CAPÍTULO 3

# Transmisión de datos


3.1. **Conceptos y terminología**
Terminología utilizada en transmisión de datos
Frecuencia, espectro y ancho de banda

3.2. **Transmisión de datos analógicos y digitales**
Datos analógicos y digitales
Señales analógicas y digitales
Transmisión analógica y digital

3.3. **Dificultades en la transmisión**
Atenuación
Distorsión de retardo
Ruido

3.4. **Capacidad del canal**
Ancho de banda de Nyquist
Fórmula para la capacidad de Shannon
El cociente $E_b/N_0$

3.5. **Lecturas recomendadas**

3.6. **Términos clave, cuestiones de repaso y ejercicios**
Términos clave
Cuestiones de repaso
Ejercicios

**Apéndice 3A. Decibelios y energía de la señal**

### CUESTIONES BÁSICAS

- Todos los tipos de información considerados en este texto (voz, datos, imágenes, vídeo) se pueden representar mediante señales electromagnéticas. Para transportar la información, dependiendo del medio de transmisión y del entorno donde se realicen las comunicaciones, se podrán utilizar señales analógicas o digitales.

- Cualquier señal electromagnética, analógica o digital, está formada por una serie de frecuencias constituyentes. Un parámetro clave en la caracterización de la señal es el ancho de banda, definido como el rango de frecuencias contenidas en la señal. En términos generales, cuanto mayor es el ancho de banda de la señal, mayor es su capacidad de transportar información.

- Uno de los problemas principales en el diseño de un sistema de comunicaciones reside en paliar las dificultades, o defectos, de las líneas de transmisión. Las dificultades más importantes a superar son la atenuación, la distorsión de atenuación, la distorsión de retardo, así como los distintos tipos de ruido. El ruido puede ser, entre otros, de tipo térmico, ruido de intermodulación, diafonía o impulsivo. Al usar señales analógicas, las dificultades en la transmisión causan efectos de naturaleza aleatoria que degradan la calidad de la información recibida y pueden afectar a la inteligibilidad. Cuando se utilizan señales digitales, los defectos en la transmisión pueden introducir bits erróneos en la recepción.

- El diseñador de un sistema de comunicaciones debe tener presente cuatro factores determinantes: el ancho de banda de la señal, la velocidad de transmisión de la información digital, la cantidad de ruido, además de otros defectos en la transmisión, y, por último, la proporción o tasa de errores tolerable. El ancho de banda disponible está limitado por el medio de transmisión así como por la necesidad de evitar interferencias con señales cercanas. Debido a que el ancho de banda es un recurso escaso, es conveniente hacer máxima la velocidad de transmisión para el ancho de banda disponible. La velocidad de transmisión está limitada por el ancho de banda, por la presencia ineludible de defectos en la transmisión, como el ruido, y, finalmente, por la tasa de errores que sea tolerable.

El éxito en la transmisión de datos depende fundamentalmente de dos factores: la calidad de la señal que se transmite y las características del medio de transmisión. El objetivo de este capítulo, y del siguiente, es proporcionar al lector un conocimiento intuitivo de la naturaleza de estos dos factores.

La primera sección introduce algunos conceptos y terminología comúnmente aceptados en este campo, proporcionando así la base suficiente para abordar el resto del capítulo. La Sección 3.2 clarifica el uso de los conceptos *analógico* y *digital*. Tanto los datos analógicos como los digitales se pueden transmitir usando señales analógicas o digitales. Es más, esto es ampliable al procesamiento intermedio que se haga entre la fuente y el destino, pudiendo ser igualmente analógico o digital.

En la Sección 3.3 se estudian los defectos presentes en la transmisión que, en definitiva, pueden ser los causantes de los errores en los datos. Dichos errores son fundamentalmente: la atenuación, la distorsión en la atenuación, la distorsión de retardo y los diversos tipos de ruido existentes. Para concluir, se estudia el concepto fundamental de la capacidad del canal.



## 3.1 CONCEPTOS Y TERMINOLOGÍA

En esta sección se introducen algunos conceptos y términos que se utilizarán en este capítulo y, de hecho, a lo largo de toda la Parte II.

### TERMINOLOGÍA UTILIZADA EN TRANSMISIÓN DE DATOS

La transmisión de datos entre un emisor y un receptor siempre se realiza a través de un medio de transmisión. Los medios de transmisión se pueden clasificar como guiados y no guiados. En ambos casos, la comunicación se realiza usando ondas electromagnéticas. En los **medios guiados**, por ejemplo en pares trenzados, en cables coaxiales y en fibras ópticas, las ondas se transmiten confinándolas a lo largo de un camino físico. Por el contrario, los medios **no guiados,** también denominados **inalámbricos,** proporcionan un medio para transmitir las ondas electromagnéticas sin confinarlas, como por ejemplo en la propagación a través del aire, el mar o el vacío.

El término **enlace directo** se usa para designar un camino de transmisión entre dos dispositivos en el que la señal se propague directamente del emisor al receptor sin ningún otro dispositivo intermedio que no sea un amplificador o repetidor. Estos últimos se usan para incrementar la energía de la señal. Obsérvese que este término se puede aplicar tanto a medios guiados como no guiados.

Un medio de transmisión guiado es **punto a punto** si proporciona un enlace directo entre dos dispositivos que comparten el medio, no existiendo ningún otro dispositivo conectado. En una configuración guiada **multipunto**, el mismo medio es compartido por más de dos dispositivos.

Un medio de transmisión puede ser *simplex*, *half-duplex* o *full-duplex*. En la transmisión ***simplex***, las señales se transmiten sólo en una única dirección; siendo una estación la emisora y otra la receptora. En ***half-duplex***, ambas estaciones pueden transmitir, pero no simultáneamente. En ***full-duplex***, ambas estaciones pueden igualmente transmitir y recibir, pero ahora simultáneamente. En este último caso, el medio transporta señales en ambos sentidos al mismo tiempo. Posteriormente se explicará cómo se realiza este tipo de transmisión. Nótese que estas definiciones son de uso común en los Estados Unidos (son definiciones ANSI). En otros lugares (donde prevalecen las definiciones UIT-T) el término *simplex* corresponde a *half-duplex*, tal y como se ha definido antes, y *duplex* se usa por lo que se ha definido como *full-duplex*.

### FRECUENCIA, ESPECTRO Y ANCHO DE BANDA

En este texto, se estudiarán las señales electromagnéticas desde el punto de vista de la transmisión de datos. En el punto 3 de la Figura 1.2 se genera una señal en el transmisor que se enviará a través del medio. La señal, que es una función del tiempo, se puede expresar alternativamente en función de la frecuencia; es decir, la señal puede considerarse estar constituida por componentes a diferentes frecuencias. Para comprender y caracterizar el funcionamiento de los sistemas de transmisión de datos el **dominio de la frecuencia** suele ser más ilustrativo que el **dominio del tiempo**. A continuación, se introducen ambos dominios.

#### Conceptos en el dominio temporal

Toda señal electromagnética, considerada como función del tiempo, puede ser tanto analógica como digital. Una **señal analógica** es aquella en la que la intensidad de la señal varía suavemente en el tiempo. Es decir, no presenta saltos o discontinuidades[1].

[1] La definición matemática es: una señal $s(t)$ es continua si $\lim_{t \to a} s(t)$ para todo $a$.

Una **señal digital** es aquella en la que la intensidad se mantiene constante durante un determinado intervalo de tiempo, tras el cual la señal cambia a otro valor constante[2]. En la Figura 3.1 se muestran ejemplos de ambos tipos de señales. La señal continua puede corresponder a voz y la señal discreta puede representar valores binarios (0 y 1).

Las **señales periódicas** son el tipo de señales más sencillas que se puede considerar; se caracterizan por contener un patrón que se repite a lo largo del tiempo. En la Figura 3.2 se muestra un ejemplo de señal periódica continua (una onda sinusoidal) y un ejemplo de señal periódica discreta (una onda cuadrada). Matemáticamente, una señal $s(t)$ se dice periódica si y solamente si

$$s(t + T) = s(t) \qquad -\infty < t < +\infty$$

donde la constante $T$ es el periodo de la señal ($T$ debe ser el menor valor que verifique la ecuación). En cualquier otro caso la señal es **no periódica**.

La onda seno es una de las señales periódicas por antonomasia. Una onda seno genérica se representa mediante tres parámetros: la amplitud ($A$), la frecuencia ($f$) y la fase ($\phi$). La **amplitud de pico** es el valor máximo de la señal en el tiempo; normalmente, este valor se mide en voltios. La **frecuencia** es la razón (en ciclos por segundo o Hercios (Hz)) a la que la señal se repite. Un parámetro equivalente es el **periodo** ($T$), definido como la cantidad de tiempo transcurrido entre dos repeticiones consecutivas de la señal; por tanto, se verifica que $T = 1/f$. La **fase** es una medida de la posición relativa de la señal dentro de un periodo de la misma; este concepto se explicará

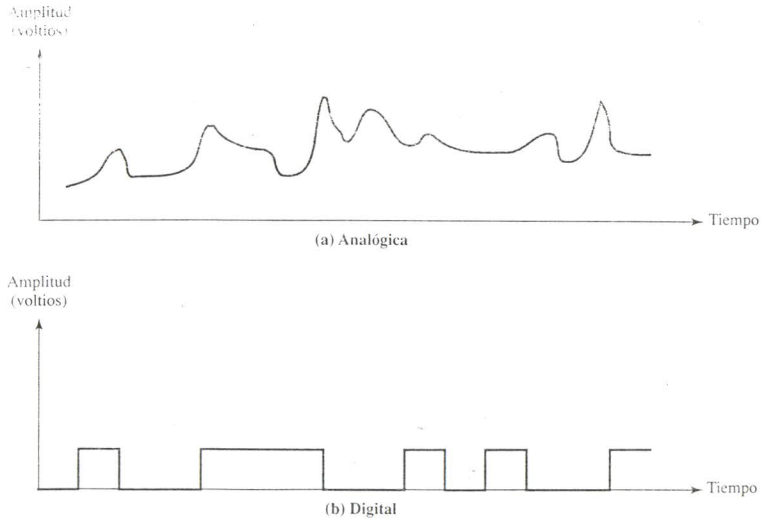



**Figura 3.1.** Señal analógica y señal digital.

[2] Ésta es una definición ideal. De hecho, la transición entre un nivel de tensión y otro no puede ser instantánea, ya que siempre habrá un pequeño periodo de transición. No obstante, una señal digital real se aproxima mucho al modelo ideal de niveles constantes de tensión con transiciones instantáneas.



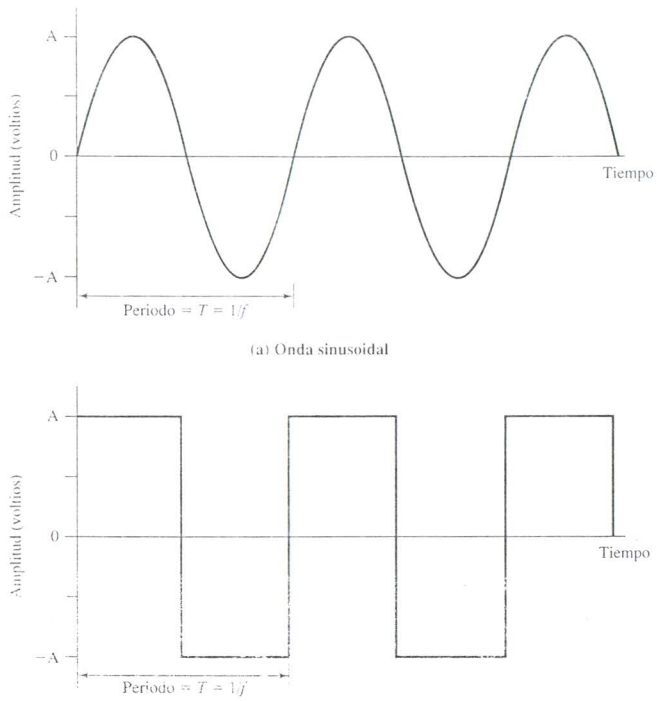



**Figura 3.2.** Ejemplos de señales periódicas.

más adelante. Más formalmente, en una señal periódica $f(t)$, la fase es la parte fraccionaria $t/T$ del periodo $T$, en la que $t$ ha avanzado respecto un origen arbitrario. El origen se considera normalmente como el último cruce por cero desde un valor negativo a uno positivo.

La expresión genérica para una onda sinusoidal es

$$s(t) = A \operatorname{sen}(2\pi f t + \phi)$$

En la Figura 3.3 se muestra el efecto de la variación de cada uno de los tres parámetros antes mencionados. En la parte (a) de la figura la frecuencia es 1 Hz, por tanto, el periodo $T = 1$ segundo. En la parte (b) se representa una onda seno con la misma fase y frecuencia pero con una amplitud de pico 0,5. En la parte (c) se tiene una señal con frecuencia $f = 2$, lo cual es equivalente a considerar un periodo $T = 0{,}5$. Por último, en la parte (d) de la misma figura se muestra el efecto de un desplazamiento en fase de $\pi/4$ radianes, que corresponde a 45 grados ($2\pi$ radianes = 360° = 1 periodo).

En la Figura 3.3, el tiempo se representa en el eje horizontal; la curva representa el valor de la señal en un punto del espacio dado en función del tiempo. Este tipo de gráficas, con un cambio

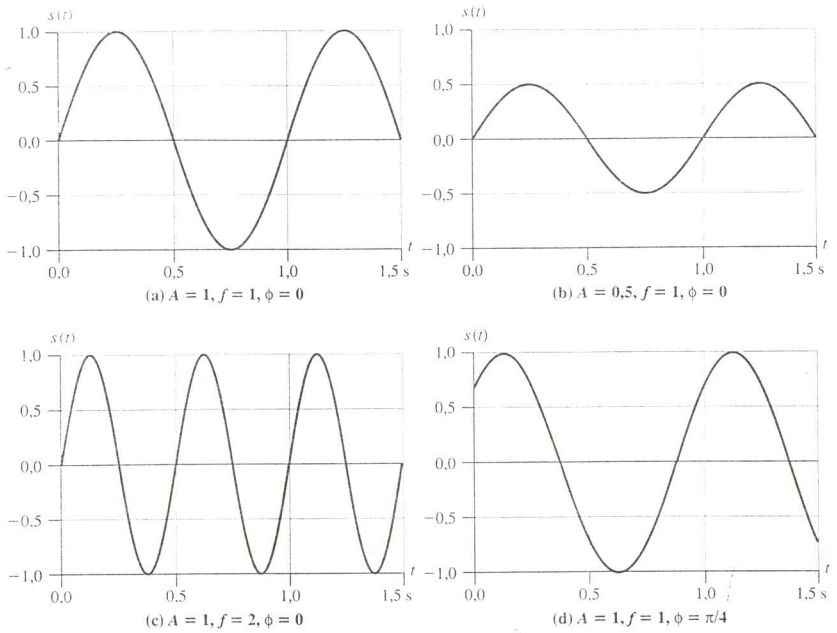



**Figura 3.3.** $s(t) = A\,\text{sen}\,(2\pi ft + \phi)$.

adicional de escala, también se usan representando la distancia en el eje horizontal. En este caso, la curva mostraría el valor de la señal para un instante de tiempo dado en función de la distancia. Por ejemplo, en una transmisión de una señal sinusoidal (léase una onda electromagnética de radiofrecuencia alejada a una cierta distancia de la antena, o un sonido alejado a cierta distancia del altavoz), en un instante determinado, la intensidad de la señal variará sinusoidalmente en función de la distancia desde la fuente.

Existe una relación sencilla entre las dos señales seno anteriores (en el tiempo y en el espacio). Dada una señal, se define la **longitud de onda,** $\lambda$, como la distancia que ocupa un ciclo o, en otras palabras, se define como la distancia entre dos puntos de igual fase en dos ciclos consecutivos. Supóngase que la señal se propaga a una velocidad $v$. En ese caso, la longitud de onda se puede relacionar con el periodo de la señal a través de la siguiente expresión: $\lambda = vT$, o de forma equivalente, $\lambda f = v$. Es de especial relevancia el caso en que $v = c$; es decir, cuando la velocidad de propagación en el medio es igual a la de la luz en el vacío, que como es sabido es aproximadamente $3 \times 10^8$ m/s.

## Conceptos en el dominio de la frecuencia

En la práctica, las señales electromagnéticas pueden estar compuestas de muchas frecuencias. Por ejemplo, la señal

$$s(t) = (4/\pi) \times (\text{sen}\,(2\pi ft) + (1/3)\,\text{sen}\,(2\pi(3f)t))$$



se muestra en la Figura 3.4c. En este ejemplo la señal está compuesta por sólo dos términos seno correspondientes a las frecuencias $f$ y $3f$; dichas componentes se muestran en las partes (a) y (b) de la mencionada figura. Hay dos comentarios interesantes que se pueden hacer a la vista de la figura:

- La frecuencia de la segunda componente es un múltiplo entero de la frecuencia de la primera. Cuando todas las componentes de una señal tienen frecuencias múltiplo de una dada, esta última se denomina **frecuencia fundamental**.
- El periodo de la señal total de componentes es el periodo correspondiente a la frecuencia fundamental. El periodo de la componente $(2\pi ft)$ es $T = 1/f$, y el periodo de $s(t)$ es también $T$, como se puede observar en la Figura 3.4c.

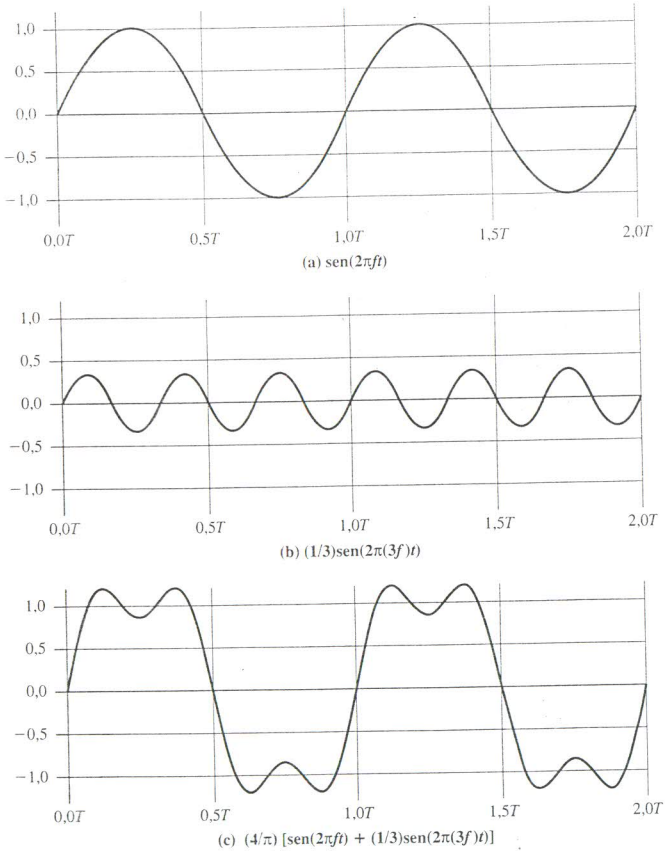
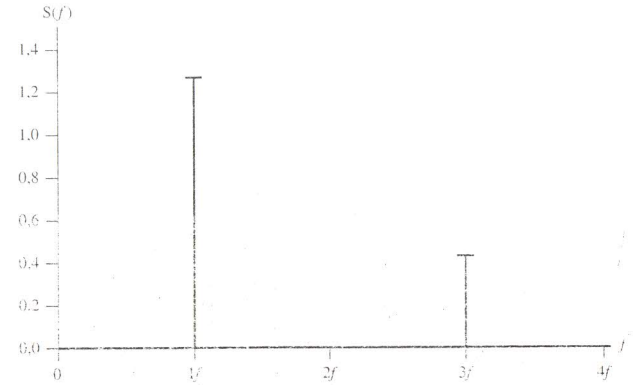


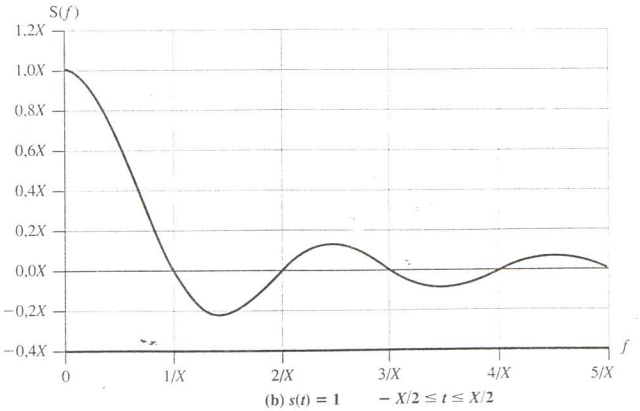

**Figura 3.4.** Suma de componentes en frecuencia ($T = 1/f$).

Se puede demostrar, usando el análisis de Fourier, que cualquier señal está constituida por componentes sinusoidales de distintas frecuencias. Sumando un número suficiente de señales sinusoidales, cada una con su correspondiente amplitud, frecuencia y fase, se puede construir cualquier señal electromagnética. En otras palabras, se puede demostrar cualquier señal electromagnética que está constituida por una colección de señales periódicas analógicas (ondas seno) con diferentes amplitudes, frecuencias y fases. La importancia de poder considerar una señal tanto en el dominio de la frecuencia, como en el dominio del tiempo se pondrá de manifiesto conforme vayamos avanzando en nuestro estudio. Para el lector interesado, en el Apéndice B se presenta una introducción al análisis de Fourier.

Por tanto, podemos decir que para cada señal hay una función en el dominio del tiempo $s(t)$ que determina la amplitud de la señal en cada instante del tiempo. Igualmente, hay una función $S(f)$, en el dominio de la frecuencia, que especifica las amplitudes de pico de las frecuencias constitutivas de la señal. En la Figura 3.5a se muestra la señal de la Figura 3.4c en el dominio de la




(a) $s(t) = (4/\pi)[\text{sen}(2\pi ft) + (1/3)\text{sen}(2\pi(3f)t)]$




(b) $s(t) = 1 \quad -X/2 \le t \le X/2$

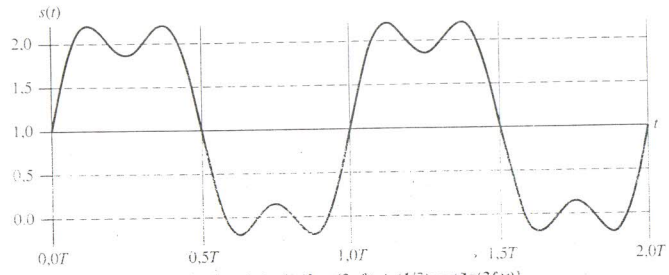
**Figura 3.5.** Representaciones en el dominio de la frecuencia.



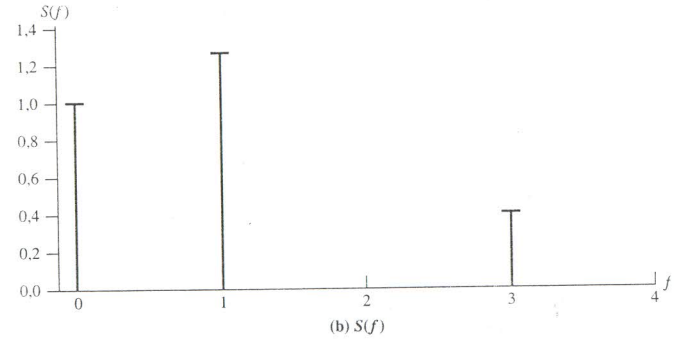
frecuencia. Obsérvese que, en este caso, $S(f)$ es discreta. En la Figura 3.5b se muestra la función en el dominio de la frecuencia correspondiente a una señal pulso cuadrado, con valor 1 entre $-X/2$ y $X/2$, y 0 en cualquier otro caso[3]. Obsérvese que, en este caso, $S(f)$ es continua y tiene valores distintos de cero indefinidamente, aunque la magnitud de las componentes en frecuencias decrece rápidamente para frecuencias $f$ grandes. Estos comportamientos son habituales en las señales reales.

Se define el **espectro** de una señal como el conjunto de frecuencias que la constituyen. Para la señal de la Figura 3.4c, el espectro se extiende desde $f$ a $3f$. Se define el **ancho de banda absoluto** de una señal como la anchura del espectro. En el caso de la Figura 3.4c, el ancho de banda es $2f$. Muchas señales, como la de la Figura 3.5b, tienen un ancho de banda infinito. No obstante, la mayor parte de la energía de la señal se concentra en una banda de frecuencias relativamente estrecha. Esta banda se denomina **ancho de banda efectivo** o, simplemente, **ancho de banda**.

Para concluir, definiremos el término **componente continua (dc)**. Si una señal contiene una componente de frecuencia cero, esa componente se denomina continua (dc, *direct current*). Por ejemplo, en la Figura 3.6 se muestra el resultado de sumarle una componente continua a la señal de la Figura 3.4c. Sin componente continua, la señal tiene una amplitud media igual a cero, vista en el




(a) $s(t) = 1 + (4/\pi)[\text{sen}(2\pi ft) + (1/3)\text{sen}(2\pi(3f)t)]$




(b) $S(f)$

**Figura 3.6.** Señal con componente continua (dc).

[3] De hecho, la función $S(f)$ en este ejemplo es simétrica respecto $f = 0$ y, por tanto, está definida para valores negativos de la frecuencia. La existencia de frecuencias negativas es un artificio matemático cuya justificación cae fuera del propósito de este texto.

dominio del tiempo. Si tiene componente continua, tendrá un término de frecuencia $f = 0$ y, por tanto, una amplitud promedio distinta de cero.

## Relación entre la velocidad de transmisión y el ancho de banda

Se ha definido el ancho de banda efectivo como la banda en la que se concentra la mayor parte de la energía de la señal. *La mayor parte* es un concepto algo impreciso. La cuestión importante aquí es que, aunque una forma de onda dada contenga frecuencias en un rango extenso, por cuestiones prácticas, cualquier sistema de transmisión (transmisor más medio más receptor) sólo podrá transferir una banda limitada de frecuencias. Esto hace que la velocidad de transmisión máxima en el medio esté limitada.

Para explicar esta cuestión, consideremos la onda cuadrada de la Figura 3.2b. Supongamos que un 0 binario se representa mediante un pulso positivo y un 1 por un pulso negativo. Por tanto, la forma de onda representa la secuencia binaria 0101... La duración de cada pulso es $1/(2f)$; luego la velocidad de transmisión es $2f$ bits por segundo (bps). ¿Cuáles son las componentes en frecuencia de esta señal? Para responder a esta cuestión, consideremos de nuevo la Figura 3.4. Al sumar las ondas seno de frecuencias $f$ y $3f$, se obtiene una forma de onda que empieza a parecerse a la onda cuadrada original. Continuemos el proceso sumando otra onda seno con frecuencia $5f$, como se muestra en la Figura 3.7a, y posteriormente sumando otra onda seno de frecuencia $7f$, también mostrada en la Figura 3.7b. Al sumar más términos múltiplos impares de la frecuencia $f$, convenientemente escalados, se irá aproximando la onda cuadrada cada vez con más precisión.

De hecho, se puede demostrar que las componentes en frecuencia de una onda cuadrada con amplitudes $A$ y $-A$ se pueden expresar como

$$s(t) = A \times \frac{4}{\pi} \times \sum_{k \text{ impar}, k=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\,(2\pi k f t)}{k}$$

Luego, esta forma de onda tiene un número infinito de componentes en frecuencia y, por tanto, un ancho de banda infinito. Sin embargo, la amplitud de pico de la componente $k$-ésima, $kf$, es solamente $1/k$. Por tanto, la mayor parte de la energía de esta forma de onda está contenida en las primeras componentes. ¿Qué ocurre si se limita el ancho de banda sólo a las tres primeras componentes? Ya hemos visto la respuesta en la Figura 3.7a. Como se puede ver, la forma de la onda resultante se aproxima razonablemente bien a la onda cuadrada original.

Las Figuras 3.4 y 3.7 pueden servir para ilustrar la relación entre la velocidad de transmisión y el ancho de banda. Supongamos que se está utilizando un sistema de transmisión digital capaz de transmitir señales con un ancho de banda de 4 MHz. Intentemos transmitir una secuencia de unos y ceros alternantes, como la onda cuadrada de la Figura 3.7c. ¿Qué velocidad de transmisión se puede conseguir? Para responder a esta pregunta consideremos los siguientes tres casos:

**Caso I.** Aproximemos nuestra onda cuadrada con una forma de onda como la de la Figura 3.7a. Aunque es una forma de onda «distorsionada» es suficiente para que el receptor sea capaz de discriminar entre un 0 o un 1 binarios. Ahora bien, si tomamos una $f = 10^6$ ciclos/segundo = 1 MHz, entonces el ancho de banda de la señal

$$s(t) = \frac{4}{\pi} \times \left[ \text{sen}\,((2\pi \times 10^6)t) + \frac{1}{3}\text{sen}\,((2\pi \times 3 \times 10^6)t) + \frac{1}{5}\text{sen}\,((2\pi \times 5 \times 10^6)t) \right]$$



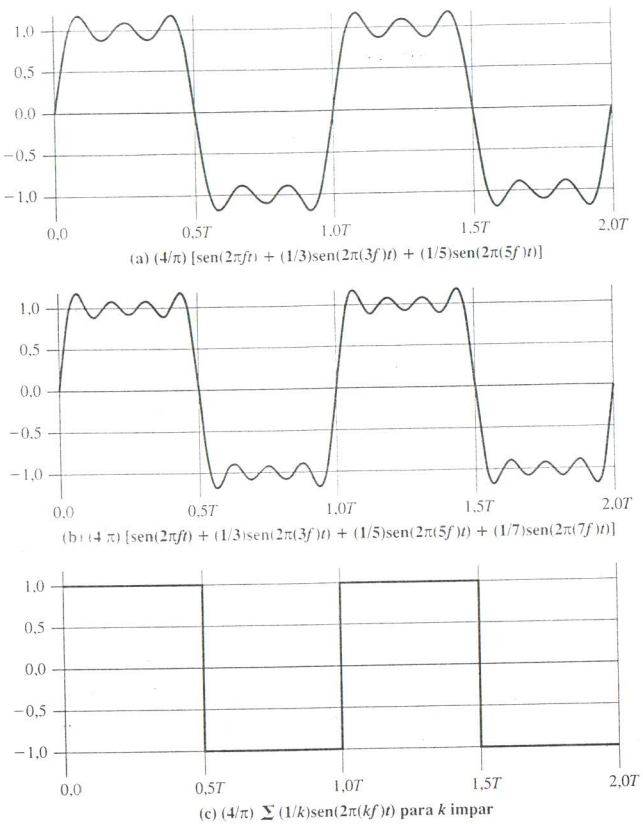



**Figura 3.7.** Componentes en frecuencia de una onda cuadrada ($T = 1/f$).

será igual a $(5 \times 10^6) - 10^6 = 4$ MHz. Obsérvese que para $f = 1$ MHz, el periodo de la frecuencia fundamental es $T = 1/10^6 = 10^{-6} = 1$ µs. Luego, si se considera esta forma de onda como una cadena de 0 y 1, un bit aparecerá cada 0,5 µs, lo que corresponde a una velocidad de $2 \times 10^6 = 2$ Mbps. Así, para un ancho de banda de 4 MHz, se consigue una velocidad de transmisión de 2 Mbps.

**Caso II.** Ahora supongamos que se dispone de un ancho de banda de 8 MHz. Considérese de nuevo la Figura 3.7a, pero ahora con $f = 2$ MHz. Usando un razonamiento idéntico al anterior, el ancho de banda de la señal es igual a $(5 \times 2 \times 10^6) - (2 \times 10^6) = 8$ MHz. Pero en este caso $T = 1/f = 0{,}5$ µs. Por tanto, aparece un bit cada 0,25 µs siendo la velocidad de transmisión, en este de caso, igual a 4 Mbps. Como conclusión, si se duplica el ancho de banda, dejando el resto de parámetros igual, se duplica la velocidad de transmisión potencial.

**Caso III.** Ahora supongamos que la forma de onda de la Figura 3.4c se considera adecuada para aproximar una onda cuadrada. Es decir, la diferencia entre un pulso positivo y un pulso negativo en la Figura 3.4c es suficientemente grande para que la forma de onda pueda representar adecuadamente la secuencia de unos y ceros. Supóngase, como en el caso II, que $f = 2$ MHz y que $T = 1/f = 0{,}5$ µs, de tal manera que aparece un bit cada 0,25 µs, siendo la velocidad de transmisión igual a 4 Mbps. Considerando la Figura 3.4c, el ancho de banda de la señal es igual a $(3 \times 2 \times 10^6) - (2 \times 10^6) = 4$ MHz. Por tanto, un ancho de banda dado puede proporcionar varias velocidades de transmisión, dependiendo de la habilidad que exhiba el receptor para distinguir diferencias entre los 1 y 0 en presencia de ruido y de otros defectos.

Resumiendo,

- **Caso I:** ancho de banda = 4 MHz, velocidad de transmisión = 2 Mbps.
- **Caso II:** ancho de banda = 8 MHz, velocidad de transmisión = 4 Mbps.
- **Caso III:** ancho de banda = 4 MHz, velocidad de transmisión = 4 Mbps.

De las observaciones precedentes, se pueden extraer las siguientes conclusiones. En general, cualquier onda digital tendrá un ancho de banda infinito. Si se intenta transmitir esta forma de onda como una señal por cualquier medio, el sistema de transmisión limitará el ancho de banda que se puede transmitir. Es más, para cualquier medio, cuanto mayor sea el ancho de banda transmitido, mayor será el coste. Luego, por un lado, razones prácticas y económicas sugieren que la información digital se aproxime por una señal de ancho de banda limitado. Por otro lado, limitar el ancho de banda introduce distorsiones, las cuales hacen que la interpretación de la señal recibida sea más difícil. Cuanto mayor es la limitación en el ancho de banda, mayor es la distorsión y mayor es la posibilidad de que se cometan errores en el receptor.

Una ilustración adicional puede servir para reforzar estos conceptos. En la Figura 3.8 se muestra una cadena de bits con una velocidad de transmisión de 2.000 bits por segundo. Con un ancho de banda igual a 2.500 Hz, o incluso 1.700 Hz, la representación es bastante buena. Es más, estos resultados son generalizables de la siguiente manera. Si la velocidad de transmisión de la señal digital es $W$ bps, entonces se puede obtener una representación muy buena con un ancho de banda de $2W$ Hz. No obstante, a menos que el ruido sea muy elevado, la secuencia de bits se puede recuperar con un ancho de banda menor (*véase* el apartado dedicado a la capacidad del canal en la Sección 3.4).

Por tanto, hay una relación directa entre la velocidad de transmisión y el ancho de banda: cuanto mayor es la velocidad de transmisión de la señal, mayor es el ancho de banda efectivo necesitado. Visto de otra manera, cuanto mayor es el ancho de banda de un sistema de transmisión, mayor es la velocidad con la que se pueden transmitir los datos en el sistema.

Otra observación interesante es la siguiente: si consideramos que el ancho de banda de una señal está centrado sobre una frecuencia dada, denominada **frecuencia central**, cuanto mayor sea dicha frecuencia central, mayor es el ancho de banda potencial y, por tanto, mayor puede ser la velocidad de transmisión. Por ejemplo, para una señal centrada en torno a 2 MHz, su ancho de banda máximo es de 4 MHz.

Posteriormente, tras el estudio de las dificultades presentes en la transmisión, en la Sección 3.4 se volverá a la discusión de la relación entre el ancho de banda y la velocidad de transmisión.



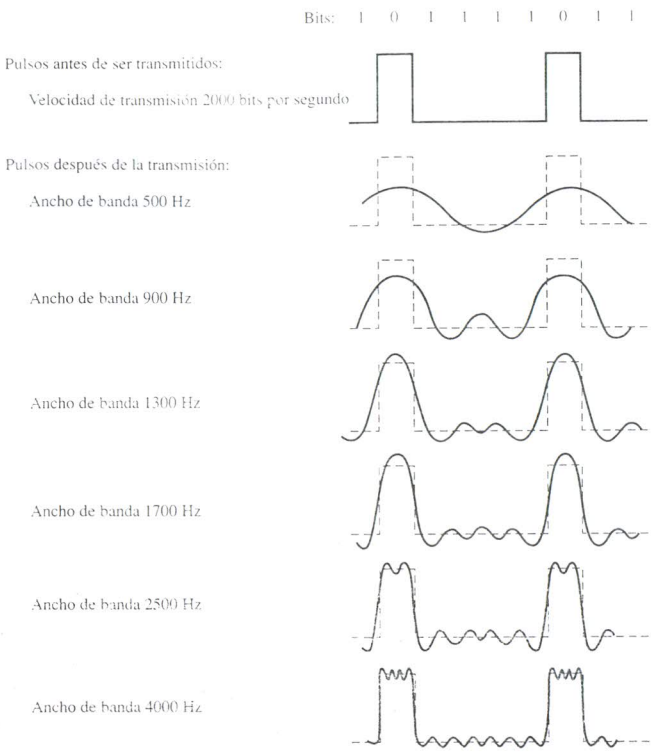



**Figura 3.8.** Efecto del ancho de banda en las señales digitales.

## 3.2. TRANSMISIÓN DE DATOS ANALÓGICOS Y DIGITALES

Los términos *analógico* y *digital* corresponden respectivamente, por lo general, a *continuo* y *discreto*. Estos dos términos se aplican con frecuencia en el marco de las comunicaciones en al menos tres contextos diferentes: datos, señalización y transmisión.

Escuetamente, se define **dato** como cualquier entidad capaz de transportar información. Las **señales** son representaciones eléctricas o electromagnéticas de los datos. La **señalización** es el hecho de la propagación física de las señales a través de un medio adecuado. Por último, se define **transmisión** como la comunicación de datos mediante la propagación y el procesamiento de señales. En lo que sigue, se intentará clarificar estos conceptos abstractos, considerando las diferencias entre los términos *analógico* y *digital* referidos a los datos, las señales y la transmisión.

### DATOS ANALÓGICOS Y DIGITALES

Los conceptos de datos analógicos o digitales son bastante sencillos. Los datos analógicos pueden tomar valores en un intervalo continuo. Por ejemplo, el vídeo y la voz son valores de intensidad

que varían continuamente. La mayor parte de los datos que se capturan con sensores, como los de temperatura y de presión, toman valores continuos. Los datos digitales toman valores discretos, como por ejemplo las cadenas de texto o los números enteros.

El ejemplo más familiar o cercano de datos analógicos es la señal de **audio**, la cual se puede percibir directamente por los seres humanos en forma de ondas de sonido. La Figura 3.9 muestra el espectro acústico de la voz humana y de las señales de música[4]. Se pueden encontrar componentes en frecuencia entre 100 Hz y 7 kHz. Aunque la mayor parte de la energía de la voz está concentrada en las frecuencias bajas, experimentalmente se ha demostrado que las frecuencias por debajo de 600 o 700 Hz contribuyen poco a la inteligibilidad de la voz en el oído humano. Una señal de voz típica tiene un rango dinámico aproximadamente de 25 dB[5], es decir, la potencia máxima es del orden de 300 veces superior a la potencia mínima. La Figura 3.9 también muestra el espectro y rango dinámico de la señal de música.

Otro ejemplo típico de datos analógicos es el **vídeo**. En este caso, es más fácil caracterizar los datos en términos del espectador (o destino) de la pantalla de TV, que en términos de la escena original (o fuente) que se graba en la cámara de TV. Para producir una imagen en la pantalla, un haz de electrones barre la superficie de la pantalla de izquierda a derecha y de arriba a abajo. En la televisión en blanco y negro la iluminación (en una escala del negro al blanco) que se produce en un punto determinado es proporcional a la intensidad del haz cuando pasa por ese punto. Por tanto, en cualquier instante de tiempo el haz toma un valor de intensidad analógico para así producir el brillo deseado en ese punto de la pantalla. Es más, cuando el haz hace el barrido, el valor analógico cambia. Por tanto, la imagen de vídeo se puede considerar como una señal analógica variable en el tiempo.

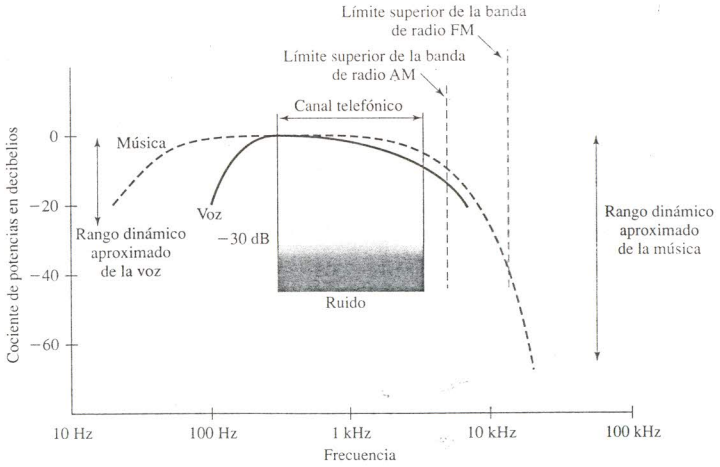



**Figura 3.9.** Espectro acústico de la voz y música [CARN99a].

[4] Nótese que en el eje *x* se usa una escala logarítmica. De igual forma, como el eje *y* está en decibelios, en realidad es escala logarítmica también. En el documento de repaso de matemáticas del sitio web de recursos para estudiantes de computación, localizado en WilliamStallings.com/StudentsSupport.html, hay un resumen sobre las escalas logarítmicas.

[5] El concepto de decibelio se explica en el Apéndice 3A.



La Figura 3.10a muestra el proceso de barrido. Al final de cada línea de barrido, el haz se vuelve rápidamente hacia la izquierda (retroceso horizontal). Cuando el haz alcanza la parte más baja, se vuelve rápidamente a la línea superior (retroceso vertical). Obsérvese que el haz se anula durante los retrocesos.

Para conseguir una resolución adecuada, el haz describe un total de 483 líneas horizontales a una velocidad de 30 barridos de pantalla por segundo. Después de diversas pruebas se ha demostrado que esa velocidad produciría una sensación de parpadeo, en lugar de una sensación de movimiento suave, como sería deseable. Para producir una imagen sin parpadeo, y sin incrementar con ello el ancho de banda requerido, se utiliza una técnica denominada **entrelazado**. Tal y como se muestra en la Figura 3.10b, las líneas pares e impares se escanean por separado de forma alternante en los campos par e impar respectivamente. El campo impar corresponde al escaneado desde A hasta B y el campo par desde C hasta D. El haz alcanza la mitad de la línea inferior de la pantalla tras barrer 214,5 líneas. En ese instante, el haz se reposiciona rápidamente a lo alto de la pantalla, volviendo a la mitad de la línea superior de la pantalla visible, para generar las 241,5 líneas adicionales entrelazadas con las originales. Así pues, la pantalla se refresca 60 veces por segundo, en lugar de las 30 anteriores, y con ello se elimina el parpadeo.

Las cadenas de caracteres, o de **texto**, son un ejemplo típico de datos digitales. Mientras que los datos en formato de texto son más adecuados para los seres humanos, en general, no se pueden

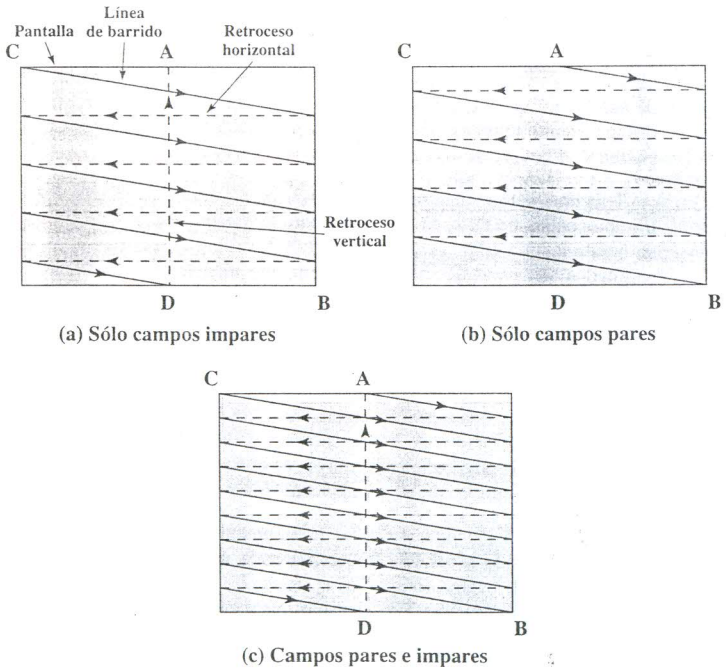



**Figura 3.10.** Barrido de vídeo entrelazado.

transmitir o almacenar fácilmente (en forma de caracteres) en los sistemas de procesamiento o comunicación. Tales sistemas están diseñados para tratar datos binarios. Para esto se han diseñado un gran número de códigos mediante los cuales los caracteres se representan como secuencias de bits. Quizá, el ejemplo más antiguo y conocido es el código Morse. En nuestros días, el código más utilizado es el Alfabeto de Referencia Internacional (IRA, *International Reference Alphabet*)[6]. Cada carácter se representa en este código por un patrón único de 7 bits; por tanto, se pueden representar 128 caracteres distintos. Esto implica un número mayor del necesario, por lo que algunos patrones, de entre los 128, se utilizan como *caracteres de control*. Los caracteres codificados con IRA se almacenan o transmiten casi siempre usando 8 bits por carácter. El bit número 8 se utiliza como bit de paridad para la detección de errores. Este bit se elige de forma tal que el número de unos binarios en el octeto sea siempre impar (paridad impar) o siempre par (paridad par). Así pues, se podrán detectar los errores de transmisión que cambien un único bit o cualquier número impar de ellos.

## SEÑALES ANALÓGICAS Y DIGITALES

En un sistema de comunicaciones, los datos se propagan de un punto a otro mediante señales electromagnéticas. Una señal analógica es una onda electromagnética que varía continuamente y que, según sea su espectro, puede propagarse a través de una serie de medios; por ejemplo, a través de un medio guiado como un par trenzado, un cable coaxial, un cable de fibra óptica, o a través de medios no guiados, como la atmósfera o el espacio. Una señal digital es una secuencia de pulsos de tensión que se puede transmitir a través de un medio conductor; por ejemplo, un nivel de tensión positiva constante puede representar un 0 binario y un nivel de tensión negativa constante puede representar un 1.

La principal ventaja de la señalización digital es que en términos generales, es más económica que la analógica, a la vez de ser menos susceptible a las interferencias de ruido. La principal desventaja es que las señales digitales sufren más con la atenuación que las señales analógicas. En la Figura 3.11 se muestra una secuencia de pulsos de tensión, generados por una fuente que utiliza dos niveles. También se muestra la tensión recibida en algún punto distante de un medio conductor. Debido a la atenuación, o reducción, de la energía de la señal que sufren las frecuencias altas, los pulsos se hacen más pequeños a la vez que se suavizan. Esta atenuación puede implicar perder con facilidad la información contenida en la señal propagada.

A continuación, se darán algunos ejemplos específicos de tipos de señales y, posteriormente, se discutirán las relaciones existentes entre datos y señales.

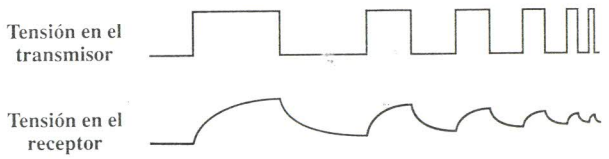



**Figura 3.11.** Atenuación de señales digitales.

[6] IRA se define en la Recomendación de la UIT-T T.50. Inicialmente se denominó *International Alphabet Number* 5 (IA5). La versión del IRA en EE.UU. se denomina *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII). En la página web del libro se puede encontrar una descripción y una tabla con el código IRA.



### Ejemplos

Volvamos a los tres ejemplos de la sección anterior. Para cada uno de ellos, se describirá la señal y su ancho de banda estimado.

El ejemplo más típico de información analógica es el audio, o información acústica, la cual se percibe directamente por los seres humanos como ondas de sonido. Un tipo de información acústica es, desde luego, la voz humana, la cual tiene componentes en frecuencias desde los 20 Hz a los 20 kHz. Para su transmisión, este tipo de información se puede convertir fácilmente a una señal electromagnética (*véase* Figura 3.12). En particular, todas las frecuencias sonoras, cuya amplitud se mide en términos de sonoridad, se convierten a frecuencias electromagnéticas, cuyas amplitudes se miden en voltios. Los teléfonos tienen un mecanismo sencillo para realizar esta conversión.

En el caso de datos acústicos (voz), los datos se pueden representar directamente mediante una señal electromagnética que ocupe el mismo espectro. Sin embargo, es necesario establecer un compromiso entre la fidelidad del sonido cuando se vaya a transmitir eléctricamente y el coste de la transmisión, el cual aumentará al aumentar el ancho de banda. Aunque, como ya se ha mencionado, el espectro de la voz está aproximadamente entre 100 Hz y 7 kHz, un ancho de banda mucho más estrecho producirá una calidad aceptable. El espectro estándar para las señales de voz está entre 300 y 3.400 Hz. Esta reducción es adecuada para la transmisión de la voz, ya que a la vez se reduce la capacidad de transmisión necesaria y se posibilita el uso de teléfonos de coste muy bajo. Así pues, el teléfono transmisor convierte la señal acústica de entrada en una señal electromagnética en el rango de 300 a 3.400 Hz. Esta señal se transmite a través del sistema telefónico al receptor, el cual la reproduce generando un sonido acústico.

Ahora consideremos la señal de vídeo. Para generar la señal de vídeo se usa una cámara de TV, que en realidad realiza funciones similares a un receptor de TV. Un componente de la cámara es una placa fotosensible, sobre la que se enfoca ópticamente la imagen. Un haz de electrones barre la placa de izquierda a derecha y de arriba abajo, de igual manera que en la Figura 3.10. Al efectuar el barrido, se genera una señal eléctrica proporcional a la intensidad de la imagen en cada punto particular. Como ya se ha mencionado, se barren 483 líneas a una razón de 30 barridos completos por segundo. Estos números son aproximados, ya que se pierde tiempo en el retroceso vertical del haz de barrido. El estándar en EE.UU. es de 525 líneas, de las cuales se pierden 42 durante el retroceso vertical. Por tanto, la frecuencia de barrido horizontal es (525 líneas) × (30 barridos/s) = 15.750 líneas por segundo, o lo que es lo mismo 63,5 $\mu$s/línea. De estos 63,5 $\mu$s/línea, aproximadamente 11 $\mu$s están reservados para el retroceso horizontal, quedando pues un total de 52,5 $\mu$s por línea de vídeo.

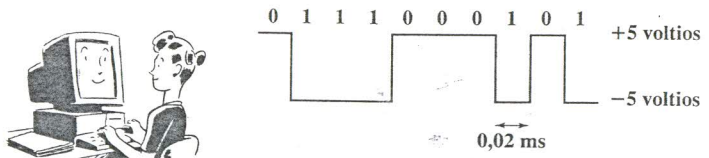
En esta figura en la que se muestra una señal analógica típica, las variaciones en amplitud y en frecuencia transportan la evolución temporal de la sonoridad y la frecuencia fundamental de la voz o de la música. Para transmitir TV, se usan señales similares, pero con frecuencias mucho más altas.

**Figura 3.12.** Conversión de voz a señal analógica.

Estamos ya en disposición de estimar el ancho de banda que se necesita para la señal de vídeo. Para hacer esto se deben estimar las frecuencias superior (máxima) e inferior (mínima) de la banda. Utilizaremos el siguiente razonamiento para determinar la frecuencia máxima: dicha frecuencia ocurriría durante el barrido horizontal si la imagen cambiara alternativamente de blanco a negro tan rápido como fuera posible. Se puede estimar el valor máximo considerando la resolución de la imagen de vídeo. En la dimensión vertical hay 483 líneas, de forma tal que la resolución vertical máxima sería 483. Experimentalmente se ha demostrado que la resolución real subjetiva es alrededor del 70% de ese número, es decir, 338 líneas. Para conseguir una imagen compensada, las resoluciones vertical y horizontal deberán ser aproximadamente las mismas. La resolución horizontal debería ser $4/3 \times 338 = 450$ líneas, ya que la relación de la anchura de la pantalla de TV respecto a la altura es de 4:3. En el peor de los casos, la línea de barrido consistiría en 450 elementos alternantes de blanco y negro. El barrido resultante sería una onda en la que cada ciclo consistiría en dos niveles de tensión correspondientes al negro (el mayor) y al blanco (el inferior). Por tanto, habría $450/2 = 225$ ciclos de la onda cada 52,5 μs, proporcionando una frecuencia máxima de 4,2 MHz. Este razonamiento aproximado es, en realidad, bastante preciso. El límite inferior será una frecuencia cero o continua, donde el valor de continua corresponde a la iluminación promedio de la imagen (es decir, el valor promedio en el que la señal supera el nivel de referencia del negro). Por tanto, el ancho de banda de la señal de vídeo es aproximadamente 4 MHz − 0 = 4 MHz.

En la discusión anterior no se han considerado ni las componentes de color ni las de audio. Obsérvese que si se incluyen dichas componentes el ancho de banda sigue siendo aproximadamente 4 MHz.

Finalmente, el tercer ejemplo mencionado anteriormente es el correspondiente a datos binarios digitales. La información binaria se genera en terminales, computadores y otros equipos para el procesamiento de datos; posteriormente, para su transmisión, se convierte a pulsos digitales de tensión, como se muestra en la Figura 3.13. Normalmente, para estos datos se usan dos niveles de tensión constante (dc), un nivel para el 1 binario y otro para el 0 (en el Capítulo 5, se verá que ésta es una de las posibles alternativas, llamada NRZ). Lo interesante aquí es el ancho de banda de dicha señal. Éste dependerá de la forma de la onda exacta y de la secuencia de unos y ceros. Para una mejor comprensión, considérese la Figura 3.8 y compárese con la Figura 3.7. Como se puede observar, al aumentar el ancho de banda de la señal, la aproximación a la cadena de pulsos digitales es mejor.




Las teclas pulsadas por una usuaria en un PC se convierten en una cadena de dígitos binarios (1 y 0). En esta figura, en la que se muestra una señal digital típica, el 1 binario se representa con −5 voltios y el 0 binario se representa con +5 voltios. El elemento de señal para cada bit tiene una duración de 0,02 ms, lo que implica una velocidad de transmisión igual a 50.000 bits por segundo (50 kbps).

**Figura 3.13.** Conversión de la entrada de un PC a señal digital.



## Datos y señales

En la discusión anterior se han considerado señales analógicas para representar datos analógicos y señales digitales para representar datos digitales. Generalmente, los datos analógicos son función del tiempo y ocupan un espectro en frecuencias limitado; estos datos se pueden representar mediante una señal electromagnética que ocupe el mismo espectro. Los datos digitales se pueden representar mediante señales digitales con un nivel de tensión diferente para cada uno de los dígitos binarios.

Como se muestra en la Figura 3.14, éstas no son las únicas posibilidades. Los datos digitales se pueden también representar mediante señales analógicas usando un *módem* (modulador/demodulador). El módem convierte la serie de pulsos binarios de tensión (bi-valuados) en una señal analógica, codificando los datos digitales haciendo variar alguno de los parámetros característicos de una señal denominada *portadora*. La señal resultante ocupa un cierto espectro de frecuencias centrado

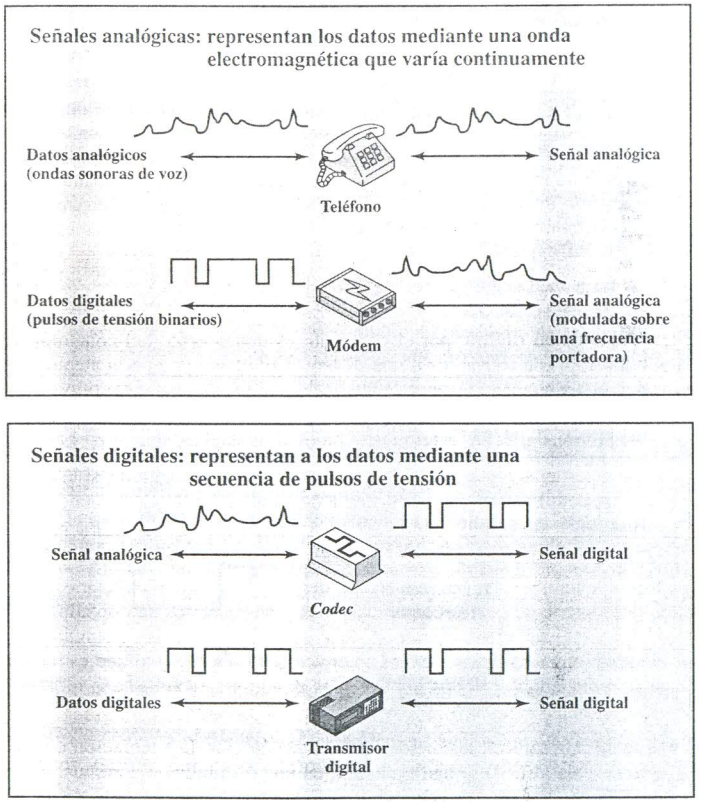



**Figura 3.14.** Señalización analógica y digital de datos analógicos y digitales.

en torno a la frecuencia de la portadora. De esta manera se podrán transmitir datos digitales a través de medios adecuados a la naturaleza de la señal portadora. Los módem más convencionales representan los datos binarios en el espectro de la voz y, por tanto, hacen posible que los datos se propaguen a través de líneas telefónicas convencionales. En el otro extremo de la línea, el módem demodula la señal para recuperar los datos originales.

Realizando una operación muy similar a la que realizan los módem, los datos analógicos se pueden representar mediante señales digitales. El dispositivo que realiza esta función para la voz se denomina *codec* (codificador-decodificador). Esencialmente, el *codec* toma la señal analógica, que representa directamente a la voz, y la aproxima mediante una cadena de bits. En el receptor, dichos bits se usan para reconstruir los datos analógicos.

Así pues, la Figura 3.14 sugiere que los datos se pueden codificar de varias maneras. Este punto se volverá a tratar en el Capítulo 5.

## TRANSMISIÓN ANALÓGICA Y DIGITAL

Tanto las señales analógicas como las digitales se pueden transmitir si se emplea el medio de transmisión adecuado. El medio de transmisión en concreto determinará cómo se tratan estas señales. En la Tabla 3.1 se resumen los métodos de transmisión de datos. La **transmisión analógica** es una forma de transmitir señales analógicas con independencia de su contenido; las señales pueden representar datos analógicos (por ejemplo, voz) o datos digitales (por ejemplo, los datos binarios modulados en un módem). En cualquier caso, la señal analógica se irá debilitando (atenuándose) con la distancia. Para conseguir distancias más largas, el sistema de transmisión analógico incluye amplificadores que inyectan energía en la señal. Desgraciadamente, el amplificador también inyecta energía en las componentes de ruido. Para conseguir distancias mayores, al utilizar amplificadores en cascada, la señal se distorsiona cada vez más. En el caso de los datos analógicos, como la voz, se puede tolerar una pequeña distorsión, ya que en ese caso los datos siguen siendo inteligibles. Sin embargo, para los datos digitales los amplificadores en cascada introducirán errores.

La **transmisión digital**, por el contrario, es dependiente del contenido de la señal. Una señal digital sólo se puede transmitir a una distancia limitada, ya que la atenuación, el ruido y otros aspectos negativos pueden afectar a la integridad de los datos transmitidos. Para conseguir distancias mayores se usan repetidores. Un repetidor recibe la señal digital, regenera el patrón de ceros y unos, y los retransmite. De esta manera se evita la atenuación.

Para señales analógicas se puede usar la misma técnica anterior si la señal transmitida transporta datos digitales. En este caso, el sistema de transmisión tendrá repetidores convenientemente espaciados en lugar de amplificadores. Dichos repetidores recuperan los datos digitales a partir de la señal analógica y generan una señal analógica limpia. De esta manera, el ruido no es acumulativo.

Un problema a resolver es la elección del mejor método de transmisión. Para resolver este problema, la industria de las telecomunicaciones y sus usuarios han optado por la transmisión digital. Tanto las comunicaciones a larga distancia, como los servicios de comunicación a distancias cortas (por ejemplo, entre edificios) se han reconvertido a digital y, lo que es más, la señalización digital se está introduciendo en todos los sistemas donde sea factible. Las razones más importantes que justifican esta elección son:

- **Tecnología digital:** las mejoras en las tecnologías de integración a gran escala (LSI) y a muy gran escala (VLSI) se han traducido en una disminución continua, tanto en coste como en el tamaño, de la circuitería digital. Los equipos analógicos no han experimentado una reducción similar.



Tabla 3.1. Transmisión analógica y digital.

(a) Datos y señales

| | Señal analógica | Señal digital |
|---|---|---|
| Datos analógicos | Hay dos alternativas (1) la señal ocupa el mismo espectro que los datos analógicos; (2) los datos analógicos se codifican ocupando una porción distinta del espectro. | Los datos analógicos se codifican utilizando un *codec* para generar una cadena de bits. |
| Datos digitales | Los datos digitales se codifican usando un módem para generar señal analógica. | Hay dos alternativas (1) la señal consiste en dos niveles de tensión que representan dos valores binarios (2) los datos digitales se codifican para producir una señal digital con las propiedades deseadas. |

(b) Tratamiento de señales

| | Transmisión analógica | Transmisión digital |
|---|---|---|
| Señal analógica | Se propaga a través de amplificadores; se trata de igual manera si la señal se usa para representar datos analógicos o digitales. | Se supone que la señal analógica representa datos digitales. La señal se propaga a través de repetidores; en cada repetidor, los datos digitales se obtienen de la señal de entrada y se usan para regenerar una nueva señal analógica de salida. |
| Señal digital | No se usa. | La señal digital representa una cadena de unos o ceros, los cuales pueden representar datos digitales o pueden ser resultado de la codificación de datos analógicos. La señal se propaga a través de repetidores; en cada repetidor, se recupera la cadena de unos y ceros a partir de la señal de entrada, a partir de los cuales se genera la nueva cadena de salida. |

- **Integridad de los datos:** al usar repetidores en lugar de amplificadores, el ruido y otros efectos negativos no son acumulativos. Por tanto, usando tecnología digital es posible transmitir datos conservando su integridad a distancias mayores utilizando incluso líneas de calidad inferior.

- **Utilización de la capacidad:** en términos económicos, el tendido de líneas de transmisión de banda ancha ha llegado a ser factible, incluso para medios como canales vía satélite y fibra óptica. Para usar eficazmente todo ese ancho de banda se necesita un alto grado de mutiplexación. La multiplexación se puede realizar más fácilmente y con menor coste usando técnicas digitales (división en el tiempo) que con técnicas analógicas (división en frecuencia). Estas cuestiones se estudiarán en el Capítulo 8.

- **Seguridad y privacidad:** las técnicas de cifrado se pueden aplicar fácilmente a los datos digitales o a los analógicos que se hayan digitalizado previamente.

- **Integración:** en el tratamiento digital de datos analógicos y digitales todas las señales tienen igual forma y pueden ser procesadas de una forma similar. Este hecho posibilita economías de gran escala mediante la integración de voz, vídeo y datos.

## 3.3 DIFICULTADES EN LA TRANSMISIÓN

En cualquier sistema de comunicaciones se debe aceptar que la señal que se recibe diferirá de la señal transmitida debido a varias adversidades y dificultades sufridas en la transmisión. En las señales analógicas, estas dificultades pueden degradar la calidad de la señal. En las señales digitales, se generarán bits erróneos: un 1 binario se transformará en un 0 y viceversa. En este apartado se van a estudiar las dificultades mencionadas comentando sus efectos sobre la capacidad de transportar información en los enlaces de transmisión; en el Capítulo 5 se presentan algunas medidas a tomar para paliar el efecto de estas dificultades.

Las dificultades más significativas son:

- La atenuación y la distorsión de atenuación.
- La distorsión de retardo.
- El ruido.

### ATENUACIÓN

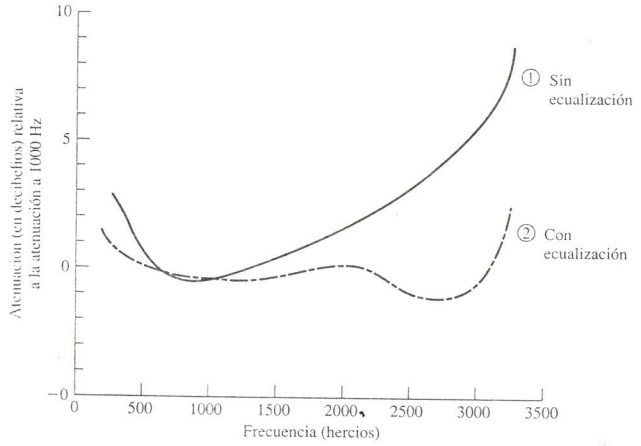
En cualquier medio de transmisión la energía de la señal decae con la distancia. En medios guiados, esta reducción de la energía es por lo general exponencial y, por tanto, se expresa generalmente como un número constante en decibelios por unidad de longitud. En medios no guiados, la atenuación es una función más compleja de la distancia y es dependiente, a su vez, de las condiciones atmosféricas. Se pueden establecer tres consideraciones respecto a la atenuación. Primera, la señal recibida debe tener suficiente energía para que la circuitería electrónica en el receptor pueda detectar la señal adecuadamente. Segunda, para ser recibida sin error, la señal debe conservar un nivel suficientemente mayor que el ruido. Tercera, la atenuación es habitualmente una función creciente de la frecuencia.

Los dos primeros problemas se resuelven controlando la energía de la señal, para ello se usan amplificadores o repetidores. En un enlace punto a punto, la energía de la señal en el transmisor debe ser lo suficientemente elevada como para que se reciba con inteligibilidad, pero no tan elevada que sature la circuitería del transmisor o del receptor, lo que generaría una señal distorsionada. A partir de cierta distancia, la atenuación es inaceptable, lo que requiere la utilización de repetidores o amplificadores que realcen la señal periódicamente. Este tipo de problemas son todavía más complejos en líneas multipunto, en las que la distancia entre el transmisor y el receptor es variable.

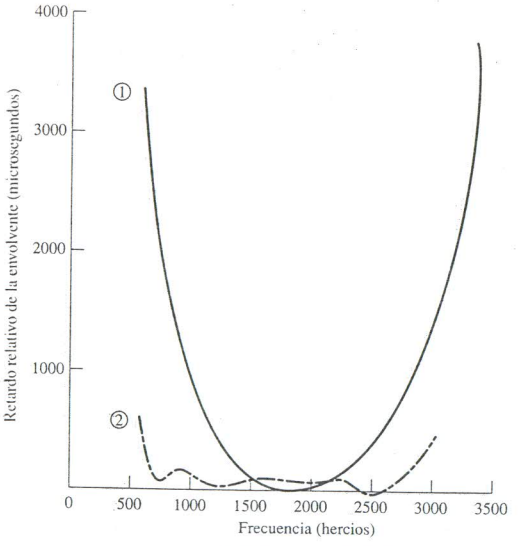
El tercer problema es especialmente relevante para el caso de las señales analógicas. Debido a que la atenuación varía en función de la frecuencia, la señal recibida está distorsionada, reduciendo así la inteligibilidad. Para soslayar este problema, existen técnicas para ecualizar la atenuación en una banda de frecuencias dada. En las líneas telefónicas esto se realiza cambiando las propiedades eléctricas de la línea, usando normalmente bobinas de carga, las cuales suavizan los efectos de la atenuación. Otra aproximación alternativa es la utilización de amplificadores que amplifiquen más las frecuencias altas que las bajas.



En la Figura 3.15a se incluye un ejemplo, en el que se representa la atenuación como función de la frecuencia para una línea convencional. En dicha figura, la atenuación se ha obtenido como una medida relativa respecto de la atenuación a 1.000 Hz. Los valores positivos en el eje *y* representan atenuaciones mayores que la sufrida a 1.000 Hz. A la entrada se aplica un tono a 1.000 Hz




(a) Atenuación




(b) Distorsión de retardo

**Figura 3.15.** Distorsión de atenuación y de retardo para un canal de voz.

con una potencia conocida, posteriormente se mide la potencia $P_{1.000}$ en la salida. Este procedimiento se repite para cualquier otra frecuencia $f$, y la atenuación relativa en decibelios es[7]

$$N_f = -100 \log_{10} \frac{P_f}{P_{1.000}}$$

En la Figura 3.15a la línea continua muestra la atenuación sin ecualización. Como se puede observar, las componentes en frecuencia en el extremo superior de la banda de voz se atenúan mucho más que las componentes en bajas frecuencias. Es evidente que esto distorsiona la señal de voz recibida. La línea discontinua muestra los efectos de la ecualización. Al aplanar la atenuación relativa, se consigue una mejora en la calidad de la señal de voz. Esto también permite, al usar un módem para transmitir datos digitales, una velocidad superior.

La distorsión de atenuación es un problema mucho menor para las señales digitales. Como ya se ha mencionado, la energía de la señal digital decae rápidamente con la frecuencia (*véase* Figura 3.5b); la mayor parte de sus componentes están concentradas en torno a la frecuencia fundamental o velocidad de transmisión (en bits/segundo o bps) de la señal.

## DISTORSIÓN DE RETARDO

La distorsión de retardo es un fenómeno debido a que la velocidad de propagación de una señal a través de un medio guiado varía con la frecuencia. Para una señal limitada en banda, la velocidad tiende a ser mayor cerca de la frecuencia central y disminuye al acercarse a los extremos de la banda. Por tanto, las distintas componentes en frecuencia de la señal llegarán al receptor en instantes diferentes de tiempo, dando lugar a desplazamientos de fase entre las diferentes frecuencias.

Este efecto se llama distorsión de retardo, ya que la señal recibida está distorsionada debido al retardo variable que sufren sus componentes. La distorsión de retardo es particularmente crítica en la transmisión de datos digitales. Supóngase que se está transmitiendo una secuencia de bits, utilizando una señal analógica o digital. Debido a la distorsión de retardo, algunas de las componentes de la señal en un bit se desplazarán hacia otras posiciones, provocando interferencia entre símbolos. Este hecho es un factor (de gran importancia) que limita la velocidad de transmisión máxima en un canal de transmisión.

Para compensar la distorsión de retardo también se pueden emplear técnicas de ecualización. Usando de nuevo como ejemplo una línea telefónica, en la Figura 3.15b se muestra el efecto de la ecualización del retardo en función de la frecuencia.

## RUIDO

Para cualquier dato transmitido, la señal recibida consistirá en la señal transmitida modificada por las distorsiones introducidas en la transmisión, además de señales no deseadas que se insertarán en algún punto entre el emisor y el receptor. A estas últimas señales no deseadas se les denomina ruido. El ruido es el factor de mayor importancia de entre los que limitan las prestaciones de un sistema de comunicación.

[7] En todo el texto, a menos que se indique lo contrario, $\log(x)$ significa $\log_{10}(x)$.



La señal de ruido se puede clasificar en cuatro categorías:

- Ruido térmico.
- Ruido de intermodulación.
- Diafonía.
- Ruido impulsivo.

El **ruido térmico** se debe a la agitación térmica de los electrones. Está presente en todos los dispositivos electrónicos y medios de transmisión; como su nombre indica, es función de la temperatura. El ruido térmico está uniformemente distribuido en el espectro de frecuencias usado en los sistemas de comunicación, es por esto por lo que a veces se denomina ruido blanco. El ruido térmico no se puede eliminar y, por tanto, impone un límite superior en las prestaciones de los sistemas de comunicación. Es especialmente dañino en las comunicaciones satelitales ya que, en estos sistemas, la señal recibida por las estaciones terrestres es muy débil. En cualquier dispositivo o conductor, la cantidad de ruido térmico presente en un ancho de banda de 1 Hz es

$$N_0 = kT \text{ (W/Hz)}$$

donde[8]

$N_0$ = densidad de potencia del ruido, en vatios por 1 Hz de ancho de banda.

$k$ = constante de Boltzmann = $1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K.

$T$ = temperatura absoluta, en grados Kelvin.

**Ejemplo 3.1.** A temperatura ambiente, es decir a $T = 17\,^{\circ}\text{C}$, o 290 K, la densidad de potencia del ruido térmico será:

$$N_0 = (1{,}38 \times 10^{-23}) \times 290 = 4 \times 10^{-21} \text{ W/Hz} = -204 \text{ dBW/Hz}$$

donde dBW corresponde a decibelios-vatio, unidad definida en el Apéndice 3A.

Se supone que el ruido es independiente de la frecuencia. Así pues, el ruido térmico presente en un ancho de banda de $B$ hercios se puede expresar como

$$N = kTB$$

o, expresado en decibelios-vatio,

$$N = 10 \log k + 10 \log T + 10 \log B$$
$$= -228{,}6 \text{ dBW} + 10 \log T + 10 \log B$$

[8] Un julio (J) en el Sistema Internacional (SI) es la unidad de energía eléctrica, mecánica o térmica. Un vatio es la unidad de potencia en el SI, y es igual a un julio por segundo. El kelvin (K) es la unidad de temperatura termodinámica en el SI. Una temperatura en grados Kelvin igual a $T$, expresada en grados Celsius será igual a $T$-273,15.

**Ejemplo 3.2.** Dado un receptor con una temperatura efectiva de ruido de 294 K y un ancho de banda de 10 MHz, el ruido térmico a la salida del receptor será

$$N = -228{,}6 \text{ dBW} + 10 \log(294) + 10 \log 10^7$$
$$= -228{,}6 + 24{,}7 + 70$$
$$= -133{,}9 \text{ dBW}$$

Cuando señales de distintas frecuencias comparten el mismo medio de transmisión puede producirse **ruido de intermodulación**. El efecto del ruido de intermodulación es la aparición de señales a frecuencias que sean suma o diferencia de las dos frecuencias originales o múltiplos de éstas. Por ejemplo, la mezcla de las señales de frecuencias $f_1$ y $f_2$ puede producir energía a frecuencia $f_1 + f_2$. Estas componentes espúreas podrían interferir con otras componentes a frecuencia $f_1 + f_2$.

El ruido de intermodulación se produce cuando hay alguna no linealidad en el transmisor, en el receptor o en el sistema de transmisión. Idealmente, estos sistemas se comportan como sistemas lineales; es decir, la salida es igual a la entrada multiplicada por una constante. Sin embargo, en cualquier sistema real, la salida es una función más compleja de la entrada. El comportamiento no lineal puede aparecer debido al funcionamiento incorrecto de los sistemas o por sobrecargas producidas al utilizar señales con mucha energía. Bajo estas circunstancias es cuando aparecen los términos suma o diferencia no deseados.

La **diafonía** la ha podido experimentar todo aquel que al usar un teléfono haya oído otra conversación; se trata, en realidad, de un acoplamiento no deseado entre las líneas que transportan las señales. Esto puede ocurrir por el acoplamiento eléctrico entre cables de pares cercanos o, en raras ocasiones, en líneas de cable coaxial que transporten varias señales. La diafonía también puede aparecer cuando las señales no deseadas se captan en las antenas de microondas; aunque éstas se caracterizan por ser altamente direccionales, la energía de las microondas se dispersa durante la transmisión. Generalmente, la diafonía es del mismo orden de magnitud (o inferior) que el ruido térmico.

Los ruidos antes descritos son de magnitud constante y razonablemente predecibles. Así pues, es posible idear un sistema de transmisión que les haga frente. Por el contrario, el **ruido impulsivo** es no continuo y está constituido por pulsos o picos irregulares de corta duración y de amplitud relativamente grande. Se generan por una gran diversidad de causas, por ejemplo, por perturbaciones electromagnéticas exteriores producidas por tormentas atmosféricas o por fallos y defectos en los sistemas de comunicación.

Generalmente, el ruido impulsivo no tiene mucha transcendencia para los datos analógicos. Por ejemplo, la transmisión de voz se puede perturbar mediante chasquidos o crujidos cortos, sin que ello implique pérdida significativa de inteligibilidad. Sin embargo, el ruido impulsivo es una de las fuentes principales de error en la comunicación digital de datos. Por ejemplo, un pico de energía con duración de 0,01 s no inutilizaría datos de voz, pero podría corromper aproximadamente 560 bits si se transmitieran a 56 kbps. La Figura 3.16 muestra un ejemplo del efecto del ruido sobre una señal digital. Aquí el ruido consiste en un nivel relativamente pequeño de ruido térmico más picos ocasionales de ruido impulsivo. Los datos digitales se recuperan muestreando la señal recibida una vez por cada intervalo de duración del bit. Como se puede observar, el ruido es a veces suficiente para convertir un 1 en un 0, o un 0 en un 1.



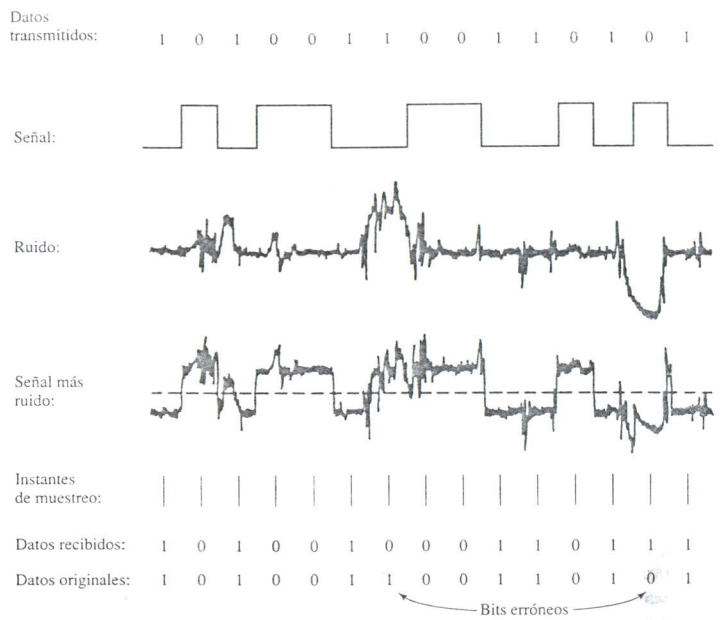



**Figura 3.16.** Efecto del ruido en una señal digital.

## 3.4. CAPACIDAD DEL CANAL

Previamente se ha estudiado que hay una gran variedad de efectos nocivos que distorsionan o corrompen la señal. Para los datos digitales, la cuestión a resolver es en qué medida estos defectos limitan la velocidad con la que se pueden transmitir. Se denomina **capacidad del canal** a la velocidad máxima a la que se pueden transmitir los datos en un canal, o ruta de comunicación de datos, bajo unas condiciones dadas.

Hay cuatro conceptos en juego relacionados entre sí, que son:

- **La velocidad de transmisión de los datos:** velocidad, expresada en bits por segundo (bps), a la que se pueden transmitir los datos.
- **El ancho de banda:** ancho de banda de la señal transmitida; éste estará limitado por el transmisor y por la naturaleza del medio de transmisión; se mide en ciclos por segundo o hercios.
- **El ruido:** nivel medio de ruido a través del camino de transmisión.
- **La tasa de errores:** tasa a la que ocurren los errores. Se considera que ha habido un error cuando se recibe un 1 habiendo transmitido un 0, o se recibe un 0 habiendo transmitido un 1.

El problema considerado aquí es el siguiente: los servicios de comunicaciones son por lo general caros y, normalmente, cuanto mayor es el ancho de banda requerido por el servicio, mayor es el coste. Es más, todos los canales de transmisión de interés práctico están limitados en banda. Las limitaciones surgen de las propiedades físicas de los medios de transmisión o por limitaciones que se imponen deliberadamente en el transmisor para prevenir interferencias con otras fuentes. Por consiguiente, es deseable hacer un uso tan eficiente como sea posible del ancho de banda limitado. En el caso de los datos digitales, esto significa que dado un ancho de banda sería deseable conseguir la mayor velocidad de datos posible no superando la tasa de errores permitida. El mayor inconveniente para conseguir este objetivo es la existencia de ruido.

## ANCHO DE BANDA DE NYQUIST

Para comenzar, considérese el caso de un canal exento de ruido. En este entorno, la limitación en la velocidad de los datos está impuesta simplemente por el ancho de banda de la señal. Nyquist formalizó esta limitación, afirmando que si la velocidad de transmisión de la señal es $2B$, entonces una señal con frecuencias no superiores a $B$ es suficiente para transportar esta velocidad de transmisión de la señal. Y viceversa: dado un ancho de banda $B$, la mayor velocidad de transmisión de la señal que se puede conseguir es $2B$. Esta limitación está provocada por la interferencia entre símbolos que se produce por la distorsión de retardo. Este resultado es de utilidad en el diseño de convertidores digital a analógico; en la página web del libro se facilita su demostración.

Obsérvese que en el último párrafo nos hemos referido a la velocidad de la señal. Si las señales a transmitir son binarias (dos niveles de tensión), la velocidad de transmisión de datos que se puede conseguir con $B$ Hz es igual a $2B$ bps. Por ejemplo, considérese un canal de voz que se utiliza mediante un módem para transmitir datos digitales. Supóngase un ancho de banda de 3100 Hz. Entonces, la capacidad $C$ del canal es $2B = 6.200$ bps. No obstante, como se verá en el Capítulo 5, se pueden usar señales con más de dos niveles; es decir, cada elemento de señal puede representar a más de dos bits. Por ejemplo, si se usa una señal con cuatro niveles de tensión, cada elemento de dicha señal podrá representar dos bits. La formulación de Nyquist para el caso de señales multinivel es

$$C = 2B \log_2 M$$

donde $M$ es el número de señales discretas o niveles de tensión. Así pues, para $M = 8$, valor típico que se usa en algunos módem, la capacidad resulta ser 18.600 bps, siendo el ancho de banda igual a 3.100 Hz.

Por tanto, para un ancho de banda dado, la velocidad de transmisión de datos se puede incrementar considerando un número mayor de señales diferentes. Sin embargo, esto supone una dificultad mayor en el receptor: en lugar de tener que distinguir una de entre dos señales, deberá distinguir una de entre $M$ posibles señales. El ruido y otras dificultades en la línea de transmisión limitarán el valor de $M$.

## FÓRMULA PARA LA CAPACIDAD DE SHANNON

La fórmula de Nyquist implica que al duplicar el ancho de banda se duplica la velocidad de transmisión, si todo lo demás se mantiene inalterado. Ahora establezcamos una relación entre la velocidad de transmisión, el ruido y la tasa de errores. La presencia de ruido puede corromper uno o más bits. Si se aumenta la velocidad de transmisión, el bit se hace más «corto», de tal manera que dado un patrón de ruido, éste afectará a un mayor número de bits. Así pues, dado un nivel de ruido, cuanto mayor es la velocidad de transmisión, mayor es la tasa de errores.



La Figura 3.16 ilustra esta relación. Si se incrementa la velocidad de transmisión de los datos, entonces habrá más bits durante el intervalo de duración del ruido y, por tanto, habrá un mayor número de errores.

Todos estos conceptos se han relacionado en la fórmula desarrollada por el matemático Claude Shannon. Como se ha comentado, cuanto mayor es la velocidad de transmisión, mayor es el daño que puede ocasionar el ruido. Dado un nivel de ruido, es de esperar que incrementando la energía de la señal se mejoraría la recepción de datos en presencia de ruido. Un parámetro fundamental en el desarrollo de este razonamiento es la relación señal-ruido (SNR, o S/N)[9], que se define como el cociente de la potencia de la señal entre la potencia del ruido presente en un punto determinado en el medio de transmisión. Generalmente, este cociente se mide en el receptor, ya que es aquí donde se realiza el procesado de la señal y la eliminación del ruido no deseado. Por cuestiones de comodidad, la SNR se expresa en decibelios:

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \frac{\text{potencia de señal}}{\text{potencia de ruido}}$$

Esta expresión muestra, en decibelios, cuánto excede la señal al nivel de ruido. Una SNR alta significará una señal de alta calidad y, por tanto, la necesidad de un número reducido de repetidores.

La relación señal-ruido es importante en la transmisión de datos digitales, ya que ésta determina la máxima velocidad de transmisión que se puede conseguir. Una conclusión de Shannon es que la capacidad máxima del canal, en bits por segundo, verifica la ecuación

$$C = B \log_2 (1 + \text{SNR}) \qquad (2.1)$$

donde $C$ es la capacidad del canal en bits por segundo y $B$ es el ancho de banda del canal en hercios. La fórmula de Shannon representa el máximo límite teórico que se puede conseguir. Sin embargo, en la práctica, se consiguen velocidades mucho menores. Una razón para esto reside en el hecho de que la fórmula anterior supone ruido blanco (ruido térmico). Además, no se han tenido en cuenta el ruido impulsivo, la distorsión de atenuación o la distorsión de retardo.

La capacidad, tal y como se ha calculado en la fórmula precedente, se denomina capacidad libre de errores. Shannon probó que si la velocidad de información real en el canal es menor que la capacidad libre de errores, entonces es teóricamente posible encontrar una codificación de la señal que consiga una transmisión exenta de errores a través del canal. Desafortunadamente, el teorema de Shannon no sugiere la manera de encontrar dicho código, pero proporciona un criterio de referencia con el que se pueden comparar las prestaciones de los esquemas de comunicación reales.

Pueden ser instructivas otras consideraciones adicionales que se deducen a partir de la ecuación anterior. Para un nivel de ruido dado, podría parecer que la velocidad de transmisión se puede aumentar incrementando tanto la energía de la señal como el ancho de banda. Sin embargo, al aumentar la energía de la señal, también lo hacen las no linealidades del sistema, dando lugar a un aumento del ruido de intermodulación. Obsérvese igualmente que, como el ruido se ha supuesto blanco, cuanto mayor sea el ancho de banda, más ruido se introducirá en el sistema. Por tanto, cuando $B$ aumenta, la SNR disminuye.

---

[9] En algunas referencias se usa SNR, otras usan S/N. También, la cantidad adimensional es denominada SNR o S/N, mientras que la cantidad expresada en decibelios se denomina $\text{SNR}_{\text{dB}}$ o $(\text{S/N})_{\text{dB}}$. Otros usan SNR o S/N para indicar la cantidad en decibelios. En este texto usamos SNR y $\text{SNR}_{\text{dB}}$.

**Ejemplo 3.3.** En el siguiente ejemplo se relacionan las formulaciones de Shannon y Nyquist. Supóngase que el espectro de un canal está situado entre 3 MHz y 4 MHz y que la $SNR_{dB} = 24$ dB. En este caso,

$$B = 4 \text{ MHz} - 3 \text{ MHz} = 1 \text{ MHz}$$
$$\text{SNR}_{dB} = 24 \text{ dB} = 10 \log_{10}(\text{SNR})$$
$$\text{SNR} = 251$$

Usando la fórmula de Shannon se tiene que

$$C = 10^6 \times \log_2(1 + 251) \approx 10^6 \times 8 = 8 \text{ Mbps}$$

Éste es, como ya se ha mencionado, un límite teórico difícil de alcanzar. No obstante, supóngase que este límite se puede alcanzar. Según la fórmula de Nyquist, ¿cuántos niveles de señalización se necesitarán? Se tiene que

$$C = 2B \log_2 M$$
$$8 \times 10^6 = 2 \times (10^6) \times \log_2 M$$
$$4 = \log_2 M$$
$$M = 16$$

## EL COCIENTE $E_b/N_0$

Finalmente, en este apartado se presenta un parámetro relacionado con la SNR que es más adecuado para determinar las tasas de error y la velocidad de transmisión. Además se usa habitualmente para medir la calidad de las prestaciones de los sistemas de comunicación digital. Este parámetro es el cociente de la energía de la señal por bit entre la densidad de potencia del ruido por hercio, $E_b/N_0$. Sea una señal, digital o analógica, que contenga datos digitales binarios transmitidos a una determinada velocidad $R$. Teniendo en cuenta que 1 W = 1 J/s, la energía por bit de la señal será $E_b = ST_b$, donde $S$ es la potencia de la señal y $T_b$ es el tiempo necesario para transmitir un bit. La velocidad de transmisión es $R = 1/T_b$. Por tanto,

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S/R}{N_0} = \frac{S}{kTR}$$

o, expresado en decibelios,

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{dB} = S_{dBW} - 10 \log R - 10 \log k - 10 \log T$$
$$= S_{dBW} - 10 \log R + 228{,}6 \text{ dBW} - 10 \log T$$

El cociente $E_b/N_0$ es importante ya que para los datos digitales la tasa de error por bit es una función (decreciente) de este cociente. Dado un valor de $E_b/N_0$ necesario para conseguir una tasa de errores deseada, los parámetros se pueden seleccionar de acuerdo con la fórmula anterior. Nótese que cuando se aumenta la velocidad de transmisión $R$, la potencia de la señal transmitida, relativa al ruido, debe aumentarse para mantener el cociente $E_b/N_0$ requerido.



Intentemos inferir intuitivamente este resultado a partir de la Figura 3.16. La señal aquí considerada es digital, pero el mismo razonamiento podría extenderse para el caso de una señal analógica. En algunos casos, el ruido es suficiente como para alterar el valor de un bit. Ahora, si la velocidad de transmisión se duplicase, los bits tendrían asociada una duración menor, con lo que el mismo ruido podría destruir dos bits. Por tanto, para una señal y ruido de energías constantes, un incremento en la velocidad de transmisión aumentaría la tasa de error.

La ventaja del cociente $E_b/N_0$ sobre la SNR es que esta última depende del ancho de banda.

**Ejemplo 3.4.** En la modulación digital binaria PSK (*Phase-Shift Keying*) (definida en el Capítulo 5), para obtener una tasa de error por bit igual a $10^{-4}$ (un bit erróneo cada 10.000) se necesita un cociente $E_b/N_0 = 8{,}4$ dB. Si la temperatura efectiva es 290 °K (temperatura ambiente) y la velocidad de transmisión es 2.400 bps, ¿qué nivel de señal recibida se necesita?

En este caso se tiene que

$$8{,}4 = S(\text{dBW}) - 10 \log 2.400 + 228{,}6 \text{ dBW} - 10 \log 290$$
$$= S(\text{dBW}) - (10)(3{,}38) + 228{,}6 - (10)(2{,}46)$$
$$S = -161{,}8 \text{ dBW}$$

Se puede establecer la relación entre $E_b/N_0$ y la SNR de la siguiente manera. Se tiene que

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N_0 R}$$

El parámetro $N_0$ es la densidad de potencia del ruido en vatios/hercio. Por tanto, el ruido en una señal con ancho de banda $B_T$ es $N = N_0 B_T$. Sustituyendo, se tiene que

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \frac{B_T}{R} \tag{2.2}$$

Otra formulación de interés es la relación entre la eficiencia espectral y $E_b/N_0$. La fórmula de Shannon [Ecuación (2.1)] se puede rescribir como

$$\frac{S}{N} = 2^{C/B} - 1$$

Usando la Ecuación (2.2), igualando $B_T$ con $B$ y $R$ con $C$, tenemos que

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{B}{C}(2^{C/B} - 1)$$

Ésta es una fórmula útil que relaciona la eficiencia espectral alcanzable $C/B$ con $E_b/N_0$.

**Ejemplo 3.5.** Supóngase que queremos encontrar el máximo $E_b/N_0$ necesario para conseguir una eficiencia espectral de 6 bps/Hz. Entonces $E_b/N_0 = (1/6)(2^6 - 1) = 10{,}5 = 10{,}21$ dB.

## 3.5 LECTURAS RECOMENDADAS

Hay muchos libros que cubren los aspectos fundamentales de la transmisión analógica y digital. [COUC97] es bastante completo. Una referencia de calidad es [FREE99], en la que se incluyen algunos de los ejemplos proporcionados a lo largo de este capítulo, y [HAYK01].

COUC01 Couch, L. *Digital and Analog Communicastions Systems*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.

FREE99 Freeman, R. *Fundamentals of Telecommunications*. New York: Wiley, 1999.

HAYK01 Haykin, S. *Communication Systems*. New York: Wiley, 2001.

## 3.6 TÉRMINOS CLAVE, CUESTIONES DE REPASO Y EJERCICIOS

### TÉRMINOS CLAVE

amplitud de pico
ancho de banda
ancho de banda absoluto
ancho de banda efectivo
aperiódico
atenuación
capacidad del canal
componente dc
dato
dato analógico
datos digitales
decibelio (dB)
diafonía
distorsión de atenuación
distorsión de retardo
dominio de la frecuencia
dominio del tiempo
enlace directo
enlace multipunto
enlace punto-a-punto
espectro
fase
frecuencia
frecuencia central
frecuencia fundamental
*full-duplex*
*half-duplex*
inalámbrico
longitud de onda
medio guiado
medio no guiado
periodo
ruido
ruido de intermodulación
ruido impulsivo
ruido térmico
señal
señal analógica
señal digital
señal periódica
señalización
*simplex*
transmisión
transmisión analógica
transmisión digital

### CUESTIONES DE REPASO

**3.1.** ¿En qué se diferencia un medio guiado de un medio no guiado?

**3.2.** ¿Cuáles son las diferencias entre una señal electromagnética analógica y una digital?

**3.3.** ¿Cuáles son las tres características más importantes de una señal periódica?

**3.4.** ¿Cuántos radianes hay en 360°?



**3.5.** ¿Cuál es la relación entre la longitud de onda y la frecuencia en una onda seno?

**3.6.** ¿Cuál es la relación entre el espectro de una señal y su ancho de banda?

**3.7.** ¿Qué es la atenuación?

**3.8.** Defina la capacidad de un canal.

**3.9.** ¿Qué factores clave afectan a la capacidad de un canal?

### EJERCICIOS

**3.1.** a) En una configuración multipunto, sólo un dispositivo puede trasmitir cada vez, ¿por qué?

b) Hay dos posibles aproximaciones que refuerzan la idea de que, en un momento dado, sólo un dispositivo puede transmitir. En un sistema centralizado, una estación es la responsable del control y podrá transmitir o decidir que lo haga cualquier otra. En el método descentralizado, las estaciones cooperan entre sí, estableciéndose una serie de turnos. ¿Qué ventajas y desventajas presentan ambas aproximaciones?

**3.2.** Una señal tiene una frecuencia fundamental de 1000 Hz. ¿Cuál es su periodo?

**3.3.** Simplifique las siguientes expresiones:

a) $\operatorname{sen}(2\pi ft - \pi) + \operatorname{sen}(2\pi ft + \pi)$

b) $\operatorname{sen} 2\pi ft + \operatorname{sen}(2\pi ft - \pi)$

**3.4.** El sonido se puede modelar mediante funciones sinusoidales. Compare la frecuencia relativa y la longitud de onda de las notas musicales. Piense que la velocidad del sonido es igual a 330 m/s y que las frecuencias de una escala musical son:

| Nota | DO | RE | MI | FA | SOL | LA | SI | DO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Frecuencia | 264 | 297 | 330 | 352 | 396 | 440 | 495 | 528 |

**3.5.** Si la curva trazada con una línea continua de la Figura 3.17 representa al $\operatorname{sen}(2\pi t)$, ¿qué función corresponde a la línea discontinua? En otras palabras, la línea discontinua se puede expresar como $A \operatorname{sen}(2\pi ft + \phi)$; ¿qué son $A$, $f$ y $\phi$?

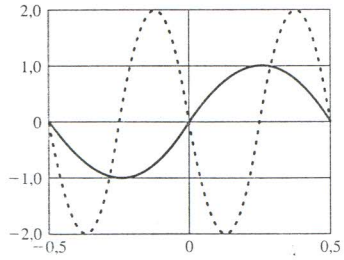



**Figura 3.17.** Figura del Ejercicio 3.5.

**3.6.** Exprese la señal $(1 + 0{,}1 \cos 5t) \cos 100t$ como combinación lineal de funciones sinusoidales; encuentre la amplitud, frecuencia y fase de cada una de las componentes. (*Sugerencia:* use la expresión del $\cos a \cos b$).

**3.7.** Encuentre el periodo de la función $f(t) = (10 \cos t)^2$.

**3.8.** Sean dos funciones periódicas $f_1(t)$ y $f_2(t)$, con periodos $T_1$ y $T_2$ respectivamente. ¿Es periódica la función $f(t) = f_1(t) + f_2(t)$? Si es así, demuéstrelo. Si no, ¿bajo qué condiciones $f(t)$ será periódica?

**3.9.** La Figura 3.4 muestra el efecto resultante al eliminar las componentes de alta frecuencia de un pulso cuadrado, considerando sólo las componentes de baja frecuencia. ¿Cómo sería la señal resultante en el caso contrario (es decir, quedándose con todos los armónicos de frecuencia alta y eliminando los de bajas frecuencias)?

**3.10.** La Figura 3.5b muestra la función correspondiente a un pulso rectangular en el dominio de la frecuencia. Este pulso puede corresponder a un 1 digital en un sistema de comunicación. Obsérvese que se necesita un número infinito de frecuencias (con amplitud decreciente cuanto mayor es la frecuencia). ¿Qué implicaciones tiene este hecho en un sistema de transmisión real?

**3.11.** El IRA es un código de 7 bits que permite la definición de 128 caracteres. En los años setenta, muchos medios de comunicación recibían las noticias a través de un servicio que usaba 6 bits denominado TTS. Este código transmitía caracteres en mayúsculas y minúsculas, así como caracteres especiales y órdenes de control. Generalmente, se utilizan 100 caracteres. ¿Cómo cree que se puede conseguir esto?

**3.12.** ¿Cuál es el incremento posible en la resolución horizontal para una señal de vídeo de ancho de banda 5 MHz? ¿Y para la resolución vertical? Responda ambas cuestiones por separado; es decir, utilice el incremento de ancho de banda para aumentar la resolución horizontal o la vertical, pero no ambas.

**3.13.** **a)** Suponga que se transmite una imagen digitalizada de TV de 480 × 500 puntos, en la que cada punto puede tomar uno de entre 32 posibles valores de intensidad. Supóngase que se envían 30 imágenes por segundo (esta fuente digital es aproximadamente igual que los estándares adoptados para la difusión de TV). Determine la velocidad de transmisión $R$ de la fuente en bps.

**b)** Suponga que la fuente anterior se transmite por un canal de 4,5 MHz de ancho de banda con una relación señal-ruido de 35 dB. Encuentre la capacidad del canal en bps.

**c)** ¿Cómo se deberían modificar los parámetros del apartado (a) para permitir la transmisión de la señal de TV en color sin incrementar el valor de $R$?

**3.14.** Dado un amplificador con una temperatura efectiva de ruido de 10.000 °K y con un ancho de banda de 10 MHz, ¿cuánto será el nivel de ruido térmico a la salida?

**3.15.** ¿Cuál es la capacidad para un canal de un «teletipo» de 300 Hz de ancho de banda con una relación señal-ruido de 3 dB?

**3.16.** Para operar a 9.600 bps se usa un sistema de señalización digital:

**a)** Si cada elemento de señal codifica una palabra de 4 bits, ¿cuál es el ancho de banda mínimo necesario?

**b)** ¿Y para palabras de 8 bits?



**3.17.** ¿Cuál es el nivel de ruido térmico para un canal de ancho de banda de 10 kHz y 1000 W de potencia operando a 50 °C?

**3.18.** Considérense los trabajos de Shannon y Nyquist sobre la capacidad del canal. Cada uno de ellos estableció un límite superior para la razón de bits del canal basándose en dos aproximaciones diferentes. ¿Cómo se pueden relacionar ambas aproximaciones?

**3.19.** Sea un canal con una capacidad de 20 Mbps. El ancho de banda de dicho canal es 3 MHz. ¿Cuál es la relación señal-ruido admisible para conseguir la mencionada capacidad?

**3.20.** La onda cuadrada de la Figura 3.7c, con $T = 1$ ms, se transmite a través de un filtro paso bajo ideal de ganancia unidad con frecuencia de corte a 8 kHz.

**a)** Determine la potencia de la señal de salida.

**b)** Suponiendo que a la entrada del filtro hay un ruido térmico con $N_0 = 0{,}1$ μW/Hz, encuentre la relación señal-ruido en dB a la salida.

**3.21.** Si el nivel recibido de una señal en un sistema digital es de −151 dBW y la temperatura efectiva del ruido en el receptor es de 1.500 K, ¿cuánto es el cociente $E_b/N_0$ para un enlace que transmita a 2.400 bps?

**3.22.** Rellene las casillas vacías de la siguiente tabla correspondientes a distintas potencias necesarias para obtener la correspondiente relación expresada en decibelios.

| Decibelios | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pérdidas | | | 0,5 | | | | | | | 0,1 |
| Ganancias | | | 2 | | | | | | | 10 |

**3.23.** Si un amplificador tiene una ganancia en tensión de 30 dB, ¿cuál es su relación de tensiones de entrada y salida?

**3.24.** Si un amplificador proporciona a la salida 20 W, ¿cuánto proporcionará expresado en dBW?

## APÉNDICE 3A. DECIBELIOS Y ENERGÍA DE LA SEÑAL

Un parámetro importante en cualquier sistema de transmisión es la energía de la señal transmitida. Al propagarse la señal en el medio habrá una pérdida, o *atenuación*, de energía de la señal. Para compensar este hecho es necesario introducir amplificadores cada cierta distancia que restituyan la energía de la señal.

Los valores de ganancias, pérdidas y, en general, de todas las magnitudes relativas se suelen expresar en decibelios, ya que:

- La energía de la señal decae, por lo general, exponencialmente. Por tanto, las pérdidas se pueden expresar cómodamente en decibelios, ya que es una unidad logarítmica.
- En un sistema de transmisión, las ganancias y pérdidas en cascada se pueden calcular fácilmente mediante sumas o restas, respectivamente.

El decibelio es una medida del cociente o proporción entre dos niveles de la señal:

$$G_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{salida}}{P_{entrada}}$$

donde

$N_{dB}$ = número de decibelios.
$P_{entrada}$ = potencia de entrada.
$P_{salida}$ = potencia de salida.
$\log_{10}$ = logaritmo en base 10.

La Tabla 3.2 muestra varias potencias de 10 expresadas en decibelios.

En la bibliografía hay algunas inconsistencias a la hora de usar los términos *ganancia* y *pérdida*. Si un valor $G_{dB}$ es positivo, corresponde en realidad a una ganancia en potencia. Por ejemplo, una ganancia de 3 dB significa que la potencia se ha doblado. Si el valor de $G_{dB}$ es negativo, en realidad implica una pérdida de potencia. Por ejemplo, una ganancia de $-3$ dB, significa que la potencia se ha dividido por la mitad, es decir, es una pérdida de potencia. Normalmente eso se expresa diciendo que ha habido una pérdida de 3 dB. Sin embargo, algunas referencias dirían que ha habido una pérdida de $-3$dB. Tiene más sentido decir que una ganancia negativa corresponde a una pérdida positiva. Por tanto, definimos la pérdida en decibelios $L_{dB}$, como

$$L_{dB} = -10\log_{10}\frac{P_{salida}}{P_{entrada}} = 10\log_{10}\frac{P_{entrada}}{P_{salida}} \qquad (2.2)$$

**Tabla 3.2.** Valores en decibelios.

| Cociente de potencias | dB | Cociente de potencias | dB |
|---|---|---|---|
| $10^1$ | 10 | $10^{-1}$ | $-10$ |
| $10^2$ | 20 | $10^{-2}$ | $-20$ |
| $10^3$ | 30 | $10^{-3}$ | $-30$ |
| $10^4$ | 40 | $10^{-4}$ | $-40$ |
| $10^5$ | 50 | $10^{-5}$ | $-50$ |
| $10^6$ | 60 | $10^{-6}$ | $-60$ |

**Ejemplo 3.6.** Si en una línea de transmisión se transmite una señal con una potencia de 10 mW y a cierta distancia se miden 5 mW, la pérdida se puede expresar como $L_{dB} = 10\log(10/5) = 10(0{,}3) = 3$ dB.

Obsérvese que el decibelio es una medida de una diferencia relativa, es decir, no es absoluta. Una pérdida de 1.000 W a 500 W es igualmente una pérdida de 3 dB.

El decibelio también se usa para medir diferencias de tensión, ya que la potencia es proporcional al cuadrado de la tensión:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

donde

$P$ = potencia disipada en una resistencia $R$.
$V$ = caída de tensión en la resistencia $R$.



Por tanto,

$$L_{dB} = 10\log\frac{P_{entrada}}{P_{salida}} = 10\log\frac{V^2_{entrada}/R}{V^2_{salida}/R} = 20\log\frac{V_{entrada}}{V_{salida}}$$

**Ejemplo 3.7.** Los decibelios son útiles para determinar la ganancia o pérdida acumulada por una serie de elementos de transmisión. Sea un conjunto de elementos atacados por una potencia de entrada igual a 4 mW. Sea el primer elemento una línea de transmisión con 12 dB de atenuación ($-12$ dB de ganancia), el segundo elemento un amplificador con una ganancia igual a 35 dB y, por último, una línea de transmisión con 10 dB de pérdida. La ganancia o atenuación neta será $(-12 + 35 - 10) = 13$ dB. El cálculo de la potencia de salida $P_{salida}$ es,

$$G_{dB} = 13 = 10\log(P_{salida}/4\text{ mW})$$
$$P_{salida} = 4 \times 10^{1,3}\text{ mW} = 79{,}8\text{ MW}$$

Los valores en decibelios se refieren a magnitudes relativas a cambios en magnitud, no a valores absolutos. A veces es conveniente expresar un nivel absoluto de potencia o tensión en decibelios para facilitar así el cálculo de la pérdida o ganancia con respecto a un valor inicial de señal. El **dBW (decibelio-vatio)** se usa frecuentemente en aplicaciones de microondas. Se elige como referencia el valor de 1 W y se define como 0 dBW. Se define, por tanto, el nivel absoluto de potencia en dBW como

$$\text{Potencia}_{dBW} = 10\log\frac{\text{Potencia}_W}{1\text{ W}}$$

**Ejemplo 3.8.** Una potencia de 1.000 W corresponde a 30 dBW y una potencia de 1 mW corresponde a $-30$ dBW.

Otra unidad es el **dBm (decibelio-milivatio),** en la que se usa 1 mW como referencia. Así 0 dBM = 1 mW. La fórmula es

$$\text{Potencia}_{dBW} = 10\log\frac{\text{Potencia}_{mW}}{1\text{ mW}}$$

Obsérvense las siguientes relaciones

$$+30\text{ dBm} = 0\text{ dBW}$$
$$0\text{ dBm} = -30\text{ dBW}$$

Otra unidad frecuente en los sistemas de televisión por cable y en las aplicaciones LAN de banda ancha es el **dBmV (decibelio-milivoltio).** Ésta es una medida absoluta, donde 0 dBmV equivale a 1 mV. Por tanto,

$$\text{Tensión}_{dBmV} = 20\log\frac{\text{Tensión}_{mV}}{1\text{ mV}}$$

En este caso se ha supuesto que la caída de tensión se realiza en una resistencia de 75 ohmios.