuando el elemento es usado en una conexión “shunt” a tierra. Las mediciones de esta implementación mostraron para una señal de ancho de banda de 3.84 MHz una eficiencia pico de drenador del 52% para una señal con PAPR de 3.9 dB y una eficiencia del 38% para una señal WCDMA con una PAPR de 9.6 dB. Por lo que la degradación de la eficiencia con señales de alto PAPR sigue siendo una limitante para esta propuesta de combinador.

Una propuesta anterior de un sistema “outphasig” con combinador de potencia de cuatro vías a las frecuencias de microondas, fue propuesto por [11]. Aunque la implementación fue satisfactoria esta requiere de una rigurosa afinación de los valores de los componentes discretos para sintonizar la red de combinación de potencia y además de una rigurosa contabilidad de las longitudes eléctricas de los componentes e interconexiones.

Teniendo en cuenta que en los combinadores sin pérdidas solo la parte capacitiva de la carga reactiva degrada el rendimiento del sistema en [12] se demuestra esta teoría y se propone una nueva estructura (Z-LINC) en el que el combinador sin pérdidas se diseña para proporcionar carga capacitiva cero en los amplificadores de potencia para cualquier ángulo de desfasaje. La carga capacitiva de valor cero sobre todo el rango de potencia de “back-off” permite disminuir el deterioro de eficiencia. El concepto es validado teóricamente y experimentalmente mediante un estudio comparativo entre el fabricado del LINC clásico y prototipo del Z-LINC.

En el caso de los combinadores Wilkinson o un Híbrido de 180°, la eficiencia se puede mejorar mediante el reciclaje de la energía. En este método se puede sustituir la resistencia de aislamiento en el combinador de potencia por un rectificador que puede ofrecer ajuste de impedancia para el aislamiento y una correcta operación de los amplificadores de potencia en pos de lograr una máxima eficiencia del reciclaje. La inclusión de una red de compensación de impedancia reduce la variación de impedancia de entrada vista por el rectificador. Sin embargo, la compensación de impedancia es limitada sobre todo si la impedancia de entrada tiene una parte reactiva en la rectificación a altas frecuencias.

En [13] se presenta un perfeccionado convertidor RF-DC basado en un rectificador clase E con un amplio rango dinámico de balance de entrada. Para lograrlo se utiliza la dependencia de la impedancia de entrada del rectificador clase E con algunas capacitancias, para reemplazar estos capacitores con diodos varactores que compensan los cambios de impedancia con la potencia de entrada y la condiciones de carga de DC. Los resultados con este convertidor RF-DC muestran una eficiencia pico del 60% y una S11 menor de -20dB sobre una potencia RF de entrada de 12dB y un voltaje de operación de la batería de 2.5-4.2 V a 800 MHz.

Por otro lado, los amplificadores LINC requieren señales de manejo especializadas. Estas señales son un resultado de la transformación no lineal, la cual es normalmente desarrollada en el DSP (procesador digital de señales) y enviada a los amplificadores a través del proceso normal de conversión de subida D/A e I/Q. La naturaleza no lineal de estas señales de manejo significa que pueden tener un ancho de banda mucho más grande que la señal original de entrada. Esto trae consigo complicaciones para alguno de los siguientes bloques de procesamiento analógico y limita el ancho de banda de modulación de la señal a transmitir.

Atendiendo al reciente interés de los investigadores por reducir el ancho de banda de los componentes del LINC en [14] se muestra una novedosa técnica que reduce el ancho de banda de estos componentes,

mientras inhabilita las variaciones de la envolvente y elimina la distorsión fuera de banda en la señal transmitida. El esquema de modulación utilizado fue OFDM (“orthogonalfrequencydivision”), en el cual, para las señales multiportadoras la componente de fase de la modulación transmitida es la que domina el espectro de las componentes del sistema LINC. Las mediciones mostraron una reducción del ancho de banda del 46 % lo que implica un incremento del 85% en el ancho de banda de modulación de la señal transmitida.

Una de las líneas de investigación que ha ganado fuerza en la búsqueda del mejoramiento de los compromisos de linealidad-eficiencia con el uso de combinadores aislados son las estructuras de LINC multinivel (ML-LINC). En estas estructuras para recrear un punto nulo en la envolvente de la señal, los dos envolventes constantes de las señales moduladas en fase deben combinarse con un desfase de 180°. En los transmisores LINC tradicionales de un solo nivel, esto podría resultar en potencia disipada en el combinador de potencia lo que degradaría la eficiencia. Con el uso de estructuras ML-LINC, típicamente se modula la salida de los amplificadores de potencia, mediante la modulación de la fuente de alimentación de los amplificadores de potencia generando de esta manera múltiples niveles de salida.

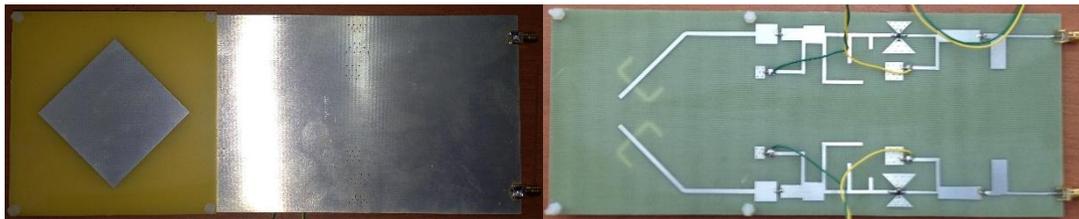
Una de las líneas de investigación que se ha desarrollado con estas estructuras es el manejo de señales LTE con ML-LINC. Este interés encuentra la motivación en los estrictos requerimientos de potencia promedio del canal adyacente (ACPR, en sus siglas en inglés) y magnitud del vector de error (EVM, en sus siglas en inglés) que no son fáciles de lograr con los sistemas actuales. En [15] se analiza el impacto de la localización de los niveles en un sistema ML-LINC para obtener alta linealidad. Los resultados mostraron que colocando niveles en el tope de la región dinámica de las señales “outphasing” se puede lograr un rendimiento adecuado de la linealidad para aplicaciones LTE. Siendo esto crucial para lograr una ACPR mejor del -45 dBc, valor que constituye el mínimo requerido para aplicaciones LTE entre otros. En esta variante se implementa un ML-LINC de 5 niveles, logrando un ACPR de -50 dBc a 10 dB mejorando así los resultados respecto al estado del arte. Con esta implementación se libera una potencia promedio de salida de 2W para una señal LTE con PAPR de 10 dB a 1.4 MHz.

Sin embargo en [16] se centra el análisis de la influencia de los desbalances de las dos ramas en la arquitectura ML-LINC para señales LTE. Este análisis se basa en determinar la máxima tolerancia de los desbalances ganancia/fase y retardos entre las dos ramas que se pueden permitir para cumplir con las especificaciones del estándar LTE. Siendo este un aspecto que no se había analizado con profundidad hasta ese momento. Se tuvieron en cuenta los desbalances para diferentes anchos de bandas de la señal y niveles del sistema.

Otra variante ML-LINC es presentada por [17], en el cual se logra una buena cantidad de niveles reconfigurables mediante el control arbitrario de la potencia de salida de los amplificadores de potencia. Siendo destacable en esta variante la eficiencia que se logra en la generación arbitraria de los múltiples niveles. De hecho, el sistema solo usa una fuente de voltaje reconfigurable. Para alcanzar alta eficiencia se desarrolla un algoritmo que optimiza los diferentes niveles simétricos dependiendo de la estadística de la señal actual. Los resultados en las mediciones mostraron en comparación con el LINC convencional que la eficiencia de potencia promedio puede ser mejorada de un 28% hasta el 41% para una señal

WCDMA con una ACPR por debajo de -45 dBc. Para una señal LTE de 10 MHz la eficiencia puede ser mejorada con respecto al LINC convencional en un 24 %.

Una alternativa para evitar la degradación de la eficiencia en la etapa final de combinación de potencias se presenta en [18], donde se construyó un amplificador LINC integrando en un solo sistema una antena de microcinta acoplada por apertura con polarización circular (AAPC) y la estructura amplificadora LINC como se muestra en la figura 3. En lugar de realizar la combinación de potencias a la salida de los amplificadores, las señales de envolvente constante, previamente desfasadas 90° son amplificadas y transmitidas a través de las excitaciones de polarización horizontal y vertical de la antena, de este modo, la señal deseada de comunicación y la señal resultante de la cancelación son radiadas con polarización circular ortogonal.



**Figura 3. Vista superior e inferior del LINC construido[18].**

Con el fin de aumentar la ganancia y el ancho de banda de la antena AAPC se seleccionó el aire como “sustrato de radiación”, esto conllevó a la necesidad de utilizar un sustrato auxiliar para imprimir el parche. Por otra parte los amplificadores utilizados en la implementación de este transmisor LINC se basan en un amplificador clase E a líneas de transmisión.

Las mediciones realizadas mostraron una S11 a la frecuencia fundamental de -30dB con un ancho de banda de aproximadamente 226 MHz, mientras que para S22 se alcanzó aproximadamente -23dB, con un ancho de banda de aproximadamente 214 MHz. La eficiencia máxima lograda osciló sobre el 46 % a la frecuencia de 2.08 GHz sobre una portadora a dicha frecuencia.

Sin embargo, con estas estructuras hay que tener en cuenta el hecho de que si las diferencias en las demoras de las ramas no son adecuadamente controladas, pudiera suceder que las señales que arriban a la antena estén desfasadas, lo que provocaría que al combinarlas se afecte el nivel de ACPR, lo cual en este caso en particular es más complejo de controlar con técnicas de predistorsión digital.

## **CONCLUSIONES.**

A partir del estudio del estado de arte de las arquitecturas emergentes de transmisión basadas en el LINC e identificando las limitaciones actuales en cuanto al compromiso linealidad-eficiencia en estos transmisores, por lo que se mantiene vigente la necesidad de reducir los niveles de pérdidas que se producen en la combinación de señales. La variante de combinar las señales en el extremo receptor elimina este inconveniente presente en el transmisor, pero se hace más complejo controlar las demoras entre las ramas con las técnicas de predistorsión digital. Dentro de las desventajas de LINC, las que se encuentran asociadas a los desbalances de fase/ganancia, pueden ser controladas satisfactoriamente a través de las del empleo de técnicas de predistorsión digital y la implementación de bucles de

realimentación en los transmisores. Con el uso de la técnica del LINC multinivel se pueden alcanzar razones de potencia del canal adyacente menores de -45 dBc. Este valor constituye el mínimo requerido para el uso de aplicaciones LTE entre otras señales de alta eficiencia espectral. Su importancia radica en que es un requerimiento difícil de lograr con los sistemas actuales.

## REFERENCIAS.

1. CHIREIX, H., *High power outphasing modulation*. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1935. **23**(11): p. 1370-1392.
2. COX, D.C., *Linear Amplification with Nonlinear Components*. IEEE transactions on communication, 1974: p. 1942-1945.
3. Salas, L.R., *Contribuciones a la implementación de arquitecturas emergentes de transmisión basadas en conceptos de amplificación de alta eficiencia*, Departamento de Telecomunicaciones 2013, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría": Facultad de Ingeniería Eléctrica. p. 182.
4. Jordi Alonso Fuster, Patricia Ferreres Hernández, and S.S. Simón, *Diseño e implementación de combinadores de potencia para amplificador LINC @ 868MHz*, in *Sistemas de Telecomunicación* 2013, Universidad Politecnica de Cataluña. p. 137.
5. Raab, F.H., *Efficiency of Outphasing RF Power-Amplifier Systems*. IEEE transactions on communication, 1985. **33**(10): p. 1094-1099.
6. Chengguo Liu, Guowei Yang, and Z.P. Wu, *Improvement of Linear Amplification with Nonlinear Components Based on COX's Theory*, 2013, Atlantis Press: 3rd International Conference on Electric and Electronics. p. 51-54.
7. Landin, P.N., et al., *Modeling and Digital Predistortion of Class-D Outphasing RF Power Amplifiers*. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 2012. **60**(6): p. 1907-1915.
8. Joonhoi, H., et al. *A novel unbalanced phase calibration technique for the LINC transmitter*. in *Radio and Wireless Symposium (RWS), 2010 IEEE*. 2010.
9. Abou-Chahine, Z., et al. *An input amplitude modulated harmonic outphasing PA*. in *Mediterranean Microwave Symposium (MMS), 2013 13th*. 2013.
10. Barton, T.W., J.L. Dawson, and D.J. Perreault. *Four-way lossless outphasing and power combining with hybrid microstrip/discrete combiner for microwave power amplification*. in *Microwave Symposium Digest (IMS), 2013 IEEE MTT-S International*. 2013.

11. Barton, T.W., J.L. Dawson, and D.J. Perreault, *Experimental Validation of a Four-Way Outphasing Combiner for Microwave Power Amplification*. *Microwave and Wireless Components Letters*, IEEE, 2013. **23**(1): p. 28-30.
12. Amiri, O.T. and A. Koukab. *A zero capacitive LINC architecture for efficient broadband transmitters*. in *Microwave Conference (EuMC), 2013 European*. 2013.
13. Abdelhalem, S.H., P.S. Gudem, and L.E. Larson, *An RF–DC Converter with Wide-Dynamic-Range Input Matching for Power Recovery Applications* *Circuits and Systems II: Express Briefs*, IEEE Transactions on, 2013. **60**(6): p. 336-340.
14. Mustafa, A.K., S. Ahmed, and M. Faulkner, *Bandwidth Limitation for the Constant Envelope Components of an OFDM Signal in a LINC Architecture*. *Circuits and Systems I: Regular Papers*, IEEE Transactions on, 2013. **60**(9): p. 2502-2510.
15. Hone, T.M., et al. *Achieving linearity for outphasing amplifiers targeting LTE applications and beyond*. in *Microwave Conference Proceedings (APMC), 2013 Asia-Pacific*. 2013.
16. Junqing, G., et al. *Linearity study of path imbalances in multi-level LINC transmitter for wideband LTE application*. in *Microwave Conference (EuMC), 2013 European*. 2013.
17. Aref, A.F., et al. *Efficient amplification of signals with high PAPR using a novel multilevel LINC transmitter architecture*. in *Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), 2012 7th European*. 2012.
18. Roberto Acosta Quintana, R.P.F., *Diseño e implementación de un transmisor emergente con arquitectura LINC integrado a una antena de microcinta*, *Departamento de Telecomunicaciones* 2014, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”: Facultad de Ingeniería Eléctrica. p. 127.