

Interferencia entre Símbolos

Introducción

En esta práctica se analiza la Interferencia entre Símbolos (ISI en inglés) que un canal limitado en ancho de banda introduce sobre la señal que por él se transmite.

Tal y como se ha visto en teoría, la consecuencia de limitar el ancho de banda de un canal cuando se transmiten símbolos utilizando pulsos temporales es el ensanchamiento de dichos pulsos. Este ensanchamiento produce un solape temporal en el receptor que le dificulta la correcta detección. Las figuras siguientes representan este efecto.

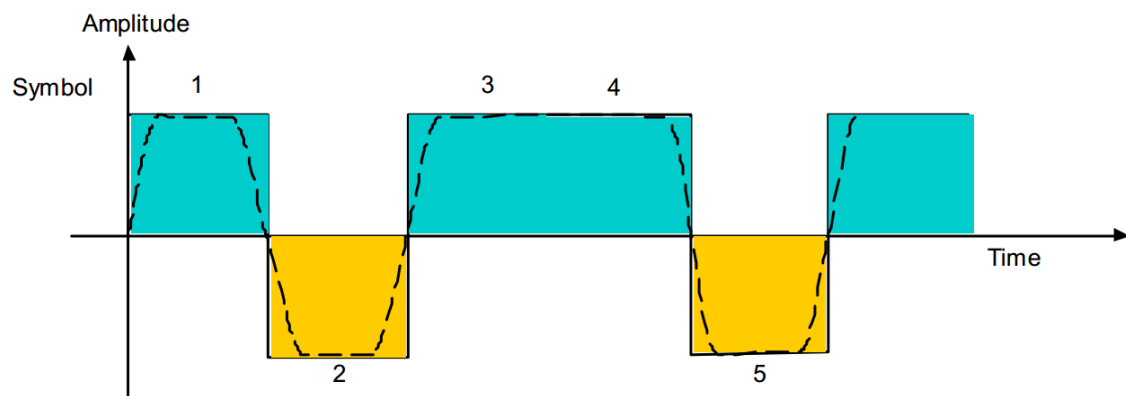


Figure 1 - Ejemplo de símbolos transmitidos.

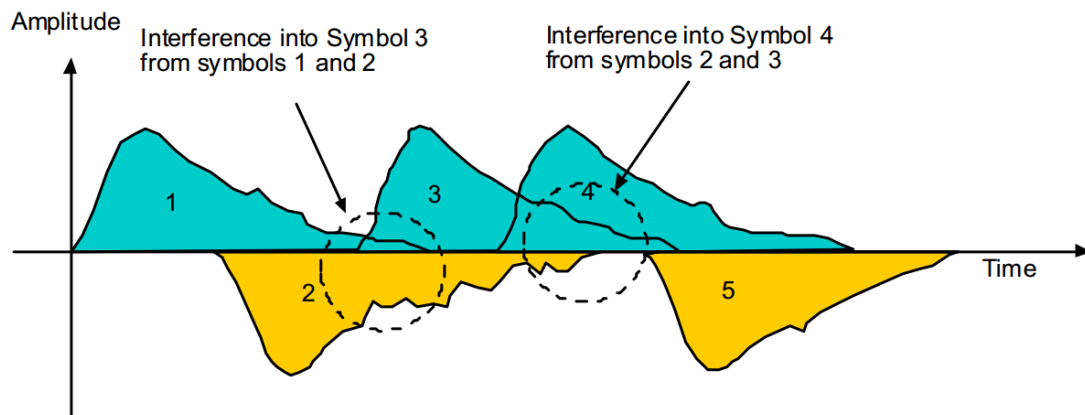


Figure 2 - Ejemplo de símbolos recibidos con ISI.

1. Respuesta impulsional y en frecuencia de varios filtros

En el apartado 1 de Practica_ISI se definen cuatro filtros paso bajo diferentes. Al ejecutarlo se generan varias gráficas.

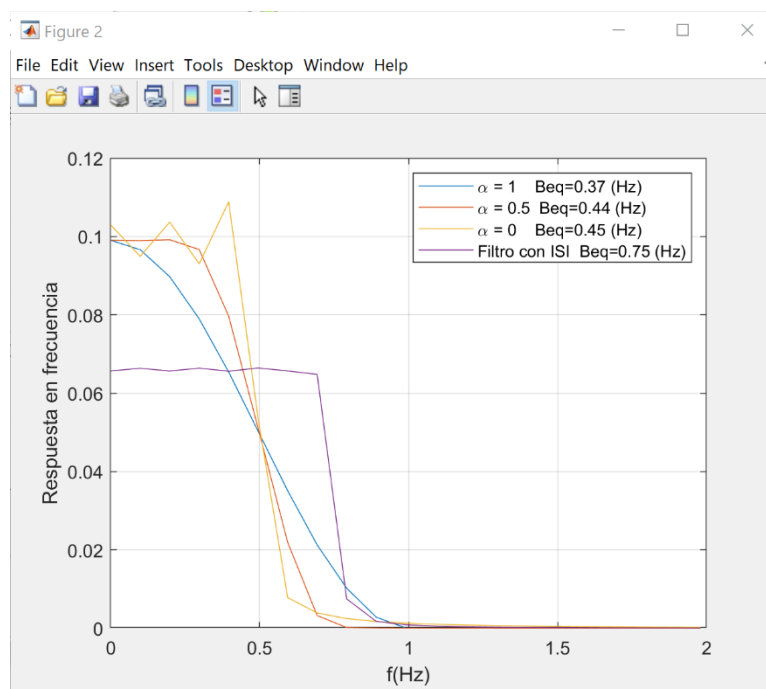
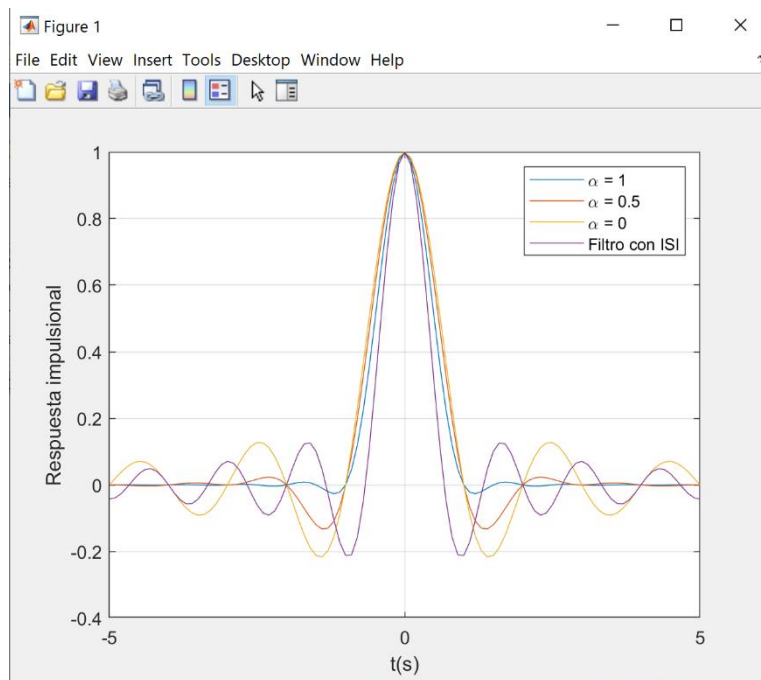
1. Comente la bondad relativa de los cuatro filtros para la transmisión en banda base en función de los criterios que estime conveniente.

Los tres primeros filtros son filtros de coseno alzado, los cuales reducen el ISI al mínimo en condiciones ideales al ser cero en múltiplos del periodo de muestreo. En frecuencia funcionan como filtro paso bajo. Se diferencian en el parámetro de roll-off (α), el cual mide el exceso de ancho de banda por encima del criterio de Nyquist. Cuanto mayor sea α , mayor es el ancho de banda. Esto tiene el inconveniente de que se debe comprar una banda más ancha para transmitir si no se quiere correr el riesgo de ocupar canales contiguos, causando interferencias.

- $\alpha 0$ -> filtro irrealizable debido a que la longitud temporal es infinita. Además, los lóbulos caen muy lentamente. Sin embargo, es el que menos ancho de banda necesita (Beq).
- $\alpha 0.5$ -> filtro realizable, los lóbulos caen más rápido que el caso anterior, y además tiene el mismo Beq. Es la opción que más se suele utilizar en la práctica.
- $\alpha 1$ -> filtro realizable, la cola cae más rápido (lóbulos), por lo que ante posibles imperfecciones responde mejor. Sin embargo, es el que más ancho de banda ocupa, con las consecuencias mencionadas en el párrafo anterior.

Por otro lado, el cuarto filtro corresponde a un filtro con ISI. Este filtro causa interferencia intersimbólica porque no se hace cero en múltiplos de $1/T_s$. Esta ISI causará un aumento importante en la BER. Además, es el que más ancho de banda ocupa, por lo que no se recomienda utilizarlo.

A continuación, se muestra la comparativa de los 4 filtros tanto en tiempo como en frecuencia:

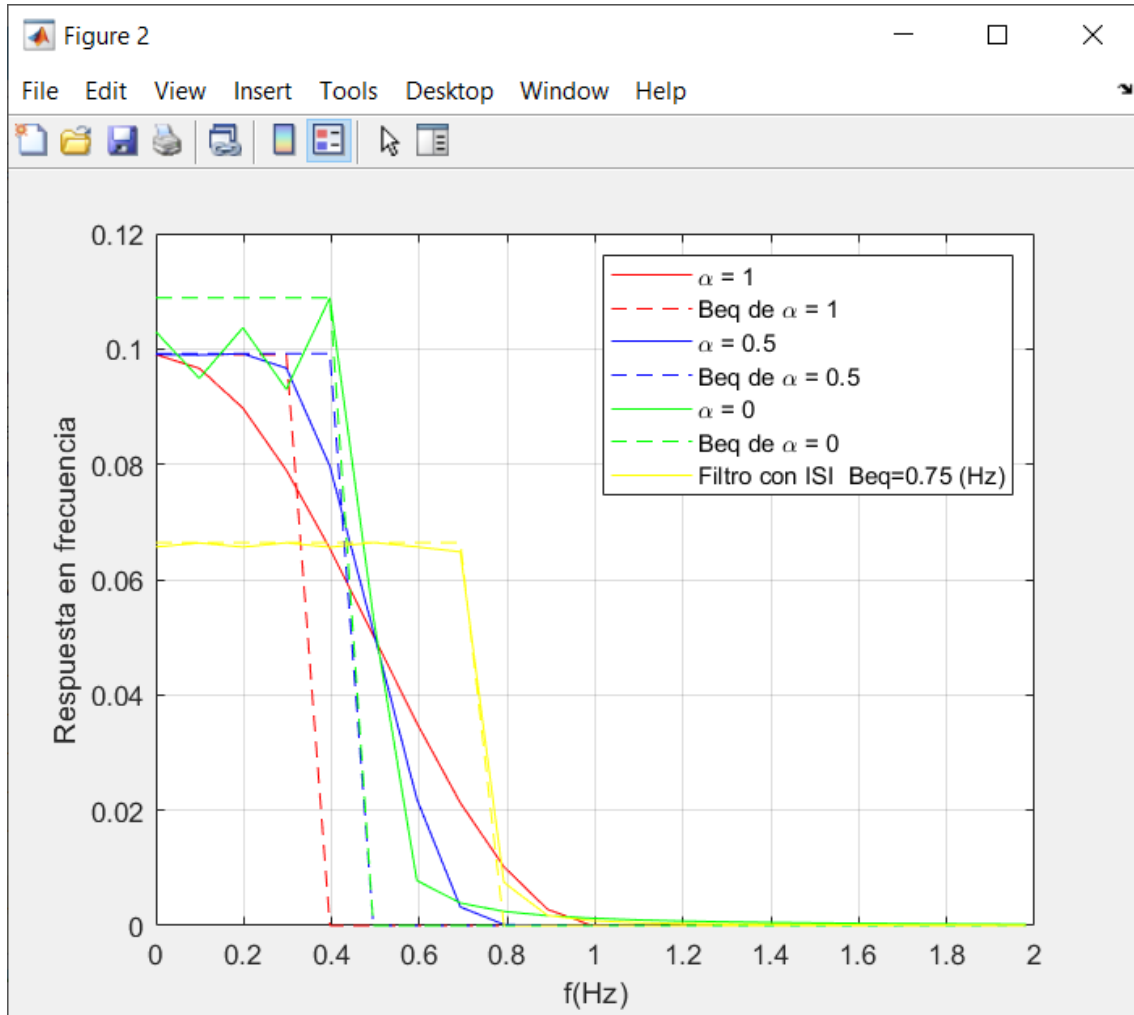


2. Comente los resultados de las gráficas 1 y 2. A la vista de lo que está programado, ¿qué es el ancho de banda equivalente de ruido de los filtros?

El Beq corresponde al ancho de banda utilizado por un filtro rectangular que deja pasar la misma cantidad de potencia que el ancho de banda acumulado del canal.

Los resultados obtenidos al calcular el Beq para cada filtro son:

- $\alpha = 0$: 0.37 Hz
- $\alpha = 0.5$: 0.44 Hz
- $\alpha = 1$: 0.45 Hz
- ISI: 0.75 Hz

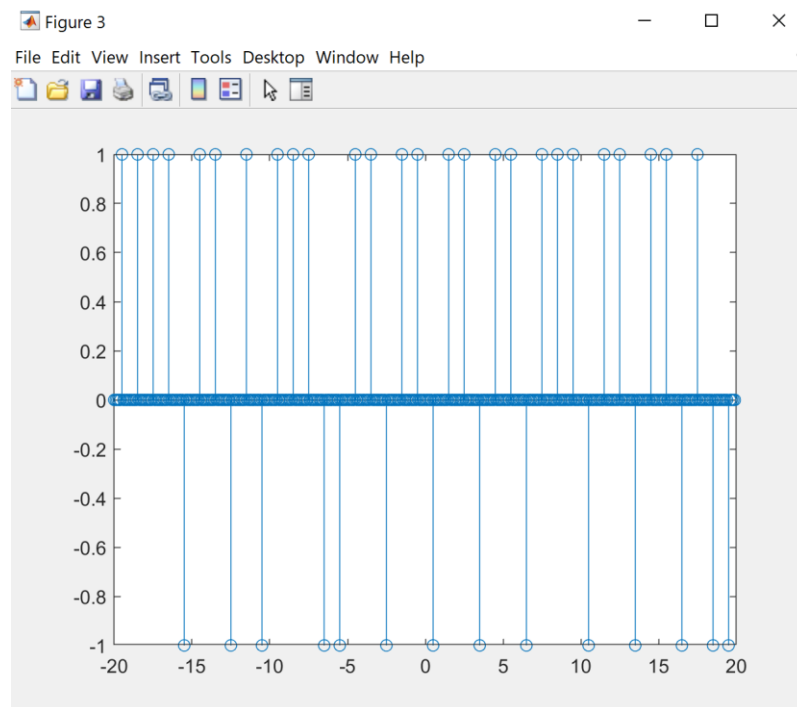


El filtro con 0 roll-off es el que menor Beq tiene y el filtro con ISI el que más. Este resultado concuerda con las gráficas del apartado anterior en las que se observaba que cuanto mayor es α , mayor ancho de banda tiene el filtro y que el filtro con ISI era el que más ancho de banda tenía. En la gráfica se puede observar la relación entre cada filtro y su Beq.

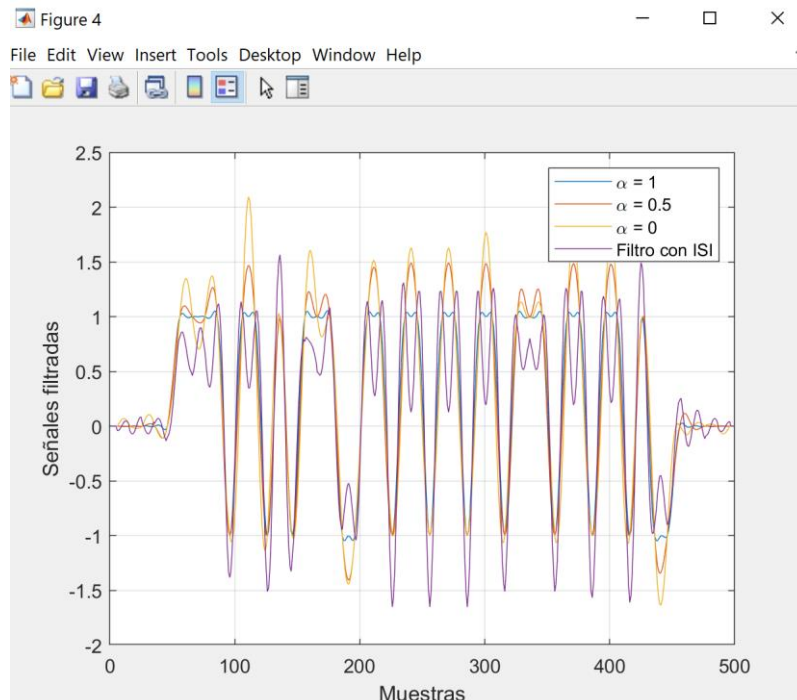
2. Estudio del ISI sin ruido por medio de diagramas de ojo

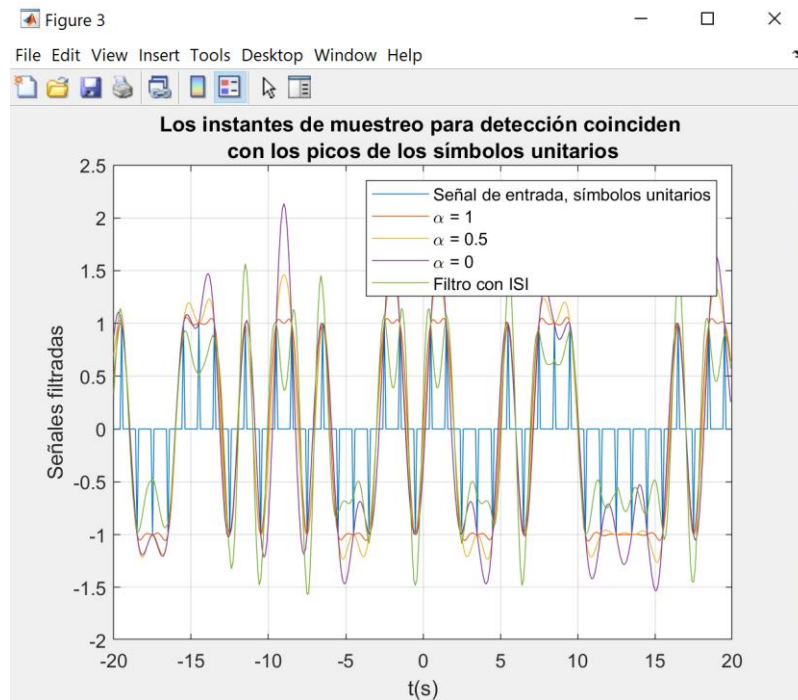
En el apartado 2 se generan los diagramas de ojo resultantes de transmitir una secuencia de impulsos unitarios, lo que se podrían llamar deltas digitales, a través de los cuatro filtros.

3. Comente las Figuras 3, 4 y 5.



Esta figura corresponde a la secuencia de impulsos (deltas de Kroneker) aleatorios (alfabeto ± 1) del vector de entrada.





En estas figuras se comparan el tren de deltas a la entrada de los filtros con la secuencia de símbolos a la salida estos. Se puede observar que en el caso del filtro con ISI los valles y los picos no coinciden con las deltas a diferencia de en el resto de los filtros. Esto se debe al hecho de que no se hace cero en múltiplos de f_s , por lo que cada muestra encuentra interferencias de los símbolos adyacentes.

Además, con $\alpha = 0$, se producen sobreimpulsos, ya que la amplitud aumenta respecto a las deltas de entrada. La amplitud no es constante para todas las deltas.

En el caso de $\alpha = 0.5$, la amplitud es más constante y más ajustada a las deltas originales. Por último, con $\alpha = 1$, el filtro se ajusta muy bien a la secuencia de deltas, con amplitud prácticamente cte. Por tanto, detecta todos los picos de las deltas. Debido a esto, será considerablemente más difícil recuperar la señal original.

En cuanto al resto de símbolos, aunque las amplitudes son distintas para cada uno, los máximos se encuentran sincronizados con las deltas, por lo que a la hora de tomar la decisión sobre cuál fue el símbolo enviado se elegirá el correcto (el más cercano).

4. Relacione los sobreimpulsos con el valor de α . A nivel cualitativo, ¿qué impacto puede tener el sobreimpulso sobre la BER, cuando en los filtros entra no solamente señal, sino también ruido?

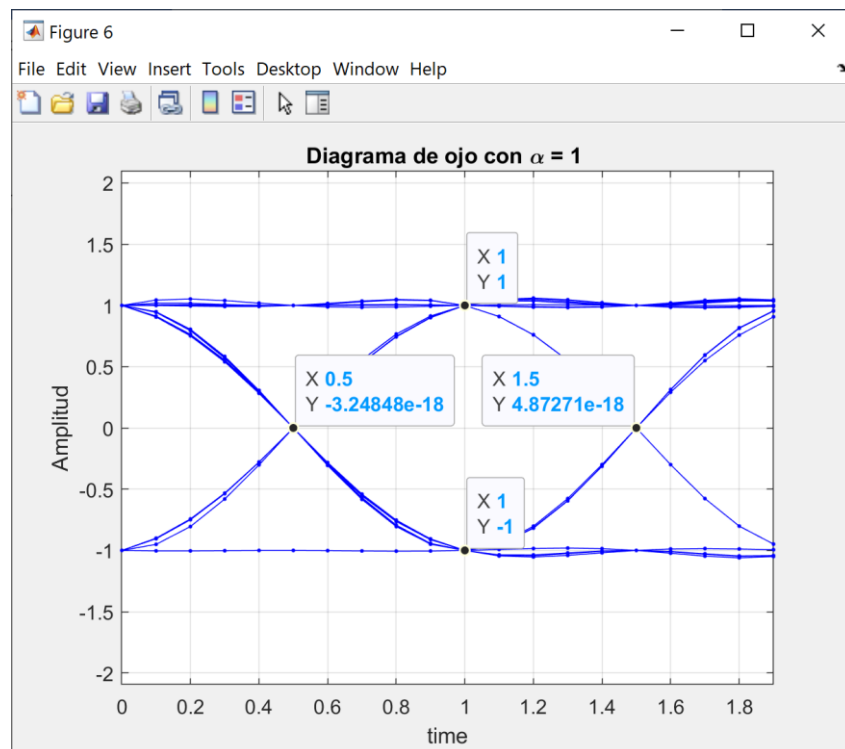
Como se ha observado en las gráficas anteriores, cuanto menor es el α , mayor es el sobreimpulso. En el caso de que no exista ruido, el sobreimpulso no afecta a la BER, ya que en todo caso contribuye a separar todavía más los símbolos. Sin embargo, en presencia de ruido, el sobreimpulso aumenta la amplitud de este (de forma no constante), y en consecuencia la BER aumenta.

5. ¿Cómo se generan los diagramas de ojo?

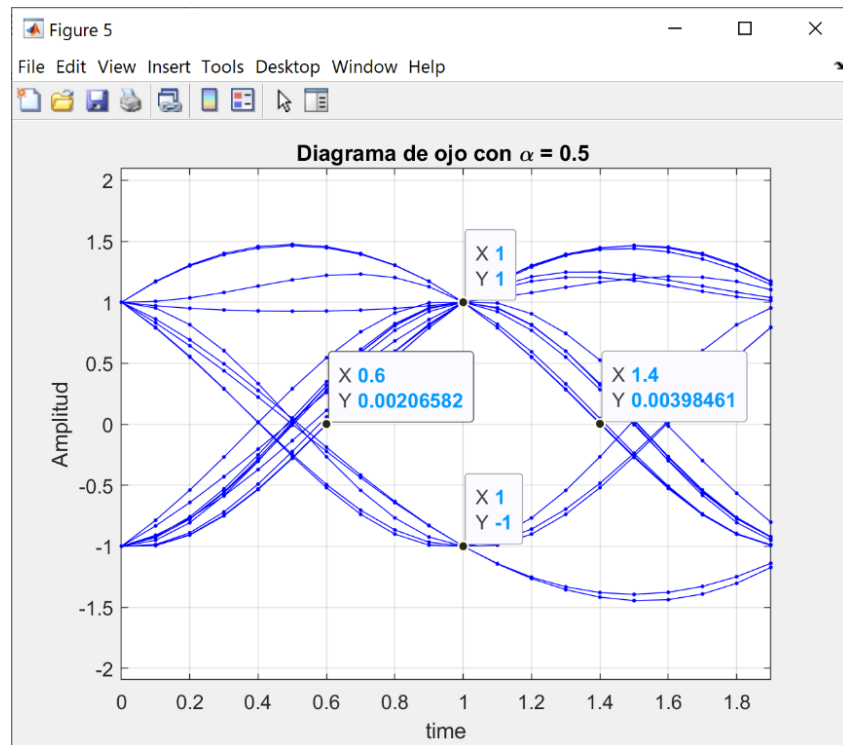
Los diagramas de ojo sirven para poder medir de forma cualitativa la calidad de las transmisiones, en especial comprobar la presencia de ISI. Se llaman así por su forma característica que recuerda a un ojo abierto.

Para generarlos, se superponen los símbolos obtenidos a la salida del filtro durante 2 periodos de símbolo (2s). Cuanto más abierto esté el ojo más fácil resulta detectar el valor correspondiente de los símbolos, sobre todo en presencia de ruido o de ISI. Cuanto mayor es el ancho de banda del filtro, más apertura tiene el ojo.

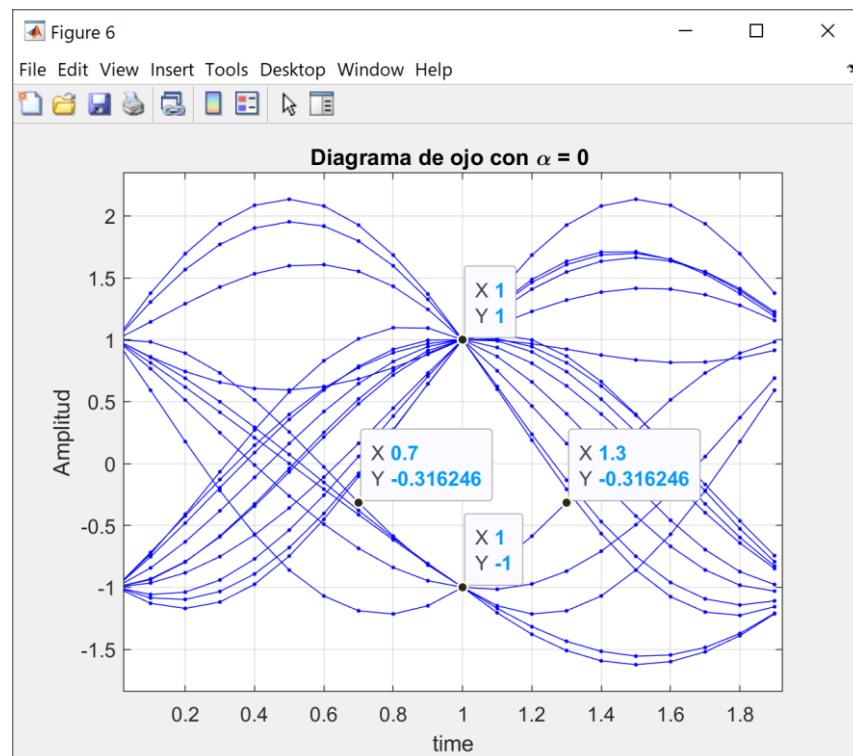
6. Por inspección sobre las gráficas que se generan, indicar las aperturas de los diagramas de ojo en amplitud y tiempo.



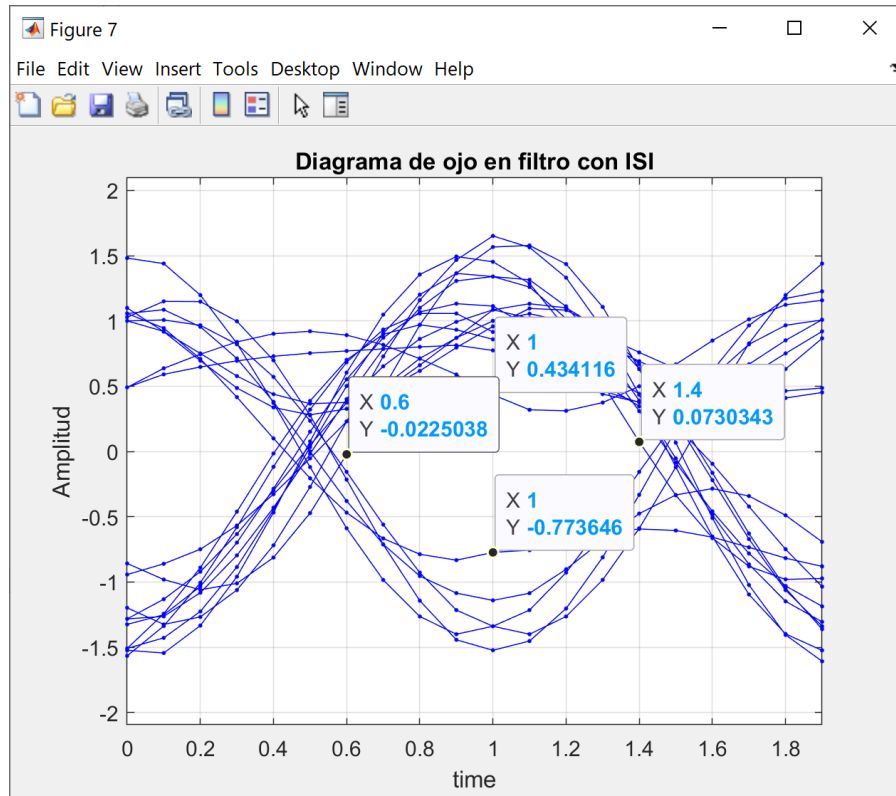
En el caso $\alpha = 1$, el ojo está más abierto, lo que supondrá una BER menor. Para $t=1$, la apertura en amplitud es 2 y en tiempo es 1s.



En el caso de $\alpha 0.5$, se observa un ligero sobreimpulso. Para $t=1$, la apertura en amplitud es 2, y en tiempo 0.8. Se cierra ligeramente en tiempo.



En el caso de $\alpha = 0$, se observa perfectamente el sobreimpulso con el diagrama de ojo. La apertura en amplitud es 2 y en tiempo es 0.5, por lo que se cierra en tiempo. Es importante destacar que en este instante no hay sobremodulación. Si se escogiese otro (por ejemplo 0.6), la apertura en amplitud sería mucho mayor (>3).



Cuanto más cerrado es el ojo, más probable es una detección errónea en presencia de ruido, por lo que el BER será mayor. En este caso, ocurre con el filtro ISI. Para $t=1$, la apertura en amplitud 1.2 y en tiempo es 0.8.

3. Efecto del ruido en el diagrama de ojo

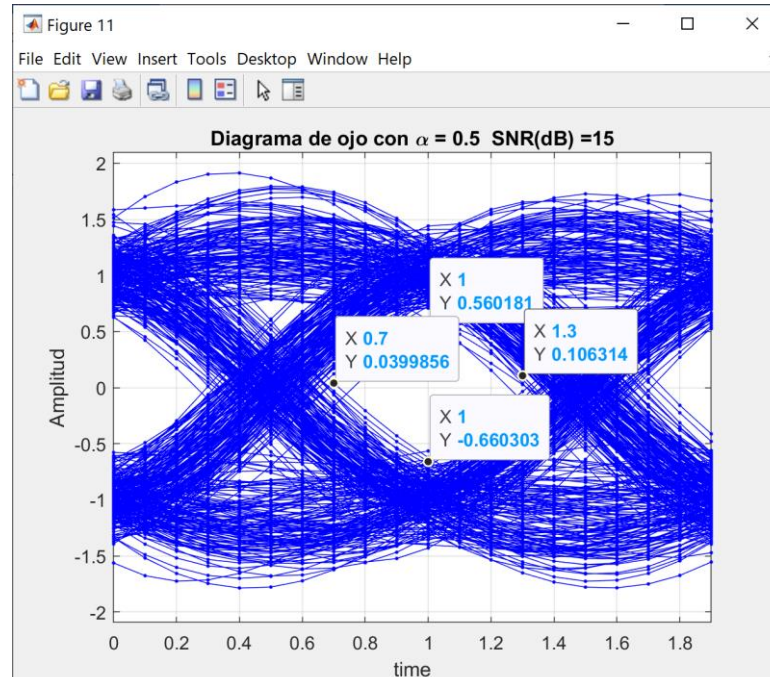
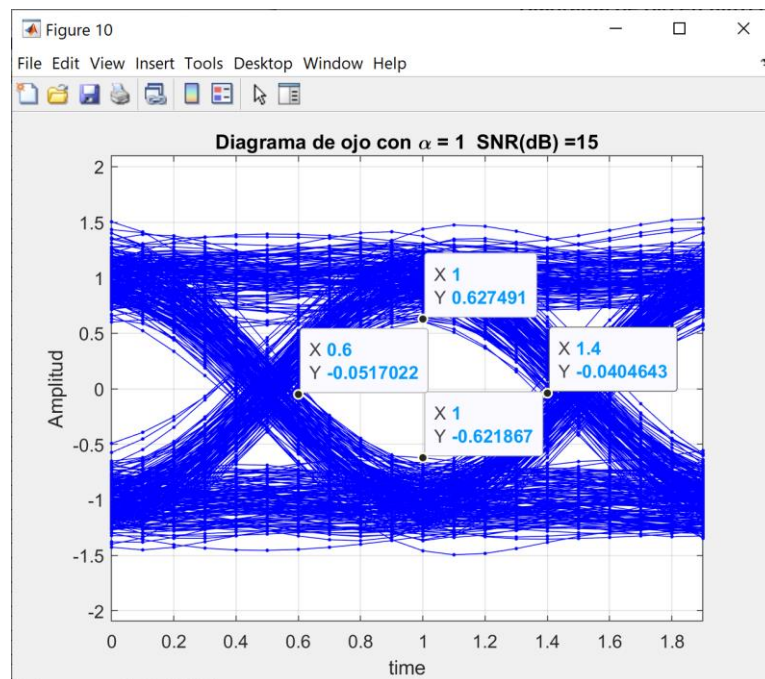
- Indique lo que se realiza en este apartado y los resultados que se obtienen. Realice una comparación entre código y resultados del apartado con los del apartado anterior.

Se introduce un ruido blanco gaussiano junto a la señal aleatoria con $\text{SNR}=15$ db (bastante alta) antes de filtrar. Se utilizan 1000 símbolos para que sea más apreciable el efecto en las gráficas.

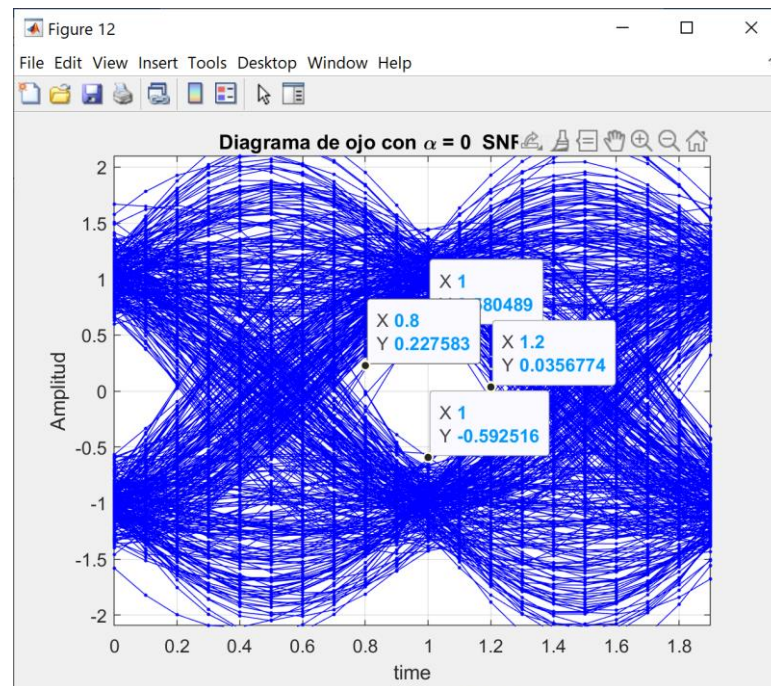
Se utiliza el mismo banco de 4 filtros: 3 de coseno alzado con distintas α y un filtro con ISIS. Se filtra la secuencia de deltas + ruido añadido para cada filtro, y se devuelve una matriz con la salida de los filtros (cada una en columna).

Como se puede observar en las gráficas, en todos los casos se cierra el ojo considerablemente, especialmente en el caso de ISI.

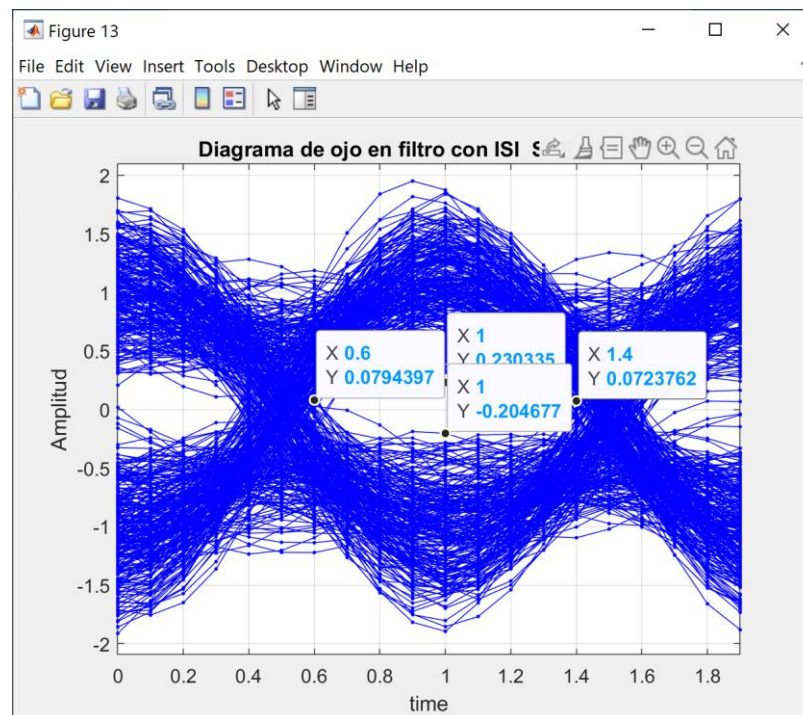
Aunque con ruido en el caso de $\alpha 1$ se cierre el ojo, los valores siguen estando próximos a 1, por lo que el BER será bajo. También influye la SNR, la cual es bastante alta.



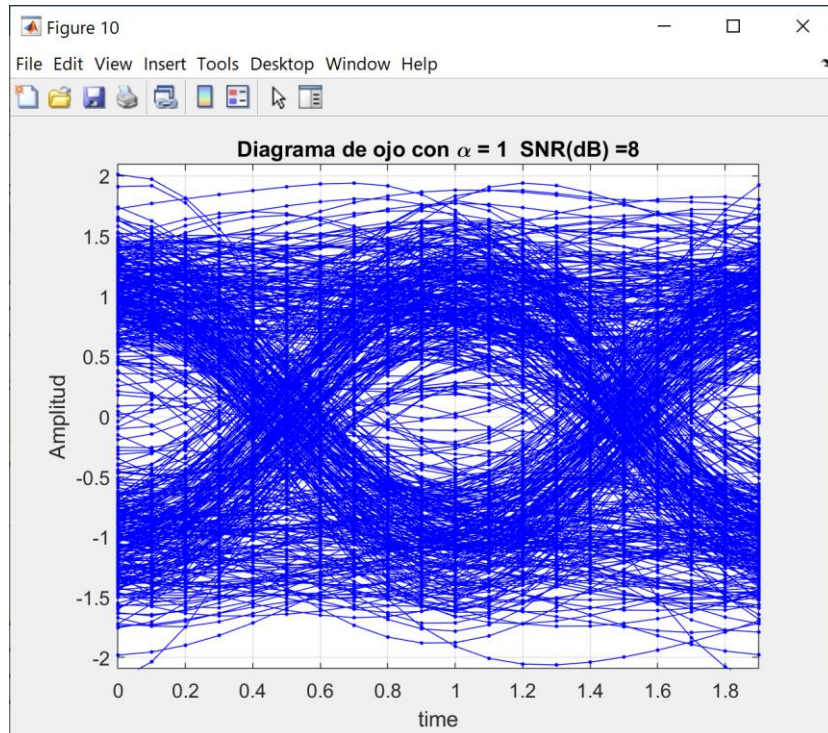
Es interesante destacar la amplitud del sobreimpulso en $\alpha = 0$. En consecuencia, el ojo se abomba y la apertura en amplitud máxima supera el valor de 4.



En efecto, el diagrama de ojo del filtro con ISI es el que más cerrado está, aunque la SNR es lo suficientemente alta como para que no se produzcan detecciones erróneas y un BER muy grande.



A continuación, se muestra de nuevo el diagrama de ojo de $\alpha = 1$, esta vez con una SNR inferior (8 dB). En este caso, el ojo se ha cerrado mucho, incluso llegando en algún caso a ocupar el espacio del símbolo incorrecto, por lo que la BER será mucho mayor. Cabe destacar que aun así se sigue apreciando la forma del mismo, por lo que la mayoría de los símbolos los determinará de forma correcta.



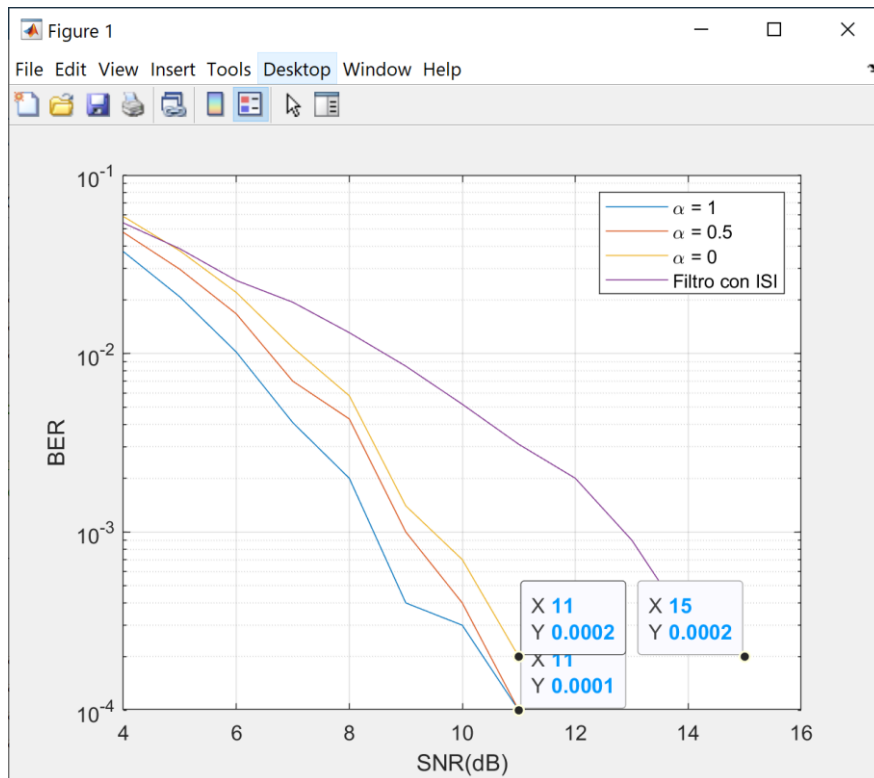
8. Razone la relación numérica que debe haber entre la relación señal ruido antes de los filtros con la de después de los filtros.

Puesto que los filtros no son una fuente de ruido y que tanto el espectro del ruido blanco gaussiano como el de una delta son constantes, la SNR no se ve alterada a la salida.

4. Efecto del ISI en la tasa de error

En este apartado se calcula la tasa de error de transmisión que se obtiene cuando la señal que se introduce en los filtros está contaminada con ruido blanco y gaussiano.

9. Analice los resultados obtenidos en la figura, y relaciónelos con los resultados que apliquen de apartados anteriores.



En todos los filtros, el valor de BER va disminuyendo conforme aumenta la SNR, ya que la calidad de la señal es mayor. En el caso de los filtros de coseno alzado, el ritmo de disminución es similar, siendo el de $\alpha = 1$ el que tiene una pendiente más pronunciada. Por otro lado, el filtro con ISI tiene una BER significativamente mayor que el resto, especialmente para SNRs altas, y la pendiente es bastante más suave.

Con relación a los diagramas de ojo anteriores, con SNR=15, el BER es despreciable (en el código se considera como NaN, ya que es menor que 10^{-4}). Esto confirma la conclusión observada en los diagramas de ojos anteriores, en los que, aunque hay variación de amplitud, el ojo sigue estando lo suficientemente marcado. La SNR es lo suficientemente alta, por lo que no hay confusión significativa entre los símbolos.

5. Efecto del ISI en la tasa de error cuando además de ruido blanco hay error en la elección de los instantes de muestreo

Este apartado está vacío. Copie en él el código del apartado 4, y a continuación modifíquelo como crea conveniente para introducir errores en los instantes de muestreo. Ejecutar el código modificado y comentar los resultados obtenidos, en comparación con los del apartado anterior.

```
% Para calcular la tasa de error se define un vector de relaciones
señal-ruido. Ahora SNRdB es un
% vector. N se aumenta para calcular BER con fiabilidad
N = 10000;
SNRdB = 4:20;
BER = zeros(length(SNRdB),size(Filtro,2));
Su = deltas_mas_menos(N, T, Ts);
```

```
%  
% Un símbolo detectado es un "1" cuando el valor de la señal en el  
% instante de muestreo es mayor  
% que 0, y "-1" en caso contrario. Como se aprecia en las figura 5, los  
% instantes de muestreo son los  
% comienzos de los símbolos unitarios, los instantes en que su valor  
% es +1 o -1.  
%  
% Vector de instantes de muestreo, es decir, índices en el vector t de  
% los instantes de muestreo  
ind = find(Su~=0);  
%  
% Extracción de los picos {+1,-1} del vector de símbolos unitarios  
Su_muestreo = Su(ind);  
%  
for ip = 1:length(SNRdB)  
%  
% Se filtra la señal de símbolos unitarios  
[s_filtrada] = salida_filtro(Su, T, Ts, Filtro, SNRdB(ip));  
%  
% Valores de las señales filtradas en los instantes de muestreo  
con un retraso de 3 muestras  
yM = zeros(N, size(s_filtrada,2));  
yM(1:N,:) = s_filtrada(ind+3,:);  
%  
% Si el valor en los instantes de muestreo es mayor que 0 se asigna  
% a +1, en caso contrario  
% a -1  
ind1 = find(yM>=0);  
ind2 = find(yM<0);  
yM(ind1) = 1;  
yM(ind2) = -1;  
%  
% Cálculo de BER  
Su2 = repmat(Su_muestreo', 1, size(Filtro,2));  
Su2 = yM~=Su2;  
BER(ip,:) = sum(Su2,1)/N;  
end  
BER(find(BER<1e-5)) = NaN;  
figure;  
for ip =1:size(Filtro,2);  
semilogy(SNRdB,BER(:,ip)); hold on  
end  
grid on;  
xlabel('SNR(dB) con retardo 3 muestras'); ylabel('BER')  
legend('\alpha = 1', '\alpha = 0.5', '\alpha = 0', 'Filtro con ISI');
```

En el código se ha introducido un retardo. Se ha desplazado las posiciones de muestreo (vector ind) en +3. Como resultado, se desplaza el instante de muestreo de la señal filtrada a la hora de calcular el BER.

Con este retardo, se puede observar en las gráficas que el BER con SNR bajas resulta mayor que sin retardo, ya que en la zona donde se muestrea ahora el ojo se encuentra más cerrado. El BER cae mucho más lento.

Es importante destacar que $\alpha 0$ y $\alpha 0.5$ tienen mayor BER que el filtro con ISI, debido a que el ojo está más cerrado en tiempo que en amplitud, por lo que se ve más afectado por el retardo

en muestreo que por el ruido. En el filtro con ISIS pasa el efecto contrario, le afecta más el ruido ya que se cierra más en amplitud que en tiempo.

A continuación se muestran las gráficas relación BER-SNR:

