

Universidad Nacional de Córdoba Facultad de  
Ciencias Exactas, Físicas y Naturales



Comunicaciones Digitales  
Trabajo Práctico Nº 2

Alumno: Rébola Christian

-Año 2017-

# Introducción

El siguiente trabajo practico integra los conocimientos vistos en toda la materia. Se nos dio un código de MatLab que simula un sistema de comunicaciones digitales, en el cual podemos enviar los siguiente tres tipos de datos: Datos binarios generados con una distribución uniforme, ceros y unos intercalados, y finalmente datos binarios generados con una imagen. Nuestro trabajo consiste en modificar el simulador para que cumpla los siguientes requisitos:

- 1) Cumplir criterio de Nyquist
- 2) Agregar un ecualizador lineal de forzado a cero
- 3) Ecualizar la señal con un ecualizador MMSE
- 4) Implementar los ecualizadores adaptivos lineal y realimentado por decisiones

En cada caso debemos documentar los resultados y cualquier información de importancia que podamos extraer.

## Desarrollo

### Parte 1

Como sabemos, Nyquist demostró que una condición necesaria y suficiente para que una señal  $x(t)$  se transmita con cero ISI es:

$$x(nT) = \begin{cases} 1 & \text{para } n = 0 \\ 0 & \text{para } n \neq 0 \end{cases}$$

Cuya transformada de Fourier:

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} X(f + \frac{m}{T}) = T$$

Una función muy común que cumple con estas condiciones es la señal de coseno realzado. Entonces, para aseguraron de que ni el filtro transmisor ni el filtro receptor generen interferencia debe cumplirse:

$$g_T(t) * g_R(t) = x_{RC}(t)$$

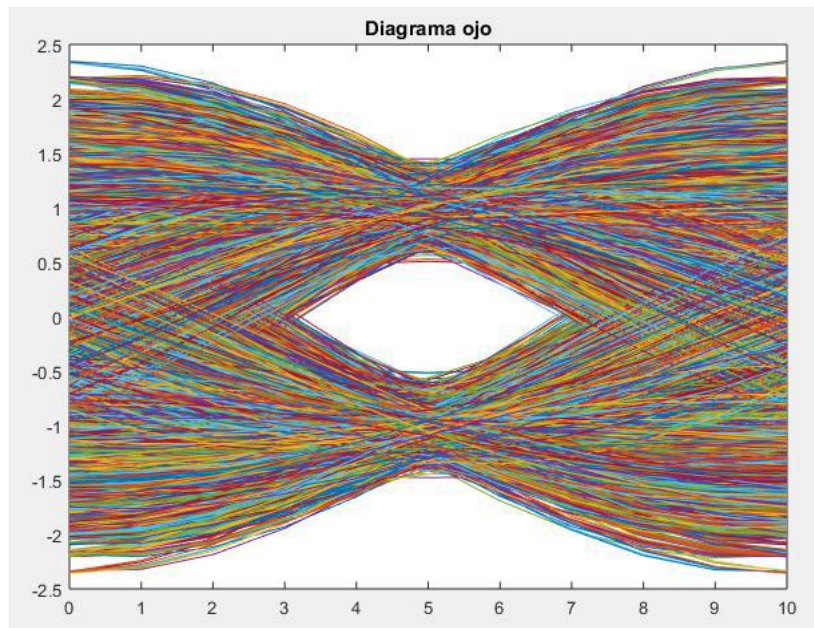
Donde:  $g_T(t)$  es la respuesta al impulso del transmisor

$g_R(t)$  es la respuesta al impulso del receptor

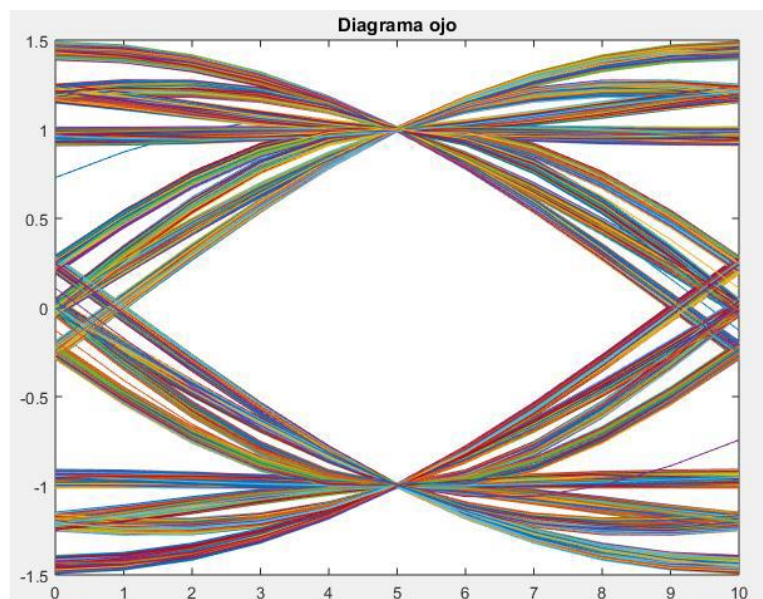
$x_{RC}(t)$  es la señal de coseno realzado

Para implementar esto, tomamos 10 muestras por símbolo y ajustamos que se envíen 9 ceros entre símbolos para asegurar cero ISI.

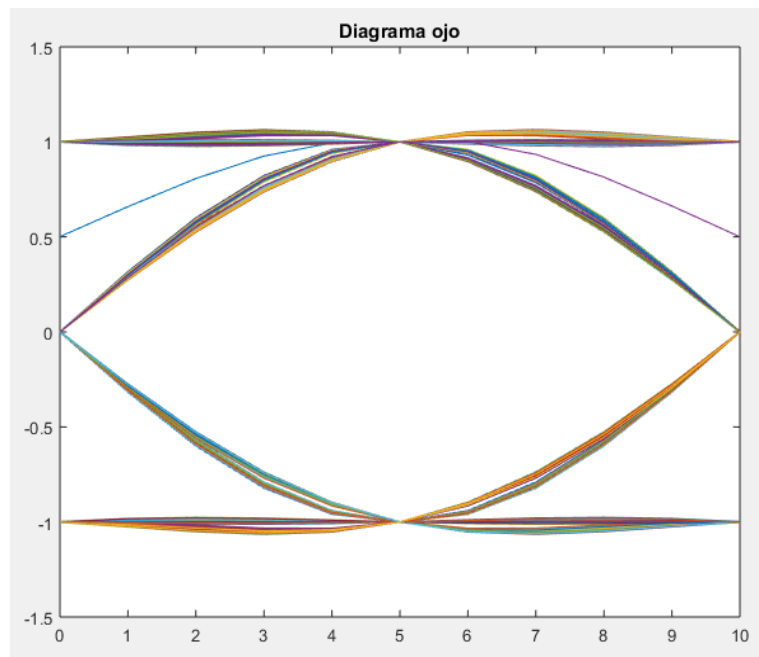
Con el sistema ya configurado podemos graficar los diagramas de ojo para los distintos roll off:



Roll Off = 0



Roll Off = 0.5



Roll Off = 1

Los resultados son los esperados, para valores mayores de roll off, el tamaño del ojo aumenta, mejorando la inmunidad al ruido, a errores de fase de muestreo y al jitter.

Ahora observemos los diagramas SER y BER. En este caso, al transmitir datos binarios, los símbolos transmiten la misma información que los bits, por lo tanto los diagramas son iguales.

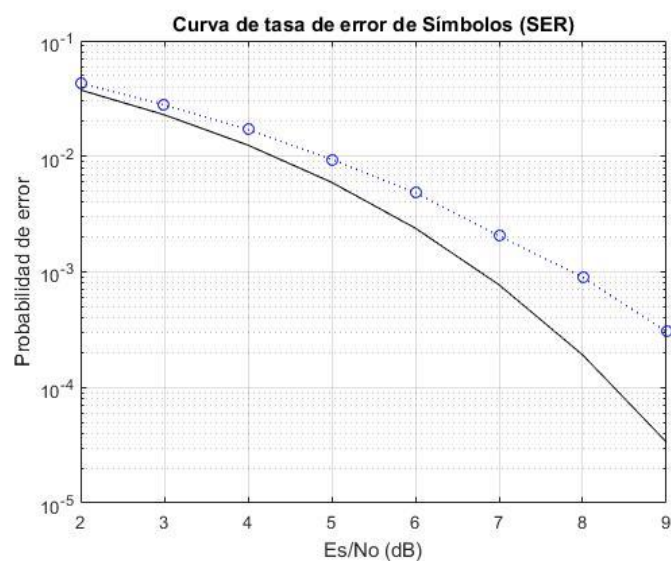
Usando como parámetros:

Simbolos transmitidos = 1000000

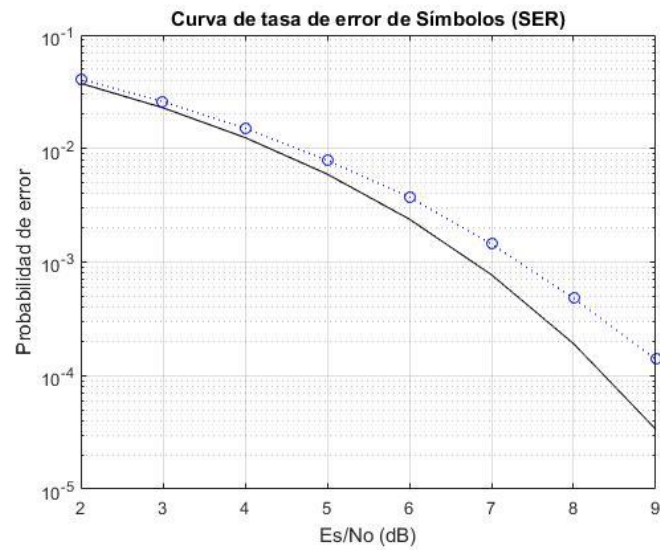
Frecuencia de símbolos = 1.2e3

Numero de ceros entre símbolos = 9

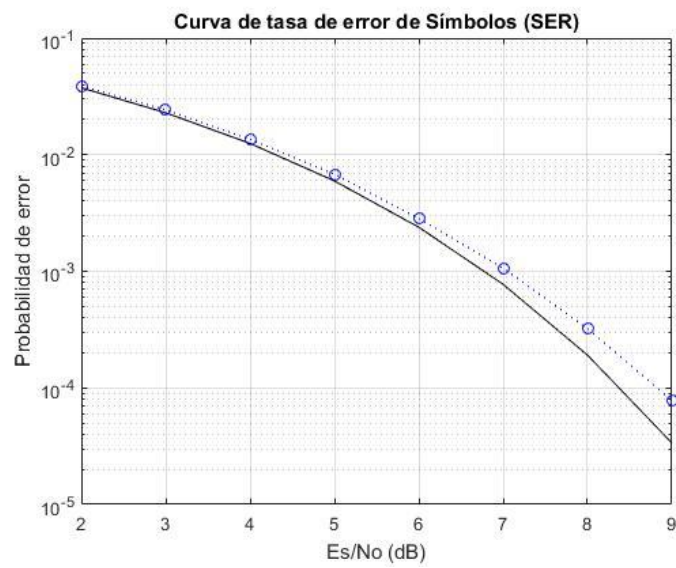
Y para distintos roll offs tenemos lo siguiente:



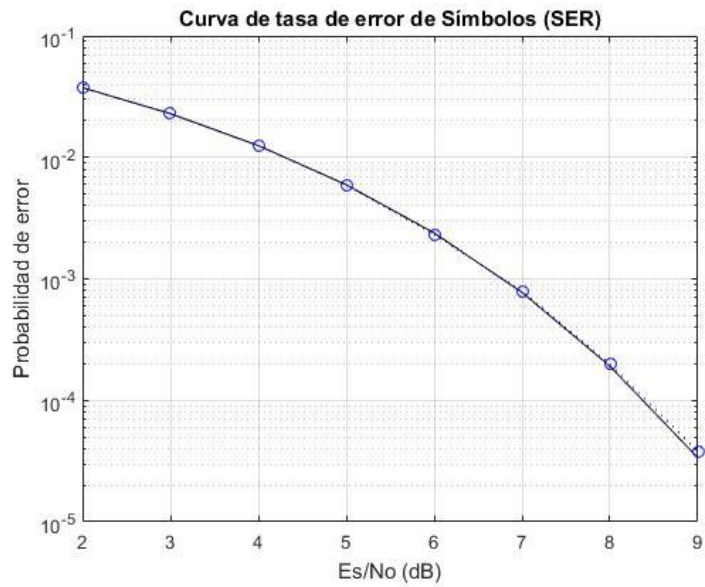
Roll Off = 0



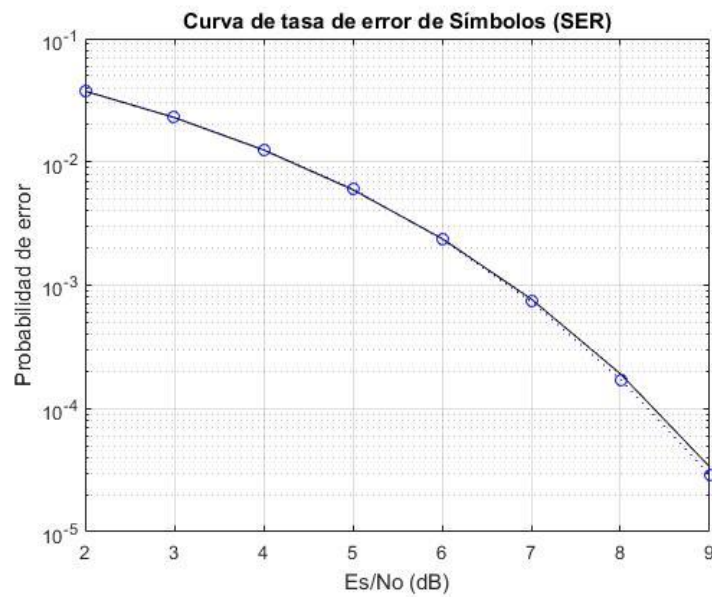
Roll Off = 0.05



Roll Off = 0.1



Roll Off = 0.2



Roll Off = 0.5

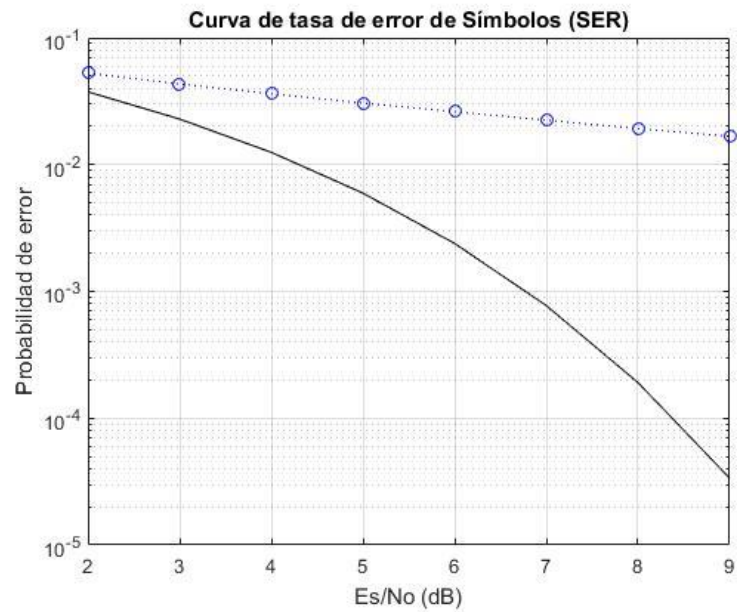
Estas graficas se explican claramente con la interpretación de los diagramas ojo.

Con un roll off muy pequeño, la señal de coseno realzado tiene mas “cola”, haciendo probable un error de detección en los instantes de muestreo. Luego, vamos a tener una probabilidad de error mucho mayor, como muestran las figuras

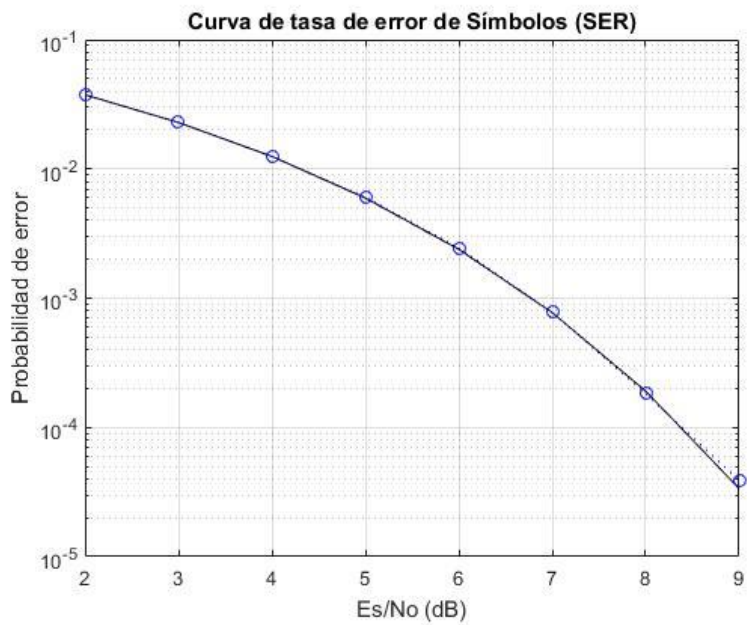
En cambio, con un roll off mayor a 0.2, la curva SER se asemeja a la curva ideal, por lo que casi no vamos a tener errores.

Siempre se recomienda tomar un roll off entre 0.2 y 1

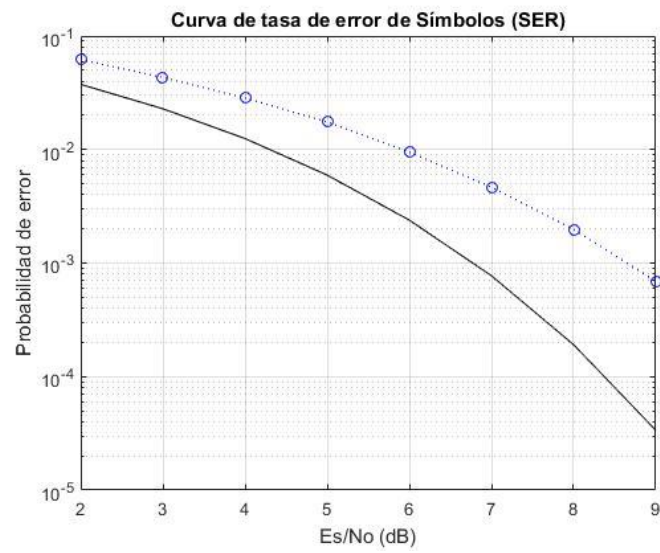
Tambien podemos graficar las mismas curvas SER para una distinta cantidad de ceros entre símbolos, y ver como esto influye en el sistema:



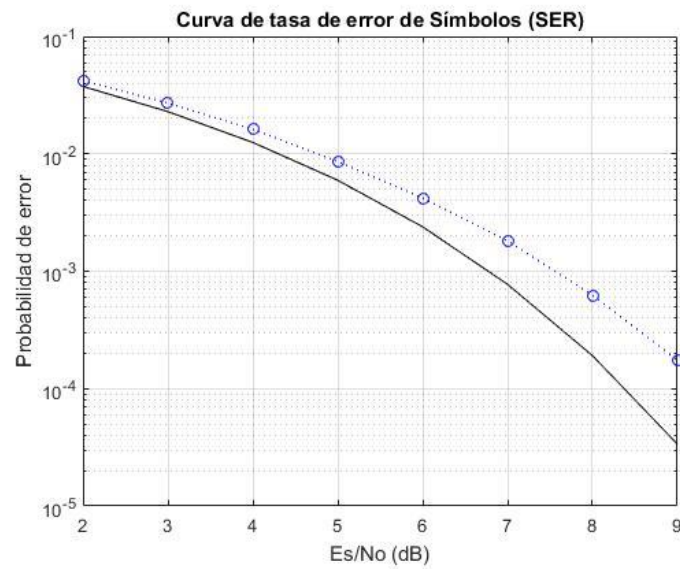
6 ceros entre símbolos



9 ceros entre símbolos

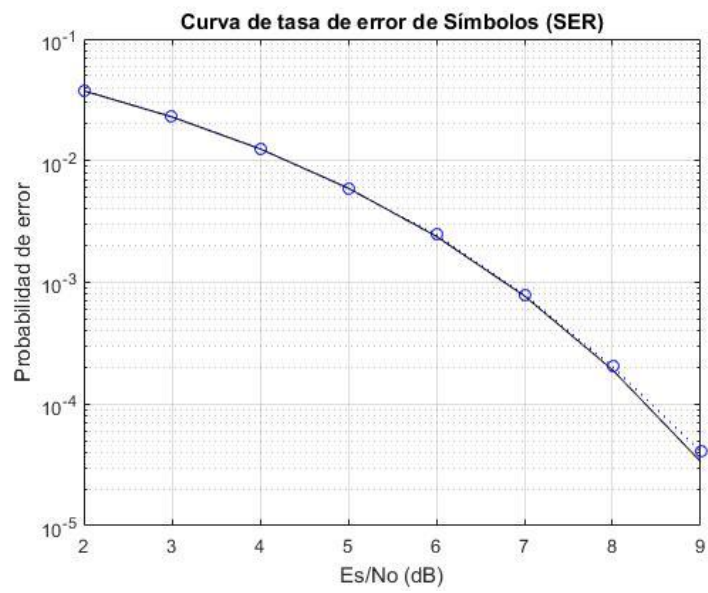


12 ceros entre símbolos



15 ceros entre símbolos





19 ceros entre símbolos

Como estamos tomando 10 muestras por símbolos, poniendo 9 ceros entre símbolos tenemos una probabilidad de error mínima.

## Parte 2

Ya hemos modificado los filtros transmisor y receptor para cumplir con el criterio de Nyquist. El gran problema de un sistema de Comunicaciones Digitales es que, a diferencia del transmisor y el receptor, nosotros no podemos implementar el canal, es decir, el medio de transmisión. Inclusive, este canal a veces puede variar su respuesta a lo largo del tiempo. Para solucionar este problema, agregamos otro modulo mas al sistema, llamado ecualizador, con el cual trataremos de contrarrestar los efectos del canal.

Tenemos que:

$$g_T(t) * g_C(t) * g_R(t) * g_E(t) = x_{RC}(t)$$

Siendo:  $g_E(t)$  la respuesta al impulso del ecualizador

Como ya hemos modificado el transmisor y el receptor para que cumplan el criterio de Nyquist, concluimos que:

$$g_E(t) = \frac{1}{g_C(t)}$$

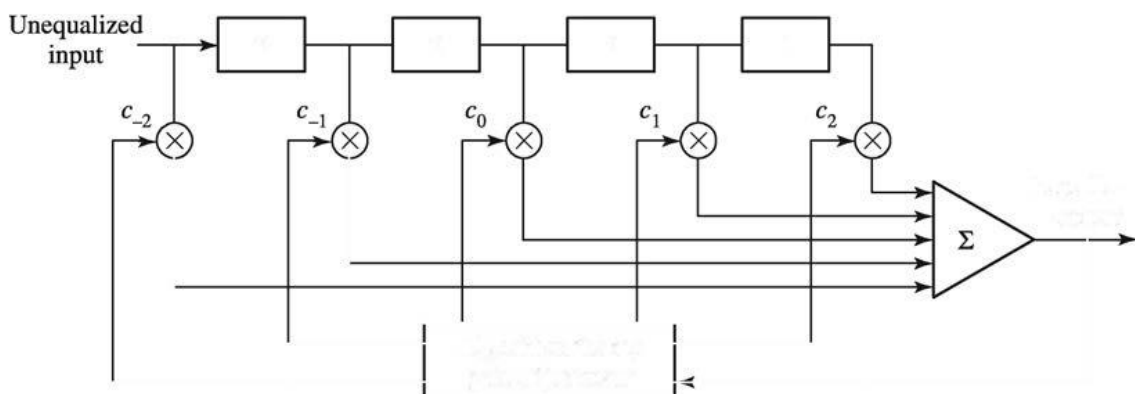
El ecualizador debe ser la inversa del canal.

Ahora pasaremos a estudiar el efecto de la ISI implementando un canal distinto, que incluye ruido gaussiano blanco. La entrada al ecualizador es:

$$x(t) = \frac{1}{1 + (\frac{2t}{T})}$$

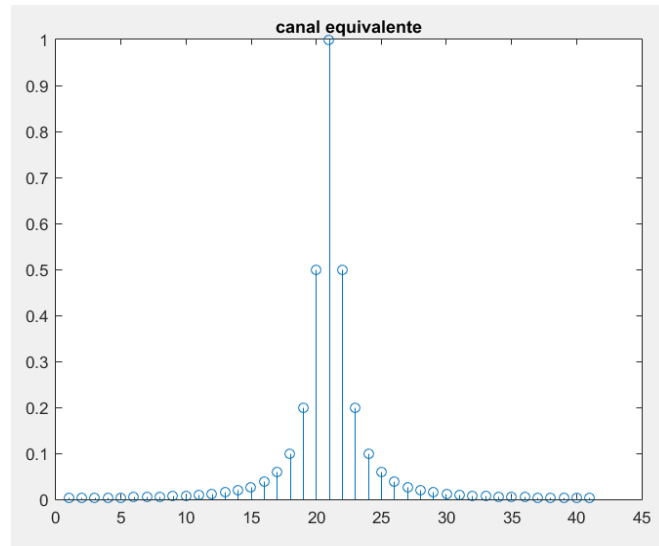
Siendo T la frecuencia de símbolos.

El diagrama de bloques del ecualizador forzado a cero es:

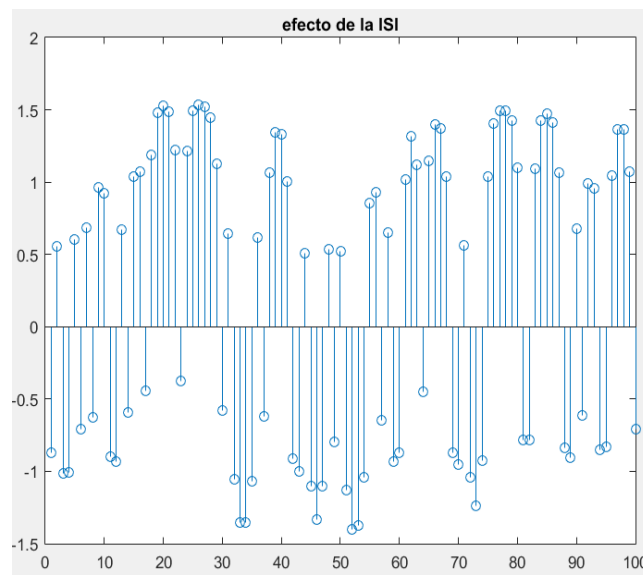


En los ecualizadores, generalmente se trabaja al doble de la frecuencia de símbolos. Para implementar, nosotros debemos agregar un 0 entre cada símbolo transmitido.

Si muestreamos  $x(t)$  al doble de la frecuencia de símbolos, obtenemos un canal con la siguiente respuesta al impulso.

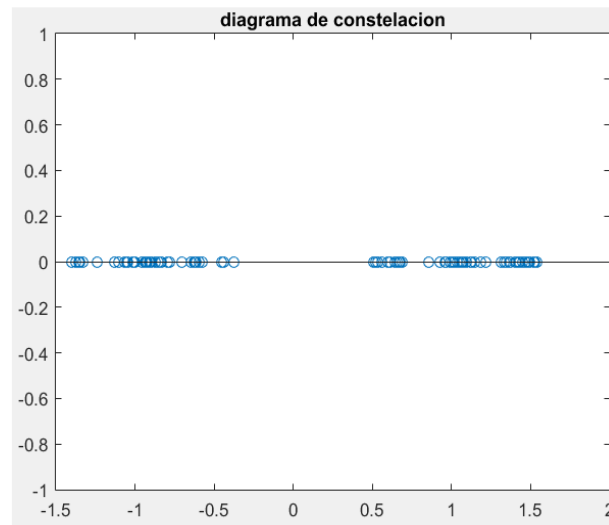


Ahora vamos a tomar muestras de salida para ver como influye la ISI en la recepción de símbolos. Para 100 muestras tenemos que:



Como observamos, la ISI tiene un gran efecto de distorsión en los símbolos. Esto puede llevar a errores de detección en un canal que introduzca ruido.

El diagrama de constelación:



Vemos que en general los símbolos se esparcen alrededor de  $\{-1\}$  y  $\{1\}$ , formando la famosa “nube de símbolos”. Sin embargo, debido a la ausencia de ruido, vemos que hay una gran separación entre las dos nubes, por lo cual es casi imposible que tengamos errores de detección.

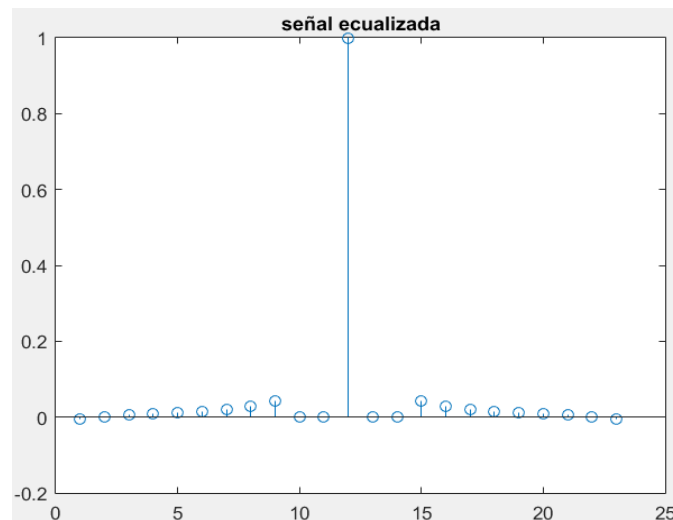
Ahora vamos a implementar el ecualizador de forzado a cero.

El efecto de este ecualizador es eliminar las componentes de ISI de un símbolo. Es decir, sabemos que los símbolos llegan de esta forma:

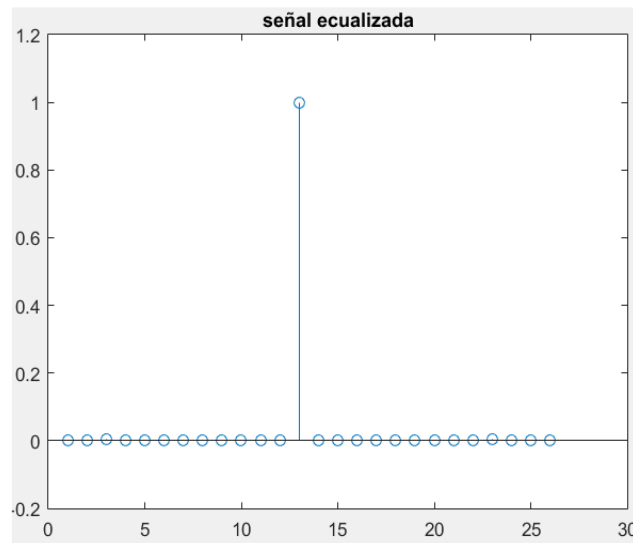
$$a = a_0 + \sum b_k a_k$$

Siendo  $a_0$  el símbolo actual (deseado) y los  $a_k$  los símbolos anteriores y posteriores a  $a_0$ . Lo que hace el ecualizador es eliminar estas componentes no deseadas.

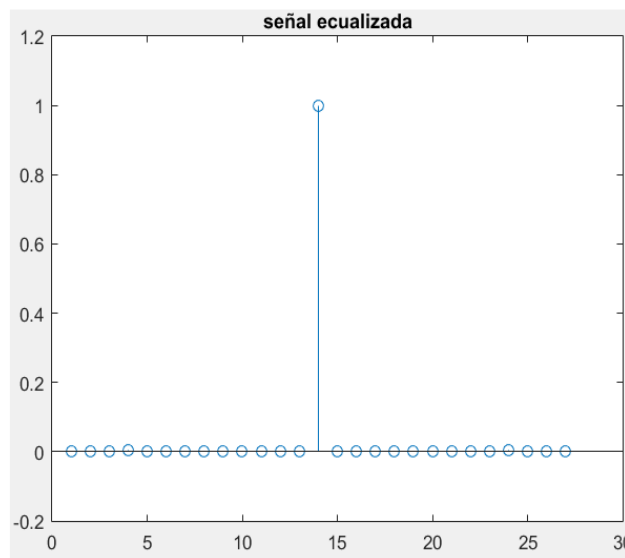
Ahora veremos el pulso ecualizado para ecualizador con diferente cantidad de taps:



5 taps



11 taps



13 taps

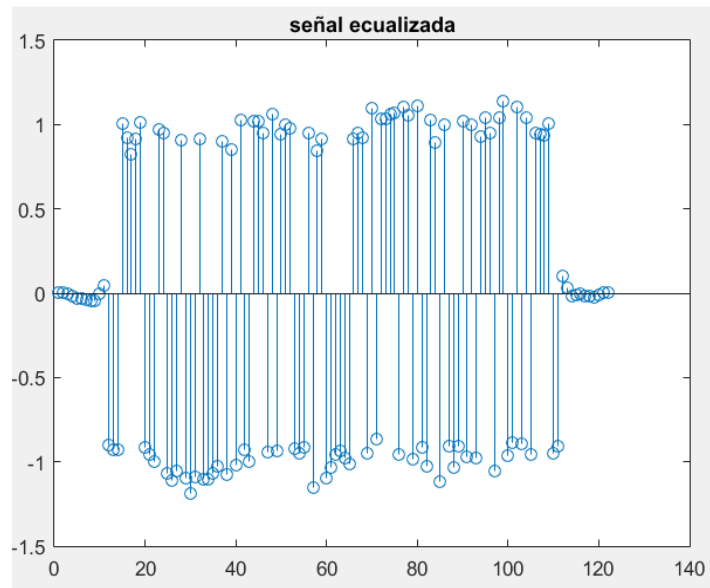
Un ecualizador de  $2K+1$  taps elimina los componentes no deseados que generan los  $K$  símbolos anteriores al actual y los  $K$  símbolos posteriores.

Por esta razón, podemos ver que para un ecualizador de 5 taps no eliminamos todos los componentes de ISI del pulso

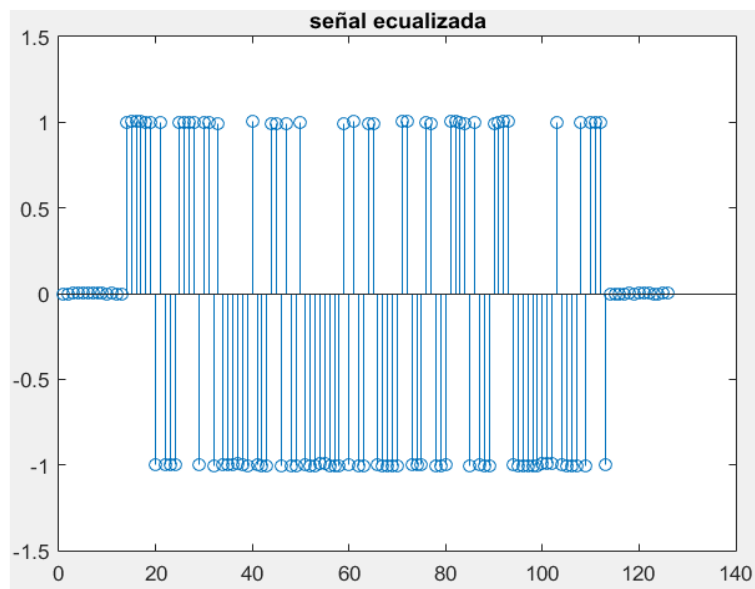
Con el ecualizador de 11 taps ya prácticamente no tenemos ISI y con el de 13 taps la eliminamos completamente, quedando un pulso limpio.

El siguiente paso es hacer el downsampling de la señal, es decir, debemos volver a muestrear a frecuencia de símbolos, ya que los valores que hay entre medio de los símbolos son ceros que agregamos al principio.

Ahora, tomando 100 muestras como en el diagrama anterior, veamos el efecto de la ISI con la señal ecualizada con los ecualizadores con los distintos taps.

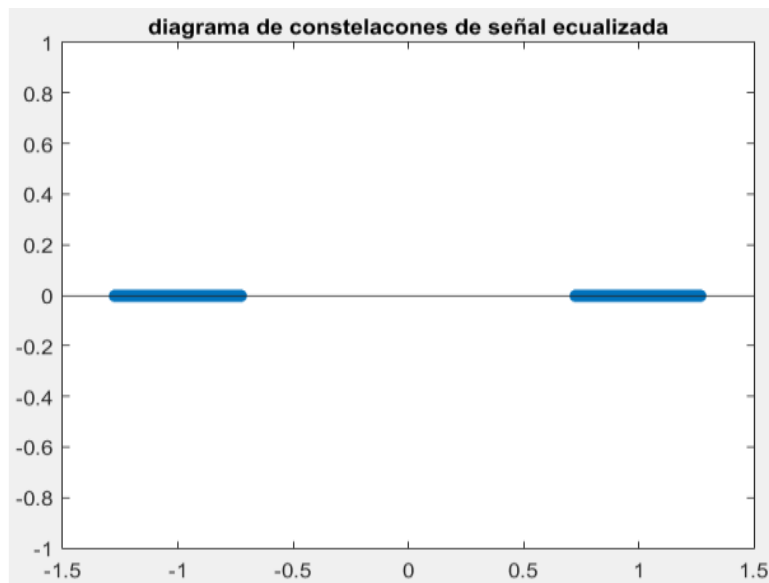


5 taps

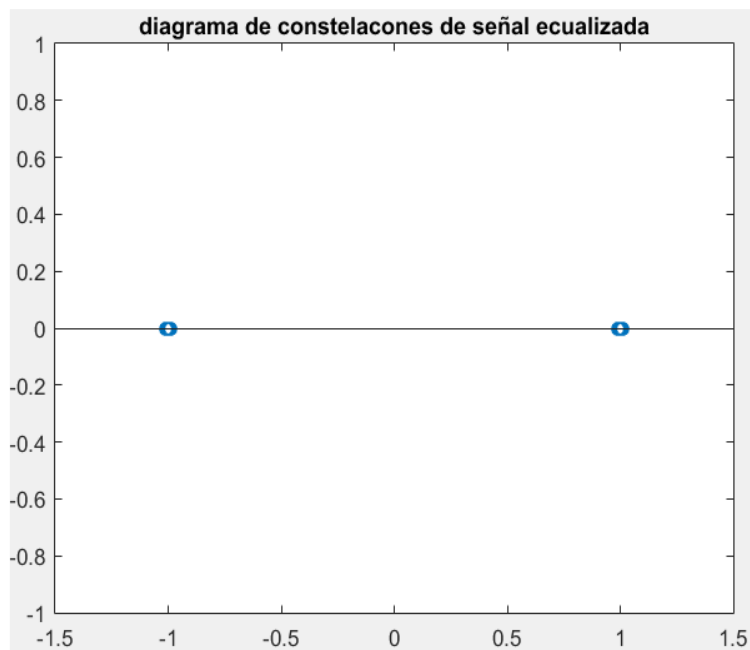


13 taps

Ahora veamos las constelaciones:



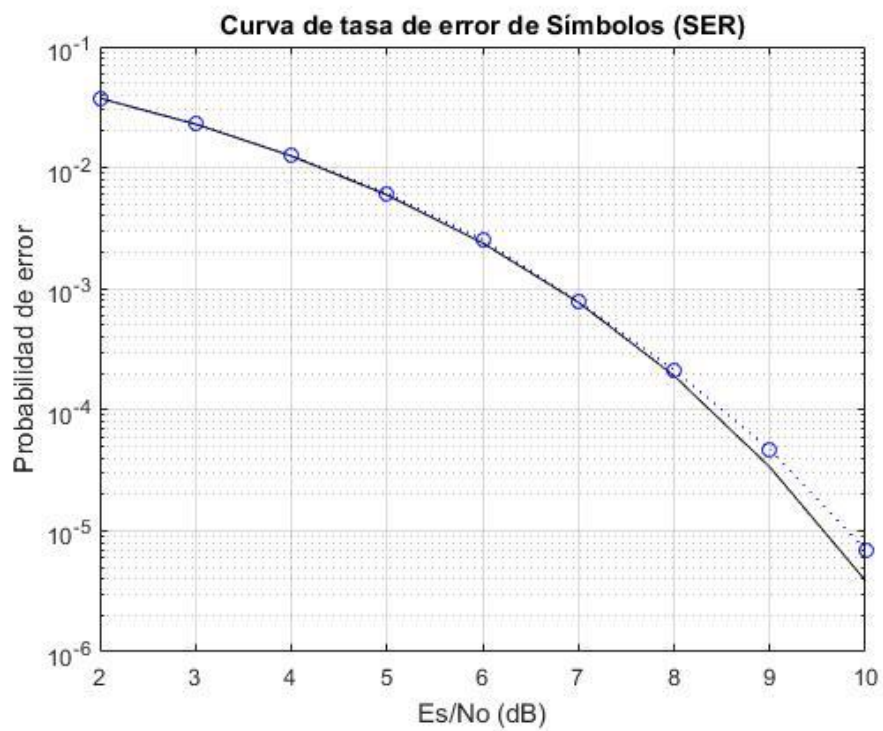
5 taps



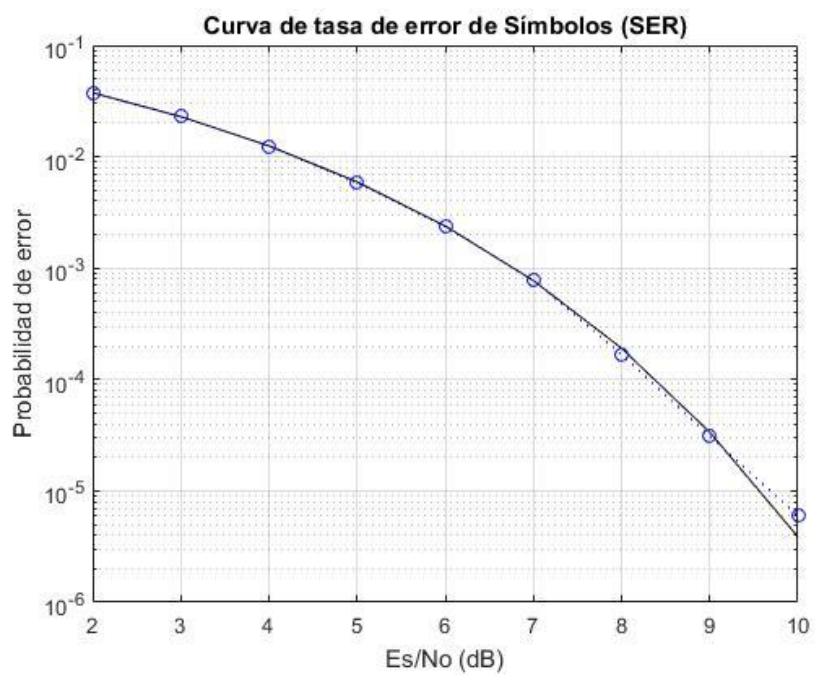
13 taps

Ambos ecualizadores mejoran notablemente la “precisión” de los símbolos en  $\{-1\}$  y  $\{1\}$ . Sin embargo, podemos ver claramente que el ecualizador de 13 taps prácticamente elimina todos los componentes no deseados.

Ahora vamos a ver las probabilidades de error



5 taps



13 taps