

CAPITULO 2

INTRODUCCION TEORICA A LOS AMPLIFICADORES DE POTENCIA

2.1. DEFINICION Y CLASIFICACION DE LOS AMPLIFICADORES DE POTENCIA

Sin duda, es en el campo de la electrónica, donde los **amplificadores** [16] adquieren mayor importancia. Son usados en casi todos los equipos electrónicos, como emisores y receptores de radio y televisión, ordenadores, equipos de comunicación, instrumentos musicales,...

Un amplificador electrónico es un dispositivo que puede incrementar la corriente, el voltaje o la potencia de una señal. Estos últimos, llamados **amplificadores de potencia (PAs)**, obviamente, amplifican a la vez tensión y corriente (amplificación de la tensión y amplificación de la corriente, por ende, amplificación de la potencia).

La relación que existe entre la entrada y la salida del amplificador (normalmente expresada en función de la frecuencia de la señal de entrada) se denomina **función de transferencia** del amplificador. Como la amplificación va a depender de la frecuencia, se suele hacer funcionar a los amplificadores en un determinado rango de frecuencias, normalmente donde la amplificación es constante o **lineal**.

Por otro lado, hay que destacar, que el componente clave de los amplificadores es el elemento activo, normalmente un transistor (BJT o MOSFET). La función del transistor es la de amplificar la corriente eléctrica, y el valor de esta amplificación va a depender del tipo de transistor y del diseño del circuito (valores de los componentes, configuración en base común, en colector común,...).

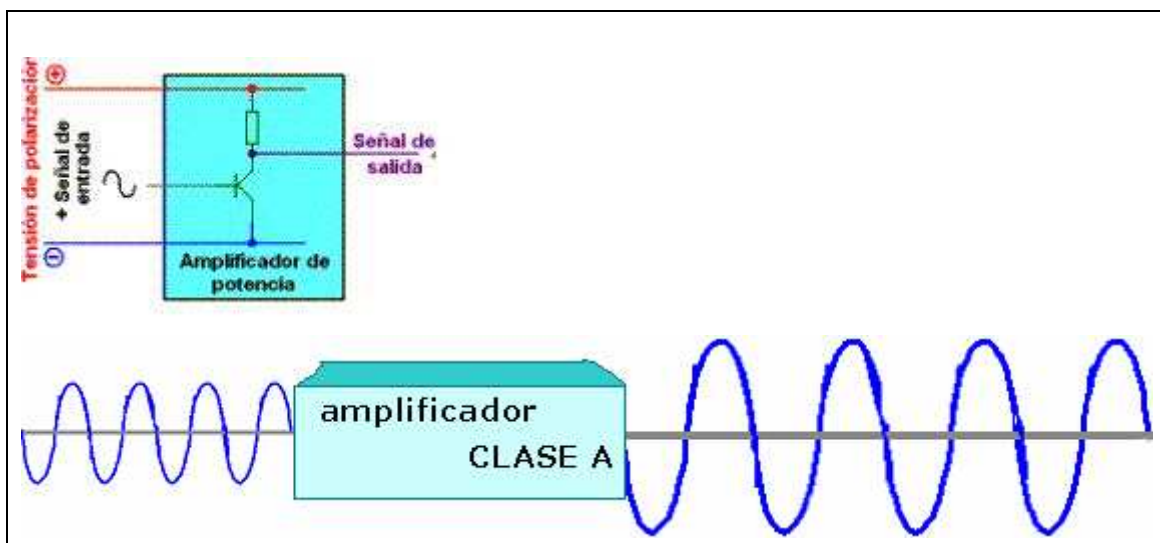
A la hora de clasificar los amplificadores existen muchos criterios. Por ejemplo, podemos clasificarlos en función de la frecuencia de la señal que amplifican [17]. En este caso tendremos:

- Amplificadores de Corriente Continua: Amplifican señales cuyas frecuencias se encuentran entre cero y algunos Hertzios.

- Amplificadores de Audiofrecuencia: Amplifican señales comprendidas entre 20 Hz y 20 KHz. Amplifican hasta algunos centenares de Vatios.
- Amplificadores de Radiofrecuencia: Amplifican señales cuyas frecuencias están comprendidas entre los 20 KHz y varios cientos de Megahertzios. Son típicos en los sistemas de radiodifusión y manejan Kilovatios.
- Amplificadores de Videofrecuencia: Llamados también amplificadores de banda ancha. Amplifican señales cuyas frecuencias esta comprendida entre los 30 Hz y los 15 MHz.
- Amplificadores de Microondas: Amplifican señales de frecuencias mayores al Gigahertzio.

También pueden clasificarse según el amplificador entregue a la salida toda la señal de entrada o una parte de la misma [18] [19]. Destacan los amplificadores:

- Clase A
- Clase B
- Clase AB
- y clase C



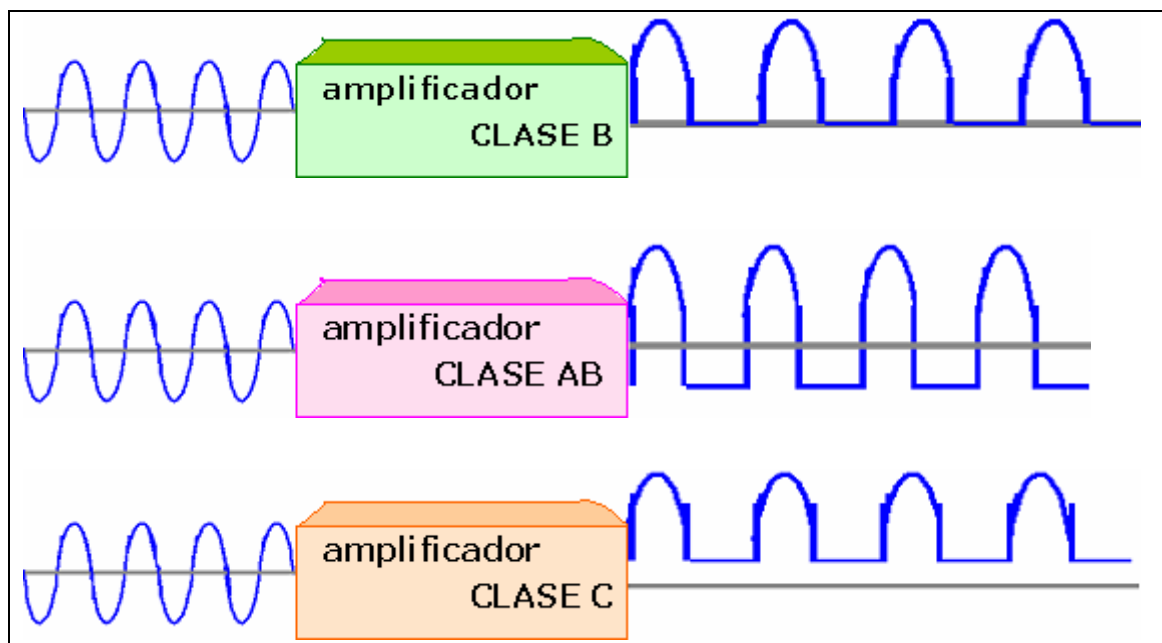


Fig.2.1. Entradas y salidas correspondientes a los diferentes tipos de amplificadores [16].

Los amplificadores lineales son los de clase A y clase B. La salida de un amplificador de clase A es una reproducción lineal de la entrada amplificada. Por su parte, un amplificador de clase B solo conduce la mitad de la entrada de la onda senoidal, lo que significa también que solo amplifica esta mitad (fig. 2.1).

Por otro lado, aunque los de clase A son lineales no son muy eficientes, lo que los convierte en ineficaces y sólo válidos como amplificadores de voltaje de señales pequeñas o como amplificadores de baja potencia. Los amplificadores de clase B y C sin embargo son más eficientes y son buenos amplificadores de potencia. C es más eficiente que B.

Los de clase AB nos proporcionan una eficiencia que en ocasiones será igual a la de B.

Se define la eficiencia de potencia de un amplificador, como la relación de la potencia de salida (o disipada) a la potencia de entrada (o de alimentación).

Resumiendo, podemos decir que va a existir un compromiso entre eficiencia y linealidad, siendo los PAs más eficientes (clase AB y C) los que presentan mayor grado de no linealidad.

2.2. DISTORSION NO LINEAL EN AMPLIFICADORES DE POTENCIA

Como ya hemos dicho, los amplificadores están generalmente preparados para trabajar en un régimen de funcionamiento lineal, el cual se caracteriza por un aumento de la potencia de salida proporcional al incremento de la potencia de entrada [20]. La diferencia en dB entre ambos niveles de potencia constituye la **ganancia** del amplificador. Sin embargo, conforme aumenta la potencia de señal a la entrada, llega un momento en que el amplificador comienza a saturarse y la potencia a la salida ya no aumenta proporcionalmente (**comportamiento no lineal**). Se dice entonces que el amplificador ha entrado en **compresión**. En la figura 2.2 se puede observar este comportamiento.

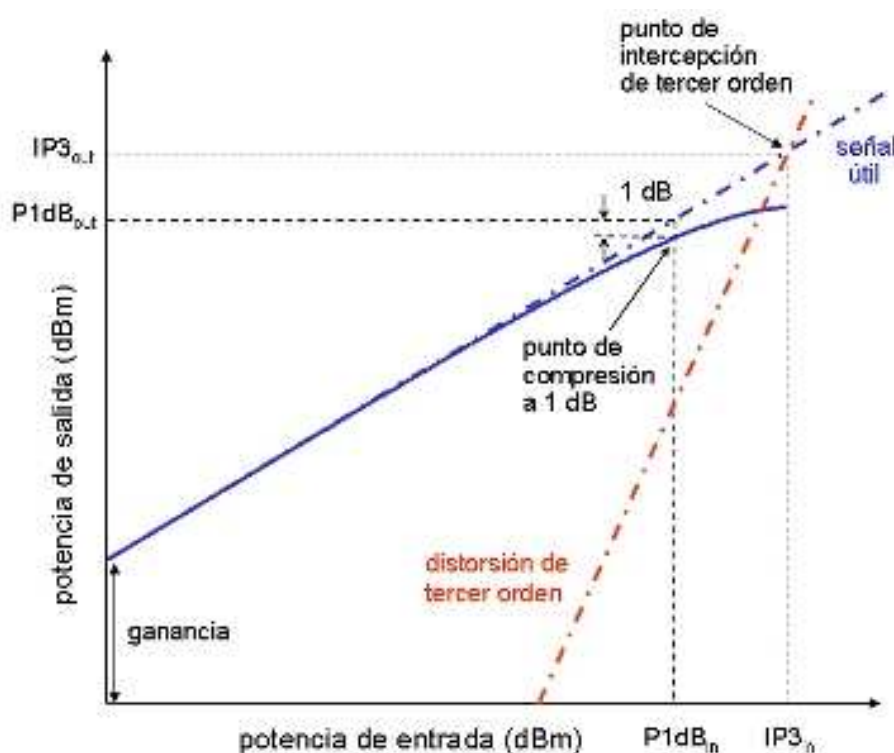


Fig.2.2. Respuesta típica de un amplificador junto con sus parámetros de distorsión asociados.

En frecuencia, que el amplificador sea no lineal, se refleja en la aparición a la salida de componentes frecuenciales no existentes en la entrada (**armónicos**) que pueden estar muy próximas a la banda de trabajo.

En el sentido más general existe distorsión cuando la señal que sale de un equipo no es la misma que la que entró, y se llama **distorsión no lineal** (armónica y de intermodulación) a la distorsión que se produce por la aparición de estos armónicos de la señal original.

La **distorsión de intermodulación** es el resultado de la interacción entre dos o más señales en el interior de un dispositivo no lineal, produciendo a su salida otras señales no deseadas. Estas señales adicionales que aparecen a la salida del dispositivo se conocen con el nombre de productos de intermodulación. Considerando que a la entrada del dispositivo no lineal tenemos dos tonos de radiofrecuencia f_1 y f_2 , a su salida se producirán productos de intermodulación a frecuencias suma y diferencia de múltiplos de las frecuencias originales, es decir:

$$f_{\text{salida}} = mf_1 \pm nf_2$$

donde m y n son números enteros mayores o iguales que la unidad. El **orden** de la distorsión no lineal queda determinado por la suma de m y n .

En los casos particulares de $m = 0$ ó $n = 0$, a la salida del dispositivo se obtienen armónicos a frecuencias múltiplos de las frecuencias de entrada:

$$f_{\text{salida}} = mf_1, \quad f_{\text{salida}} = nf_2$$

Este tipo de distorsión se conoce con el nombre de **distorsión armónica** y necesita tan sólo una señal para generarse.

Tanto las distorsiones de segundo orden como la armónica caen bastante alejadas de la banda de interés donde se encuentran las señales deseadas y, por lo tanto, generalmente no suelen causar problemas. En cambio, los productos de intermodulación de tercer orden del tipo $2f_1 - f_2$ y $2f_2 - f_1$ son los más perjudiciales, ya que se generan muy cerca de las señales de interés y son difíciles de filtrar. En cuanto al resto, conforme aumenta el orden de la distorsión, el nivel de los productos de intermodulación a la salida del dispositivo disminuye, pierden importancia.

Volviendo a la figura 2.2, dependiendo del tipo de amplificador con el que estemos trabajando, la **saturación o comportamiento no lineal** surgirá para potencias más bajas o más altas. Para caracterizar las prestaciones de un amplificador en este sentido se utiliza un parámetro conocido como **punto de compresión a 1dB** (P1dB). El P1dB se define como aquel punto en que la potencia a la salida del amplificador se encuentra 1dB por debajo del comportamiento lineal (el ideal), y puede referirse tanto a la entrada como a la salida del dispositivo.

La **saturación** del amplificador implica que nos encontramos en una zona de trabajo donde la **distorsión no lineal** presenta valores importantes.

Normalmente suele representarse en el mismo gráfico de potencia de salida frente a potencia de entrada el **nivel de la distorsión**, y más concretamente, el nivel de los **productos de intermodulación** de tercer orden $2f_1 - f_2$ ó $2f_2 - f_1$ que se ha visto que son los más perjudiciales. Estos productos de intermodulación presentarán una pendiente de orden 3 tal y como se representan en la figura 2.2. Para caracterizar la **distorsión no lineal** de un amplificador suele emplearse un parámetro conocido como **punto de intercepción de tercer orden (IP3)** y que se define como el punto donde se intersectan las rectas teóricas de potencia de señal útil y de potencia de intermodulación. Al igual que antes, este parámetro puede referirse tanto a la entrada como a la salida del dispositivo. Evidentemente, cuanto más elevado sea el valor de IP3 más lineal será nuestro dispositivo.

También hay que tener en cuenta que las modulaciones digitales van a generar otro tipo de distorsión, distorsión conocida como **recrecimiento espectral**. Este tipo de distorsión se manifiesta como un aumento del espectro de la señal digital a ambos lados de la misma y que, por lo tanto, afecta a los canales vecinos. La figura 2.3 muestra el aspecto que presenta la distorsión.

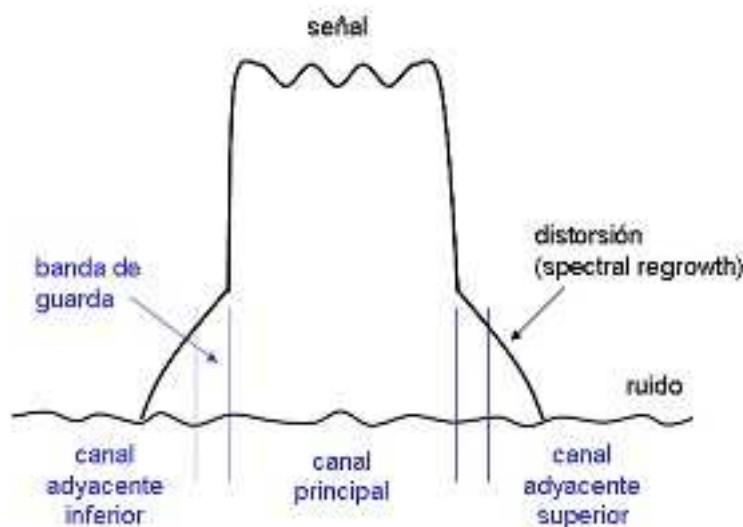


Fig. 2.3. Espectro de distorsión en modulaciones digitales

La medida que suele realizarse para caracterizar este tipo de distorsión se conoce con el nombre de **relación de potencia en canal adyacente (ACPR)**, y es el cociente entre los niveles de potencia en el canal principal y en cualquiera de los canales adyacentes.

En conclusión podemos decir que los efectos de las no linealidades en los PAs son dobles [21]: por un lado causan crecimiento 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.

2.3. EFECTOS DE MEMORIA EN AMPLIFICADORES

Como puede entenderse del punto anterior, el estudio y la comprensión del comportamiento no lineal de los PAs, ha cobrado una gran relevancia en los últimos tiempos a raíz del importante desarrollo que han experimentado los sistemas de radiocomunicaciones.

La distorsión sobre la señal en los PAs se puede evitar mediante la técnica de back-off [22], que consiste en utilizar el amplificador por debajo de su punto de compresión a 1dB. Pero con esta técnica se reduce drásticamente la eficiencia, no sólo del PA, sino de un transmisor completo, ya que el PA consume la mayor parte de la potencia de alimentación del mismo. Además [23], los actuales estándares de comunicaciones (IEEE 802.11g, IEEE 802.16, ETSI HiperLAN-2, UMTS) apuestan por usar modulaciones multinivel, multiportadora o ambas (M-QAM, $\pi/4$ DQPSK, WCDMA, OFDM), muy sensibles a las no linealidades de los PAs, y que requerirían por tanto altos niveles de back-off para poder operar en una región lineal, penalizando de este modo demasiado la eficiencia.

En consecuencia, el objetivo marcado será minimizar los efectos de la no linealidad a la par que maximizar la eficiencia de los PAs. De entre las diferentes técnicas de linealización propuestas con este fin podríamos destacar la **predistorsión** y la realimentación cartesiana [24]. Pero hay que decir que estas técnicas son técnicas de linealización a nivel de sistemas y requieren desarrollos complejos, lo que ha hecho que muchos de los trabajos recientes se hayan centrado en desarrollar topologías para obtener linealidad a nivel de dispositivo. Además, es muy importante otra cosa, y es que la presencia de los llamados **efectos de memoria** en las no linealidades, hacen que estos métodos sean ineficaces. **Para aplicaciones con gran ancho de banda como las mencionadas anteriormente (M-QAM, $\pi/4$ DQPSK, WCDMA, OFDM), no es posible ignorar estos efectos de memoria [23].**

Los efectos de memoria se definen como los cambios en la magnitud y la fase de las componentes de distorsión al variar la frecuencia de modulación, y pueden originarse por causas eléctricas y térmicas [25]. Los efectos de memoria térmicos afectan a frecuencias de modulación bajas, mientras que los efectos de memoria puramente eléctricos quedan determinados por las variaciones de las impedancias de carga y/o fuente a la frecuencia de la envolvente. Se puede emplear una señal de prueba de dos tonos con separación variable para la caracterización experimental de los efectos de memoria, siendo recomendable medir tanto la magnitud como la fase [26] de los productos de intermodulación. Partiendo de una prueba de dos tonos es

posible predecir el comportamiento de las componentes de distorsión para modulaciones más complejas que presenten un elevado ancho de banda, como las que se emplean en las señales de comunicaciones actuales.

En el tiempo, los efectos de memoria se traducen en que la salida en un determinado instante no solo depende de la entrada en dicho instante sino también de la entrada en instantes anteriores, de periodos largos o de periodos cortos de la señal de entrada.

A fin de cuentas, lo que estos efectos de memoria van a provocar será **distorsión de intermodulación dependiente del ancho de banda** [27]. Y además, también debido a los efectos de memoria, los niveles de la distorsión de intermodulación resultarán diferentes cuando se mida en los productos de intermodulación o canales adyacentes superiores e inferiores, fenómeno que se conoce como **asimetría** de los niveles de intermodulación.

Por último, podemos decir que lógicamente, todo lo anterior ha impulsado el interés y el estudio de los efectos de memoria en amplificadores dentro del estudio de la no linealidad.

2.4. MODELOS DE COMPORTAMIENTO

Entre las tendencias de modelado actuales ocupan un lugar muy destacado las técnicas de modelado basadas en el comportamiento, serán los **modelos de comportamiento o behavioral models**.

Un modelo de comportamiento [28] será un modelo simplificado que sustituirá al modelo equivalente del circuito. Estos modelos se obtienen sin un conocimiento a priori de la estructura interna del dispositivo, al relacionar formas de onda usadas como excitación con las adquiridas a la salida.

La principal limitación que ofrece este enfoque es que la precisión del modelo resultante depende fuertemente de la calidad del método de medida utilizado, lo que justifica la necesidad de disponer de instrumentación y métodos óptimos.

Existen una serie de modelos de comportamiento para los PAs, como el AM-AM y el AM-PM, que llamamos modelos clásicos [29]. Estos modelos caracterizan la respuesta del PA ante una excitación de un solo tono. Se trata pues de modelos sencillos que pueden servir para simular la amplificación en **banda estrecha** en torno a la frecuencia de trabajo y para un punto de polarización dado. Pero las señales complejas que manejan los actuales sistemas van a precisar un modelado más elaborado.

Los métodos de modelado clásicos no tienen la capacidad de pronosticar la dependencia de la distorsión con el ancho de banda [27], y los diseñadores de circuitos deben tener en cuenta estos efectos a la hora de diseñar amplificadores de alta eficiencia y que cumplan las exigencias de los sistemas de comunicación modernos sobre anchos de banda cada vez más amplios. Necesitaremos por tanto, como decíamos antes, modelos mas elaborados, modelos que en definitiva, permitan la predicción de los efectos de memoria.

Algunos de los modelos propuestos para caracterizar las no linealidades y los efectos de memoria se basan en la caracterización del PA mediante series de Volterra, polinomios con memoria, modelos de Wiener-Hammerstein, redes neuronales,... En nuestro proyecto nos centraremos en las series de Volterra.

2.5. SERIES DE VOLTERRA

El matemático español Vito Volterra introdujo lo que hoy en día conocemos como series de Volterra en su "*Theory of Functionals*" [Vol. 59]. La primera aplicación de este trabajo al análisis de circuitos no lineales la debemos sin embargo a otro matemático; Norbert Wiener. Desde entonces, las series de Volterra se consideran un buen camino para el cálculo de los pequeños, pero sin embargo molestos, términos de distorsión en PAs y otros sistemas [30].

Un sistema lineal, causal y con memoria puede ser descrito mediante una convolución:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\sigma)x(t - \sigma)d\sigma \quad (1)$$

donde $x(t)$ es la entrada, $y(t)$ la salida y $h(t)$ la respuesta al impulso del sistema.

Un sistema no lineal sin memoria puede describirse mediante series de Taylor:

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n [x(t)]^n \quad (2)$$

donde otra vez $x(t)$ es la entrada e $y(t)$ la salida. Los a_n son los coeficientes de la serie de Taylor.

Las series de Volterra combinan ambas representaciones para describir sistemas no lineales con memoria:

$$\begin{aligned} y(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \int_{-\infty}^{\infty} du_1 \dots \int_{-\infty}^{\infty} du_n h_n(u_1, \dots, u_n) \prod_{r=1}^n x(t - u_r) \\ &= \frac{1}{1!} \int_{-\infty}^{\infty} du_1 h_1(u_1) x(t - u_1) \\ &\quad + \frac{1}{2!} \int_{-\infty}^{\infty} du_1 \int_{-\infty}^{\infty} du_2 h_2(u_1, u_2) x(t - u_1) x(t - u_2) \\ &\quad + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Aquí, $x(t)$ es la entrada, $y(t)$ es la salida, y $h_n(u_1, \dots, u_n)$ son lo que llamamos **kernels** de Volterra. Los u_i son variables en el tiempo (las llamamos u_i en vez de t_i para distinguirlas mejor de t). $h_1(u_1)$ será la respuesta al impulso equivalente a $h(t)$ de la convolución, y las h_n para $n > 1$ serán respuestas al impulso de un orden mayor que servirán para caracterizar el orden de la no linealidad. El término $\frac{1}{n!}$ no es incluido por todos los autores, pero incluirlo puede simplificar muchos cálculos.

En definitiva, podemos decir que la serie de Volterra es una suma infinita de integrales de convolución, y cada elemento de esta serie recibe el nombre de operador n-ésimo de Volterra y modela la respuesta de orden n del sistema. El primer término de la serie coincide con la integral de convolución simple y caracteriza la componente lineal del sistema no lineal [31]. Además, hemos dicho que las series de Volterra resultan conceptualmente apropiadas para describir un sistema no lineal y esto es así porque:

- La potencia de orden n en el interior del operador n-ésimo da lugar a una convolución del mismo orden del espectro de la señal de entrada consigo misma, causando los denominados productos de intermodulación.
- Las integrales de convolución propiamente, modelan la inercia del sistema físico, y reproducen la memoria del mismo.

A pesar de la pertinencia física de las series de Volterra, en la práctica, la utilidad de esta metodología está limitada a sistemas con comportamiento no lineal débil. Esto es debido a la imposibilidad de extraer el gran número de kernels de Volterra necesarios para reproducir el comportamiento de regímenes fuertemente no lineales y/o efectos de memoria a largo plazo.

Para concluir, solo aclarar que en este proyecto se trabajará en el dominio discreto y por tanto (3) se expresará así:

$$y(n) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \sum_{-\infty}^{\infty} \dots \sum_{-\infty}^{\infty} h_n(u_1, \dots, u_n) \prod_{r=1}^n x(n - u_r) \quad (3)$$