

CAPÍTULO 2

Fundamentos teóricos. Conceptos.

1. Introducción.

Debido a la presencia de dispositivos no lineales como es el caso de amplificadores de potencia (PA) e instrumentos ópticos, las señales de comunicación son dañadas por distorsiones no lineales. En estos casos, los modelos no lineales se usan para proveer una representación correcta de la señal, permitiendo el desarrollo de técnicas eficientes de procesamiento de señales capaz de eliminar o reducir estas distorsiones no lineales. En este contexto, la elección de modelo del sistema no lineal juega un papel fundamental. Los modelos de Volterra han sido utilizados durante mucho tiempo para representar sistemas de comunicaciones con presencia de distorsión no lineal, con aplicaciones para el modelado de conexiones en comunicaciones por satélite, sistemas OFDM (multiplexión por división de frecuencia ortogonal) y canales de radio sobre fibra (ROF).

Los amplificadores de potencia son, en la mayoría de los transmisores de radiocomunicaciones, el último proceso por el cual tienen que pasar antes de que las antenas radien las señales de radiofrecuencia o microondas. Estos tienen varias zonas de trabajo, pero el uso de los amplificadores de potencia cerca de su zona de saturación resulta efectos no lineales en estos dispositivos que afectan al rendimiento del sistema. Sin embargo, trabajar en esa zona aumenta el rendimiento y la eficiencia de la comunicación en la zona no lineal. Es por ello, por lo que el estudio de los problemas de la distorsión de los amplificadores de potencia cada vez sea más necesario y se siga mejorando. Es este efecto, la distorsión, el que limita a los transmisores de RF en el que la mayoría de los casos se puede reducir pero a cambio de disipación de la potencia incrementada.

Podemos definir como perturbación al conjunto de acciones externas que provocan que la señal recibida no sea exactamente igual a la señal transmitida por la fuente. Estas perturbaciones pueden ser: distorsión, diafonía, interferencia y ruido. La distorsión se produce en presencia de señal, es decir, cuando el sistema está perturbado. Mientras que en el caso de la diafonía y el ruido aparecen incluso en ausencia de señal. Una diferencia a tener en cuenta es que el ruido tiene carácter aleatorio, tanto en su aparición como en sus características. En cambio, los otros tipos de perturbaciones tendrán, normalmente, características semejantes a las señales transmitidas por la fuente del sistema de transmisión en cuestión u otro análogo.

2. Amplificadores de potencia.

Los amplificadores forman parte de casi todos los equipos electrónicos, como emisores y receptores de radio y televisión, ordenadores, equipos de comunicación, etc. Es un dispositivo que puede incrementar la corriente, la tensión o la potencia de una señal. Estos últimos son a los que se dedica especial interés en este documento, los amplificadores de potencia (PAs).

Existe una relación entre la señal de entrada y salida del amplificador a la que llamamos *función de transferencia* del mismo. Como la amplificación va a depender de la frecuencia, se suele hacer funcionar a éstos en un determinado rango de frecuencias, normalmente donde la amplificación es constante o lineal. Pero como se expuso anteriormente, va a ser la zona de saturación donde sea más interesante trabajar, donde el resultado no será lineal.

Es de necesaria mención, que el elemento activo que es clave en los amplificadores normalmente es un transistor (BJT o MOSFET). La función que desempeña el transistor es la de amplificar la corriente eléctrica, y el valor de esta amplificación dependerá del tipo de transistor y del diseño del circuito (valores de los componentes, configuración en base común, en colector común,...).

Los amplificadores podemos clasificarlos según varios criterios ya sea en función de la frecuencia que amplifican (amplificadores corriente continua, de audiofrecuencia, de radiofrecuencia, de videofrecuencia y de microondas) o, también, según si el amplificador entrega a la salida toda la señal de entrada o parte de ella (clase A, B, AB o C).

Si se define la eficiencia de la potencia de un amplificador, como la relación de la potencia de salida a la potencia de entrada, se puede comprobar que los PAs más eficientes (clase AB y C) son los que presentan mayor grado de no linealidad. Es por ello, por lo que cobra suma importancia el estudio y tratamiento de este efecto, que será el objetivo principal de este documento.

3. *Distorsión.*

Se entiende por distorsión la diferencia entre la señal que entra a un equipo o sistema y la señal que sale del mismo. Por tanto, puede definirse como la "deformación" que sufre una señal tras su paso por un sistema. Existen dos tipos de este fenómeno: distorsión lineal y no lineal.

3.1. *Distorsión lineal.*

La distorsión lineal es aquella que no modifica las componentes espectrales de la señal sobre la que se aplica, esto es, la banda ocupada por la señal es la misma con y sin distorsión.

Sea $H(f)$ la función de transferencia extremo a extremo del sistema de transmisión. En general,

$$H(f) = |H(f)|e^{j\angle H(f)} \tag{2.1}$$

Según esto, puedo haber varios tipos de distorsión lineal:

- De amplitud: la función de transferencia debe tener módulo constante para que no afecta al módulo de la señal de entrada produciendo distorsión, es decir, $|H(f)| = K$.
- De fase: lo ideal será que la fase sea cero o, en el peor de los caso, es que sea lineal. Si es lineal se traduce a un retraso puro de la señal, que a veces se le denomina *distorsión de retardo*.

3.2. Distorsión no lineal.

La distorsión no lineal es aquella que genera componentes de frecuencias nuevas que no formaban parte de la señal original que se transmitió.

Como vimos anteriormente, el motivo de la existencia de este tipo de distorsión se debe al uso de dispositivos trabajando en la zona no lineal. Las técnicas de caracterización de la distorsión de estos dispositivos (como el modelo de pequeña señal) son incapaces o insuficientes para la linealización de su función característica.

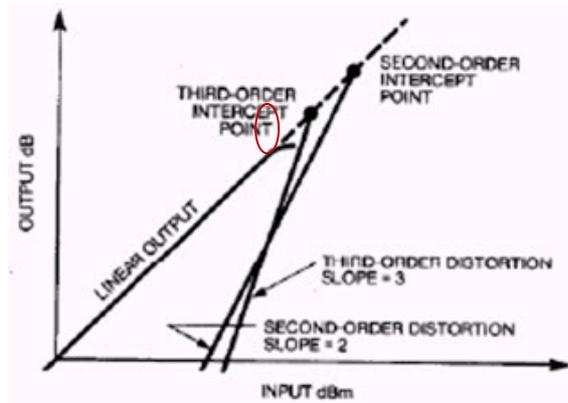


Figura nº1. Relación entrada-salida en un amplificador de potencia.

En esta figura puede observarse la función característica de un dispositivo así como el punto de compresión de 1dB y la influencia de los armónicos.

La tensión a la entrada puede descomponerse en un término constante y otro variable:

$$V_i(t) = V_I + v_i(t) \quad (2.2)$$

De este modo, la señal de salida se representará de la siguiente forma:

$$V_o(t) = V_O + v_o(t) = F(V_i(t)) \quad (2.3)$$

Como el modelo de pequeña señal no posibilita el estudio de las no linealidades de los dispositivos. La única manera de analizar la distorsión es tratando la función de transferencia directamente, sin simplificaciones de ningún tipo.

Por lo que, la salida del amplificador desarrollando en serie de Taylor alrededor de la constante V_I , es:

$$V_o(t) = V_o + v_o(t) = F(V_i(t)) = a_o + a_1 v_i(t) + a_2 v_i^2(t) + a_3 v_i^3(t) + \dots \quad (2.4)$$

$$V_o = a_o \quad (2.5)$$

$$v_o(t) = a_1 v_i(t) + a_2 v_i^2(t) + a_3 v_i^3(t) + \dots \quad (2.6)$$

donde a_o es el valor de continua de la salida del amplificador cuando $v_i(t)$ es nula. Si se supone que la entrada es un todo puro, una señal sinusoidal más un offset de continua como se indica a continuación:

$$V_i(t) = V_I + A_i \cos(\omega t) \quad (2.7)$$

Sustituyendo en (2.6) y desarrollando mediante relaciones trigonométricas llegamos a que:

$$v_o(t) = b_o + b_1 \cos(\omega t) + b_2 \cos(2\omega t) + b_3 \cos(3\omega t) + \dots \quad (2.8)$$

donde los coeficientes b_i $i = 0, 1, 2, \dots, n$ están relacionados con los a_i del siguiente modo:

$$b_0 = \frac{a_2}{2} V_A^2 + \dots \quad (2.9)$$

Aquí se puede comprobar claramente como la existencia de una señal variable puede alterar el nivel de continua a la salida, ya que el coeficiente depende de la amplitud de la senoide de entrada.

$$b_1 = a_1 V_A + \frac{3}{4} a_3 V_A^3 + \dots \quad (2.10)$$

Este coeficiente nos da la amplitud de la salida del armónico fundamental, es decir, el que nos informa sobre la ganancia. Se observa que no será la ganancia ideal (a_1) ya que también le afectan coeficientes de otros órdenes.

$$b_2 = \frac{a_2}{2} V_A^2 + \dots \quad (2.11)$$

$$b_3 = \frac{1}{4} a_3 V_A^3 + \dots \quad (2.12)$$

Con estos dos coeficientes podremos calcular algunos parámetros que nos serán útiles para la estimación de la distorsión. Interesan que sean los más bajos posibles, como el caso del *punto de comprensión de 1dB*.

En frecuencia, que el amplificador sea no lineal, se refleja en la aparición a la salida de componentes frecuencias no existentes a la entrada (armónicos), que se caracterizan por los coeficientes anteriores b_2 y b_3 , que pueden estar muy próximos a la banda de frecuencia en la que se trabaje. Es la presencia de estos armónicos en la señal original lo que provoca la distorsión no lineal.

A este tipo de distorsión se le denomina distorsión armónica y se produce a frecuencias múltiplos de la frecuencia de la señal deseada.

Existe otro tipo de distorsión que, sin embargo, se produce cuando a la entrada se introducen dos tonos con distintas frecuencias, es 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.

4. Modulación OFDM

4.1. *Definición*

La modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), es un tipo de modulación multiportadora que surgió con el propósito de conseguir altos regímenes binarios y para resolver los problemas relacionados con la transmisión multitrayecto y, por tanto, los desvanecimientos selectivos. Este tipo de modulación, la multiportadora, consiste en enviar la información, bien sea modulada en QAM o en PSK, en un conjunto de portadoras de diferente frecuencia, por ello, la transmisión de datos se realiza de forma paralela. En este contexto se suelen denominar como subportadoras o simplemente como portadoras. Cada subportadora se modula con un símbolo diferente.

En multitud de ocasiones se realiza la modulación OFDM tras pasar la señal por un codificador de canal con el objetivo de corregir los errores producidos en la transmisión, entonces esta modulación se denomina COFDM, del inglés Coded OFDM.

Se podría pensar que la implementación de la modulación OFDM es inviable, debido al problema técnico que supone la generación y la detección en tiempo continuo de los cientos, o incluso miles, de portadoras equiespaciadas que forman una modulación OFDM. Esto supondría entre otras cosas, una cadena transmisora y receptora, así como de un oscilador independiente por cada portadora, con los problemas de sintonización y sincronización que ello conllevaría.

Afortunadamente, solo se requiere una cadena en cada sentido de transmisión, que modula o demodula todas las portadoras a la vez. De hecho, una señal OFDM es la transformada inversa de Fourier de los coeficientes mapeados en las portadoras, y en consecuencia, los coeficientes son la transformada directa de la señal OFDM. Es por esto, por lo que en los procesos de modulación y

demodulación, se aprovecha esta peculiaridad característica de OFDM, y se llevan a cabo en tiempo discreto mediante los algoritmos IFFT y la FFT respectivamente. Con ello se soluciona el problema anterior, ya que solo se requiere de una cadena de transmisión para modular y demodular todas las portadoras. Para evitar el efecto indeseado de ISI (interferencia entre símbolo), es necesario un “intervalo de guarda” entre la emisión de dos símbolos consecutivos. Este intervalo no se deja vacío sino que en él se transmite una copia de las últimas muestras del símbolo, denominadas “prefijo cíclico”, que facilita la continuidad de la transmisión y la equalización en frecuencia en recepción.

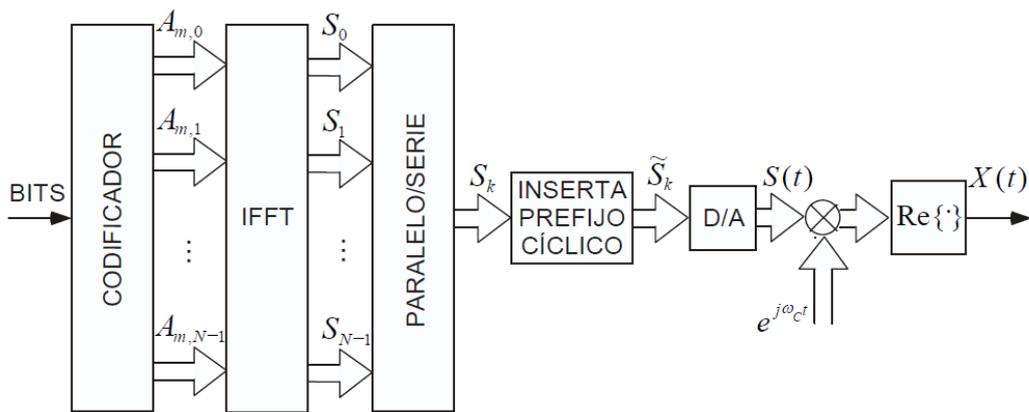


Figura nº 2. Transmisor de señal modulada OFDM.

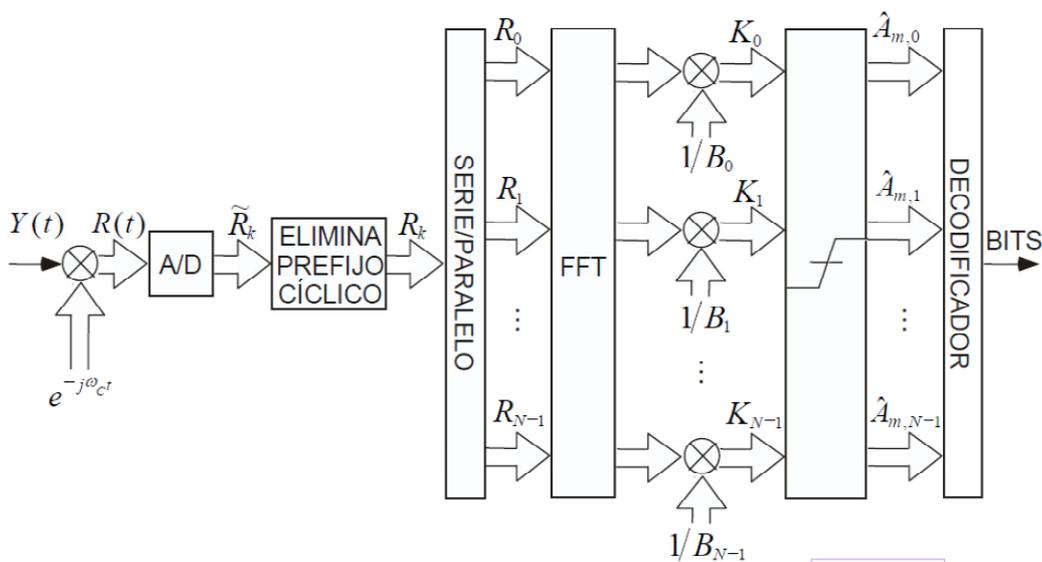


Figura nº 3. Receptor de señal modulada OFDM.

Pero quizás la característica que mas diferencia a OFDM de otros procedimientos de multiplexación en frecuencia es la ortogonalidad, pues el “espaciamiento adecuado” entre portadoras es, en este caso, un espaciamiento optimo. Este espaciamiento consiste en que la separación espectral entre portadoras consecutivas es siempre la misma, e igual al inverso del periodo de símbolo $\Delta f = 1/T_{simb}$, siendo T_{simb} el período de símbolo. Viendo una señal OFDM en el tiempo se aprecia que en el periodo de la portadora más baja caben varios periodos de las otras portadoras, alineadas todas en fase, mientras que en la representación espectral el máximo de cada portadora coincide con un nulo de las demás.

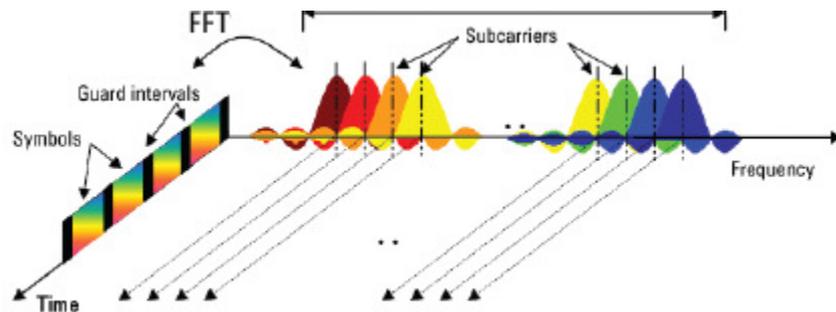


Figura nº 4. Modulación OFDM.

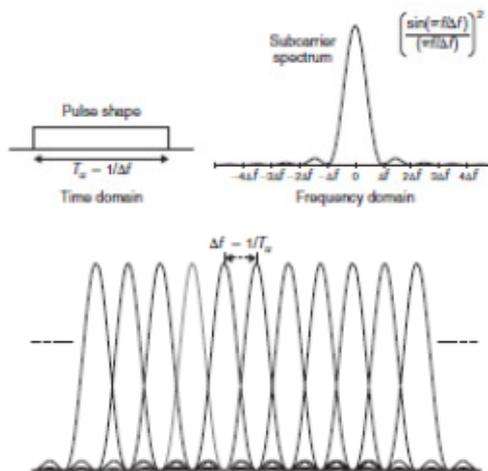


Figura nº 5. Características de modulación OFDM.

4.2. Características

Ahora, una vez hecha esta breve exposición de lo que es OFDM, se comentan algunas de las ventajas e inconvenientes de esta modulación.

Ventajas de OFDM

- **Elevada eficiencia espectral** al utilizar múltiples portadoras que pueden ser ubicadas en un ancho de banda muy reducido permitiendo así transmitir elevadas tasas de información por segundo y por ancho de banda.
- **Ecuación simplificada** en la mayoría de los casos, más sencilla que la ecualización adaptativa de las modulaciones monoportadoras. Además, en conjunción con una modulación diferencial, no es necesario un estimador de canal.
- **Menor sensibilidad a la sincronización temporal** que las modulaciones monoportadora.
- **Resistencia ante interferencias multitrayecto**: si un determinado rango de frecuencias sufre interferencias severas, dicho rango puede ser deshabilitado para la transmisión.
- **Posibilidad de variar las velocidades** superior e inferior, según el empleo de más o menos portadoras en función del propósito de la comunicación.
- **Eliminación de Interferencias Intersímbolo (ISI)**, además de **robustez frente a Interferencias Interportadora (ICI)** al introducir el Prefijo Cíclico (CP).
- **Implementación simple y eficiente** gracias a la utilización de los algoritmos de IFFT y FFT para la modulación y demodulación respectivamente.

Inconvenientes de OFDM

- Son altamente **sensibles al offset** en frecuencia y a los **ruidos de fase**. La presencia de una distorsión no lineal en la cadena de transmisión afectan de manera crítica las prestaciones de estos sistemas imponiendo severos límites a su viabilidad.

- **La necesidad de los intervalos de guarda** con prefijo cíclico suponen en coste en energía que acaba suponiendo **una menor eficiencia en energía**.

- **Una alta relación Peak Average Power Ratio (PAPR)**. Es decir, una gran diferencia entre la potencia máxima y la potencia media de la señal modulada, lo que dificulta la elección de un punto de trabajo en potencia, condicionando aun más el problema de las no linealidades.

- **Mayor coste** de los sistemas transmisores y receptores.

4.3. Comparación con otras modulaciones.

Por último, parece interesante hacer una comparación de este tipo de modulación con su antecesora, CDMA, utilizada para 3G. OFDM es la modulación que caracteriza a la tecnología en estudio, LTE (4G). En esta tabla se han tenido en cuenta algunos de los parámetros más importantes a resaltar.

Atributo	CDMA	OFDM
Banda utilizada	Fija (BW=5 MHz)	Variable ($N_C \times \Delta f$)
Periodo de Símbolo	Muy Corto ($1/BW$)	Muy Largo ($1/\Delta f$)
Ecuación	Difícil (sobre 5 MHz)	Fácil, con procesamiento en dominio espectral
Resistencia al Multitrayecto	Difícil (sobre 5 MHz)	Fácil, debido a la inserción del Prefijo Cíclico (CP)
Facilidad de MIMO	Requiere mucha capacidad de procesamiento (dominio temporal)	Fácil, merced al procesamiento en el dominio espectral
Sensibilidad a desviación de frecuencia	Razonable	Muy vulnerable
Tipo de Acceso	Por códigos de canalización y de aleatorización	Por frecuencia y tiempo ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Pudiéndose utilizar, adicionalmente, códigos de canalización y aleatorización.

Tabla nº 1. Comparación tipos de modulación.

Como se puede comprobar, se han mejorado en muchos aspectos a consecuencia de empeorar algunos como es la sensibilidad a la desviación de frecuencia, hecho que provoca la distorsión no lineal.

