PRÁCTICA 2

DISTORSIÓN E INTERMODULACIÓN

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

Independientemente de los elementos constitutivos de cualquier Sistema de Comunicación, el objetivo que se persigue en todos ellos es el de proveer en el destino una réplica aceptable del mensaje generado en la fuente de información. Durante la transmisión de la señal portadora del mensaje original, ocurren ciertos fenómenos no deseados y perjudiciales: la **perturbación** y la **distorsión**. La primera se traduce en una contaminación de la señal transmitida, en tanto que la segunda se manifiesta como una alteración en la forma de onda de dicha señal. El resultado final es que el destino va a recibir un mensaje distinto a aquel que se mandó, con la consiguiente dificultad para extraer la información.

1.1 Fases de ejecución de la práctica

De las dos clases de perjuicios citados, en la práctica presente únicamente se tratará de introducir al alumno en el estudio de la distorsión. En ese sentido, se procederá de la manera siguiente: en primer lugar, se hablará de la distorsión en general, tratando de delimitar la frontera entre lo que se entiende por procesos que no distorsionan y otros que sí lo hacen. Entre estos últimos, veremos que pueden distinguirse dos grandes grupos delimitados por el concepto de sistema lineal e invariante: procesos que introducen *distorsión lineal* y procesos que provocan *distorsión no lineal*. Dentro de las distorsiones lineales se hablará de *distorsión de fase* y de *distorsión de amplitud*, en tanto que dentro de las distorsiones no lineales se hablará de *distorsión armónica* y de *distorsión de intermodulación*. Finalmente, se le propondrá al alumno que aborde la simulación en MATLAB de dos sistemas: uno que introduzca distorsión lineal y otro que introduzca distorsión no lineal.

2. PERTURBACIÓN Y DISTORSIÓN

Como ejemplo claro de los problemas mencionados en la introducción del guión, valga el siguiente caso práctico:

En una red de televisión por cable, la distancia que separa al transmisor del receptor es tan elevada que provoca una atenuación intolerable de la señal transmitida. Para contrarrestar tal atenuación se intercalan en el trayecto amplificadores encargados de compensar las pérdidas originadas por la propagación de la señal a lo largo del cable. La misión de estos amplificadores es la de aumentar **linealmente** la amplitud de la señal presente en su entrada. Pero la realidad es que los amplificadores reales (dependiendo en gran medida de su diseño), distan de ser todo lo lineales que uno desearía. Como resultado, si bien amplifican la señal, también la deforman ligeramente (tanto más cuanto más fuera de la zona lineal del amplificador se trabaje), dando lugar a una distorsión que puede llegar a ser igual o más perjudicial que la atenuación que se trataba de resolver.

Además, los componentes activos y pasivos que forman el esquema eléctrico del amplificador, están sometidos a una temperatura ambiente que es distinta de cero Kelvin. Como consecuencia, existe una agitación térmica aleatoria de los portadores de corriente que se traduce, a su vez, en una señal de ruido añadida a la señal que pretende transformar el amplificador. En definitiva, *puede llegar a ser peor el remedio que la enfermedad*.

Así pues, y como resumen de todo lo dicho, hay que tener presente que cuando cualquier tipo de señal se propaga a través de un circuito eléctrico (el amplificador antes mencionado) o través de un medio de transmisión (el cable del ejemplo anterior), va a estar sometida, por la propia naturaleza imperfecta de los constituyentes de éstos, a toda una serie de efectos indeseados que dificultan la correcta transmisión del potencial mensaje que pueda portar la señal.

Cualitativamente se distinguen dos tipos de efectos indeseados: las **perturbaciones** y las **distorsiones**. Son perturbaciones todas aquellas señales extrañas, propias, artificiales o naturales que se agregan de forma intencionada o no a la señal deseada. Mientras que son distorsiones todas aquellas alteraciones de la forma de onda de la señal deseada, debidas a la respuesta imperfecta de los circuitos o medios por los que se propaga aquella. En base a este par de definiciones conviene tener claro que sólo podremos tener distorsión cuando se aplique señal al circuito o al medio, mientras que la perturbación existe siempre independientemente de que haya o no señal presente.

Decir que **no** existe distorsión siempre que la señal de salida de un circuito o medio de transmisión sea idéntica a la entrada, es una afirmación demasiado estricta por dos motivos. Primero, y dado que existe un tratamiento de señal intencionado por medio, la señal de salida tendrá un cierto retardo inevitable respecto a la señal de entrada y, segundo, en casi ningún proceso se persigue como objetivo primordial mantener constante la amplitud de la señal tratada. Es más, se pueden tolerar ciertas diferencias entre la señal de entrada a un circuito o medio de transmisión y la señal de salida de éstos sin que por ello deba clasificarse al proceso que tiene lugar por medio como proceso distorsionador. El propósito ahora es, por consiguiente, establecer la frontera entre la zona de distorsión y la zona de no distorsión. Luego, y a partir de esta base, será posible definir los diferentes tipos de distorsión así como investigar sus efectos.

Dada una señal original, $x(t)$, y una señal transformada a partir de aquella, $y(t)$, se dice que $x(t)$ no ha sufrido distorsión en la transformación si $y(t)$ difiere de $x(t)$ sólo en una constante multiplicativa, k, y en un retardo finito de tiempo, t_d. Expresado analíticamente, una transformación de $x(t)$ en $y(t)$ se realiza sin distorsión cuando: $y(t) = k \cdot x(t-t_d)$. Esta ecuación realiza una transformación lineal e invariante que, como tal, puede ser representada por medio de una respuesta impulsiva, $h(t)$, o de una función de transferencia, $H(f)$. Es sencillo demostrar que el sistema lineal e invariante capaz de realizar la transformación sin distorsión expresada por dicha ecuación es: $H(f) = |H(f)|e^{j\Phi(f)}$, siendo $|H(f)|$ igual a constante (k) y $\Phi(f)$ igual a $-2\pi f\, t_d$.

En la práctica, en toda transformación de señal se produce distorsión, aunque siempre puede reducirse con un diseño apropiado.

En un intento de aproximarse a su estudio formal, la distorsión se clasifica conforme a las dos clases siguientes:

1) **Distorsión lineal**, y
2) **Distorsión no lineal**.

La explicación de ambas distorsiones se realiza en los dos apartados siguientes del guión.

3. DISTORSIÓN LINEAL

Se dice que un circuito o un medio de transmisión prácticos introducen distorsión lineal sobre la señal que transforman, cuando la señal de salida que se obtiene está relacionada con la señal que debería obtenerse por medio de una **transformación lineal e invariante,** de función de transferencia **distinta** a la expresada por: $H(f) = |H(f)|e^{j\Phi(f)}$, siendo $|H(f)|$ distinta a constante $k(f)$ y/o $\Phi(f)$ distinta de $-2\pi f\, t_d$. En el primer caso, se habla de **distorsión de amplitud**, mientras que en el segundo se habla de **distorsión de fase**.

Las formas más comunes de distorsión de amplitud son una atenuación excesiva o levantamiento de los extremos de las altas o bajas frecuencias en el espectro de la señal. Menos común, pero igualmente molesto, es una respuesta desproporcionada a una banda de frecuencias dentro del espectro donde está localizada la señal sujeta a transformación.

La distorsión de fase se produce cuando las diferentes componentes de frecuencia de que se compone la señal, sufren retardos de tiempo diferentes a los proyectados originalmente. La forma de calcular el retardo de una componente espectral de frecuencia f_0, cuando ésta atraviesa un sistema lineal e invariante es por medio de la siguiente expresión:

$$t_d = -\frac{\Phi(f_0)}{2\pi f_0}$$

siendo $\Phi(f)$ el argumento de la función de transferencia de dicho sistema.

La bondad de las distorsiones lineales, ya sean éstas de amplitud o de fase, es que a priori y sobre el papel, es sencillo eliminarlas. Si deseamos obtener la señal $x(t)$ pero, en cambio, obtenemos otra señal $y(t)$, y sabemos que $x(t)$ e $y(t)$ están relacionadas por medio de la respuesta impulsiva: $y(t) = x(t)*h(t)$, entonces, si $h(t)$ tiene inversa, podremos corregir la distorsión introducida por el sistema práctico añadiendo a su salida un sistema de respuesta impulsiva igual a $\boldsymbol{h^{-1}(t)}$. Este sistema capaz de corregir la distorsión lineal es lo que se conoce por el nombre de **igualador** o **ecualizador**:

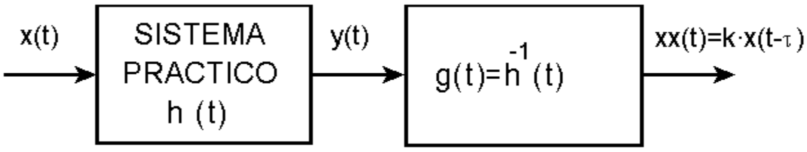


Figura 1. Empleo de un ecualizador/igualador para corregir la distorsión lineal

Raramente podrá conseguirse diseñar un ecualizador práctico cuya función de transferencia sea exactamente igual a la deseada, aunque pueden efectuarse aproximaciones que reduzcan la distorsión a un nivel aceptable. Es probable que la técnica de igualación más antigua que existe sea el empleo de *bobinas de carga* en líneas telefónicas de pares trenzados. Estas bobinas son inductores concentrados que se conectan en derivación a través de la línea cada kilómetro o más.

Modernamente, y para un amplio abanico de aplicaciones se utilizan ecualizadores basados en un tipo de filtro denominado *filtro transversal*.

4. DISTORSIÓN NO LINEAL

Se dice que un circuito o un medio de transmisión prácticos introducen distorsión no lineal sobre la señal que transforman, cuando la señal de salida que se obtiene está relacionada con la señal que debería obtenerse, por medio de una transformación no lineal. Por lo tanto, que ya no se puede admitir el tratamiento basado en las herramientas de cálculo de Sistemas Lineales. En vez de eso, los valores instantáneos de *x(t)* e *y(t)* se relacionan por medio de una curva no lineal. En este caso, es difícil eliminar la distorsión y lo único que nos queda por hacer es tratar de diseñar los circuitos de la forma más lineal posible. Para analizar este tipo de sistemas prácticos se recurre a una curva denominada comúnmente *característica de transferencia* del sistema práctico. Si, como condición añadida, tratamos sólo con sistemas sin memoria, la característica de transferencia podrá aproximarse en la zona cuasilineal de aquél mediante una función polinómica del tipo:

$$y(t) = a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + a_3 x^3(t) + a_4 x^4(t) + \dots$$

Para indicar el grado de alinealidad y, por tanto, la distorsión que introduce un sistema práctico caracterizado por esta transformación, se recurre a dos pruebas complementarias. La primera consiste en introducir al sistema o medio de transmisión un tono armónico puro de frecuencia f_0 y amplitud A. Si el alumno realiza la operación, verá que a la salida se obtiene una infinidad de armónicos de f_0 de diferente amplitud (A_n, $n = 2,3,4,\dots$), una componente continua (A_0) y el mismo tono de entrada con otra amplitud distinta (A_1). Precisamente, esta prueba es lo que se conoce como medida de la **distorsión armónica**.

Se llama distorsión del armónico n-simo, al cociente entre su amplitud y la del fundamental, y suele expresarse en tanto por ciento o en decibelios (dBc, decibelio con respecto a la portadora (*carrier* en inglés)):

$$D_n(\%) = 100\frac{A_n}{A_1}\Big|_{Z_n = Z_1} = 100\sqrt{\frac{P_n(W)}{P_1(W)}}$$

$$n = 2,3,4,\dots$$

$$L_n(dBc) = P_n(dBm) - P_1(dBm)$$

Y se llama distorsión armónica total a la media geométrica de las distorsiones de todos los armónicos:

$$D(\%) = \sqrt{\sum_n D_n^2(\%)}\Big|_{Z_n = Z_1} = 100\sqrt{\sum_n \frac{P_n(W)}{P_1(W)}}; \quad n = 2,3,4,\dots$$

Generalmente, en condiciones normales de explotación, sólo revisten importancia práctica las distorsiones de los armónicos segundo y tercero.

Consideremos un sistema no lineal que se caracteriza sólo por los coeficientes a_1, a_2 y a_3 (los demás a_i son cero. Aplicando el tono de prueba $x(t) = A \cdot cos(\omega_0 t)$, tras algunas operaciones trigonométricas y algebraicas, se obtiene a la salida:

$$y(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega_0 t) + A_2 \cos(2\omega_0 t) + A_3 \cos(3\omega_0 t)$$
$$y(t) = \frac{a_2 A^2}{2} + \left(a_1 A + \frac{3a_3 A^3}{4} \right) \cos(\omega_0 t) + \frac{a_2 A^2}{2} \cos(2\omega_0 t) + \frac{a_3 A^3}{4} \cos(3\omega_0 t)$$

Obsérvese que el coeficiente a_3 deberá ser negativo para tener saturación en el fundamental.

La segunda prueba que se utiliza para medir el grado de alinealidad consiste en introducir **dos tonos de frecuencias f_1 y f_2 y misma amplitud A**. En este nuevo caso, puede demostrarse que a la salida tendremos una componente continua, dos tonos de la misma frecuencia que los originales y tonos pertenecientes a alguna de las dos clases siguientes:

1) Términos armónicos de f_1 o de f_2, que son términos de distorsión resultantes de la acción de la no linealidad sobre las frecuencias f_1 y f_2 por separado. Es, justamente, la distorsión armónica ya mencionada.

2) Términos de frecuencias que responden a la ley $\pm j \cdot f_1 \pm k \cdot f_2$, que se producen por mezcla o batido de los dos tonos de entrada. A estos términos se les denomina *productos de intermodulación* y la distorsión que introducen sobre la señal se denomina **distorsión de intermodulación**.

Si se define el orden, n, de cada producto de intermodulación como la suma de los índices j y k, esto es, $n = j+k$, podremos definir un coeficiente de distorsión para cada producto de intermodulación y un valor de distorsión de intermodulación total, de forma análoga a como se hizo con la distorsión armónica:

$$I_n(\%) = 100 \frac{Ai_n}{A_1} |_{Zi_n = Z_1} = 100 \sqrt{\frac{Pi_n(W)}{P_1(W)}}; \qquad n = 2,3,4,...$$

$$I(\%) = \sqrt{\sum_n I_n^{\,2}(\%)} \, |_{Zi_n = Z_1} = 100 \sqrt{\sum_n \frac{Pi_n(W)}{P_1(W)}}; \quad n = 2,3,4,...$$

Para el mismo hipotético sistema visto antes, donde sólo eran distintos de cero los coeficientes a_1 hasta a_3, ahora aplicamos una señal suma de un par de tonos de igual amplitud: $x(t)=A[\cos(\omega_1 t)+\cos(\omega_2 t)]$, y suponiendo $f_2 > f_1$, se obtiene a la salida:

$$y(t)=a_2A^2+\left(a_1A+\frac{9a_3A^3}{4}\right)\left(\cos(\omega_1 t)+\cos(\omega_2 t)\right)+\frac{a_2A^2}{2}\left(\cos(2\omega_1 t)+\cos(2\omega_2 t)\right)+$$
$$+\frac{a_3A^3}{4}\left(\cos(3\omega_1 t)+\cos(3\omega_2 t)\right)+a_2A^2\left(\cos((\omega_1+\omega_2)t)+\cos((\omega_2-\omega_1)t)\right)+$$
$$+\frac{3a_3A^3}{4}\left(\cos((2\omega_1+\omega_2)t)+\cos((2\omega_2+\omega_1)t)+\cos((2\omega_1-\omega_2)t)+\cos((2\omega_2-\omega_1)t)\right)$$

donde: el primer sumando de la primera línea es la componente de continua, el segundo sumando de la primera línea son los fundamentales, el tercer sumando de la primera línea son componentes de distorsión de 2º orden, el primer sumando de la segunda línea son componentes de distorsión de 3er orden, el segundo sumando de la segunda línea son productos de intermodulación de 2º orden y finalmente, el sumando de la tercera línea son productos de intermodulación de 3er orden.

Obsérvese que el valor de la amplitud de los fundamentales es distinto al que se obtiene cuando a la entrada tenemos un solo tono de amplitud A.

El análisis de términos de distorsión se aplica más bien para sistemas de baja frecuencia y/o de banda estrecha. Por ello es representativa la prueba con un tono. Para sistemas de banda ancha es más conveniente la especificación y ensayo de términos de intermodulación.

5. REALIZACIÓN PRÁCTICA

La realización de esta práctica constará de dos partes claramente diferenciadas: una primera donde se simulará un medio de transmisión clásico como es el cable coaxial, que introduce una distorsión lineal, y otra parte donde se realizará la simulación de un sistema típicamente no lineal, como es un amplificador.

5.1. Simulación de una transformación con distorsión lineal

El comportamiento de un cable coaxial, como medio de transmisión, puede modelarse mediante la acumulación de las siguientes transformaciones básicas:

1. Un retardo, t_d.
2. Una atenuación constante en toda la banda, *Aten*.
3. Una distorsión de fase de tipo cuadrática o cúbica.
4. Un filtrado paso bajo.

En base a ello, se pide simular en MATLAB un cable coaxial caracterizado por los siguientes parámetros:

- t_d = 6 μs.
- *Aten* = 6 dB.
- Distorsión de fase de tipo cúbica (orden 3).
- Frecuencia de corte del filtrado = 2,5 MHz.
- Orden del filtrado = 6.

Siga los siguientes pasos:

1. Estudie todo el guión de la práctica hasta que entienda qué tiene que realizar y cómo. Estudie con especial atención las funciones que se le suministran en el apéndice. Debe elaborar un diagrama con los pasos fundamentales del programa requerido. En las llamadas a funciones indique claramente qué parámetros se pasan y qué valores se devuelven.

2. Cree un *script* para su simulación. Cree también cuantas funciones considere oportuno para delegar tareas concretas del *script* fundamental. No olvide que MATLAB tiene muchas funciones que pueden facilitar su tarea.

3. Genere un pulso de 4 μs de duración y 1 V de amplitud, dentro de una ventana de observación de 42,66 μs. Debe trabajar con una frecuencia de muestreo de 6 MHz en su simulación. Así: a) A partir de la frecuencia de muestreo calcule el tiempo de muestreo, T. b) Calcule cuántas muestras hay en 4 μs (N_I) y en 42,66 μs (N_V). Para facilitar el procesado, redondee N_V a una potencia de 2. c) El pulso en cuestión será un vector de N_V elementos, de los que N_I valdrán 1 (en voltios) y el resto 0. Por ejemplo: una forma elegante de crear el vector es:

```
x = [zeros(1,2) ones(1,4) zeros(1,10)]
```

que genera un vector con 16 elementos, de los que 4 valen 1. Puede situar los elementos con 1 V donde desee dentro del vector, pero se recomienda que no estén en la segunda mitad del mismo.

Trabaje con una frecuencia de muestreo de 6 MHz.

Muy importante: Tras cada generación o transformación de la señal (el pulso) visualice el resultado en el tiempo y el espectro con la función del anexo de usuario *time_dep*. Por lo tanto, lleve el pulso al osciloscopio/analizador de *time_dep*. Debe obtener un pulso rectangular en el tiempo, y una función "sinc^2" en frecuencia (con nulos de potencia que separan los lóbulos). (Tome $Z = 1\ \Omega$.)

4. Para simular el retardo y la atenuación use la función del apéndice *atade*. Observaciones: a) Realice el retardo y la atenuación en pasos separado. (Primero retarde 6 μs y atenúe 0 dB. Después retarde 0 μs y atenúe 6 dB.) De esta forma podrá apreciar mejor el efecto de cada transformación. b) El retardo se pasa a la función *atade* como un número de muestras. c) El pulso es un vector de señal (está en voltios, no es potencia o energía). Piense detenidamente cuántas veces de señal se debe atenuar el pulso para perder 6 dB. d) En *time_dep* el retardo debe desplazar el pulso temporal a la derecha (en el espectro no se nota); y la atenuación debe reducir tanto la señal temporal como el espectro (la primera en veces de señal, el segundo en dB —por lo tanto 6 dB—).

5. Para simular el filtrado use la función del apéndice *lpf*. Observaciones: En el tiempo, el filtrado debe estropear los flancos del pulso. En frecuencia, el filtrado debe reducir apreciablemente los lóbulos secundarios a partir de la frecuencia de corte.

6. Para simular la distorsión de fase use la función del apéndice *disfase*. Observaciones: a) Con distorsión cúbica, la potencia a la que se eleva la recta ("pot") es 3. b) La función *disfase* devuelve un vector con los valores de la transferencia del filtro que realiza la distorsión deseada. (Es un vector complejo.) c) Por lo tanto, si la señal antes del filtrado es *x_in*, la señal distorsionada, *x_out*, se puede obtener con el siguiente código:
```
H = disfase(length(x_in),3); % Transferencia del filtro
H_mod = abs(H); % Módulo del filtro
H_ang = angle(H); % Fase del filtro
plot(H_mod), title('MODULO DE H'), pause
plot(H_ang), title('FASE DE H'), pause
X_in = fft(x_in); % Espectro de la señal a la entrada
X_out = X_in.*H; % La señal pasa por el filtro
x_out = real(ifft(X_out,length(X_out))); % Señal temporal
```
d) En el código anterior se han obtenido y representado el módulo y la fase del filtro que distorsiona. Luego los compararemos con los equivalentes del filtro ecualizador.

7. Ecualice la distorsión de fase. Para ello: a) Genere un filtro inverso (elemento a elemento) al obtenido con *disfase*. Puede hacerlo así:
```
Heq = H.^(-1);
```
b) Pase la señal por el filtro ecualizador. c) Compruebe que efectivamente ecualiza: comparando su módulo y fase con el filtro H, y estudiando con *time_dep* la señal obtenida a su salida. (Podrá observar mejor la ecualización de la distorsión si anula o ecualiza el filtrado paso bajo.)

Con el objeto de que le resulte más fácil verificar si su código está produciendo los efectos deseados, a continuación se suministran varias pantallas generadas por un programa similar al que debe escribir, pero con diferentes datos y funciones auxiliares. Es decir: las formas, tendencias y comportamientos han de coincidir con las de las siguientes figuras, pero los valores serán otros. (Con *time_dep* los espectros son unilaterales. Es muy recomendable que realice un zoom para apreciar mejor la forma de los espectros.)

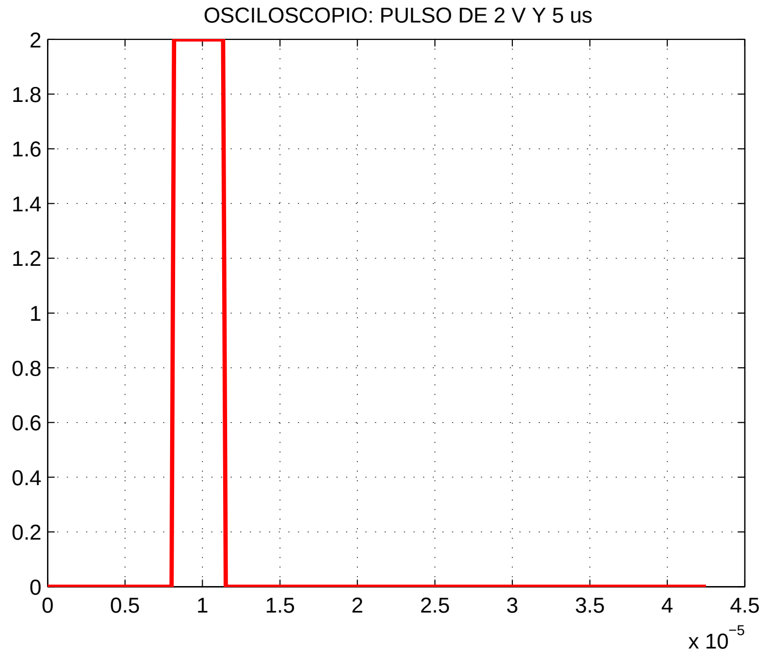


Figura 2. Un pulso de 2 V y 5 μs, en el dominio del tiempo.

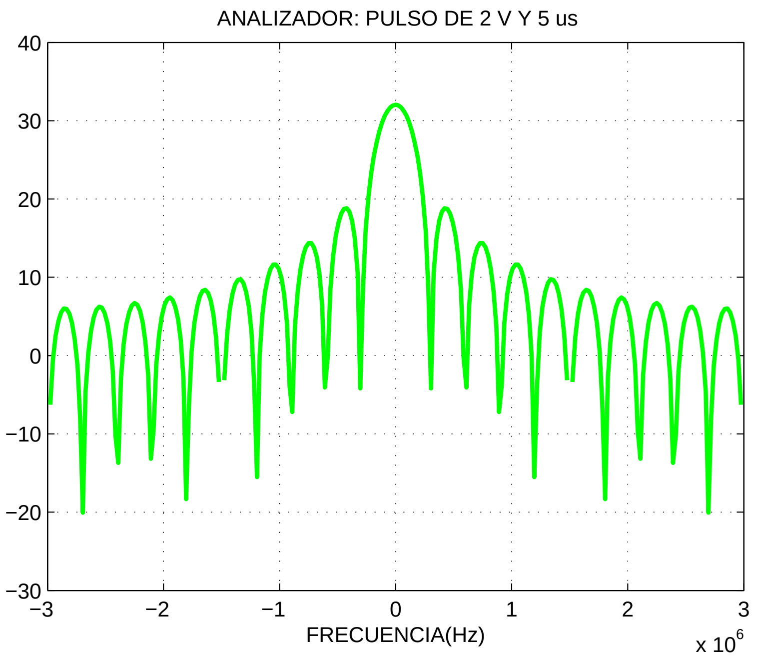


Figura 3. Espectro del pulso.

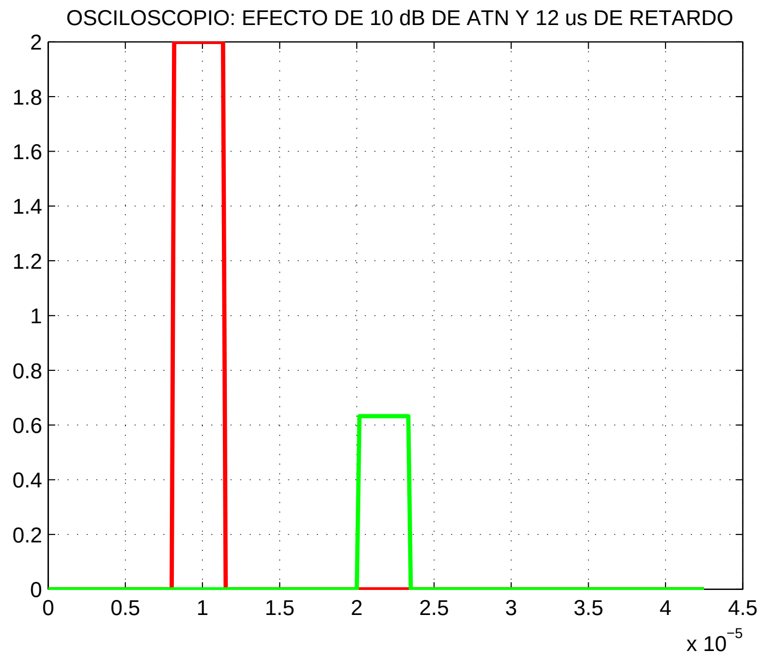


Figura 4. Comparación del pulso inicial con el pulso atenuado y retardado.

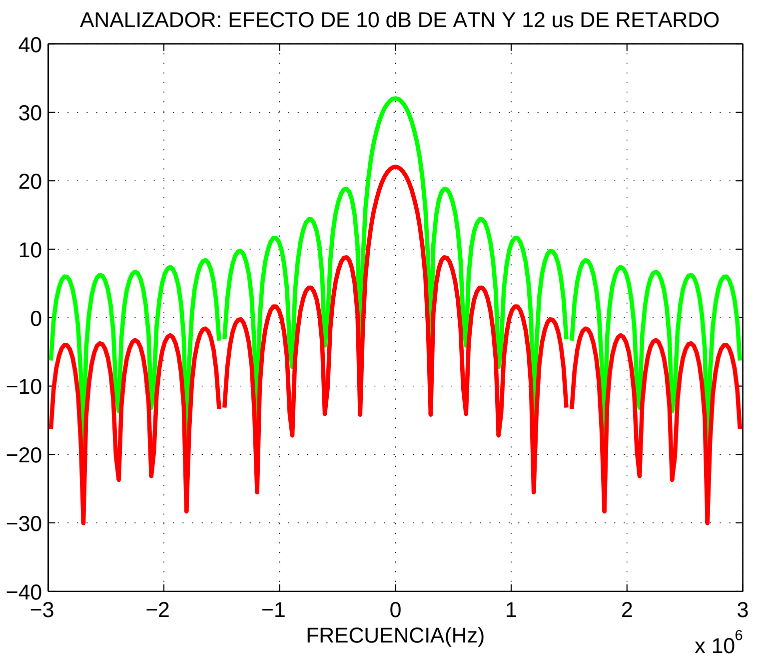


Figura 5. El espectro baja los 10 dB de atenuación. El retardo no influye en el módulo.

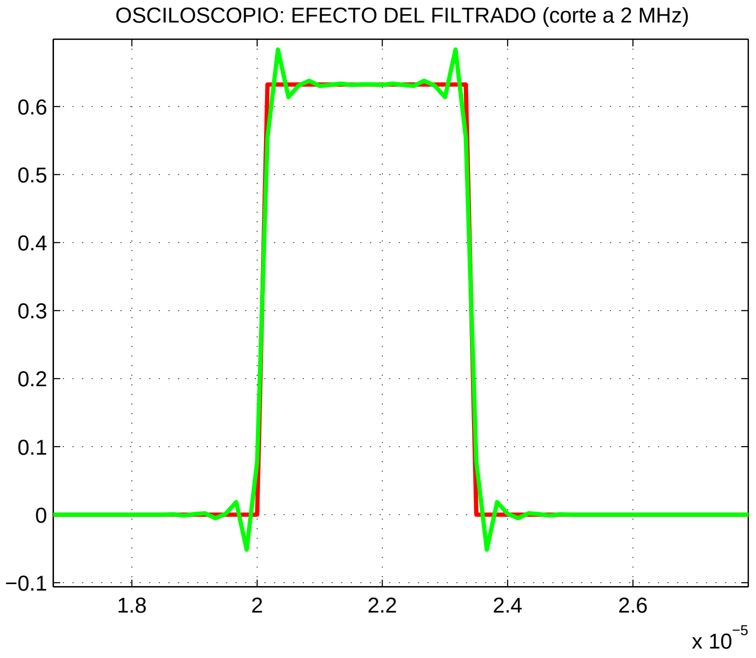


Figura 6. Comparación entre el pulso sin filtrar y filtrado.

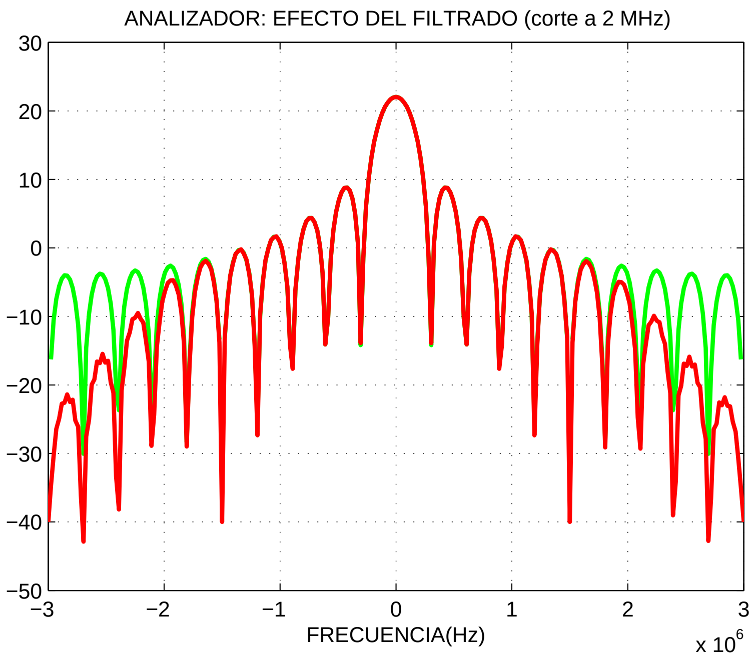


Figura 7. El efecto del filtrado se nota a partir de la frecuencia de corte.

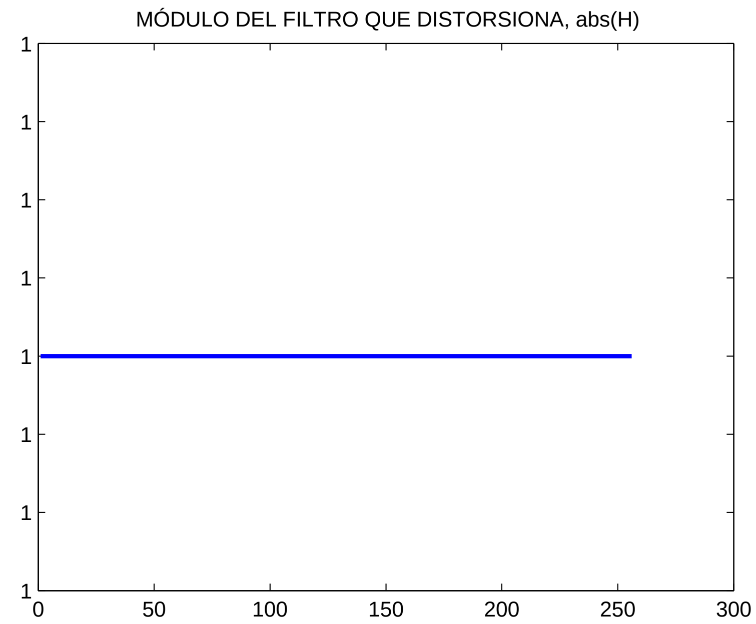


Figura 8. El filtro que distorsiona tiene módulo constante.

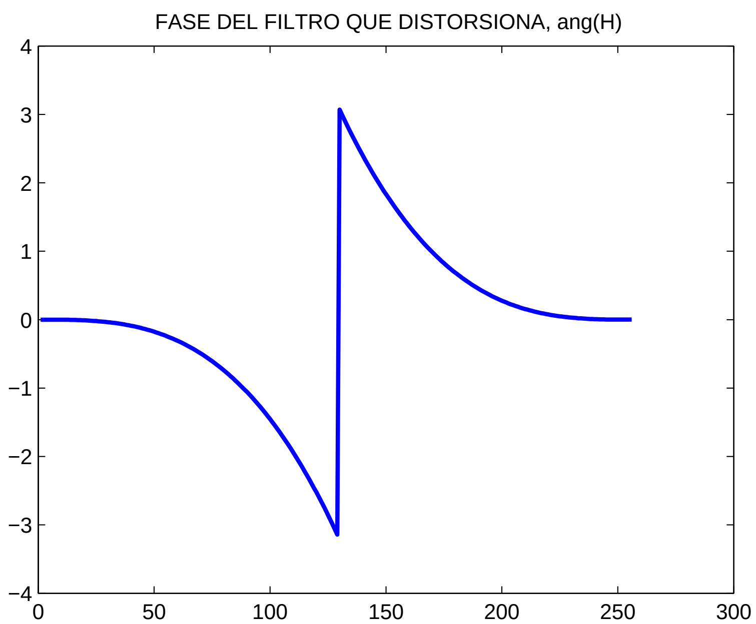


Figura 9. El filtro ecualizador tendrá que compensar esta transformación.

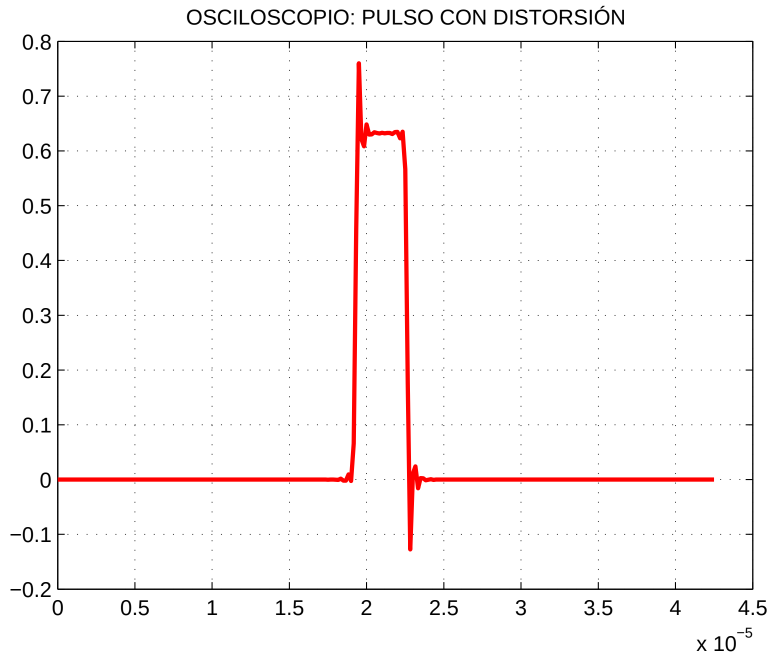


Figura 10. Los picos inicial y final caracterizan al pulso distorsionado.

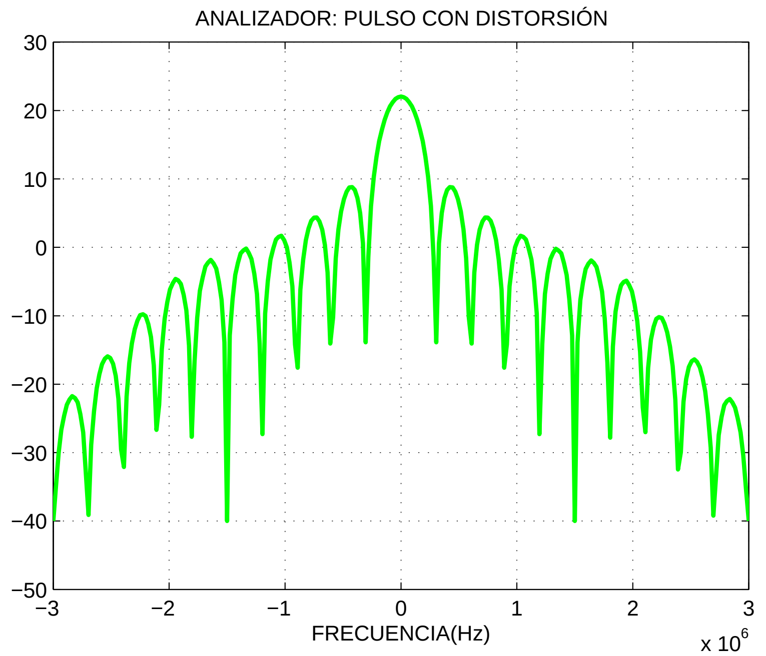


Figura 11. En el espectro no se aprecia variación por la distorsión de fase.

5.2. Simulación de una transformación con distorsión no lineal

Como sistema típicamente no lineal se ha escogido un amplificador de potencia. La característica de transferencia de un amplificador de potencia puede aproximarse en su zona cuasilineal por la siguiente ecuación polinómica de grado 3:

$$y(t) = a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + a_3 x^3(t)$$

donde *x(t)* es la señal de entrada al amplificador e *y(t)* es la señal de salida.

En esta última ecuación, a_1 representa la respuesta lineal del amplificador de potencia, esto es, su ganancia (en unidades naturales para señal), y constituye, justamente, el término deseado. El coeficiente a_2 representa el grado de asimetría entre la parte positiva y negativa de la señal de salida, y a_3 manifiesta la tendencia de la señal de salida a aplanarse debido a la saturación del amplificador. Un ejemplo de la relación entrada y salida de un amplificador lineal y uno no lineal (con a_2 = 0) lo podemos ver en la figura 12.

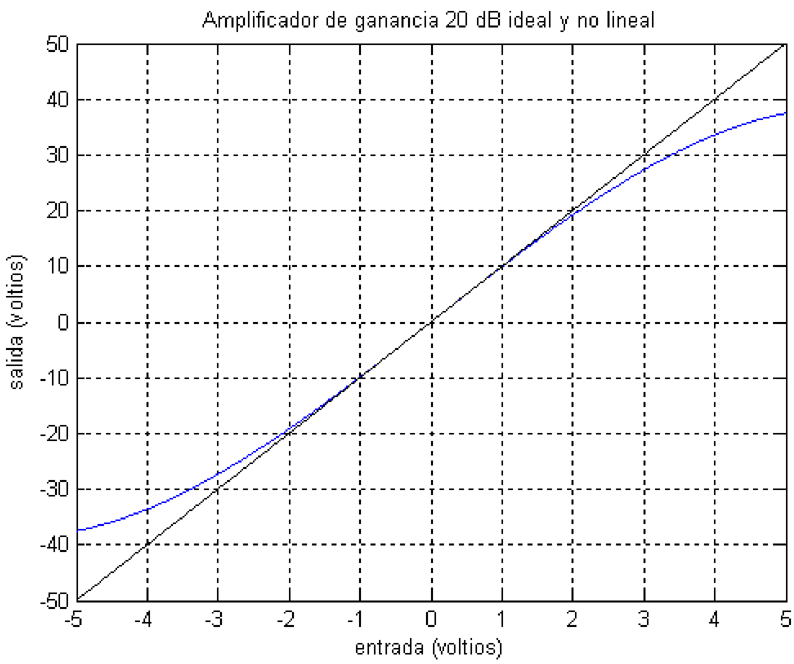


Figura 12. Respuesta de un amplificador lineal, $y(t) = 10 \cdot x(t)$, y uno no lineal $y(t) = 10 \cdot x(t) - 0{,}1 \cdot x^3(t)$

En el caso de un amplificador de potencia, no es normal realizar el estudio de su alinealidad en base a los coeficientes de distorsión e intermodulación citados en el apartado 4 de la práctica, aunque bien podría hacerse sin ningún problema. Por contra, es más común caracterizarla por los dos parámetros siguientes:

1) El punto de compresión a 1 dB.

2) El punto de intermodulación de tercer orden.

El **punto de compresión a 1 dB (P1dB)** es la *potencia* que debe tener *un tono a la entrada* del amplificador para que la *ganancia* caiga 1 dB por debajo de su valor nominal. La ganancia nominal del amplificador es la que éste tiene cuando se le excita a la entrada con una señal de bajo nivel ($G(dB) = 20log_{10}(a_1)$). La forma de medir el punto de compresión a 1 dB es la siguiente: se inyecta a la entrada un tono de frecuencia fija y amplitud variable, empezando por un valor muy bajo e incrementándola poco a poco. Para cada una de las amplitudes se obtiene la ganancia del amplificador y se realiza una representación de ésta en función de la potencia del tono de entrada. Para potencias de entrada bajas, la ganancia permanece constante e igual a la ganancia nominal. Pero a medida que aumenta la potencia de entrada, la ganancia empieza a disminuir debido a un efecto de saturación del amplificador.

Para medir el **punto de intermodulación de tercer orden (IP3)**, se inyectan a la entrada del amplificador dos tonos de distinta frecuencia e igual amplitud. Seguidamente se varía la amplitud de ambos a la vez partiendo de un valor muy bajo y en sentido creciente. Para cada una de las amplitudes, se mide la potencia que tiene un producto de intermodulación de tercer orden próximo a las componentes fundamentales (componente $2f_1$-f_2 o $2f_2$-f_1), a la salida del amplificador, y se realiza una representación de ésta en función de la potencia de uno de los tonos presentes a la entrada. El punto de intermodulación de tercer orden es el cruce de esta curva con la curva de potencia ideal de salida de uno de los dos tonos fundamentales. La forma de conseguir esta última curva consiste, sencillamente, en obtener la potencia de salida como la potencia de entrada de uno de los dos tonos amplificada por la ganancia nominal del amplificador obtenida antes.

<u>Nota:</u> Las gráficas para la obtención tanto del punto de compresión a 1 dB como del de intermodulación de tercer orden se deben de realizar en unidades logarítmicas.

Tome como coeficientes de la característica de transferencia del amplificador:

$a_1 = 10; \quad a_2 = 0; \quad a_3 = -0.1$

y como datos de la simulación:

- Frecuencia de muestreo: 512 Hz.
- Número de muestras: 256.
- Frecuencias de los tonos de entrada: 30 y 34 Hz.
- Impedancia de trabajo: 50 Ω.

Realice una simulación en MATLAB del amplificador citado.

Cree un script para estudiar y representar el punto de compresión a 1 dB (P1dB).

1) Estudie cómo la distorsión depende del nivel de la señal de entrada. Para ello: a) Genere una sinusoide de 30 Hz y 0,01 V de pico. Visualícela con *time_dep* y verifique que sus parámetros coinciden con los datos. (Compruebe la frecuencia en el osciloscopio y en el analizador. Compruebe el valor de pico en el osciloscopio. Calcule la potencia del tono en dBm y compare con el valor del espectro, haciendo varias veces zoom si es necesario.) b) Pase la señal por el amplificador. Si *x* es la sinusoide (el vector con sus valores), la señal a la salida del amplificador se obtiene con:

```
y = a1*x + a2*x.^2 + a3*x.^3;
```

donde las potencias afectan a los vectores de muestras elemento a elemento. Visualice la señal *y* con *time_dep*. Observe que, aunque existe distorsión, su nivel es totalmente despreciable, y la sinusoide en el osciloscopio parece perfecta. c) Genere ahora la sinusoide con 7 V de pico. Visualícela con *time_dep*. d) Pase la nueva sinusoide por el amplificador. Visualice la salida con *time_dep*. Observe que los picos del tono se han recortado por la saturación, y el espectro muestra un armónico con un nivel muy alto.

2) Dibuje una gráfica donde pueda medir el P1dB. Para ello: a) Trabaje con una sinusoide a la entrada de 30 Hz y potencia variable desde −10 dBm hasta 30 dBm (p. ej: en pasos de 0,5 dB). b) Calcule la amplitud del tono para cada valor de la potencia. c) Genere el vector de la sinusoide para cada caso. d) Pase los tonos por el amplificador. e) Mida la potencia a la salida (a la frecuencia fundamental) en cada caso, usando la función *powmeter*. f) Calcule la ganancia en cada caso. g) Pinte una gráfica que represente la ganancia en función de la potencia a la entrada. h) Observe el resultado, con clara saturación de la ganancia. Mediante el zoom, mida con precisión el P1dB (aquél en el que la ganancia baja 1 dB). A continuación se suministra un código (incompleto donde aparecen interrogaciones) que realiza las tareas propuestas. Úselo como base para su programa.

```
Pin = -10:0.5:30;      % pot. de entrada (dBm) del tono; hay 81 valores

for i = 1:length(Pin) % recorro los 81 elementos de Pin
    A = ????;          % para cada pot. calculo la amplitud A
    x = ????;          % genero el tono para cada amplitud A
    y = ????;          % paso el tono por el amplificador
    Pout(i) = ????;    % mido la pot. de salida (dBm) para cada A
    G(i)= ????;        % calculo la ganancia (dB) para cada A
end

subplot(1,1,1), plot(Pin,G), grid, pause % pinto la ganancia
```

3) Calcule de forma teórica el P1dB. Compruebe que el resultado está en buena concordancia con la simulación.

<u>Cree un script para estudiar y representar el punto de intermodulación de tercer orden (IP3)</u>.

4) Dibuje una gráfica donde pueda medir el IP3. Para ello: a) Trabaje con la suma de dos sinusoides a la entrada. Tome como frecuencias 30 y 34 Hz. Varíe la potencia de cada tono desde 10 hasta 35 dBm (p. ej: en pasos de 0,5 dB). b) Calcule la amplitud de cada tono (ambos tienen la misma) para cada valor de la potencia. c) Genere el vector con la suma de las dos sinusoides para cada caso. d) Pase la señal suma por el amplificador. e) Mida con *powmeter* la potencia a la salida de: un tono fundamental sin saturación (el polinomio se reduce a una recta); un batido (cualquiera) de tercer orden; un tono fundamental con saturación (no hace falta para el IP3, pero es interesante). f) Represente, en la misma gráfica y siempre en función de la potencia de un tono a la entrada, las tres potencias medidas en el paso anterior. g) Observe el resultado. Mediante el zoom, mida con precisión el IP3 (aquél en el que se cortan las dos rectas). A continuación se suministra un código (incompleto donde aparecen interrogaciones) que realiza las tareas propuestas. Úselo como base para su programa.

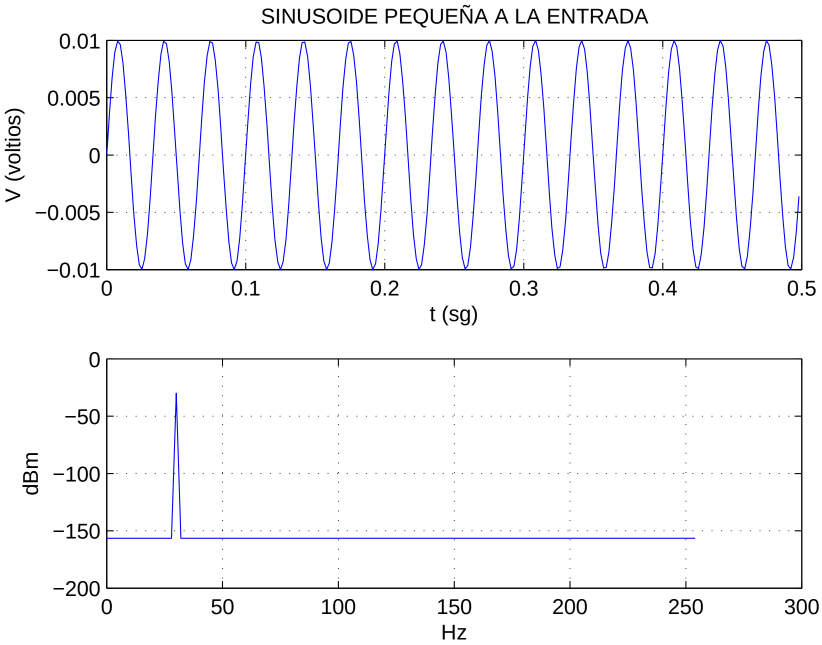
```
Gi = 20*log10(a1);     % ganancia ideal, de pequeña señal, sin saturación

Pin = 10:0.5:35;       % pot. de entrada (dBm) de 1 tono; 51 elementos
Pout_i = Pin + Gi;     % pot. de salida sin saturación (la calculo aquí)

for i = 1:length(Pin) % para recorrer los 51 valores
    A = ????;          % calculo A para cada pot.
    x1 = ????;         % frecuencia f1, amplitud A
    x2 = ????;         % frecuencia f2, amplitud A
    x = x1 + x2;       % suma de los 2 tonos
    y = ????;          % pasa por el polinomio
    Pout_3(i) = 10*log10(powmeter(y,fs,2*f1-f2,1,Z))+30; % batido
    Pout_f(i) = 10*log10(powmeter(y,fs,f1,1,Z))+30; % fundamental con sat.
end

plot(Pin,Pout_3,Pin,Pout_f,Pin,Pout_i), grid, pause
```

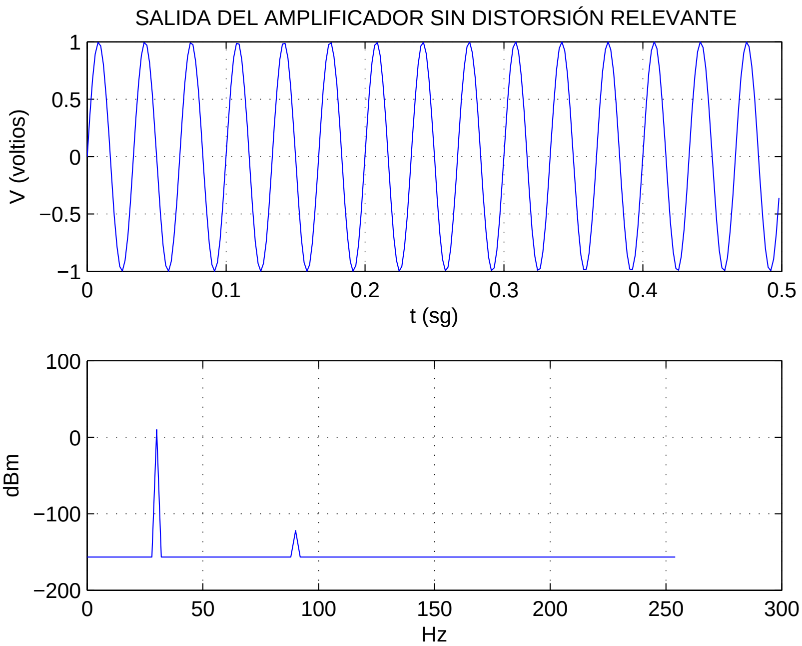
5) Fíjese en la curva del fundamental a la salida con saturación. Observará que primero es aproximadamente igual a la recta de ganancia ideal, luego se separa hacia abajo por la saturación, y finalmente crece muy deprisa. Este último tramo de crecimiento rápido no representa el comportamiento del amplificador: el modelo matemático (un polinomio de tercer grado) no sirve para modelar el amplificador en condiciones de saturación muy fuerte. En la realidad, lo más probable es que el amplificador se destruya en estas circunstancias (en todo caso, no va a entregar una ganancia mayor que la ideal).

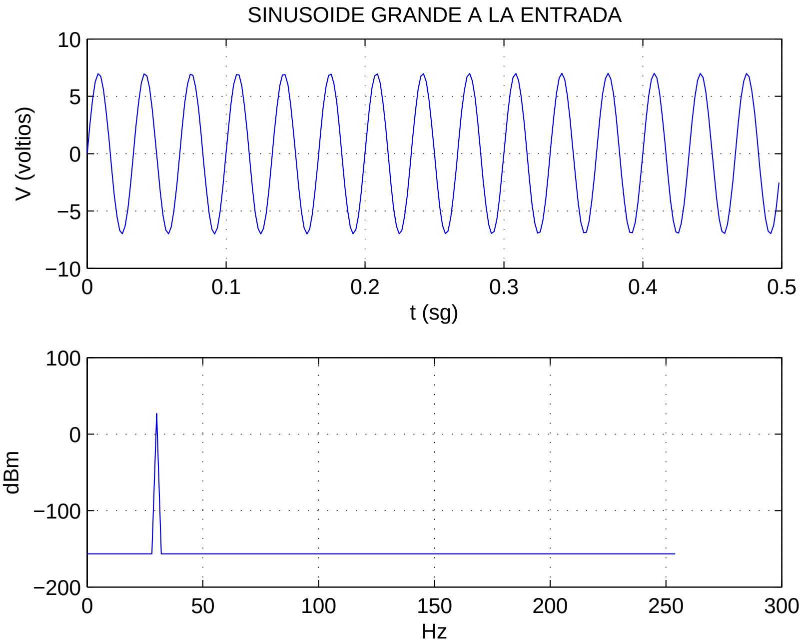
6) Mida la pendiente de cada una de las dos rectas representadas. Como debe saber de la parte teórica, esas pendientes siempre tienen el mismo valor. (Vienen forzadas por los exponentes del polinomio modelo: 1 en el término lineal, 3 en el término cúbico.)

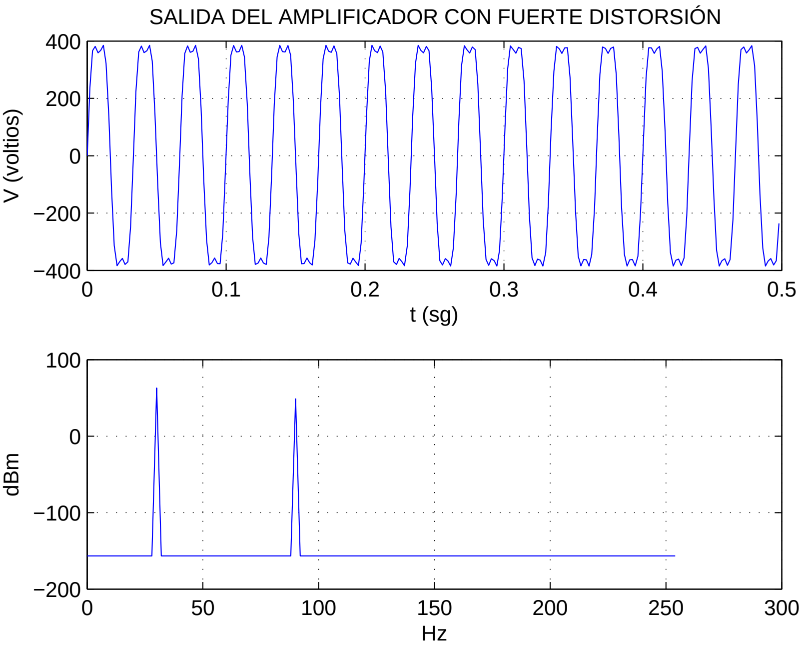
7) Calcule de forma teórica el IP3. Compruebe que el resultado está en buena concordancia con la simulación.

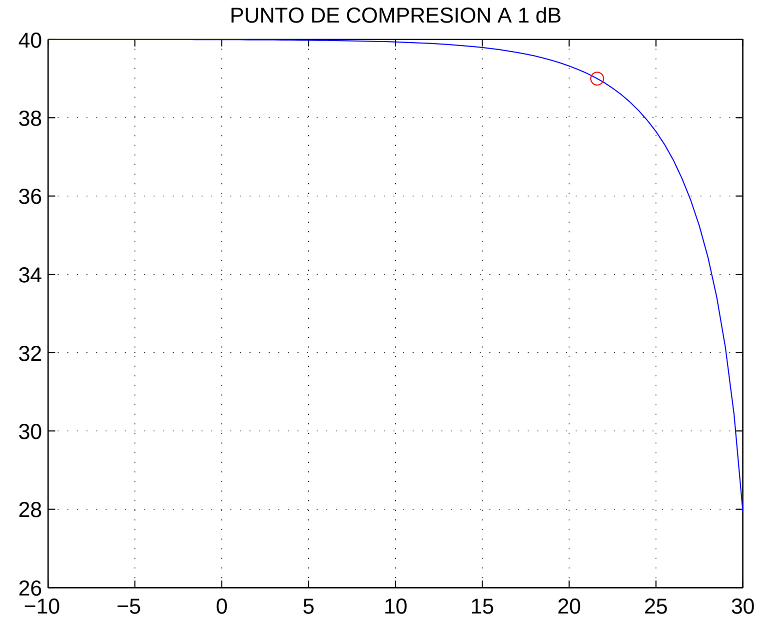
Con el objeto de que le resulte más fácil verificar si su código está produciendo los efectos deseados, a continuación se suministran varias pantallas generadas por un programa similar al que debe escribir, pero con un polinomio modelo diferente. Es decir: las formas, tendencias y comportamientos han de coincidir con las de las siguientes figuras, pero los valores pueden ser otros.

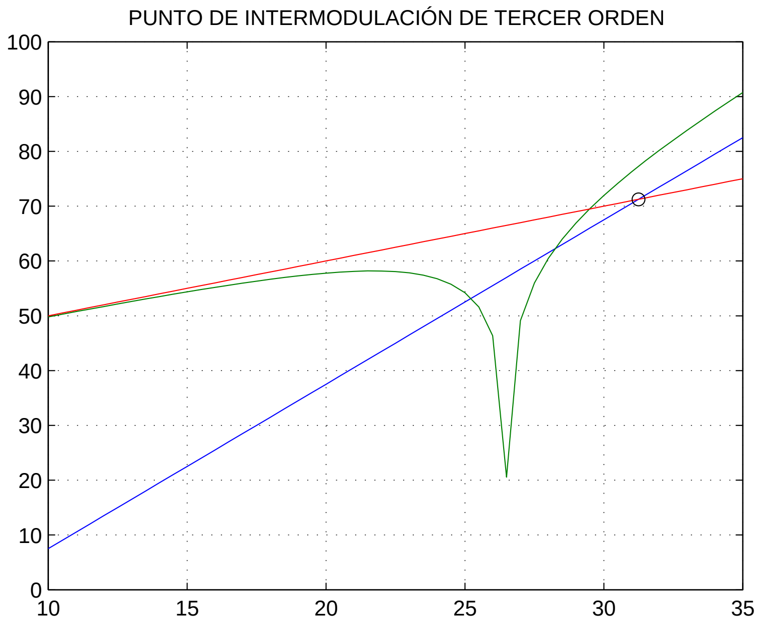

SINUSOIDE PEQUEÑA A LA ENTRADA
V (voltios)
0.01
0.005
0
−0.005
−0.01
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
t (sg)
dBm
0
−50
−100
−150
−200
0
50
100
150
200
250
300
Hz


SALIDA DEL AMPLIFICADOR SIN DISTORSIÓN RELEVANTE
V (voltios)
1
0.5
0
−0.5
−1
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
t (sg)
dBm
100
0
−100
−200
0
50
100
150
200
250
300
Hz


SINUSOIDE GRANDE A LA ENTRADA
V (voltios)
10
5
0
−5
−10
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
t (sg)
dBm
100
0
−100
−200
0
50
100
150
200
250
300
Hz


SALIDA DEL AMPLIFICADOR CON FUERTE DISTORSIÓN
V (voltios)
400
200
0
−200
−400
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
t (sg)
dBm
100
0
−100
−200
0
50
100
150
200
250
300
Hz


PUNTO DE COMPRESION A 1 dB
40
38
36
34
32
30
28
26
−10
−5
0
5
10
15
20
25
30


PUNTO DE INTERMODULACIÓN DE TERCER ORDEN
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
10
15
20
25
30
35

APÉNDICE: FUNCIONES DE USUARIO

En este apéndice se muestran los listados de las funciones en MATLAB que se entregan para facilitar la realización de la práctica.

ATADE: Atenuador y Retardador.

```
function y=atade(x,a,d)
%
%  function y=atade(x,a,d)
%  Esta función simula un bloque atenuador y retardador.
%  El número de muestras de y es igual al numero de muestras de x.
%  Datos que se le pasan:
%       * x : Secuencia de entrada al bloque en vector fila.
%       * a : Atenuación expresada en veces.
%       * d : Retardo expresado en numero de muestras
% Fecha: 2/02/07

N=length(x);
if (d>N)
        y=zeros(1,N);
else
        y=zeros(1,d);
        y(1,d+1:N)=x(1:N-d)/a;
end;

% Fin de la función atade
```

LPF: Filtro Paso Bajo de Butterworth.

```
function y=lpf(x,fs,fc,n)
%
% function y=lpf(x,fs,fc,n)
%
% Esta función simula un filtro paso bajo con la aproximación de
% Butterworth.
% Datos que se le pasan:
%       * x : Secuencia de entrada en vector fila.
%       * fs: Frecuencia de muestreo del sistema simulado.
%       * fc: Frecuencia de corte del filtro.
%       * n : Orden del filtro.
%
% Fecha: 02/02/07
%
N=length(x);
N2=round(N/2);
if N2==N/2             % Si x es de longitud par
      f=0:fs/N:fs/2;
else                   % pero si es de longitud impar
      f=0:fs/N:fs/2-fs/N;
end;
F=(sqrt(ones(1,length(f))+(f/fc).^(2*n))).^(-1);
F=[F F(N2:-1:2)];
X=fft(x,N);
Y=X.*F;
y=real(ifft(Y,N));

% Fin de la función lpf
```

DISFASE: Transferencia de un filtro que produce distorsión de fase.

```
function H=disfase(N,pot)
%
% function H=disfase(N,pot)
%
% Introduce una dist. lineal modelada como una deformación de la
% respuesta en fase ideal. Tal deformación se representa como una
% potenciación de la recta ideal: angle(H(W))=-W^pot.
%
% Datos de entrada:
%     N   : Longitud de H.
%     pot : Potencia a la que se eleva la recta -W.
%
% Datos de salida:
%     H   : Función de transferencia entre 0 y 2 pi (vector fila).
%
% Fecha: 06/02/2007
%
delta=2*pi/N;
omega=0:delta:2*pi-delta;
Nmed=floor(N/2)+1;
phi=[-omega(1:Nmed).^pot/(pi^(pot-1))];
phi=[phi abs(omega(Nmed+1:N)-2*pi).^pot/(pi^(pot-1))];
H=exp(j*phi); % vector fila

% Fin de la función disfase
```

```
function p=powmeter(x,fs,f0,B,Z)
%
% function P=powmeter(x,fs,f0,B,Z)
%
% Función que calcula la potencia (W) que hay dentro de una banda
% espectral de la señal x.
%     Datos de entrada:
%           x  = Señal de entrada
%           fs = Frecuencia de muestreo
%           f0 = Frecuencia central de la banda
%           B  = Ancho de banda de la medida
%           Z  = Impedancia de trabajo (parte real)
%
% Fecha: 06/02/2007
%
N=length(x);
X=fft(x,N)/N;
deltaf=fs/N;
f1=f0-B/2;
f2=f0+B/2;
n1=round(f1/deltaf)+1;
n2=round(f2/deltaf)+1;
if n1<0 disp ('Valores de entrada al Power Meter erróneos')
    elseif n1==0 p=X(1)*conj(X(1))+2*sum(X(2:n2).*conj(X(2:n2)));
else p=2*sum(X(n1:n2).*conj(X(n1:n2)));
end
p=p/Z;

% Fin de la función powmeter
```

```
function time_dep(x,T,Z,s,lin_log)
%
% function time_dep(x,T,Z,s,lin_log)
%
% Esta función representa en la parte superior la señal en el dominio
% del tiempo, y en la parte inferior la d.e.p.
%
% Parametros de entrada:
% ......................
%   x: señal a analizar (real)
%   T: periodo de muestreo
%   Z: impedancia (ohmios)
%   s: título que se quiere aparezca
%   lin_log: representación lineal ('lin') o logaritmica ('log')
%
% 06/02/07
%
a=length(x);
subplot(211),plot((0:a-1)*T,x,'b'),grid
xlabel('t (sg)'),ylabel('V (voltios)')
title(s)
x1=fft(x)/a;
y=x1.*conj(x1);
y=[y(1) 2*y(2:a/2)]/real(Z);
eje=(1/T)*(0:a/2-1)/a;
aux=(lin_log(1:3) =='lin');
if sum(aux)==3
        subplot(212),plot(eje,y*1e3,'b')
        ylabel('mw')
else
   subplot(212),plot(eje,10*log10(y*1e3+eps),'b')
   ylabel('dBm')
end
grid,xlabel('Hz')
pause

% Fin de la función time_dep
```