PRÁCTICA 3: COMUNICACIONES DIGITALES. RECEPCIÓN.

Índice de la práctica

1. OBJETIVO	2
2. RECEPCIÓN DIGITAL EN BANDA BASE	3
2.1 COMPARATIVA ENTRE RECEPTOR POR MUESTREO Y RECEPTOR ÓPTIMO (MÁX. 25 MINUTOS) 2.2 COMPARATIVA ENTRE TRANSMISIÓN DIGITAL Y ANALÓGICA (MÁX. 20 MINUTOS)	
3. RECEPCIÓN DIGITAL MODULADA	8
3.1 ASK: RECEPTOR NO COHERENTE (MÁX. 15 MINUTOS)	8
3.2 ERRORES DE FASE Y FRECUENCIA EN RECEPTORES DIGITALES (MÁX. 15-20 MINUTOS)	9
3 3 REGIONES DE DECISIÓN EN EL PLANO I-O (MÁX. 10-15 MINUTOS)	12

1. Objetivo

La estructura típica de un sistema de comunicaciones digital se presenta en el siguiente diagrama de bloques:

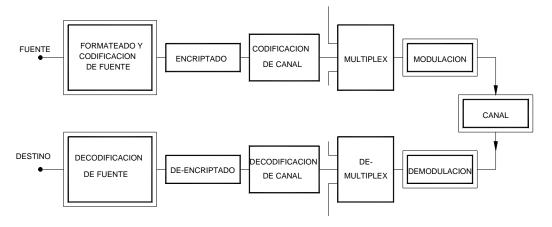


Figura 1. Estructura típica de un sistema de comunicaciones digital

El objetivo de esta práctica es estudiar la rama inferior del diagrama de bloques. Dicha rama se corresponde con las funciones que debe realizar un receptor de comunicaciones digitales. En concreto, se va a estudiar el bloque de demodulación o decodificación de línea. Dicho estudio se realiza ejecutando el programa >> *Practica3* en Matlab.



Figura 2. Interfaz gráfica del programa principal

La teoría necesaria para la realización de la práctica se corresponde con el Tema 6 de los apuntes de la asignatura.

2. Recepción digital en banda base

El estudio de la recepción digital se realiza ejecutando el programa >> Practica3 en Matlab. En general en esta práctica se envían secuencias de bits largas para calcular probabilidades de error. En consecuencia es necesario esperar a que la herramienta realice los cálculos, que no son inmediatos.

2.1 Comparativa entre receptor por muestreo y receptor óptimo (máx. 25 minutos)

El objetivo de este apartado es comparar el comportamiento del receptor por muestreo y del receptor óptimo en un sistema de comunicaciones digital en banda base. Para ello, en la pantalla del programa principal seleccione en la barra de menú: *Banda Base > Receptor muestreo vs óptimo*. Esto despliega una interfaz gráfica que nos permitirá realizar dicha comparación.

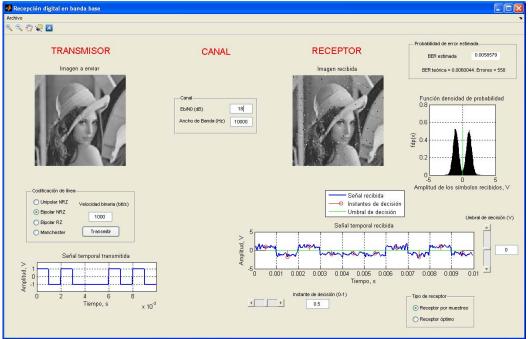


Figura 3. Interfaz gráfica de la herramienta de recepción digital en banda base

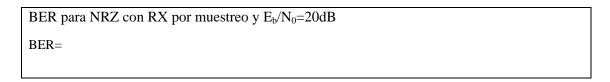
Se va a simular la transmisión de una imagen con un sistema de comunicaciones digital en banda base. Utilizando el menú *Archivo* > *Cargar Archivo*, cargue un fichero de imagen.

Configure el transmisor con una *Velocidad binaria* de 1000 bit/s, y una *Codificación de línea Unipolar NRZ*. Configure el *Canal* con un *Ancho de banda* de 10000 Hz y una relación E_b/N_0 de 20 dB. Seleccione en el panel *Tipo de receptor*, la opción *Receptor por muestreo*, y pulse el botón *Transmitir*.

El programa muestra en la esquina inferior izquierda los diez primeros símbolos de la señal temporal transmitida. En la esquina inferior derecha muestra los diez primeros

símbolos de la señal recibida, los instantes de decisión y el umbral de decisión de dicho receptor.

Arriba a la derecha se muestra la imagen recibida, tras la decodificación de línea y de fuente. En el panel de la esquina superior derecha se muestra la *Probabilidad de error teórica*, el *Número de bits erróneos* de la transmisión y la *Probabilidad de error estimada* en esta transmisión. Anote el resultado, como referencia.



Adicionalmente, se muestra un histograma que representa una estimación de la *Función densidad de probabilidad* de la amplitud de los símbolos recibidos, con el umbral de decisión en trazo verde.

La imagen recibida será muy ruidosa, ya que el umbral de decisión no es el óptimo. Coloque el *Umbral de decisión* en su punto correcto, escribiendo en la casilla correspondiente o usando la barra de desplazamiento vertical que proporciona el programa. Tras este ajuste deberá conseguir una *BER estimada* muy parecida a la *BER teórica*.

Imagine que ahora se reduce el ancho de banda del filtro de 10000 a 5000 Hz. Eso mejorará la SNR, o alternativamente nos permitirá reducir la Energía media por bit, manteniendo constante aproximadamente la BER ¿Cuál sería el ahorro de potencia teórico si reducimos el ancho de banda de 10000 a 5000 Hz? Compruebe su cálculo reduciendo E_b/N_0 en el simulador hasta que obtenga la misma BER que con el ancho de banda anterior.



Disminuya la relación E_b/N_0 a 12 dB, y compruebe cómo aumenta la *BER* y la imagen recibida se hace mucho más ruidosa. Fíjese cómo en el histograma de amplitud de símbolos se solapan las dos distribuciones gaussianas que antes eran muy claras.

Ahora cambiamos de receptor. Seleccione en el panel *Tipo de receptor*, la opción *Receptor óptimo*. La imagen recibida será muy ruidosa, ya que el instante de decisión no es el óptimo. Coloque el *Instante de decisión* en su punto correcto (al final del intervalo de símbolo), escribiendo un 1 en la casilla correspondiente o usando la barra de desplazamiento vertical.

Si ha seleccionado el instante de decisión óptimo, observará que la imagen recibida es casi perfecta. Además, la *BER* se habrá reducido drásticamente respecto al receptor por muestreo.

Vuelva a configurar un Ancho de banda de 10000 Hz, una relación E_b/N_0 de 20 dB y Receptor por muestreo. Cambie la Codificación de línea a Bipolar NRZ y pulse el botón Transmitir. Una vez haya seleccionado el Umbral de decisión óptimo comprobará cómo ha disminuido la BER con respecto a usar codificación Unipolar con la misma relación E_b/N_0 .

Utilizando codificación *Bipolar NRZ*, disminuya 3 dB la relación E_b/N_0 y observe cómo obtiene una *BER* igual a la del caso *Unipolar NRZ* con 20dB. Esto es así porque la codificación bipolar supone un ahorro de 3 dB de potencia respecto a la codificación unipolar para la misma BER.

Con una relación E_b/N_0 de 15 dB, cambie la *Codificación de línea* a *Bipolar RZ* y seleccione un *Receptor por muestreo*. Razone cuál sería el intervalo de tiempos (dentro del periodo de símbolo) en el que podemos seleccionar un *Instante de decisión* que nos permita recibir correctamente la imagen.

Espacio reservado para contestar		

Por último, cambie la *Codificación de línea* a *Manchester* y seleccione un *Receptor por muestreo*. Con una relación E_b/N_0 de 50 dB, configure el *Instante de decisión* a 0.25 veces el periodo de símbolo. Puede observar que la imagen recibida es perfecta. Cambie ahora el *Instante de decisión* a 0.75 veces el periodo de símbolo. Observe qué ocurre y explique por qué sucede este efecto.

Espacio reservado para contestar	

2.2 Comparativa entre transmisión digital y analógica (máx. 20 minutos)

El objetivo de este apartado es comparar la calidad que se obtiene con una transmisión analógica y con una transmisión digital en igualdad de condiciones.

Para ello, en la pantalla del programa principal seleccione en la barra de menú: *Banda Base > Comparativa analógico vs digital*. Esto despliega una interfaz gráfica que nos permitirá realizar dicha comparación.

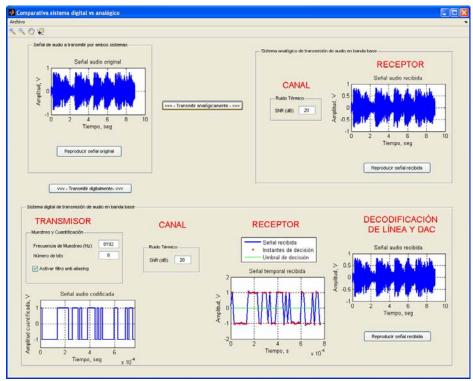


Figura 10. Interfaz gráfica de la herramienta de comparación analógico vs. digital

El programa simula la transmisión de una señal de audio en banda base usando un sistema analógico y un sistema digital. La señal de audio original se muestra en el panel superior izquierdo y puede escucharla pulsando el botón *Reproducir señal original*.

El sistema analógico envía la señal de audio, tal y como fue captada, a través de un canal ruidoso. En el panel superior derecho se puede seleccionar la *SNR* a la salida del canal, y se muestra la señal con el ruido añadido. Puede escuchar la señal ruidosa pulsando el botón *Reproducir señal recibida*, dentro del panel superior derecho.

El sistema digital realiza muestreo, cuantificación y codificación de la señal. Seguidamente, codifica la señal con un código Bipolar NRZ, la envía a través de un canal ruidoso y se recibe con un receptor óptimo.

En el panel inferior puede configurar el proceso de formateado de fuente (frecuencia de muestreo, número de bits y existencia de filtro antialiasing). En la figura inferior izquierda se muestra la señal de audio tras la codificación de fuente y de línea. Dicha señal se envía a un canal ruidoso. Puede seleccionar la *SNR* a la salida del canal. En la figura inferior central se muestra la señal recibida con el ruido añadido tras pasar por el filtro adaptado. Por último, en la figura inferior derecha se muestra la señal reconstruida después de la decodificación de línea y de fuente. Puede escuchar dicha señal pulsando el botón *Reproducir señal recibida*, dentro del panel inferior.

En este ejercicio se va a comparar la señal que se recibiría con el sistema analógico y con el sistema digital para un mismo valor de relación señal a ruido *SNR*.

En primer lugar, introduzca una *SNR* de 30 dB tanto para el sistema digital como para el analógico.

Pulse el botón *Transmitir analógicamente* y podrá visualizar y reproducir la señal recibida por el sistema analógico.

Configure el sistema digital con una *Frecuencia de muestreo* de 8192 Hz, 8 bits/muestra y filtro antialiasing activado. A continuación, pulse el botón *Transmitir digitalmente* y podrá visualizar y reproducir la señal recibida por el sistema digital.

La calidad de ambas señales es prácticamente igual que la de la señal original.

Sin embargo, el sistema de transmisión digital necesita mucho más ancho de banda que el analógico. Para reducir el ancho de banda requerido por el sistema digital, disminuya el *Número de bits* del sistema digital. Puede observar cómo a medida que va disminuyendo el número de bits, el ruido de cuantificación va aumentando y la calidad percibida empeora.

Este ejemplo demuestra que para *SNR* muy alta el sistema analógico tiene mayor calidad que el digital, ya que el sistema digital siempre distorsiona algo la señal en el proceso de cuantificación. Además, tiene el inconveniente de que el ancho de banda ocupado por el sistema digital es mayor.

Sin embargo, existen ventajas que motivan el uso de sistemas digitales. Vamos a verlo con otro ejemplo. Configure ahora una *SNR* de 3 dB tanto para el sistema digital como para el analógico. Configure el sistema digital con una frecuencia de muestreo de 8192 Hz, 8 bits/muestra y filtro antialiasing activado. ¿Qué sistema da mejor calidad?



Baje la SNR del sistema digital hasta 0dB y, aumentando la *SNR* del sistema analógico busque un punto donde la calidad que percibe de las señales recibidas sea similar. La diferencia entre ambas *SNR* nos da una estimación del ahorro de potencia del sistema digital frente al analógico.

SNR del sistema analógico para calidad similar(dB) = Ahorro de potencia por el uso de tecnología digital (dB) =

3. Recepción digital modulada

El estudio de la recepción digital modulada se realiza ejecutando el programa >> *Practica3* en Matlab.

3.1 ASK: receptor no coherente (máx. 15 minutos)

El objetivo de este apartado es estudiar el receptor no coherente y el receptor óptimo en un sistema de comunicaciones digital con modulación ASK. De ese modo podremos comparar sus prestaciones y analizar sus ventajas e inconvenientes.

En la pantalla del programa principal seleccione en la barra de menú: *Modulaciones* > *Receptor no coherente vs óptimo*. Esto despliega una interfaz gráfica que nos permitirá realizar dicha comparación.

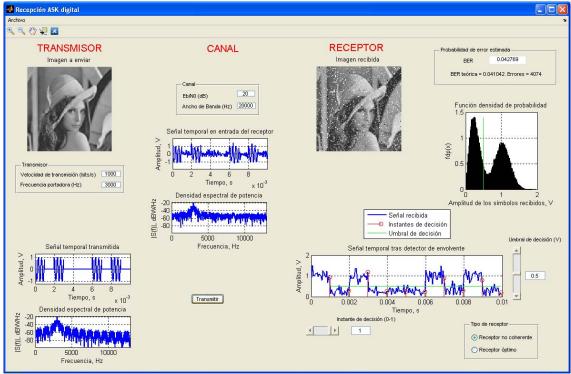


Figura 11. Interfaz gráfica de la herramienta de recepción ASK

El programa simula la transmisión de una imagen con un sistema de comunicaciones digital con modulación ASK. Utilizando el menú *Archivo* > *Cargar Archivo*, cargue un fichero de imagen.

Configure el panel de *Canal* con un *Ancho de banda* de 20000 Hz y una relación E_b/N_0 de 30 dB. En el panel de configuración del *Transmisor* seleccione una *Velocidad de Transmisión* de 1000 bit/s y una *Frecuencia portadora* de 3000 Hz. Seleccione, en el panel *Tipo de receptor*, la opción *Receptor no coherente* y pulse el botón *Transmitir*.

El programa muestra en la esquina inferior izquierda los diez primeros símbolos de la señal temporal transmitida, así como su densidad espectral de potencia. En el centro muestra los diez primeros símbolos de la señal temporal a la entrada del receptor (tras pasar por el canal), así como su densidad espectral de potencia. En la esquina inferior derecha muestra los diez primeros símbolos de la señal a la entrada del bloque de muestreo y decisión, los instantes de decisión y el umbral de decisión utilizados por dicho receptor.

Arriba a la derecha se muestra la imagen recibida, tras la decodificación de línea y de fuente. En el panel de la esquina superior derecha se muestra la *Probabilidad de error teórica*, el *Número de bits erróneos* de la transmisión y la *Probabilidad de error estimada* en esta transmisión.

Adicionalmente, se muestra un histograma que representa una estimación de la *Función densidad de probabilidad* de la amplitud de los símbolos recibidos, con el umbral de decisión en trazo verde.

En las condiciones anteriores, si ha seleccionado un *Instante y Umbral de decisión* correctos, la imagen recibida será perfecta. Disminuya ahora la relación E_b/N_0 y compruebe cómo al reducir esta relación, aumenta la *BER* y empeora la imagen recibida. Observe cómo el histograma de amplitudes recibidas está más disperso alrededor de los dos valores ideales.

Opcional: Si le sobra tiempo, pruebe a utilizar el receptor óptimo y observe como mejora el resultado.

3.2 Errores de fase y frecuencia en receptores digitales (máx. 15-20 minutos)

El objetivo de este apartado es analizar el efecto de los errores de fase y frecuencia en el oscilador local de un receptor digital. Como ejemplo se va a utilizar una modulación M-PSK y su receptor óptimo.

En la pantalla del programa principal seleccione en la barra de menú: *Modulaciones* > *Errores de fase y frecuencia*. Esto despliega una interfaz gráfica que nos permitirá realizar dicho estudio.

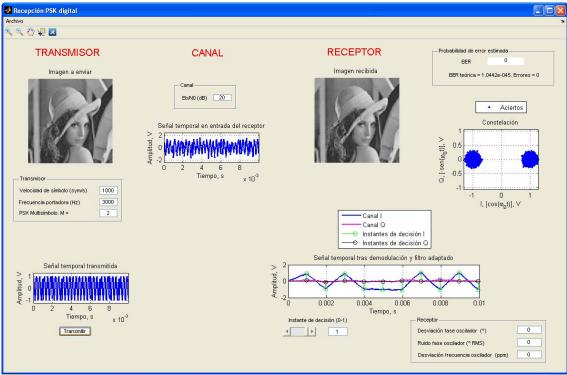


Figura 12. Interfaz gráfica de la herramienta de recepción PSK

El programa simula la transmisión de una imagen con un sistema de comunicaciones digital con modulación M-PSK. Utilizando el menú *Archivo* > *Cargar Archivo*, cargue un fichero de imagen.

Configure el panel de *Canal* con una relación E_b/N_0 de 30 dB. En el panel de configuración del *Transmisor* seleccione una *Velocidad de símbolo* de 1000 sym/s, una *Frecuencia portadora* de 3000 Hz y un alfabeto de M = 4 símbolos (QPSK). *Instante de decisión=1*. Pulse el botón *Transmitir*.

El programa muestra en la esquina inferior izquierda los diez primeros símbolos de la señal temporal transmitida. En el centro muestra los diez primeros símbolos de la señal temporal a la entrada del receptor (tras pasar por el canal). En la esquina inferior derecha muestra los diez primeros símbolos a la entrada del bloque de muestreo y decisión, con los instantes de decisión utilizados por dicho receptor.

Arriba a la derecha se muestra la imagen recibida, tras la decodificación de línea y de fuente. En el panel de la esquina superior derecha se muestra la *Probabilidad de error teórica*, el *Número de bits erróneos* de la transmisión y la *Probabilidad de error estimada* en esta transmisión.

Adicionalmente, se muestra la constelación recibida en el plano I-Q.

Introduzca una *Desviación de fase* constante en el oscilador local del receptor de 10°. ¿Qué sucede en la constelación recibida? Cambie el valor de la desviación de fase para comprender su efecto.

Espacio reservado para contestar
Vuelva a dejar una <i>Desviación de fase</i> de 0°, e introduzca un <i>Ruido de fase</i> en el oscilador local de 3° RMS. Esto introduce un ruido de fase que varía de forma aleatoria con el tiempo siguiendo una distribución gaussiana con la desviación típica seleccionada. ¿Qué sucede en la constelación recibida? Aumente progresivamente el valor del ruido de fase para comprender su efecto.
Espacio reservado para contestar
Vuelva a dejar a 0° el <i>Ruido de fase</i> , e introduzca una <i>Desviación de frecuencia</i> en el oscilador local de 1 ppm (parte por millón de la frecuencia portadora). ¿Qué sucede en la constelación? Tenga en cuenta que un error de frecuencia constante es igual a un error de fase lineal con el tiempo.
Espacio reservado para contestar
Aumente la <i>Desviación de frecuencia</i> a 10 ppm. La imagen recibida presenta franjas verticales sin errores y otras franjas incorrectas. ¿Puede explicar este efecto? Tenga en cuenta que los píxeles de la imagen se transmiten siguiendo una ordenación por columnas.
Espacio reservado para contestar

3.3 Regiones de decisión en el plano I-Q (máx. 10-15 minutos)

El objetivo de este apartado es estudiar el proceso de decisión de un receptor digital con modulación I-Q. Dicha decisión puede analizarse de forma más sencilla usando el espacio vectorial I-Q. Como ejemplo se va a utilizar un esquema de modulación M-QAM y su receptor óptimo.

En la pantalla del programa principal seleccione en la barra de menú: *Modulaciones* > *Regiones de decisión en plano IQ*. Esto despliega una interfaz gráfica que nos permitirá realizar dicho estudio.

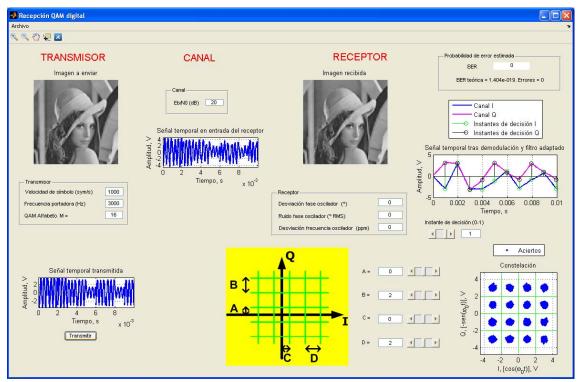


Figura 13. Interfaz gráfica de la herramienta de recepción QAM

El programa simula la transmisión de una imagen con un sistema de comunicaciones digital con modulación M-QAM. Utilizando el menú *Archivo* > *Cargar Archivo*, cargue un fichero de imagen.

Configure el panel de *Canal* con una relación E_b/N_0 de 20 dB. En el panel de configuración del *Transmisor* seleccione una *Velocidad de símbolo* de 1000 sym/s, una *Frecuencia portadora* de 3000 Hz y un alfabeto de M = 16 símbolos. *Instante de decisión* =1. Pulse el botón *Transmitir*.

El programa muestra en la esquina inferior izquierda los diez primeros símbolos de la señal temporal transmitida. En el centro muestra los diez primeros símbolos de la señal temporal a la entrada del receptor (tras pasar por el canal). En la derecha muestra los diez primeros símbolos de la señal a la entrada del bloque de muestreo y decisión, con los instantes de decisión utilizados por dicho receptor.

Arriba a la derecha se muestra la imagen recibida, tras la decodificación de línea y de fuente. En el panel de la esquina superior derecha se muestra la *Probabilidad de error teórica*, el *Número de bits erróneos* de la transmisión y la *Probabilidad de error estimada* en esta transmisión.

También se muestra la constelación recibida en el plano I-Q con las regiones de decisión delimitadas con líneas verdes.

Con los errores en el oscilador local del receptor puestos a cero y con una relación E_b/N_0 de 20 dB, varíe el parámetro A. Esto produce que cambien las regiones de decisión, dejando de ser las óptimas. Aumente A hasta que empiecen a aparecer errores en la transmisión. Observe cómo varía la *BER* y, por tanto, la calidad de la imagen recibida.

Por último, experimente con distintos tamaños de alfabeto. Compruebe que para una misma relación E_b/N_0 , cuanto mayor es el número de símbolos mayor es la *BER*. Es el precio a pagar por un aumento de la velocidad de transmisión.

Las modulaciones M-QAM son adecuadas para canales limitados en ancho banda, ya que aumentar el número de símbolos implica un mayor gasto de potencia para conseguir una misma BER, pero al mismo tiempo mejora la eficiencia espectral.