

# Capítulo 1

## Introducción

Este capítulo presenta una introducción a la asignatura, que trata sobre los principios teóricos básicos que se aplican en el diseño y análisis de sistemas de comunicaciones. El capítulo comienza definiendo lo que es un sistema de comunicaciones, enumerando los elementos funcionales básicos que lo forman, y describiendo brevemente la principal función de cada uno de ellos. Posteriormente, se realizan algunas clasificaciones generales de los sistemas de comunicaciones en distintos tipos, y se discuten varios aspectos relacionados con el diseño y análisis de un sistema de comunicaciones, para finalizar presentando los objetivos de la asignatura y los contenidos de la misma.

### 1.1. Definición de un sistema de comunicaciones

Un sistema de comunicaciones tiene como fin la *transmisión de información* entre dos puntos separados por una distancia pero unidos físicamente por alguna estructura física (natural o artificial) susceptible de ser empleada para ello.

Se puede por tanto definir la transmisión como el proceso de enviar o transportar información de un punto (fuente) hasta otro punto (destino) a través de un canal o medio de transmisión, como se ilustra en la Figura 1.1.



Figura 1.1: Representación general de un sistema de comunicaciones.

El medio de transmisión puede ser cualquier elemento que permita realizar el envío de información entre una fuente y un destino: un cable de pares, una guía de onda, un cable coaxial, una fibra óptica, o la propia atmósfera (utilizando todo el espectro radioeléctrico) son algunos ejemplos habituales. Pero también se pueden considerar medios de transmisión algunos dispositivos de almacenamiento, como CD-ROMS, DVDs, etc., que permiten transportar información entre dos puntos.

En general las fuentes de información no están adecuadas para poder transmitir de forma directa la información que generan utilizando cualquier medio de transmisión; normalmente es necesario

procesar la manifestación física de la fuente para poder introducir la información que contiene de forma eficiente en el medio o canal. La mayoría de medios de transmisión están concebidos para la transmisión de señales eléctricas o electromagnéticas, mientras que la manifestación física de las fuentes no es en muchos casos de naturaleza eléctrica. Por poner ejemplo sencillo, en una fuente de audio (voz, música, etc.), la manifestación física de la información consiste en ondas de presión acústica que viajan a través del aire. Para poder transmitir este tipo de información, en primer lugar es necesario convertir la manifestación física de la información en una señal eléctrica en el lado de la fuente. Esto se hace mediante un *transductor*. El ejemplo clásico de transductor para señales de audio es un micrófono, que transforma las ondas de presión acústica en una señal eléctrica que representa la variación a lo largo del tiempo de la presión acústica. La Figura 1.2 muestra un ejemplo de señal eléctrica asociada a una señal de voz.

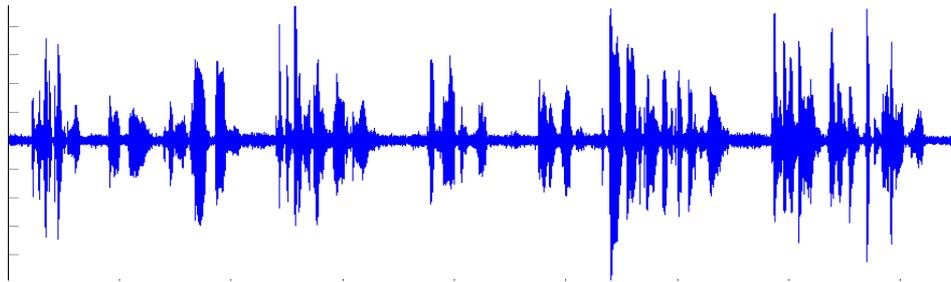


Figura 1.2: Ejemplo de señal eléctrica asociada a una señal de voz.

Una vez que la manifestación física de la información se ha convertido en una señal eléctrica adecuada para representarla, dicha señal eléctrica será procesada por el sistema de comunicaciones, y enviada a través de un cierto medio de transmisión. En el lado del receptor será de nuevo procesada para convertir la señal eléctrica recibida en la correspondiente manifestación física de la información.

## 1.2. Elementos funcionales básicos de un sistema de comunicaciones

En el apartado anterior se ha definido un sistema de comunicaciones y se han descrito brevemente los principales pasos a seguir para la transmisión de información entre dos puntos. En este apartado, esos pasos elementales a seguir se concretarán en la definición de los elementos funcionales básicos que van a formar parte de un sistema de comunicaciones.

Un sistema de comunicaciones está compuesto por múltiples elementos, pero desde un punto de vista funcional, los elementos básicos son los cinco que muestra la Figura 1.3

- Fuente de información
- Transmisor
- Canal
- Receptor
- Destino de la información

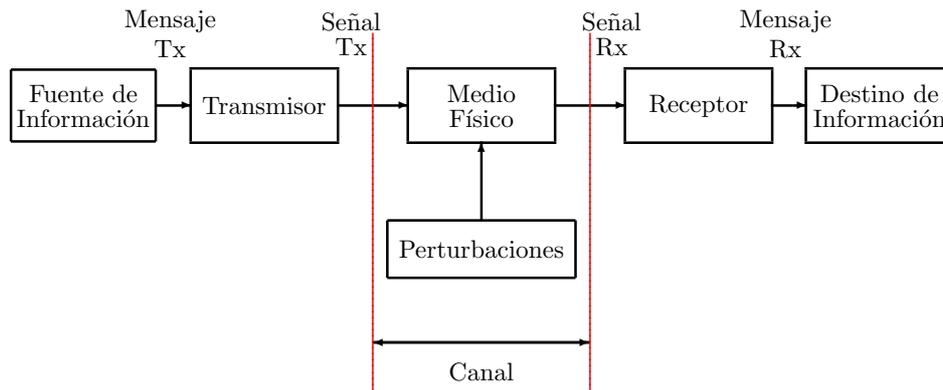


Figura 1.3: Esquema funcional de un sistema de comunicaciones.

A continuación se describe brevemente cada uno de estos elementos funcionales.

### 1.2.1. Fuente de Información

Como indica su nombre, la fuente de información genera la información que se pretende transmitir al otro extremo del sistema de comunicaciones. El mensaje a transmitir será la manifestación física de la información producida por la fuente. Como ya se ha comentado anteriormente, independientemente del tipo de fuente, lo habitual es que un transductor convierta la información en una señal de tipo eléctrico que la representa (por ejemplo, un micrófono convierte una señal acústica en una señal eléctrica, o una cámara de vídeo convierte una secuencia de imágenes en otra señal eléctrica).

Existen muchos tipos de fuentes de información. Si se clasifican desde el punto de vista del formato en que se representa la información, se pueden dividir en fuentes analógicas o digitales. Una fuente analógica produce una información que se manifiesta en variaciones con continuidad de algún tipo de magnitud física. Algunos ejemplos serían la presión en el aire al hablar o la variación continua de temperatura de un termómetro a lo largo del tiempo. En este tipo de fuentes el mensaje a transmitir está representado por una forma de onda continua que representa la variación de la correspondiente magnitud física, como en el ejemplo de la señal de voz de la Figura 1.2. En una fuente digital la información en cambio está representada por un conjunto de símbolos que pertenece a un alfabeto finito, que se envían secuencialmente en intervalos discretos de tiempo (se enviará un símbolo cada  $T$  segundos). Ejemplos de este tipo de fuentes serían ficheros de texto, donde el alfabeto está formado por los posibles caracteres que pueden aparecer en el texto, o los sistemas de datos binarios, donde la información se codifica como una secuencia de unos y ceros (alfabeto binario,  $\{0, 1\}$  o bits).

### 1.2.2. Transmisor

La función del transmisor es convertir la señal de información o mensaje, independientemente de su formato, en una señal eléctrica o electromagnética adecuada para su transmisión a través del medio físico utilizado por el sistema para realizar la comunicación; habitualmente este medio se denominará genéricamente canal de comunicaciones. Para realizar de forma eficiente esta tarea se requiere un conocimiento relativo del canal: por ejemplo, es necesario saber cuanto atenúa el

medio la señal transmitida para amplificarla suficientemente o en qué rango de frecuencias permite el medio realizar la transmisión con la menor distorsión. El transmisor utilizará ese conocimiento relativo del canal para generar una señal adecuada a sus características, de forma que la señal sufra la menor distorsión posible durante su transmisión.

El proceso mediante el cual el transmisor adapta la señal a las características del canal se denomina genéricamente *modulación*. El proceso a realizar dependerá de múltiples factores, como el tipo de fuente de información, las características específicas del canal, las prestaciones requeridas, o los recursos disponibles, en especial la energía de que dispone el transmisor y el ancho de banda disponible en el canal; pero hay algunos aspectos generales que se pueden discutir en este momento. En cuanto al rango de frecuencias de la señal a transmitir, se pueden adoptar dos estrategias distintas de funcionamiento: transmisión en banda base o transmisión paso banda. En una transmisión en banda base se transmite la señal en la misma banda de frecuencias que ocupa de forma natural, que suele ser en bajas frecuencias. En una transmisión paso banda se modifica el rango de frecuencias que ocupa el espectro de la señal. La señal se procesa de tal forma que se traslada su respuesta en frecuencia a otra banda de frecuencias, centrada en torno a una cierta frecuencia central ( $\omega_c$  rad/s o  $f_c$  Hz), que por distintas razones pueda ser más adecuada para la transmisión.

### 1.2.3. Canal

Se denomina de forma genérica como canal al medio físico que se utiliza para enviar la señal desde el transmisor al receptor. Existen distintos tipos de medios que pueden ser utilizados para transportar las señales en un sistema de comunicaciones. Los más comunes son los cables, de distintos tipos como los cables de pares utilizados en los sistemas tradicionales de telefonía, o los cables coaxiales empleados en los sistemas de televisión, las guías de onda, la fibra óptica y el espectro radioeléctrico, en el que el medio es la propia atmósfera y la energía electromagnética que transporta la información se introduce o se extrae de la misma mediante el uso de antenas. Un aspecto importante a tener en cuenta en este último medio de transmisión es que el medio es único y por tanto es compartido entre todos sus potenciales usuarios. Esto hace que en la práctica sea un recurso escaso y que el acceso al mismo esté regulado por las administraciones públicas; de otro modo las interferencias entre los distintos usuarios que trataran de hacer uso del mismo de forma no ordenada harían imposible una utilización eficiente del mismo.

Cada medio físico tiene sus propias características, pero independientemente del medio físico, un canal de comunicaciones introducirá siempre una serie de *perturbaciones* o *distorsiones* sobre las señales durante su transmisión. En el mejor de los casos, en lo que podría considerarse un escenario ideal, el canal introducirá en las señales transmitidas dos efectos: un retardo y una atenuación; ambos efectos son inherentes al propio proceso de transmisión de señales eléctricas o electromagnéticas a través de un medio:

- Las señales sufren una atenuación al propagarse por cualquier medio.
- Las señales tardan un cierto tiempo en recorrer una determinada distancia a través de cualquier medio.

Si sólo aparecen durante la transmisión estos dos efectos, la señal recibida  $r(t)$  se podrá escribir en función de la señal transmitida  $s(t)$  como

$$r(t) = C \cdot s(t - t_0),$$

donde la constante  $C < 1$  define la atenuación y  $t_0$  el retardo. Estos dos efectos son, como ya se ha dicho, inherentes a la transmisión de señales electromagnéticas y por tanto inevitables, pero en la mayor parte de los casos no son problemáticos. La atenuación se puede compensar con una amplificación con un factor de ganancia  $G = 1/C$ . En cuanto al retardo, si está dentro de unos límites razonables no suele tener implicaciones importantes, y dada la velocidad de transmisión de las señales electromagnéticas en la mayoría de las aplicaciones no supone un problema en la práctica. Por tanto, un medio que sólo incluya un retardo y una atenuación podría considerarse un sistema con una respuesta ideal.

Pero además de estos dos efectos, en la práctica aparecerán otro tipo de efectos no deseados, principalmente una distorsión lineal, una distorsión no lineal y ruido, en particular ruido térmico, que siempre estará presente en la transmisión de señales eléctricas o electromagnéticas por la inherente agitación térmica de los portadores de carga (electrones, fotones,...).

En esta asignatura, dado su carácter introductorio, se considerarán únicamente las distorsiones lineales y el ruido térmico, y no se tendrán en cuenta las distorsiones no lineales. En este caso, el modelo que se utilizará para la distorsión lineal es un modelo invariante en el tiempo, que vendrá caracterizado por una respuesta al impulso en el dominio temporal,  $h(t)$ , y la correspondiente representación de dicha respuesta en el dominio de la frecuencia,  $H(j\omega)$ . La relación entre la respuesta del sistema en los dominios temporal y frecuencial está dada por la transformada de Fourier

$$H(j\omega) = \mathcal{TF}\{h(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$h(t) = \mathcal{TF}^{-1}\{H(j\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(j\omega) e^{+j\omega t} d\omega.$$

Considerando la distorsión lineal y el ruido, el modelo del canal de comunicaciones será el denominado modelo de canal lineal, que viene dado por la relación

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau + n(t) = s(t) * h(t) + n(t),$$

y que se muestra conceptualmente en el diagrama de bloques de la Figura 1.4: la salida del canal es el resultado de una distorsión lineal dada por  $h(t)/H(j\omega)$  y la suma del término de ruido  $n(t)$ .

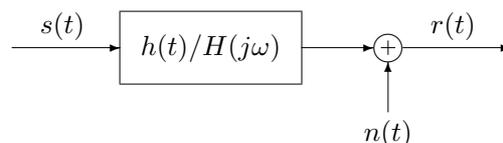


Figura 1.4: Modelo de canal lineal habitualmente utilizado para modelar el canal de comunicaciones.

Conviene recordar que el efecto del retardo y la atenuación se pueden incluir en la respuesta al impulso del sistema. En particular, un sistema ideal sin distorsión lineal de la señal y sin ruido, que sólo genera sobre la señal transmitida una atenuación dada por un factor  $C < 1$  y un retardo  $t_0$ , de forma que la señal recibida es

$$r(t) = C \cdot s(t - t_0),$$

se puede modelar a través de un sistema lineal con respuesta

$$h(t) = C \cdot \delta(t - t_0) \leftrightarrow H(j\omega) = C \cdot e^{-j\omega t_0}.$$

### 1.2.4. Receptor

El receptor debe recuperar la señal original de información (mensaje) a partir de la señal recibida. Como esta señal ha sufrido durante su transmisión una cierta distorsión (en el modelo de canal anterior, una distorsión lineal más el efecto del ruido), en general puede no ser posible recuperar de forma exacta la señal de información transmitida. El receptor debe diseñarse para, considerando las distorsiones que sufrirá la señal durante la transmisión, recuperar con la mayor fidelidad que sea posible la señal de información. La forma en que se mide esa fidelidad varía dependiendo del tipo de señal de información transmitida. Si la información transmitida tiene formato analógico, el objetivo será que la forma de onda de la señal recibida se parezca lo máximo posible a la de la transmitida, y la forma habitual de cuantificar este parecido es mediante la denominada relación señal a ruido (S/N, o SNR de *Signal to Noise Ratio*). Esta relación mide el cociente entre la energía o potencia de la diferencia entre señal transmitida y recibida (que se considera ruido) y la energía o potencia de la señal transmitida. Si el formato de la información transmitida es digital, el objetivo será recibir el menor número de símbolos que representan la información de forma errónea, de forma que se cuantifica la fidelidad con una probabilidad de error de símbolos (o de bits en sistemas binarios, BER de *Bit Error Rate*). En cualquier caso, el receptor en general deberá realizar las siguientes tareas:

- Demodular la señal, lo que significa deshacer todas las transformaciones que se hicieron en el transmisor para acondicionar la señal para su transmisión a través del canal de comunicaciones, como por ejemplo volver la señal a su banda de frecuencias original si se ha realizado una transmisión en paso banda.
- Minimizar el efecto del ruido sobre la señal de información.
- Compensar, si es posible, las distorsiones lineales que haya introducido el canal.

Al igual que en el transmisor, de nuevo el modo en que se realizarán las tres tareas dependerá de múltiples factores, como del formato de la información transmitida o del ancho de banda utilizado. A lo largo del curso se verá cómo se materializan estas funciones para los distintos tipos de modulaciones.

## 1.3. Sistemas de comunicaciones analógicos y digitales

De forma similar a cómo se clasificaron las fuentes de información en cuanto al formato de la información que generan, dando lugar a la distinción entre fuentes analógicas y fuentes digitales, los sistemas de comunicaciones se pueden también clasificar en cuanto al formato en que transportan la información en dos grandes tipos: sistemas analógicos y sistemas digitales. Un sistema de comunicaciones analógico envía la información impresa en una cierta forma de onda continua, mientras que un sistema digital enviará la información impresa en una secuencia de símbolos que se envían secuencialmente a una cierta tasa ( $R_s$  símbolos por segundo). El caso más habitual son los sistemas binarios, en los que la información está contenida en una secuencia de bits (unos y ceros) que se envían a una cierta tasa de bit ( $R_b$  bits/s).

Es importante destacar que un sistema de comunicaciones analógico/digital no está restringido a la transmisión de una fuente del mismo tipo (analógico/digital). En particular, una señal analógica puede digitalizarse, convirtiéndola en una secuencia de bits a una cierta tasa, y posteriormente volver a convertirse en analógica (procesos de conversión analógico/digital, o A/D

y digital/analógico, o D/A). La conversión analógico/digital de una señal consiste en dos pasos. Una señal analógica es continua tanto en el tiempo como en el rango de posibles amplitudes (hay continuidad en los dos ejes de la representación temporal de la señal, como se ve en la Figura 1.5). Para convertirla a formato digital la señal se discretizará tanto en tiempo como en amplitud, como se ilustra también en la figura:

- De tiempo continuo se pasa a muestras de la señal en tiempo discreto mediante un muestreo periódico

$$s[n] = s(t)|_{t=nT_m} = s(nT_m),$$

donde  $T_m$  es el intervalo de muestreo. Si la señal  $s(t)$  es limitada en banda, con un ancho de banda de  $B$  Hz, el conocido teorema de Nyquist para el muestreo demuestra que no hay pérdida de información en el proceso de muestreo; esto significa que es posible recuperar la señal original a partir de sus muestras mediante una interpolación con funciones sincs (lo que es equivalente a interpolar con un filtro paso bajo del ancho de banda de la señal). Para ello, sólo es necesario garantizar que el intervalo de muestreo  $T_m$  sea lo suficientemente pequeño para garantizar que su inversa, la frecuencia de muestreo, sea al menos el doble del ancho de banda de la señal expresado en Hz

$$\frac{1}{T_m} = f_m \text{ muestras/s} \geq B \text{ Hz.}$$

- Después del muestreo, la digitalización finalizará cuantificando cada una de las muestras resultantes con  $n$  bits. En la figura se representa un ejemplo de cuantificación con 3 bits, en el que el rango dinámico de la señal se divide en 8 posibles valores (ya que 3 bits permiten representar  $2^3 = 8$  valores). En este paso sí se produce una distorsión de la señal de información, ya que de los valores originales de la señal en cada muestra (círculos sin relleno en la figura) se pasa al valor cuantificado más cercano (círculos sólidos en la figura). A este efecto se le denomina ruido de cuantificación.

El proceso de conversión de una señal analógica a digital produce por tanto una secuencia de bits. La tasa de dicha secuencia vendrá dada por el producto entre la tasa de muestreo y el número de bits por muestra

$$R_b \text{ bits/s} = f_m \text{ (muestras/s)} \times n \text{ (bits/muestra).}$$

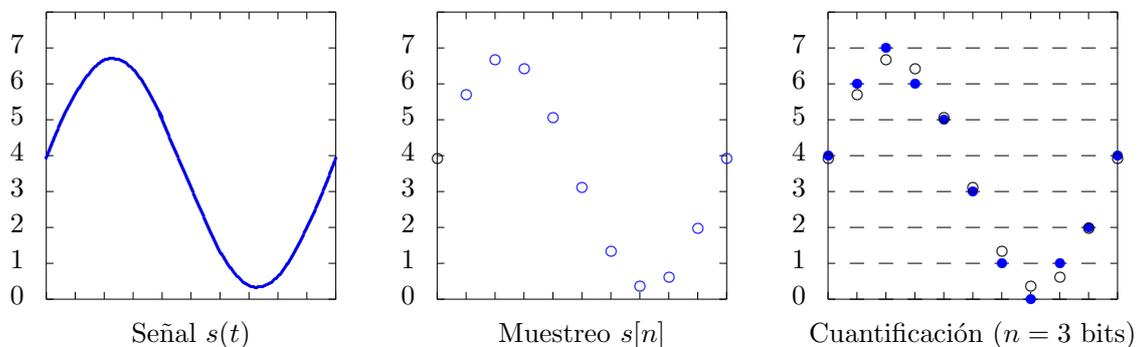


Figura 1.5: Conversión de una señal analógica a formato digital (secuencia de bits).

Aunque la conversión conlleva siempre un cierto grado de distorsión de la señal de información, debido a ese ruido de cuantificación, en muchos casos esa distorsión puede llegar a ser inapreciable.

Para ello, sólo hay que utilizar un número suficiente de bits por muestra. Si se incrementa el número de bits, el número de niveles de cuantificación será  $2^n$ , con lo que la diferencia entre niveles dentro del rango de la señal disminuirá progresivamente a medida que se aumenta  $n$ , llegando un momento en que la distorsión debida a la cuantificación será prácticamente inapreciable al reconstruir la señal a tiempo continuo interpolando con sincs (filtrado paso bajo). El coste asociado a la disminución de la distorsión que se consigue al aumentar el número de bits por muestra es el aumento de la tasa binaria de la secuencia de bits resultante de la conversión A/D.

Actualmente la tendencia es que las fuentes de naturaleza analógica no se transmitan con un sistema de comunicaciones analógico, sino que se conviertan a formato digital, se transmitan con un sistema de comunicaciones digital y finalmente se conviertan de nuevo a formato analógico. Esto es así porque aunque cada tipo de sistema tiene sus ventajas y sus inconvenientes frente al otro tipo, en general las ventajas de los sistemas digitales tienen mayor peso que sus desventajas para la mayoría de las aplicaciones. Esto hace que en la actualidad los sistemas de comunicaciones digitales predominen claramente sobre los sistemas de comunicaciones analógicos. Cuáles son esas ventajas de los sistemas digitales sobre los sistemas analógicos que los han hecho claramente preponderantes será algo que se discutirá con detalle en el Capítulo 4, dedicado al estudio de los sistemas de comunicaciones digitales.

Aunque también es posible transmitir información digital utilizando sistemas de comunicaciones analógicos, esta opción es mucho menos frecuente, y en la práctica está reducida a unos pocos sistemas con necesidades muy específicas.

## 1.4. Diseño de un sistema de comunicaciones

Al diseñar un sistema de comunicaciones hay que considerar distintos factores. Algunos de los más importantes son los siguientes:

- Calidad o prestaciones requeridas.
- Uso de recursos.
- Coste económico.
- Tecnología disponible para la implementación.

A continuación se analizarán brevemente cada uno de estos factores.

### 1.4.1. Calidad requerida

Entre las especificaciones de un sistema de comunicaciones una de las más importantes es la calidad requerida para el mismo. El diseño del sistema tendrá que estar encaminado a lograr la calidad especificada con las restricciones impuestas por los recursos disponibles y con el menor coste posible, sin superar en ningún caso el coste máximo asumible para el sistema. Naturalmente, existe siempre un compromiso entre estos factores; cuanto mayores sean los recursos disponibles, mayor será la calidad que se podrá obtener.

La forma de especificar la calidad de un sistema de comunicaciones es diferente en función del tipo de sistema. Para sistemas de comunicaciones analógicos, la calidad está ligada a la *fidelidad* de

la señal recibida: la señal recibida debe ser lo más parecida que sea posible a la señal transmitida originalmente. Como se ha discutido con anterioridad, en el proceso de transmisión se producirán distorsión e interferencias, fundamentalmente ruido térmico. Esto supone que la señal recibida será distinta de la señal original. Para medir lo fiel que es una señal se suele utilizar como figura de mérito la relación señal a ruido (S/N), que nos da la relación entre la potencia de la señal y del ruido. En algunas ocasiones, al utilizar esta medida se considerará como ruido el efecto conjunto de todas las distorsiones que se producen sobre la señal transmitida, es decir, a la diferencia entre la señal transmitida y la señal recibida. En realidad se incluye el efecto del ruido y de las demás distorsiones lineales o no lineales que se producen. Por esta razón, en estas ocasiones también se le denomina relación señal a distorsión. Como es lógico, cuanto mayor sea el valor de esta relación señal a ruido (o a distorsión) mayor es la calidad del sistema.

En sistemas de comunicaciones digitales, en cambio, dado que la información está contenida en una secuencia de símbolos de un alfabeto finito (habitualmente binario, unos y ceros), la figura de mérito que se utiliza normalmente para cuantificar la calidad del sistema será la *tasa (o probabilidad) de error* de símbolo en general, o en el caso particular binario de bit (en este caso se conoce comúnmente con el acrónimo inglés BER, de *Bit Error Rate* o *Bit Error Ratio*). Naturalmente, cuanto menor sea esta tasa o probabilidad de error mayor será la calidad del sistema digital.

### 1.4.2. Recursos disponibles

Los recursos disponibles para su uso por el sistema de comunicaciones serán determinantes a la hora de limitar las máximas prestaciones alcanzables. Entre los recursos a considerar, los más importantes habitualmente son el ancho de banda y la energía.

El ancho de banda va a estar limitado en la práctica en la mayor parte de las aplicaciones. Bien por limitaciones físicas, dado el ancho de banda limitado que tienen algunos de los medios de transmisión habituales, como los cables, o bien por limitaciones administrativas, fundamentalmente cuando se transmite utilizando el espectro radioeléctrico, ya que el uso de este medio compartido está completamente regulado.

El ancho de banda está ligado a la calidad de la señal. En sistemas analógicos, aplicaciones con más precisión requieren mayor ancho de banda. Esto es así por dos razones principalmente. En algunos casos el ancho de banda real de las señales analógicas puede ser mayor que el ancho de banda disponible para la transmisión, por lo que hay que filtrar las señales para reducir su ancho de banda antes de la transmisión. Si se produce esta situación, cuantas más componentes frecuenciales se eliminen (a medida que disminuya el ancho de banda), mayor será la distorsión que sufre la señal de información. En otros casos, una de las formas de reducir el efecto del ruido es ensanchar el espectro de la señal de modo que haya cierta redundancia en la señal transmitida. Cuanto más se aumente el ancho de banda de la señal, mayor será la protección frente al ruido que se obtenga durante la transmisión. Esto se verá con más detalle al analizar las prestaciones de las denominadas modulaciones angulares, o modulaciones de fase y frecuencia. En sistemas digitales, el ancho de banda está relacionado con la máxima tasa de transmisión que se puede obtener con unas mínimas prestaciones, de forma que a mayor ancho de banda mayor capacidad de transmisión (transmisión a una mayor velocidad).

### 1.4.3. Coste del sistema y tecnologías existentes

El coste del sistema es también otro factor a considerar en el diseño del mismo, ya que habitualmente habrá un coste objetivo o un coste máximo asumible que no podrá superarse. Este coste está relacionado con las tecnologías utilizadas en la implementación de transmisores y receptores, y en la elección del medio de transmisión a utilizar. Por tanto, a la hora de decidir sobre algunas opciones de diseño el conocimiento de las posibles tecnologías a utilizar y su correspondiente coste será un aspecto importante.

Pese a esta importancia, en esta asignatura no se tratará este aspecto, que queda fuera de los objetivos de la asignatura, que como veremos en la siguiente sección tiene una orientación más teórica que práctica y se centrará en los aspectos teóricos básicos que rigen el funcionamiento de un sistema de comunicaciones.

## 1.5. Objetivos y organización de la asignatura

Una vez hecha una breve introducción a los sistemas de comunicaciones, en esta última sección del capítulo se van a presentar los objetivos fundamentales de la asignatura y la organización de los contenidos de la misma para lograr dichos objetivos.

### 1.5.1. Objetivos de la asignatura

Esta asignatura trata de establecer los principios teóricos fundamentales que se aplican en el diseño y análisis de sistemas de comunicaciones, tanto analógicos como digitales. Para ello, será fundamental la caracterización matemática de un sistema de comunicaciones y de las señales presentes en el mismo, tanto señales transmitidas como señales interferentes como el ruido. Esta caracterización será la que permita realizar el análisis de un sistema de comunicaciones, y deducir los principios teóricos que definen el diseño óptimo de cada uno de los distintos elementos funcionales que lo forman. En particular se pueden establecer los siguientes objetivos fundamentales:

- Introducir la caracterización estadística de las señales relacionadas con sistemas de comunicaciones, de las señales de información y especialmente del ruido térmico que siempre aparece en la transmisión de una señal electromagnética.
- Presentar el concepto de modulación en sistemas de comunicaciones analógicos, y estudiar los tipos de modulación más comunes: las modulaciones de amplitud y las modulaciones angulares, de fase y frecuencia.
- Formar la base del núcleo de conocimientos sobre comunicaciones digitales, presentando de forma simplificada el concepto de modulación digital, la transmisión sobre canales gaussianos, donde el principal elemento de distorsión considerado será el ruido térmico, y estudiando los principios teóricos básicos para diseñar un demodulador digital, aplicando los principios estadísticos de la teoría de la decisión y la representación vectorial de las señales. Finalmente, se utilizarán principios de la teoría de la información para obtener algunos de los límites fundamentales que se pueden alcanzar en un sistema digital de comunicaciones.

### 1.5.2. Organización de la asignatura

Para cumplir los objetivos presentados en el apartado anterior, la asignatura se ha organizado en los siguientes cinco capítulos:

#### 1. Introducción

En este primer capítulo se ha hecho una breve introducción a los sistemas de comunicaciones para presentar los objetivos y la organización de la asignatura.

#### 2. Ruido en los sistemas de comunicaciones

En este capítulo se presenta la caracterización estadística de las señales en un sistema de comunicaciones, y en particular de la señal de ruido térmico que siempre aparece presente como elemento de distorsión en la transmisión de señales eléctricas o electromagnéticas. Para realizar esta caracterización, se repasan algunos conceptos básicos de la teoría de variable aleatoria y de procesos aleatorios, para presentar el modelo estadístico comúnmente empleado para modelar el ruido térmico. Este modelo se aplicará en el cálculo de la relación señal a ruido en la transmisión de una señal de información.

#### 3. Modulaciones analógicas

En este capítulo se presentan distintas técnicas de modulación utilizadas en sistemas analógicos de comunicaciones. En particular se presentan las variantes más conocidas de modulaciones de amplitud, y las modulaciones angulares de fase y frecuencia. Para cada tipo de modulación se presenta su descripción en el dominio del tiempo, sus características espectrales y sus requerimientos de potencia. Finalmente, se analiza el comportamiento de cada modulación frente al ruido, evaluando la relación señal a ruido obtenida con cada una de ellas.

#### 4. Modulación y detección en canales gaussianos

Este capítulo presenta los principios básicos que rigen el diseño y análisis de un sistema digital de comunicaciones. Se introduce el concepto de modulación digital, como mecanismo para la transmisión de información digital a través de canales analógicos, y el concepto de detección como mecanismo para recuperar la información digital transmitida a partir de la señal analógica recibida a través del canal de comunicaciones. Como modelo para este canal se utilizará el modelo más sencillo: un canal aditivo gaussiano.

#### 5. Límites fundamentales en los sistemas de comunicaciones digitales

Finalmente, el último capítulo presenta algunos de los límites fundamentales que pueden alcanzarse con un sistema de comunicaciones digitales. En particular, se estudia cómo calcular la máxima cantidad de información que se puede transmitir de forma fiable mediante un sistema digital de comunicaciones, lo que se conoce como *capacidad de canal*. La obtención de este límite se basa en la aplicación de la teoría de la información y del uso de medidas cuantitativas de información que se presentan en el capítulo como herramientas para el análisis de sistemas de comunicaciones digitales.

### 1.5.3. Bibliografía recomendada

Existen excelentes libros que tratan sobre los sistemas de comunicaciones. Para esta asignatura se recomiendan sólo un número reducido de ellos, que tratan de forma adecuada todos los contenidos de la asignatura, con la finalidad de evitar al estudiante una excesiva cantidad de referencias.

También con este objetivo, se ha distinguido entre lo que se ha denominado bibliografía básica, donde aparecen dos referencias que tratan todos los contenidos de la asignatura, y lo que se ha denominado bibliografía complementaria, donde se citan textos que permiten profundizar en algunos de los contenidos de la asignatura más allá de los propios objetivos de esta. A continuación se presentan estas referencias bibliográficas y se incluye un breve comentario sobre cada una de ellas.

## Bibliografía básica

1. A. Artés et al. “Comunicaciones Digitales”, Pearson Educación, 2007

La primera referencia básica es este excelente libro, realizado por varios profesores universitarios, orientado hacia su uso como manual de aprendizaje, por lo que resulta muy apropiado como referencia para la asignatura. En este libro se tratan fundamentalmente los sistemas de comunicaciones digitales con un claro enfoque hacia los contenidos habitualmente tratados en las titulaciones relacionadas con la Ingeniería de Telecomunicación. El capítulo 3 cubre la mayor parte de los contenidos del capítulo 2 de la asignatura. El capítulo 4 y el capítulo 9 cubren, respectivamente, todos los contenidos de los capítulos 4 y 5 de la asignatura.

Este libro está disponible on-line a través de la página web de su primer autor, el Catedrático Antonio Artés Rodríguez, de la Universidad Carlos III de Madrid

- Disponible on-line: [www.tsc.uc3m.es/~antonio/](http://www.tsc.uc3m.es/~antonio/)

2. J. G. Proakis, M. Salehi. “Communication Systems Engineering” (2ª Ed.), Prentice-Hall, 1994

Se trata de otro excelente texto sobre sistemas de comunicaciones, tanto digitales como analógicos. Su notación compacta y su modularidad facilitan la tarea de seguimiento de los contenidos de la asignatura pese a su diferente secuenciamiento con respecto al seguido en la asignatura. Los capítulos 4 y 5 cubren los contenidos del capítulo 2 de la asignatura; los capítulos 3 y 5 cubren los contenidos del capítulo 3 de la asignatura; y finalmente los capítulos 6 y 9 lo hacen con los del capítulo 5. Aunque el capítulo 7 cubre bastantes de los contenidos del capítulo 4 de la asignatura, en este caso la aproximación es ligeramente distinta a la seguida en la asignatura.

## Bibliografía complementaria

1. A. Papoulis. “Probability, random variables, and stochastic processes”, (3ª Ed.), McGraw-Hill, 1991

Uno de los libros de referencia de las bases de la teoría de la probabilidad y los procesos estocásticos. Una excelente referencia para todos los conceptos estadísticos que se manejan en la asignatura.

2. A.B. Carlson. “Communication Systems” (2ª Ed.), McGraw-Hill, 1986

Texto clásico de introducción a la transmisión analógica y digital. Básicamente, consta de tres partes: la primera introduce los fundamentos básicos de las señales y procesos aleatorios; la segunda abarca las comunicaciones analógicas, mientras que la tercera parte está dedicada a las comunicaciones digitales. El desarrollo que realiza de las comunicaciones analógicas es sencillo e intuitivo y está ilustrado con esquemas de bloques de sistemas y circuitos eléctricos básicos.

3. S. Haykin. “An Introduction to Analog and Digital Communications”, Willey, 1989  
Otro texto clásico que trata los sistemas de comunicaciones analógicos y digitales, aunque en este caso con un claro énfasis en los últimos. Es un libro interesante para el tratamiento introductorio de la teoría de la comunicación y de la naturaleza matemática de su formulación.
4. B. Sklar. “Digital communications : fundamentals and applications”, Prentice Hall, 2001  
Libro avanzado sobre comunicaciones digitales, interesante para aquellos estudiantes con una formación básica en teoría de la probabilidad. Presenta una excelente introducción a los fundamentos sobre señales, espectro de las mismas, y transmisión en banda base. A partir de esta introducción, el libro presenta múltiples variantes de modulaciones y técnicas de modulación que, aunque van más allá de los objetivos de esta asignatura, pueden resultar de interés a un estudiante que la haya cursado.