

PRÁCTICA 4: INTERFERENCIA ENTRE SÍMBOLOS.

Índice de la práctica

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	2
1.1 TEORÍA NECESARIA.....	2
1.2 INICIO DE LA APLICACIÓN	2
2. BANDA BASE	4
2.1 CONDICIÓN DE NYQUIST EN EL DOMINIO DEL TIEMPO	4
2.2 EL FILTRO EN COSENO ALZADO.....	6
2.3 RESPUESTA GLOBAL	8
3. MODULACIONES PAM	12
3.1 EFICIENCIAS	12
3.2 SISTEMA COMPLETO	13

1. Introducción y objetivos

El objetivo de la práctica es analizar el fenómeno de la Interferencia Entre Símbolos, y como minimizar sus efectos, tanto para transmisiones en banda base como moduladas.

La práctica está pensada para desarrollarse a lo largo de dos horas, incluyendo los tiempos consumidos en iniciar y familiarizarse con la aplicación (15 minutos, incluyendo los correspondientes al cambio de hora), y los 20 minutos para el test final. La práctica está dividida en dos partes. Cada una de ellas pretende mostrar el comportamiento del fenómeno, para los diferentes tipos de transmisión digital: en banda base y con modulación.

1.- Banda Base (máximo 45 minutos).

2.- Modulaciones PAM (máximo 40 minutos).

1.1 Teoría necesaria

La teoría necesaria para la realización de la práctica es la contenida en el Tema 7 de los apuntes de la asignatura, disponibles en el servidor moodle de la misma.

1.2 Inicio de la aplicación

La práctica se realiza ejecutando una aplicación codificada en Matlab. El código de la aplicación se encuentra en un disco compartido en la red del laboratorio. Para ejecutar la aplicación será necesario copiarse todos los archivos a un directorio local. Al inicio de la clase se explicará el procedimiento para realizar esta operación, por lo que es conveniente acudir puntual al laboratorio.

Una vez copiado el software al disco local, la práctica se realiza iniciando Matlab y posteriormente tecleando, en la ventana de comandos:

`>> Practica4`

Aparecerá la siguiente ventana en la que en la parte superior se despliegan los diferentes menús que dan acceso a cada una de las partes de la práctica, y que se describen en los capítulos posteriores de este manual.



Figura 1. Interfaz gráfica del programa principal

2. Banda Base

2.1 Condición de Nyquist en el dominio del tiempo

En la pantalla del programa principal seleccione en la barra de menú: *Banda Base>Nyquist en dominio del tiempo*. Esto despliega la interfaz gráfica siguiente:

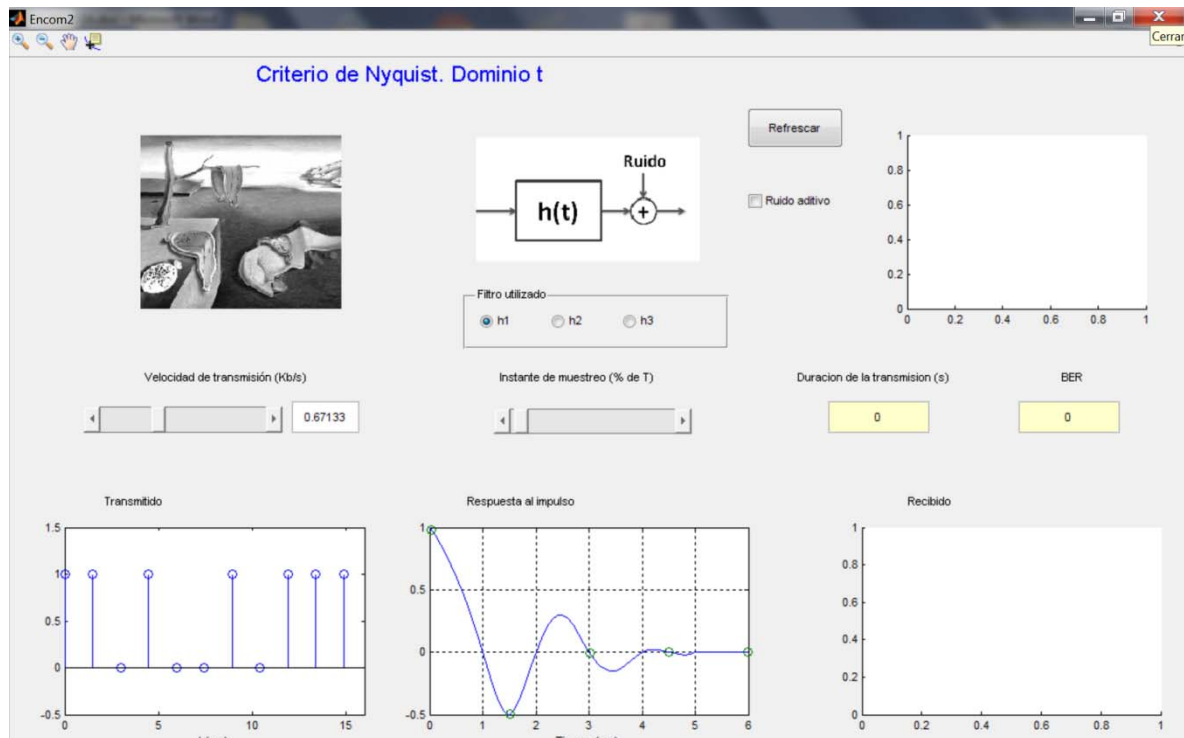


Figura 2. Interfaz gráfica del experimento “Criterio de Nyquist en el dominio t”

El objetivo de esta parte de la práctica es analizar cómo funciona el teorema de Nyquist en el dominio del tiempo, en las transmisiones en banda base. La herramienta permite trabajar con tres filtros diferentes (definidos por su respuesta al impulso $h(t)$), a la vez que enviar los datos con diferentes velocidades y elegir diferentes instantes de muestreo en el receptor. La transmisión es binaria.

Sobre esta pantalla realice los siguientes ejercicios.

1.- Velocidades de transmisión sin ISI para el filtro 1. Seleccione como Filtro utilizado, h1. En la gráfica inferior observará su respuesta al impulso. Deje el instante de muestreo a cero. Y actúe sobre la velocidad de transmisión. Al hacerlo aparecerán marcados sobre la $h(t)$ del filtro los instantes kT . Modifique el valor de la velocidad de transmisión y observe si se cumple la condición del teorema de Nyquist que, para filtros sin retardo, es:

$$h(k \cdot T) = 0 \text{ para } k \neq 0$$

$$h(0) \neq 0$$

Determine diferentes velocidades de transmisión a las que la ISI es nula. Observe que la $h(t)$ se hace cero para valores de t mayores de 5ms, e indique también la v_t por debajo de la cual ya no habrá ISI.

Máxima v_t sin ISI (Kb/s)	
Siguiente v_t sin ISI (Kb/s)	
Siguiente v_t sin ISI (Kb/s)	
Siguiente v_t sin ISI (Kb/s)	
v_t por debajo de la cual ya no hay ISI (Kb/s)	

2.- Transmisión con el filtro 1. Presione el botón “Refrescar” y se mostrará como la secuencia transmitida aparece en el otro extremo. En la gráfica de abajo a la derecha puede ver la forma de onda en el tiempo, y arriba puede ver el resultado de enviar la imagen. Además en las dos ventanas de texto observará la BER y el tiempo total consumido en enviar la imagen. La herramienta permite además añadir ruido en el proceso. Comience de momento, sin ruido y con instante de muestreo igual a cero.

2.1- Coloque una $v_t=0.2$ Kb/s. Observe que cumple la condición de Nyquist. Pulse refrescar y observe la señal de salida. Observe como está formada por réplicas de la respuesta al impulso, en la posición de cada delta de entrada. Compruebe como no hay ISI y los valores en los instantes de muestreo son los ideales ($h(0)$ para los unos y 0 para los ceros). Observe como en el instante de muestreo de cada símbolo, la respuesta al bit anterior ya se ha extinguido por completo. Cualquier v_t inferior a esta (T más largo, va a estar libre de ISI).

Observe también como la imagen se transmite correctamente y (sin ruido añadido) la BER es nula. Observe el tiempo total necesario para transmitir la imagen con esta v_t . Sabiendo que cada pixel de la imagen está cuantificado con 8 bits (256 niveles de gris), determine el número de pixels de la imagen.

.....

2.2- Sin cambiar v_t , observe cómo es necesario elegir adecuadamente el instante de muestreo en el receptor. Actuando sobre este parámetro de manera inapropiada se puede deteriorar la transmisión. Por ejemplo, elija un instante de muestreo que coincida con nulos de la respuesta al impulso y se recibirán todos ceros. Igualmente eligiendo un instante de muestreo que coincida con un valor negativo de la $h(t)$ puede invertirse toda la imagen. Rellene la tabla siguiente.

Instante de la primera muestra para imagen negra	
Instante de la primera muestra para imagen invertida	

3.- Velocidad de transmisión sin ISI para el filtro 2. Repita el ejercicio 1, pero ahora seleccionando el filtro h_2 . Observe que este filtro ahora provoca un retardo en la señal, por lo que la condición de Nyquist se reformula de la siguiente forma:

$$h(t_0 + k \cdot T) = 0 \text{ para } k \neq 0$$

$$h(t_0) \neq 0$$

Ahora deberá indicar también cual es el instante de muestreo del primer símbolo recibido.

	v_t	t_0
Máxima v_t sin ISI (Kb/s)		
Siguiente v_t sin ISI (Kb/s)		
Siguiente v_t sin ISI (Kb/s)		
Siguiente v_t sin ISI (Kb/s)		
v_t por debajo de la cual ya no hay ISI (Kb/s)		

4.- Transmisión con el filtro 2. Repita el punto 2.1 con este nuevo filtro. Observe que ahora es necesario utilizar un instante de muestreo diferente de cero, para ajustarse al retardo introducido por el filtro. Lógicamente no es necesario que vuelva a calcular el tamaño de la imagen.

5.- Filtro 3. Seleccione ahora el filtro h_3

5.1 Determine una combinación $v_t \sim t_{\text{muestreo}}$ que cumpla la condición de Nyquist en el dominio del tiempo. Busque la combinación que produce ISI nula con el mayor valor posible de v_t .

Velocidad de transmisión	
Instante de la primera muestra	

En las condiciones anteriores añada ruido y observe como la BER se mantiene muy baja

5.2 Imagine que tiene que cumplir una especificación de $BER \leq 10^{-4}$, con ruido añadido. Juegue con los valores de v_t y tiempo de muestreo para conseguir transmitir el fichero en el menor tiempo posible. Como mínimo debe conseguir cumplir los requisitos y enviar el fichero en un tiempo no mayor de 400 segundos

Velocidad de transmisión	
Instante de la primera muestra	
Tiempo total de transmisión	
BER estimada	

2.2 El filtro en coseno alzado

En la pantalla del programa principal seleccione en la barra de menú: *Banda Base > Coseno alzado*. Esto despliega la interfaz gráfica siguiente:

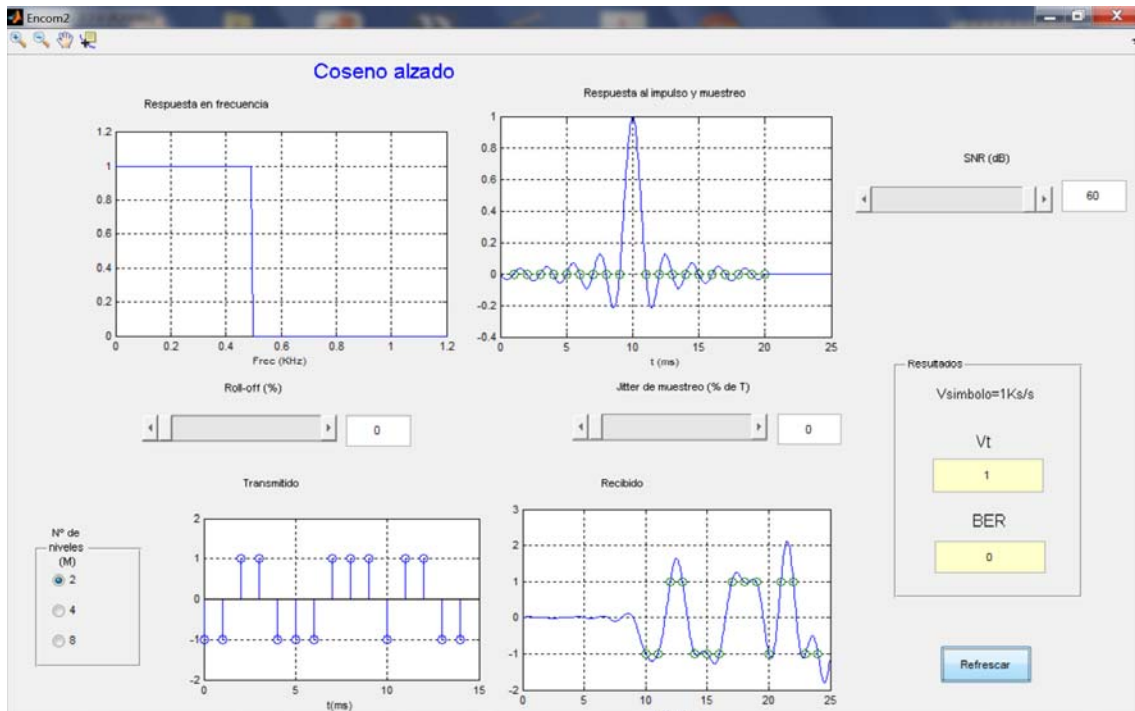


Figura 2. Interfaz gráfica del experimento “Coseno alzado”

El objetivo de este experimento es ver las características de un filtro en coseno alzado en banda base. La herramienta permite trabajar con filtros con diferentes factores de roll-off. En el experimento se analiza también el efecto de tener errores en los instantes ideales de muestreo (jitter).

Sobre esta pantalla realice los siguientes ejercicios.

1.- Observación de las características del filtro. Actúe únicamente sobre el control de Roll-off y observe el comportamiento de la respuesta del filtro en el tiempo y en la frecuencia. Comente lo que observa al variar el roll-off, en relación a los siguientes aspectos (en caso de que sea posible indique también el valor del parámetro mencionado):

Ancho de banda total ocupado:

“Suavidad” de la respuesta en frecuencia:

Máxima velocidad de símbolo sin ISI:

Altura de los lóbulos secundarios de la respuesta al impulso

2.- Variación del tamaño del alfabeto. Actúe ahora sobre el control del valor de M (tamaño del alfabeto), y pulse “Refrescar”. Si ha mantenido las condiciones iniciales (jitter=0 y SNR muy alta), deberá observar que aunque la salida está muy filtrada, los valores de la señal recibida en los instantes de muestreo se corresponden exactamente

con los valores ideales, y que serán diferentes para cada alfabeto. Utilice el zoom para verificar este hecho.

Indique justificadamente, cómo se calcula la velocidad de transmisión reportada por la herramienta:.....

.....

.....

3.- Efecto del jitter de muestreo (observación cualitativa) (OPTATIVO).

Manteniendo la SNR a su valor máximo (60dB) actúe ahora sobre el valor del jitter. Eso generará un error aleatorio en el instante de muestreo, con una desviación típica que viene indicada como porcentaje del periodo de símbolo (1ms).

Seleccione un jitter del 10% y un roll-off=0. Observe la respuesta al impulso. Notará que al no tomarse las muestras en los instantes nominales, ya no se garantiza que ISI=0. Eso se traduce en una especie de ruido (la ISI) que aparece sumada a la señal recibida. Haga zoom y observe cómo la señal recibida ya no toma sus valores ideales.

Pruebe a repetir el experimento con roll-off=50% y roll-off=100%. Indique cómo afecta este parámetro a la cantidad de ISI que contamina la señal recibida. Justifíquelo desde el punto de vista de cómo es la respuesta al impulso.

.....

.....

.....

.....

2.3 Respuesta en frecuencia

En la pantalla del programa principal seleccione en la barra de menú: *Banda Base>Respuesta global*. Esto despliega la interfaz gráfica siguiente:

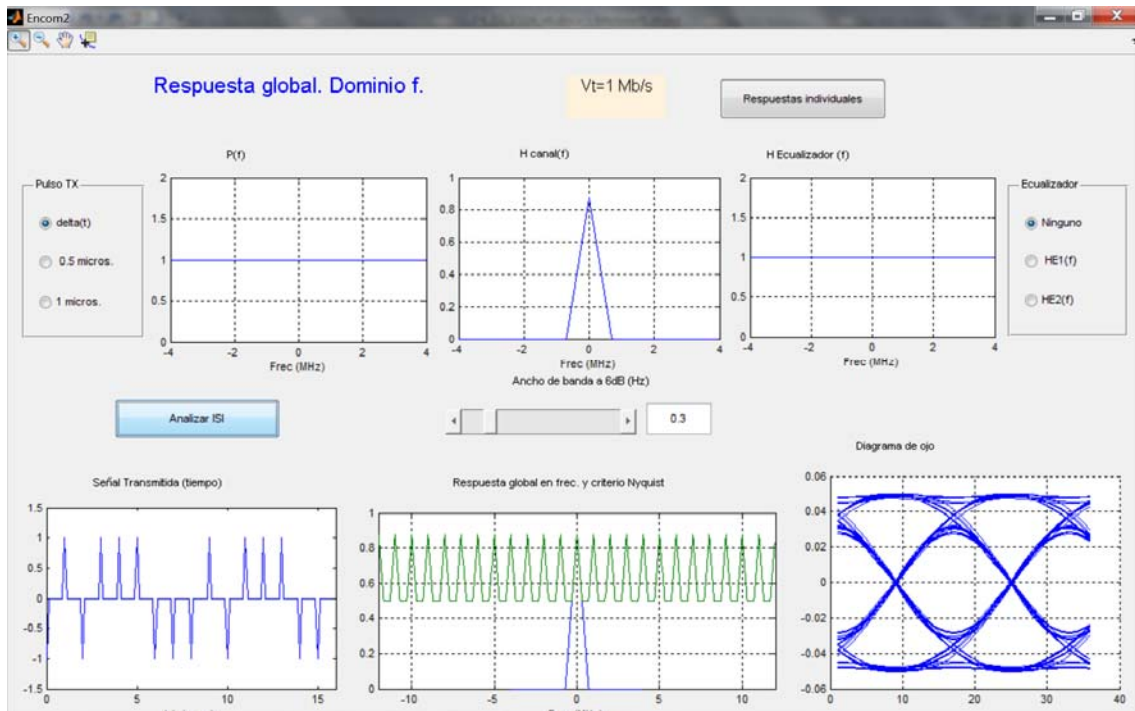


Figura 3. Interfaz gráfica del experimento “Respuesta global”

El objetivo de este experimento es triple:

- Comprobar el funcionamiento del criterio de Nyquist en el dominio de la frecuencia
- Observar la ISI mediante el diagrama de ojo
- Analizar el efecto de utilizar un ecualizador para mejorar las prestaciones del sistema, utilizando diferentes formas de pulso

Sobre esta pantalla realice los siguientes ejercicios.

1.- Criterio de Nyquist en el dominio de la frecuencia. Seleccione como forma de pulso transmitido una delta. No seleccione ningún ecualizador. A continuación modifique el ancho de banda del filtro del canal (que se trata de un filtro trapezoidal, o triangular). Pulse el botón “Respuestas Individuales” y observará, arriba, en el dominio de la frecuencia la forma del pulso transmitido, $P(f)$, el filtro de canal $H_C(f)$ y el ecualizador $H_E(f)$. Abajo a la izquierda se dibujará la señal emitida para una secuencia aleatoria de bits, antes de ser filtrada.

Al pulsar “Analizar ISI” se representará ahora, abajo en el centro, el criterio de Nyquist en el dominio de la frecuencia, mientras que a la derecha se dibujará el diagrama de ojo. La figura del centro presenta por una parte la respuesta global:

$$H_{TOT} = P(f) \cdot H_C(f) \cdot H_E(f)$$

Y por otra, la cantidad
$$Q(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} H_{TOT}(f - k \cdot v_s)$$

Recuerde que de acuerdo al criterio de Nyquist, la anterior cantidad debe ser constante con la frecuencia, para que no exista ISI.

Pruebe con diferentes valores del ancho de banda del filtro de canal y determine para qué valores del mismo se cumple la condición de Nyquist.

NOTA: Recuerde presionar siempre primero el botón “Respuestas Individuales”

Valores de ancho de banda para los que se cumple la condición de Nyquist			

Observe como para estos valores de ancho de banda la apertura del ojo es máxima

2.- Efecto de la ISI: cierre del ojo. Ahora se va a repetir el experimento anterior pero con dos diferencias: vamos a analizar anchos de banda que sí producen ISI, y además vamos a observar qué efecto producen en el diagrama de ojo.

Para ello vamos a analizar por orden los anchos de banda siguientes: 0.4 MHz, 0.3 MHz y 0.2 MHz. Observe cómo se va produciendo un paulatino “cierre del ojo” al disminuir el ancho de banda (véase la figura 4).

NOTA: Recuerde presionar siempre primero el botón “Respuestas Individuales” y luego “ Analizar ISI”

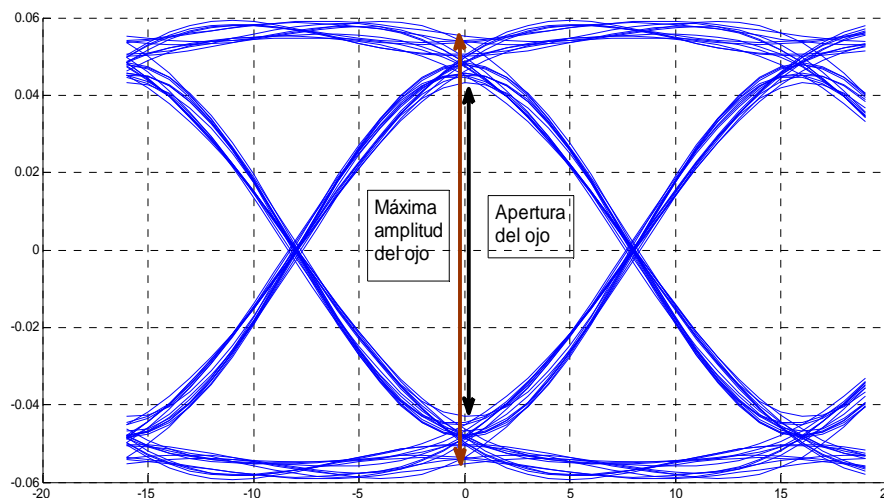


Figura 4. Procedimiento para observar el porcentaje de apertura del ojo

3.- Utilización de pulsos reales. En la realidad no pueden usarse pulsos en forma de delta, ya que no son realizables, usándose típicamente pulsos rectangulares. Pruebe a utilizar ahora pulsos de $0.5\mu\text{s}$ y de $1\mu\text{s}$ e intente (sin utilizar ecualizador) ajustar el ancho de banda para que no se produzca ISI. Describa qué problemas encuentra y a qué se deben, desde el punto de vista del criterio de Nyquist en el dominio de la frecuencia.

NOTA: Recuerde presionar siempre primero el botón “Respuestas Individuales” y luego “ Analizar ISI”

[illegible]

4.- Empleo de ecualizadores. Para mitigar los problemas creados por el uso de pulsos reales se han diseñado dos ecualizadores, cada uno de ellos a medida para uno de los pulsos de la herramienta. En este ejercicio debe tratar de averiguar qué ecualizador es adecuado para cada pulso. Para ello seleccione un ancho de banda del filtro de 0.5 MHz y a continuación pruebe, con cada pulso los tres posibles ecualizadores. Marque en la tabla siguiente si se produce o no ISI:

Existe ISI?			
Tipo de Pulso	Ecuador utilizado		
	Ninguno	HE1	HE2
Delta			
0.5 micros			
1 micros.			

Indique cual es el ecualizador más adecuado para cada uno de los pulsos.

3. Modulaciones PAM

3.1 Eficiencias

En la pantalla del programa principal seleccione en la barra de menú: *Modulaciones PAM>Eficiencias*. Esto despliega la interfaz gráfica siguiente:

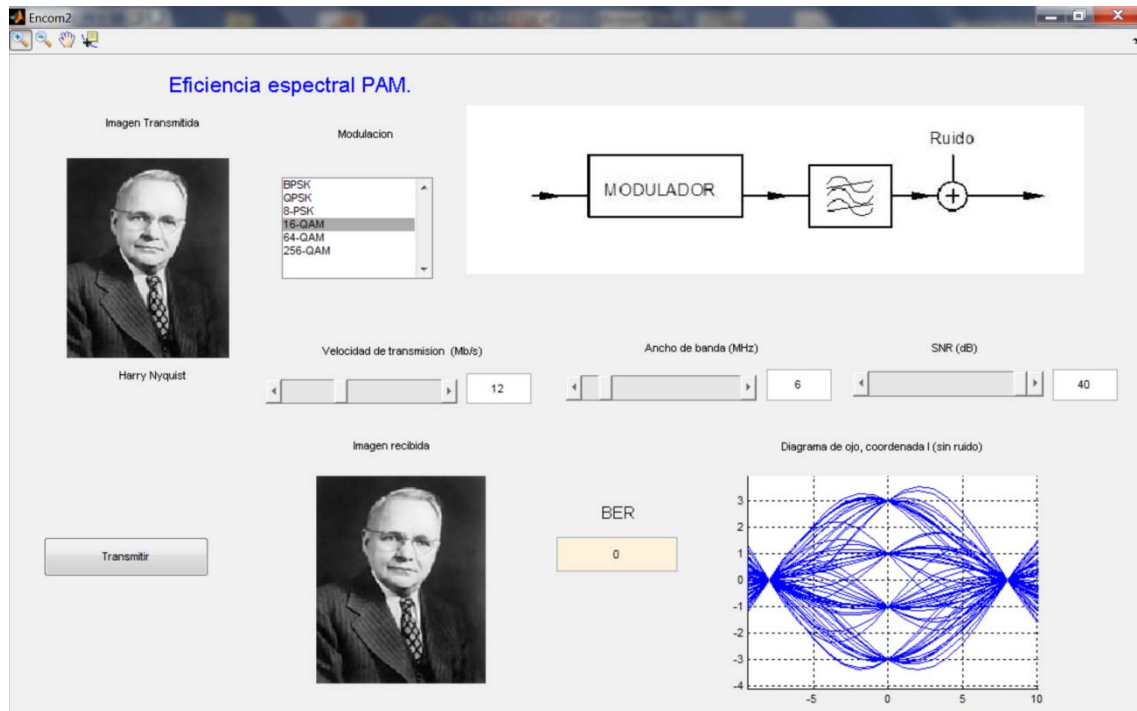


Figura 5. Interfaz gráfica del experimento “Modulaciones PAM. Eficiencias”

El objetivo de esta parte de la práctica es comparar las eficiencias de las distintas modulaciones PAM. También se observará el efecto combinado de ISI y ruido sobre la calidad del sistema.

Sobre esta interfaz realice los siguientes ejercicios.

1.- Anchos de banda para 12Mb/s. Seleccione una SNR de 40dB y una velocidad de transmisión de 12Mb/s. Realice transmisiones con diferentes anchos de banda y busque cuál es el menor ancho de banda con el que consigue un diagrama de ojo ideal (sin ISI).

El diagrama de ojo se muestra sólo para la coordenada I de la modulación PAM. Existiría otro similar para la coordenada Q. La forma de comprobar si el diagrama es ideal es que en el instante de muestreo ($t=0$) todas las trazas se corten exactamente en los valores ideales de la coordenada I. Por ejemplo, la figura 5 muestra un caso sin ISI para 16-QAM. En esta constelación, la coordenada I toma idealmente cuatro valores: -3, -1, 1 y 3. Como se ve en la gráfica, las trazas se cortan exactamente en esos puntos de forma que en los instantes de muestreo se detectará la coordenada I ideal. Se trata de buscar el menor ancho de banda posible en que esta propiedad se sigue cumpliendo.

Rellene la tabla siguiente y compruebe si se corresponde con los valores estudiados en teoría:

Modulación	BW mínimo	$E_f = V_t/BW$
BPSK		
QPSK		
8-PSK		
16-QAM		
64-QAM		

2.- Efecto de los diferentes tipos de error (OPTATIVO). Seleccione la modulación 16-QAM, y una velocidad de transmisión de 24Mb/s

2.1. En primer lugar seleccione un ancho de banda de 6 MHz (y por tanto sin ISI) y reduzca la SNR a 10 dB. Anote la probabilidad de error computada por el sistema y observe la calidad subjetiva de la imagen recibida.

BER (para SNR=10dB) :

2.2 Ponga ahora una SNR de 40dB (muy alta) pero provoque la aparición de ISI reduciendo el ancho de banda del filtro. Reduzca el ancho de banda hasta que se produzca la misma tasa de errores que en el caso anterior. Anote el ancho de banda para el que ocurre esto.

BW para misma BER=

Compare la calidad subjetiva de la imagen para ambas situaciones. En ambos casos hay igual BER, sin embargo la impresión subjetiva de ambas es diferente. En esta última situación haga un zoom en la zona de la cara de Nyquist y comprobará como hay efectivamente una degradación importante de la imagen. Este experimento pone de manifiesto el efecto diferente de la pérdida de calidad debida a ruido y a distorsión (ISI).

3.2 Sistema completo

En la pantalla del programa principal seleccione en la barra de menú: *Modulaciones PAM>Sistema completo*. Esto despliega la interfaz gráfica siguiente:

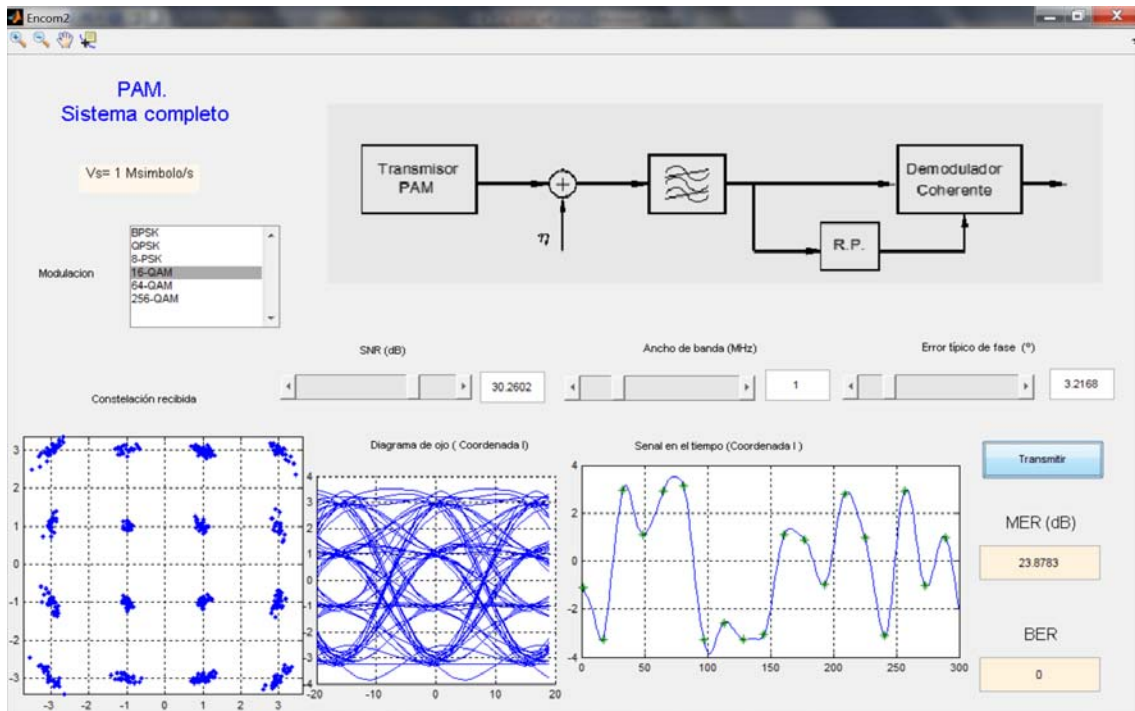


Figura 6. Interfaz gráfica del experimento “Modulaciones PAM. Sistema completo”

El objetivo de esta parte final de la práctica es observar el efecto combinado de los distintos fenómenos estudiados en el curso sobre la calidad de las modulaciones PAM.

Sobre esta interfaz realice los siguientes ejercicios.

1.- Efecto del ruido. Seleccione un ancho de banda de 1MHz (sin ISI), un error típico de fase de 0° y una SNR de 20dB. Observe cómo son los clusters producidos en recepción en las distintas modulaciones PAM. Indique el valor de MER medido para cada constelación e interprete el resultado.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Observe como para las primeras modulaciones de la lista no se producen errores, mientras que al ir aumentando el tamaño de la constelación, empiezan a producirse errores, en las QAM más altas, al ser mucho más sensibles.

2.- Efecto de la ISI. Vuelva a poner la SNR a 40dB y reduzca ahora el ancho de banda a 0.8 MHz. Pruebe las modulaciones BPSK, QPSK, 8PSK y 16-QAM. Observe el aspecto de los clusters recibidos. Observe que ahora tienen más “regularidad” que los producidos por el ruido, y de hecho, muestran cierta estructura interna.

3.- Efecto del ruido de fase. Deje el ancho de banda a 1MHz e introduzca ahora un error aleatorio de fase. Observe cómo se modifican las distintas constelaciones por este efecto, al igual que ya hizo en la práctica anterior. Determine cuál es el error típico de fase (en grados) que produce una MER igual a 20dB. Justifique analíticamente este resultado (pista pase el error típico de fase obtenido a radianes).

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

4.- Comparación BPSK-QPSK (OPTATIVO). Genere primero una BPSK y luego una QPSK, ambas con una SNR de 8dB. Indique la BER obtenida en cada caso y llévelo a la tabla siguiente.

A continuación ponga la SNR a 40dB y genere un error de fase típico de 20°. Vuelva a calcular las BER y refléjelas en la tabla. ¿Qué puede decir respecto a la comparación entre las modulaciones BPSK y QPSK? ¿Son igual de robustas?

.....

.....

.....

.....

	BER(BPSK)	BER (QPSK)
Con SNR=8 dB		
Con $E_{\text{fase}}=20^\circ$		

5. Efectos combinados. Coja una modulación de su elección y seleccione SNR=40dB y BW=1MHz. Aumente el error de fase hasta que la MER sea de 13dB. Anote este valor de error de fase.

A continuación ponga el error de fase a cero y disminuya el ancho de banda. Ajuste BW hasta que la MER sea de nuevo 13dB. Anote este valor de ancho de banda.

Finalmente coloque una SNR de 13dB, un error de fase igual al anotado anteriormente y un ancho de banda igual al anotado después. Indique la MER medida, con todos estos efectos simultáneos.

MER global (dB) =

Justifique analíticamente el valor obtenido

.....

.....

.....

.....