

Índice del Capítulo:

1. Clases de Amplificador.	
1.1.- Amplificador de clase A.....	2
1.2.- Amplificador de clase B.....	4
1.3.- Amplificador de clase C.....	6
1.4.- Amplificadores de clase AB.....	7
1.5.- Amplificadores de clase D.....	9
2.- Técnicas de Predistorsión.	
2.1.- Introducción.....	11
2.2.- Introducción a los HPA.....	13
2.3.- Saturación.....	14
2.3.- Distorsión armónica.....	16
2.4.- Intermodulación.....	18
2.5.- Modelos de amplificador.....	20
2.6.- Predistorsión en bucle abierto.....	23

IEEE

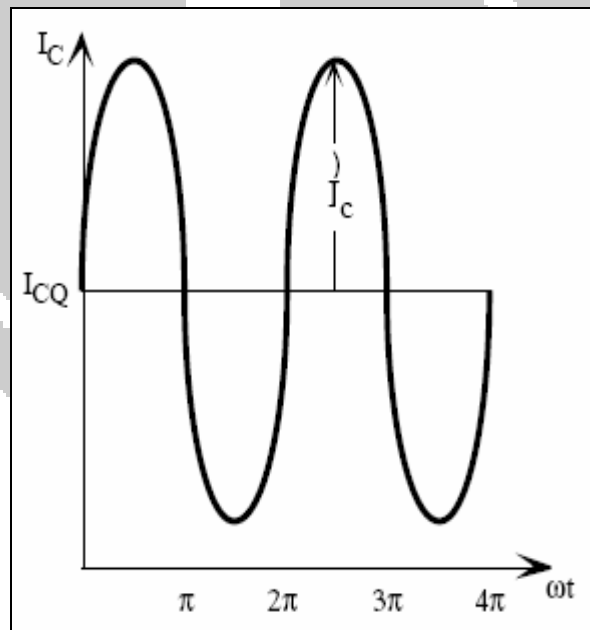
1.- Clases de amplificador

1.1.- Amplificadores clase A:

Son aquellos amplificadores cuyas etapas de potencia consumen corrientes altas y continuas de su fuente de alimentación, independientemente de si existe señal o no. Esta amplificación presenta el inconveniente de generar una fuerte y constante emisión de calor. No obstante, los transistores de salida están siempre a una temperatura fija y sin alteraciones. En general, podemos afirmar que esta clase de amplificación es frecuente en circuitos de audio y en los equipos domésticos de gama alta, ya que proporcionan una calidad de sonido potente y de muy buena calidad. Resumiendo, los amplificadores de clase A tienen mayor calidad de sonido, cuestan más y son menos prácticos, ya que gastan corriente y devuelven señales muy limpias.

La clase A se refiere a una etapa de salida con una corriente de polarización mayor que la máxima corriente de salida que dan, de tal forma que los transistores de salida siempre están consumiendo corriente. La gran ventaja de la clase A es que es casi lineal, y en consecuencia la distorsión es menor. La gran desventaja de la clase A es que es poco eficiente, es decir que requiere un amplificador de clase A muy grande para dar 50 W, y ese amplificador usa mucha corriente y se pone a muy alta temperatura. Algunos amplificadores de "high-end" son clase A, pero la verdadera clase A solo está en quizás un 10% del pequeño mercado de "high-end" y en ninguno del mercado de gama media. Los amplificadores de clase A a menudo consisten en un transistor de salida

conectado al positivo de la fuente de alimentación y un transistor de corriente constante conectado de la salida al negativo de la fuente de alimentación. La señal del transistor de salida modula tanto el voltaje como la corriente de salida. Cuando no hay señal de entrada, la corriente de polarización constante fluye directamente del positivo de la fuente de alimentación al negativo, resultando que no hay corriente de salida, se gasta mucha corriente. Algunos amplificadores de clase A más sofisticados tienen dos transistores de salida en configuración push-pull.



Amplificador de clase A

IEEE

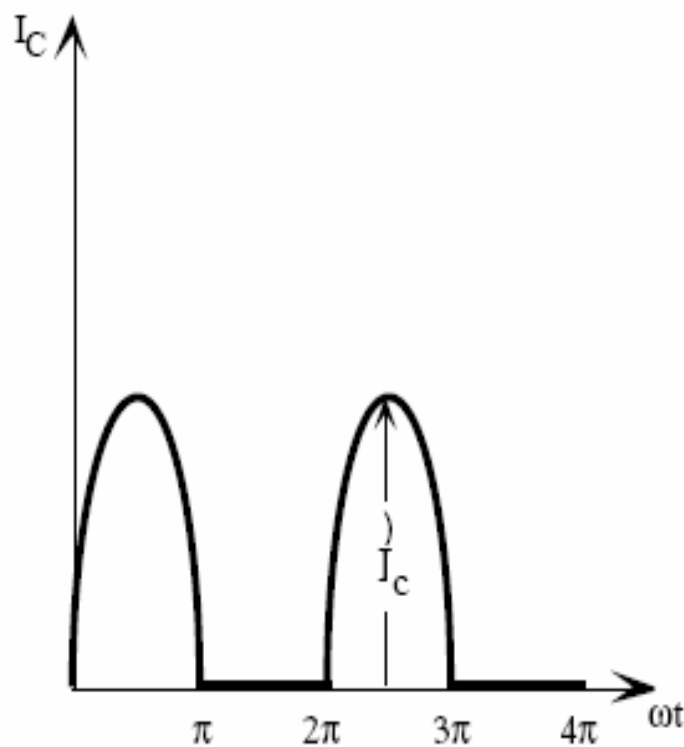
1.2.- Amplificadores de clase B

Son aquellos amplificadores que tienen la peculiaridad de no disponer de corriente a través de los transistores si no existe una señal presente. La propia señal de excitación polarizará a los transistores para que entren en conducción y así exciten a su vez a los altavoces. Esta característica hace especialmente indicados a estos tipos de amplificadores en equipos alimentados por baterías, ya que el consumo está íntimamente ligado al nivel de señal de entrada. Hablando de forma genérica, podríamos afirmar que la calidad en la amplificación de estos equipos es menor y su utilización se adecuaría a aplicaciones que no requieran un sonido muy elaborado, como pueden ser sistemas telefónicos, transmisores de seguridad portátiles, sistemas de aviso, entre otras aplicaciones. Este tipo de amplificadores no se usa en audio.

Los amplificadores de clase B tienen etapas de salida con corriente de polarización cero. Generalmente, un amplificador clase B tiene corriente de polarización cero en una pequeña parte del circuito de potencia, para evitar no linealidades.

Tienen una importante ventaja sobre los de clase A en eficiencia debido a que casi no usan electricidad con señales pequeñas. Los amplificadores de clase B tienen una gran desventaja, una distorsión audible con señales pequeñas. Probablemente sea una distorsión con una deficiente sonoridad, que lleva a notarse con señales más grandes. Esta distorsión se llama distorsión de filtro, porque sucede en un punto que la etapa de salida se cruza entre la fuente y la corriente de amortiguación. No hay casi amplificadores de clase B hoy en día a la venta.

Los amplificadores clase B consisten en un transistor de salida conectado de la salida al positivo de la fuente de alimentación y a otro transistor de salida conectado de la salida al terminal negativo de la fuente de alimentación. La señal fuerza a un transistor a conducir mientras que al otro lo corta.

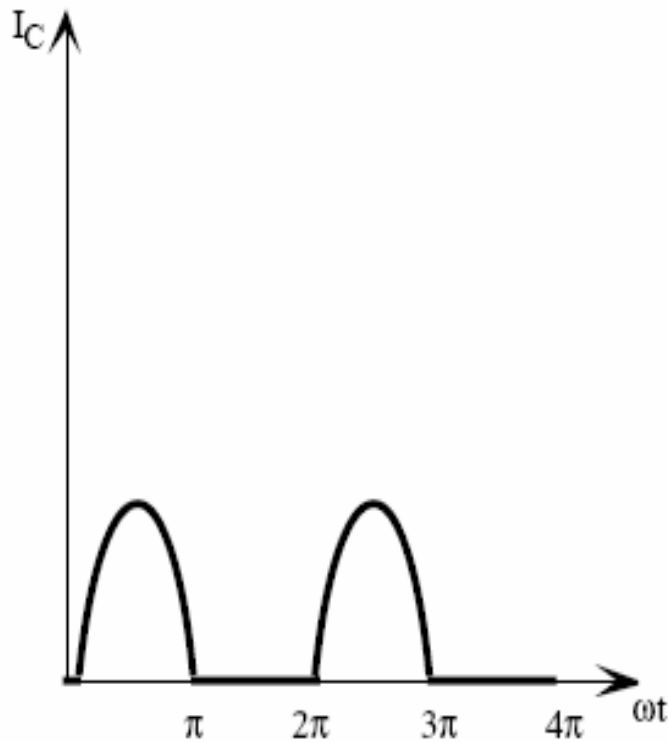
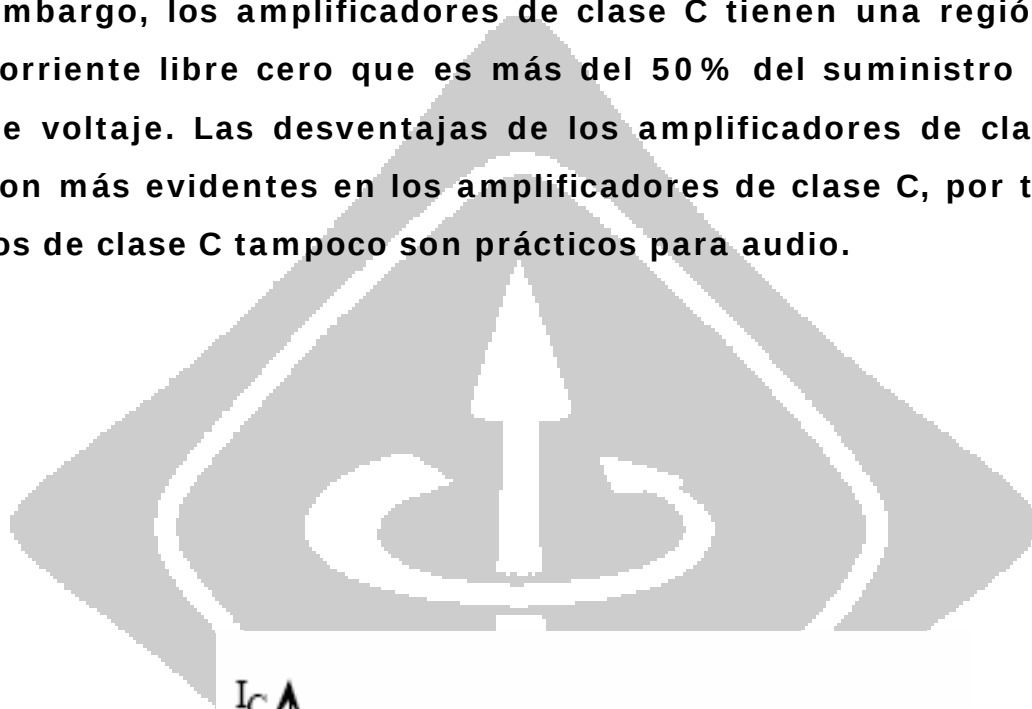


Amplificador de clase B

IEEE

1.3.-Amplificadores de clase C

Este tipo de amplificador tampoco se usa en audio. Los amplificadores de clase C son similares a los de clase B en que la etapa de salida tiene corriente de polarización cero. Sin embargo, los amplificadores de clase C tienen una región de corriente libre cero que es más del 50% del suministro total de voltaje. Las desventajas de los amplificadores de clase B son más evidentes en los amplificadores de clase C, por tanto los de clase C tampoco son prácticos para audio.

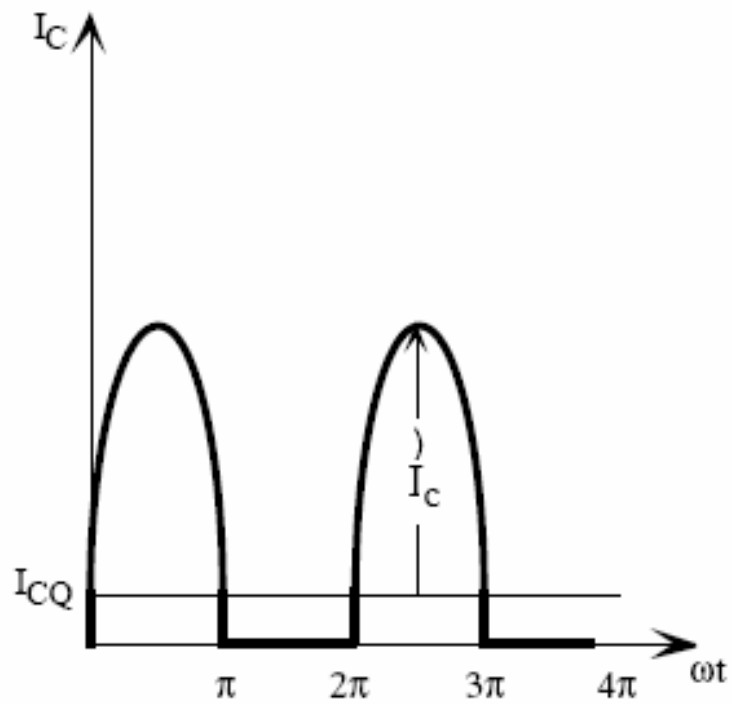


Amplificador de clase C

1.4.-Amplificadores de clase AB

Son aquellos amplificadores que reciben una pequeña alimentación constante de entrada, independiente de las entradas, en suma a la que será producida en función de la señal. Es decir, contaremos con una alimentación constante mínima y además, el amplificador aumentará también la potencia que entrega a los altavoces en función de las señales de entrada que reciba. Esta es la clase de amplificador más común en el área del autosonido, sin embargo podemos conseguir también de clase A, aunque ya sabemos el alto consumo de corriente de estos aparatos. La clase AB domina el mercado y rivaliza con los mejores de clase A en calidad de sonido. Usa menos corriente que los de clase A y pueden ser más baratos, pequeños, frescos y ligeros.

Los amplificadores de clase AB son casi iguales a los de clase B en que tienen dos transistores de salida. Sin embargo, los amplificadores de clase AB difieren de los de clase B en que tienen pequeña corriente libre fluyendo del terminal positivo al negativo incluso si no hay señal de entrada. Esta corriente se incrementa ligeramente, pero no se incrementa tanto como para parecerse a los de clase A. Esta corriente libre incluso corrige casi todas las no linealidades asociadas con la distorsión del filtro. Estos amplificadores se llaman de clase AB en vez de A porque con señales grandes, se comportan como amplificador clase B, pero con señales pequeñas, se comportan como amplificador de clase A. La mayoría de los amplificadores disponibles en el mercado son de clase AB.



Amplificador de clase AB



IEEE

1.5.- Amplificadores de clase D

La ventaja fundamental de este tipo de amplificadores es su excelente rendimiento energético, superior en algunos casos al 90-95%, lo que reduce drásticamente el tamaño de los disipadores, y por tanto el tamaño y peso.

Tradicionalmente se han visto relegados a aplicaciones limitadas como amplificadores para dispositivos portátiles o “subwoofers”, en los que la distorsión o el ancho de banda no son factores determinantes. Sin embargo, con la tecnología actual existen amplificadores clase-D para toda la banda y niveles de distorsión comparables a los de clase AB o incluso clase A.

Los amplificadores de clase D se basan en la conmutación entre dos estados (aunque existen variaciones multinivel), con lo que los dispositivos de salida siempre se encuentran en corte o en saturación (en ambos casos la potencia disipada en los mismos es prácticamente nula), salvo en los estados de transición, cuya duración debe ser minimizada a fin de no disminuir el rendimiento. Esta señal conmutada, que puede ser generada de diversas formas, aunque la más común es la modulación por anchura de pulsos o PWM, debe ser filtrada posteriormente para recuperar la información de audio. Para ello, la frecuencia de conmutación debe ser sustancialmente superior al ancho de banda requerido (al menos 10 veces mayor) para poder ser rechazada eficazmente.

El filtro suele ser de tipo LC, por no suponer pérdidas importantes. Los amplificadores Clase-D requieren de un minucioso diseño para minimizar la radiación electromagnética y evitar que pueda interferir en equipos adyacentes, típicamente en la banda de FM. No obstante, la tecnología actual ha demostrado que esta clase de amplificadores es la alternativa lógica a las tecnologías lineales tradicionales no sólo por su rendimiento, sino también por su calidad de sonido, tamaño y coste.

Otros amplificadores

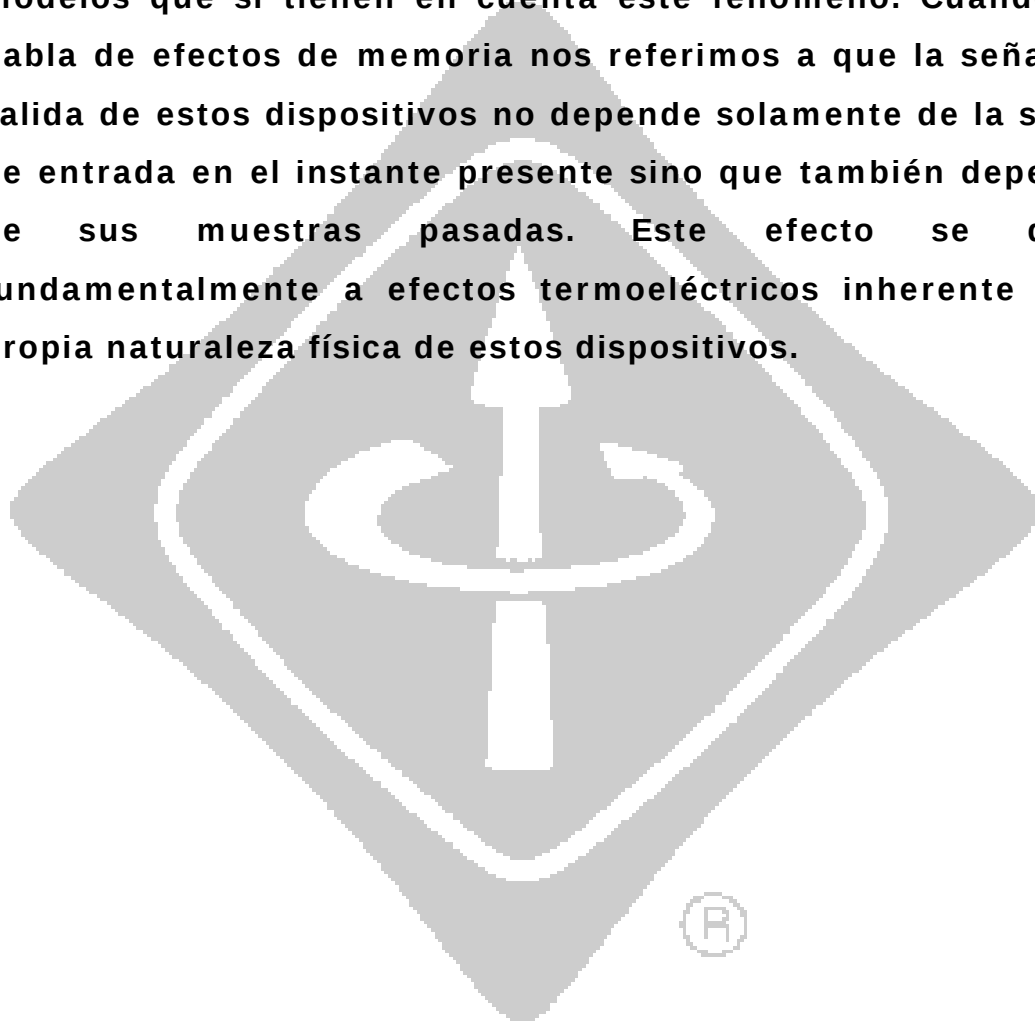
Algunos hablan también de las clases E, G y H, aunque las denominaciones no están tan estandarizadas como las clases A y B. Se trata de variaciones de las topologías clásicas aunque confían en la variación de las tensiones de alimentación para minimizar la disipación en los transistores de potencia en cada momento, dependiendo de la señal de entrada. Según ésta variación se realice en varios pasos discretos y de manera continua estaremos ante un amplificador de clase G ó H. Estas clases se suelen limitar a amplificadores para sonorización profesional de elevada potencia, aunque presentan problemas importantes, sobre todo en el caso de la conmutación discreta de los niveles de alimentación. Desde la aparición y evolución de los amplificadores de clase D, estas tecnologías están cayendo en desuso.

2.-Técnicas de Predistorsión:

2.1 Introducción

Los amplificadores de potencia (AP) son dispositivos altamente no lineales, cuyo alto consumo (aproximadamente un 70% de la energía disponible) y su indispensable presencia en los sistemas de comunicaciones, los convierten en continuo objeto de investigación. Además, como es bien sabido, existe un compromiso entre eficiencia y linealidad, así pues, los HPA's (High Power Amplifier) más eficientes desde un punto de vista de rendimiento energético (clase AB, clase C y los conmutados clase D, E, F), son los que presentan mayor grado de no linealidades. Los efectos de las no linealidades en los AP's son dobles: por un lado causan recrecimiento espectral, dando lugar a interferencias en los canales adyacentes (distorsión fuera de banda), mientras que por otro lado, causan distorsión dentro de la propia banda de transmisión, degradando por tanto el *bit error rate* (BER). Los organismos reguladores fijan, a través de los diferentes estándares de comunicaciones, los niveles máximos de emisión fuera de banda permitidos (máscaras de emisión de potencia que delimitan el *adjacent channel power ratio*, ACPR), así como de la propia distorsión en banda, por ejemplo especificando porcentajes máximos de error en las constelaciones. La predistorsión no es más que un fenómeno artificial de distorsionar la señal de interés, a fin de que al ser realmente distorsionada por otro dispositivo el efecto se contrarreste lo mejor posible. Así pues el objetivo primordial es conocer cuanto distorsiona nuestro dispositivo (de ahora en adelante HPA), a fin de poder compensarlo.

Llegados a este punto, cabría decir que existen multitud de modelos aceptados para el HPA. Aunque la diferencia primordial entre ellos es la que los separa en dos grandes grupos. Los modelos sin memoria, que consideran nulos o prácticamente los efectos de memoria ocasionados y los modelos que si tienen en cuenta este fenómeno. Cuando se habla de efectos de memoria nos referimos a que la señal de salida de estos dispositivos no depende solamente de la señal de entrada en el instante presente sino que también depende de sus muestras pasadas. Este efecto se debe fundamentalmente a efectos termoeléctricos inherente a la propia naturaleza física de estos dispositivos.



IEEE

2.2.- Introducción a los HPA

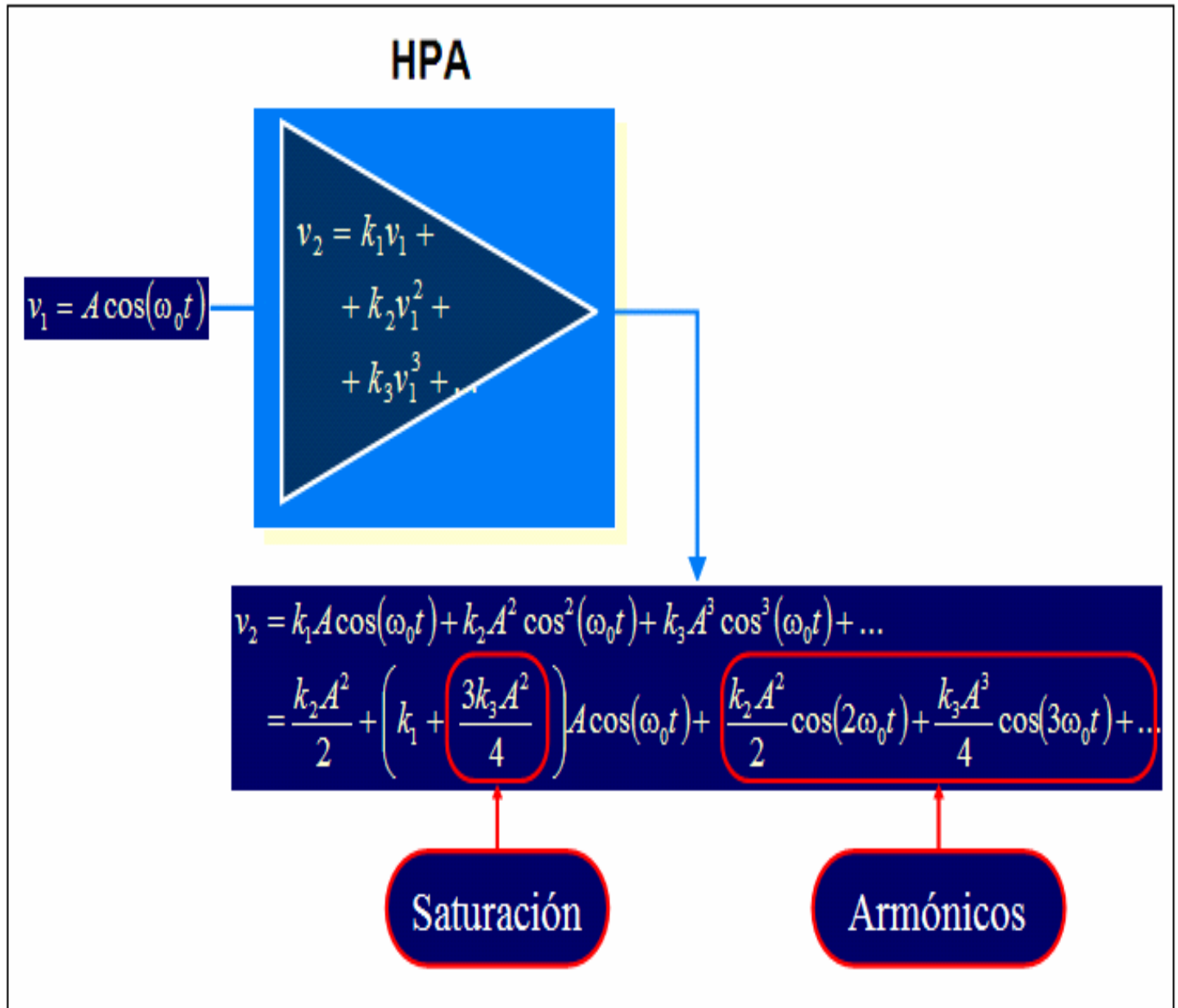


Fig.: Modelo estándar de un Amplificador

IEEE

2.3.- Saturación:

El fenómeno de saturación, es un fenómeno inherente a los amplificadores por el cual la ganancia máxima que pueden proporcionar sólo se consigue para un rango pequeño y finito de señales de entrada. Se habla de que la ganancia de un amplificador satura cuando empezamos a aumentar la tensión de entrada y vemos que la señal ya no se amplifica igual y puede llegar el momento en el que se atenué. Dicho de manera más técnica, se habla de que se ha llegado al punto de compresión de 1 dB y que hemos saturado el amplificador. Se puede observar abajo en la figura

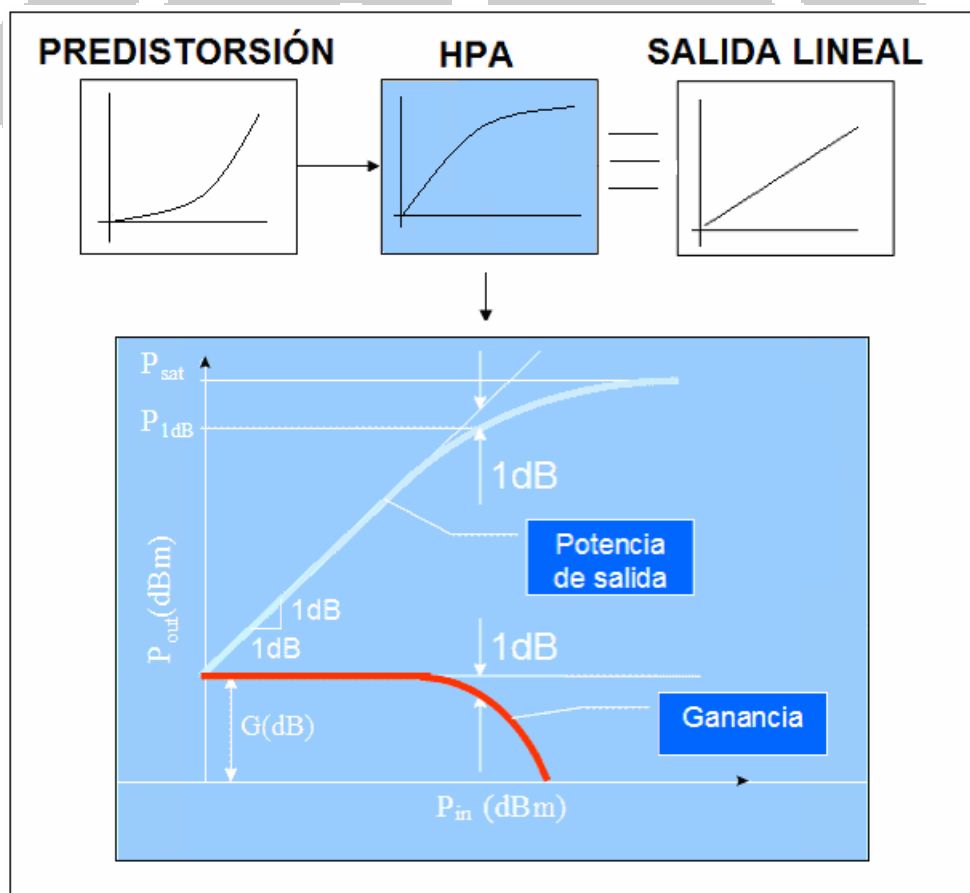
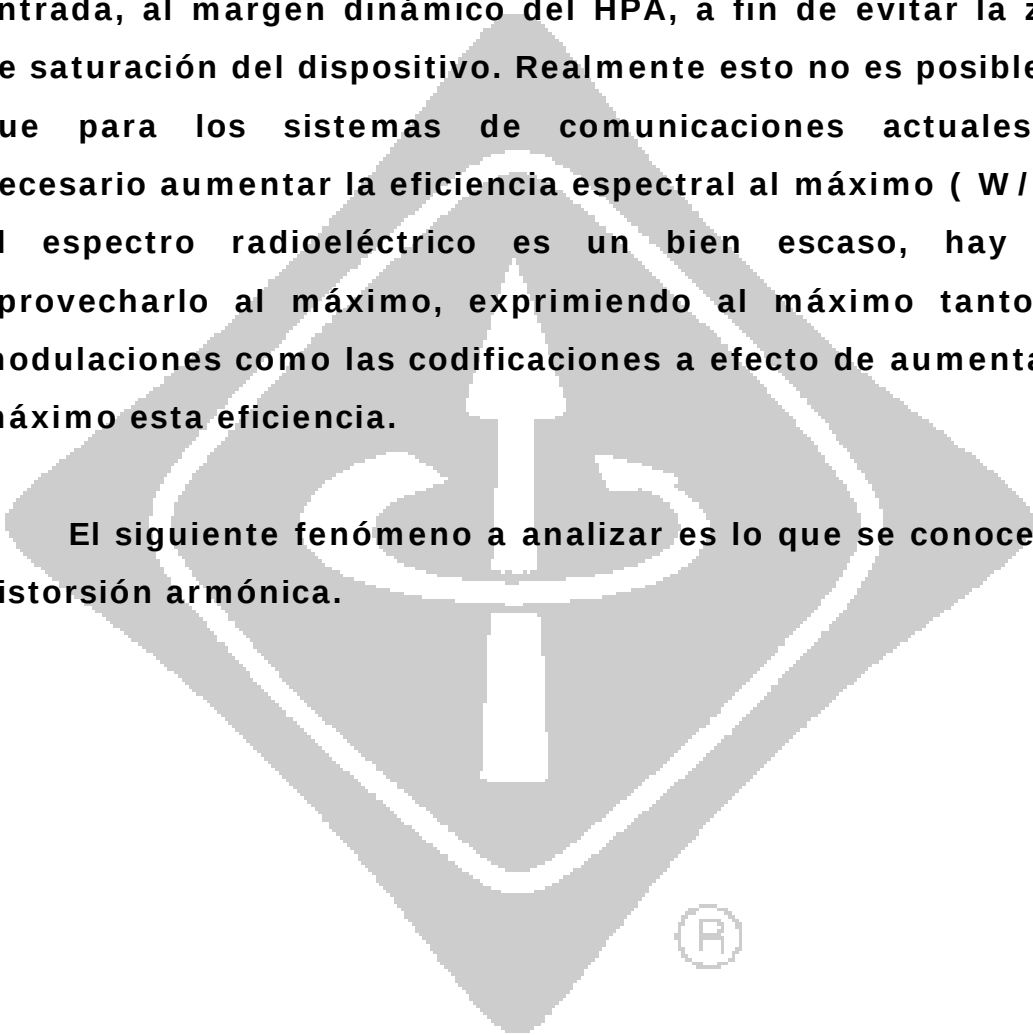


Fig.: No linealidad en la ganancia del amplificador

Como se puede observar en el diagrama anterior, el comportamiento deseado para la cascada Predistorsionador-HPA, es lineal en potencia, es decir que la ganancia sea lo más constante posible para todas las potencias de entradas de la señal. Se podría pensar en limitar los rangos de la señal de entrada, al margen dinámico del HPA, a fin de evitar la zona de saturación del dispositivo. Realmente esto no es posible, ya que para los sistemas de comunicaciones actuales es necesario aumentar la eficiencia espectral al máximo (W/Hz). El espectro radioeléctrico es un bien escaso, hay que aprovecharlo al máximo, exprimiendo al máximo tanto las modulaciones como las codificaciones a efecto de aumentar lo máximo esta eficiencia.

El siguiente fenómeno a analizar es lo que se conoce por distorsión armónica.

A large, light gray watermark of the IEEE logo is centered on the page. It features a diamond shape containing a stylized torch, with a registered trademark symbol (®) to its right. Below the diamond, the letters "IEEE" are printed in a bold, blocky font.

IEEE

2.3.- Distorsión armónica:

Los armónicos vienen dados por la saturación de la ganancia del HPA. Esta saturación provoca armónicos en múltiplos de la frecuencia de la señal de entrada. Afortunadamente se eliminan por filtrado de banda estrecha, y no tienen mayor importancia.



2.4.- Intermodulación

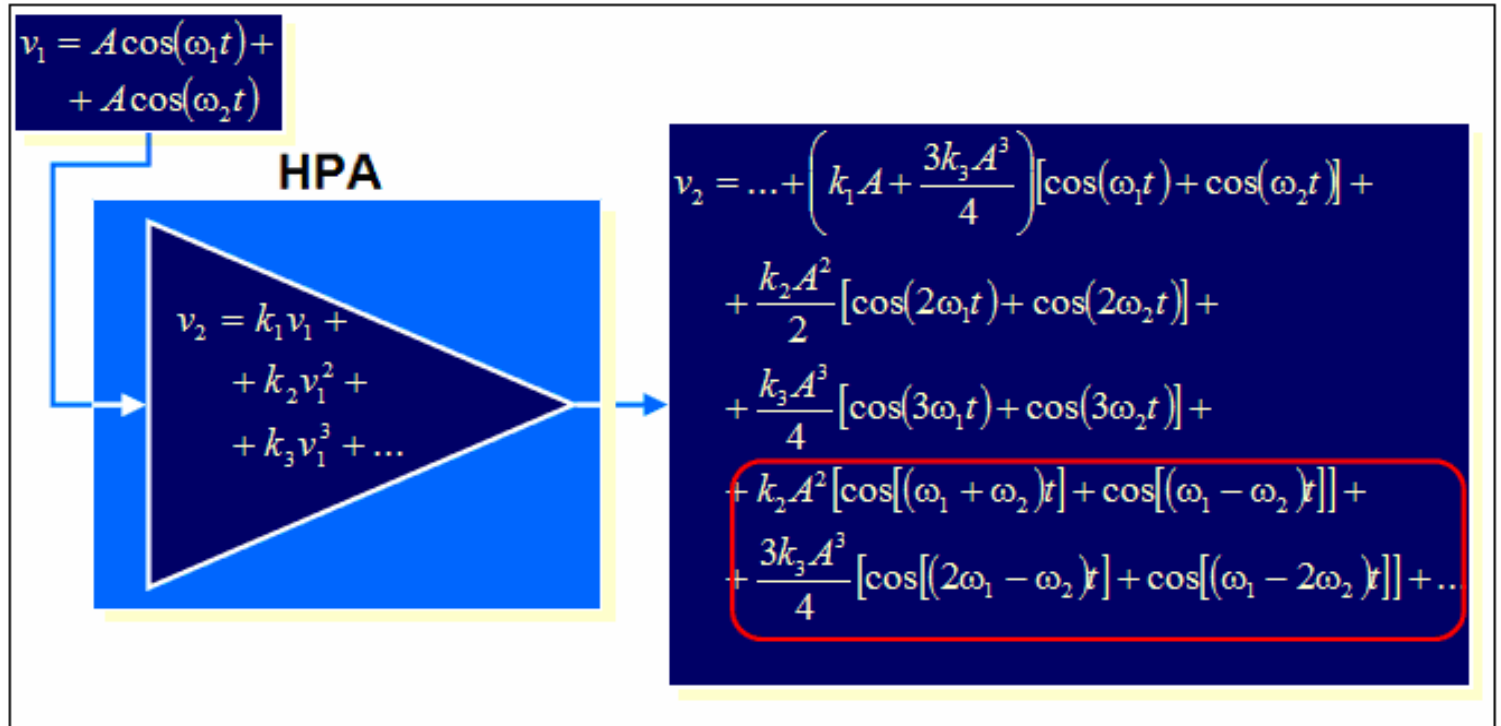


Fig.: Fenómeno de intermodulación

Como también se puede observar, la intermodulación es un fenómeno muy nocivo para las señales con las que vamos a trabajar. Como es bien sabido, al amplificador, le van a llegar combinaciones lineales de la señales de interés, por lo que es importante predecir el comportamiento del mismo. Nosotros nos centraremos en la más perniciosa de ellas, la intermodulación de 3º orden. En un análisis más exhaustivo podremos ver de lo que estamos hablando.

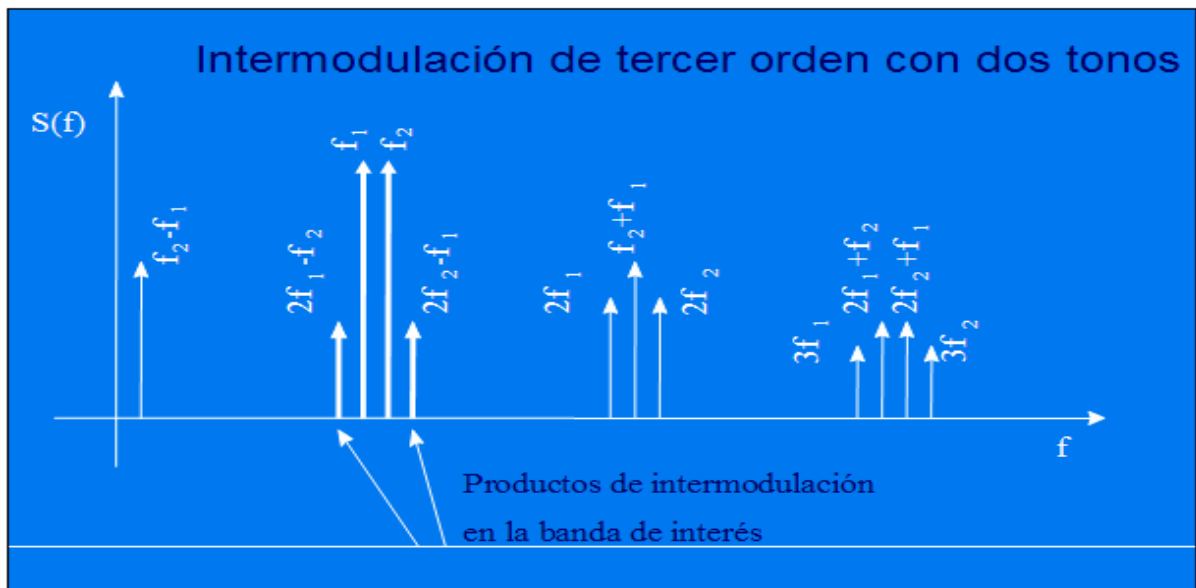


Fig.: Intermodulación de 3^{er} orden con dos tonos

Expresando las relaciones de potencia de entrada y de salida en dB's tenemos lo siguiente:

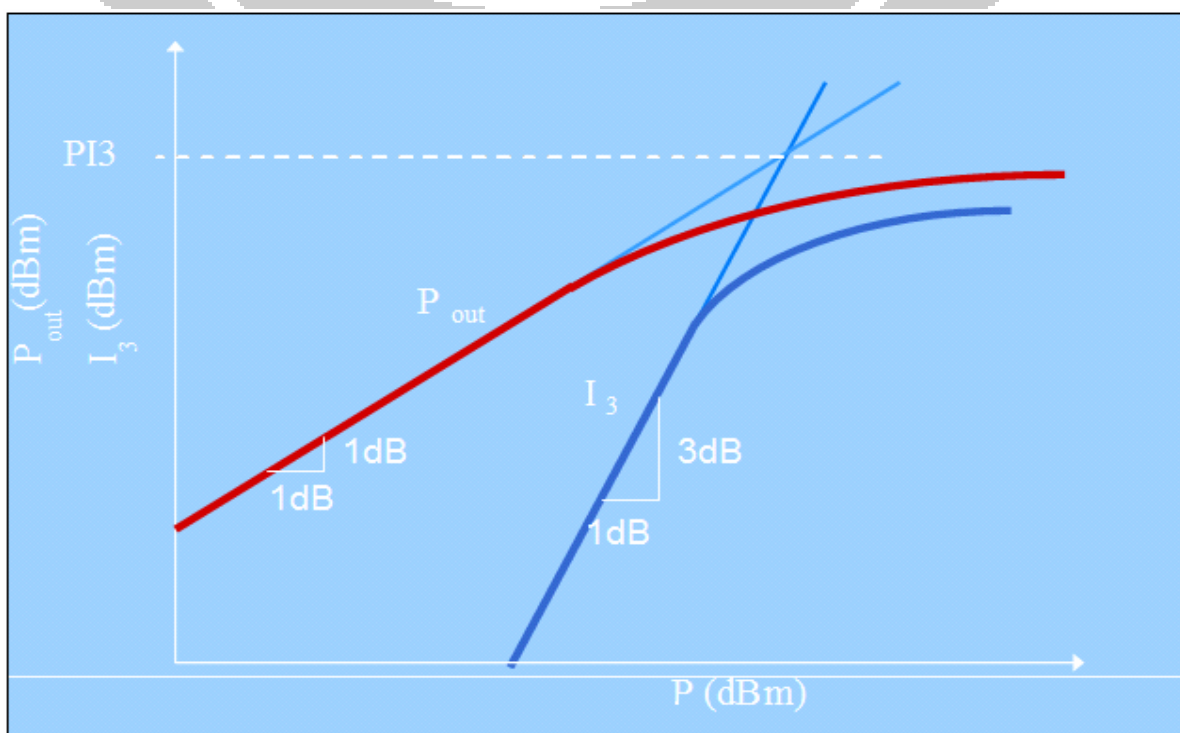


Fig.: Intermodulación de 3^{er} orden en dB's

Podemos observar como nuevamente este efecto repercute negativamente sobre nuestras señales de entrada, reduciendo aún más el margen dinámico de HPA. Resumiendo, el efecto de la saturación nos obliga a reducir el rango de potencias de nuestra señal de entrada, mientras que la intermodulación nos limita también, el rango de potencias de entrada de señal.

Aprovechamos para decir, que para este análisis no hemos tenido en cuenta el ruido interno del propio HPA, que nos reduciría aún más el rango de trabajo, de nuestro amplificador. La razón es que no podríamos mandar señales por debajo de umbral del ruido del dispositivo, ya que este no las distinguiría.

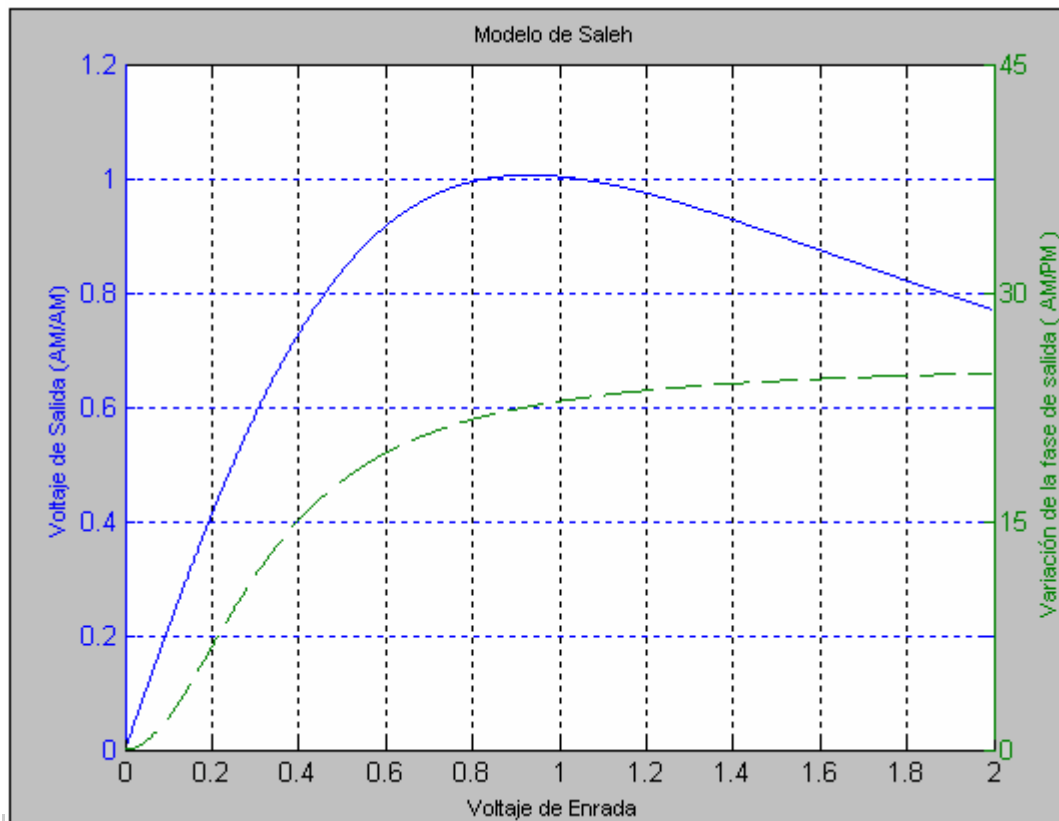
Evidentemente, para el anterior análisis hemos tenido en cuenta solo los efectos AM-AM. Es decir, los efectos sufridos por las señales a su paso por el HPA, sobre su amplitud. Entonces se podría pensar que una de las soluciones es la de utilizar modulaciones en fase. Esto no es del todo cierto, tenemos que tener en cuenta que el comportamiento en fase de este dispositivo, tampoco es lineal, es decir que también introduce una dispersión en las componentes frecuenciales de la señal de interés. Esto se traduce en un aumento considerable en el ancho de banda de la señal, razón más que importante para estudiar más detenidamente este comportamiento.

2.5.- Modelos de amplificador

Los HPA, más utilizados en comunicaciones inalámbricas modernas son los TWTA (o amplificadores de tubo de onda progresiva) o los amplificadores de semiconductor (SSPA). Estos amplificadores por su propia naturaleza introducen una distorsión en la fase de la señal, y como comentábamos antes eso se traduce en una dispersión en frecuencia y por tanto un aumento en el ancho de banda útil de la señal a transmitir. Los modelos de amplificador más utilizados en la actualidad se pueden dividir en dos grandes grupos, los modelos que si tienen en cuenta los efectos de la memoria y los modelos que no los tienen en cuenta. En el primer grupo están los modelos : Polinomio Cúbico, Tangente Hiperbólica, Modelo de Saleh, Modelo de Ghorbani y modelo de Rapp etc...Para el segundo grupo los más conocidos son: Modelo de Volterra, Modelo de Hammerstein-Wiener.

Sabemos que uno de los modelos de HPA más aceptados a nivel mundial por los expertos es el de Senior Member del IEEE Abdel A.M. Saleh, quien propuso este modelo el 12 de Noviembre de 1980. El modelo, denominado de amplitud-fase, básicamente se puede resumir en estas dos expresiones.

IEEE



$$A(r) = \alpha_a |x(t)| / (1 + \beta_a |x(t)|^2)$$

$$\phi(r) = \alpha_\phi |x(t)|^2 / (1 + \beta_\phi |x(t)|^2)$$

El amplificador de la figura de arriba corresponde a las ecuaciones: [4.0330 9.1040]

$$A[u_x] = \frac{2.1587u_x}{1 + 1.1517u_x^2}$$

$$\phi[u_x] = \frac{4.0330u_x^2}{1 + 9.1040u_x^2}$$

IEEE

Para entender estas expresiones diríamos que:

Si la señal de entrada es:

$$x(t) = |x(t)|e^{j\alpha_x} \quad (1)$$

La salida de esta al pasar por el amplificador sería

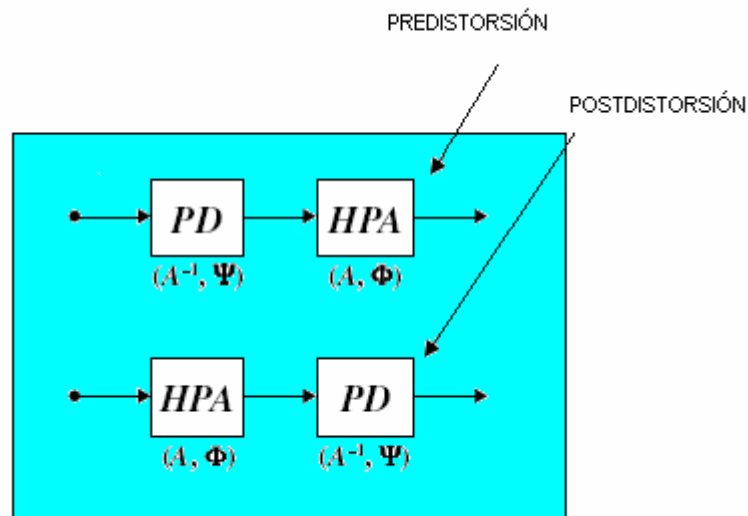
$$y(t) = A[|x(t)|]e^{j(\phi(|x(t)|)+\alpha_x)} \quad (2)$$

Por lo que como se ve se introduce un desfase no lineal en la señal e entrada tanto en fase como en amplitud.

2.6.- Predistorsión en bucle abierto

Una vez conocido el modelo, la predistorsión básicamente consistiría en invertir este modelo del HPA, y combinar ambos sistemas para conseguir una linealización de sistema. La cascada del modelo inverso puede ser tanto de predistorsión como de postdistorsión. Nos explicamos:

IEEE



Comencemos con el desarrollo matemático:

Si suponemos una señal genérica de entrada en banda base $x(t)$

Donde
$$x(t) = |x(t)|e^{j\alpha_x}$$

Con α_x la fase de $x(t)$

Entonces la salida sería

$$y(t) = A[|x(t)|]e^{j(\phi(|x(t)|) + \alpha_x)}$$

Si hacemos $|x(t)| = u_x \Rightarrow$

$$y(t) = A[u_x] e^{j(\phi(u_x) + \alpha_x)}$$

$$G[u_x] = G_{AM}[u_x] G_{PM}[u_x] =$$

$$A[u_x] / u_x (\cos(\phi[u_x]) + j \sin(\phi[u_x]))$$

Donde G_{AM} es la ganancia en amplitud y G_{PM} es la ganancia en fase

Con lo que para obtener el modelo inverso basta con realizar unas sencillas operaciones algebraicas sobre la ganancia AM-AM y AM-PM del amplificador.

$$PD(u_x) = G_{AM}^{-1} G_{PM}^{-1}$$

Donde $G_{AM}^{-1} = u_x A[u_x]^{-1}$ y $G_{PM}^{-1} = e^{-j(\phi(u_x))}$



IEEE

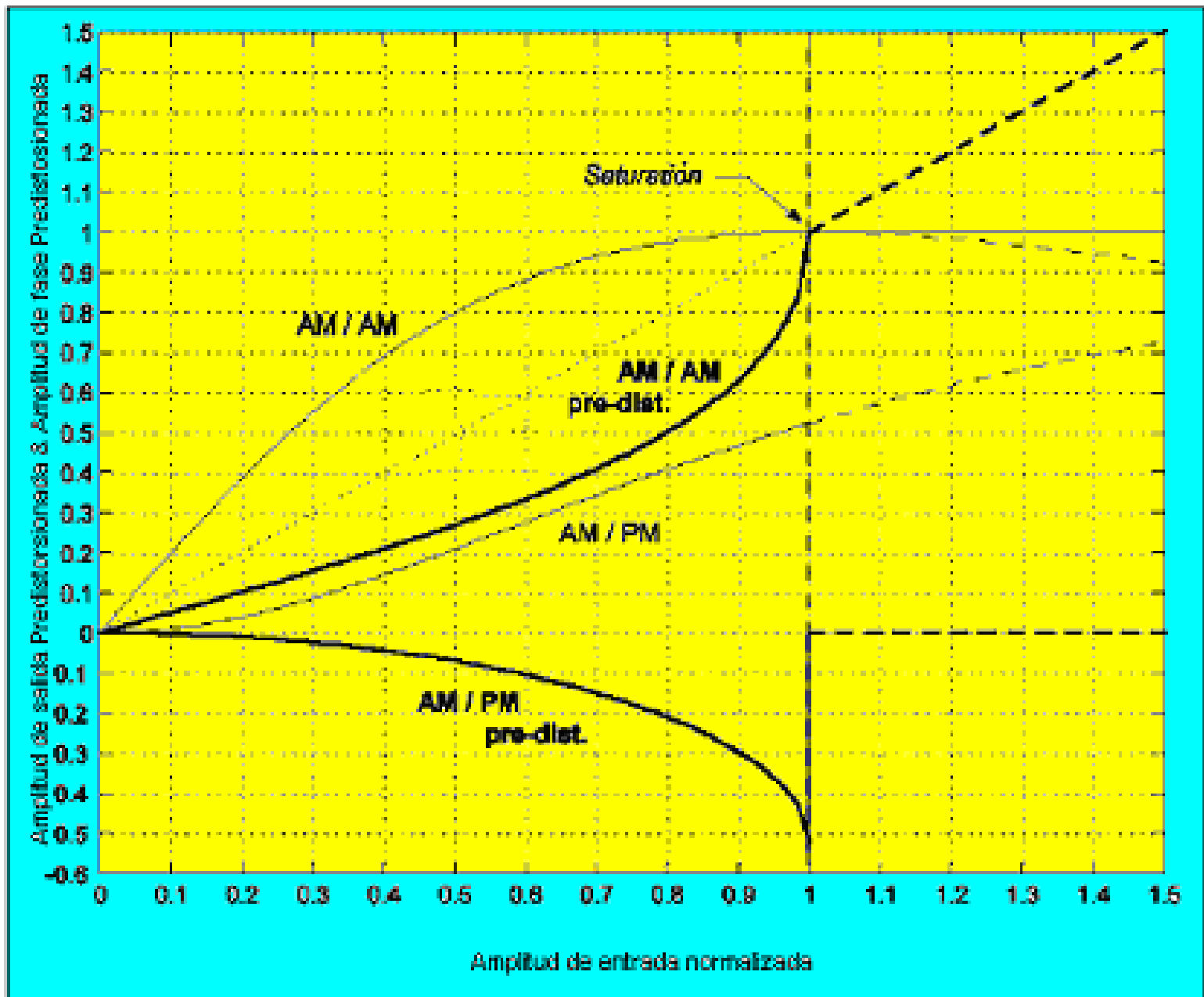


Fig. Características de transferencia AM / AM y AM / PM normalizadas del modelo de Saleh y sus respectivos inversos teóricos para pre / postdistorsión.

Como se puede observar los datos representados corresponden a amplitudes de tensión de entrada normalizados a la unidad. Esto se consigue considerando que

$\beta_a = \beta_\phi = 1$, tomando el valor de $\phi_{sat} = \pi/3$ y $\alpha_a = 2$. Así pues la expresiones de $A[u_x]$ quedaría así:

$$A[u_x] = 2u_x / 1 + u_x^2$$

$\phi[u_x] = \alpha_\phi u_x^2 / 1 + u_x^2 \Rightarrow$ para que la amplitud de la fase de salida esté normalizada a uno $\phi_{sat} = \pi/3$. ϕ_{sat} se define como la fase de saturación, es decir, el retraso máximo que sufrirían las componentes frecuenciales. Por lo que haciendo los cálculos $\alpha_\phi = 2\pi / 3$

Con lo que nos quedaría:

$$\phi[u_x] = 2\pi/3 u_x^2 / 1 + u_x^2$$

De (3) podemos deducir que $|G_{PM}[u_x]| = 1$

En la gráfica de la distorsión de AM-AM, observamos que la predistorsión tiende a ∞ cuando nos vamos acercando a la zona de saturación. Por que tenemos que garantizar que esto no ocurra. La solución es que el Predistorsionador verifique la ecuación siguiente.

$$\psi[u] = -\phi[A^{-1}[u]]$$

Donde $\psi[u]$ es la inversa de la fase del HPA.

$$G_{AM}^{-1} = \frac{1}{G_{AM} u |G^{-1}_{AM}[u]|}$$

Con lo que nos queda que el

Por tanto la función de Predistorsionador quedaría como:

$$PD[u_x] = \frac{-1}{G_{AM} u |G^{-1}_{AM}[u]|} \phi[A^{-1}[u]]$$

Resumiendo el resultado obtenido es lo que se conoce por Predistorsión en bucle abierto. Es decir, se pretende neutralizar el efecto de la distorsión del HPA, invirtiendo el modelo del mismo. Como cabe esperar, existen también otros métodos, conocidos por adaptativos. Esto significa que son sistemas dinámicos que, como su propio nombre indica, se adaptan al modelo del HPA por una realimentación en bucle cerrado.

IEEE

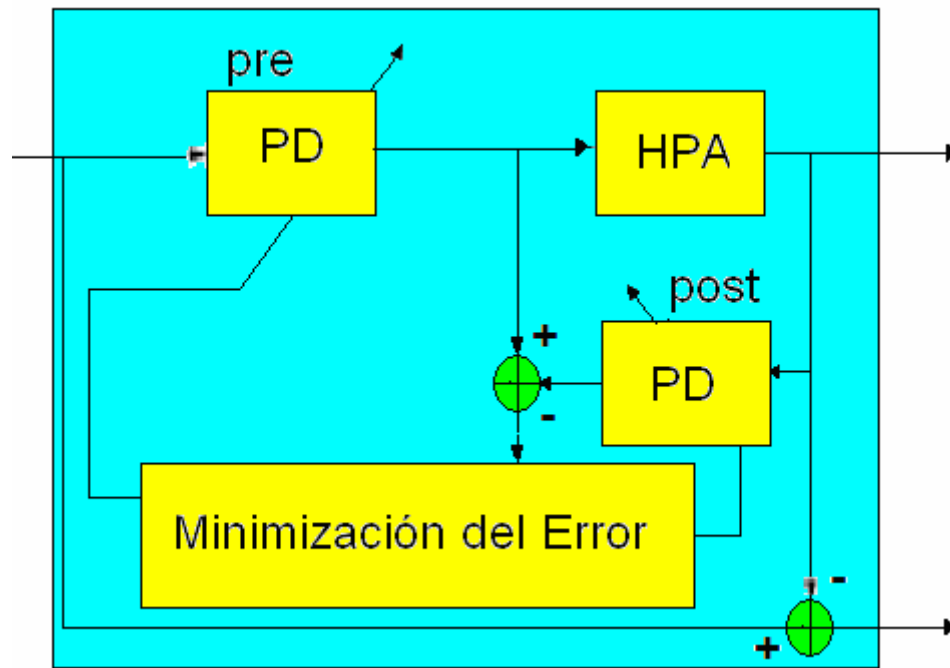


Fig. Modelo genérico de Predistorsión adaptativa

Una vez introducido este modelo de la predistorsión adaptativa, nos centraremos en explicarlo con una mayor profundidad en el siguiente capítulo.



IEEE