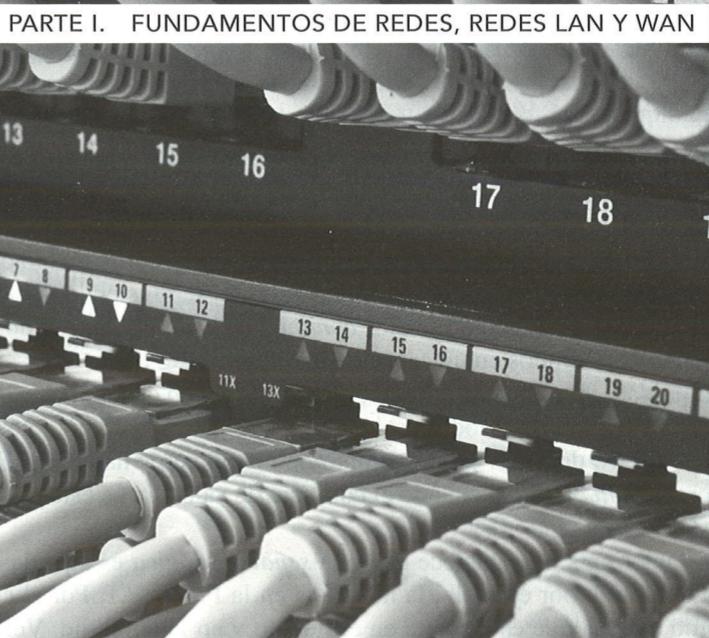


de información total corresponde a las cabeceras? Aplique el resultado a una conexión a 512 kbps con tamaño de datos de 1.500 bytes y 4 capas, cada una de las cuales añade 64 bytes cabecera.

9. Identifique los SAP en los siguientes sistemas de comunicación: radiodifusión FM, red telefónica, correo postal.
10. Justifique la veracidad o falsedad de la siguiente afirmación: todo servicio de comunicaciones se lleva a cabo usando cuatro primitivas de servicio: *Request, Indication, Response y Confirm*.
11. Clasifique los siguientes servicios como orientados a conexión / no orientados a conexión y confirmados / sin confirmación, razonando adecuadamente la respuesta:
  - a) Correo postal ordinario.
  - b) Correo certificado.
  - c) Envío y recepción de fax.
  - d) Conversación telefónica.
  - e) Domiciliación bancaria de recibos.
  - f) Solicitud de certificado de empadronamiento.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Forouzan, B. A.: *Transmisión de Datos y Redes de Comunicaciones*. McGraw-Hill, 2007, 4.<sup>a</sup> edición.  
 León-García, A.; Widjaja, I.: *Redes de Comunicación. Conceptos Fundamentales y Arquitecturas Básicas*. McGraw-Hill, 2001.  
 Peterson, L. L.; Davie, B. S.: *Computer Networks. A System Approach*. Morgan Kaufmann, 2011, 5.<sup>a</sup> edición.  
 Stallings, W.: *Comunicaciones y Redes de Computadores*. Pearson Educación, 2004. 7.<sup>a</sup> edición.  
 Tanenbaum, A. D.; Wetherall, D. J.: *Computer Networks*. Prentice-Hall, 2011. 5.<sup>a</sup> edición.



- 2.1. Análisis de señal
- 2.2. Medios de transmisión
- 2.3. Modos de transmisión. Modulación
- 2.4. Interfaces

## TRANSMISIÓN DE DATOS

**C**omo inicio al estudio de las funciones y servicios realizados en las distintas capas en que se organiza una red de computadores, a lo largo de este tema se tratan los aspectos relativos a la capa física, centrada en la transmisión de la información sobre un canal de comunicaciones, sea este una red local, un simple cable, la atmósfera o cualquier otro soporte de transmisión existente entre un emisor y un receptor. De esta forma, el objetivo del presente capítulo es presentar los aspectos involucrados en el envío de información sin estructurar, es decir, de bits, mediante un sistema de comunicación que permita el intercambio de señales entre dos equipos. Estas señales, de tipo electromagnético en los sistemas actuales, deben poder ser interpretadas, de forma que se pueda asignar un significado en forma de bits a las mismas. En este contexto, el canal de transmisión, esto es, el medio físico por el que se propaga la información, desempeña un papel fundamental, dado que altera de diversas formas la señal que esté siendo propagada. Esto introduce limitaciones y problemas que deben ser resueltos para la correcta transmisión de la información. Las funcionalidades y servicios de la capa física deben, en consecuencia, proporcionar mecanismos que permitan el intercambio eficaz de información en presencia de dichas limitaciones.

Con este objetivo, el esquema del capítulo es el que sigue. En el primer apartado se introducen conceptos básicos sobre teoría de la señal tales como espectro y ancho de banda. Seguidamente se presentan distintos tipos de medios de transmisión, comentando sus características principales y sus limitaciones. Una cuestión fundamental en la transmisión de datos es la relativa a la modulación de señales, aspecto que se desarrolla a lo largo del Apartado 2.3 como proceso necesario para la adecuación de las señales a transmitir sobre el canal a las características de este. Finalmente, el capítulo concluye con la descripción de algunos tipos de interfaces empleadas en la interconexión de las estaciones finales con los dispositivos de transmisión/recepción que, en última instancia, son los que posibilitan la comunicación sobre el canal (Figura 1.1).

Continuando con definiciones de señales, diremos que una señal es *periódica* cuando sus valores se repiten en el tiempo:  $x(t) = x(t \pm T) \forall t \in \mathbb{N} \cup \mathbb{R}$ , siendo  $T$  el *período* de repetición. Por su parte, una señal es *simétrica, o par*, cuando cumple que  $x(t) = x(-t) \forall t \in \mathbb{N} \cup \mathbb{R}$ , mientras que es *impar, o antisimétrica*, cuando  $x(t) = -x(-t) \forall t \in \mathbb{N} \cup \mathbb{R}$ . Un ejemplo de función par es la función coseno y el seno de función impar (Figura 2.3).

### 2.1.2. Análisis de Fourier. Espectro y ancho de banda

A partir de las definiciones anteriores estamos en disposición de introducir las *series de Fourier*, análisis donde se establece que toda señal periódica puede aproximarse mediante funciones seno y coseno de la siguiente forma:

$$x(t) = \frac{1}{2} c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(nwt) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(nwt) \quad (2.1)$$

siendo

$$\begin{aligned} c &= \frac{2}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot \sin(nwt) \cdot dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot \cos(nwt) \cdot dt \end{aligned}$$

y donde  $w = 2\pi f = 2\pi/T$  es la *frecuencia angular*, medida en radianes/segundo, y  $f$ , inversa del periodo, la *frecuencia lineal* en Hertzios (Hz) o ciclos/segundo.

Cada una de las componentes en frecuencia  $nw$  se conoce como *armónico* y junto con las amplitudes asociadas,  $a_n$ ,  $b_n$  y  $c$ , esta última correspondiente a la frecuencia  $w = 0$ , definen el *espectro* de la señal. En la Figura 2.4 se muestran diversas señales en el tiempo y su espectro asociado. Como característica a resaltar, hemos de decir que el espectro de una señal periódica es discreto en el sentido visto en el apartado anterior, hecho fácilmente constatable a partir de la existencia de sumatorias en la expresión dada en (2.1).

¿Qué sucede con las señales no periódicas? En este caso podemos crear un artificio matemático consistente en repetir la señal original (con  $T = \infty$  si es preciso) de modo que la señal obtenida sí sea periódica. Ahora, la representación espectral de la señal no periódica original se establece mediante la *transformada de Fourier*, definida como:

$$X(w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} \cdot dt \quad (2.2)$$

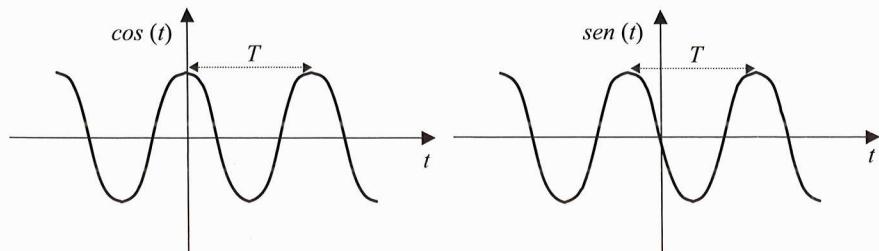


Figura 2.3. Ejemplo de función par,  $\cos(t)$ , y de función impar,  $\sin(t)$ .

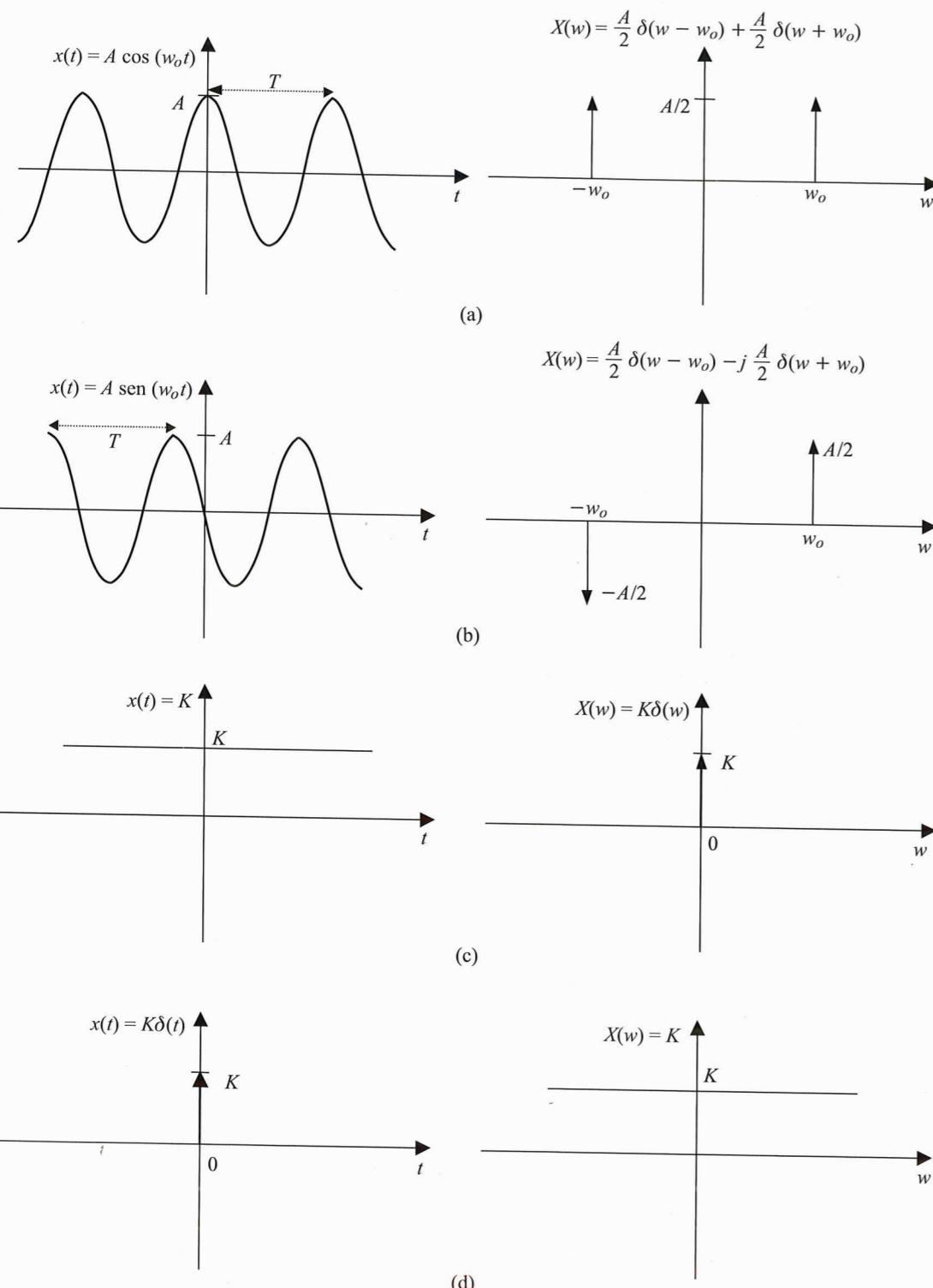


Figura 2.4. Ejemplos de funciones y espectros asociados.

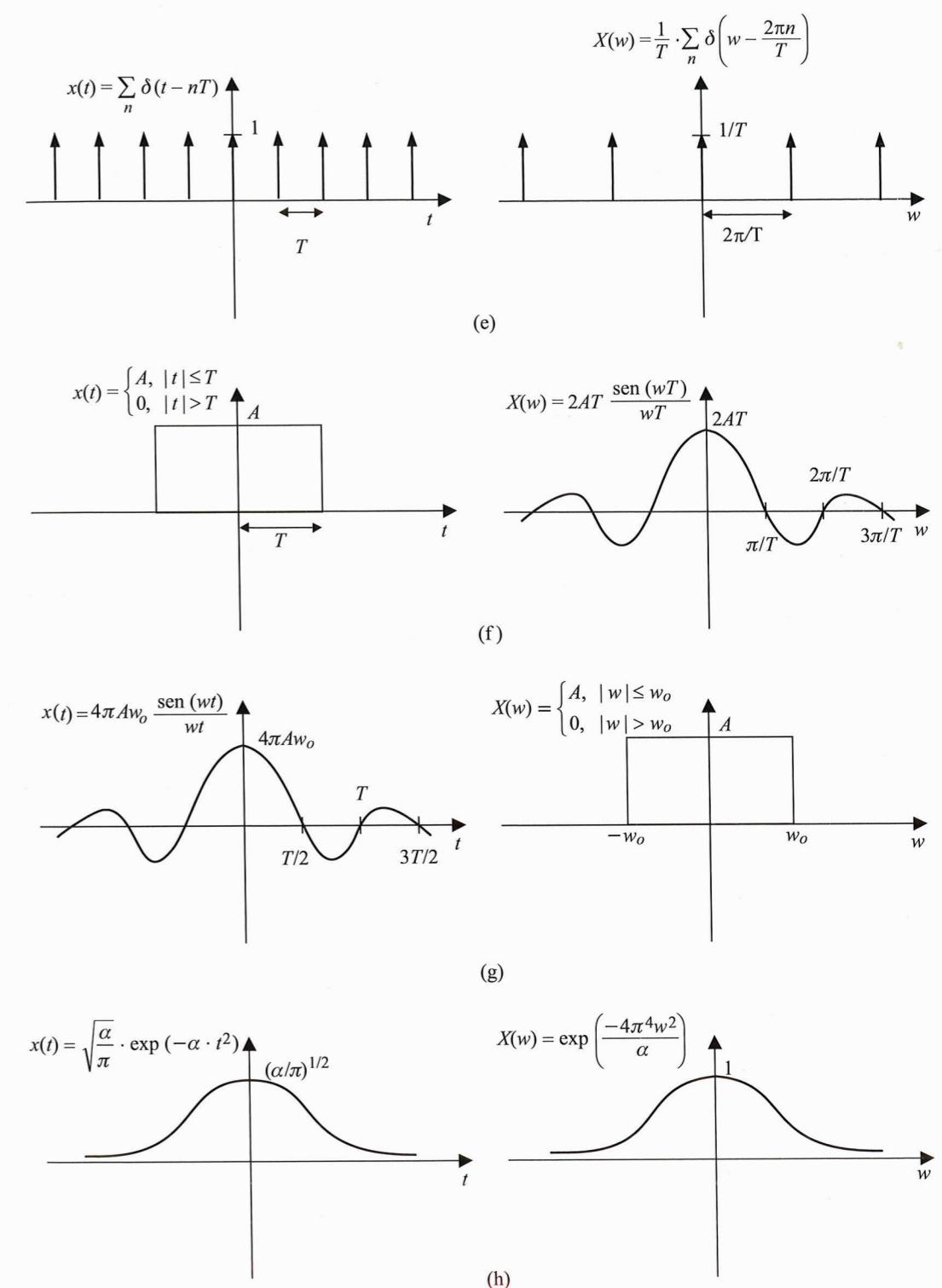
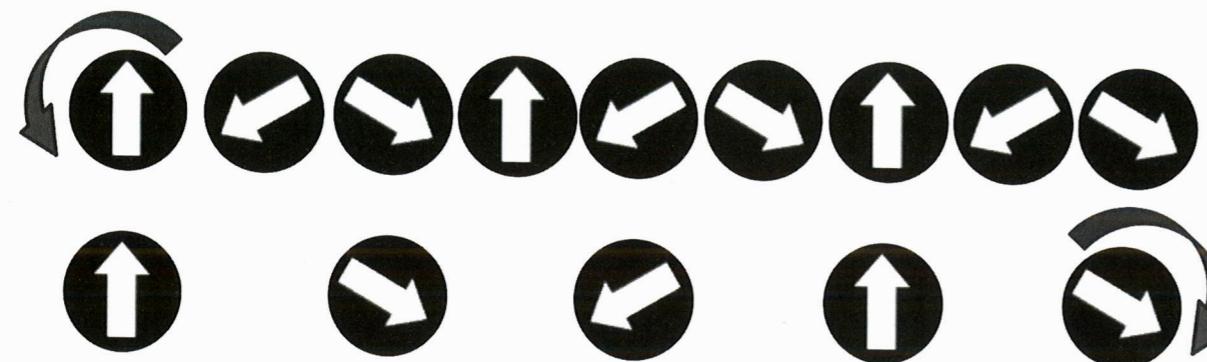


Figura 2.4. (Continuación.)



**Figura 2.6.** Ejemplo de *aliasing* para el giro de una rueda. En la parte superior, secuencia de imágenes cumpliendo el teorema de muestreo (al menos una imagen cada media vuelta), preservando la información sobre el sentido de giro. En la parte inferior, secuencia equivalente para un periodo de muestreo doble del anterior, incumpliendo el teorema de muestreo y perdiéndose la información sobre el sentido de giro.

$X(w)$  y, en consecuencia, se producirá pérdida de información. Este efecto, claramente indeseable, se denomina *aliasing*<sup>2</sup>.

2. Caso  $w_s > 2 \cdot w_m$ . En este caso no se produce solapamiento alguno entre los espectros  $X(w)$  adyacentes y, en consecuencia, podremos extraer la información original mediante el filtrado mencionado. Esta situación se corresponde con la representada en la Figura 2.5(f).
3. Caso  $w_s = 2 \cdot w_m$ . Situación límite entre los casos 1 y 2.

De acuerdo con todo lo anterior, el teorema de Nyquist establece que para que no se produzca pérdida de información en el proceso de muestreo de una señal<sup>3</sup> debe cumplirse que la frecuencia de muestreo sea al menos el doble de la máxima componente en frecuencias de la señal:

$$w_s \geq 2 \cdot w_m \quad (2.6)$$

o lo que es lo mismo

$$f_s \geq 2 \cdot f_m$$

estando  $f_s$  medido en muestras/segundo y  $f_m$  en Hz. Así, por ejemplo, en el caso de una señal de voz, puesto que  $f_m \approx 4$  KHz, resulta que el muestreo debe cumplir:  $f_s \geq 8$  KHz = 8.000 muestras/segundo.

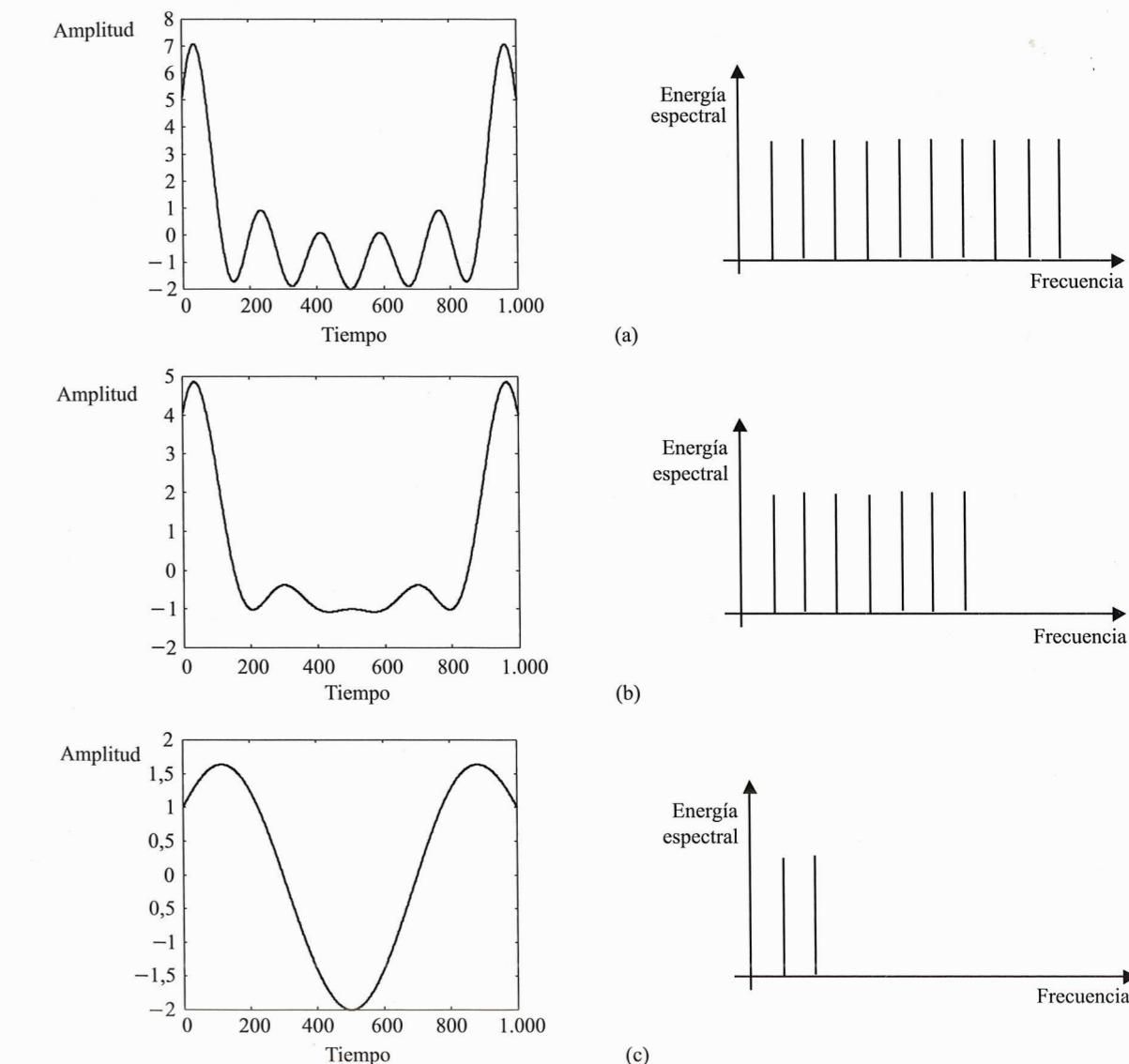
Un ejemplo simple del incumplimiento del teorema de muestreo y sus efectos lo podemos encontrar en una situación cotidiana como es el efecto visual que aparece en algunas ocasiones al observar la rueda de un vehículo girando, aparentemente, en sentido contrario al de la marcha. Este efecto tiene su origen en el número de imágenes por segundo que es capaz de procesar el sentido de la vista, que resulta insuficiente en relación al número de vueltas por unidad de tiempo de las ruedas, tal como se muestra en la Figura 2.6.

<sup>2</sup> Para asegurarnos evitar el problema de *aliasing* en el muestreo de una señal debido a la existencia de componentes de frecuencia fuera del rango especificado como su ancho de banda, antes de muestrear se filtra la señal de forma que se eliminan dichas componentes. El filtro en cuestión se denomina *filtro antialiasing*.

<sup>3</sup> Ha de señalarse que, dado que generalmente el espectro de una señal es infinito, el hecho de considerar un ancho de banda finito para la misma implica una pérdida de información. Dicha pérdida de información, no obstante, no está motivada por el proceso de muestreo en sí mismo.

## 2.2. Medios de transmisión

Un medio de transmisión se define como el soporte físico o canal sobre el que se desarrolla o puede desarrollarse una comunicación. Los canales de comunicación reales se caracterizan por presentar un ancho de banda finito, de forma que su comportamiento corresponde con el de un filtro (generalmente de tipo paso baja). Por tanto, el canal introduce distorsión en las señales que son transmitidas por él, ya que eliminará aquellas componentes en frecuencia que se encuentran fuera de un cierto rango (Figura 2.7) y alterará las amplitudes asociadas a las frecuencias que deja pasar. Adicionalmente, el canal introduce ruido en las señales, por lo que la señal recibida será diferente de la señal emitida.



**Figura 2.7.** Filtrado paso baja de una señal: señal original y espectro con 10 armónicos (a), señal filtrada y espectro con 7 armónicos (b) y señal filtrada y espectro con solo 2 armónicos (c).

### 2.2.1. Capacidad de canal

Una cuestión de suma importancia acerca de un canal de comunicaciones se refiere a la velocidad máxima con que podemos efectuar una transmisión de datos sobre el mismo, que se denomina *capacidad del canal*,  $C$ . A esta pregunta dio respuesta Shannon en 1948, considerando el número de pulsos de señal que pueden transmitirse por unidad de tiempo, mediante la expresión:

$$V_{\text{trans-máx}} = 2 \cdot W \text{ (pulsos/s)} \quad (2.7)$$

siendo  $W$  el ancho de banda del canal en Hz.

El resultado anterior puede deducirse intuitivamente a partir del teorema de muestreo. Seguiremos para ello el siguiente razonamiento:

1. Un canal de ancho de banda  $W$  Hz permite transportar una señal cuyo ancho de banda o componente máxima en frecuencia no supere  $W$ . En caso contrario, como se ha mostrado en la Figura 2.7, desaparecerá parte del espectro, con la consiguiente pérdida de información.
2. Según lo anterior, y dada la relación especificada por el teorema de muestreo en la Expresión (2.6), se podría establecer que  $V_{\text{trans.}} \geq 2W$ .
3. Ahora bien, ¿tiene sentido decir que  $V_{\text{trans.}} > 2W$ ? La respuesta es no, ya que en caso contrario estaríamos afirmando que sobre un canal de ancho de banda  $W$  Hz se puede transmitir una señal de ancho de banda superior a este valor, lo cual es del todo imposible.
4. Conclusión: el valor  $2W$  es el límite superior para la velocidad de transmisión que puede conseguirse en un canal de comunicaciones de ancho de banda  $W$  Hz.

Otra posible deducción no formal de (2.7), tal vez más clara que la anterior, es la siguiente. Dado que la componente máxima en frecuencias aceptada para una señal a transmitir sobre un canal de ancho de banda  $W$  Hz es, precisamente,  $W$  Hz, es claro que la duración mínima de un pulso (correspondiente a una muestra) será  $\tau = 1/2W$  segundos —ver subfiguras (f) y (g) en Figura 2.4—, lo que equivale a decir que la velocidad máxima de transmisión es, como se ha estipulado,  $1/\tau = 2W$ .

La velocidad referida en la Expresión (2.7) está dada, como se indica, en muestras o pulsos por segundo. En lugar de la palabra pulsos, en ocasiones se utiliza el término *estados de señalización* para referirnos de forma genérica a los distintos valores de señal a transmitir sobre el canal. En este sentido, la velocidad mencionada anteriormente suele denominarse *velocidad de modulación* y su unidad de medida es el *baudio* (1 baudio = 1 estado de señalización/segundo).

Para transmitir datos será necesario asignar un significado, en términos de bits, a cada uno de los estados de señalización que se estén utilizando. Cuando los estados de señalización solo pueden tomar uno de dos posibles valores (asignándosele los valores binarios 0 o 1), la velocidad de transmisión en bits/segundo coincide con la de modulación. Ahora bien, dado que es posible hacer que un estado de señalización o pulso represente varios bits, la *velocidad de transmisión*, ahora sí en bits/segundo (bps), se puede expresar como:

$$V_{\text{transmisión}} = V_{\text{modulación}} \cdot \log_2 N = 2W \cdot \log_2 N \quad (2.8)$$

donde  $N$  es el número de estados de señalización o valores distintos que pueden tomar las muestras o pulsos transmitidos. Como se ha establecido anteriormente, para  $N=2$  resultará  $V_{\text{transmisión}} = V_{\text{modulación}}$ .

### EJEMPLO

Dado un canal de ancho de banda  $W = 1 \text{ MHz}$  sobre el que se transmiten muestras según  $N = 14$ , ¿cuál es la velocidad de modulación? ¿Y la de transmisión?

La resolución de este caso pasa por la aplicación directa de las Expresiones (2.7) y (2.8), teniendo en consideración además que el número de bits necesarios para representar  $N$  estados de señalización nunca puede ser fraccionario:

$$\begin{aligned} V_{\text{mod.}} &= 2 \cdot 10^6 \text{ baudios} = 2 \text{ Mbaudios} \\ V_{\text{trans.}} &= 2 \cdot 10^6 \cdot 4 = 8 \text{ Mbps} \end{aligned}$$

Según se deduce de la Expresión (2.8), es claro que el valor de  $V_{\text{transmisión}}$  crecerá sin más que aumentar el ancho de banda del canal y/o el número de estados de señalización utilizados. Sin embargo, este segundo parámetro no puede superar un cierto límite puesto que, debido a la existencia de ruido en todo canal de comunicaciones real (ver siguiente apartado), llegaría un momento en que el receptor no sería capaz de discriminar entre dos niveles de señal adyacentes. En tal caso la transmisión sería errónea, situación a todas luces indeseable.

Puede demostrarse que el límite para el número de estados de señalización a considerar en una transmisión está dado por:  $N \leq (1 + S/R)^{1/2}$ , donde  $S$  y  $R$  son, respectivamente, la potencia de la señal y del ruido y el cociente de ambas se conoce como la *relación señal-ruido* (*«Signal-to-Noise Ratio»*, SNR, en inglés) del canal de comunicación.

Generalmente, la SNR se expresa en decibelios según:  $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10} \text{SNR}$ , siendo sus posibles valores:

1.  $\text{SNR}_{\text{dB}} > 0$ : significa que  $S > R$ .
2.  $\text{SNR}_{\text{dB}} = 0$ : en este caso,  $S = R$ .
3.  $\text{SNR}_{\text{dB}} < 0$ : caso totalmente desfavorable en el que  $R > S$ .

De acuerdo con lo anterior, interesa que el valor de la SNR sea cuanto mayor mejor puesto que ello significará que la calidad de la señal recibida, y en consecuencia la de la transmisión, será superior.

Sustituyendo en la Expresión (2.8)  $N$  por el límite mencionado, tendremos que la velocidad de transmisión máxima para un canal de ancho de banda  $W$  Hz y  $\text{SNR} = S/R$  es:

$$C = V_{\text{trans-máx}} = W \cdot \log_2 (1 + S/R) \quad (2.9)$$

### EJEMPLO

¿Cuál es la capacidad de un canal de ancho de banda  $W = 1 \text{ MHz}$  y  $\text{SNR} = 15 \text{ dB}$ ? ¿Será posible utilizar en las transmisiones sobre dicho canal  $N = 16$  estados de señalización?

La capacidad del canal está dada por la Expresión (2.9), pero en ella hemos de tener en cuenta que la SNR no está expresada en decibelios. Por tanto, en primer lugar llevaremos a cabo la conversión:

$$\text{SNR} = 10^{\text{SNR}_{\text{dB}}/10} \Rightarrow \text{SNR} = 10^{15/10} = 31,62$$

Por tanto:

$$C = 10^6 \log_2 (1 + 31,62) \approx 5 \text{ Mbps}$$

Por otro lado, en caso de utilizar  $N = 16$  estados de señalización, y según (2.8), la velocidad de transmisión sería  $2 \cdot 10^6 \cdot 4 = 8 \text{ Mbps}$ , lo cual resulta imposible dado que, según hemos obtenido,  $C$  es inferior a este valor. De hecho, el número de estados de señalización deberá cumplir:

$$N \leq (1 + \text{SNR})^{1/2} = 5,7$$

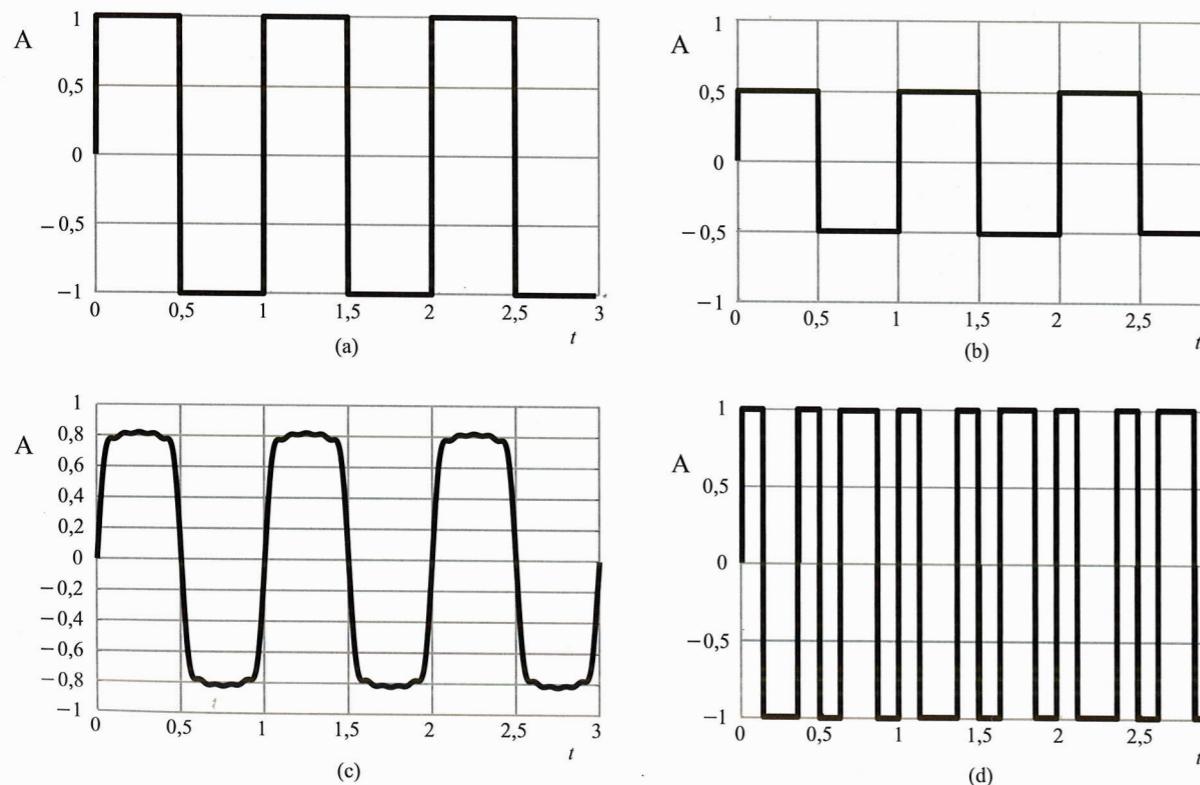
A la velocidad máxima de transmisión sobre un canal dado se le denomina *capacidad de canal* y se representa por la letra  $C$ . La Expresión (2.9) corresponde al Teorema de Shannon de la capacidad.

### 2.2.2. Limitaciones de los medios de transmisión

Como medios físicos, reales, que son, los canales de comunicación presentan varias limitaciones o problemas que afectan al transporte de las señales, ya que modifican o alteran la forma de las señales recibidas respecto de las emitidas, lo que puede dificultar o incluso imposibilitar una correcta interpretación de los datos. Los más importantes y comunes a todos ellos son los siguientes:

- a) *Atenuación*. Es el decaimiento de la amplitud/potencia de la señal con la distancia. Suele medirse en decibelios a través de la expresión  $10 \log_{10}(A_o/A_d)$ , siendo  $A_o$  la amplitud de la señal en el origen y  $A_d$  su amplitud tras recorrer una distancia  $d$ . Este efecto se traduce, evidentemente, en que la señal recibida será una copia de menor amplitud de la emitida, lo que puede plantear problemas a los detectores en el receptor (Figura 2.8(b)).

La attenuación se soluciona con la introducción de repetidores que amplifiquen la señal cada cierta distancia hasta alcanzar el destino.



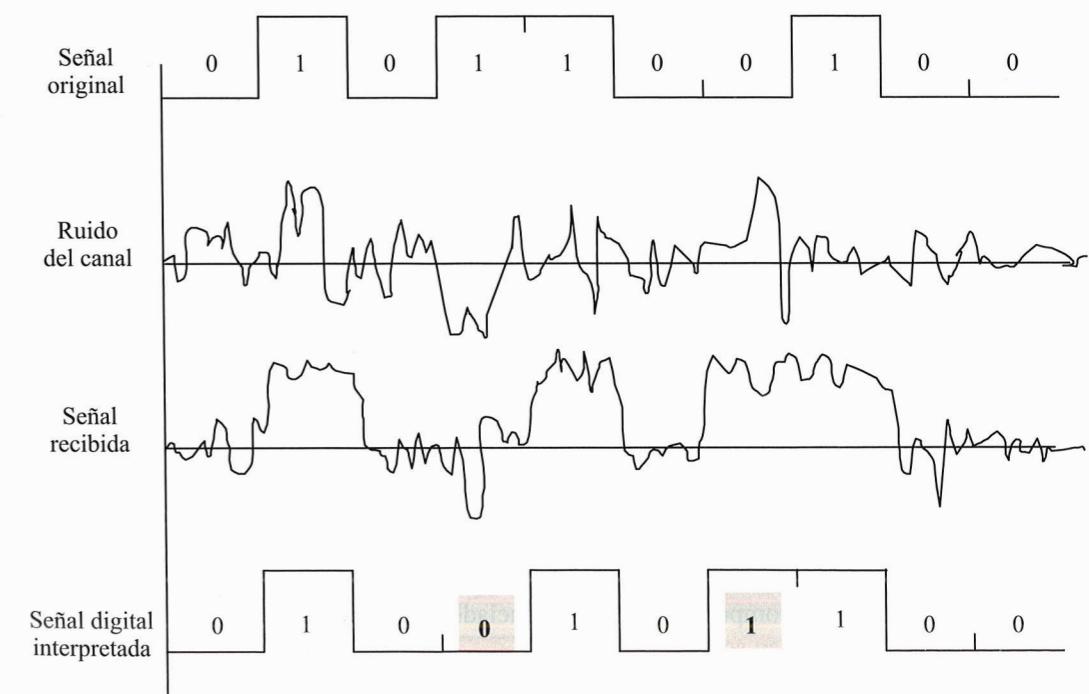
**Figura 2.8.** Efectos de la atenuación en el canal sobre la señal transmitida: señal original (a) y atenuada, si la atenuación es igual para todas las componentes en frecuencia (b), distorsión de atenuación originada por la dependencia de la atenuación con la frecuencia (c), interferencia intersímbólica debida a las diferencias en las velocidades de propagación (d).

Suele ocurrir, sobre todo a partir de cierto valor de frecuencia, que la atenuación depende de este parámetro (comportamiento tipo filtro paso baja o paso banda), por lo que su valor será diferente para cada componente en frecuencias de la señal transmitida. En este caso, la señal recibida no solo diferirá de la emitida en una menor amplitud, sino que aparecerá distorsión (Figura 2.8(c)), esto es, la forma de la señal será diferente. En consecuencia, para paliar este efecto se precisan ecualizadores de señal; es decir, repetidores selectivos en frecuencias que amplifiquen más aquellas componentes que están más atenuadas.

- b) *Distorsión de retardo*. Este efecto es el resultado de la transmisión a velocidad diferente de cada una de las componentes en frecuencias, lo que provoca la interferencia entre pulsos adyacentes, problema conocido con el nombre de *interferencia intersímbólica*. De forma simplificada, podemos decir que, dado que la información asociada a un pulso contenida en diferentes frecuencias viaja a velocidades diferentes, se pueden producir problemas debido a que en el receptor se combina información procedente de diferentes instantes de tiempo (posiblemente diferentes pulsos) en el emisor (Figura 2.8(d)).

De forma análoga al caso anterior, la solución de este problema pasa por la consideración de igualadores de fase que compensen la distorsión de retardo sufrida por las componentes más lentas, generalmente mediante la introducción artificial de retardos en las componentes más rápidas.

- d) *Ruido*. Se denomina ruido a toda señal ajena a la transmisión y que perturba a esta, pudiendo llegar a alterarla (Figura 2.9). Diversas son las fuentes u orígenes del ruido, siendo los más usuales en las comunicaciones los siguientes:



**Figura 2.9.** Visión conceptual del ruido de transmisión y sus efectos en recepción.

### Par trenzado

El par trenzado (Figura 2.11(a)) consiste en un par de hilos conductores cruzados entre sí a fin de reducir el ruido de diafonía descrito en el apartado anterior. A mayor número de cruces por unidad de longitud, mejor comportamiento ante este problema. Generalmente la transmisión es tal que uno de los conductores transporta la señal de información mientras que el otro sirve de referencia (usualmente a masa: 0 voltios). Esta disposición se conoce como *transmisión asimétrica*. Este tipo de transmisión es muy susceptible a ruidos externos dado que, ante estos, solo se ve afectado el hilo de señal y no el de tierra. Para solucionar este problema se suele recurrir a la *transmisión simétrica o balanceada*, caracterizada porque sobre un cable se transmiten  $+V(t)$  voltios y  $-V(t)$  voltios sobre el otro. Esto hace que las interferencias externas afecten por igual a ambas señales, manteniéndose inalterada la diferencia entre ellas.

Existen dos tipos de par trenzado: apantallado («Shielded Twisted Pair», STP) y no apantallado («Unshielded Twisted Pair», UTP). El segundo de ellos presenta una mera cubierta de plástico que protege al cable del contacto directo, mientras que el STP dispone de una cobertura exterior en forma de malla conductora, además de la de plástico final, que sirve para reducir las interferencias electromagnéticas externas. De esta forma, los pares trenzados STP presentan mejores características de transmisión que los UTP, si bien hay que decir que también son más caros.

Dentro de los pares UTP podemos encontrar varios tipos en función, principalmente, de la distancia de trenzado y del número de pares de hilos. Así, los UTP de categoría o tipo 3 (Cat. 3) presentan un cruce cada 7-10 cm, mientras que los de categoría 5 (Cat. 5) tienen una distancia de trenzado del orden de diez veces menor ( $\approx 0,75$  cm). Esto se traduce en unas mejores prestaciones de los UTP Cat. 5 frente a los Cat. 3 en cuanto a diafonía. Asimismo, hemos de decir que la frecuencia de trabajo de los UTP de clase 3 se extiende hasta los 16 MHz, alcanzándose los 100 MHz en los Cat. 5. En la actualidad, los cables más habituales son los de Cat. 5e, que corresponden a una versión mejorada en cuanto a prestaciones de los Cat. 5, soportando frecuencias de hasta 100 MHz.

También podemos encontrar en el mercado pares trenzados UTP Cat. 6, los cuales permiten frecuencias de trabajo de 250 MHz, y UTP Cat. 6e, que llegan a los 500 MHz. Para anchos de banda superiores existen cables de tipo STP en los que se apantalla independientemente cada par de cables, llegándose así a 600 MHz en los Cat. 7, también denominados clase F, y a 1 GHz en el caso de los de Cat. 7a/clase Fa.

La atenuación en los pares trenzados es lineal con la distancia y es dependiente de la frecuencia (creciente con esta) y de las propiedades de los materiales de los que se compone el cable y el aislante. Habitualmente se expresa en dB/km para una frecuencia o rango de frecuencias de trabajo.

Dos son las principales aplicaciones en que se hace uso de cables de par trenzado en los sistemas de comunicaciones:

- Bucle de abonado. Es el último tramo de cable existente entre el teléfono de un abonado y la central a la que se encuentra conectado. Este cable suele ser UTP de tipo 3, o incluso de inferior categoría, para aplicaciones de voz («voice-grade»), con el que se consiguen velocidades del orden de los Mbps.
- Redes LAN. En este caso se emplea UTP Cat. 5e o Cat. 6 para transmisión de datos («data-grade»), consiguiéndose velocidades de varios centenares de Mbps. Un ejemplo de este uso lo constituyen las redes 10/100/1000BASE-T.

Por lo que se refiere a las características de transmisión de los pares trenzados, podemos destacar dos:

- Ancho de banda reducido, lo que se traduce en velocidades del orden de las centenas de Mbps (más altas cuanto menores sean las distancias a cubrir), aunque existen cables que llegan hasta los Gbps.

**Tabla 2.1.** Comparativa de ancho de banda y atenuación de los medios de transmisión guiados.

	Ancho de banda	Velocidad de transmisión (bps)	Atenuación (dB/km)	Distancia entre repetidores (km)
Par trenzado	GHz	Gbps	3	2
Cable coaxial	GHz	Gbps	2	10
Fibra óptica	THz	Tbps	0,3	50

- Alta atenuación, lo que implica necesidad de poca separación entre los repetidores de señal para comunicaciones a larga distancia (Tabla 2.1).

### Cable coaxial

El cable coaxial (Figura 2.11(b)) se compone de un hilo conductor, llamado *núcleo*, y una malla externa separados por un dieléctrico o aislante. Una cobertura plástica aísla el conjunto del contacto directo y lo protege de la humedad y de los agentes externos en general. El cable coaxial es intrínsecamente asimétrico dado que la malla externa se encuentra conectada a tierra, siendo solo el núcleo la línea de señal. Respecto de la malla externa hemos de decir que cuanto más densa sea esta más inmune será el cable coaxial a interferencias externas. En los conectores de mayor calidad, además de la malla se incorpora un recubrimiento metálico en forma de lámina fina (tipo papel de plata).

En cuanto a la atenuación, el comportamiento es análogo al de los pares trenzados, esto es, es lineal con la distancia, depende de la frecuencia y de las propiedades de los materiales, si bien los valores son claramente inferiores.

Tres son las aplicaciones principales de este tipo de medio:

- CATV: transmisión de televisión por cable.
- Redes LAN: un caso concreto lo podemos encontrar en las ya obsoletas redes 10BASE5 («Thick Ethernet») y 10BASE2 («Thin Ethernet») o en las redes de cable.
- Comunicaciones a larga distancia: la baja atenuación y menor sensibilidad a las interferencias externas que este tipo de cable sufre, en comparación con el par trenzado, lo hace útil para transmisiones a gran distancia.

En la actualidad, este tipo de medio está cayendo en desuso debido a que resulta más eficiente y simple utilizar par trenzado, en el caso de las redes LAN, o fibra óptica, para las comunicaciones a larga distancia o a altas velocidades. Su uso se restringe, prácticamente, a las redes de cable (basadas en redes CATV preexistentes) y a líneas de respaldo de larga distancia.

En cuanto a las características de transmisión del cable coaxial, hemos de destacar dos:

- Ancho de banda moderado (en torno a 500 MHz) y, en consecuencia, velocidades de transmisión que alcanzan los Gbps.
- Menor atenuación que los pares trenzados y, en consecuencia, mayor separación entre repetidores, lo que lo hace de este un medio adecuado para transmisiones a larga distancia.

### Fibra óptica

La fibra óptica constituye un medio de comunicaciones flexible, ligero y de muy altas prestaciones. Las señales transmitidas sobre este tipo de medio guiado corresponden al espectro visible y su principio de funcionamiento se basa en la refracción total de la luz.

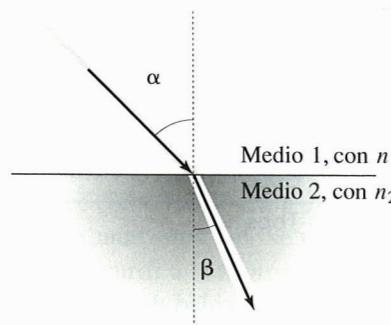


Figura 2.12. Fenómeno de refracción de la luz.

Como se muestra en la Figura 2.12, supongamos una superficie de separación entre dos medios, con índices de refracción<sup>5</sup>  $n_1$  y  $n_2$ , sobre la que incide un rayo de luz. La *ley de la refracción* (o ley de Snell) establece la siguiente relación entre los ángulos de incidencia y de refracción:

$$n_1 \operatorname{sen} \alpha = n_2 \operatorname{sen} \beta \quad (2.10)$$

de donde se concluye que:

- Si  $n_1 < n_2$ , entonces  $\alpha > \beta$ . Es decir, el rayo refractado pasa completamente al medio 2, acercándose a la normal (línea perpendicular a la superficie de separación de los medios).
- Si  $n_1 > n_2$ , entonces  $\beta > \alpha$ . Esto se traduce en que el rayo refractado se acerca a la superficie de separación de los dos medios.

Existirá en este caso un ángulo de incidencia, llamado *crítico*, para el cual  $\beta=90^\circ$ :

$$\alpha_{\text{crítico}} = \operatorname{arcsen} (n_1/n_2) \quad (2.11)$$

Es claro que para ángulos de incidencia superiores a  $\alpha_{\text{crítico}}$ ,  $\beta > 90^\circ$ ; es decir, el rayo refractado queda confinado en el primer medio, no pasando al segundo.

Por tanto, todo el haz de luz queda confinado en el interior del medio si se cumple la condición anterior. Este fenómeno de refracción se conoce como *reflexión total*, ya que aparentemente corresponde a una reflexión, y es el principio de funcionamiento en que se basa la transmisión sobre fibra óptica. Sobre esta, compuesta por un núcleo y un revestimiento, ambos de silicio y con índices de refracción  $n_{\text{núcleo}} > n_{\text{revestimiento}}$ , y una cubierta plástica externa que aísla la fibra del exterior, se transmite, por confinamiento basado en el fenómeno de reflexión total, luz a lo largo del núcleo. Este principio de funcionamiento consigue un ancho de banda enorme en la transmisión, ya que se pueden utilizar muy altas frecuencias (del orden de centenas de GHz) y en un amplio rango. Además, es posible realizar la transmisión de varios rayos y a diferentes frecuencias de forma simultánea, lo que amplía su capacidad. Pensemos que una simple variación en el ángulo de incidencia dentro de un cono de ángulo superior a  $\alpha_{\text{crítico}}$  supondría una comunicación adicional.

Para evitar pérdidas debido al cambio brusco de dirección sufrido por el rayo de luz en la superficie de separación del núcleo y del revestimiento, en ocasiones se utilizan fibras ópticas de *índice gradual*. Estas, frente a las anteriores, de *índice discreto*, se caracterizan por no presentar una superficie de separación clara entre ambos medios, núcleo y revestimiento, sino que esta, y

<sup>5</sup> El índice de refracción de un medio se define como la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de esta en el seno del medio en cuestión:  $n = c/v$ .

en consecuencia la variación del índice de refracción, es gradual, progresiva (Figura 2.13). La atenuación puede reducirse aún más si el radio del núcleo de la fibra es tan pequeño que se aproxima a la longitud de onda de la fibra de luz transmitida. En este caso, claro está, solo podrá transmitirse un único rayo de luz sobre la fibra; es decir, solo será posible una comunicación. Este tipo de fibra óptica se denomina *monomodo*, recibiendo las anteriores, por contraposición, el nombre de fibras *multimodo*.

Las fibras ópticas están siendo utilizadas en múltiples contextos, especialmente en las comunicaciones a alta distancia y/o alta velocidad, desplazando a los otros tipos de medios guiados debido a su bajo coste y gran capacidad. También se está extendiendo su utilización en redes LAN de alta velocidad y en la interconexión de estas. El factor que actualmente limita una mayor utilización de la fibra óptica es la necesidad de disponer de equipos que conviertan las señales ópticas en señales electrónicas (conversión opto-electrónica), y cuyo coste aún es algo elevado.

### Medios no guiados

Como se estableció al comienzo del apartado, la denominación de medios de transmisión no guiados hace referencia al no confinamiento mediante cables de las señales transmitidas en su seno. En este sentido, hemos de señalar la aparición de problemas adicionales a los ya conocidos de diafonía, eco, atenuación, etc., estudiados previamente. Son los conocidos como *efectos multitraекторia*, los cuales están provocados por las reflexiones que sufre la señal en los distintos obstáculos existentes en el medio (edificios, montañas, etc.) y que pueden dar lugar a la recepción de varias copias de la misma señal en diferentes instantes de tiempo, aunque con diferentes amplitudes y fases.

Según el rango de frecuencias de trabajo, las transmisiones no guiadas se pueden clasificar en tres tipos: radio, microondas y luz (infrarrojos/láser) —ver Tabla 2.2—.

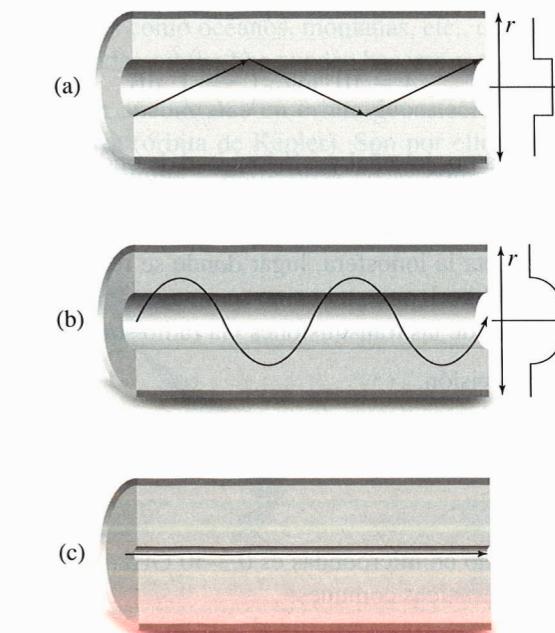


Figura 2.13. Fibras ópticas multimodo, de índice discreto (a), de índice gradual (b) y monomodo (c).

**Tabla 2.2.** Espacio radioeléctrico y bandas de frecuencia.

Banda	Rango de frecuencias	Usos principales	Denominación
VLF (muy baja frecuencia)	3-30 KHz	Navegación marítima y aérea, radiolocalización	Telefonía y potencia
LF (baja frecuencia)	30-300 KHz		
MF (frecuencia media)	300-3.000 KHz		
HF (alta frecuencia)	3-30 MHz	AM comercial, radioaficionados	Radio
VHF (muy alta frecuencia)	30-300 MHz	FM comercial, TV VHF	
UHF (frecuencia ultra alta)	300-3.000 MHz	TV UHF, GPS, telefonía móvil, microondas terrestres	Microondas
SHF (frecuencia súper alta)	3-30 GHz	Microondas satélite y terrestres	
EHF (frecuencia extremadamente alta)	30-300 GHz	—	Experimental

### Radio

Las transmisiones de radio se extienden desde la parte baja del espectro hasta los 300 MHz. La característica principal de estas ondas es su omnidireccionalidad; es decir, se propagan en todas direcciones. Desde este punto de vista hemos de señalar su naturaleza de difusión: todas las estaciones receptoras reciben sobre el mismo medio lo emitido desde un origen.

La atenuación,  $A$ , sufrida por estas ondas se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$A = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \text{ dB} \quad (2.12)$$

donde  $d$  es la distancia recorrida por la señal y  $\lambda$  la longitud de onda de esta. Se observa así que la atenuación crece con la frecuencia.

Asimismo, la transmisión por radio se ve afectada por las condiciones climatológicas como la lluvia o la niebla. También le afecta la ionosfera, lugar donde se reflejan las ondas de forma que estas pueden transmitirse más allá del horizonte, tal como se muestra en la Figura 2.14.

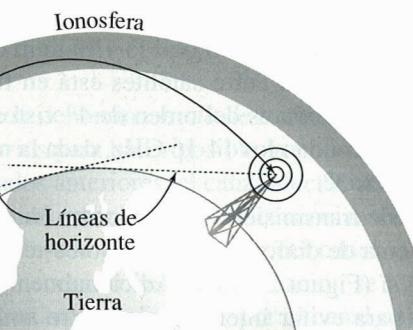
Las principales aplicaciones de las transmisiones vía radio son:

- Difusión de radio y televisión.
- Comunicaciones inalámbricas dentro de un entorno geográfico, como en el caso de las «wireless» LAN (WLAN) o la telefonía móvil.

### Microondas

El rango de frecuencias manejado en microondas es 0,3-30 GHz. La transmisión es muy similar a la de radio, presentando así características comunes:

- La atenuación sufrida por estas ondas sigue la Expresión (2.12). Esto significa que, dada la mayor frecuencia de las microondas, este problema es más importante que en radio.
- También les afecta la climatología.

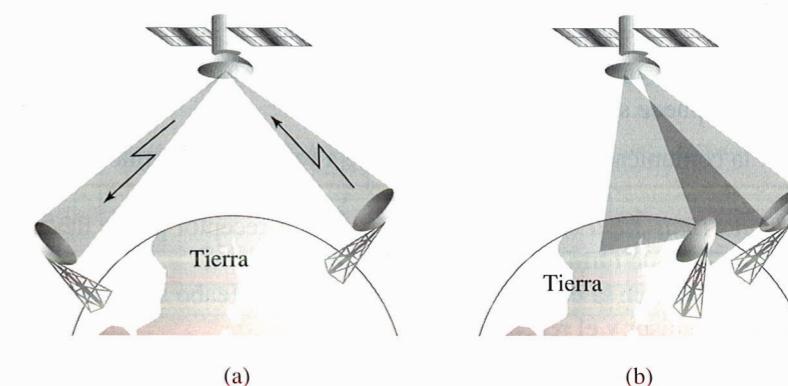
**Figura 2.14.** Transmisión de radio más allá de la línea de horizonte.

- Como las ondas de radio, las microondas se reflejan en la ionosfera, pudiéndose transmitir más allá de la línea de horizonte.

Adicionalmente a las consideraciones anteriores, y a diferencia de la transmisión radio, hemos de resaltar el hecho de que la transmisión en microondas es altamente direccional. Por tanto, los enlaces son punto a punto en este caso (Figura 2.15(a)). No obstante, hay que indicar la dispersión sufrida por el haz de emisión debido a las condiciones meteorológicas.

Habitualmente se diferencia entre dos tipos de utilización de las microondas: las microondas terrestres, utilizadas entre equipos situados en la superficie terrestre, y las microondas satelitales, utilizadas para la comunicación entre un equipo terrestre y un satélite. El rango de frecuencias de las transmisiones de microondas terrestres se encuentra principalmente por debajo de los 3 GHz. Por su parte, las transmisiones por satélite están por encima de esta frecuencia y se caracterizan por la existencia de dispositivos repetidores de señal situados fuera de la superficie terrestre con el objeto principal de salvar obstáculos tales como océanos, montañas, etc., que de otra forma resultarían difíciles de evitar. Las principales consideraciones que pueden hacerse acerca de las transmisiones por satélite son:

- Los satélites suelen encontrarse en órbita geoestacionaria a, aproximadamente, 36.000 km del ecuador la Tierra (órbita de Kepler). Son por ello llamados GEO («Geostationary-Earth Orbit»). Este hecho implica, entre otras cosas como la alta atenuación sufrida, un elevado retardo en las transmisiones (del orden de 250 ms).

**Figura 2.15.** Enlaces punto a punto en satélite (a) y situación de ocurrencia de diafonía (b).

También existen satélites en órbitas bajas (LEO, «Low-Earth Orbit»), cuya órbita no es estacionaria con la Tierra.

- La mínima separación entre satélites está en función de la frecuencia de trabajo. Así, para 4-6 GHz la separación es del orden de 4° vistos desde la Tierra, mientras que si las frecuencias manejadas rondan los 14-16 GHz, dada la mayor direccionalidad de las ondas, puede disminuir hasta los 3°.
- Los canales de transmisión usados por los satélites se denominan «*transponders*», y pueden sufrir problema de diafonía si los emisores-receptores en tierra se encuentran demasiado cercanos entre sí (Figura 2.15(b)). Adicionalmente, dado que las comunicaciones son unidireccionales, y para evitar interferencias entre ambos sentidos de la comunicación, se utilizan transpondedores (frecuencias) diferentes para cada sentido de la comunicación, denominándose ascendentes (*upstreams*) a los asociados a las comunicaciones tierra-satélite y descendentes (*downstreams*) a los asociados a las comunicaciones satélite-tierra.

Frente a las comunicaciones a larga distancia, globales, para las que se utilizan las microondas de satélites, las microondas terrestres encuentran una importante aplicación, por ejemplo, en las comunicaciones celulares o móviles como la telefonía móvil o WiMAX, para comunicar entre sí las diferentes celdas o estas con redes cableadas.

#### Infrarrojos/láser

Estas transmisiones, dada su menor longitud de onda, son más direccionales que las anteriores. En este sentido, el emisor y el receptor deben estar perfectamente alineados para permitir una transmisión adecuada.

De acuerdo con la Expresión (2.12), es claro que estas ondas sufren el problema de atenuación en mayor proporción que las transmisiones de radio y microondas. Adicionalmente, hemos de señalar que se ven afectadas en gran modo por las condiciones meteorológicas así como por la intrusión de cualquier objeto (partículas de polvo, insectos, etc.) dentro del radio de acción del haz (no olvidemos que este no se encuentra protegido por cobertura exterior alguna).

Aunque fueron bastante utilizadas para comunicaciones de corta distancia punto a punto, por ejemplo, entre edificios cercanos o entre equipos tipo PC, su uso se ha visto claramente superado por otro tipo de medios. En la actualidad su uso se encuentra prácticamente limitado a los controles remotos.

## 2.3. Modos de transmisión. Modulación

En función del tipo de interacción permitido, la transmisión sobre un canal de comunicación entre un emisor y un receptor puede ser de tres tipos:

1. *Simplex*: la comunicación solo puede llevarse a cabo en un sentido entre el emisor y el receptor.
2. *Semi-dúplex (half-duplex)*: la comunicación emisor-receptor puede llevarse a cabo en ambos sentidos, pero no de forma simultánea en el tiempo.
3. *Dúplex (full-duplex)*: la comunicación puede llevarse a cabo simultáneamente en ambos sentidos entre el emisor y el receptor.

A parte de las consideraciones anteriores, las señales utilizadas para transmitir información sobre un canal de comunicaciones pueden ser analógicas, es lo que sucede en el caso de la atmósfera, o digitales, como suele suceder en redes LAN cableadas. Desde este punto de vista, existen cuatro

situaciones de estudio posibles correspondientes a las distintas combinaciones existentes entre el tipo de transmisión a realizar (analógica o digital) y el tipo de señal de datos original de que se dispone, también analógica o digital.

A cada una de estas situaciones se le denomina *modo de transmisión* y, de forma genérica, *modulación* al conjunto de procesos necesarios para hacer posible la transmisión adecuada en cada caso.

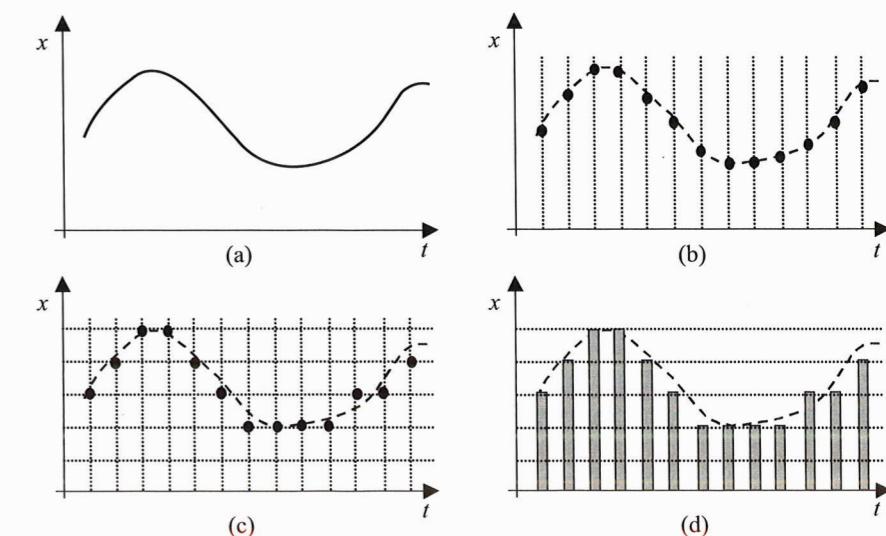
Como se ha indicado en los apartados anteriores, el canal afecta a las señales que es preciso transmitir para posibilitar el intercambio de información. En consecuencia, será necesario incorporar dicha información de forma que no se vea alterada por los efectos del canal, a pesar de que la señal en sí misma sí se vea afectada. Es decir, es necesario que la información se represente en base a aquellos parámetros o características que se vean menos afectadas por el canal considerado y/o que sea posible recuperar la información a pesar de dichos efectos. Este es uno de los objetivos principales de las técnicas de modulación, que permiten adaptar las características de la señal que transporta la información a las del canal de transmisión.

A continuación se describen los cuatro modos de transmisión existentes.

### 2.3.1. Señales analógicas, transmisión digital

Dada la naturaleza analógica de la práctica totalidad de las señales existentes en la naturaleza, un proceso necesario en el tratamiento de información mediante computadores es la conversión analógico a digital (CA/D). A través de ella, una señal analógica se transforma en una secuencia de pulsos de tensión que representan los valores de las muestras tomadas de la señal original. Los procesos a implementar en una CA/D son tres (Figura 2.16):

1. *Muestreo*. El primer paso a realizar consiste en la discretización temporal de la señal analógica. Para ello se divide o ranura el tiempo de forma que solo se consideran aquellos valores de la señal que corresponden a instantes discretos  $nT$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , siendo  $T$  el *período de muestreo* (Figura 2.16(b)). A cada uno de los valores de señal considerado se le conoce con el nombre de *muestra*.



**Figura 2.16.** Ejemplo de digitalización de una señal analógica (a): muestreo (b), cuantización uniforme (c) y codificación PAM (d).

Respecto de este proceso hemos de recordar el teorema de muestreo o de Nyquist visto en el Apartado 2.1.3, el cual establece —Expresión (2.6)— que no se produce pérdida de información en el muestreo de una señal si se cumple que la frecuencia de muestreo es, al menos, dos veces superior a la máxima componente en frecuencias de la señal a muestrear.

2. *Cuantización.* Es el proceso a través del cual se lleva a cabo la discretización en amplitud de la señal original, de forma que el número de valores aceptados para esta es discreto y numerable (Figura 2.16(c)). Al valor de amplitud o separación existente entre dos valores de señal consecutivos aceptados se le denomina *cuento*.

A diferencia del proceso de muestreo, la cuantización (a veces referida como cuantificación) siempre supone pérdida de información. Pueden hacerse varias consideraciones acerca de los valores de amplitud a considerar:

- *Cuantización uniforme/logarítmica.* La forma más fácil de dividir el rango de valores posibles para la amplitud es hacerlo uniformemente, lo cual consiste en una división homogénea; es decir, el valor del cuento es constante (Figura 2.17(a)). Frente a esta técnica de cuantización, una alternativa consiste en llevar a cabo una división del rango de amplitudes en forma logarítmica (Figura 2.17(b)). En este último caso se consigue una mayor resolución en aquellas partes del rango en que más falta hace: donde la energía de la señal es menor.

Haciendo referencia a cuantizaciones no uniformes utilizadas en transmisión telefónica de señales de voz, dos son las más utilizadas: *ley A*, implementada en Europa, y *ley μ*, utilizada en Norteamérica, Japón y Canadá.

- *Cuantización absoluta/diferencial.* En ocasiones, en lugar de realizar la transmisión de las muestras de una señal se considera la diferencia entre ellas. Es decir, dada la general relación existente entre dos muestras adyacentes, es mejor, desde el punto de vista del rango de amplitud a considerar, cuantizar la diferencia entre ellas que sus valores absolutos.

3. *Codificación.* Tras la realización de la discretización en el tiempo y en la amplitud de la señal analógica original, hemos de decidir cómo representar cada uno de los posibles valores de las muestras. El proceso de codificación o representación puede ser diverso (Figura 2.18):

- Por amplitud de pulso (MAP o PAM en inglés, de «Pulse Amplitude Modulation»). En este caso, la información correspondiente al valor de cada una de las muestras se codifica mediante sendos pulsos de duración y separación fijas pero de amplitud diferente; es decir, como se observa en las Figuras 2.16(d) y 2.18(b), en MAP la información está contenida en la amplitud de los pulsos.

- Por duración de pulso (MDP o PWM en inglés, de «Pulse Width Modulation»). Esta técnica se caracteriza por emplear pulsos de igual amplitud y, como en MAP, equiespaciados, pero, por el contrario, de distinta duración. Es decir, en PWM la información de la señal se transmite en la duración o anchura de los pulsos.

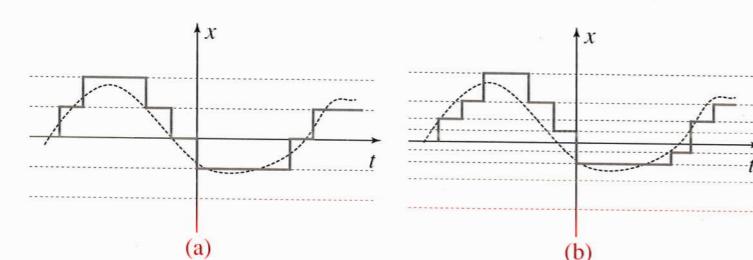


Figura 2.17. Cuantización uniforme (a) y logarítmica (b).

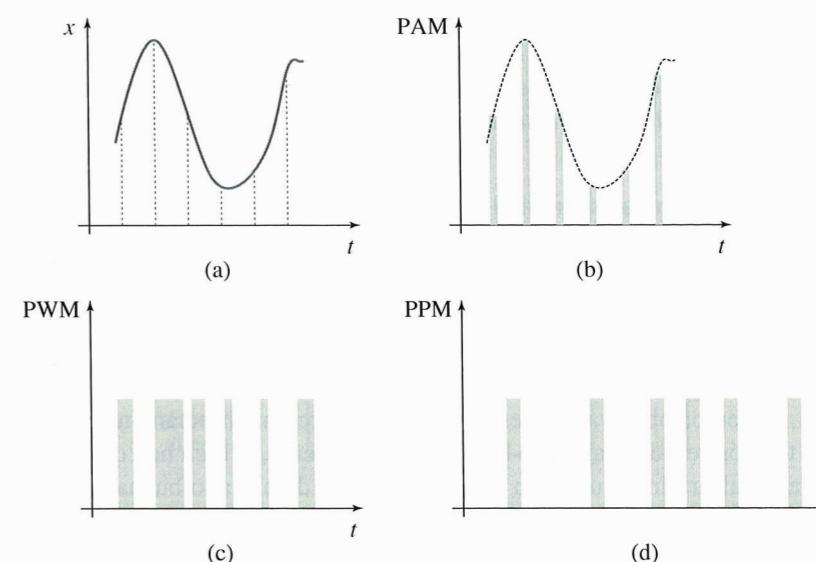


Figura 2.18. Tipos de codificación de una señal muestreada (a): PAM (b), PWM (c) y PPM (d).

- Por posición de pulso (MPP o PPM, de «Pulse Position Modulation»). Como se muestra en la Figura 2.18(d), en esta técnica de codificación se emplean pulsos de igual amplitud e igual duración, estando contenida la información de las muestras en la separación existente entre ellos.
- Frente a las técnicas anteriores, la más ampliamente utilizada en comunicaciones es la conocida como PCM («Pulse Code Modulation», modulación por código de pulso). En PCM se hace uso de pulsos de igual amplitud y duración, estando además estos equiespaciados. ¿Cómo se representa entonces la información? Mediante la utilización, a diferencia de como sucede en PAM, PWM y PPM, de más de un pulso por muestra.

Por ejemplo, si se utilizan pulsos binarios (*bits*), caracterizados por tomar uno de solo dos posibles valores, con 4 pulsos podremos representar hasta 16 valores de señal distintos ( $2^4 = 16$ ). En general, podemos relacionar el número de pulsos/muestra, *p*, con el número de valores de señal considerados, *N*, mediante  $p = \log_b N$ , siendo *b* la base o posibles valores que pueden tomar los pulsos (2 en el caso de considerar bits).

Queda claro pues que la tasa de bits por unidad de tiempo, *b*, obtenidos después de muestrear, cuantizar y codificar PCM puede expresarse como:

$$b = f \cdot \log_2 N \quad (2.13)$$

donde *f* es la frecuencia de muestreo en Hz o muestras/segundo y *N* el número de valores de señal o estados de cuantización distintos aceptados.

- Además de los mencionados, existen otros esquemas de codificación como, por ejemplo, la *modulación delta*. En esta técnica, por cada muestra *x(n)* se ofrece una tensión de salida *v\_o(n)* consistente en uno de los dos siguientes posibles valores:

- $+V$  si  $\sum_{i=1}^{n-1} v_o(i) > x(n)$ .
- $-V$  en otro caso.

**EJEMPLO**

Para una transmisión de voz en telefonía se muestrea la señal analógica a 8 KHz y se codifica mediante PCM con 8 bits/muestra según la ley A. ¿Cuál será la tasa en bits/segundo (bps) obtenida en el proceso?

La respuesta a esta pregunta es tan fácil como realizar la siguiente operación:

$$8.000 \text{ muestras/segundo} \times 8 \text{ bits/muestra} = 64.000 \text{ bps} = 64 \text{ Kbps}$$

donde, claro está, el hecho de que el proceso de cuantización siga la ley A, la ley  $\mu$ , o sea esta uniforme, no afecta en modo alguno.

Podemos observar que esta técnica proporciona directamente una secuencia de pulsos de tensión representativa de los valores de la señal, si bien hay que decir que la adaptación a la señal original puede no ser en ocasiones demasiado buena. Así, si el valor del pulso de tensión considerado,  $V$ , es grande, se producen continuas oscilaciones en la salida  $v_o$  si la señal de entrada permanece constante. Por el contrario, si esta varía rápido y lo hace de forma importante y el pulso de tensión de salida es pequeño,  $v_o$  tarda mucho en adaptarse al valor de la señal; es el conocido como problema de *sobrecarga de pendiente*. Adicionalmente, esta técnica es bastante sensible a los errores.

Llegados a este punto nos encontramos con que la señal analógica que contenía la información ha sido transformada en una señal digital que, de acuerdo al modo de transmisión considerado, hemos de transmitir digitalmente; es decir, estamos en la situación correspondiente al siguiente modo de transmisión, por lo que pasaremos directamente a considerarlo.

### 2.3.2. Señales digitales, transmisión digital

Dada una señal digital, ¿cuáles son los procesos que hemos de llevar a cabo sobre ella para su transmisión digital? Puede creerse que ninguno, pero esto no es del todo cierto. A este respecto se ha de mencionar que existen distintos tipos de códigos PCM (Figura 2.19), los cuales presentan características distintas; características que son importantes desde el punto de vista de la transmisión de las señales, como por ejemplo el ancho de banda involucrado.

Desde esta perspectiva, las características más importantes a considerar acerca de un código son las siguientes:

- *Espectro*. Doble es la importancia de esta característica. De una parte interesa que el ancho de banda de la señal codificada sea reducido, a fin de precisar menos recursos en el canal de transmisión. Por otro lado, no interesa la existencia de componente en continua (frecuencia 0) dado que gran parte de los canales de transmisión hacen uso de o se comportan como transformadores de señal, dispositivos que no dejan pasar las componentes en continua. Adicionalmente, la existencia de un nivel de continua implica la transferencia de energía entre emisor y receptor, lo que habitualmente es indeseable y puede generar problemas en la conexión.
- *Capacidad de sincronismo*. Uno de los principales problemas en la transmisión remota de información consiste en la pérdida de sincronismo entre el emisor y el receptor, lo que impide la interpretación correcta de la información recibida. Para evitar este problema existen códigos, a veces denominados de *autorreloj*, que contienen en sí mismos información de reloj.

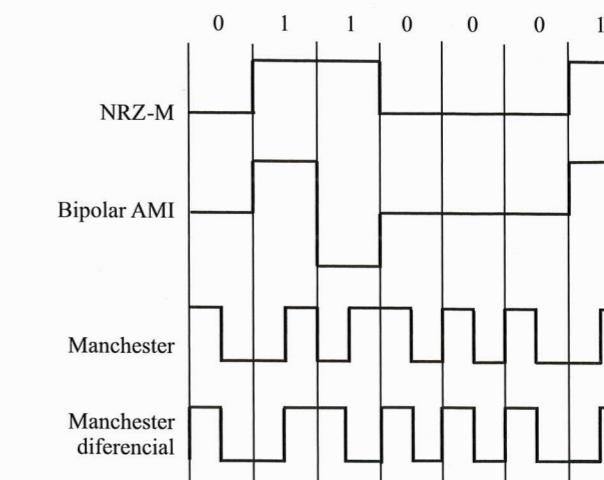


Figura 2.19. Ejemplos de códigos binarios.

Estos códigos se utilizan también, por ejemplo, en procesos de almacenamiento masivo en discos duros y disquetes de sistemas computador. El proceso de lectura/escritura es equivalente al de emisión/recepción por cuanto que ambos implican un intercambio de información en el tiempo.

- *Capacidad de detección de errores*. Adicionalmente a la utilización de técnicas para llevar a cabo la detección de errores en transmisiones, aspecto cuyo estudio se abordará en temas posteriores, existen códigos con ciertas propiedades en este sentido. En estos, por construcción, las secuencias de pulsos deben cumplir determinadas propiedades. Por ejemplo, que la polaridad de los pulsos sea alterna. De esta forma resulta posible detectar algunos errores de transmisión en un bit, ya que la secuencia finalmente recibida podría no ser válida desde el punto de vista de su construcción.
- *Complejidad*. Un factor también importante a considerar es la complejidad y coste de implementación del código. Así, por ejemplo, es claro que no es lo mismo desarrollar un código con asignación 1/0 como valores de tensión absolutos e independientes entre sí que uno diferencial en el que hemos de tener en cuenta los valores de señal precedentes.

A continuación se presentan distintos códigos PCM, llamados en general *códigos de línea*.

#### NRZ («Non-Return to Zero»)

En este caso, la codificación efectuada es como sigue:

- El valor lógico 1 se representa mediante un valor de tensión  $+V$ .
- El bit 0 con un pulso de tensión nula.

También puede considerarse la representación contraria; es decir, al 0 lógico se le asocia un pulso de tensión de valor  $+V$  y al 1 uno de valor cero. Al primero de ellos se le conoce como NRZ-M (*Mark NRZ*) y al último como NRZ-L (*Level NRZ*) —Figura 2.19—.

También existe una variante diferencial, llamada NRZ-I (*Inverted NRZ*), consistente en:

- Al valor 0 lógico se le asigna una tensión tal que no se produce transición al comienzo del intervalo de bit; es decir, si el valor de tensión anterior era  $+V$ , el actual también tomará este valor.

### Mánchester diferencial

Similar al código Mánchester en cuanto a la aparición de una transición en mitad del intervalo de bit tanto para el valor lógico 0 como para el 1, la variante diferencial se caracteriza por la introducción de dependencias en la codificación de ambos valores lógicos (Figura 2.19):

- Siempre existe una transición en mitad del intervalo de bit.
- El lógico 0 supone una transición al comienzo del intervalo.
- El valor 1 no supone una transición al inicio del intervalo.

Las características de este esquema de codificación son las mismas que las del Mánchester normal, con la salvedad de que la codificación diferencial permite la detección por parte del receptor de ciertas condiciones de error en la transmisión. También hemos de señalar la mayor complejidad de implementación de Manchester diferencial frente al código Manchester.

### Otros esquemas de codificación

Hemos visto que la introducción de la capacidad de sincronismo a través de la utilización de códigos Manchester frente a NRZ o AMI, tiene como consecuencia una disminución del 50% en la eficiencia del código. Para conseguir aumentar esta eficiencia al tiempo que se mantiene la capacidad de sincronismo que le falta a NRZ o AMI, se han ideado otros esquemas de codificación que pasamos a describir.

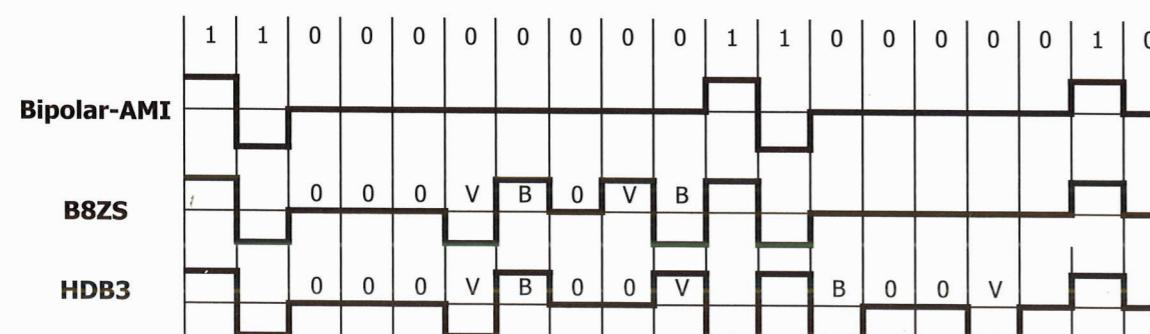
- **B8ZS** («Bipolar with 8-Zeros Substitution»). Utilizado en Norteamérica, en el esquema de codificación B8ZS se siguen las siguientes reglas (Figura 2.21):

- Codificación como AMI.
- Si tienen lugar 8 valores 0 consecutivos estos se sustituyen, haciendo uso de la técnica de violación de código, por:
  - 000–+0+- si el pulso anterior era negativo.
  - 000+-0+ si el pulso anterior era positivo.

donde 0 significa 0 voltios y + y – pulsos de tensión de  $+V$  y  $-V$  voltios, respectivamente.

- **HDB3** («High Density with Bipolar 3-zeros»). Similar al anterior, aunque en este caso utilizado en Europa, el código HDB3 lleva a cabo la siguiente codificación (Figura 2.21):

- Codificación como AMI.
- Si tienen lugar 4 valores 0 consecutivos, estos se sustituyen, haciendo uso también de la técnica de violación de código, por:



**Figura 2.21.** Esquemas de codificación de aleatorización («scrambling») B8ZS y HDB3 generados a partir de codificación bipolar-AMI.

- 000– si el pulso anterior era negativo y el número de pulsos bipolares (1) desde la última sustitución es impar.
- 000+ si el pulso anterior era positivo y el número de pulsos bipolares (1) desde la última sustitución es impar.

- +00+ si el pulso anterior era negativo y el número de pulsos bipolares (1) desde la última sustitución es par.
- -00– si el pulso anterior era positivo y el número de pulsos bipolares (1) desde la última sustitución es par.

- **4B/5B-NRZI**. Utilizado en redes LAN como Ethernet de alta velocidad (Capítulo 5), en este esquema se hace uso de un grupo de 5 bits, llamado *grupo de código*, para representar una serie de 4 bits de datos. La secuencia de bits que forman cada uno de los grupos de código asociados a los 16 grupos de 4 bits de datos es tal que tras la codificación NRZI llevada a cabo sobre ellos no existen más de 3 intervalos de bit consecutivos con el mismo valor de tensión (Figura 2.22). Este hecho mejora el sincronismo propio del esquema NRZI y es la razón básica de su utilización.

Bits de datos	Grupo de código (NRZI)				
0000	1	1	1	1	0
0001	0	1	0	0	1
0010	1	0	1	0	0
0011	1	0	1	0	1
0100	0	1	0	1	0
0101	0	1	0	1	1
0110	0	1	1	1	0
0111	0	1	1	1	1
1000	1	0	0	1	0
1001	1	0	0	1	1
1010	1	0	1	1	0
1011	1	0	1	1	1
1100	1	1	0	1	0
1101	1	1	0	1	1
1110	1	1	1	0	0
1111	1	1	1	0	1

**Figura 2.22.** Codificación 4B/5B-NRZI.

Aunque esta transformación puede parecer a primera vista un desperdicio de ancho de banda, hay que constatar que la eficiencia conseguida con este esquema de codificación es del 80% (4/5) frente al 50% alcanzado con la codificación Manchester.

- Un código similar al 4B/5B-NRZI, aunque con mayor capacidad de detección de errores, es el 8B/10B. También se pueden nombrar otros esquemas como el *MLT-3*, donde se utilizan valores de señal ternarios, y el 8B/6T, donde se realiza una transformación o mapeo de 8 valores binarios en 6 ternarios.

Los esquemas descritos pertenecen a la familia de los denominados códigos de aleatorización («scrambling»), caracterizados por la sustitución de una o varias secuencias de bits por otras de forma sistemática.

### 2.3.3. Señales digitales, transmisión analógica

A lo largo de este apartado y del siguiente se aborda la transmisión analógica de datos sobre un canal de comunicaciones. Esta transmisión se suele caracterizar por la simultaneidad en el medio de varias comunicaciones, lo que se consigue, como se estudiará en el tema siguiente, mediante el empleo de técnicas de multiplexación en frecuencias.

La transmisión de señales digitales de forma analógica precisa de un conjunto de procesos que permitan la transmisión de la información contenida en la señal digital original haciendo uso de una señal analógica. En este proceso se ven involucradas tres señales: a) la señal de datos original (digital),  $d(t)$ , que recibe el nombre de *señal modulante o moduladora*, b) la señal analógica en la que se basa la transmisión, denominada *señal portadora*,  $c(t)$ , y c) la señal resultante a transmitir finalmente sobre el medio, llamada *señal modulada*,  $m(t)$ , también analógica.

Existen tres técnicas básicas distintas para obtener la señal modulada a partir de una señal portadora y de una señal moduladora (Figura 2.23). Puesto que la señal moduladora o de datos es de naturaleza digital, estas técnicas se llaman de *modulación digital* y son las que siguen.

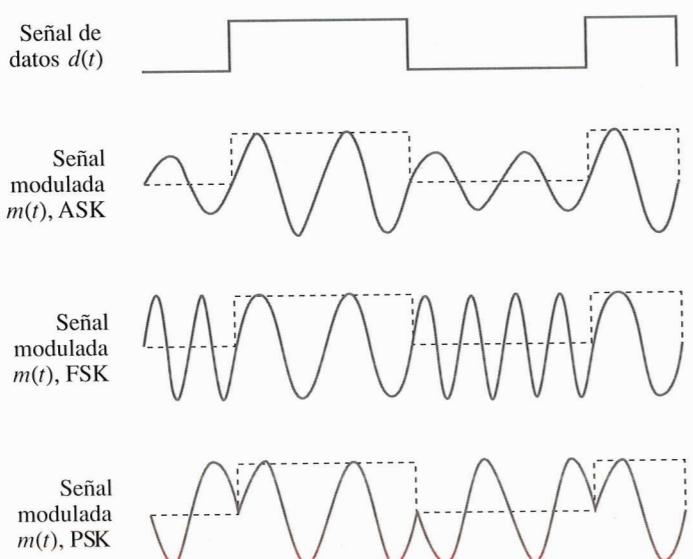


Figura 2.23. Técnicas de modulación digital ASK, FSK y PSK.

### ASK («Amplitude Shift Keying»)

En la técnica de modulación en amplitud la información de la señal digital se transmite en la amplitud de la señal portadora. Para ello, la modulación es de la forma:

$$m(t) = \begin{cases} A_1 \cdot \cos(w_c t) & \text{si } d(t) = 1 \\ A_2 \cdot \cos(w_c t) & \text{si } d(t) = 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

Es decir, se emplea una señal portadora de frecuencia  $w_c$  con dos posibles valores de amplitud, uno,  $A_1$ , para representar el valor lógico 1 y otro,  $A_2$ , para el 0. Cuando uno de los dos valores de amplitud es cero, la técnica recibe el nombre de *modulación todo-nada*.

Esta técnica presenta la ventaja de una fácil detección, ya que únicamente es necesario obtener la envolvente de la señal recibida para determinar la amplitud y, en consecuencia, el bit transmitido.

### FSK («Frequency Shift Keying»)

En este caso la información de la señal digital se transmite en la frecuencia de la señal portadora de acuerdo con

$$m(t) = \begin{cases} A \cdot \cos(w_{c1} t) & \text{si } d(t) = 1 \\ A \cdot \cos(w_{c2} t) & \text{si } d(t) = 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

En FSK se emplean así dos señales portadoras, de frecuencias  $w_{c1}$  y  $w_{c2}$ , con la misma amplitud para representar los valores 0 y 1.

Frente a ASK, en este caso la detección es algo más compleja, ya que es necesario medir la frecuencia de la señal.

### PSK («Phase Shift-Keying»)

Como el nombre de la técnica indica, la información de la señal digital se transmite ahora en la fase de la señal portadora. El proceso de modulación se expresa formalmente como sigue:

$$m(t) = \begin{cases} A \cdot \cos(w_c t + \phi_1) & \text{si } d(t) = 1 \\ A \cdot \cos(w_c t + \phi_2) & \text{si } d(t) = 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

En la técnica de modulación PSK se hace uso por tanto de una única señal portadora de frecuencia  $w_c$  y amplitud  $A$ , pero con distinta fase según se codifique un valor lógico 1 o un valor 0.

El comportamiento de PSK es muy similar al de FSK, presentando la ventaja de una detección más sencilla, ya que es más fácil detectar cambios de fase que de frecuencia.

A cada uno de los posibles valores de señal ASK, FSK y PSK que puede tomar  $m(t)$  es lo que denominamos en apartados anteriores *estados de señalización*. Tal como se han presentado las técnicas de modulación digital, es claro que un estado de señalización se corresponde con un bit, por lo que la velocidad de modulación (número de estados de señalización por segundo o baudios) coincide en valor con la velocidad de transmisión (bits por segundo). El aumento de esta última frente a la primera pasaría, como ya conocemos, por incrementar el número de estados de señalización permitidos de forma que cada uno de ellos haga referencia a más de un bit. Así, bastaría con aceptar 4 amplitudes distintas en ASK para conseguir que, dados los 4 estados de señalización correspondientes (todos con la misma frecuencia portadora), la transmisión de cada uno de ellos sea equivalente a la generación de 2 bits. Un ejemplo de esto lo constituye la técnica QPSK («Quadrature PSK»), la cual se caracteriza por el empleo de los siguientes 4 estados de señalización (con lo que  $v_{transmisión} = 2 \cdot v_{modulación}$ ):



$$m(t) = \begin{cases} A_1 \cdot \cos\left(w_c t + \frac{\pi}{4}\right) & \text{si } d(t-1, t) = 01 \\ A_1 \cdot \cos\left(w_c t + \frac{3\pi}{4}\right) & \text{si } d(t-1, t) = 01 \\ A_1 \cdot \cos\left(w_c t + \frac{5\pi}{4}\right) & \text{si } d(t-1, t) = 10 \\ A_1 \cdot \cos\left(w_c t + \frac{7\pi}{4}\right) & \text{si } d(t-1, t) = 11 \end{cases} \quad (2.17)$$

Respecto de las características de las técnicas de modulación digital diremos que el esquema ASK presenta una mayor susceptibilidad a errores en la transmisión debido a que la amplitud es muy sensible al ruido. Por su parte, la fase es el parámetro de los tres manejados que resulta más inmune al ruido de transmisión, por lo que la técnica PSK es la que menor probabilidad de error presenta de las tres. Esta es la razón por la que PSK es el esquema de modulación digital más usado y el que mayor velocidad de transmisión consigue: al ser la fase menos sensible al ruido, el número de estados de señalización que podemos utilizar es mayor que en ASK y FSK.

#### QAM («Quadrature Amplitude Modulation»)

Las técnicas de modulación digital estudiadas no son incompatibles entre sí, pudiendo utilizarse una combinación de ellas. Por ejemplo, podríamos considerar una codificación en la que se empleasen 2 amplitudes distintas y 4 fases, con lo que se tendría un total de 8 estados de señalización; es decir,  $v_{\text{transmisión}} = 3 \cdot v_{\text{modulación}}$ . A la combinación de las técnicas ASK y PSK se le conoce como *modulación de amplitud en cuadratura* o QAM («Quadrature Amplitude Modulation»).

Para concluir el estudio de la modulación digital mencionaremos el término *constelación*, el cual hace referencia a la representación espacial de los estados de señalización utilizados en un esquema de modulación dado. Así, por ejemplo, en la Figura 2.24(a) se muestra la constelación QPSK dada en (2.17) y en la Figura 2.24(b) la constelación de un hipotético esquema de modulación QAM con 8 estados de señalización (QAM8) obtenido a partir de la QPSK considerando dos amplitudes distintas, que podría corresponder, por ejemplo, a la siguiente codificación:

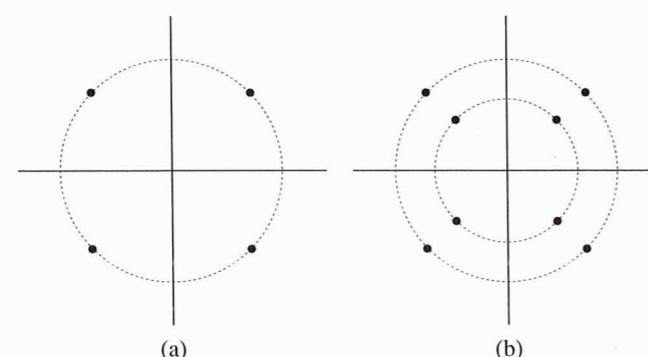


Figura 2.24. Constelación QPSK (a) y una hipotética 8-QAM derivada de la anterior haciendo uso de dos amplitudes distintas (b).

$$m(t) = \begin{cases} A_1 \cdot \cos\left(w_c t + \frac{\pi}{4}\right) & \text{si } d(t-1, t) = 000 \\ A_2 \cdot \cos\left(w_c t + \frac{\pi}{4}\right) & \text{si } d(t-1, t) = 001 \\ A_1 \cdot \cos\left(w_c t + \frac{3\pi}{4}\right) & \text{si } d(t-1, t) = 010 \\ A_2 \cdot \cos\left(w_c t + \frac{3\pi}{4}\right) & \text{si } d(t-1, t) = 011 \\ A_1 \cdot \cos\left(w_c t - \frac{3\pi}{4}\right) & \text{si } d(t-1, t) = 100 \\ A_2 \cdot \cos\left(w_c t - \frac{3\pi}{4}\right) & \text{si } d(t-1, t) = 101 \\ A_1 \cdot \cos\left(w_c t - \frac{\pi}{4}\right) & \text{si } d(t-1, t) = 110 \\ A_2 \cdot \cos\left(w_c t - \frac{\pi}{4}\right) & \text{si } d(t-1, t) = 111 \end{cases} \quad (2.18)$$

#### 2.3.4. Señales analógicas, transmisión analógica

La transmisión directa sobre la atmósfera de señales analógicas como, por ejemplo, la voz (digamos procedente de una emisora de radio) requeriría la utilización de antenas de varios kilómetros de altura. Este hecho, junto con la necesidad de compartir el medio entre varias transmisiones simultáneas<sup>6</sup>, hace que las señales analógicas de datos deban ser procesadas a fin de posibilitar su transmisión (incluso) sobre un medio analógico.

Para hacer posible esta transmisión se recurre a técnicas similares a las descritas en el apartado anterior, donde existe una señal moduladora y una portadora. La diferencia con las técnicas ASK, FSK y PSK radica básicamente en el hecho de que ahora la señal de datos de que se dispone es analógica. Es por ello que las técnicas de modulación manejadas en este modo de transmisión se denominan *analógicas* y son las que se describen a continuación.

#### Modulación lineal o en amplitud (AM, «Amplitude Modulation»)

Esta técnica es similar a ASK en cuanto a que la información de la señal de datos se transmite en la amplitud de la señal portadora. Para ello, en este caso el proceso de modulación AM consiste en multiplicar directamente las señales portadora y moduladora:

$$m(t) = d(t) \cdot \cos(w_c t) \quad (2.19)$$

A este proceso se le denomina *AM de portadora suprimida* o *AM-PS* (Figura 2.25). El proceso de recepción pasa por multiplicar la señal modulada por la señal portadora y realizar, posteriormente, un filtrado paso baja como se indica en la Figura 2.25(e). Es lo que se conoce como *demodulación coherente* o *síncrona* y presenta el inconveniente de ser muy sensible a variaciones en la frecuencia y la fase de la portadora local generada en el receptor respecto de la utilizada por el emisor.

<sup>6</sup> Es lo que se conoce como *transmisión en banda ancha*. Véase el Capítulo 3.

Una alternativa a AM-PS es la técnica conocida como *AM de alta potencia*, o *AM-AP*, en la que la señal modulada se obtiene a partir de:

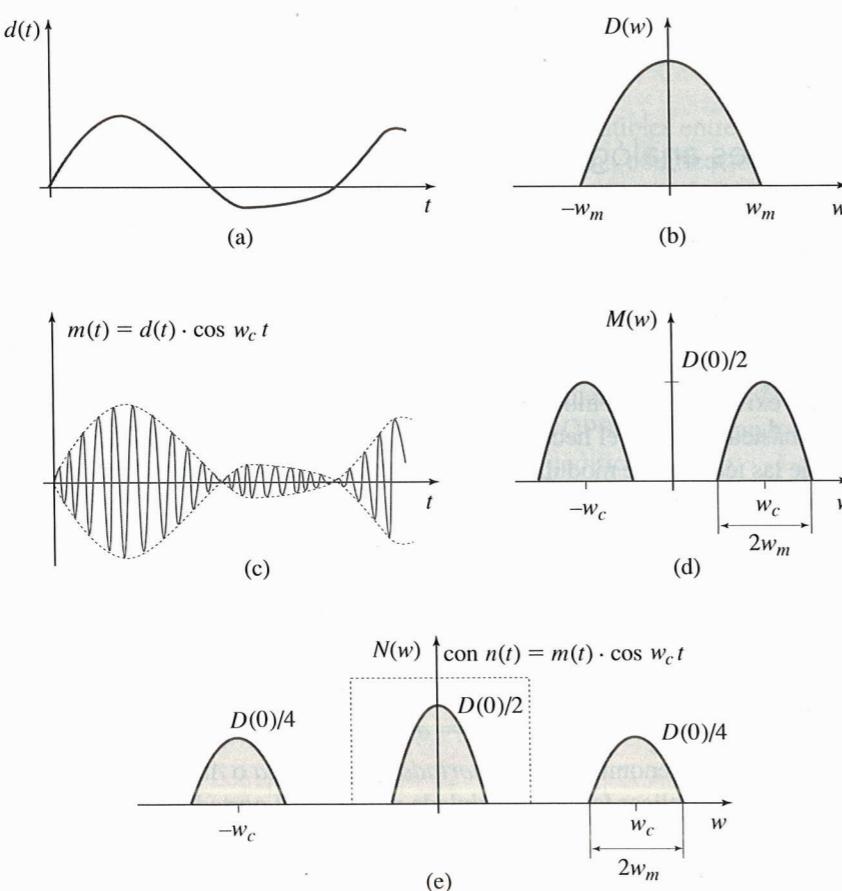
$$m(t) = [A + d(t)] \cdot \cos(w_c t) \quad (2.20)$$

En este caso, como se muestra en la Figura 2.26, la recepción consistiría en un proceso de rectificación o en uno de detección de envolvente, procedimientos más simples y menos críticos que el llevado a cabo en AM de portadora suprimida. No obstante, para que la detección de envolvente pueda realizarse sin problema ha de cumplirse que el *índice de modulación en amplitud*, definido como,

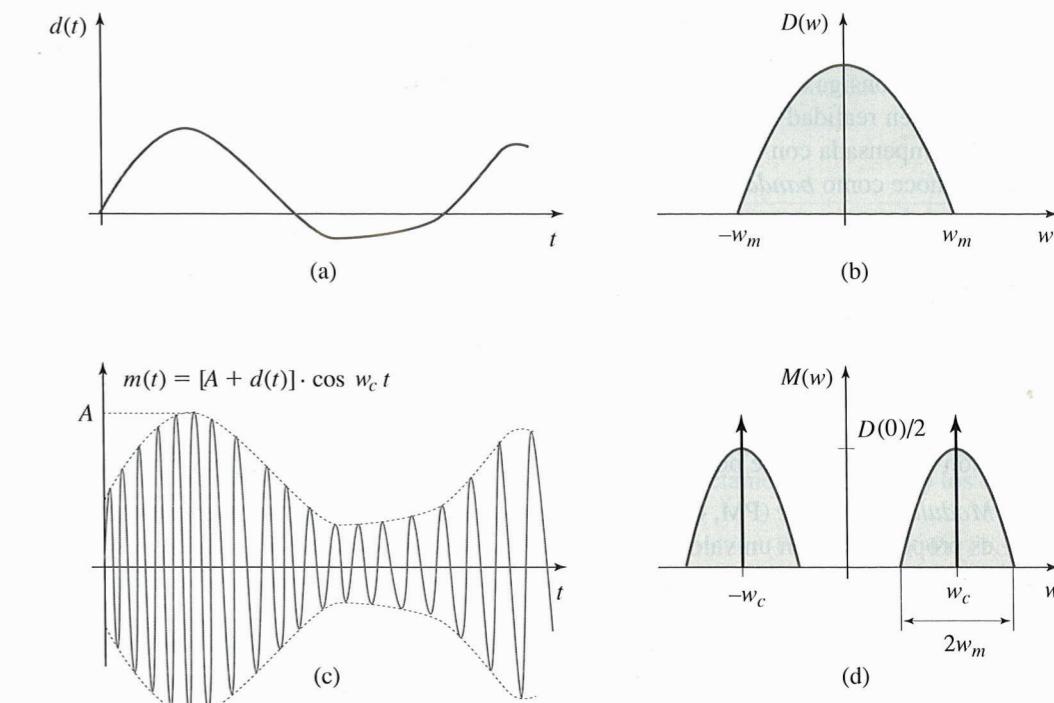
$$\mu_{AM} = \frac{|d(t)_{\max}|}{A} \quad (2.21)$$

sea inferior a 1; es decir, que  $A > |d(t)_{\max}|$ .

Según se muestra en las Figuras 2.25 y 2.26, tanto AM-PS como AM-AP se caracterizan por implicar una traslación en frecuencias del espectro de la señal de datos original. Esto es lo que sucede, por ejemplo, con la emisión de radio, donde a cada estación emisora se le asigna una frecuencia portadora; frecuencia a sintonizar (es decir, filtrar) en el dial de nuestro receptor. Adicionalmente a la traslación

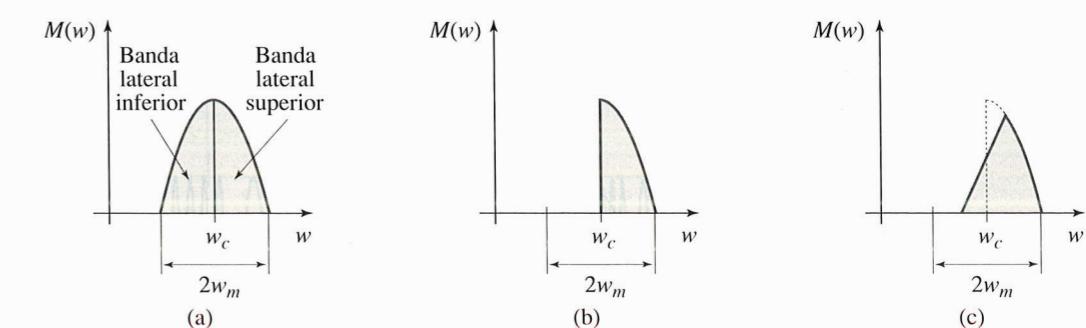


**Figura 2.25.** AM de portadora suprimida: señal moduladora (a) y espectro (b), señal modulada (c) y espectro (d) y señal demodulada coherentemente (e).



**Figura 2.26.** AM de alta potencia: señal moduladora (a) y espectro (b) y señal modulada (c) y espectro (d).

en frecuencias, hemos de destacar un aspecto indeseable de la técnica AM: el ancho de banda de la señal modulada es el doble del de la señal moduladora. La parte derecha de este se denomina *banda lateral superior* y la parte izquierda *banda lateral inferior*, y a la técnica AM tal como se ha explicado (PS y AP) se le conoce como de *doble banda lateral* (DBL). Nos encontramos así con las técnicas AMDBL-PS y AMDBL-AP (Figura 2.27). Para evitar esta redundancia innecesaria de información, y el consecuente desaprovechamiento del ancho de banda, bastaría con realizar en el emisor un filtrado paso banda de forma que, una vez efectuada la modulación y antes de la transmisión de la señal resultante, se eliminase una de las dos bandas laterales. Las técnicas anteriores así implementadas se conocen como AMBLU-PS y AMBLU-AP, donde las siglas BLU significan *banda lateral única*.



**Figura 2.27.** Doble banda lateral (a), banda lateral única (b) y banda lateral residual (c).

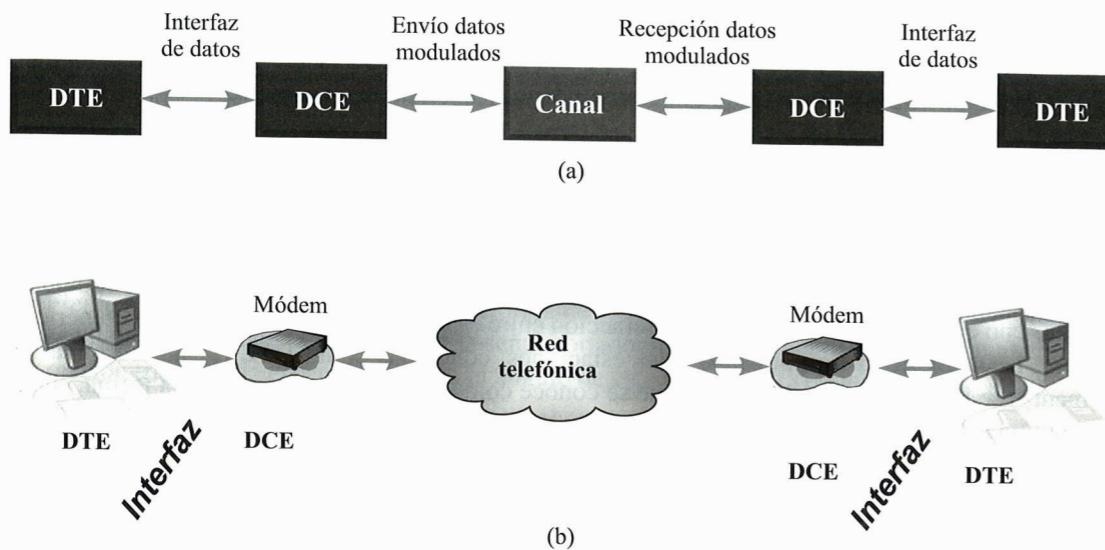


Figura 2.30. Equipos DTE y DCE e interfaz de datos (a), ejemplo en comunicaciones vía módem (b).

embargo, esto requiere una sincronización perfecta entre los relojes del emisor y el receptor, ya que una deriva entre ambos podrá dar lugar a la pérdida o generación artificial de bits a la salida, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 2.32.

Para resolver los problemas ocasionados por la posible falta de sincronización de los relojes en el emisor y el receptor se adoptan dos posibles formas de operación:

- *Transmisión asíncrona*. En este modo de operación el emisor y el receptor no necesitan estar perfectamente sincronizados a nivel de bit, ya que las transmisiones son de corta duración (Figura 2.33(a)). La información se recibe e interpreta usando patrones acordados, agrupándose los bits en bloques pequeños que se envían de forma independiente y con una separación aleatoria entre sí. Al inicio de cada bloque se incluye una marca de inicio (Figura 2.33(b)) que

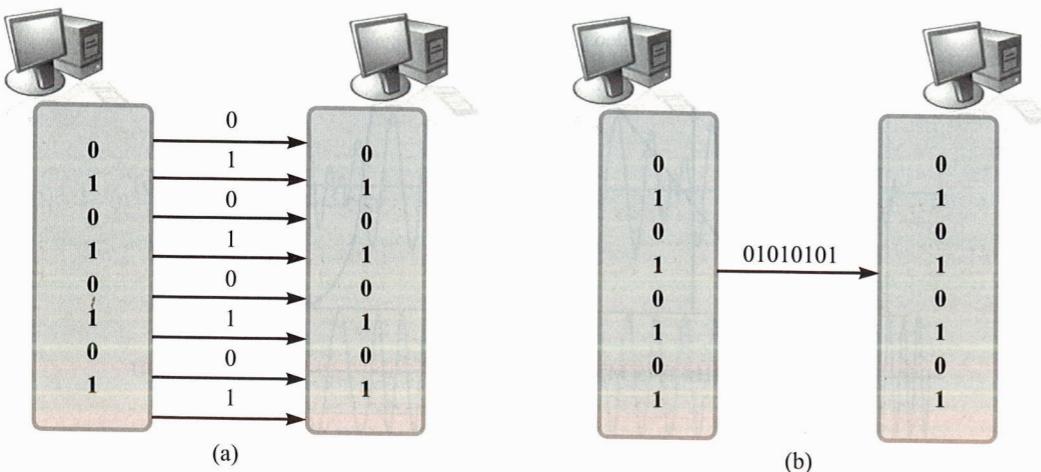


Figura 2.31. Comunicaciones paralelo (a) y serie (b).

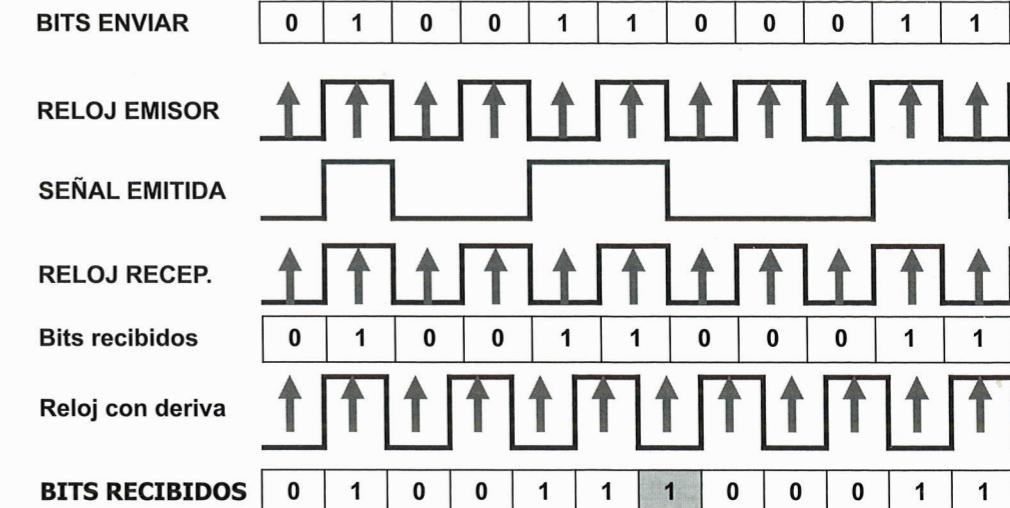


Figura 2.32. Inserción de un bit ficticio a la salida como consecuencia de diferencias en los relojes del emisor y del receptor. Las flechas indican los instantes de muestreo.

permite sincronizar los relojes (normalmente, el denominado bit de inicio) y se establece un periodo mínimo entre bloques (bits de parada o fin). Evidentemente, la corta duración de la transmisión hace que la posible deriva de los relojes durante el periodo de transmisión no dé lugar a errores en la interpretación de los bits.

— *Transmisión síncrona*. A diferencia del caso anterior, la transmisión síncrona se caracteriza por usar grandes bloques de datos delimitados por secuencias preestablecidas al inicio y/o final de los mismos (Figura 2.33(c)). Para garantizar la correcta sincronización entre el emisor y el receptor se incluye información relativa al reloj en la transmisión. Esto puede conseguirse mediante la utilización de códigos de autorreloj, como el código Mánchester, a partir de los que es posible reconstruir la señal de reloj en el receptor; mediante el envío de la propia señal de reloj por un canal diferente; o mediante la inclusión de varios segmentos en el bloque con información que permite sincronizar los relojes (caracteres de sincronismo). El formato final de los bloques utilizados depende del protocolo que esté siendo utilizado y suele incluir, además de los datos a transportar y los delimitadores, información relativa a dicho protocolo en forma de campos de control.

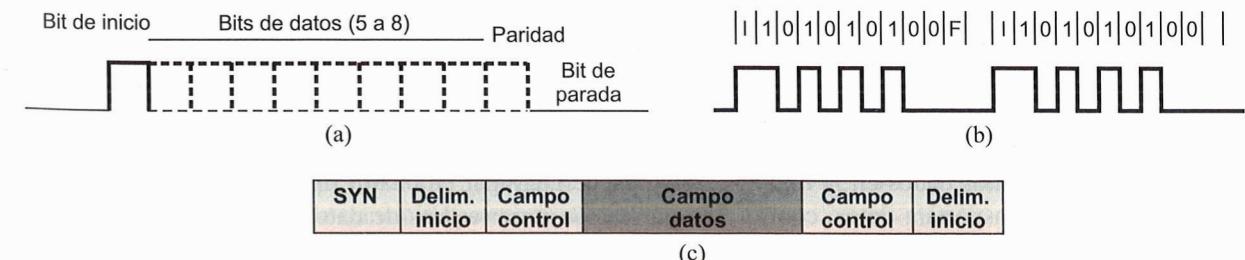


Figura 2.33. Transmisión asíncrona (a), ejemplo de transmisión de dos caracteres mediante transmisión asíncrona (b) y transmisión síncrona (c).

Las especificaciones de una interfaz deben incluir todas las características necesarias para permitir la correcta comunicación entre el DTE y el DCE, por lo que pueden estructurarse en los siguientes tipos de especificaciones:

- *Mecánicas*: estas características hacen referencia al tipo de conectores utilizados en la interconexión, a sus dimensiones, el número y tipo de cables y la ubicación de los mismos según el tipo de equipo.
- *Eléctricas*: establecen los niveles de tensión asignados a los valores binarios lógicos 0 y 1 y las temporizaciones de las señales a utilizar.
- *Funcionales*: asignan un significado (interpretación) a cada una de las señales que pueden aparecer en cada una de las líneas o contactos de que se dispone en la interfaz.
- *De procedimiento*: establecen las secuencias de eventos, en términos de líneas que se deben utilizar y pasos a seguir, para hacer posible la comunicación.

Numerosas son las posibilidades de conexión de un equipo terminal en una red de computadores y, en consecuencia, diversas son las posibles interfaces involucradas. Dada su amplia utilización, tres son las que vamos a presentar: RS-232 y USB, utilizadas p. ej. en las comunicaciones vía módem a través de la red telefónica, y conexión RJ-45, usada ampliamente en redes LAN de tipo BASE-T.

Las interfaces han evolucionado de forma paralela a la de los equipos y sistemas informáticos. Así, las primeras interfaces hacían uso de múltiples señales (líneas), cada una de las cuales tenía un significado. La operación de la interfaz se establecía en base a una lógica implementada en el hardware que evaluaba los valores de las señales. Adicionalmente, las señales de control y señalización utilizaban circuitos diferentes a los de las señales de datos. Un ejemplo de este tipo de interfaz es RS-232, como veremos en el apartado siguiente. Con la mejora y abaratamiento de los procesadores, las interfaces han evolucionado hacia sistemas mucho más complejos en los que se usa un número reducido de líneas y el control y señalización se realizan en base a secuencias de bits específicas que se incorporan y combinan con los datos, de forma similar a como se hace en los protocolos de redes de comunicaciones. Estas interfaces se dicen basadas en software, por contraposición con las anteriores basadas en hardware. Un ejemplo de esto es la interfaz USB, que es calificada en múltiples contextos como una red de comunicaciones de ámbito personal (PAN) en lugar de como una interfaz.

#### 2.4.1. RS-232

Basada en un dispositivo UART («Universal Asynchronous Receiver/Transmitter»), caracterizado por llevar a cabo una transmisión asíncrona, la interfaz RS-232 fue estandarizada por EIA («Electronic Industries Alliance»), complementándose el nombre con una letra indicativa de la versión. La última es la F. Esta interfaz fue adoptada también por la antigua CCITT («Comité Consultativo Internacional Telegráfico y Telefónico»), hoy ITU-T, bajo el estándar denominado V.24.

En cuanto a las especificaciones mecánicas hemos de indicar que existen dos conectores: DB-25, de 25 contactos, y DB-9, con 9 líneas (Figura 2.34), macho en ambos casos en la parte del DTE. Por lo que respecta a las especificaciones eléctricas, el estándar establece un valor de tensión menor que -3 voltios para representar el 1 lógico, asignándosele al 0 lógico una tensión superior a +3 voltios.

Los circuitos dados en la Figura 2.34 se pueden agrupar en cuatro tipos en función del tipo de señal que transportan: datos, control, temporización y tierra. Los de datos se utilizan, obviamente, para enviar y recibir los datos a transmitir. A su vez, los de temporización se usan para posibilitar el envío de señales de reloj y, en consecuencia, transmisión síncrona. Los circuitos de control se utilizan para el control de la interfaz, teniendo cada uno de ellos un significado establecido en la especificación funcional.

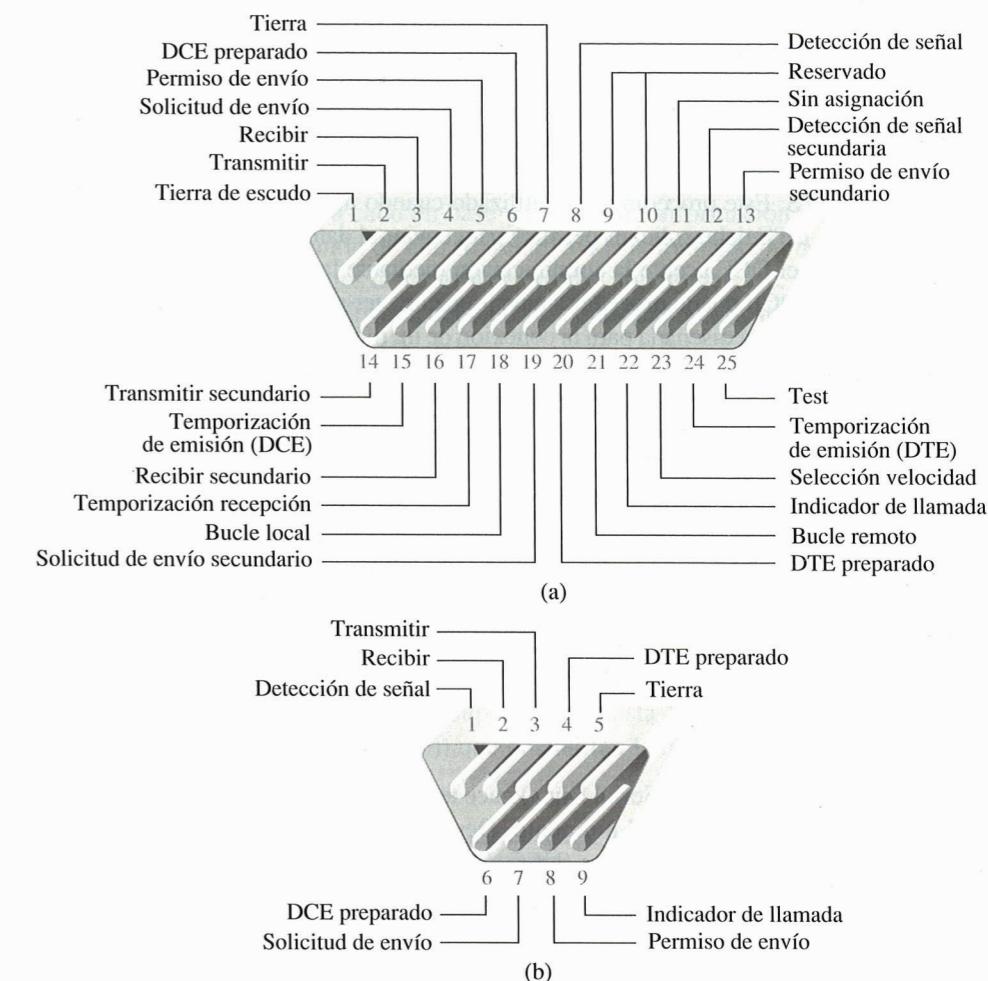


Figura 2.34. Especificación funcional de líneas en RS-232, en el DTE, para los conectores DB-25 y DB-9.

De todos ellos, vamos a mencionar únicamente los siguientes, por considerarlos los más importantes en toda comunicación:

- a) Transmisión de datos (*Tx*): línea de transmisión DTE → DCE.
- b) Recepción de datos (*Rx*): línea de recepción DTE ← DCE.
- c) DTE preparado (*DTR*, «Data Terminal Ready»): línea DTE → DCE para indicar a este último que el DTE se encuentra dispuesto para una transmisión.
- d) DCE preparado (*DSR*, «Data Set Ready»): línea DTE ← DCE para indicar al primero que el DCE está en ON.
- e) Solicitud de envío (*RTS*, «Request To Send»): línea DTE → DCE para indicar a este último el deseo de transmitir por parte del DTE.
- f) Permisos de envío (*CTS*, «Clear To Send»): línea DTE ← DCE para indicar al primero la autorización de transmisión.
- g) Indicador de llamada (*RI*, «Ring Indicator»): línea DTE ← DCE para indicar al primero que se está recibiendo una llamada.

- h) Detección de señal (CD, «Carrier Detect»): línea DTE → DCE a través de la que se indica al primero la recepción sobre la línea de una señal portadora dentro de los límites aceptados.
- i) Tierra (Gnd, «Ground»): línea de referencia para todas las señales.

Por su parte, la especificación de procedimiento establece las secuencias de eventos y el modo de operar. En este sentido, describiremos a modo de ejemplo únicamente el procedimiento de control de flujo, denominado RTS-CTS. Este procedimiento, utilizado cuando un DTE desea enviar datos sobre la interfaz, establece que el DTE debe solicitar permiso para enviar el dato activando la línea RTS («Request To Send») y esperar que el DCE acepte la comunicación mediante la activación de la línea CTS («Clear To Send»), tras lo que el DCE puede proceder a enviar un carácter por la línea de transmisión de datos (Tx).

La interfaz RS-232 está diseñada para la conexión de un módem con un computador, pero es claro que también puede utilizarse para la comunicación genérica de un computador con dispositivos externos sin más que hacer uso adecuado de las líneas funcionales existentes en la interfaz. En este sentido, es posible la comunicación computador-computador mediante la configuración *null-modem* indicada en la Figura 2.35.

Las velocidades conseguidas con la interfaz RS-232 están en torno a los 20 Kbps para distancias del orden de 15 metros. Como alternativa para mejorar las prestaciones de RS-232 surgió la interfaz serie RS-422, caracterizada por hacer uso de transmisiones balanceadas y gracias a lo cual se alcanzan velocidades del orden de 2 Mbps para distancias de 60 metros. A pesar de las claras ventajas de RS-422 frente a RS-232, aquella no ha conseguido desplazar a esta debido fundamentalmente a su incompatibilidad de uso (para empezar, RS-422 hace uso de un conector de 49 líneas) y al desarrollo de otras interfaces más simples en cuanto a cableado y conexionado y de mayores velocidades.

#### 2.4.2. USB

La interfaz serie USB («Universal Serial Bus») nace teniendo como fin principal la mejora de las lentes interfaces RS-232 existentes hasta el momento. Desarrollado por empresas líderes en el sector de las telecomunicaciones y de los ordenadores (NEC, Hewlett Packard, Intel, Microsoft, Lucent y Philips), USB es un bus serie que posibilita el funcionamiento simultáneo de hasta 127 dispositivos periféricos. La transmisión USB está basada en el paso de un testigo y en el uso de TDM, una técnica de compartición de canal (ver Capítulo 3). Debido a este carácter más parecido a las redes LAN, será descrito en mayor detalle en el Capítulo 5 junto a otros estándares de redes PAN. Por ahora, nos centraremos en sus características más relevantes como interfaz.

USB es una interfaz de transmisión de datos y distribución de energía. Para ello consta de 4 líneas en sus versiones iniciales: dos para la transmisión/recepción balanceada de datos, una línea de tensión

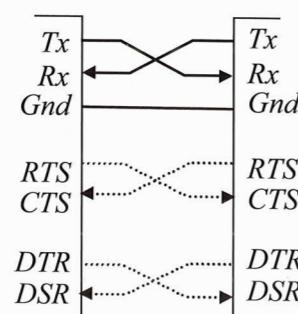


Figura 2.35. Conexión RS-232 *null-modem* entre dos computadores. En línea continua se indican las conexiones básicas y en discontinua otras opcionales.

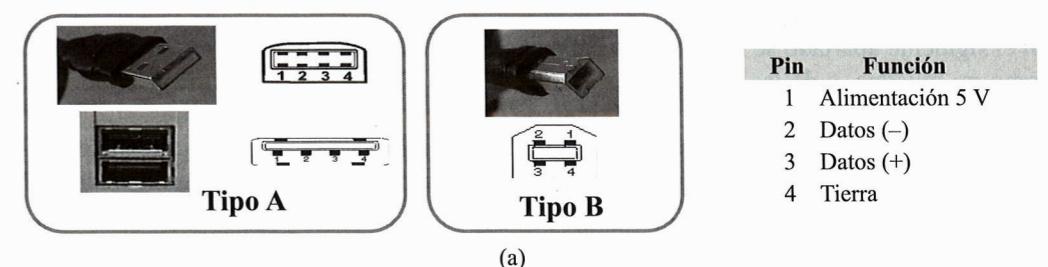
de 5 voltios que sirve de alimentación a los periféricos conectados y una cuarta de tierra que sirve de referencia a la anterior. Por lo que respecta a las características mecánicas, en la Figura 2.36(a) se muestran los conectores USB típicos, tanto de tipo A como tipo B, así como las funciones de los diferentes contactos. Los conectores tipo A son los que se ubican en el DTE (extremo del DTE), mientras que los tipo B son los que se ubican en el DCE (extremo del DCE).

De forma simplificada, podemos decir que la transmisión de información mediante USB entre un host y un dispositivo se lleva a cabo en base a bloques de información que contienen, además de los datos transportados, información de control relativa a la comunicación host-dispositivo, como el destinatario, el tipo de flujo, códigos de control de errores, solicitudes, etc. En consecuencia, el control de la interfaz es completamente software, debiendo el controlador correspondiente determinar las secuencias de comandos a partir del flujo de datos.

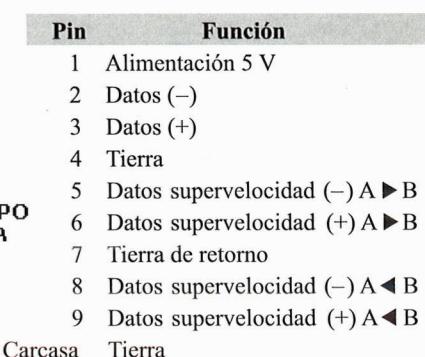
Para concluir esta breve descripción de USB, diremos que existen varias versiones, siendo la más avanzada en la actualidad la 3.0, aunque la más extendida es la 2.0. En esta última se contemplan tres velocidades distintas, denominadas:

- baja velocidad, con hasta 1,5 Mbps, para dispositivos interactivos como el teclado o el ratón;
- velocidad completa, con hasta 12 Mbps, para aplicaciones con requisitos medios de ancho de banda como audio o teléfono; y
- alta velocidad, con hasta 480 Mbps según el estándar (las velocidades reales son algo más bajas), para aplicaciones con altos requerimientos de ancho de banda como vídeo o almacenamiento masivo.

El estándar 3.0 añade una velocidad super-alta de hasta 4,8 Gbps, aunque para ello necesita incluir 5 contactos adicionales (Figura 2.36(b)) que posibilitan la transmisión simultánea en ambos sentidos (dúplex).



(a)



(b)

Figura 2.36. Conectores y pines en USB tipos A y B. Estándar USB 2.0 (a) y estándar USB 3.0 (b).

### 2.4.3. Conexiones RJ-45

Otra de las formas de conexión más utilizadas en la interconexión de computadores a redes es el uso de tarjetas con conectores RJ-45 («Registered Jack 45»). Ejemplos de este tipo de conexión lo podemos encontrar en redes LAN de tipo BASE-T con pares trenzados de categoría 4 y superiores.

Este tipo de conector es similar al utilizado en conexiones telefónicas tradicionales, RJ-11, salvo por el hecho de que dispone de 8 contactos en lugar de los 4 existentes en los RJ-11. RJ-45 define únicamente una interfaz física, esto es, las dimensiones, forma y contactos de los conectores, así como la forma de conectar los cables de par trenzado, que utilizan un código de colores para ello (Figura 2.37). Por tanto, la función que tendrá cada uno de los contactos depende de la aplicación considerada.

En el caso de redes LAN, que constituye uno de sus usos más habituales, se emplean para transmisión serie. En este caso se utilizan dos pares de contactos: un par para transmitir y otro para recibir datos, respectivamente, mediante transmisión balanceada (Figura 2.37). Las cuatro líneas restantes pueden usarse para la transmisión de energía, de modo que se puede alimentar el TE («Terminal Equipment», equipo terminal de datos) desde el NT («Networking Terminal Equipment», equipo terminal de red), y viceversa.

#### RESUMEN

El Capítulo 2 correspondiente al estudio de las funciones de red propias de la transmisión de datos, comenzó introduciendo terminología básica relacionada con la teoría de señal. Con la presentación de las series y de la transformada de Fourier, se introdujo el espectro de una señal y los conceptos de armónico y ancho de banda. A partir de este último se presentó el teorema de muestreo, o de Nyquist, en referencia a la relación que debe existir entre la frecuencia de muestreo de una señal y su componente máxima en frecuencia.

En el siguiente apartado se ha llevado a cabo el estudio de los medios de transmisión, tanto guiados como no guiados, y de las limitaciones que de sus propiedades se derivan respecto de la transmisión de información, en particular, el concepto de capacidad de canal. Se han presentado así el par trenzado, el cable coaxial, la fibra óptica y las transmisiones radio y de microondas. Respecto de todos ellos se han estudiado tanto los problemas y limitaciones que presentan como sus principales características en cuanto a ancho de banda y aplicaciones usuales.

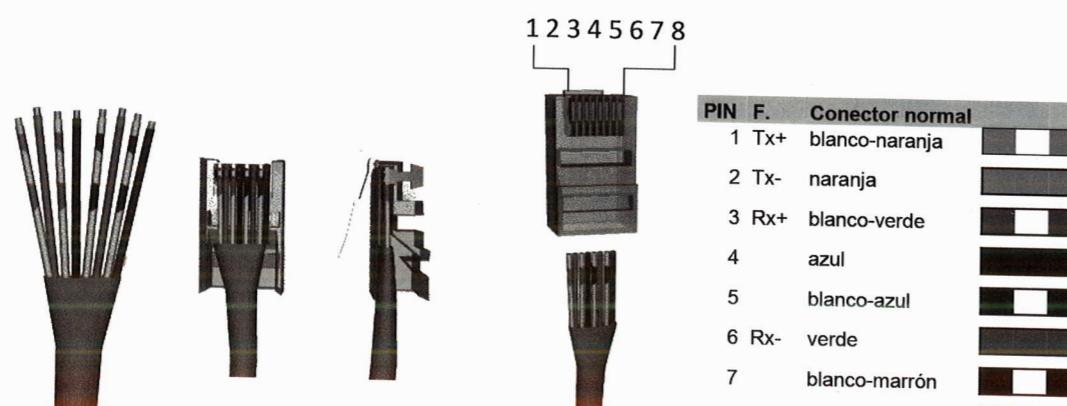


Figura 2.37. Conector RJ-45 y conexionado utilizado en redes LAN BASE-T.

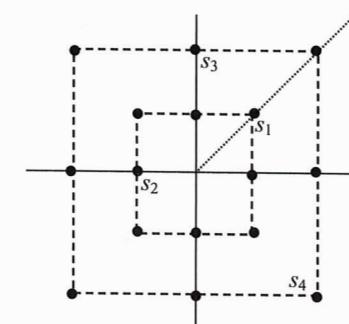
Una cuestión fundamental en la transmisión de datos hace referencia a los modos de transmisión; es decir, el conjunto de procesos necesarios a realizar para una adecuada transmisión de las señales de datos sobre el canal. Dadas las dos naturalezas posibles de una señal, analógica o digital, y las dos posibles formas de transmisión, analógica o digital también, se han desarrollado las cuatro posibles combinaciones de ellas. Se han estudiado así la conversión analógico a digital de señales, diversas técnicas de codificación de línea y los esquemas de modulación digital y analógica.

Para concluir el desarrollo de este capítulo correspondiente a las funciones propias de la capa física de una red de computadores, se han introducido las interfaces de datos, necesarias para la conexión de un computador o DTE con un canal de comunicación o red. Las interfaces aquí presentadas han sido RS-232, USB y RJ-45.

#### EJERCICIOS

1. Considere una señal periódica limitada en banda cuya expresión es:
 
$$x(t) = 6 + 5\cos 2\pi 50t + 10\sin 2\pi 50t - 10\cos 2\pi 100t - 20\sin 2\pi 150t$$
  - a) Represente el espectro (en módulo) de la señal.
  - b) ¿Cuál es el ancho de banda de la señal?
2. Suponga una señal de voz con componentes espectrales en el rango de 100 a 4.000 Hz.
  - a) ¿Cuál es la frecuencia de muestreo mínima que debe utilizarse para representar la señal?
  - b) ¿Es necesario filtrar la señal? En caso afirmativo, indique el motivo y la frecuencia a la que debe realizarse.
3. En un sistema de transmisión con un ancho de banda de 8 MHz y una capacidad de 48 Mbps, ¿cuántos niveles de tensión se utilizan?
4. Los canales de TV tienen un ancho de banda de 6 MHz.
  - a) Si se supone un canal libre de ruido, ¿cuál es la velocidad de transmisión que puede conseguirse si se usa una codificación con 32 estados de señalización?
  - b) Si el canal presenta una SNR de 20 dB, ¿cuál es ahora la velocidad máxima de transmisión?
5. Se transmiten señales de voz digitalizada a 64 kbps a través de un canal de telefonía de 4 kHz de ancho de banda. ¿Cuál es la SNR mínima que permite esto?
6. Suponga que una señal de vídeo transmite imágenes digitalizadas de TV de  $1.280 \times 720$  píxeles a razón de 50 imágenes por segundo. Cada píxel puede tomar uno de entre 32 posibles valores de intensidad (esta señal es similar a la usada por el estándar HD ready).
  - a) Determine la velocidad de transmisión de la fuente.
  - b) Si la señal se transmite por un canal de 6 MHz de ancho de banda, ¿cuál debe ser la SNR mínima del canal para que se pueda realizar la transmisión?
7. ¿Cuánto se incrementan las pérdidas de un enlace de microondas al duplicar la distancia? ¿Y en un cable coaxial?
8. Considere una línea telefónica en la que se ha medido una pérdida total de 20 dB. La potencia de la señal a la entrada es de 1,0 W y el nivel del ruido, medido a la salida, es de 5  $\mu$ W. Obtenga la relación señal ruido de la línea. Exprese el resultado en decibelios.

9. En un par trenzado se ha medido una atenuación de 0,8 dB por kilómetro a una frecuencia de 1 kHz. ¿Cuál es la longitud máxima que puede tener el cable si la máxima atenuación permitida es de 20 dB?
10. Una señal de voz, con un ancho de banda efectivo de 4 kHz, se digitaliza mediante una codificación PCM de 256 niveles. ¿Cuál es la capacidad necesaria para su transmisión sobre un enlace digital?
11. Dada la secuencia de bits lógicos 11001110:
  - a) Indique la codificación correspondiente si se hace uso de los códigos de línea NRZ-M, bipolar AMI, Manchester y Manchester diferencial.
  - b) Trate de representar aproximadamente el espectro en cada caso de a) si se considera un periodo de bit de 1 ms.
  - c) ¿Cuántos bits en total se transmitirían si se hiciese uso de un código 4B/5B para la representación de la secuencia?
12. Un diagrama de una constelación incluye puntos en las siguientes coordenadas: (1,1), (-1,1), (1,-1) y (-1,-1):
  - a) ¿A qué tipo de modulación corresponde?
  - b) ¿Qué velocidad de transmisión se puede lograr si se usa un módem a 2.400 baudios?
13. Un diagrama de constelación tiene puntos en (0,1) y (0,2). ¿Qué tipo de modulación se utiliza?
14. Calcule la velocidad de transmisión de un sistema que emite a 1.000 baudios en los siguientes casos:
  - a) Se usa codificación PSK.
  - b) Se usa codificación QAM con 64 estados.
  - c) Se usa codificación QPSK.
  - d) Se usa una codificación con el número de estados mayor posible para una SNR de 34 dB.
15. En relación a la constelación adjunta:
  - a) Indique el tipo, tamaño e implicaciones sobre la velocidad en las transmisiones.
  - b) Especifique la expresión matemática de los puntos  $s_1(t)$  a  $s_4(t)$  señalados.
  - c) ¿Cuál será el valor mínimo de la SNR<sub>dB</sub> del canal de comunicaciones que permite una constelación como esta?
  - d) Sin alterar su dimensión, ¿cómo podríamos modificar los puntos de la constelación para mejorar el comportamiento frente a potenciales ruidos y errores en la transmisión?
16. En la técnica de modulación en fase diferencial (DPSK) la información binaria determina un cambio en la fase de la señal portadora  $\cos(2\pi f_c t)$  a partir del valor que presentase en el instante anterior. Por ejemplo, considerando los desfases  $\varphi_0 = \pi/2$  y  $\varphi_1 = 3\pi/2$ , si el bit de información es 0, se aumentará la fase de la señal en  $\pi/2$ ; mientras que si el bit es 1, el cambio en la fase sería  $3\pi/2$ .
  - a) Represente gráficamente la forma de onda de la señal modulada correspondiente a la modulación de 01100011. Compárela con la forma de onda que se produciría mediante una modulación en fase convencional.
  - b) ¿Qué ventajas presenta esta técnica de modulación frente a PSK?



17. Una fuente de datos produce caracteres ASCII de 8 bits. Obtenga una expresión para la velocidad de transmisión de datos máxima para una línea de  $B$  bps en las siguientes configuraciones:
  - a) Transmisión asíncrona con 1,5 bits de parada.
  - b) Transmisión síncrona, con bloques de 48 bits de control y 128 bits de información. El campo de información contiene caracteres ASCII de 8 bits.
  - c) Igual que en b), pero con un campo de información de 1.024 bits.
18. Una transmisión asíncrona usa 8 bits de datos, un bit de paridad impar y 2 bits de parada. ¿Qué porcentaje de imprecisión se puede tolerar en el reloj del receptor para evitar el error en la delimitación de un bloque? Supóngase que las muestras se toman en la mitad del periodo de reloj. Igualmente, supóngase que al principio del bit de comienzo, el reloj y los bits recibidos están en fase.
19. Suponga que una transmisión de datos serie se lleva a cabo mediante dos relojes a 8 MHz (uno en el emisor y otro en el receptor) tal que cada uno de ellos tiene un desplazamiento de dos minutos en un año. ¿Cuántos bits se pueden enviar de forma consecutiva antes de que el error de sincronización cause un error? Supóngase que la detección de un bit será adecuada si se muestrea dentro del 40% de duración en torno a su punto central y que el emisor y el receptor se encuentran sincronizados al inicio de la transmisión.
20. Suponga que se envía un fichero de 10.472 bytes por una línea de 2.400 bps:
  - a) Calcule la redundancia, en términos de bits supplementarios introducidos y tiempos involucrados, si se utiliza transmisión asíncrona. Suponga un bit de comienzo y un bit de parada y que se usan caracteres de 8 bits sin paridad.
  - b) Calcule la redundancia, en términos de bits supplementarios y tiempos, si se utiliza transmisión síncrona. Suponga para ello que los datos se envían en bloques de 1.000 caracteres, con una cabecera de 48 bits de control.

## BIBLIOGRAFÍA

- Haykin, S.: *Communication Systems*. John Wiley & Sons, 2009, 5.<sup>a</sup> edición.
- Lathi, B. P.; Ding, Z.: *Modern Digital and Analog Communication Systems*. Oxford University Press, 2009. 4.<sup>a</sup> edición.
- León-García, A.; Widjaja, I.: *Redes de Comunicación. Conceptos Fundamentales y Arquitecturas Básicas*. McGraw-Hill, 2001.
- Proakis, J. G., Salehi, M.: *Digital Communications*. McGraw-Hill, 2008, 5.<sup>a</sup> edición.
- Proakis, J. G.; Manolakis, D. K.: *Digital Signal Processing*. Prentice-Hall, 2007, 4.<sup>a</sup> edición.
- Shay, W.: *Understanding Data Communications and Networks*, Thomson, 2004, 3.<sup>a</sup> edición.
- Stallings, W.: *Comunicaciones y Redes de Computadores*. Pearson Educación, 2004. 7.<sup>a</sup> edición.
- Tanenbaum, A. D.; Wetherall, D. J.: *Computer Networks*. Prentice-Hall, 2011. 5.<sup>a</sup> edición.