

3 EFECTOS DE LA DISTORSIÓN NO LINEAL EN LA MODULACIÓN OFDM.

3.1 INTRODUCCIÓN.

Debido a su robustez en entornos afectados por fuertes fenómenos de interferencia y multitrayecto, y debido a su eficiencia espectral, OFDM es considerada como una técnica de modulación muy efectiva para transmisiones digitales inalámbricas de alta velocidad.

OFDM es un esquema de transmisión multiportadora (implementado eficientemente por la IFFT) que transporta una secuencia de datos de entrada sobre N_{fft} subportadoras ortogonales, dentro de la banda de frecuencias útil del canal.

Esta técnica es efectiva en un entorno multitrayecto, ya que cada subcanal transporta una tasa binaria baja, y por tanto con un periodo de símbolo mucho mayor que los retrasos por eco típicos. Debido al uso del prefijo cíclico (o intervalo de guarda) insertado antes de cada periodo de modulación, la ecualización del eco se reduce simplemente a multiplicar escalarmente las variables de decisión detectadas por un coeficiente correctivo.

El principal inconveniente de la modulación OFDM es su elevado rango dinámico de señal, causado por el elevado número de subportadoras con fase y amplitud aleatorias, que son sumadas en el modulador. Para alcanzar unos resultados aceptables en presencia de amplificadores no lineales, se requieren elevados “output back-off”, resultando así en una baja eficiencia en consumo de potencia. Este hecho es

especialmente importante en el caso de transmisores portátiles (o móviles), donde la potencia es un recurso costoso.

Por tanto, se requiere un estudio preliminar del sistema OFDM con amplificador no lineal para encontrar una solución de compromiso entre la potencia transmitida y la degradación causada por la distorsión no lineal.

En los apartados posteriores evaluaremos los efectos de un amplificador de alta potencia (HPA: High Power Amplifier) del tipo TWT (Traveling-Wave Tube) sobre la tasa de error binaria (BER), la constelación de los símbolos recibidos, y el espectro de la señal transmitida, para un sistema 16-QAM OFDM según Hiperlan/2.

3.2 MODELO DE AMPLIFICADOR NO LINEAL.

La envolvente compleja de la señal de entrada al HPA es:

$$x(t) = r(t) \cdot e^{j\psi(t)}$$

y la envolvente compleja de la señal de salida es:

$$x_o(t) = A(r(t)) \cdot e^{j\{\psi(t)+f(t)\}}$$

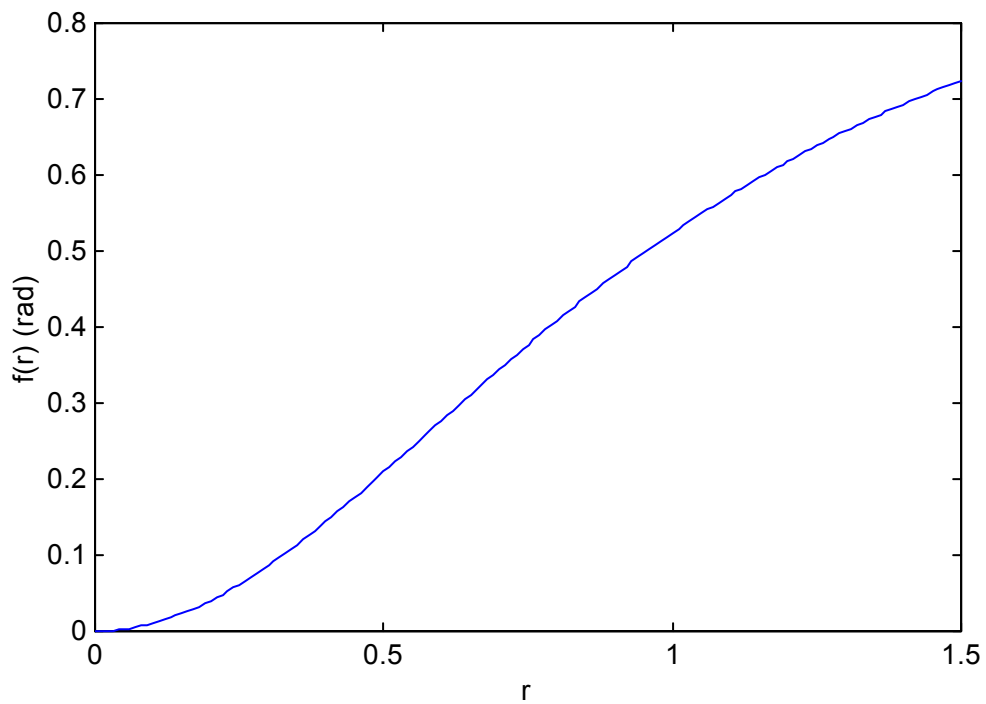
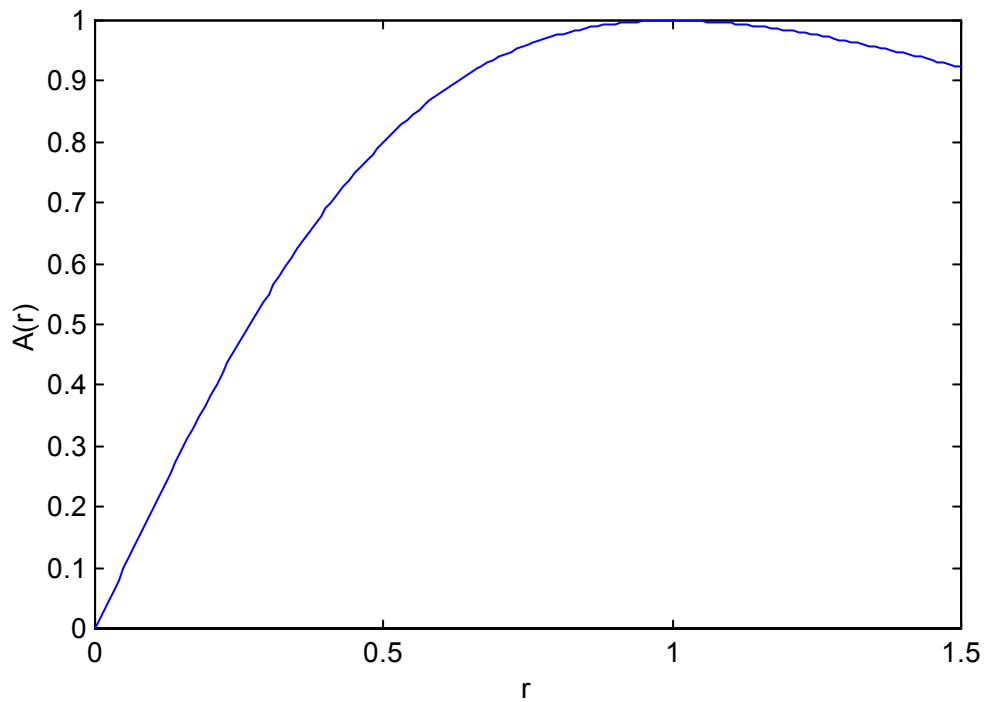
donde $A(r)$ y $f(r)$ representan respectivamente las características de conversión AM/AM y AM/PM del HPA (AM:modulación de amplitud; PM:modulación de fase).

Según el modelo de Saleh, dichas características de conversión AM/AM y AM/PM se pueden expresar respectivamente como:

$$A(r) = \frac{2r}{1+r^2};$$

$$f(r) = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{r^2}{1+r^2}$$

En las expresiones anteriores $r=1$ representa la tensión de entrada de saturación del amplificador. Si representamos las funciones $A(r)$ y $f(r)$ obtenemos las gráficas siguientes:



3.3 EFECTOS DE LAS NO LINEALIDADES EN LA SEÑAL OFDM

Cuando se amplifica una señal OFDM, los efectos de la distorsión son:

- Interferencia entre las componentes en fase y cuadratura (I/Q) debido a la conversión AM/PM.
- Intermodulación entre los subcanales OFDM provocando un ensanchamiento espectral de la señal transmitida e interferencia entre subcanales adyacentes.

Además, si se transmite simultáneamente más de una señal OFDM, la intermodulación también provocará interferencia entre canales adyacentes (ACI).

El punto de operación del amplificador es generalmente identificado por el “back-off”. De aquí en adelante usaremos las siguientes definiciones para el **IBO** (Input Back-Off) y el **OBO** (Output Back-Off):

$$IBO(dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{o,in}}{P_{in}}\right)$$

$$OBO(dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{o,out}}{P_{out}}\right)$$

donde **P_{in}** es la potencia media de la señal a la entrada del HPA, **P_{out}** es la potencia media de la señal transmitida, **P_{o,out}** es la potencia de salida máxima (potencia de saturación), y **P_{o,in}** es la potencia de entrada correspondiente a la máxima potencia de salida.

Los efectos de las no linealidades pueden ser reducidos trabajando con elevados back-off, que corresponden a mover el punto de operación del amplificador a la región lineal. Desafortunadamente esto conlleva una pérdida de la eficiencia de potencia del

HPA . En este contexto, una medida útil del modo de funcionamiento del sistema es la **degradación total (TD)**, como función del OBO del HPA:

$$TD(dB) = SNR(dB) - SNRo(dB) + OBO(dB)$$

donde SNR(dB) es la relación señal a ruido en dB requerida a la entrada del detector para obtener una BER determinada (tomaremos BER=1e-4) para un valor dado de OBO, y SNRo(dB) es la relación señal a ruido en dB requerida para obtener la misma BER en ausencia de no linealidad.

El punto de operación óptimo (que conlleva la mejor relación entre potencia de salida y degradación por distorsión no lineal) corresponde al OBO(dB) que minimiza la función TD(dB).

3.4 MODELADO MATLAB DE LAS NO LINEALIDADES.

Vamos a usar las siguientes funciones, ya vistas en 2.2.6.2: **tbb.m**, **tbb1.m**, **tbb2.m**, **QAM.m**, **rbb.m**, **rbb1.m**, **dQAM.m**, y **genfilfir.m**. Además sustituiremos las funciones **canal.m** y **sistema.m** de 2.2.6.2 por las funciones **canalnoineal.m** y **sistemanolineal.m**, que vemos a continuación:

FUNCIÓN canalnoineal.m:

```
function [r,OBO,samp]=canalnoineal(s,ret,SNR,n,K,...
    alfa,IBO)

% [r,OBO,samp]=canalnoineal(s,ret,SNR,n,K,alfa,IBO)
%
% Parámetros de entrada:
%   s: señal procedente del transmisor digital
%   ret: n° de muestras de retraso que introduce
%       el canal
%   SNR: tras los procesos de filtrado (dB)
%   n: longitud de la respuesta impulsiva del
%       canal dispersivo
%   K: amplitud de la respuesta impulsiva del
```

```

%      canal dispersivo
%      alfa: coef. de caída de la respuesta
%      impulsiva del canal
%      dispersivo.
%      IBO: Input Back-off(dB).IBO=10log(Pin,sat/Pin).
%      Pin,sat=1 en modelo de Saleh
% Parámetros de salida:
%      r: señal de salida del canal
%      OBO: Output Back-off (dB).
%      OBO=10log(Pout,sat/Pout).
%      Pout,sat=1 en modelo de Saleh
%      samp: señal amplificada por el HPA
% El módulo canal realiza los siguientes procesos:
% - Modela las no linealidades en el HPA del
%   transmisor
% - Introduce un retraso puro
% - Filtra con  $h(n)=K \cdot \exp(-\alpha \cdot n)$ 
% - Introduce ruido AWGN complejo
%

% Normalizo la potencia de la señal s, para poder
% ajustar IBO
i=sqrt(-1);
pot=sum(abs(s(1:length(s))).^2)/length(s);
s=s./sqrt(pot);
ibo=10^(IBO/10);
s=s./sqrt(ibo);
pot_s=sum(abs(s(1:length(s))).^2)/length(s);
% Efectos no lineales del HPA
for k=1:1:length(s)
    [fase(k),modulo(k)]=...
        cart2pol(real(s(k)),imag(s(k)));
    modamp(k)=2*modulo(k)/(1+modulo(k)^2);
    faseamp(k)=...
        fase(k)+(pi/3)*(modulo(k)^2)/(1+modulo(k)^2);
    [sre(k),sim(k)]=pol2cart(faseamp(k),modamp(k));
    samp(k)=sre(k)+i*sim(k);
end
%cálculo de OBO
pot_samp=...
    sum(abs(samp(1:length(samp))).^2)/length(samp);
OBO=10*log10(1/pot_samp);

% Formación del filtro dispersivo de canal
l=0:n-1;
h=K.*exp(-alfa*l);
% Normalización del filtro dispersivo de canal
Eh=sum(abs(h).^2);
h=h*(1/sqrt(Eh));
% Formación del retraso puro
delta=zeros(1,ret+1);
delta(ret+1)=1;
% Proceso de filtrado
y=conv(delta,samp);
y=filter(h,1,y);
% Adición de ruido
randn('state',sum(100*clock))
nr=randn(1,length(y));
ni=randn(1,length(y));
n=nr+i*ni;
n=n*(1/std(n));

```

```

R=pot_samp/(10^(SNR/10));
n=n*sqrt(R);
r=y+n;
% supongo existe bloque CAGC (control automático
% de ganancia) en el RX
pot_r=sum(abs(r(1:length(r))).^2)/length(r);
r=r./sqrt(pot_r);
r=r.*sqrt(pot);

```

FUNCIÓN `sistemanolineal.m`:

```

function ber=sistemanolineal(Nt,Ncp,ret,SNR,n,K,alfa,IBO)
%ber=sistemanolineal(Nt,Ncp,ret,SNR,n,K,alfa,IBO)
[so,men]=tbb(Nt,Ncp);
[soc,OBO,samp]=canalnolineal(so,ret,SNR,n,K,alfa,IBO);
origen=ret+1;
[sd,ber,scons]=rbb(soc,origen,men,Ncp,Nt);
keyboard

```

Para representar las constelaciones usaremos la misma función que en 2.2.6.2 pero añadimos una cuadrícula a la gráfica, luego la función usada será **dibcons.m** que se mostrará a continuación. Para obtener la densidad espectral de potencia usaremos la función **depnolin2.m** (hace uso de `genfiltfir.m`), que también se muestra a continuación (NOTA: **depnolin2.m** muestra la cota superior impuesta por Hiperlan/2, y la cota inferior correspondiente al sistema lineal visto en 2.2.6.3):

FUNCIÓN `dibcons.m`:

```

function nada=dibcons(scons)
plot(real(scons),imag(scons),'.',(-3,-3),(-4,4),...
      (-1,-1),(-4,4),(1,1),(-4,4),(3,3),(-4,4),...
      (-3,3),(3,3),(-3,3),(1,1),(-3,3),(-1,-1),(-3,3),(-3,-3));
axis square;

```

FUNCIÓN `depnolin2.m`:

```

function sa=depnolin2(IBO,so)
% sa=depnolin2(IBO,so)

```

```

%Parámetros de entrada:
% IBO,so: son variables obtenidas al simular el
% sistema no lineal.
%Parámetros de salida:
% sa: se usará para ver los efectos no lineales en
% el dominio temporal.
%sobremuestreo por factor de 4
for k=0:1:length(so)-1
    soint(k*4+1)=so(k+1);
    soint(k*4+2:1:(k+1)*4)=0;
end

%filtrado con LPF FIR (fase lineal),
%BW=10 Mhz y Fsam=4*20e6 Hz
[hlp,n]=genfiltfir(40,2,pi/4,pi/4);
sofil=conv(soint,hlp);
pot=sum(abs(sofil(1:length(sofil))).^2)/length(sofil);
sofil=sofil./sqrt(pot);
ibo=10^(IBO/10);
sofil=sofil./sqrt(ibo);

% Efectos no lineales del HPA
i=sqrt(-1);
for k=1:1:length(sofil)
    [fase(k),modulo(k)]=...
        cart2pol(real(sofil(k)),imag(sofil(k)));
    modamp(k)=2*modulo(k)/(1+modulo(k)^2);
    faseamp(k)=...
        fase(k)+(pi/3)*(modulo(k)^2)/(1+modulo(k)^2);
    [sr(k),si(k)]=pol2cart(faseamp(k),modamp(k));
    sa(k)=sr(k)+i*si(k);
end

[espectro,f]=psd(real(sofil),1024,4*20e6);
[especamp,f]=psd(real(sa),1024,4*20e6);

espneg=flipud(espectro);
espneg=espneg(1:512);
espnegamp=flipud(especamp);
espnegamp=espnegamp(1:512);

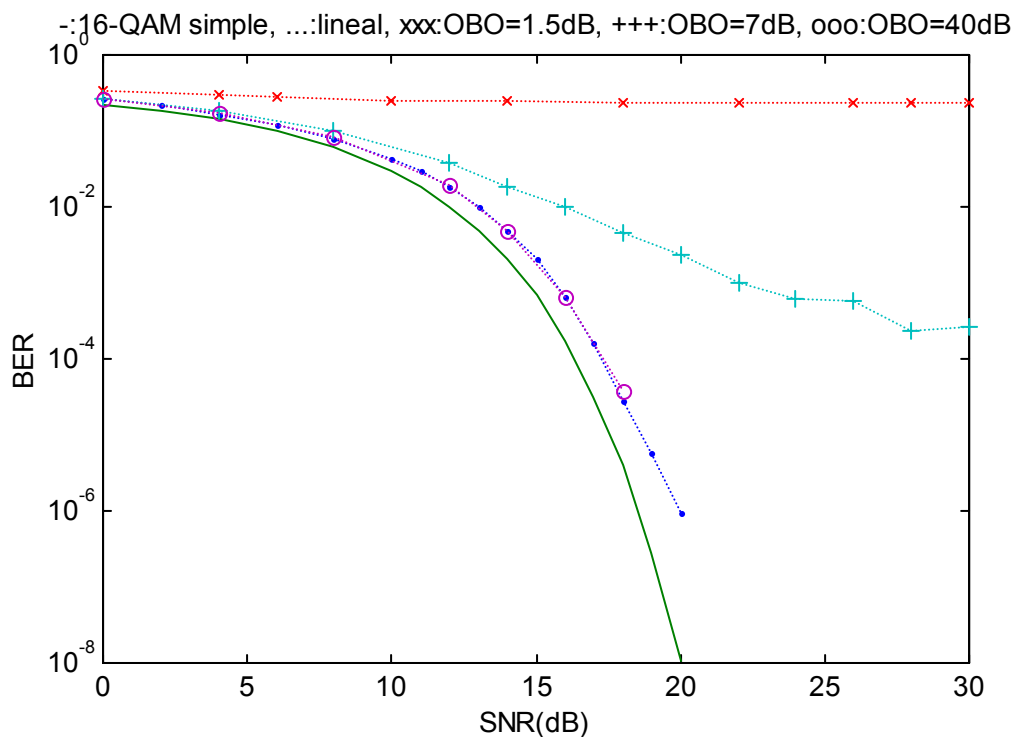
fneg=-flipud(f);
fneg=fneg(1:512);
ftotal=[fneg;f];
%a continuación incluimos el efecto de un
%mantenedor de orden cero
esptotal=[espneg;espectro].*20e6.*...
    abs((sin(pi.*ftotal./20e6)./(pi.*ftotal)));
esptotalamp=[espnegamp;especamp].*20e6.*...
    abs((sin(pi.*ftotal./20e6)./(pi.*ftotal)));

fhiper=[-40,-30,-20,-11,-9,9,11,20,30,40];
fnorm=ftotal./1e6;
specmask=[-40,-40,-28,-20,0,0,-20,-28,-40,-40];
plot(fhiper,specmask,fnorm,(-7+IBO+10*log10(esptotal)),...
    fnorm,(-7+IBO+10*log10(esptotalamp)),'--');
axis([-40,40,-150,10]);

```

3.5 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DEL SISTEMA OFDM CON AMPLIFICADOR NO LINEAL.

Los parámetros usados para las simulaciones son idénticos a los usados en 2.2.6.3, con el añadido del valor de IBO(dB) seleccionado para cada simulación. El valor de OBO(dB) es una variable de salida de la simulación. Las simulaciones dieron como resultado los valores de BER que se muestran en la gráfica siguiente junto con los obtenidos para el caso lineal en el apartado 2.2.6.3:

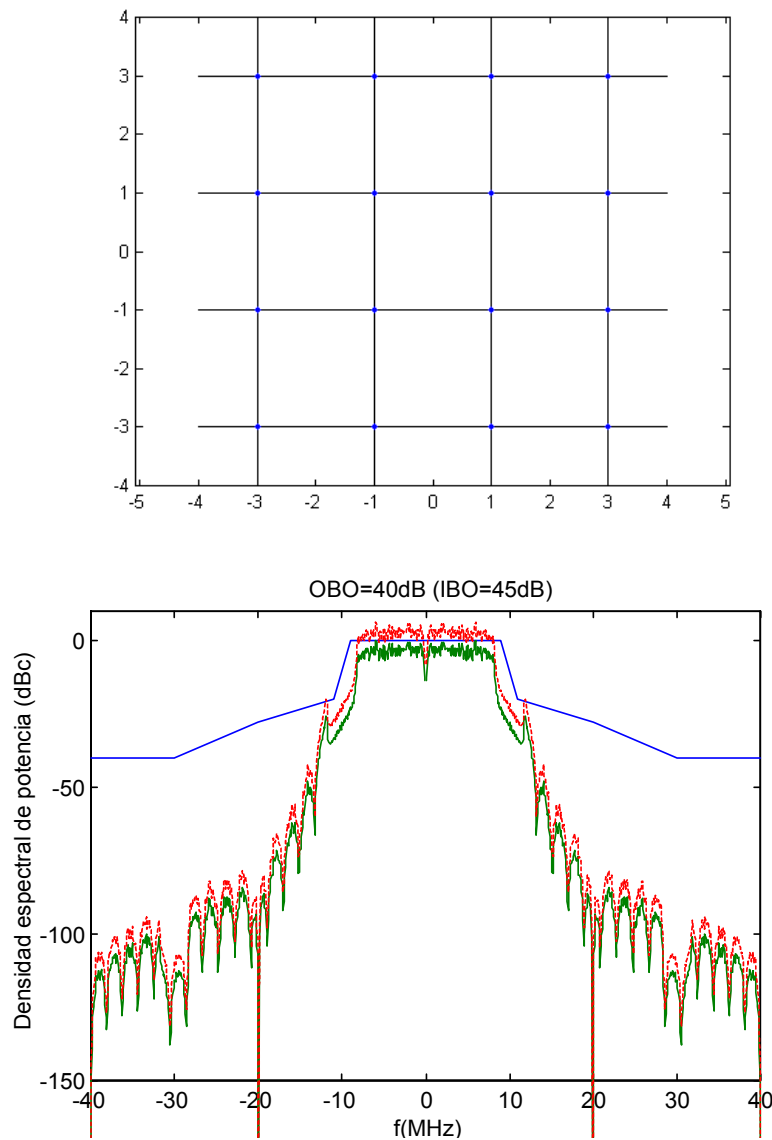


Vemos que para OBO=40dB, el sistema no lineal se comporta prácticamente como el lineal.

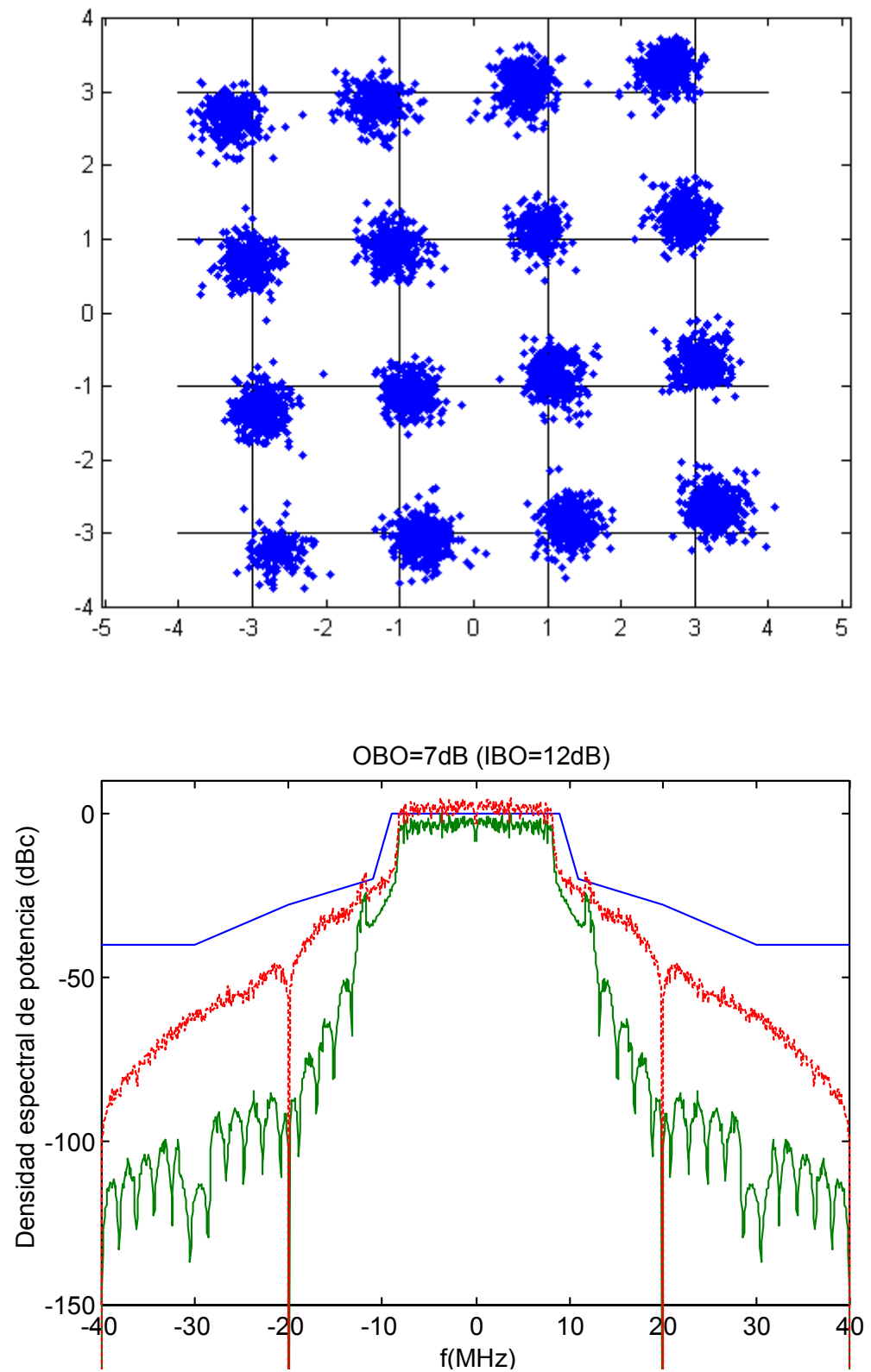
A continuación veremos cómo se altera la constelación de los símbolos 16-QAM recibidos y la densidad espectral de potencia de la señal transmitida al ir aumentando la

no linealidad (disminuyendo el IBO, y por lo tanto el OBO). Para poder tener certeza de que los cambios que se producen en las gráficas son debidos a las no linealidades y no al canal AWGN, hemos tomado $\text{SNR}=500\text{dB}$ en las siguientes simulaciones. (**NOTA:** En las 4 gráficas de densidad espectral de potencia que veremos la línea inferior es la del sistema lineal, la intermedia la del no lineal, y el tramo rectilíneo es la cota superior que aconseja no superar la norma Hiperlan/2).

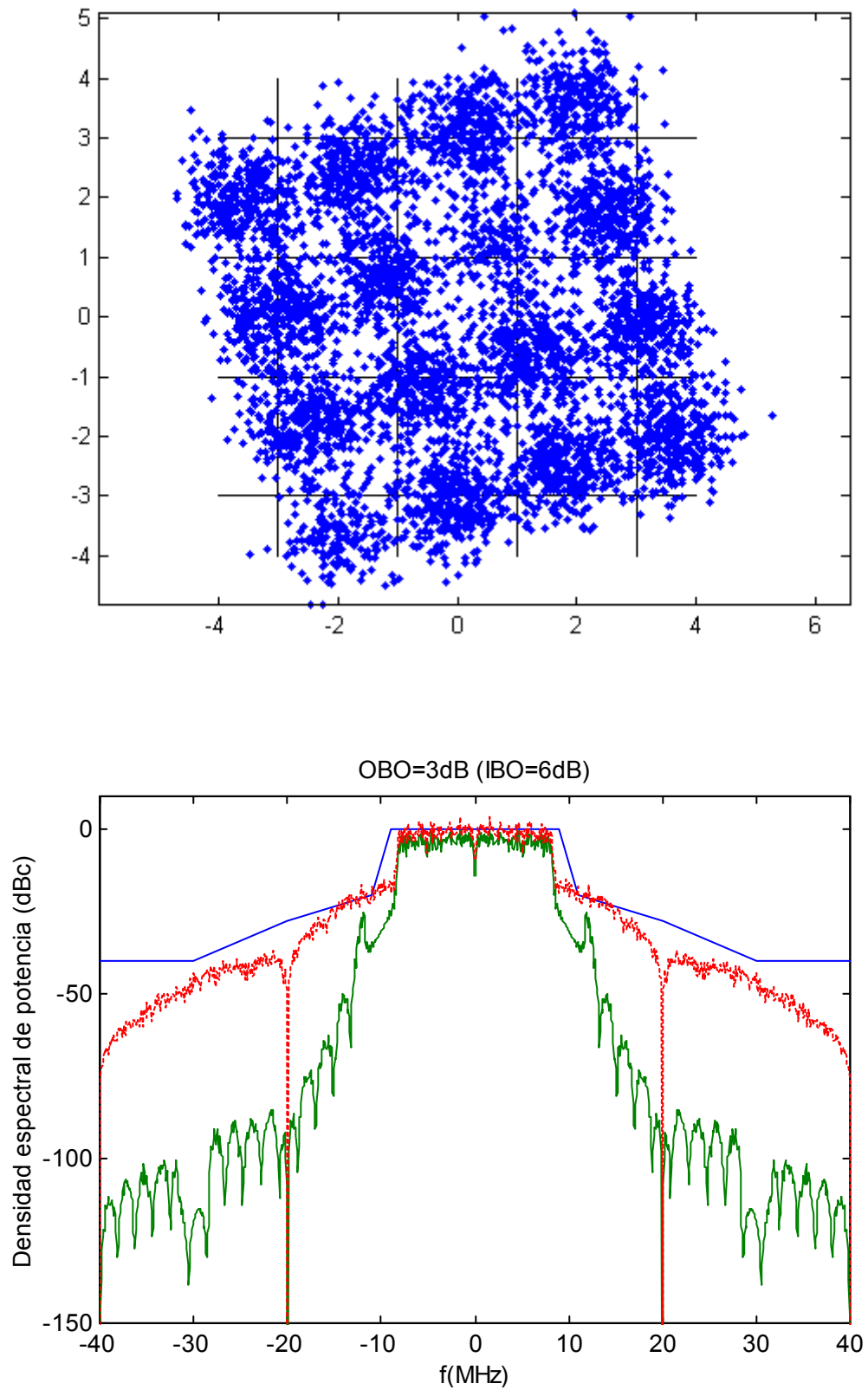
- **Constelación y espectro para $\text{OBO}=40\text{dB}$ ($\text{IBO}=45\text{dB}$), $N_t=100$, $\text{SNR}=500\text{dB}$**



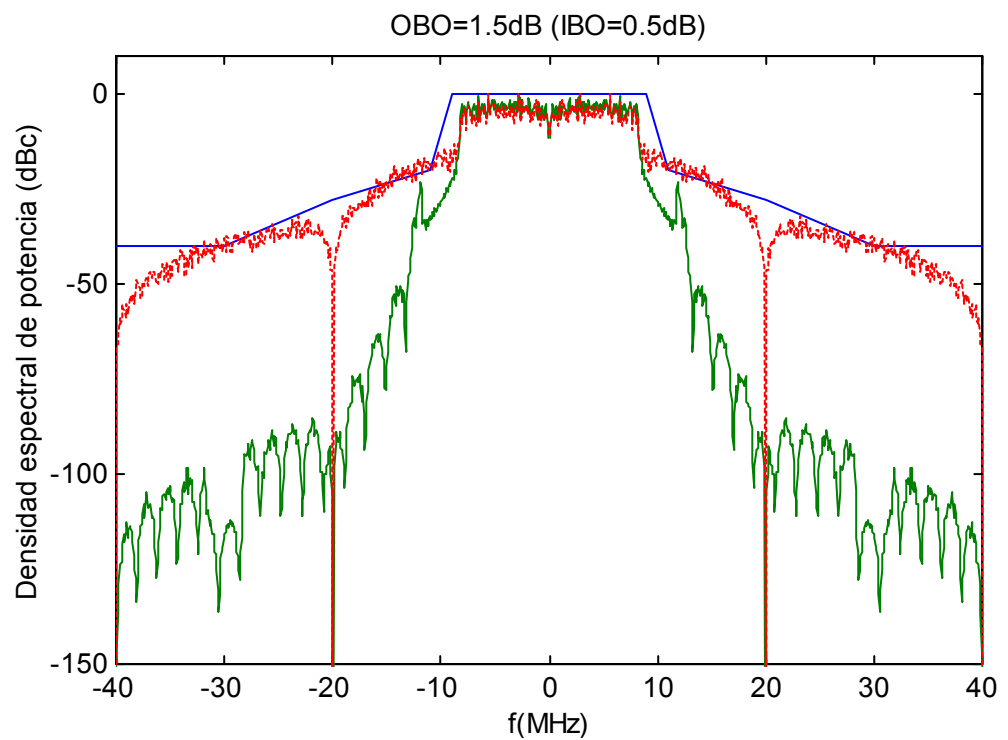
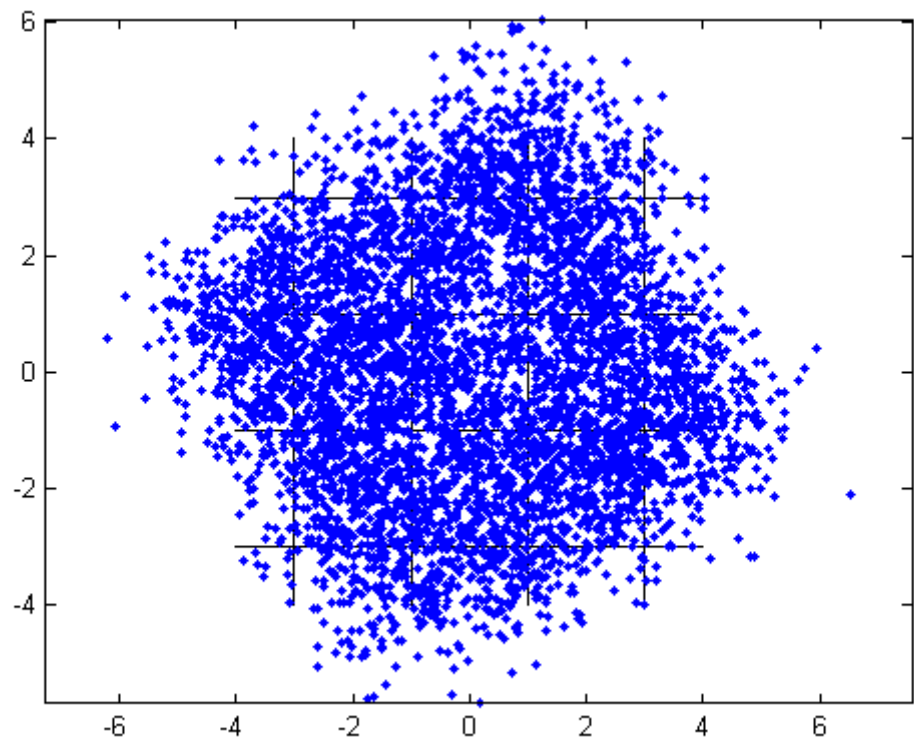
- **Constelación y espectro para OBO=7dB (IBO=12dB), $N_t=100$, SNR=500dB**



- **Constelación y espectro para OBO=3dB (IBO=6dB), $N_t=100$, SNR=500dB**



- **Constelación y espectro para OBO=1.5dB (IBO=0.5dB), $N_t=100$, SNR=500dB**



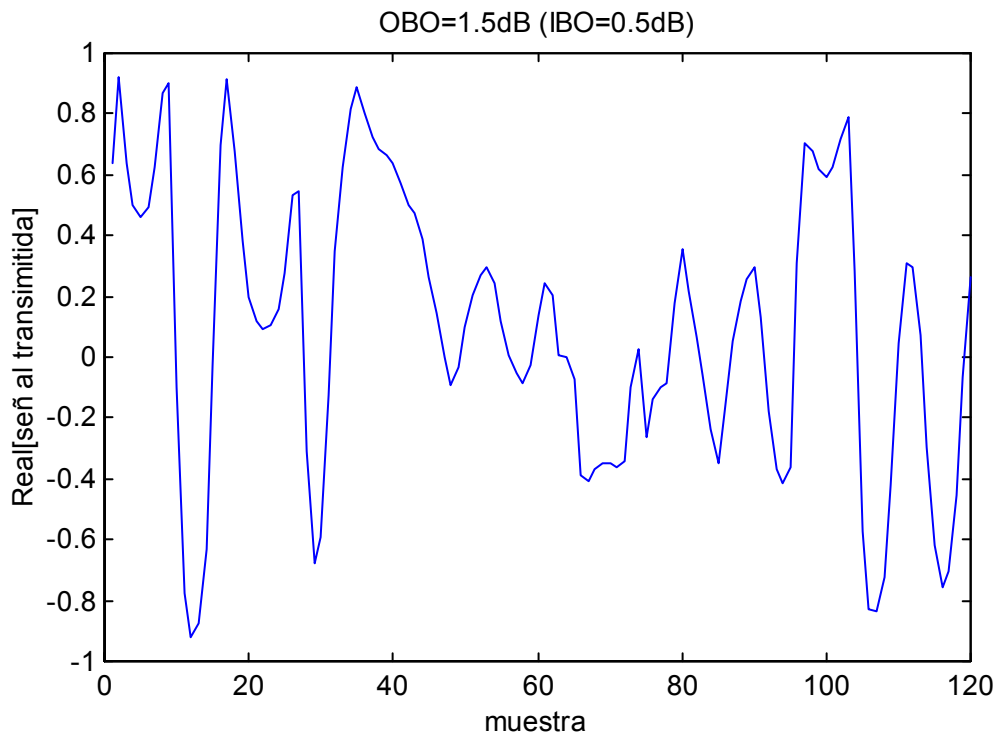
Por otro lado también se pueden ver los efectos de las no linealidades sobre la forma de la señal transmitida (en el dominio temporal). Para ello hacemos en el fichero `tbb.m` que la secuencia de información sea determinista, para poder comparar varias simulaciones con distintos IBO. Lo anterior se consigue haciendo que el nuevo valor de la variable `sinf` de `tbb.m` sea de la siguiente forma:

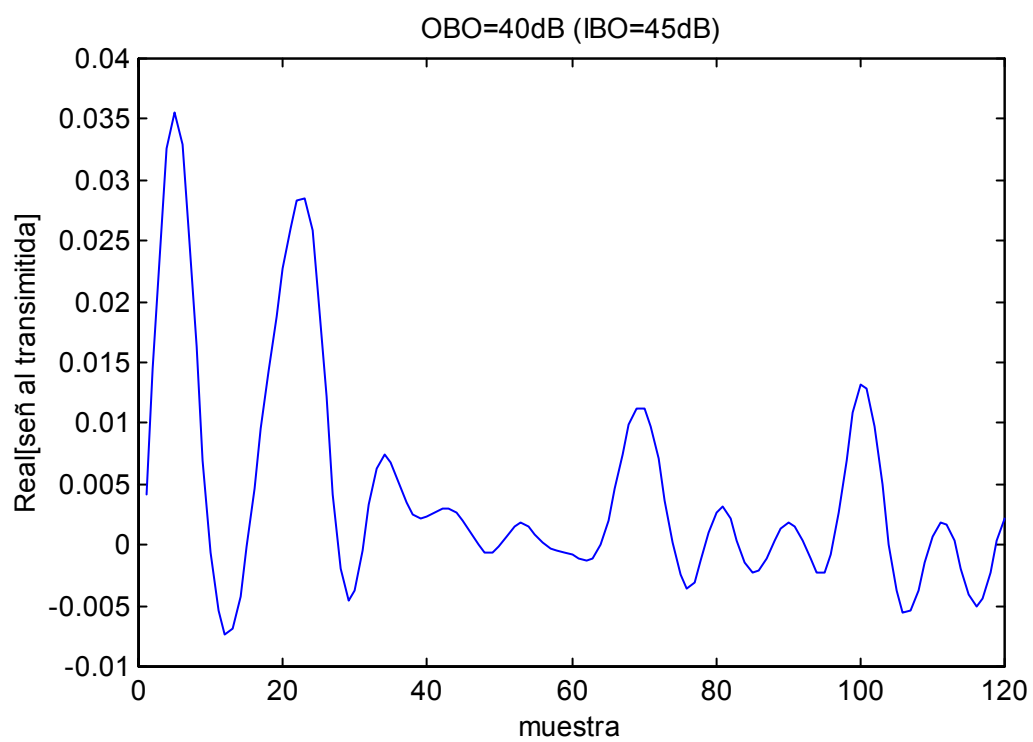
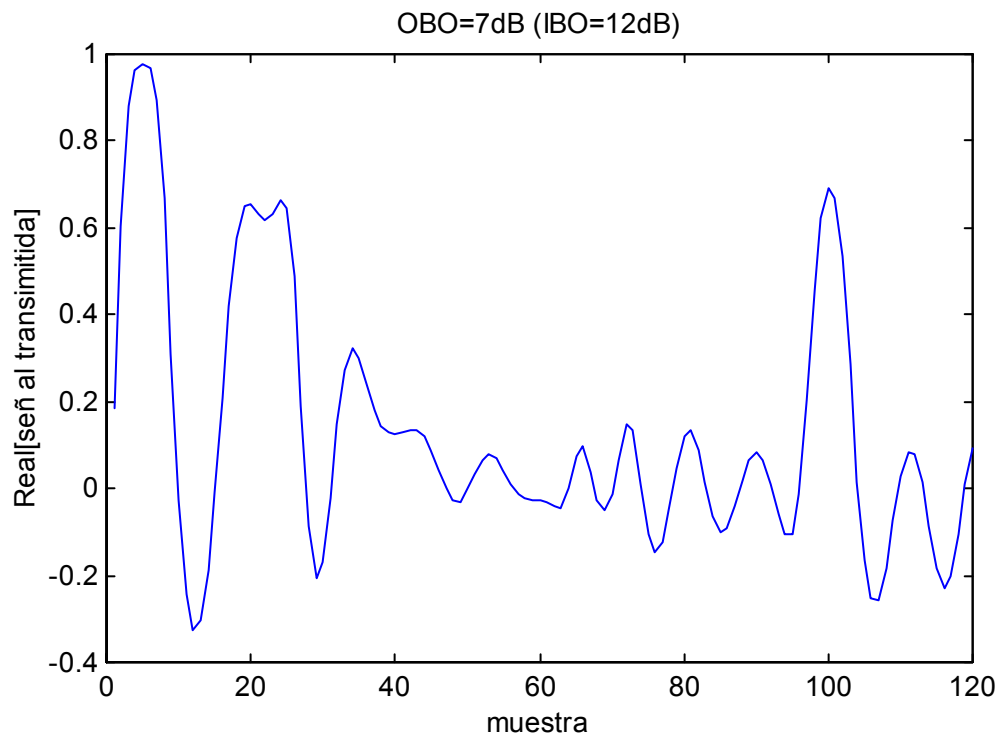
```
sinf=[(0:15),(0:15),(0:15),(0:15),(0:15),(0:15),(0:7),round(rand(1,N*Nt-104)*15)];
```

Después ejecutamos:

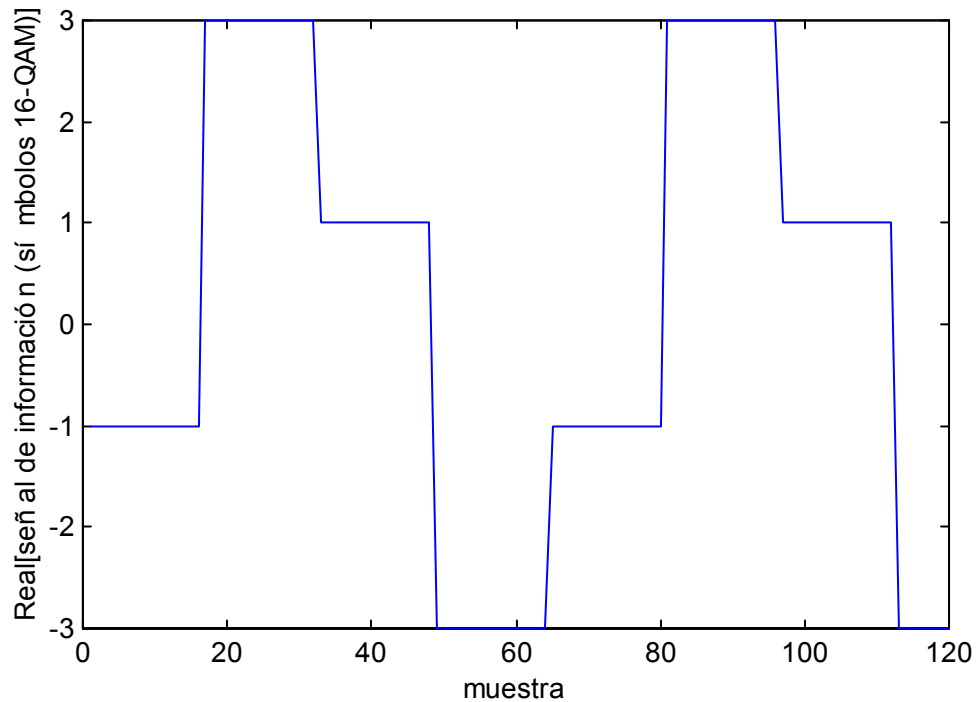
```
sistemanolineal(30,16,0,30,1,1,0,IBO);
sa=depnolin2(IBO,so);
plot((1:120),real(sa(321:440)));
```

Debido al sobremuestreo por 4 que se realiza en `depnolin2.m`, lo anterior corresponde a representar 30 símbolos 16-QAM (4-15,0-15,0,1). Así, se obtuvieron las siguientes gráficas para varios valores de IBO:





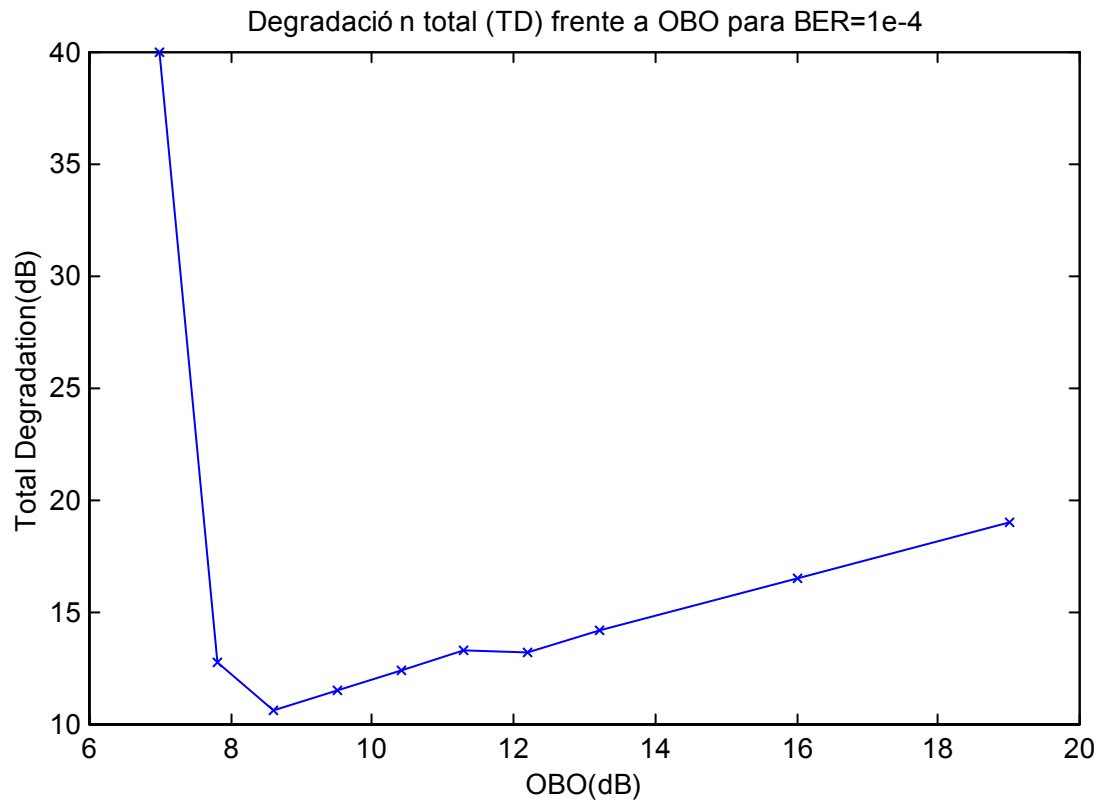
A continuación dibujamos la parte real de los símbolos 16-QAM transmitidos (interpolados por 4), correspondientes a las gráficas anteriores. Para ello usamos la función **tiempoaux.mat**, que se muestra después de la gráfica:



FUNCIÓN tiempoaux.mat:

```
%Ponemos en aux1 la parte real de los
%símbolos 16-QAM [(4:15) (0:15) 0 1] que se obtiene
%de la constelación usada en el módulo QAM
aux1=[-1 -1 -1 -1 3 3 3 3 1 1 1 1 -3 -3 -3 -3 ...
-1 -1 -1 -1 3 3 3 3 1 1 1 1 -3 -3];
for k=0:length(aux1)-1
    aux2(k*4+1:1:k*4+4)=aux1(k+1);
end
plot([1:120],aux2)
```

Por último, haciendo las simulaciones necesarias para obtener la **distorsión total** (TD) obtuvimos la siguiente gráfica:



Vemos que si trabajamos con un $OBO=8.5\text{dB}$ se obtendría el mínimo de TD. Dicho valor de OBO serviría como referencia a la hora de configurar el punto de trabajo de un sistema 16-QAM-OFDM con amplificador TWT.

3.6 CONCLUSIONES.

Después de ver los resultados del apartado anterior, se deduce que los efectos del amplificador no lineal sobre el sistema OFDM fueron:

- Generación de nubes en la constelación entorno a los símbolos 16-QAM ideales.
- Atenuación uniforme, que nosotros hemos corregido con un control automático de ganancia implementado en la función `canalnoideal.m`.

- Una rotación de la constelación.
- Un suave “warping” (o curvatura) de la forma teórica rectangular que debería tener la constelación.
- Ensanchamiento de la densidad espectral de potencia en alta frecuencia, mayor cuanto más no lineal es el sistema.

