Capítulo 3

Datos y señales

Nota

Para ser transmitidos, los datos deben ser convertidos a señales electromagnéticas.

3-1 ANÁLOGICO Y DIGITAL

Los datos pueden ser analógicos o digitales. El término datos analógicos se refiere a información que es continua; el término datos digitales indica algo que tiene estados discretos. Los datos analógicos toman valores continuos. Los datos digitales toman valores discretos.

Temas a tratar en esta sección:

Datos analógicos y digitales
Señales analógicas y digitales
Señales periódicas y aperiódicas

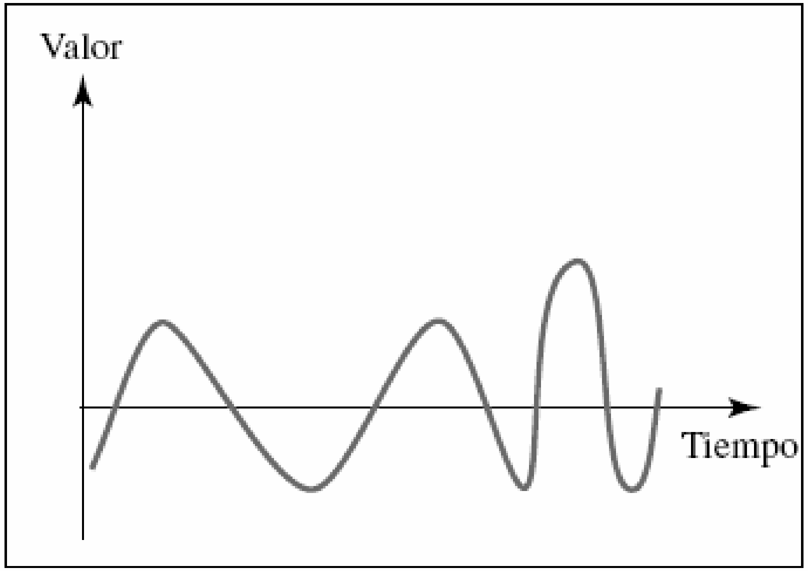
Nota

Los datos pueden ser analógicos o digitales. Los datos analógicos son continuos y toman valores continuos. Los datos digitales tienen estados discretos y toman valores discretos.

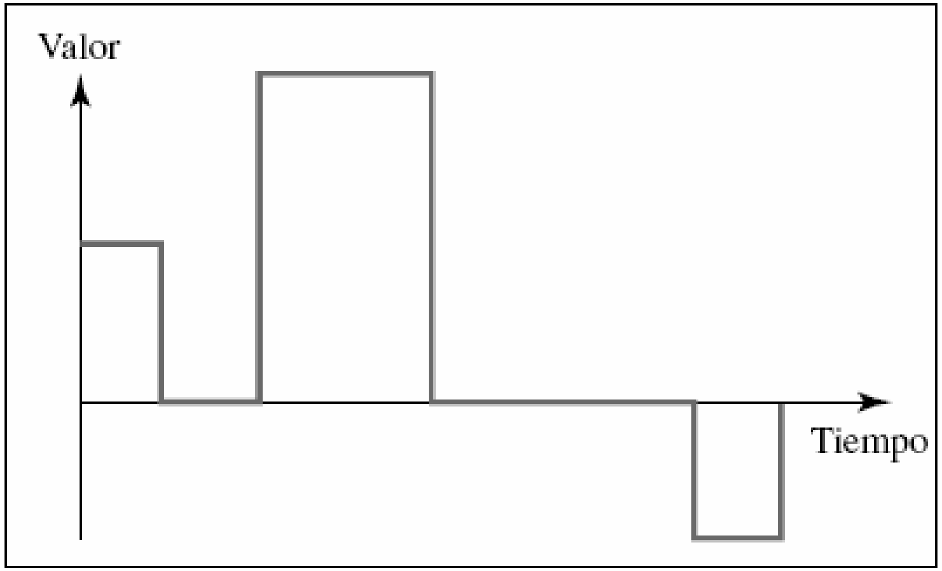
Nota

Las señales pueden ser analógicas o digitales. Las señales analógicas pueden tener un número infinito de valores dentro de un rango; las señales digitales solamente pueden tener un número limitado de valores.

Figura 3.1 *Comparación entre señales analógicas y digitales*



a. Señal analógica



b. Señal digital

Nota

En transmisión de datos se usa habitualmente señales analógicas periódicas y señales digitales aperiódicas.

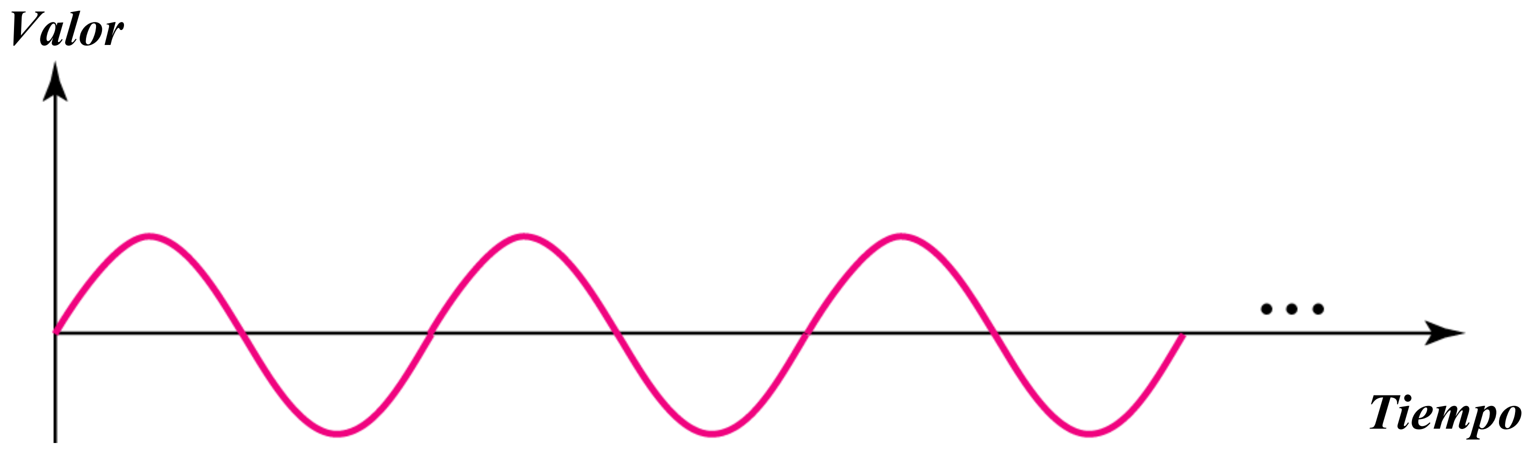
3-2 SEÑALES ANALÓGICAS PERIÓDICAS

Las señales analógicas se pueden clasificar en simples o compuestas. Una señal analógica simple, u onda seno, no puede ser descompuesta en señales más simples. Una señal analógica compuesta está formada por múltiples ondas seno.

Temas a tratar en esta sección:

Onda seno
Fase
Dominios del tiempo y la frecuencia
Señales compuestas
Ancho de banda

Figura 3.2 *Una onda seno*



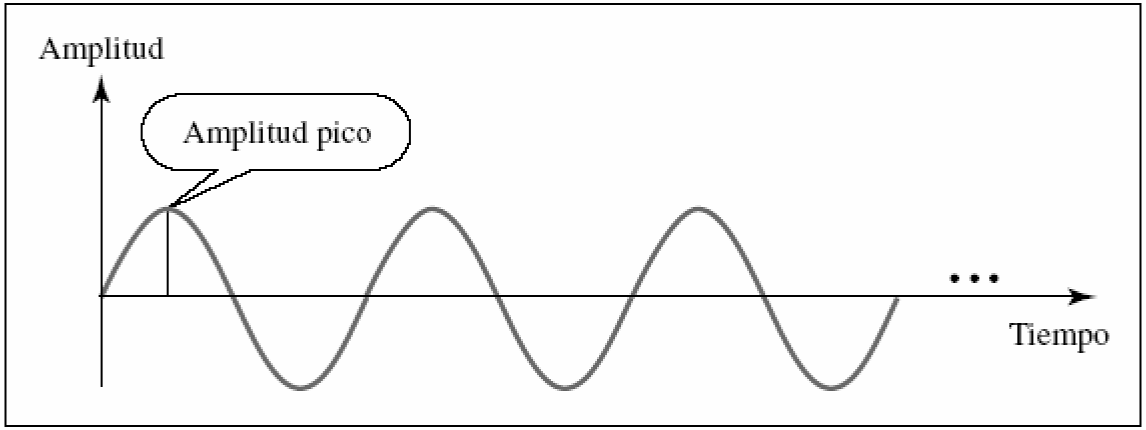
Nota

En el Apéndice C se presenta una aproximación matemática a las ondas seno.

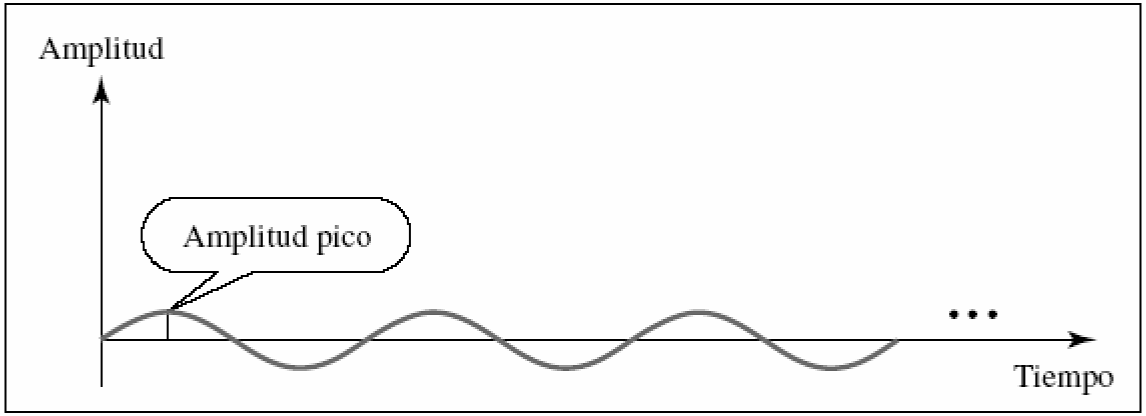
Ejemplo 3.1

La potencia de su casa se puede representar mediante una onda seno con una amplitud pico de 230 a 260 V. Sin embargo, es el conocimiento común que la potencia en los hogares de Europa está entre 210 y 220V. Esta discrepancia se debe al hecho de que estos son valores con raíces cuadráticas medias (rms, root mean square). La señal se hace cuadrada y luego se calcula el valor medio. El valor pico es igual a $2^{1/2} \times rms$.

Figura 3.3 *Dos señales con la misma fase y frecuencia pero distinta amplitud*



a. Una señal con pico de amplitud alto



b. Una señal con pico de amplitud bajo

Ejemplo 3.2

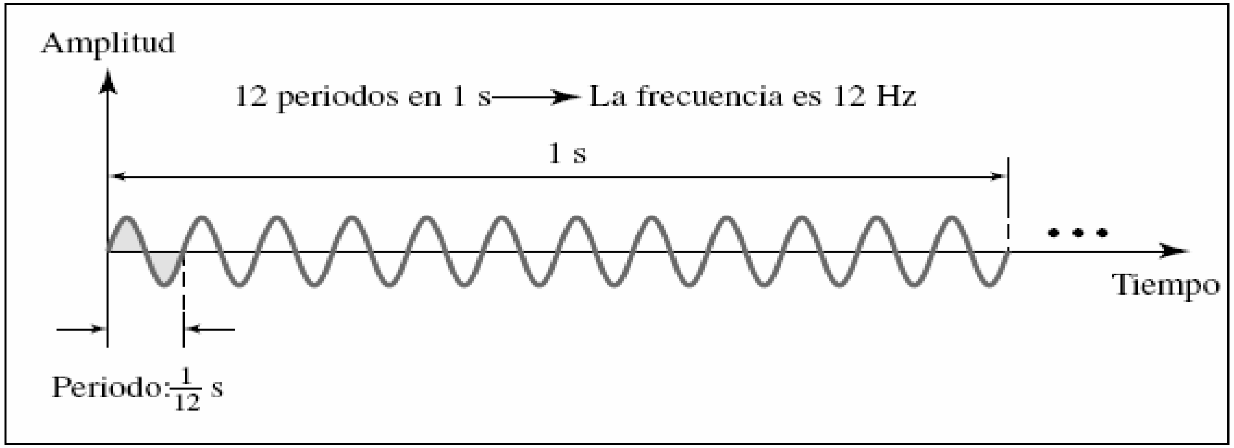
El voltaje de la batería es una constante; este valor constante se puede considerar una onda seno, como veremos más tarde. Por ejemplo, el valor pico de una batería AA es normalmente 1,5 V.

Nota

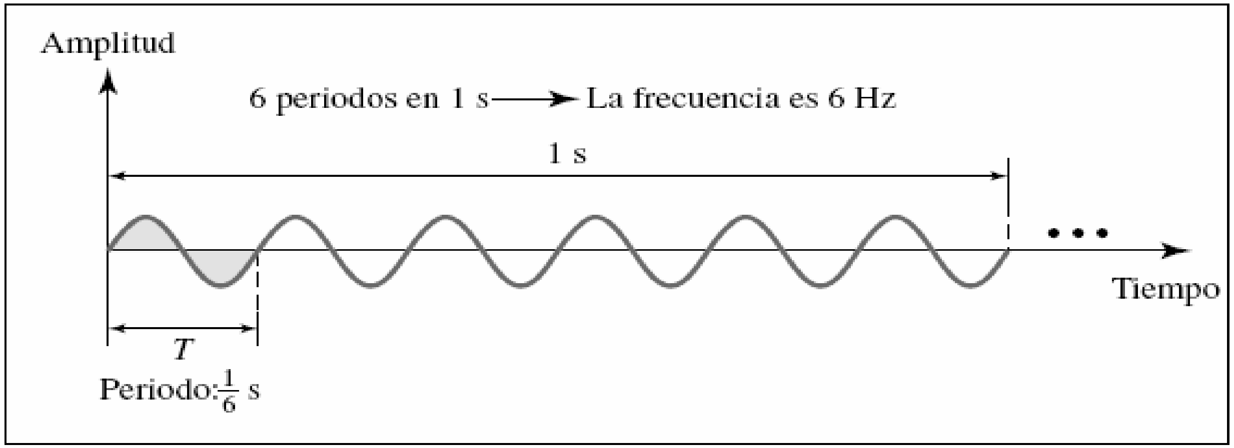
La frecuencia y el periodo son inversos entre sí

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{y} \quad T = \frac{1}{f}$$

Figura 3.4 *Dos señales con la misma amplitud y fase pero distinta frecuencia*



a. Una señal con una frecuencia de 12 Hz



b. Una señal con una frecuencia de 6 Hz

Tabla 3.1 ***Unidades del periodo y la frecuencia***

Unidad	*Equivalente*	*Unidad*	*Equivalente*
Segundos	1 s	Herzio (Hz)	1 Hz
Milisegundos (ms)	10^{-3} s	Kiloherzio (kHz)	10^{3} Hz
Microsegundos (μs)	10^{-6} s	Megaherzio (MHz)	10^{6} Hz
Nanosegundos (ns)	10^{-9} s	Gigaherzio (GHz)	10^{9} Hz
Picosegundos (ps)	10^{-12} s	TeraHerzio (THz)	10^{12} Hz

Ejemplo 3.3

La potencia eléctrica que se usa en casa tiene una frecuencia de 60Hz (50Hz en Europa). El periodo de esta onda seno se puede determinar como sigue:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 0{,}0166\,\mathrm{s} = 0{,}0166 \times 10^3\,\mathrm{ms} = 16{,}6\,\mathrm{ms}$$

Ejemplo 3.4

Exprese un periodo de 100 milisegundos en microsegundos.

Solución

En la Tabla 3.1 se puede ver que los equivalentes de 1 ms (1 ms es 10^{-3} s) y 1 s (1 s es 10^{6} μs). Se pueden hacer las sustituciones siguientes:

$$100 \text{ ms} = 100 \times 10^{-3} \text{ s} = 100 \times 10^{-3} \times 10^{6} \ \mu\text{s} = 10^{2} \times 10^{-3} \times 10^{6} \ \mu\text{s} = 10^{5} \ \mu\text{s}$$

Ejemplo 3.5

El periodo de una señal es de 100 ms. ¿Cuál es su frecuencia en Kiloherzios?

Solución

Primero se cambian los 100 ms a segundos y luego se calcula la frecuencia a partir del periodo (1 Hz = 10^{-3} kHz).

$$100 \text{ ms} = 100 \times 10^{-3} \text{ s} = 10^{-1} \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10^{-1}} \text{ Hz} = 10 \text{ Hz} = 10 \times 10^{-3} \text{ kHz} = 10^{-2} \text{ kHz}$$

Nota

La frecuencia es la velocidad de cambio respecto al tiempo.

Los cambios en un espacio de un tiempo corto indican frecuencia alta.

Los cambios en un gran espacio de tiempo indican frecuencia baja.

Nota

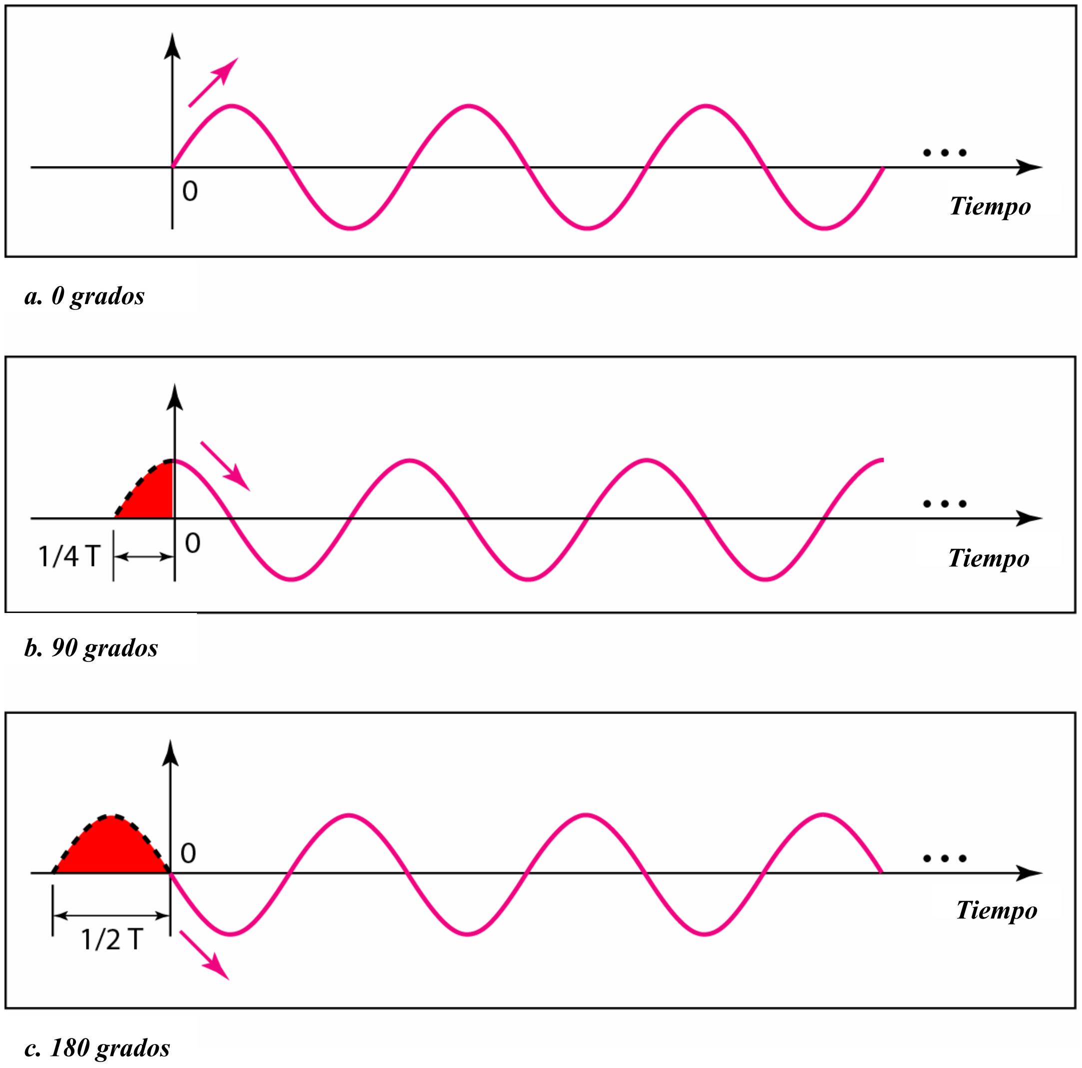
Si una señal no cambia en absoluto, su frencuencia es 0.

Si una señal cambia instantáneamente su frecuencia es infinita.

Nota

La fase describe la posición de la forma de onda relativa al instante de tiempo 0.

Figura 3.5 *Tres ondas seno con la misma amplitud y frecuencia, pero disintas fa*



Ejemplo 3.6

Una onda está desplazada 1/6 de ciclo respecto a tiempo 0.¿Cuál es su fase en grados y radianes?

Solución

Sabemos que un ciclo completo son 360 grados. Por tanto, 1/6 de ciclo es

$$\boxed{\frac{1}{6} \times 360 = 60° = 60 \times \frac{2\pi}{360} \text{ rad} = \frac{\pi}{3} \text{ rad} = 1.046 \text{ rad}}$$

Figura 3.6 *Longitud de onda y periodo*

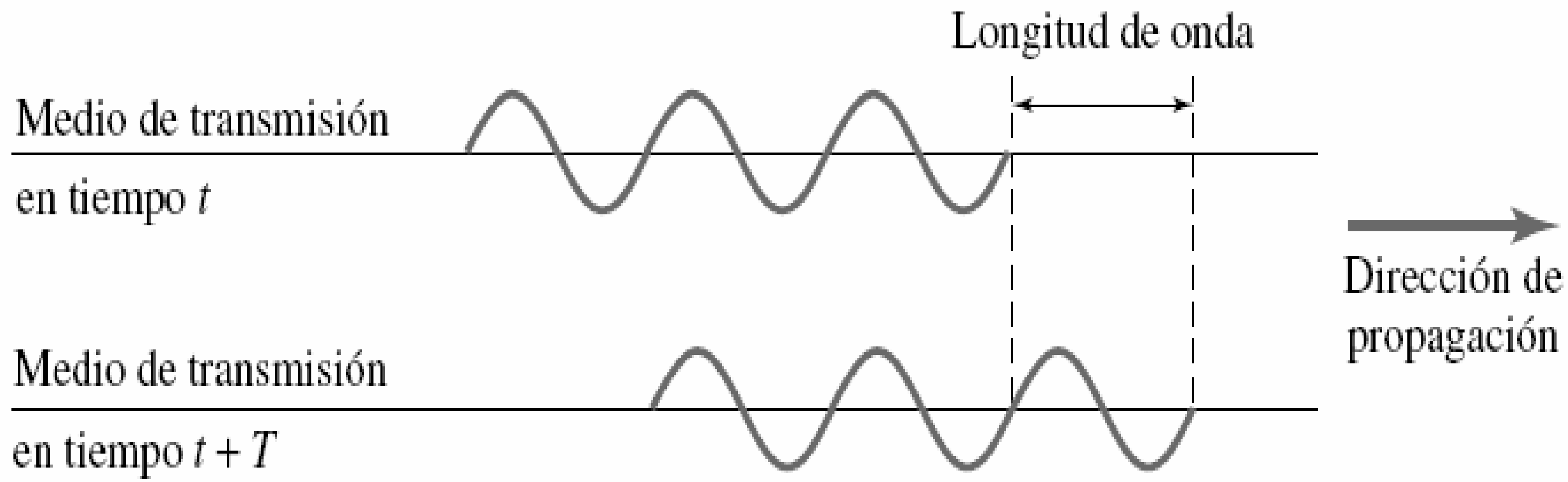
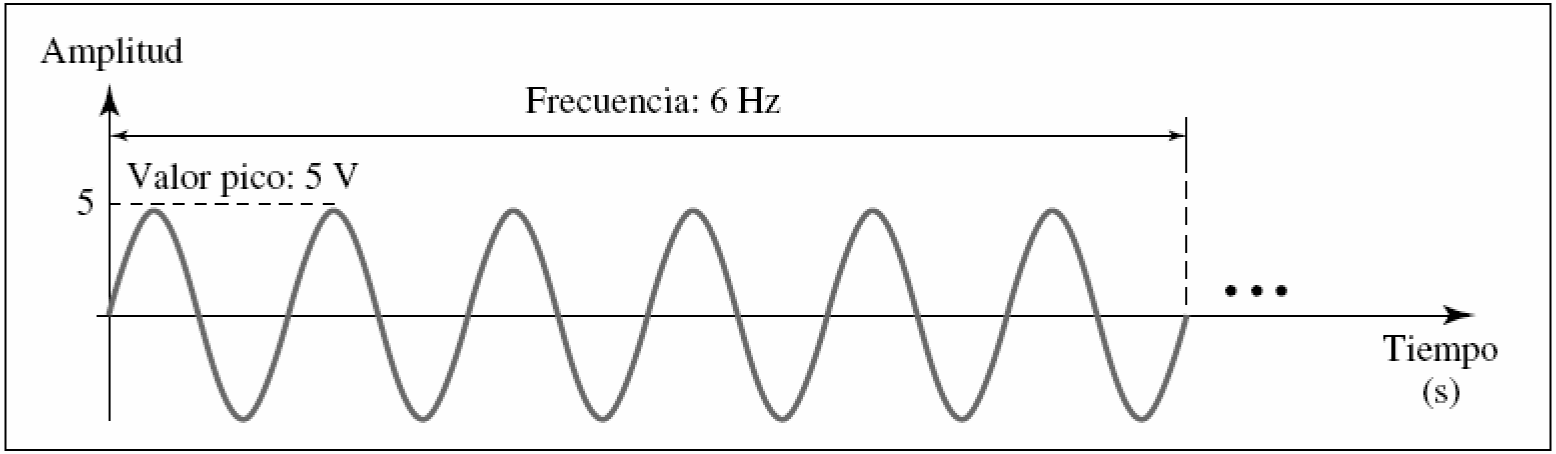
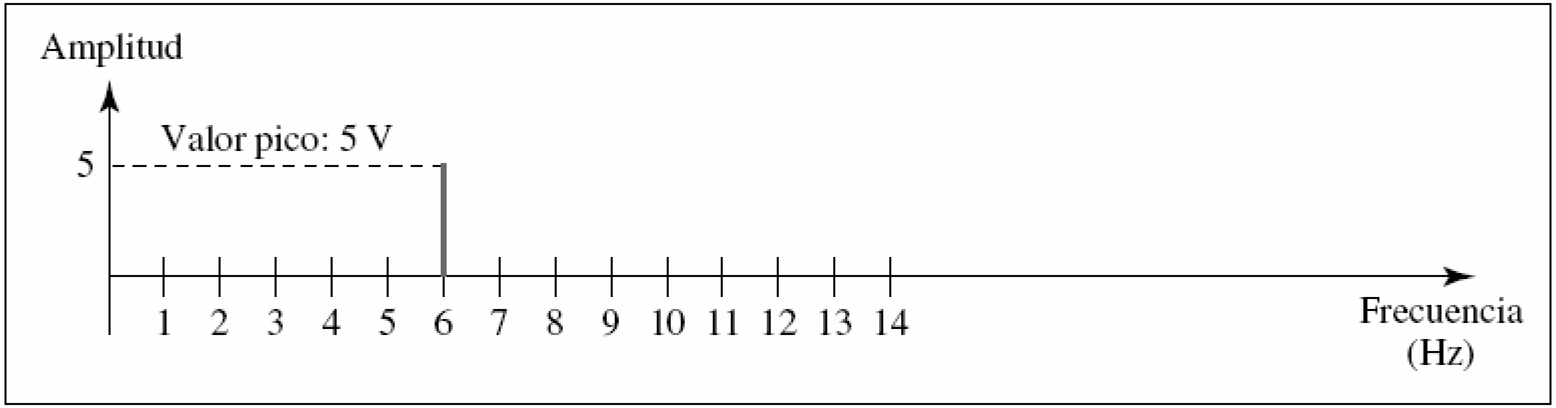


Figura 3.7 *Gráfica del dominio del tiempo y la frecuencia para una onda seno*



a. Una onda seno en el dominio del tiempo (valor pico: 5 V, frecuencia: 6 Hz)



b. La misma onda seno en el dominio de frecuencia (valor pico: 5 V, frecuencia: 6 Hz)

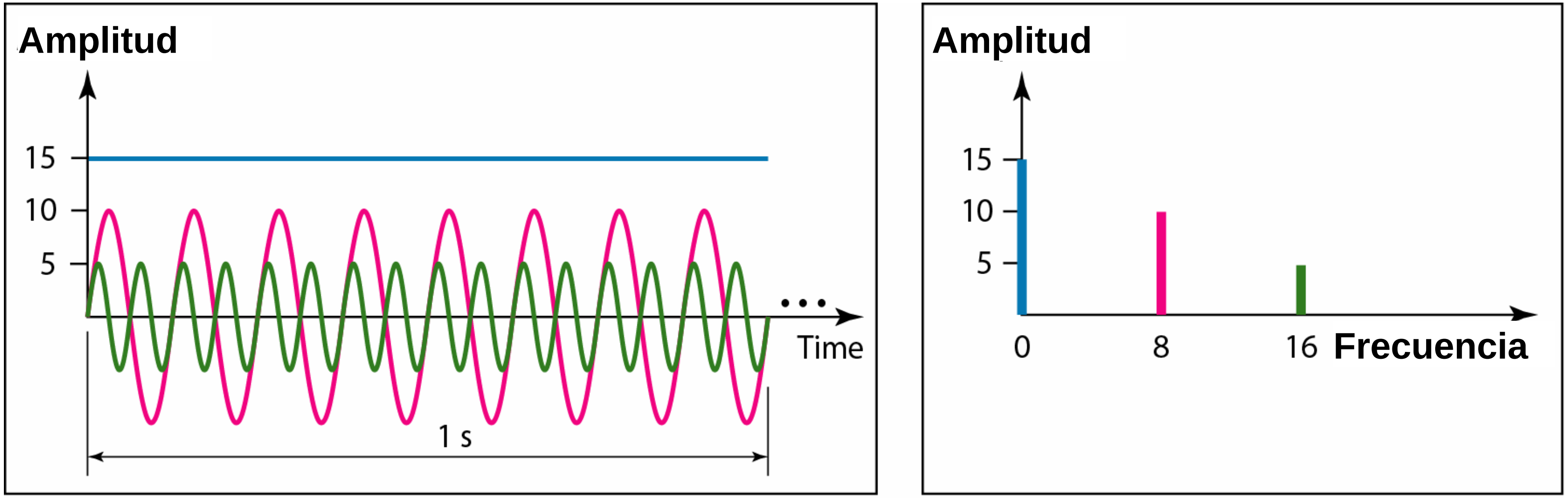
Nota

Una onda seno completa en el dominio del tiempo se puede representar mediante una única barra en el dominio de frecuencia.

Ejemplo 3.7

El dominio de frecuencia es más compacto y útil cuando se trabaja con más de una onda seno. La figura 3.8 muestra tres ondas seno con frecuencias y amplitudes variables ejemplos de las trazas en el cominio del tiempo y en el de al frecuencia de tres señales con frecuencias y amplitudes distintas. Todas se pueden representar mediante tres barras en el dominio de frecuencia.

Figura 3.8 *Dominios del tiempo y la frecuencia para tres ondas seno*



a. Representación en dominio del tiempo de tres ondas seno con frecuencias 0, 8 y 16

b. Representación en dominio de frecuencia de las mismas tres señales

Nota

Una onda seno de frecuencia única no es útil para transmitir datos; es necesario usar una señal compuesta, una señal formada por múltiples ondas seno.

Nota

De acuerdo con el Análisis de Fourier, cualquier señal compuesta es realmente una combinación de ondas simples con distintas frecuencias, amplitudes y fases. El análisis de Fourier se trata en el Apéndice C.

el Apéndice C.

Nota

Si la señal compuesta es periódica, la descomposición da una serie de señales con frecuencias discretas; si la señal compuesta es aperiódica, la descomposición da una combinación de ondas seno con frecuencias continuas.

Ejemplo 3.8

La Figura 3.9 muestra una señal compuesta periódica con frecuencia f. Ese tipo de señal no es típica de las que se encuentran en transmisión de datos. Consideramos que puede ser tres sistemas de alarma, cada uno con frecuencia distinta. El análisis de esta señal nos puede dar una buena comprensión de cómo descomponer señales.

Figura 3.9 *Una señal compuesta periódica*

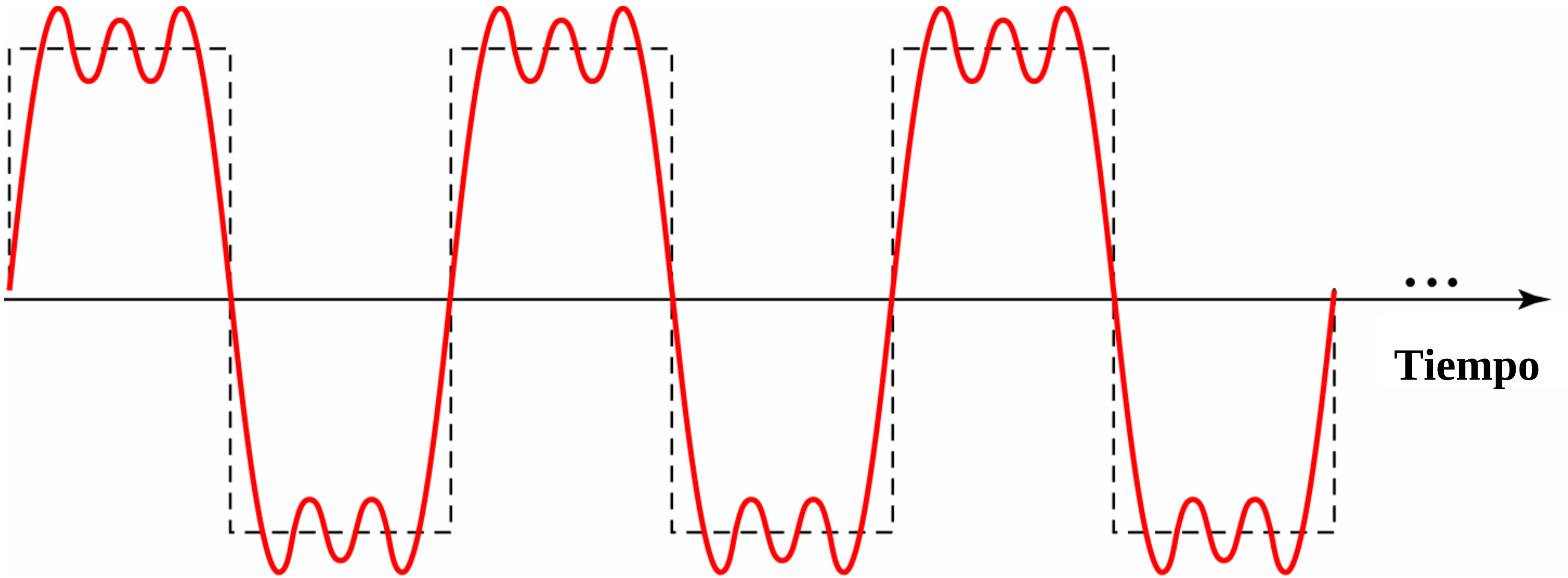
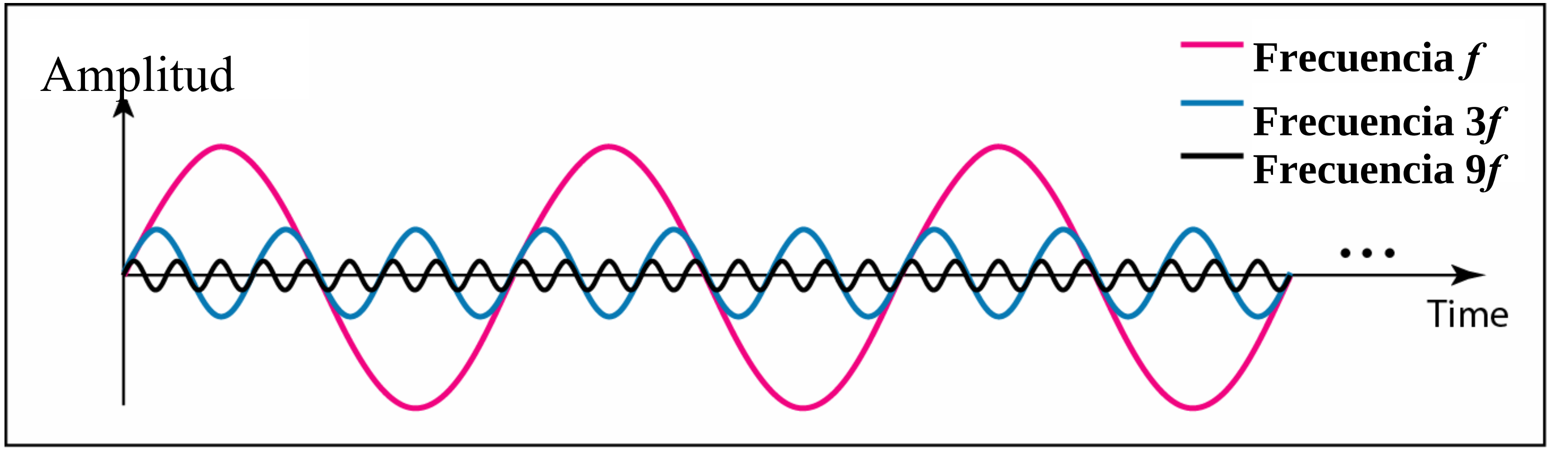
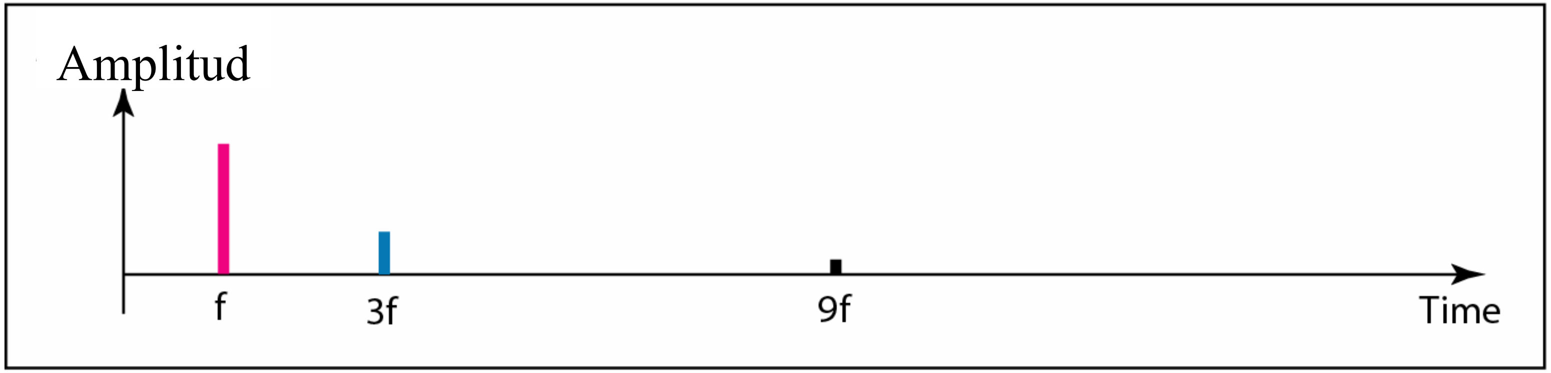


Figura 3.10 ***Descomposición de una señal compuesta periódica en los dominios de tiempo y frecuencia.***



a. Descomposición en dominio del tiempo de una señal compuesta

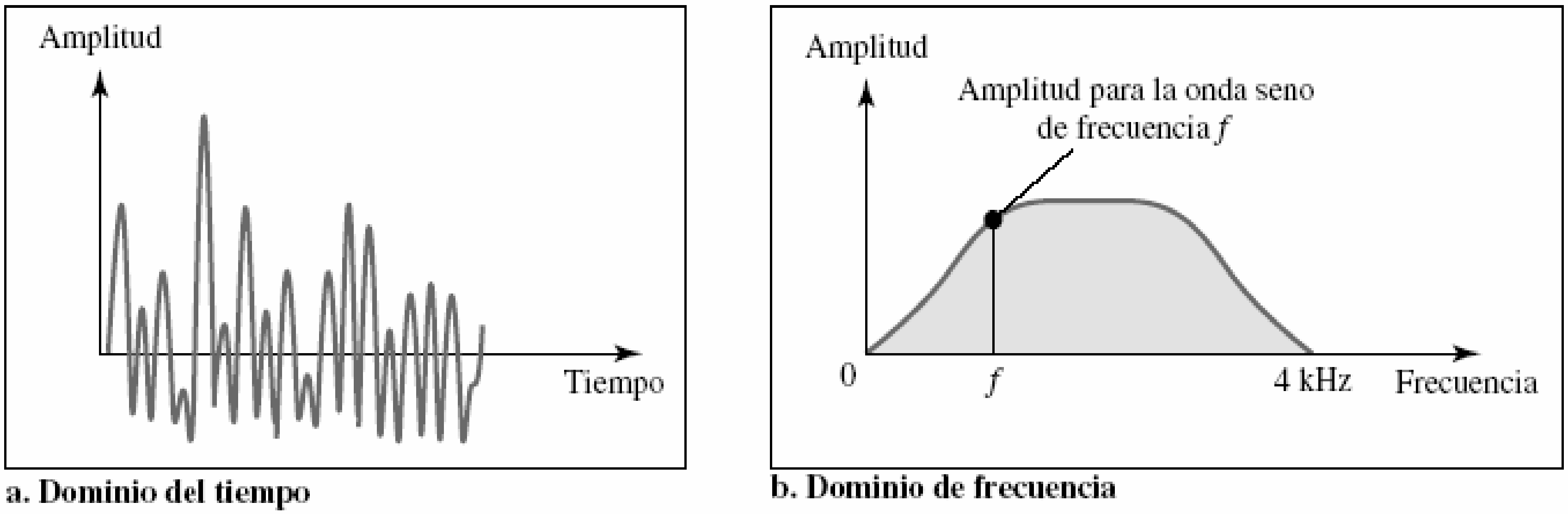


b. Descomposición en dominio de frecuencia de la señal compuesta

Ejemplo 3.9

La Figura 3.11 muestra una señal compuesta aperiódica. Puede ser la señal creada por un micrófono o un aparato de teléfono cuando se pronuncian una o dos palabras. En este caso, la señal compuesta no puede ser periódica, porque eso implica que estaríamos repitiendo la misma palabra o palabras exactamente con el mismo tono.

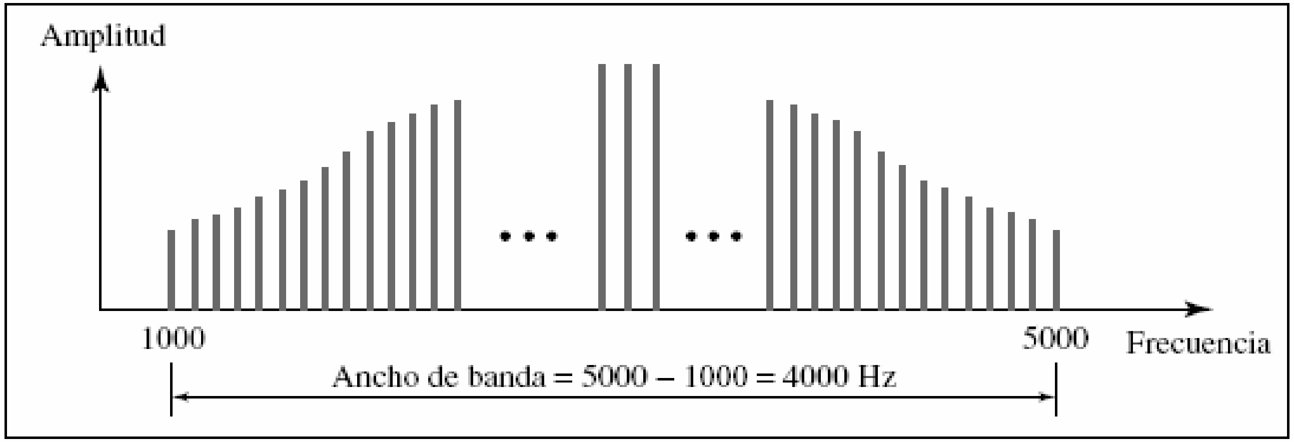
Figura 3.11 *Descomposición de una señal compuesta aperiódica en los Dominios de tiempo y frecuencia.*



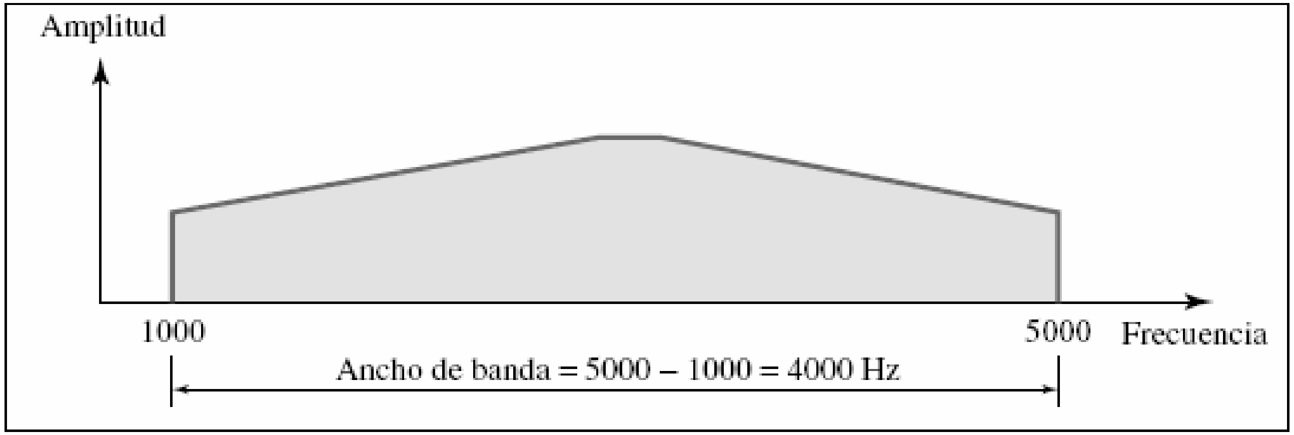
Nota

El ancho de banda de una señal compuesta es la diferencia entre la frecuencia más alta y más baja contenidas en la señal.

Figura 3.12 *Ancho de banda de señales compuestas periódicas y aperiódicas*



a. Ancho de banda de una señal periódica



b. Ancho de banda de una señal no periódica

Ejemplo 3.10

Si se descompone una señal periódica en cinco ondas seno con frecuencias 100, 300, 500,700 y 900 Hz, ¿cuál es su ancho de banda?. Dibuje el espectro, asumiendo que todos los componentes tienen una amplitud máxima de 10 voltios.

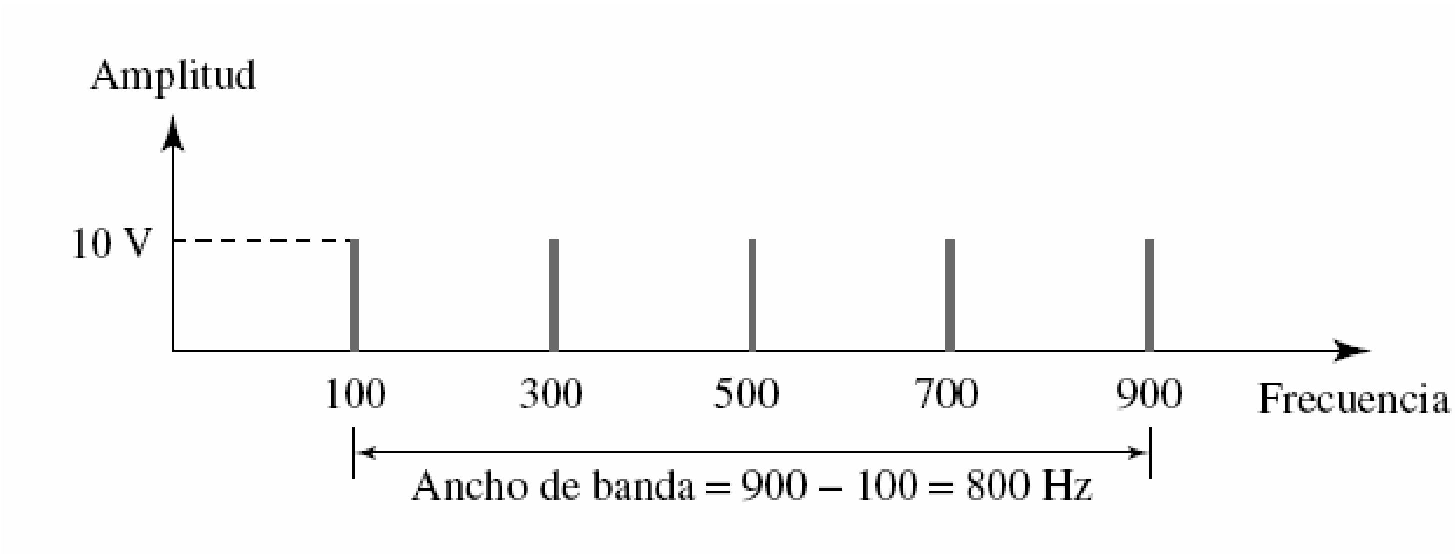
Solución

Sea f_h la frecuencia más alta, f_l y B el ancho de banda. Entonces,

$$\boxed{B = f_h - f_l = 900 - 100 = 800 \text{ Hz}}$$

El espectro tienen solamente cinco barras, en 100, 300, 500, 700, y 900 Hz (véase la Figura 3.13).

Figura 3.13 *El ancho de banda del Ejemplo 3.10*



Ejemplo 3.11

Una señal tiene un ancho de banda de 20 hz. la frecuencia más alta es 60 hz. ¿Cuál es la frecuencia más baja? Dibuje el espectro si la señal contiene todas la frecuencias integrales de la misma amplitud.

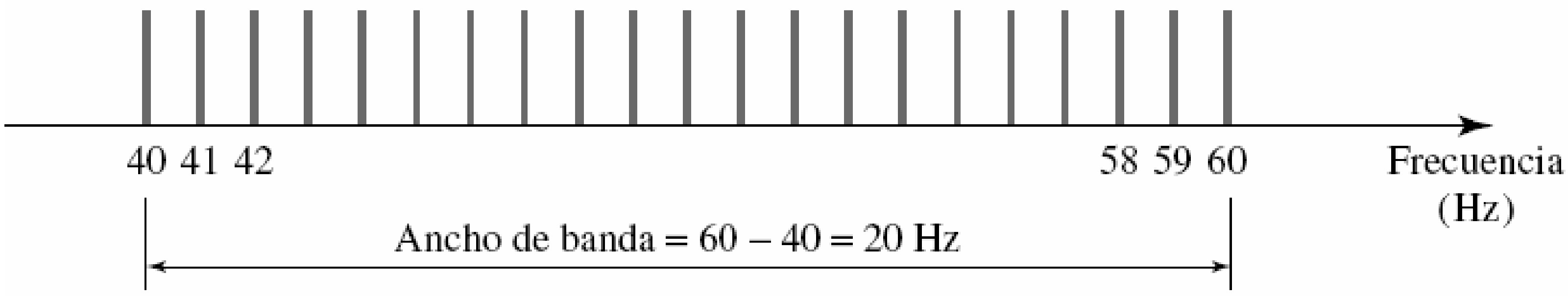
Solución

Sea f_h la frecuencia más alta, f_l la frecuencia más baja y B el ancho de banda. Entonces,

$$B = f_h - f_l \quad \Rightarrow \quad 20 = 60 - f_l \quad \Rightarrow \quad f_l = 60 - 20 = 40 \text{ Hz}$$

El espectro contiene todas la frecuencias integrales. se muestran mediante una serie de barras (véase la Figura 3.14).

Figura 3.14 ***El ancho de banda del Ejemplo 3.11.***



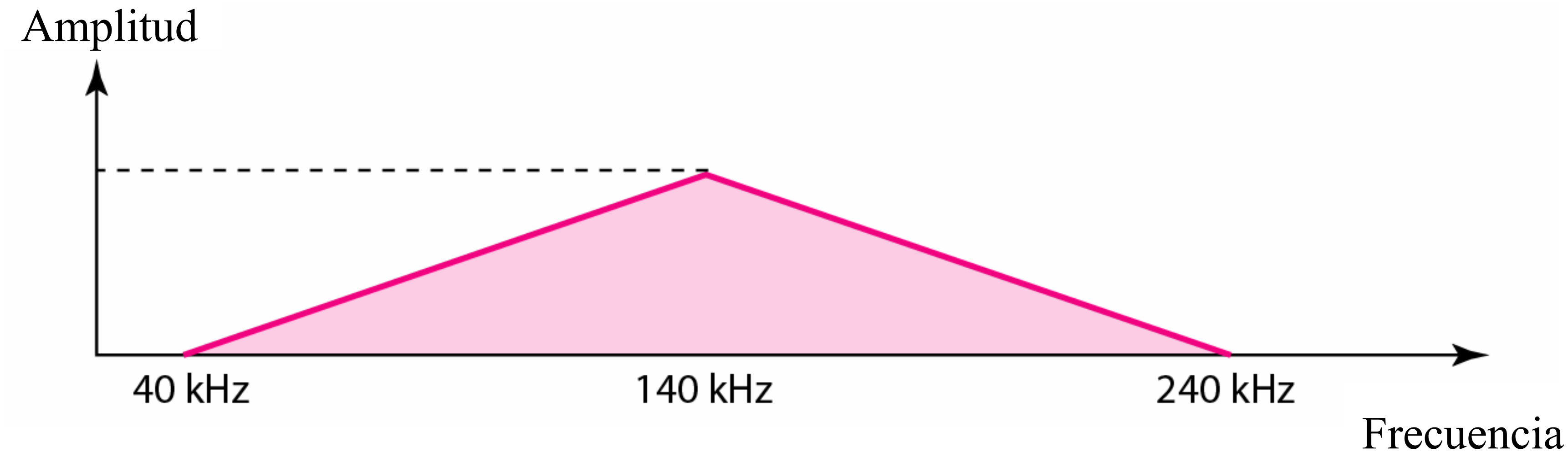
Ejemplo 3.12

Una señal compuesta aperiódica tiene un ancho de banda de 200 kHz, con una frecuencia media de 140 kHz y una amplitud pico de 20 V. las dos frecuencias extremas tienen una amplitud de 0. Dibuje el dominio de frecuencia de la señal.

Solución

La frecuencia más baja debe estar en 40 kHz y la más alta en 240 khHz. la Figura 3.15 muestra el dominio de frecuencia y el ancho de banda.

Figura 3.15 *El ancho de banda del Ejemplo 3.12*



Ejemplo 3.13

Un ejemplo de señal aperiódica compuesta es la señal propagada por una estación de radio AM. En Estados Unidos, cada estación de radio AM tiene asignado un ancho de banda de 10 kHz. El ancho de banda total dedicado a estaciones AM va desde los 530 hasta los 1700 kHz. se verá la razón del ancho de banda de 10 kHz en el Capítulo 5.

Ejemplo 3.14

Otro ejemplo de señal compuesta aperiódica es la señal propagada por una estación de radio FM. En Estados Unidos, cada estación de radio FM tiene asignado un ancho de banda de 200 kHz. El ancho de banda total dedicado a estaciones FM va desde los 88 hasta los 108 MHz. se verá la razón del ancho de banda de 200 kHz en el Capítulo 5.

Ejemplo 3.15

Otro ejemplo de señal compuesta aperiódica es la señal recibida por un viejo televisor en blanco y negro.La pantalla del televisor está formada por píxeles. Si asumimos una resolución de 525 × 700, se tienen 367.500 píxeles por pantalla. Si se refresca 30 veces por segundo, son 367.500 × 30 = 11.025.000 píxeles por segundo. El escenario con el caso pero es alternar píxeles blancos y negros. Se puede enviar 2 píxeles por ciclo. Por tanto, son necesarios 11.025.000 / 2 = 5.512.500 ciclos por segundo, o Hz. El ancho de banda necesario es de 5,5125 MHz.

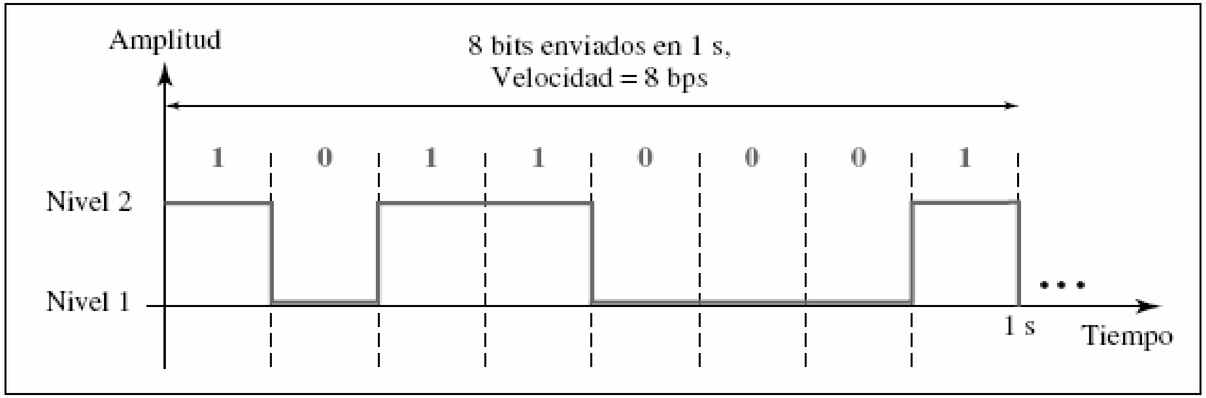
3-3 SEÑALES DIGITALES

Además de poder ser representados con una señal analógica, los datos también se pueden representar mediante una señal digital. Por ejemplo, un 1 se puede codificar como un voltaje positivo y un 0 como un voltaje cero. Una señal digital puede tener más de dos niveles. En este caso, se puede enviar más de 1 bit por cada nivel

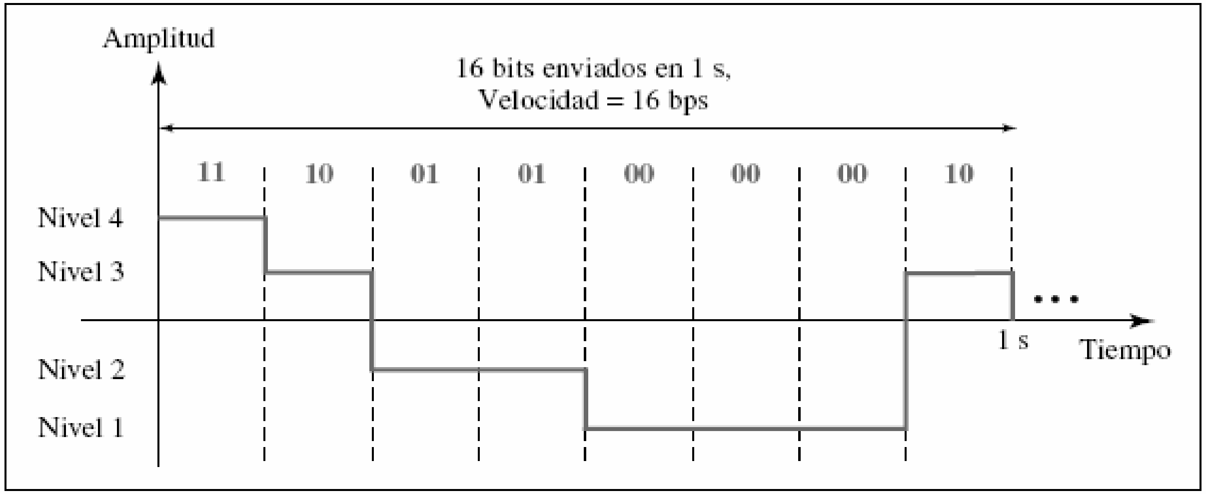
Temas a tratar en esta sección:

Tasa de bits (velocidad)
Intervalo de bit
La señal digital como una señal analógica compuesta
Transmisión de señales digitales

Figura 3.16 *Dos señales digitales: una con dos niveles de señal y otra con cuatro niveles.*



a. Una señal digital con dos niveles



b. Una señal digital con cuatro niveles

Nota

El Apéndice C repasa la información sobre funciones logarítmicas y exponenciales.

Ejemplo 3.16

Una señal digital tiene ocho niveles. ¿Cuántos bits por nivel son necesarios? se calcula el número de bits a partir de la fórmula

$$\boxed{\text{Número de bits por nivel} = \log_2 8 = 3}$$

Cada nivel de señal se representa por 3 bits.

Ejemplo 3.17

Una señal digital tiene 9 niveles. ¿Cuántos bits por nivel son necesarios? se calcula el número de bits usando la fórmula. Cada nivel de señal se representa con 3,17 bits. sin embargo, esta respuesta no es realista. El número de bits enviados por nivel tiene que ser un entero múltiplo de 2. Para este ejemplo, 4 bits pueden representar un nivel.

Ejemplo 3.18

Asuma que necesitamos descargar documentos de texto a una velocidad de 100 páginas por minuto. ¿Cuál es la velocidad necesaria para el canal?

Solución

Una página tiene una media de 24 líneas con 80 caracteres cada una. si se asume que un carácter necesita 8 bits, la velocidad es

$$100 \times 24 \times 80 \times 8 = 1.636.000 \text{ bps} = 1{,}636 \text{ Mbps}$$

Ejemplo 3.19

Un canal de voz digitalizada, como veremos en el Capítulo 4, se forma digitalizando una señal analógica de voz de 4 kHz. Es necesario muestrear la señal al doble de su frecuencia máxima (dos muestras por herzio). Se asume que cada muestra necesita 8 bits. ¿Cuál es la velocidad necesaria?

Solución

La tasa de bits se puede calcular como

$$2 \times 4000 \times 8 = 64.000 \text{ bps} = 64 \text{ Kbps}$$

Ejemplo 3.20

¿Cuál es la velocidad necesaria para la TV de alta definición (HDTV)?

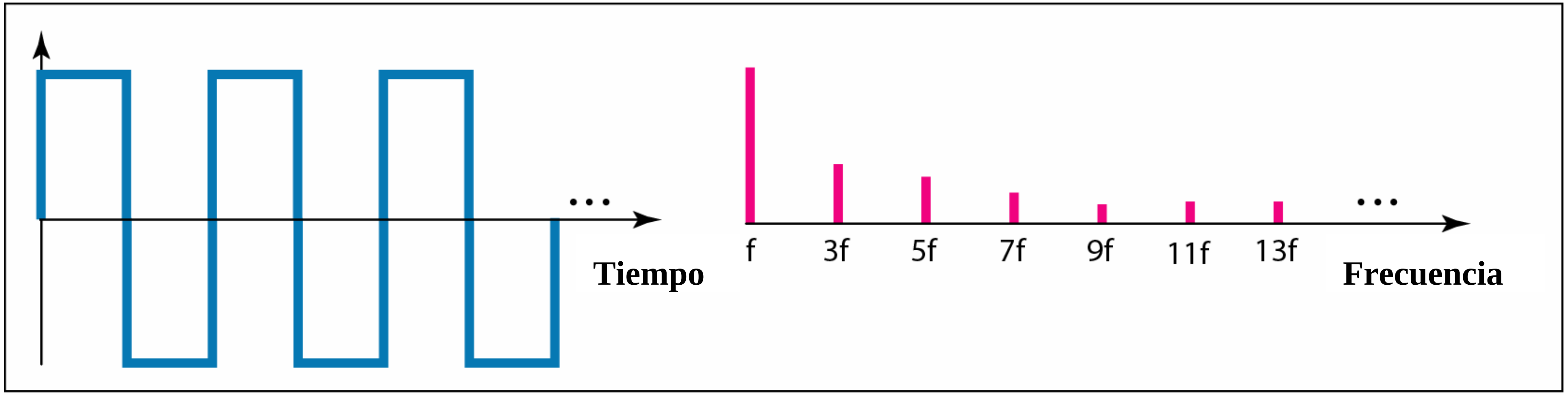
Solución

HDTV usa señales digitales para emitir señales de vídeo de alta definición. La pantalla de HDTV tiene normalmente una relación 16 : 9. Hay 1920 x 1080 píxeles por pantalla y la pantalla se refresca 30 veces por segundo. Un pixel de color se representa con 24 bits.

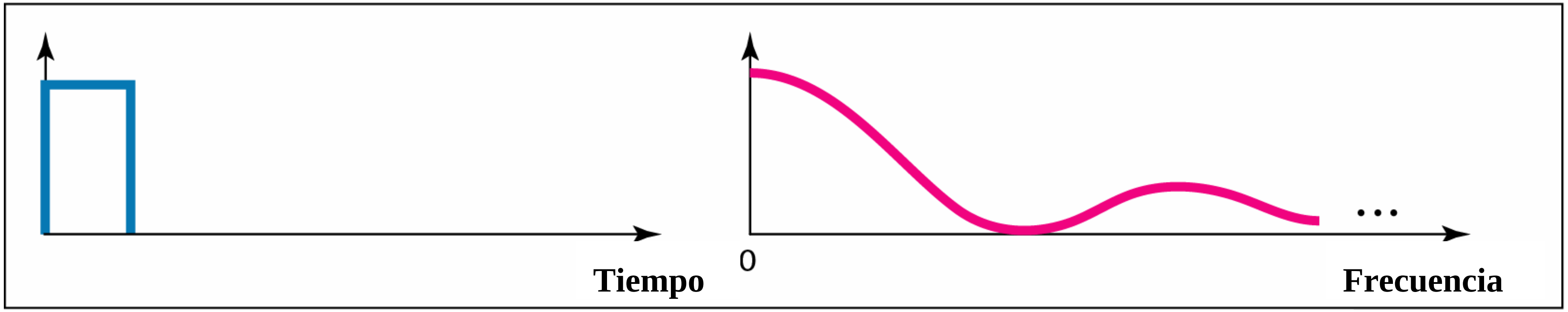
$$1920 \times 1080 \times 30 \times 24 = 1.492.992.000 \text{ bps} \quad \text{o } 1{,}5 \text{ Gbps}$$

Las emisoras de TV reducen esta tasa a entre 20 y 40 Mbps usando compresion.

Figura 3.17 *Dominio tiempo y frecuencia de señales digitales periódicas y aperiódicas*

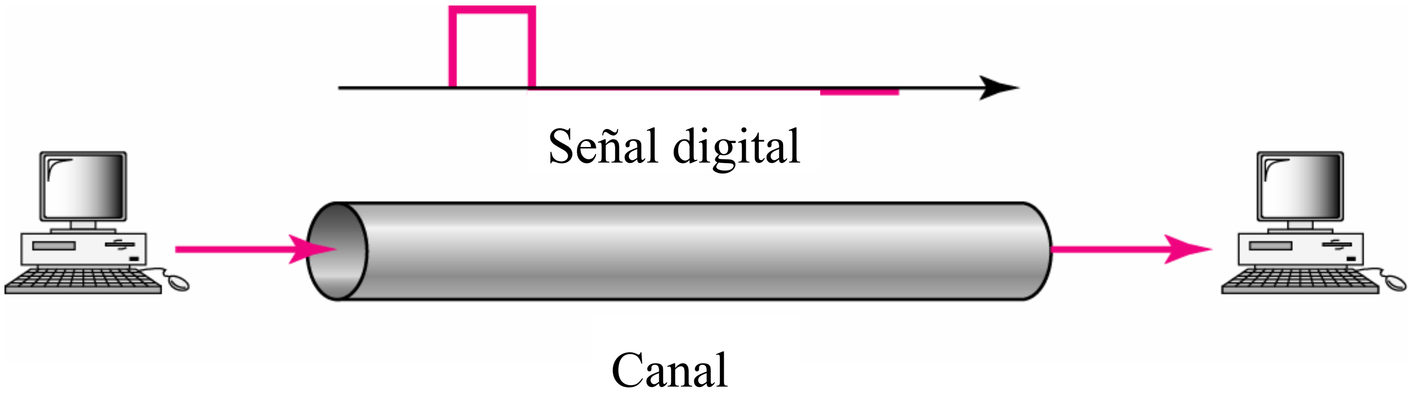


a. Dominio de tiempo y frecuencia de una señal digital periódica



b. Dominio de tiempo y frecuencia de una señal digital aperiódica

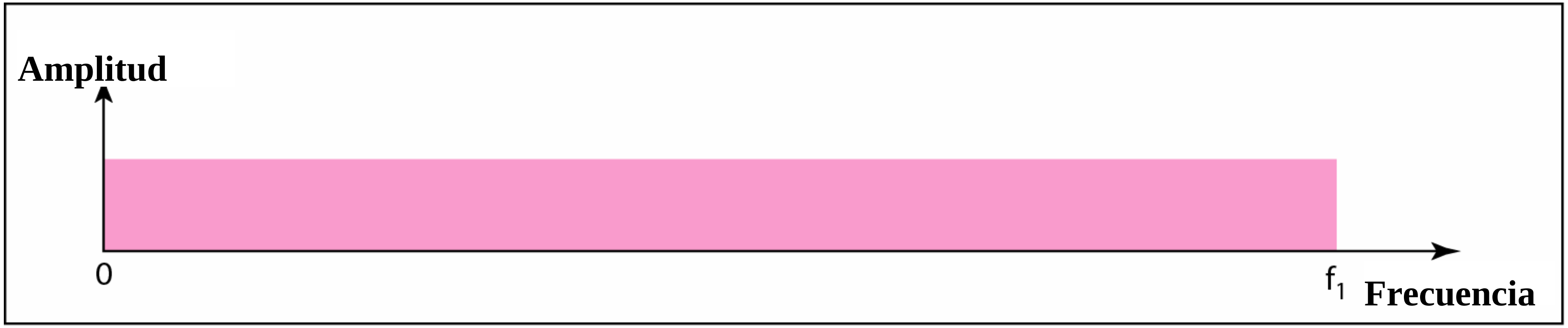
Figura 3.18 ***Transmisión banda base.***



Nota

Una señal digital es una señal analógica compuesta con un ancho de banda infinito.

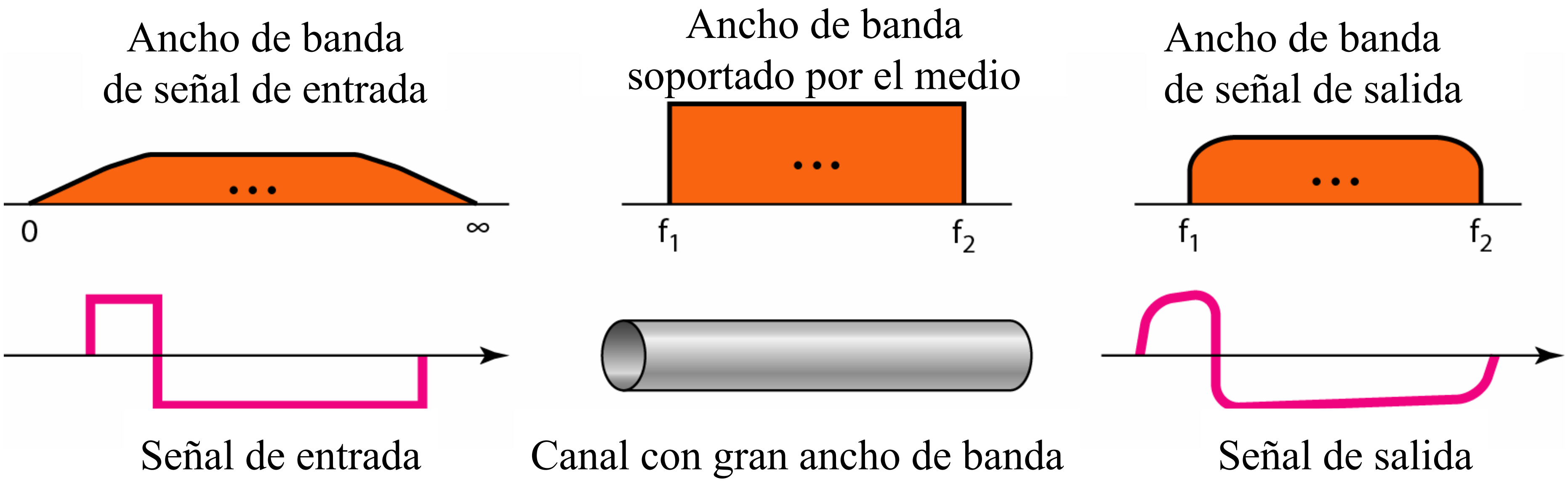
Figura 3.19 ***Anchos de banda de dos canales paso bajo***



a. Canal paso bajo, ancho de banda amplio

b. Canal paso bajo, ancho de banda estrecho

Figura 3.20 *Transmisión banda base usando un medio dedicado*



Nota

La transmisión banda base de una señal digital que preserva la forma de la señal digital es posible sólo si se tiene un canal paso bajo con un ancho de banda infinito o muy grande.

Ejemplo 3.21

Un ejemplo de canal dedicado donde todo el ancho de banda del medio se usa como un único canal es una LAN. Casi cada LAN cableada usa actualmente un canal dedicado para dos estaciones que se comunican entre sí. En una LAN con topología de bus con conexiones multipunto, sólo dos estaciones se pueden comunicar entre sí simultáneamente (tiempo compartido); las otras estaciones deben evitar enviar datos. En una LAN con topología de estrella, todo el canal entre las dos estaciones y el concentrador se usa para comunicar dos entidades. las LAN se estudian en el Capítulo 14.

Figura 3.21 *Aproximación burda de una señal digital usando el primer armónico para el caso peor.*

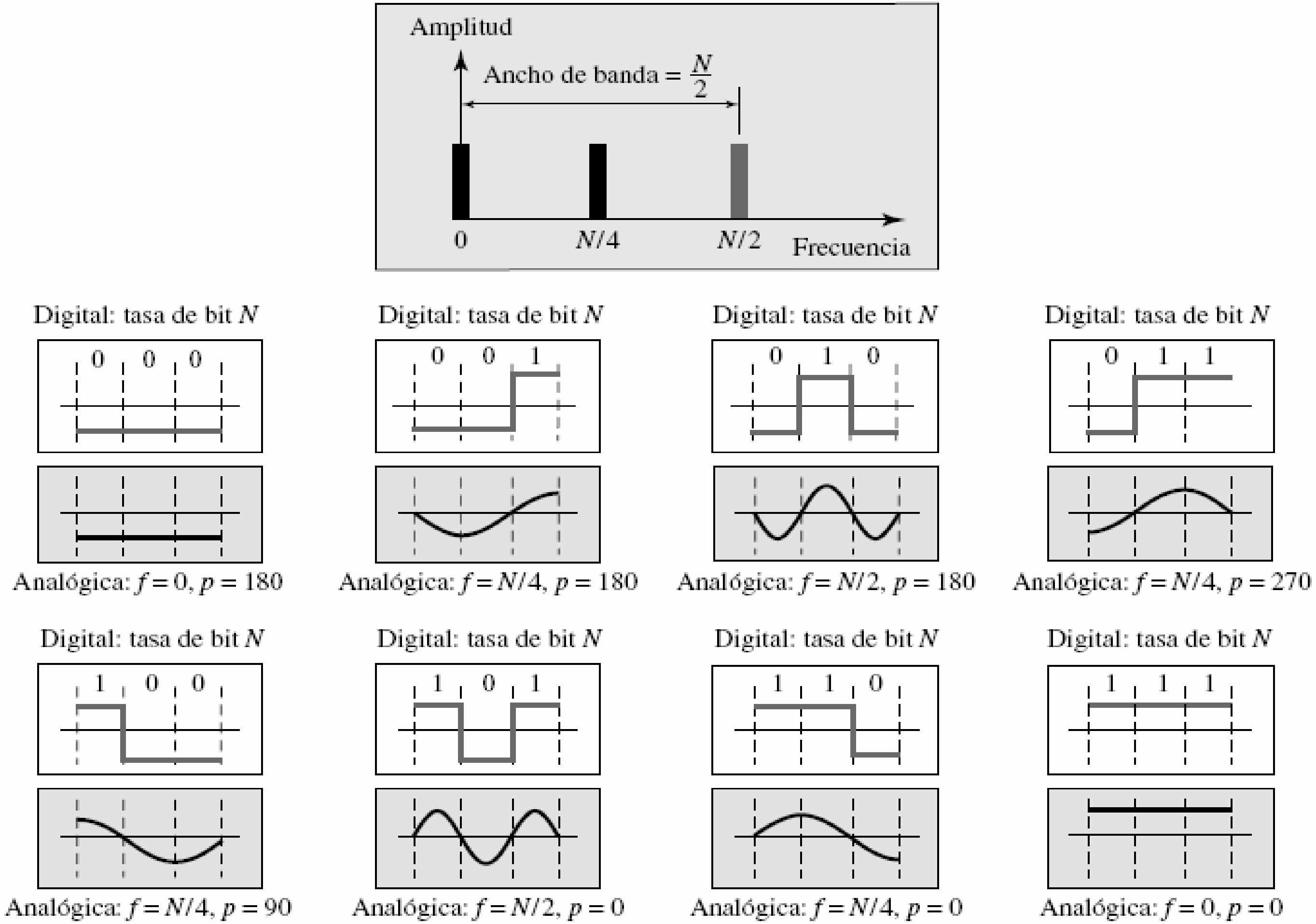
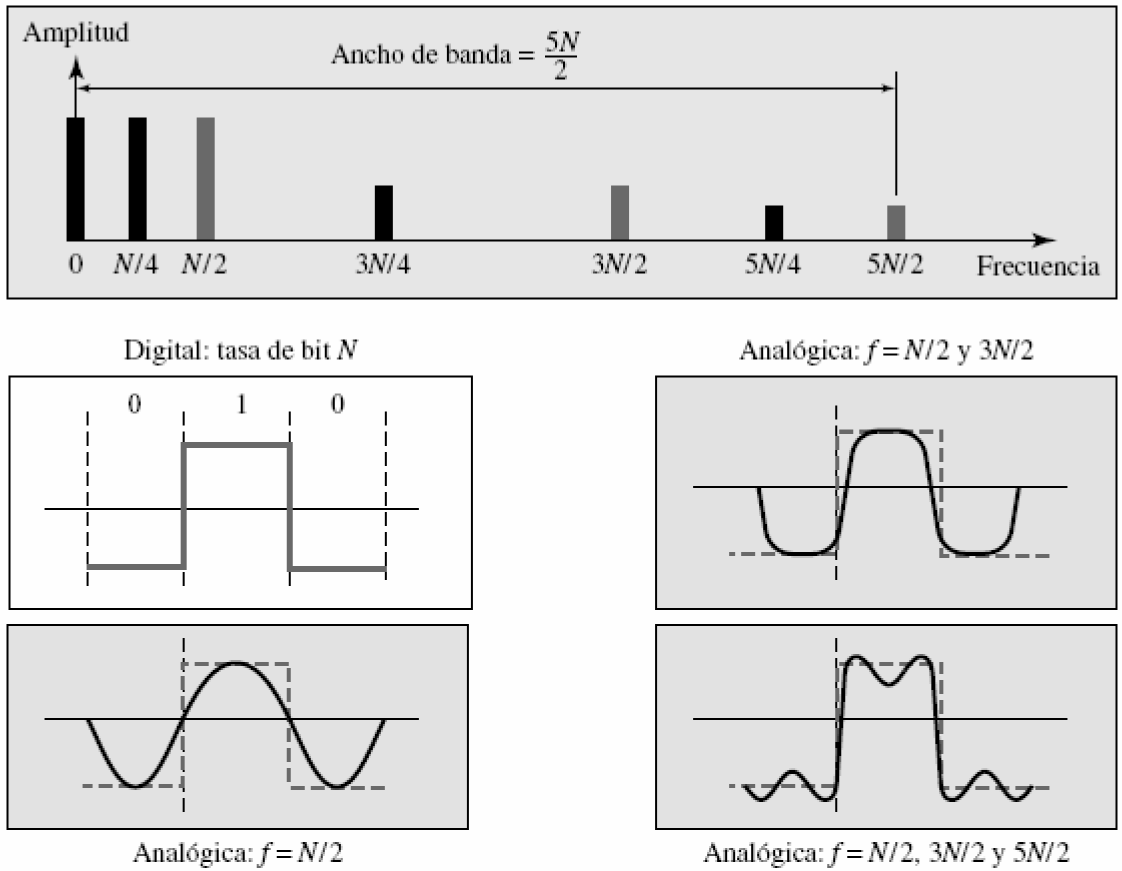


Figura 3.22 *Simulación de una señal digital con sus tres primeros armónicos.*



Nota

En la transmisión banda base, el ancho de banda necesario es proporcional a la tasa de bits; si hace falta enviar los bits más rápido, se necesita más ancho de banda.

Tabla 3.2 *Requisitos de ancho de banda.*

Tasa de bit	*Armónico 1*	*Armónico 1, 3*	*Armónico 1, 3, 5*
n = 1 kbps	B = 500 Hz	B = 1,5 kHz	B = 2,5 kHz
n = 10 kbps	B = 5 kHz	B = 15 kHz	B = 25 kHz
n = 100 kbps	B = 50 kHz	B = 150 kHz	B = 250 kHz

Ejemplo 3.22

¿Cuál es el ancho de banda necesario para un canal paso bajo si se necesita enviar 1 Mbps usando transmisión banda base?

Solución

La respuesta depende de la precisión deseada.

***a.** EL ancho de banda mínim, para una aproximación burda, es B = tasa de bit /2, o 500 kHz.*

***b.** Se consigue un mejor resultado usando los armónicos primero y tercero, siendo el ancho de banda necesario*

$B = 3 \times 500$ kHz $= 1.5$ MHz.

***c.** Se puede conseguir un resultado todavía mejor usando los armónicos primero, tercero y quinto con* $B = 5 \times 500$ kHz $= 2.5$ MHz.

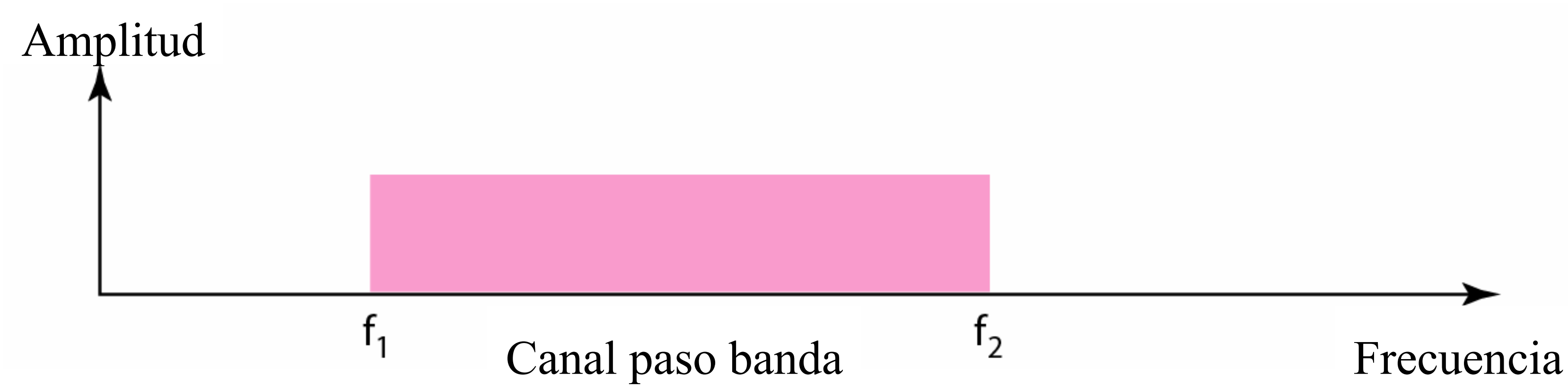
Ejemplo 3.23

Si se tiene un canal paso bajo con un ancho de banda de 100 kHz. ¿Cuál es el máximo ancho de banda de ese canal?

Solución

La velocidad máxima se puede conseguir usando el primer armónico. La tasa de bits es 2 veces el ancho de banda disponible, o 200 kbps.

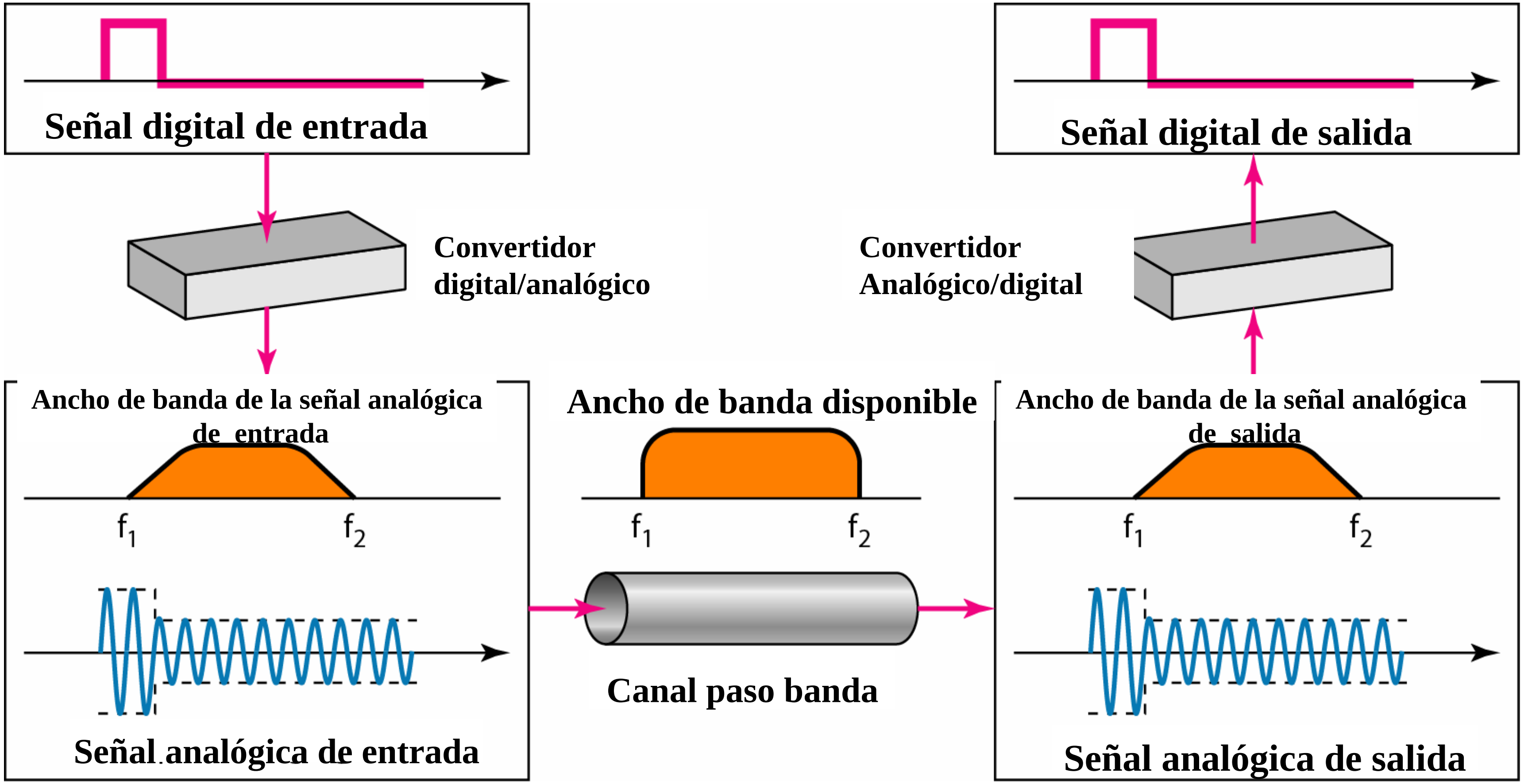
Figura 3.23 ***Ancho de banda de un canal paso banda.***



Nota

Si el canal disponible es un canal paso banda, no se puede enviar la señal digital directamente al canal; es necesario convertir la señal digital a una señal analógica antes de la transmisión.

Figura 3.24 ***Modulación de una señal digital para la transmisión sobre un canal paso banda.***



Ejemplo 3.24

Un ejemplo de transmisión banda ancha usando modulación es el envío de datos de una computadora a través de una línea telefónica, la línea que conecta a un residente con la oficina central de la telefónica. Estas líneas están diseñadas para transportar voz con un ancho de banda limitado. a solución es considerarlo un canal paso banda, convertir la señal digital de la computadora a una señal analógica y enviar la señal analógica. se pueden instalar dos convertidores para convertir la señal digital a analógica y viceversa en el receptor.En este caso, el convertidor se denomina ModEM (modulador/demodulador), que se estudiará en detalle en el Capítulo 5.

Ejemplo 3.25

Un segundo ejemplo es el teléfono móvil digital. Para una mejor recepción, los teléfonos móviles convierten la señal analógica de la voz a una señal digital (véase el Capítulo 16). Aunque el ancho de banda asignado a una compañía que proporciona servicios de telefonía móvil es muy grande, todavía no se puede la señal digital sin conversión. La razón es que sólo hay disponible un canal paso banda entre el que llama y el llamado. Es necesario convertir la señal digital de voz a una señal analógica compuesta antes de enviarla.

3-4 DETERIORO DE LA TRANSMISION

Las señales viajan a través de medios de transmisión, que no son perfectos. las imperfecciones pueden causar deterioros en las señales. Esto significa que la señal al principio y al final del medio es distinta. Lo que se ha enviado no es lo recibido. Habitualmente ocurren tres tipos de deterioro: atenuación, distorsión y ruido.

Tema a tratar en esta sección

Atenuación
Distorsión
Ruido

Figura 3.25 *Tipos de deterioro.*

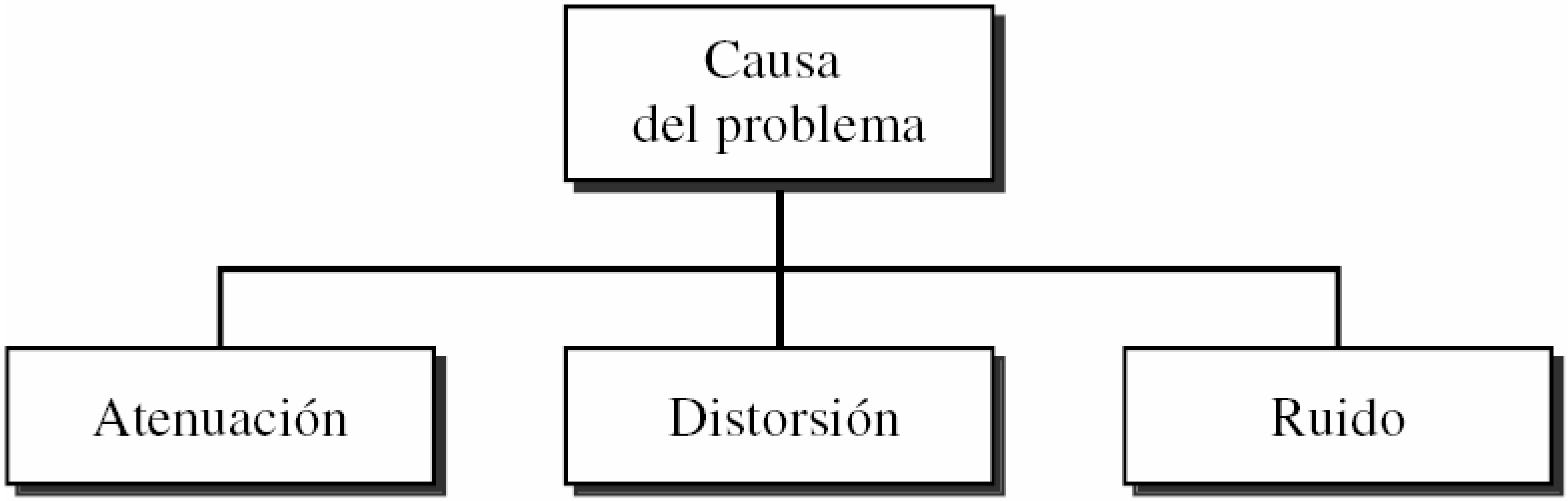
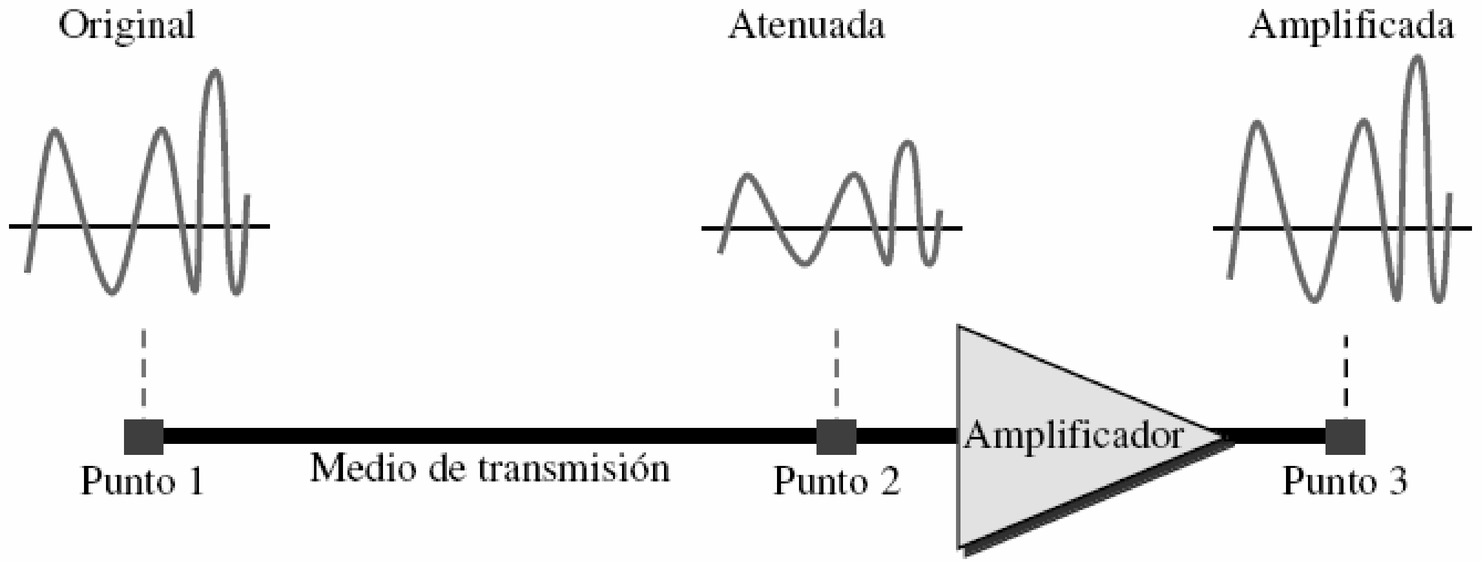


Figura 3.26 ***Atenuación.***



Ejemplo 3.26

Imagine que la señal viaja a través de un medio de transmisión y que su potencia se reduce a la mitad. Esto significa que P2 = (1/2) P1. En este caso, la atenuación (pérdida de señal) se puede calcular como

$$10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10 \log_{10} \frac{0.5 P_1}{P_1} = 10 \log_{10} 0.5 = 10(-0.3) = -3 \text{ dB}$$

Una pérdida de 3 dB (-3 dB), es equivalente a perder la mitad de potencia.

Ejemplo 3.27

Una señal pasa a través de un amplificador y su potencia se incrementa 10 veces. Esto significa que P2 = 10 P1. En este caso la amplificación (ganancia) se puede calcular como

$$10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10 \log_{10} \frac{10P_1}{P_1}$$

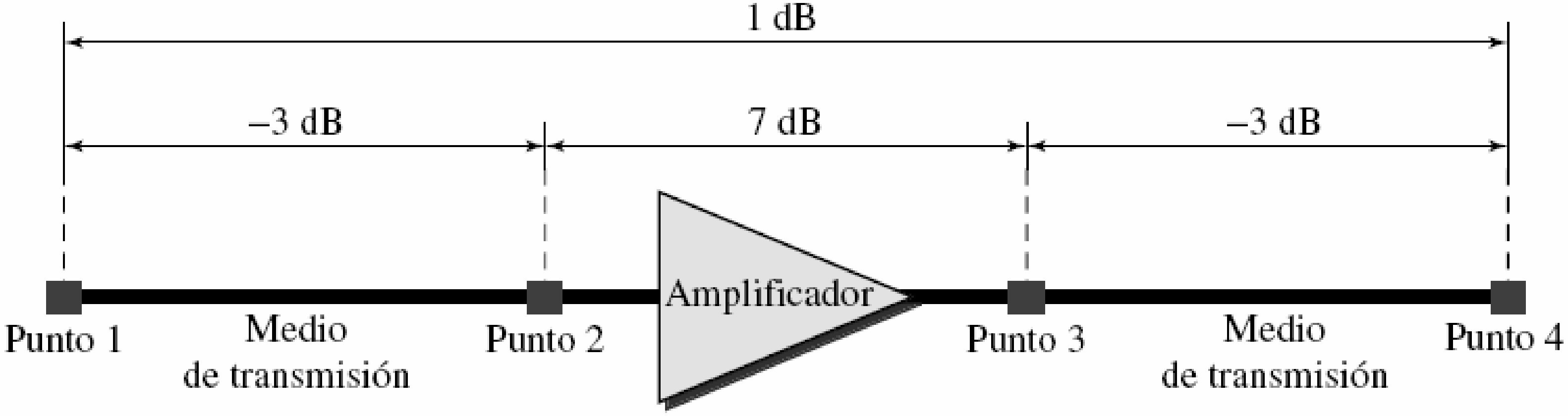
$$= 10 \log_{10} 10 = 10(1) = 10 \text{ dB}$$

Ejemplo 3.28

Una de las razones por la que los ingenieros usan los decibelios para medir los cambios de potencia de una señal es que los números decibelios se pueden sumar (o restar) cuando se miden varios puntos en lugar de dos (cascada). La Figura 3.27 muestra una señal que viaja una larga distancia desde el punto 1 al punto 4. En este caso, los decibelios se pueden calcular como

$$\boxed{\mathrm{dB} = -3 + 7 - 3 = +1}$$

Figura 3.27 *Decibelios para el ejemplo 3.28.*



Example 3.29

A veces, el decibelio se usa para medir la potencia de la señal en milivatios. En este caso, se indica como dBm y se calcula como dBm = 10 log10(Pm), donde Pm es la potencia en milivatios. Calcule la potencia de una señal si dBm = -30.

Solución

Se calcula la potencia de la señal como

$$\text{dB}_m = 10 \log_{10}(P_m) = -30$$

$$\log_{10}(P_m) = -3 \qquad P_m = 10^{-3} \text{ mW}$$

Ejemplo 3.30

La pérdida en un cable se define habitualmente en decibelios por kilómetro (dB/km). si la señal al principio del cable son -0,3 dB/km tiene una potencia de 2 mW, ¿Cuál es la potencia de la señal a los 5 km?

Solución

La pérdida en el cable es 5 × (-0,3) = -1,5 dB. se puede calcular la potencia como

$$\mathrm{dB} = 10\log_{10}\frac{P_2}{P_1} = -1{,}5$$

$$\frac{P_2}{P_1} = 10^{-0{,}15} = 0{,}71$$

$$P_2 = 0{,}71 P_1 = 0{,}7 \times 2 = 1{,}4\,\mathrm{mW}$$

Figura 3.28 *Distorsión*

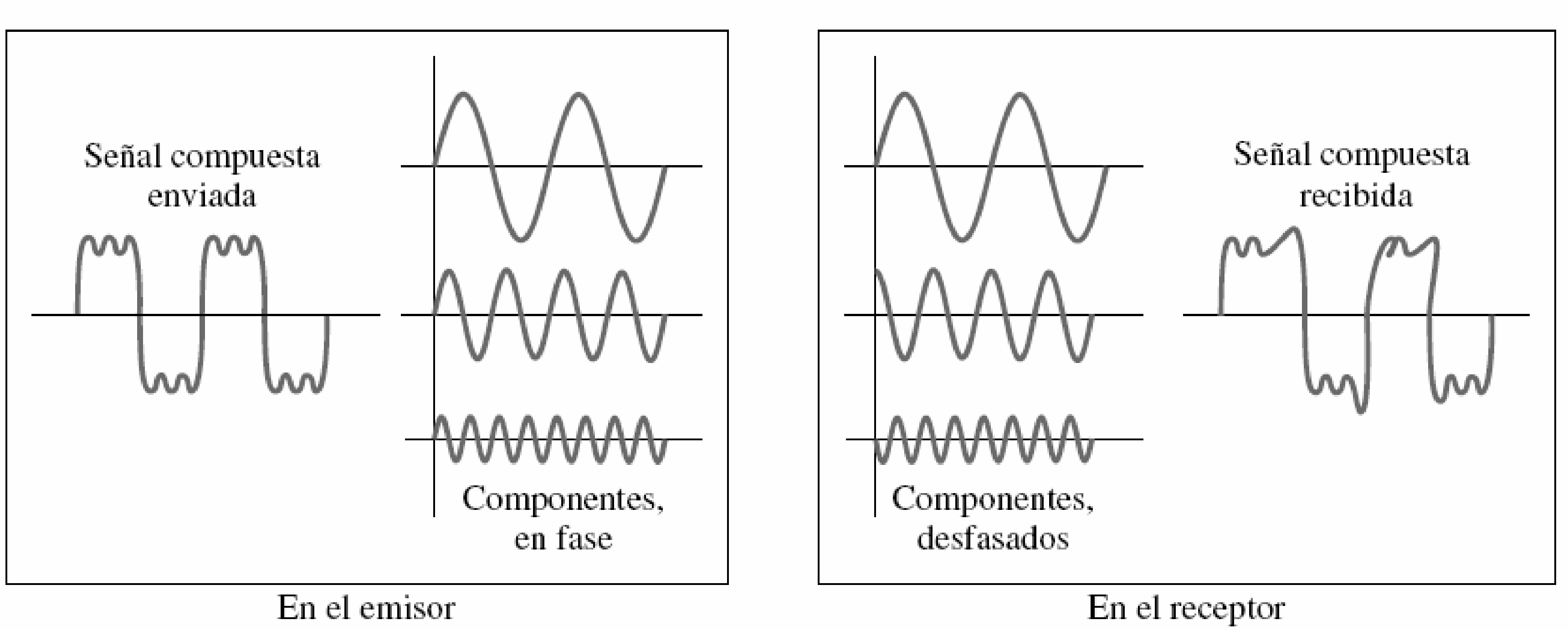
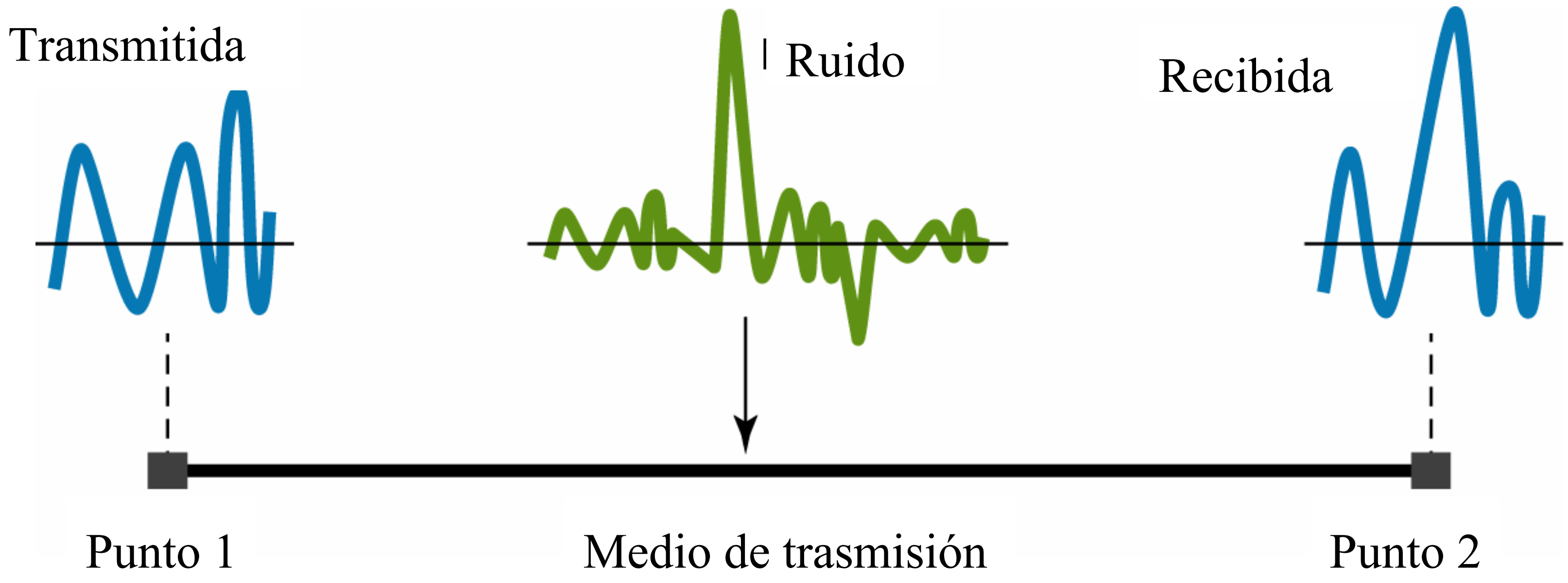


Figura 3.29 ***Ruido***



Ejemplo 3.31

La potencia de una señal es 10 mW y la potencia del ruido es 1 μW; ¿Cuáles son los valores de SNR y de SNR_{dB}?

Solución

Los valores SNR y de SNR_{dB} se pueden calcular como sigue:

$$\mathrm{SNR} = \frac{10.000\mu\mathrm{W}}{1\mu\mathrm{W}} = 10.000\mu\mathrm{W}$$

$$\mathrm{SNR}_{\mathrm{dB}} = 10\log_{10} 10.000 = 10\log_{10} 10^4 = 40$$

Ejemplo 3.32

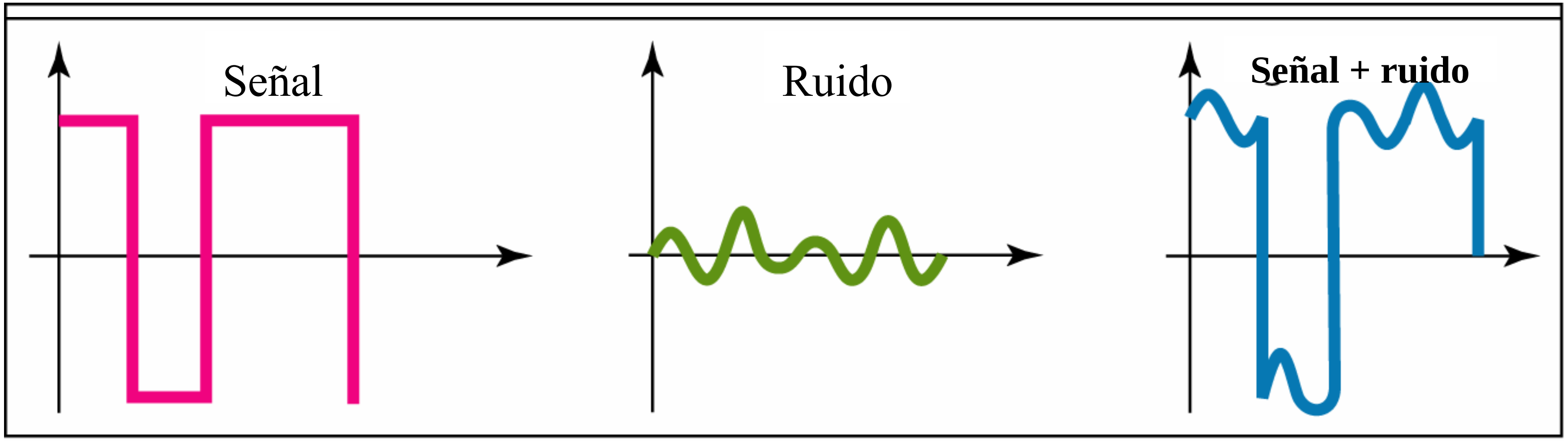
Los valores de SNR y SNR$_{dB}$ para un canal sin ruido son

$$\mathrm{SNR} = \frac{\text{potencia señal}}{0} = \infty$$

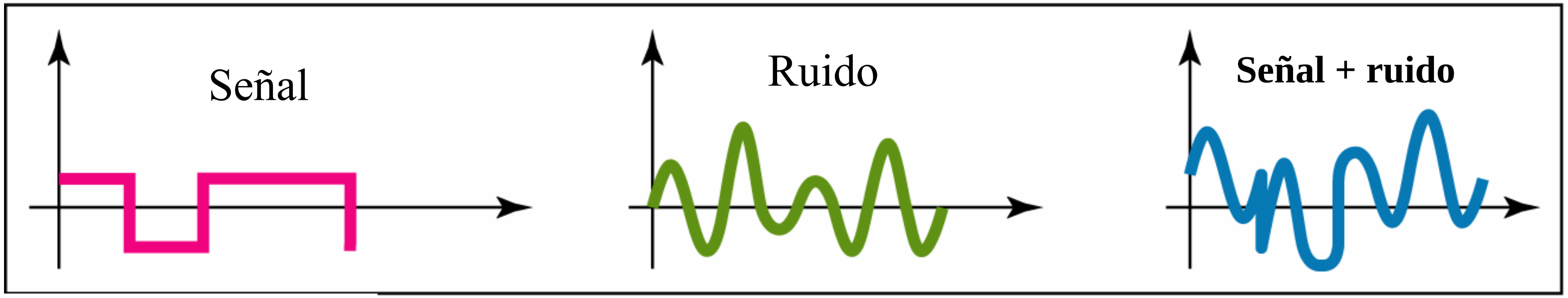
$$\mathrm{SNR_{dB}} = 10 \log_{10} \infty = \infty$$

No se puede conseguir esta ratio en la vida real; es un ideal.

Figura 3.30 *Dos casos de SNR: una SNR alta y una baja SNR*



a. SNR grande



b. SNR pequeña

3-5 LÍMITES DE LA VELOCIDAD DE DATOS

Una consideración importante en la transmisión de datos es lo rápido que se pueden enviar por un canal, en bits por segundo. La velocidad de los datos depende de tres factores:

1. El ancho de banda disponible.
2. Los niveles de señal que se usan.
3. La calidad del canal (el nivel de ruido).

Temas a tratar en esta sección

Canal sin ruido: Tasa de bists de Nyquist
Canal con ruido:Capacidad de Shannon
Usando ambos límites

Nota

Incrementar los niveles de la señal reduce la fiabilidad del sistema.

Ejemplo 3.33

¿Se ajusta la velocidad del teorema de Nyquist con la descrita intuitivamente en la transmisión banda base?

Solución

Coinciden cuando sólo hay dos niveles. En transmisión banda base, se dijo que la tasa de bits es 2 veces el ancho de banda sólo si se usa el primer armónico en el caso peor. Sin embargo la fórmula de Nyquist es más general que la que se derivó intuitivamente; se puede aplicar a transmisión banda base y modulación. También se puede aplicar cuando hay dos o más niveles de señal.

Ejemplo 3.34

Considere un canal sin ruido con un ancho de banda de 3000 Hz transmitiendo una señal con dos niveles. La velocidad máxima se puede calcular como

$$\text{TasadeBits} = 2 \times 3000 \times \log_2 2 = 6000 \text{ bps}$$

Ejemplo 3.35

Considere el mismo canal sin ruido transmitiendo una señal con 4 nivles (por cada nivel se envían 2 bits). La velcocidad máxima se puede calcular como

$$\text{TasadeBits} = 2 \times 3000 \times \log_2 4 = 12.000 \text{ bps}$$

Ejemplo 3.36

Necesitamos enviar 256 kbps por un canal sin ruido con un ancho de banda de 20 kHz. ¿Cuántos niveles de señal son necesarios?

Solución

Se puede usar la fórmula de Nyquist como sigue:

$$265.000 = 2 \times 20.000 \times \log_2 L$$

$$\log_2 L = 6{,}625 \qquad L = 2^{6{,}625} = 98{,}7 \text{ niveles}$$

Puesto que el resultado no es una potencia de 2, es necesario incrementar el número de niveles o reducir la velocidad. Si se tienen 128 niveles, la velocidad es de 280 kbps. Si se usan 64 niveles, la velocidad es de 240 kbps.

Ejemplo 3.37

Sea un canal extremadamente ruidoso en el cual el valor de la relación señal-ruido es así cero. En otras palabras, el ruido es tan alto que la señal es muy débil. Para este canal, la capacidad C se calcula como:

$$C = B \log_2 (1 + \mathrm{SNR}) = B \log_2 (1 + 0) = B \log_2 1 = B \times 0 = 0$$

Esto significa que la capacidad de este canal es 0 independientemente de su ancho de banda. En otras palabras, no se pueden recibir datos a través de este canal.

Ejemplo 3.38

Vamos a calcular la tasa de bit máxima teórica para una línea telefónica regular. Una línea telefónica tiene habitualmente un ancho de banda de 3000 Hz (300 Hz a 3300 Hz). La razón ruido-señal es habitualmente 3162 (35 dB). La capacidad de este canal se calcula como

$$C = B \log_2 (1 + \mathrm{SNR}) = 3000 \log_2 (1 + 3162) = 3000 \log_2 (3163)$$
$$= 3000 \times 11{,}62 = 34.860 \text{ bps}$$

Esto significa que la tasa de bit máxima para una línea telefónica es 34,860 Kbps. Si se quiere enviar datos más rápido sería necesario incrementar el ancho de banda de la línea o mejorar la razón ruido-señal.

Ejemplo 3.39

La razón señal-ruido se expresa a menudo en decibelios. Asuma que SNR_{dB} = 36 y que el ancho de banda del cnal es 2 MHz. La capacidad teórica del canal se puede calcular como

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} SNR \;\longrightarrow\; SNR = 10^{SNR_{dB}/10} \;\longrightarrow\; SNR = 10^{3,6} = 3981$$

$$C = B \log_2 (1+SNR) = 2 \times 10^6 \times \log_2 3982 = 24 \text{ Mbps}$$

Ejemplo 3.40

Para propósitos prácticos, cuando el SNR es muy alto, se puede asumir que SNR + 1 es casi la misma que SNR. En estos casos, la capacidad teórica del canal se puede simplificar como

$$\boxed{C = B \times \frac{\mathrm{SNR}_{\mathrm{dB}}}{3}}$$

Por ejemplo, se puede calcular la capacidad teórica del ejemplo anterior como

$$\boxed{C = 2\ \mathrm{MHz} \times \frac{36}{3} = 24\ \mathrm{Mbps}}$$

Ejemplo 3.41

se tiene un canal con un ancho de banda de 1 MHz. El SNR de este canal es 63. ¿Cuáles son la velocidad y el nivel de la señal apropiados?

Solución

Primero se usa la fórmula de shannon para encontrar el límite superior.

$$C = B \log_2 (1 + \text{SNR}) = 10^6 \log_2 (1 + 63) = 10^6 \log_2 64 = 6 \text{ Mbps}$$

Example 3.41 (continued)

The Shannon formula gives us 6 Mbps, the upper limit. For better performance we choose something lower, 4 Mbps, for example. Then we use the Nyquist formula to find the number of signal levels.

$$\boxed{4 \text{ Mbps} = 2 \times 1 \text{ MHz} \times \log_2 L \quad \longrightarrow \quad L = 4}$$

Nota

La capacidad de Shannon nos da el límite superior; la fórmula de Nyquist nos dice cuántos niveles de señal son necesarios.

3-6 PRESTACIONES

Un aspecto importante en redes son las prestaciones (rendimiento) de la red— ¿cómo es de buena? En el Capítulo 24 se trata la calidad de servicio y la medida de las prestaciones globales de una red con gran detalle. En esta sección se presentan términos que se necesitarán en capítulos futuros.

Temas a tratar en esta sección:

Ancho de banda
Rendimiento (Throughput)
Latencia (Retraso)
Producto ancho de banda- Retraso

Nota

En redes se usa el término ancho de banda en dos contextos.

- **El primero, ancho de *banda en herzios*, es el rango de frecuencias contenidas en una señal compuesta o el rango de frecuencias que un canal puede pasar.**

- **El segundo, ancho de banda en bits por segundo, se puede refiere a la velocidad de transmisión de bits en un canal o enlace.**

Ejemplo 3.42

El ancho de banda de una línea telefónica de abonado es 4 kHz para voz o datos. El ancho de banda de esta línea para transmisión de datos puede llegar hasta 56.000 bps usando un sofisticado MODEM para convertir la señal digital y analógica..

Example 3.43

Si la compañía telefónica mejora la calidad de la línea e incrementa el ancho de banda a 8 kHz, se pueden enviar 112.000 bps usando la misma tecnología que se explicó en el Ejemplo 3.42.

Ejemplo 3.44

Una red con un ancho de banda de 10 Mbps puede pasar sólo una media de 12.000 tramas por minuto, con cada trama llevando una media de 10.000 bits. ¿Cuál es el rendimiento de esta red?

Solución

Se puede calcular el rendimiento como

$$\text{Rendimiento} = 12.000 \times 10.000 / 60 = 2 \text{ Mbps}$$

En este caso, el rendimiento es casi un quinto del ancho de banda.

Ejemplo 3.45

¿Cuál es el tiempo de propagación si la distancia entre dos puntos es 12.000 km? Asuma que la velocidad de propagación es 2,4 × 108 m/s en el cable.

Solución

Se puede calcular el tiempo de propagación como

$$\text{Tiempo de propagación} = \frac{12.000 \times 1000}{2{,}4 \times 10^8} = 50\,\text{m}$$

El ejemplo muestra que un bit puede cruzar el Océano Atlántico en sólo 50 ms si hay una cable directo entre el origen y el destino.

Ejemplo 3.46

¿Cuál es el tiempo de propagación y el de transmisión para un mensaje de 2,5 kbytes (un e-mail) si el ancho de banda de la red es 1 Gbps? Asuma que la distancia entre el emisor y el receptor es 12.000 km y que la luz viaja a $2{,}4 \times 10^8$ m/s.

Solución

Se pueden calcular los tiempos de propagación y el de transmisión como

Ejemplo 3.46 (continuación)

$$\text{Tiempo de propagación} = \frac{12.000 \times 1000}{2{,}4 \times 10^8} = 50\,\text{ms}$$

$$\text{Tiempo de transmisión} = \frac{2.500 \times 8}{10^9} = 0{,}020\,\text{ms}$$

Observe que en este caso, debido a que el mensaje es corto y el ancho de banda es alto, el factor dominante es el tiempo de propagación, no el tiempo de transmisión. El tiempo de transmisión se puede ignorar.

Ejemplo 3.47

¿Cuál es el tiempo de propagación y el de transmisión para un mensaje de 5 Mbytes (una imagen) si el ancho de banda de la red es 1 Mbps? Asuma que la distancia entre el emisor y el receptor es 12.000 km y que la luz viaja a 2,4 × 108 m/s.

Solución

Se pueden calcular los tiempos de propagación y el de transmisión como

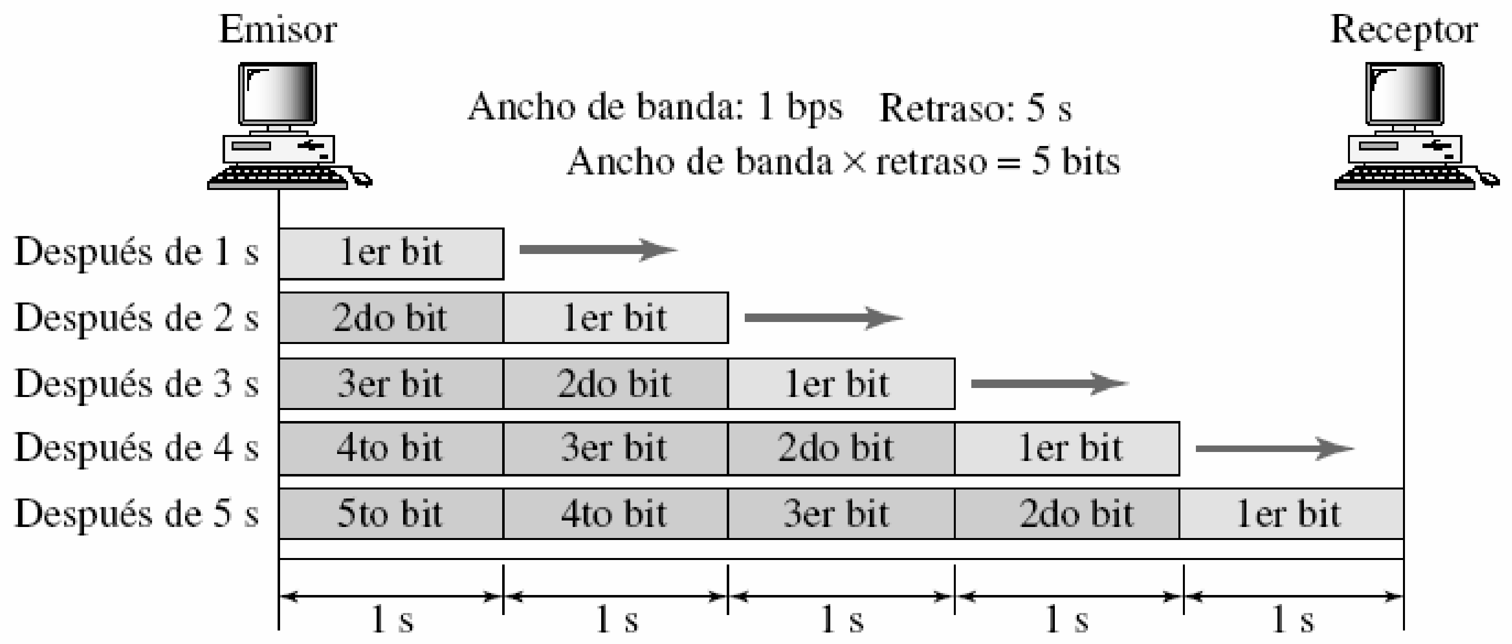
Ejemplo 3.47 (continuación)

$$\text{Tiempo de propagación} = \frac{12.000 \times 1000}{2{,}4 \times 10^8} = 50\,\text{ms}$$

$$\text{Tiempo de transmisión} = \frac{5.000.000 \times 8}{10^6} = 40\,\text{s}$$

Observe que en este caso, debido a que el mensaje es muy largo y el ancho de banda no es muy alto, el factor dominante es el tiempo de transmisión, no el tiempo de propagación. El tiempo de propagación se puede ignorar.

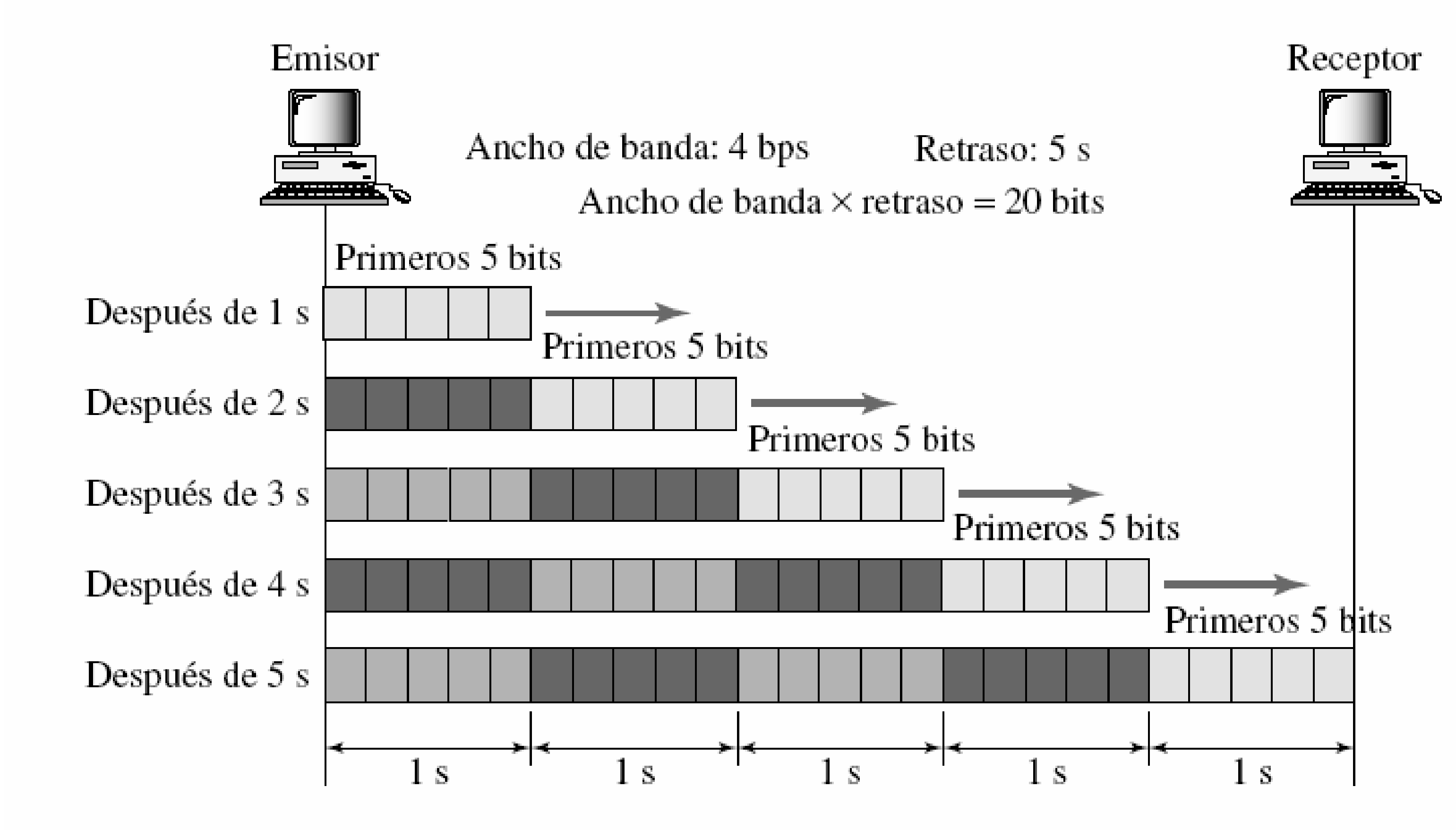
Figura 3.31 *Llenando el enlace de bits para el caso 1.*



Ejemplo 3.48

Se puede pensar en el enlace entre dos puntos como en una tubería. La sección transversal de la tubería representa el ancho de banda y la longitud el retraso. se puede decir que el volumen de la tubería define el producto ancho de banda-retraso, como se muestra en la Figura 3.33.

Figura 3.32 *Llenando el enlace de bits para el caso 2.*



Nota

El prodcuto ancho de banda-retraso define el número de bits que pueden llenar el canal.

Figura 3.33 *Concepto del producto ancho de banda-retraso.*