

*Transmisión de datos
y redes de comunicaciones*

4ª edición

Forouzan

Capítulo 4

Transmisión digital

4-1 CONVERSION DIGITAL A DIGITAL

*En esta sección, se va a ver cómo representar datos digitales utilizando señales digitales. La conversión involucra tres técnicas : **codificación de línea**, **codificación de bloques** y la **aleatorización** (Scrambling) La codificación de línea siempre es necesaria; la codificación de bloques y la aleatorización pueden no ser necesarios.*

Temas a tratar en esta sección:

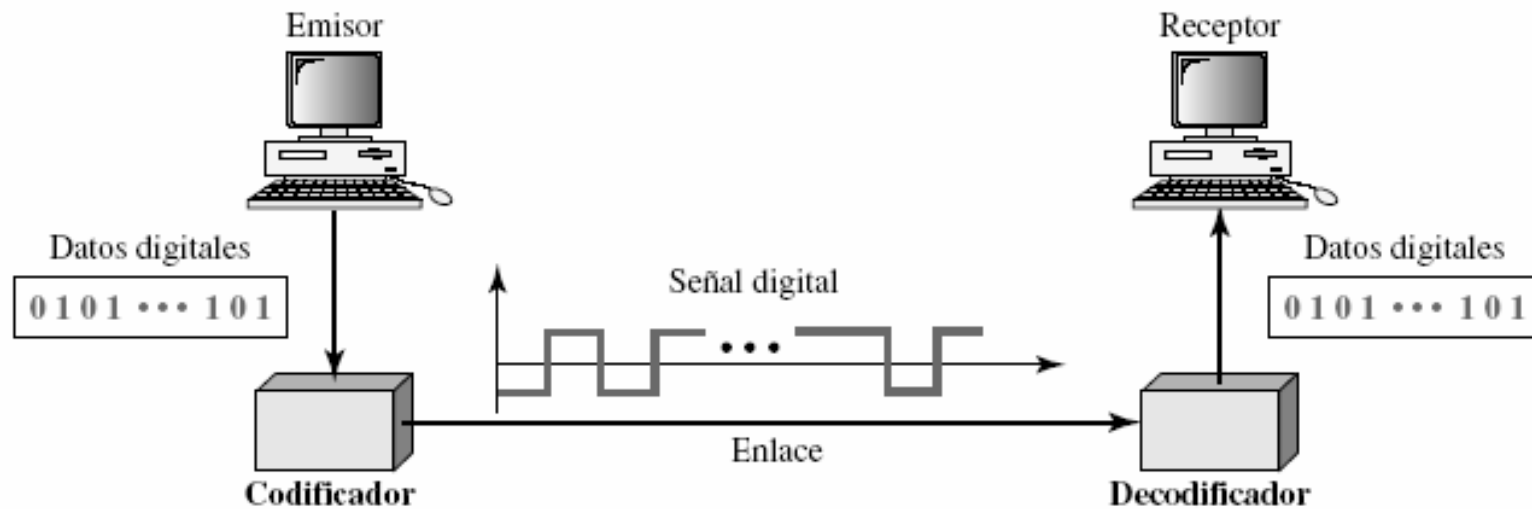
Codificación de línea

Esquemas de codificación de línea

Codificación de bloques

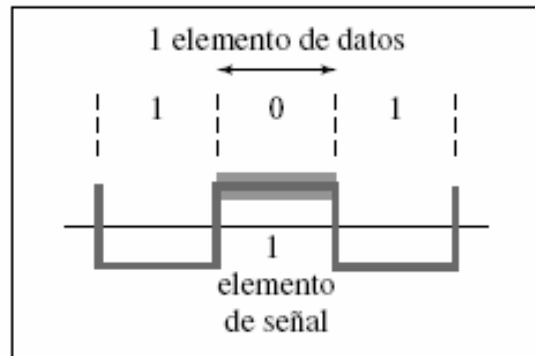
Aleatorización

Figura 4.1 *Codificación y decodificación de línea.*

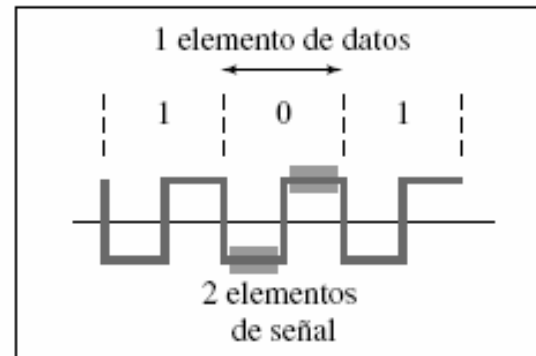


Codificación de línea: es el proceso de convertir datos digitales en señales digitales

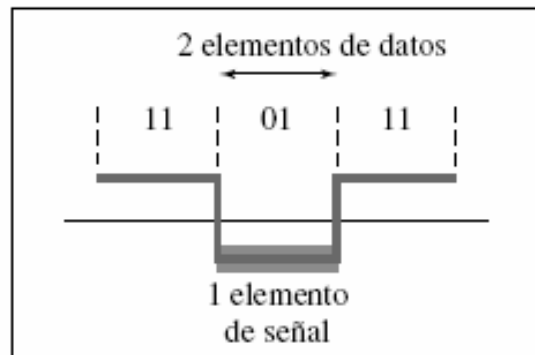
Figura 4.2 *Elemento de la señal frente a elemento de datos.*



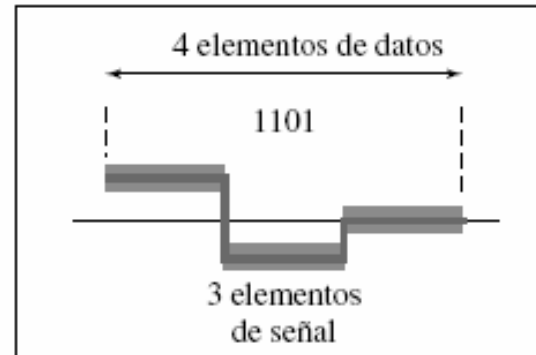
a. Un elemento de datos por un elemento de señal ($r = 1$)



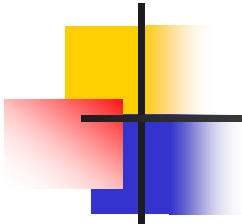
b. Un elemento de datos por dos elementos de señal ($r = \frac{1}{2}$)



c. Dos elementos de datos por un elemento de señal ($r = 2$)



d. Cuatro elementos de datos por tres elementos de señal ($r = \frac{4}{3}$)



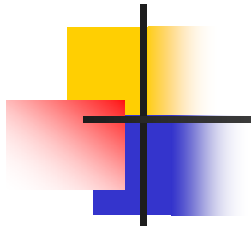
Ejemplo 4.1

Una señal transporta datos de forma que un elemento de datos se codifica como un elemento de señal ($r = 1$). si la tasa de bits es de 100 Kbps, ¿cuál es el valor medio de la tasa de baudios si c está entre 0 y 1?

Solución

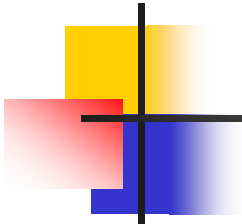
Se asume que el valor medio de $c=1/2$. La tasa de baudios es entonces:

$$S = c \times N \times \frac{1}{r} = \frac{1}{2} \times 100.000 \times \frac{1}{1} = 50.000 \text{ baudios} = 50 \text{ Kbaudios}$$



Nota

Aunque el ancho de banda real de una señal digital es infinito, el ancho de banda efectivo es finito.



Ejemplo 4.2

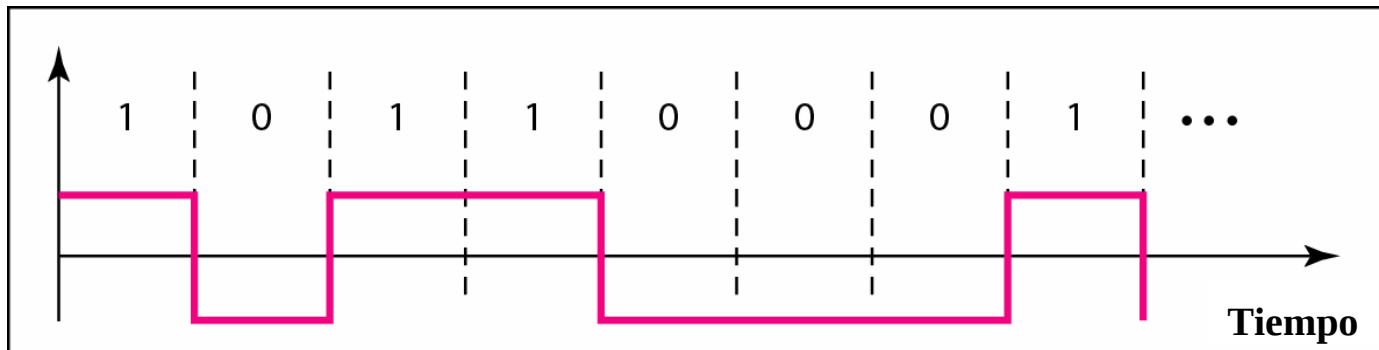
La máxima tasa de datos de un canal (véase el Capítulo 3) es $N_{\max} = 2 \times B \times \log_2 L$ (definido por la fórmula de Nyquist). ¿Coincide esto con la fórmula anterior para $N_{\max}$?

Solución

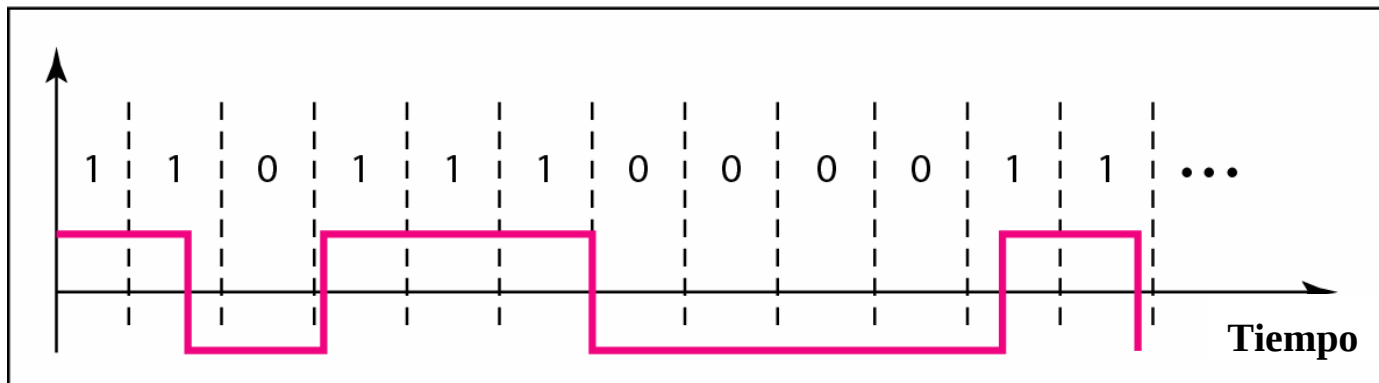
Una señal con L niveles puede transmitir $\log_2 L$ bits por nivel. Si cada nivel se corresponde con un elemento de señal y se asume el caso medio ($c = 1/2$), entonces:

$$N_{\max} = \frac{1}{c} \times B \times r = 2 \times B \times \log_2 L$$

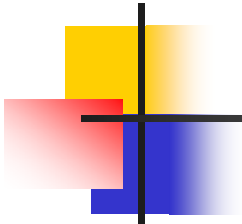
Figura 4.3 *Efecto de la falta de sincronización.*



a. Enviado



b. Recibido



Ejemplo 4.3

En una transmisión digital, el reloj del receptor es un 0,1 por ciento más rápido que el reloj del emisor. ¿Cuántos bits extra por segundo recibe el receptor si la tasa de datos es de 1 kbps? ¿Cuántos, si la tasa de datos es de 1 Mbps?

Solución

A 1 kbps, el receptor recibe 1001 bps en lugar de 1000 bps.

1000 bits enviados	1001 bits recibido	1 bps extra
--------------------	--------------------	-------------

A 1 Mbps, el receptor recibe 1.001.000 bps en lugar de 1.000.000 bps.

1.000.000 bits enviados	1.001.000 bits recibidos	1000 bits extra
-------------------------	--------------------------	-----------------

Figura 4.4 *Esquemas de codificación de la línea*

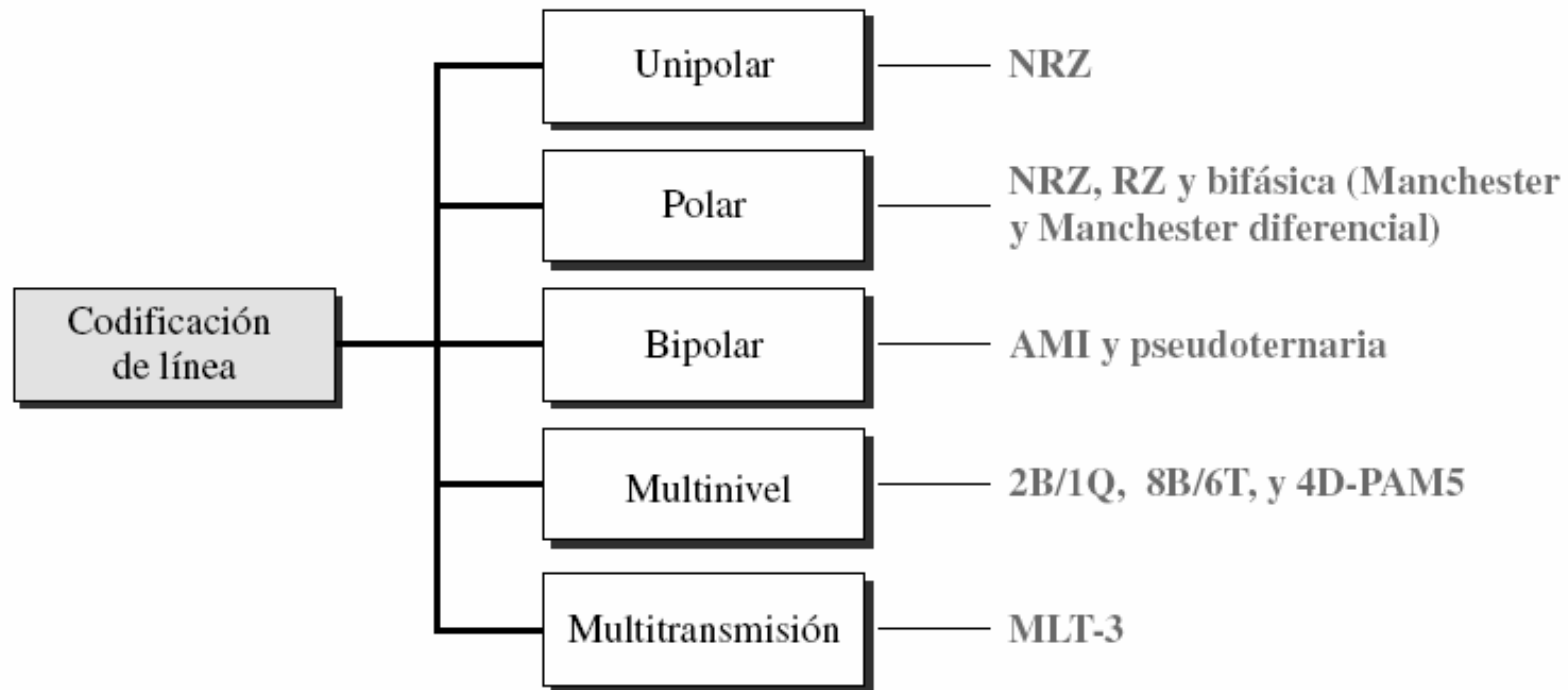
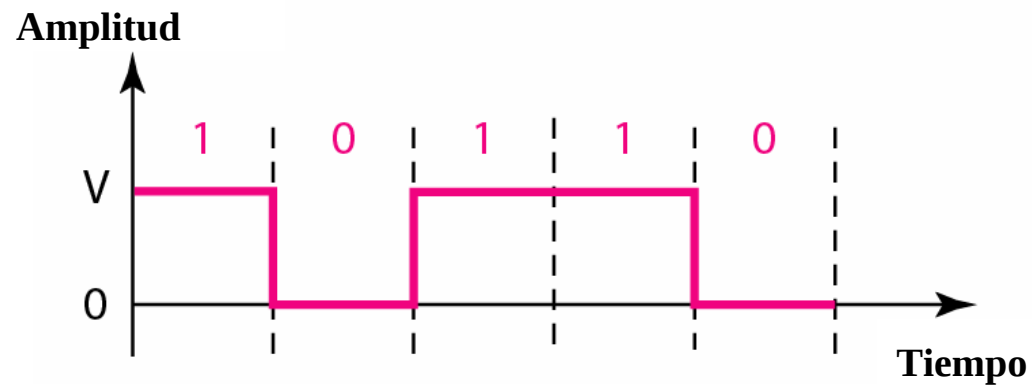


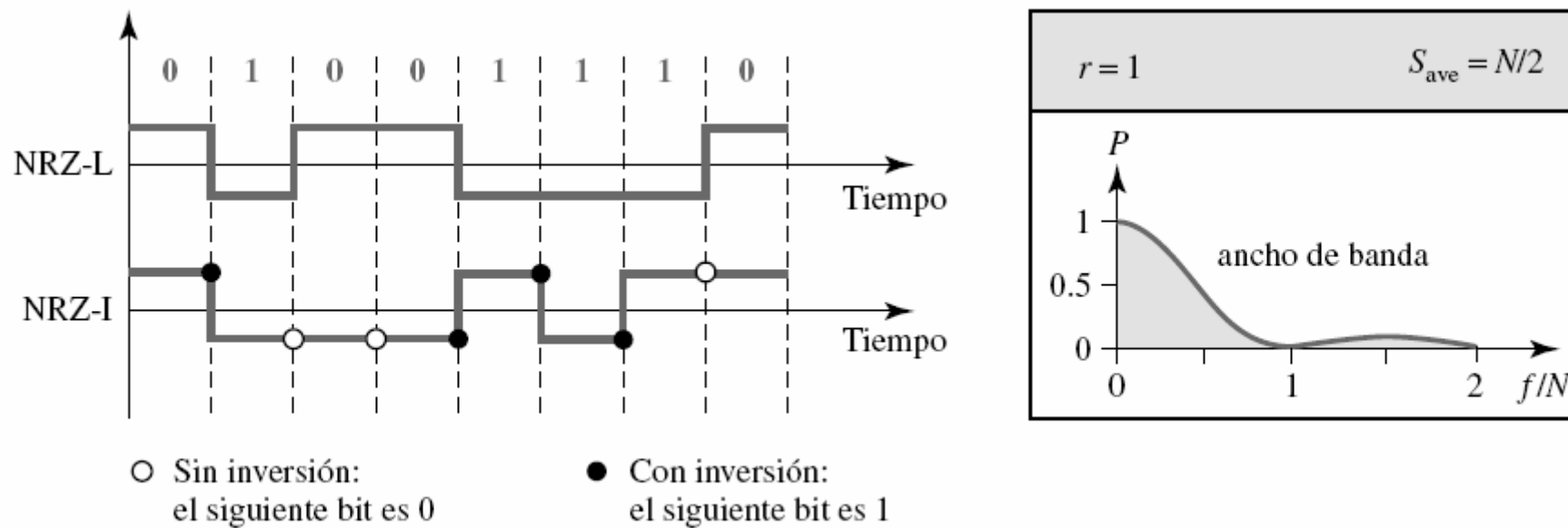
Figura 4.5 *Esquema unipolar NRZ*



$$\frac{1}{2}V^2 + \frac{1}{2}(0)^2 = \frac{1}{2}V^2$$

Potencia normalizada

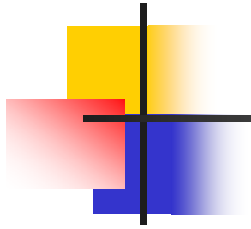
Figura 4.6 Esquemas polares NRZ-L y NRZ-I



Nota

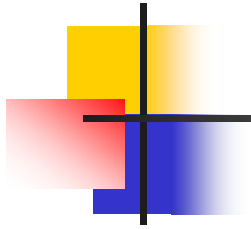
En NRZ-L el nivel de voltaje determina el valor del bit.

En NRZ-I la inversión determina el valor del bit.



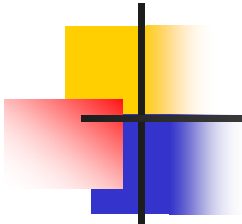
Nota

NRZ-L y NRZ-I tienen una tasa de señal media de $N/2$ baudios.



Nota

NRZ-L y NRZ-I tienen ambos un problema de componentes DC.



Ejemplo 4.4

Un sistema utiliza NRZ-I para transferir datos a 10-Mbps. ¿Cuál es la tasa de señal media y el ancho de banda mínimo?

Solución

La tasa de señal media es $S = N/2 = 500$ Kbaudios. El ancho de banda mínimo para esta tasa de baudios media es $B_{\min} = S = 500$ kHz.

Figura 4.7 *Esquema RZ polar.*

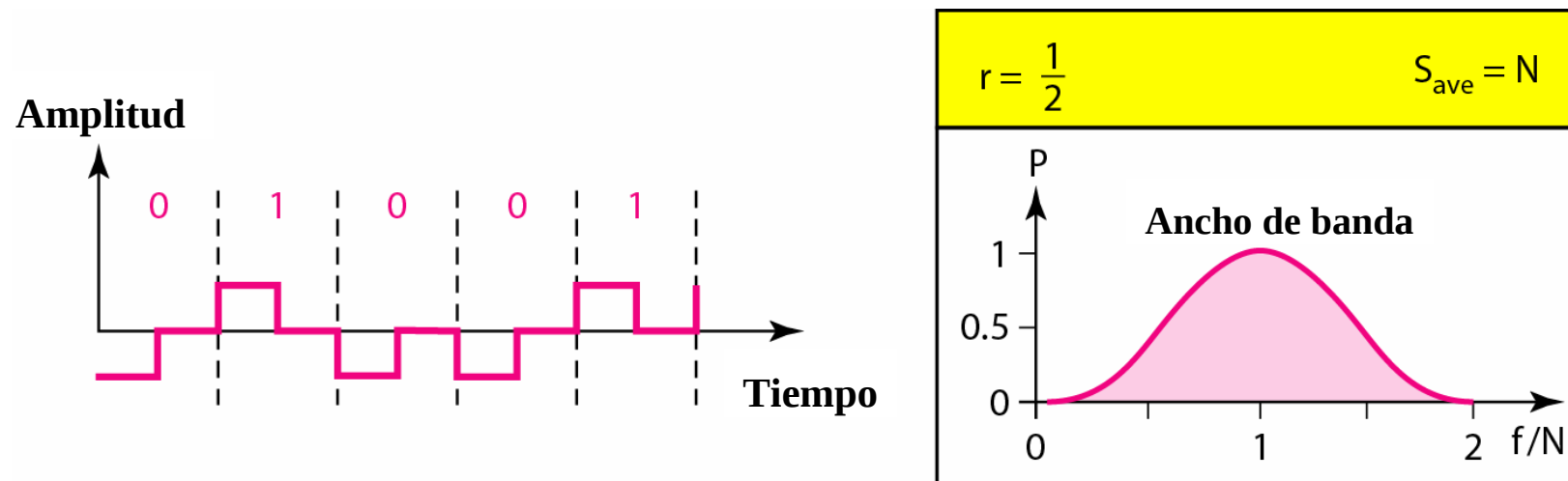
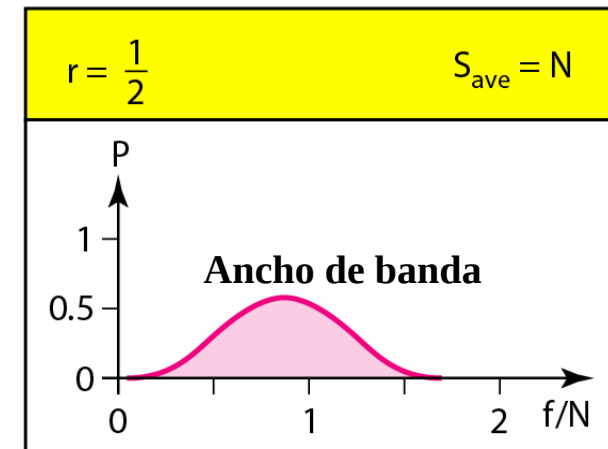
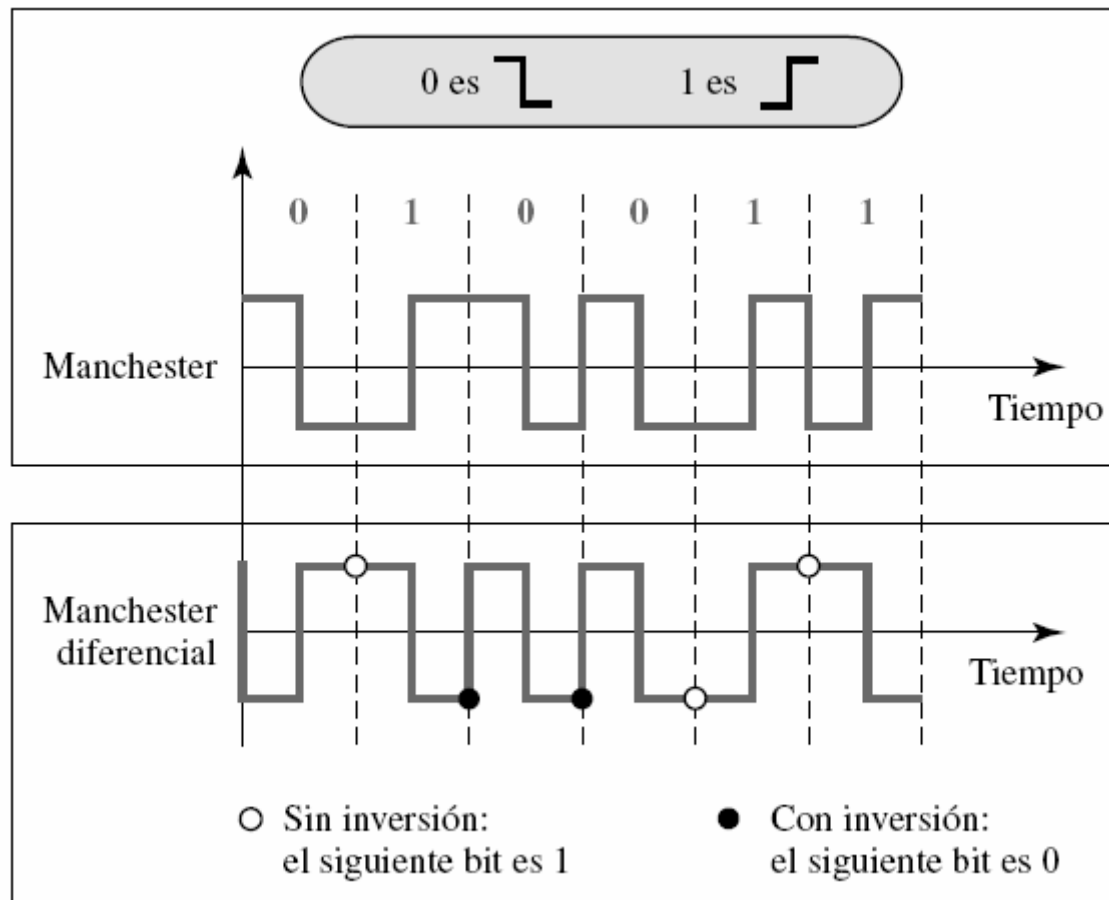
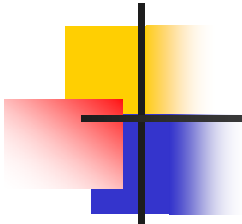


Figura 4.8 *Bifásica polar: Esquemas Manchester y Manchester diferencial.*



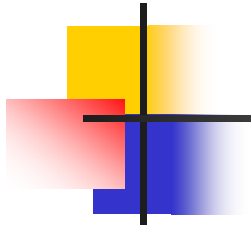
Nota

En una codificación Manchester y Manchester diferencial, la transición en la mitad de bit se utiliza para ofrecer sincronización.



Nota

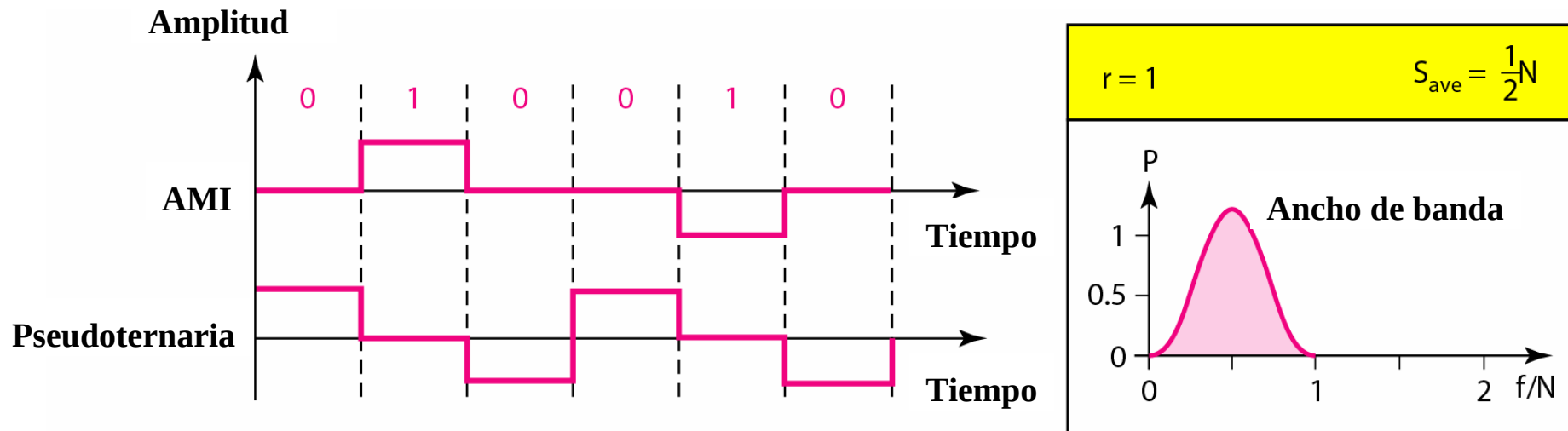
El ancho de banda mínimo de los esquemas Manchester y Manchester diferencial es dos veces el de NRZ.



Nota

En la codificación bipolar, se utilizan tres niveles: positivo, negativo y cero.

Figura 4.9 *Esquemas bipolares: AMI y pseudoternaria.*



Nota

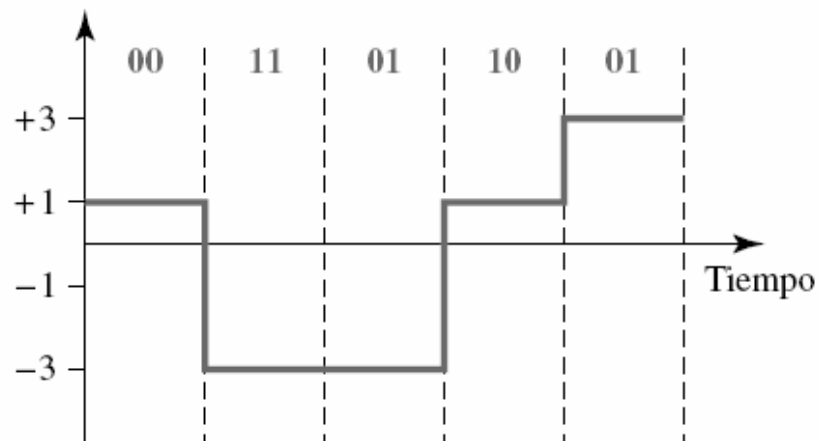
En los esquemas mBnL, un patrón de m elementos de datos se codifica como un patrón de n elementos de señal donde

$$2^m \leq L^n.$$

Figura 4.10 *Esquema multinivel 2B1Q.*

Bits siguientes	Nivel anterior: positivo	Nivel anterior: negativo
	Siguiente nivel	Siguiente nivel
00	+1	-1
01	+3	-3
10	-1	+1
11	-3	+3

Tabla de transición



Asumiendo un nivel original positivo

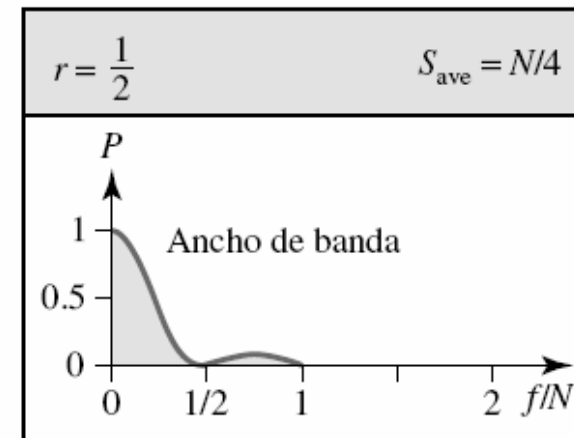


Figura 4.11 *Esquema multinivel 8B6T.*

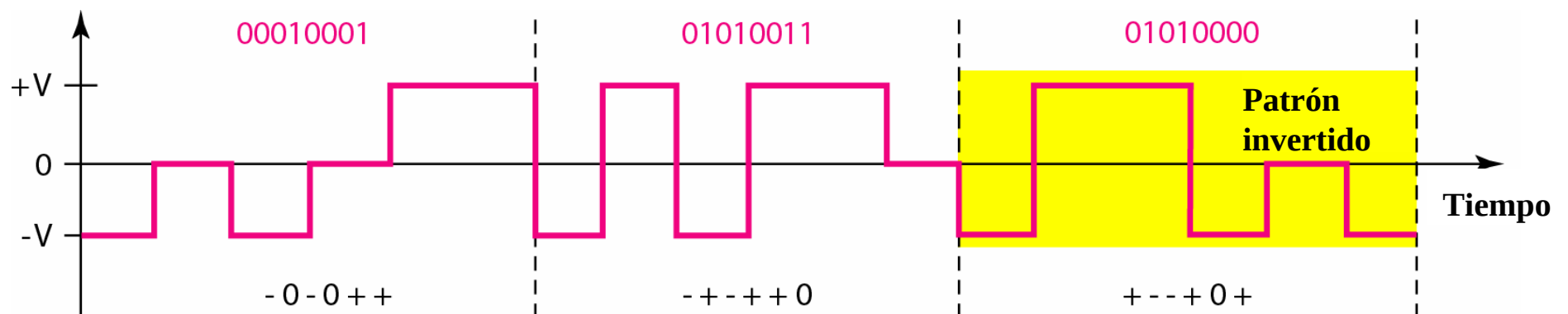


Figura 4.12 *Esquema multinivel 4D-PAM5.*

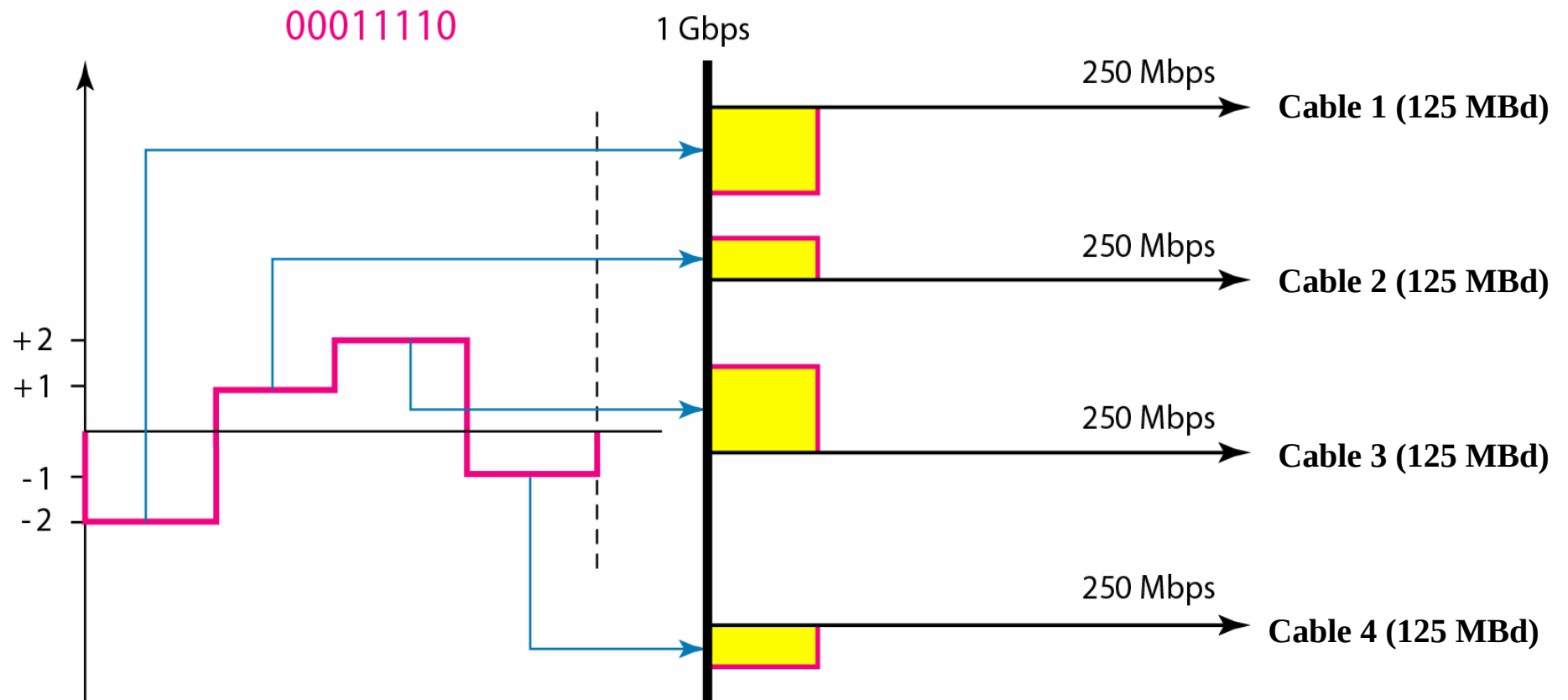
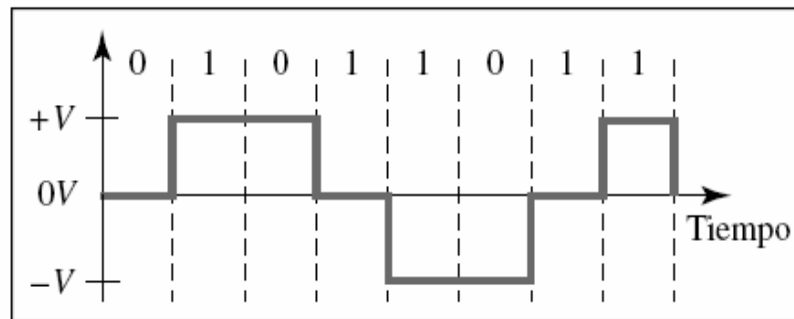
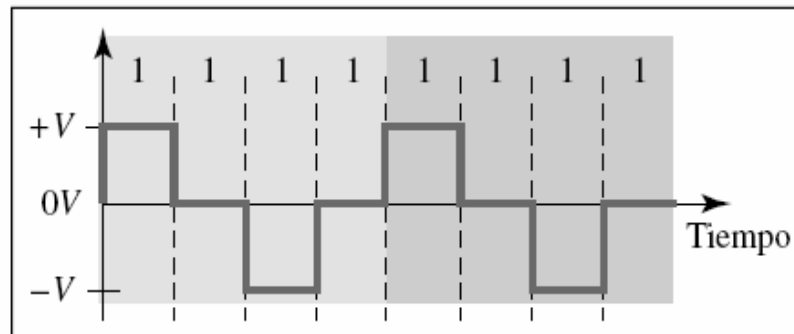


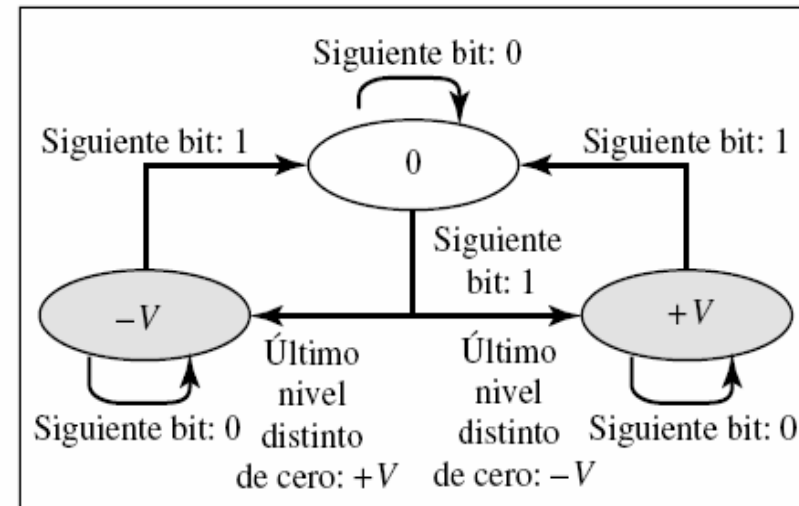
Figura 4.13 *Esquema de multitransmisión MLT-3.*



a. Caso típico



b. Caso peor



c. Estados de transición

Tabla 4.1 *Resumen de los esquemas de codificación de línea.*

<i>Category</i>	<i>Scheme</i>	<i>Bandwidth (average)</i>	<i>Characteristics</i>
Unipolar	NRZ	$B = N/2$	Costly, no self-synchronization if long 0s or 1s, DC
Unipolar	NRZ-L	$B = N/2$	No self-synchronization if long 0s or 1s, DC
	NRZ-I	$B = N/2$	No self-synchronization for long 0s, DC
	Biphase	$B = N$	Self-synchronization, no DC, high bandwidth
Bipolar	AMI	$B = N/2$	No self-synchronization for long 0s, DC
Multilevel	2B1Q	$B = N/4$	No self-synchronization for long same double bits
	8B6T	$B = 3N/4$	Self-synchronization, no DC
	4D-PAM5	$B = N/8$	Self-synchronization, no DC
Multiline	MLT-3	$B = N/3$	No self-synchronization for long 0s

Nota

La codificación de bloques normalmente se conoce como codificación mB/nB ; reemplaza cada grupo de m bits por un grupo de n bits

Figura 4.14 *Concepto de codificación de bloques*

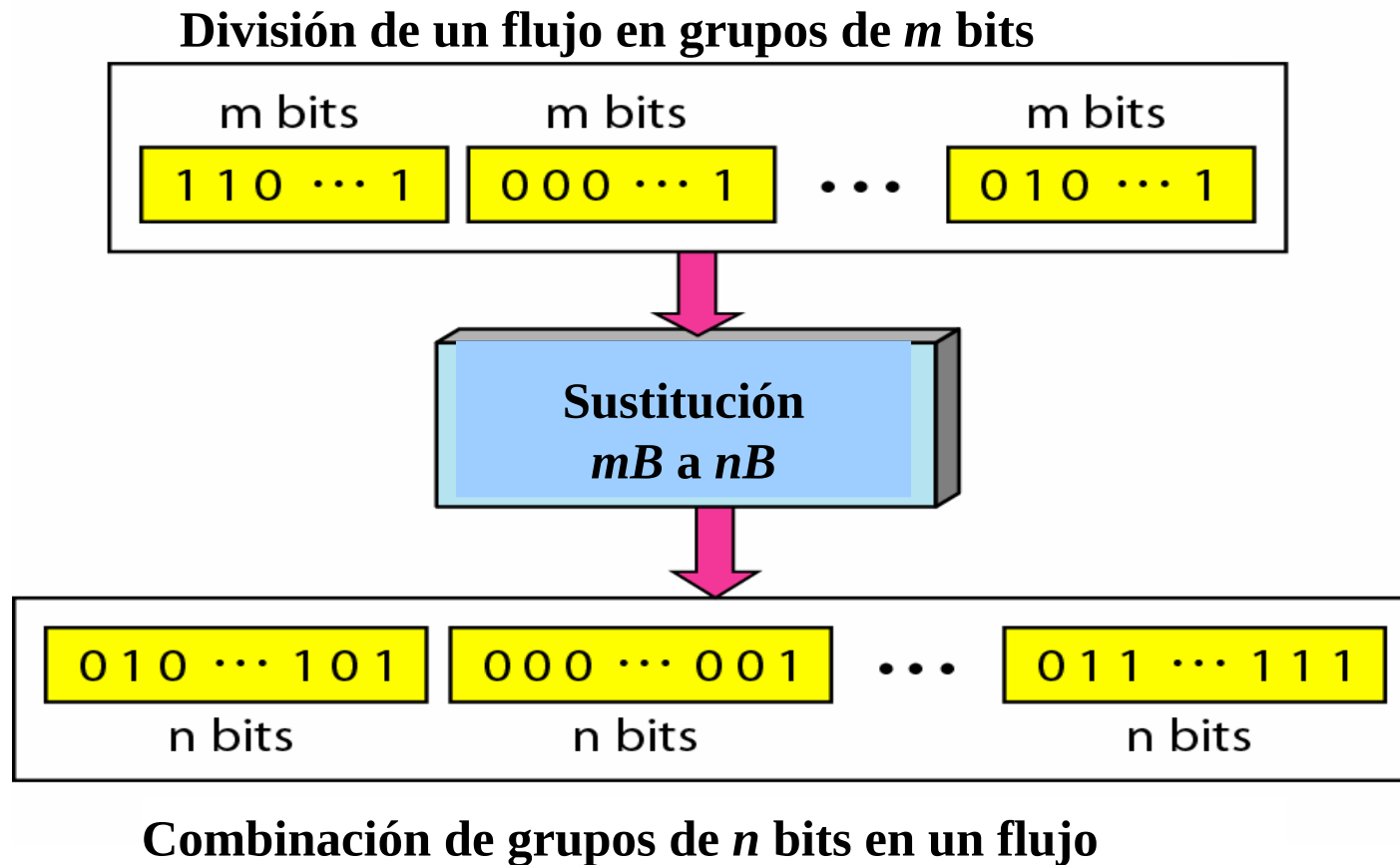


Figura 4.15 *Uso de la codificación de bloques 4B/5B con el esquema de codificación de línea NRZ-I*

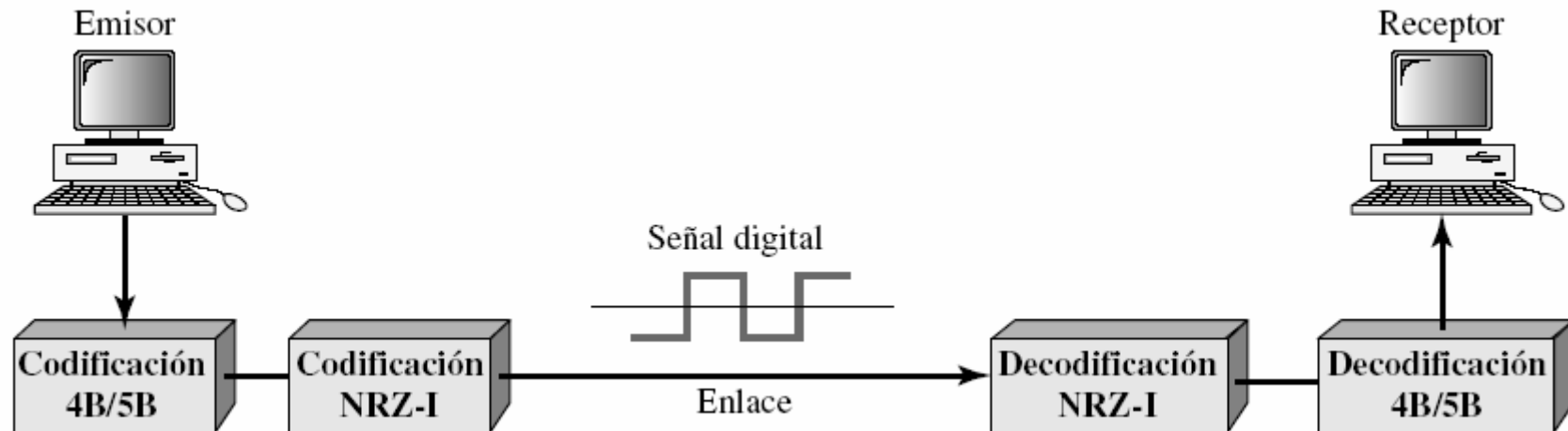
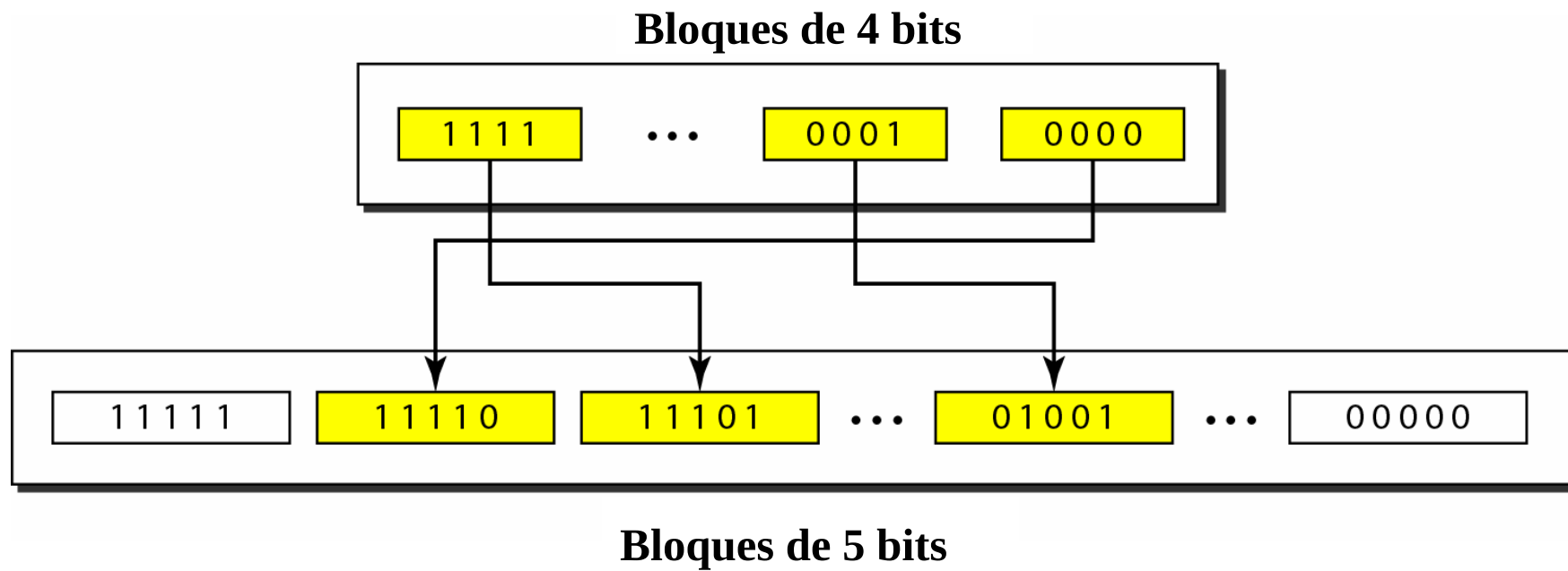
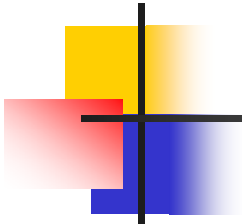


Tabla 4.2 *Proyección de códigos en 4B/5B.*

<i>Secuencia de datos</i>	<i>Secuencia codificada</i>	<i>Secuencia de control</i>	<i>Secuencia decodificada</i>
0000	11110	Q(silencio)	00000
0001	01001	I (inactivo)	11111
0010	10100	H (parada)	00100
0011	10101	J (delimitador de comienzo)	11000
0100	01010	K (delimitador de comienzo)	10001
0101	01011	T (delimitador de fin)	01101
01100	01110	S (establecer)	11001
0111	01111	R (reiniciar)	00111
1000	10010		
1001	10011		
1010	10110		
1011	10111		
1100	11010		
1101	11011		
1110	11100		
1111	11101		

Figura 4.16 *Sustitución en la codificación 4B/5B.*





Ejemplo 4.5

Se necesita enviar datos a una tasa de 1Mbps. ¿Cuál es el ancho de banda mínimo necesario utilizando la combinación de 4B/5B y NRZ-I o Manchester?

Solución

En primer lugar, la codificación de bloques 4B/5B incrementa la tasa de bits a 1,25 Mbps. El ancho de banda mínimo utilizando NRZ-I es $N/2$ o 625 KHz. El esquema Manchester necesita un ancho de banda mínimo de 1 MHz. La primera elección necesita un ancho de banda más bajo, pero tiene un problema de componente DC; la segunda necesita un mayor ancho de banda, pero no tiene ese problema.

Figura 4.17 *Codificación de bloques 8B/10B.*

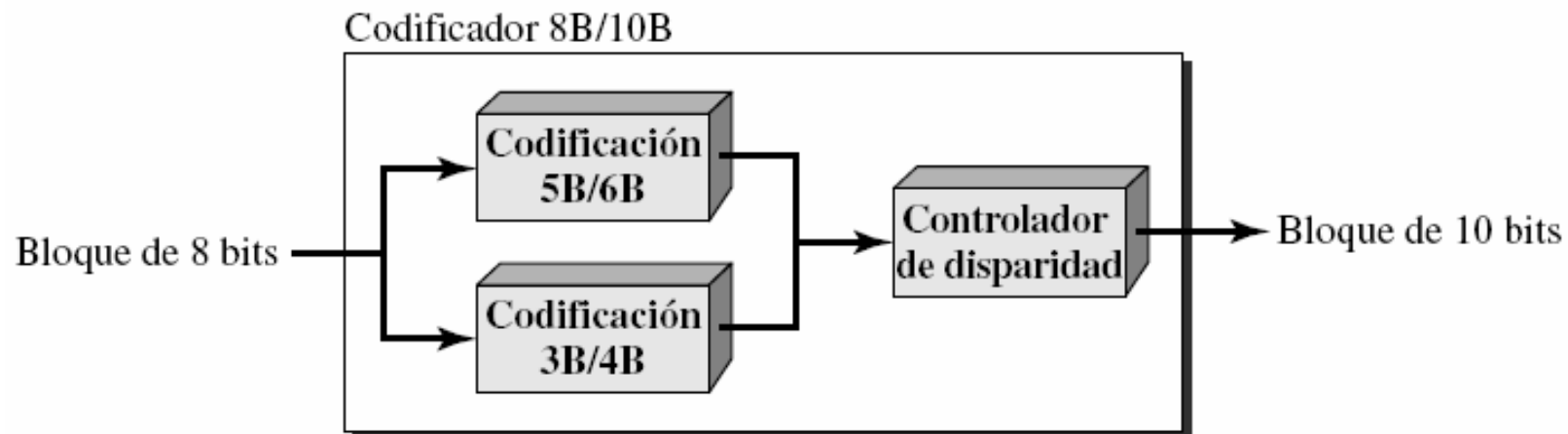
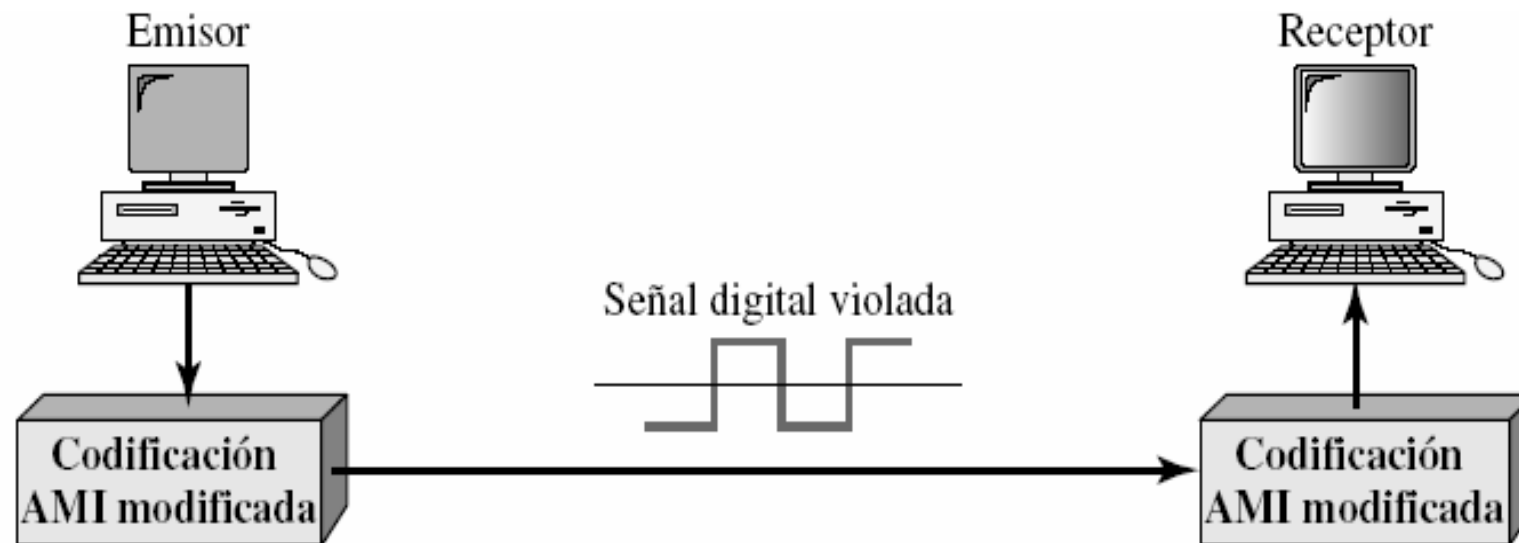
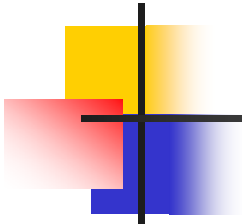


Figura 4.18 *AMI utilizado con aleatorización.*

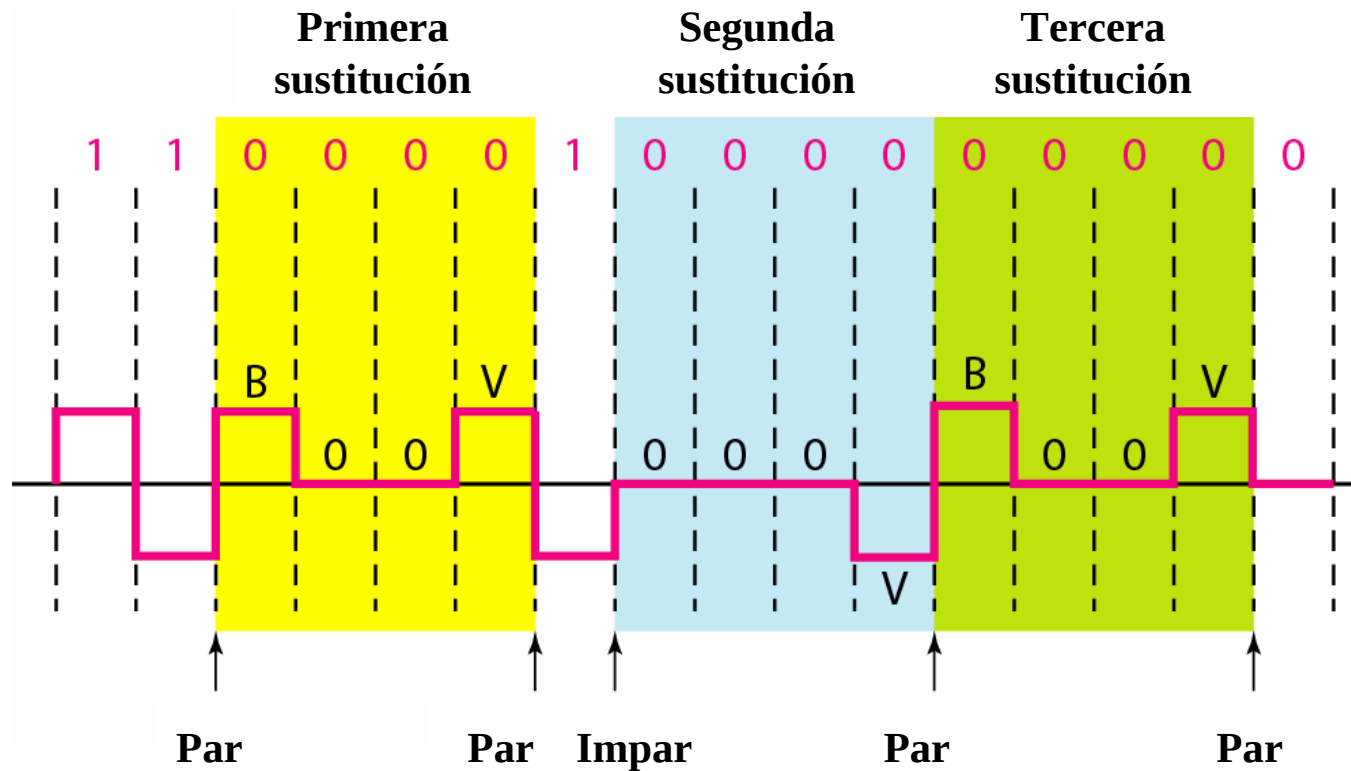




Nota

B8ZS sustituye ocho ceros consecutivos con 000VB0VB.

Figura 4.20 *Diferentes situaciones en la técnica de aleatorización HDB3*



Nota

HDB3 sustituye cuatro ceros consecutivos con 000V o B00V dependiendo del número de pulsos distinto de cero después de la última sustitución.

4-2 CONVERSION DE ANALÓGICO A DIGITAL

*Se ha visto en el Cap. 3 que una señal digital es superior a una señal analógica. La tendencia hoy en día es cambiar una señal analógica a una señal digital. En esta sección se describen dos técnicas, **la modulación por codificación de pulsos** y **la modulación delta**.*

Temas a tratar en esta sección

Modulación por codificación de pulsos (PCM)

Modulación Delta (DM)

Figura 4.21 *Componentes de un codificador PCM*

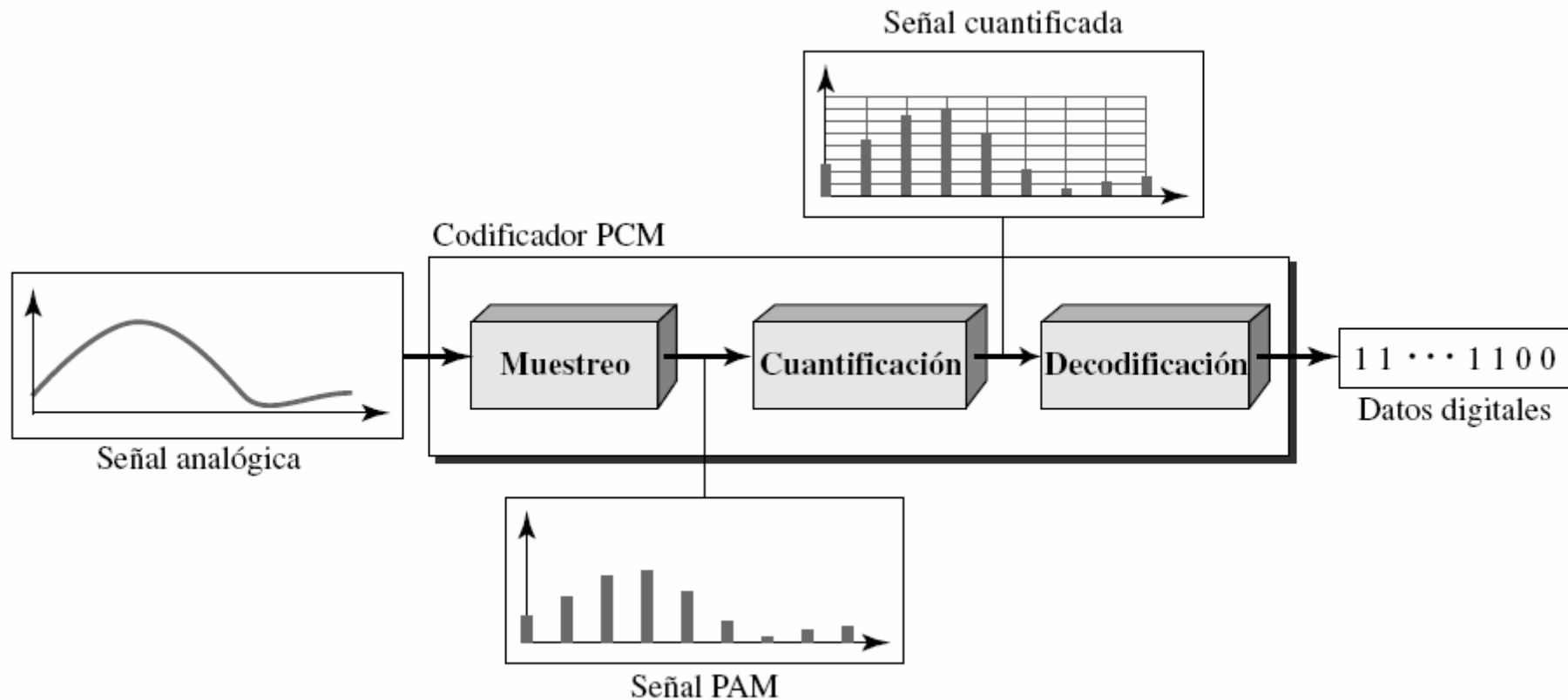
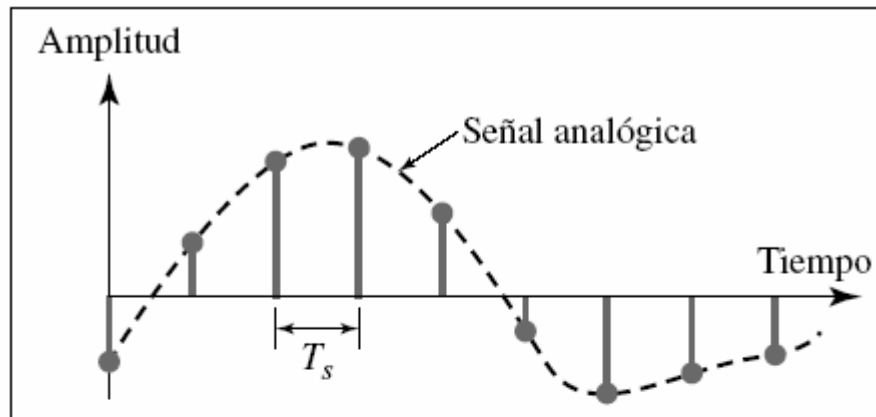
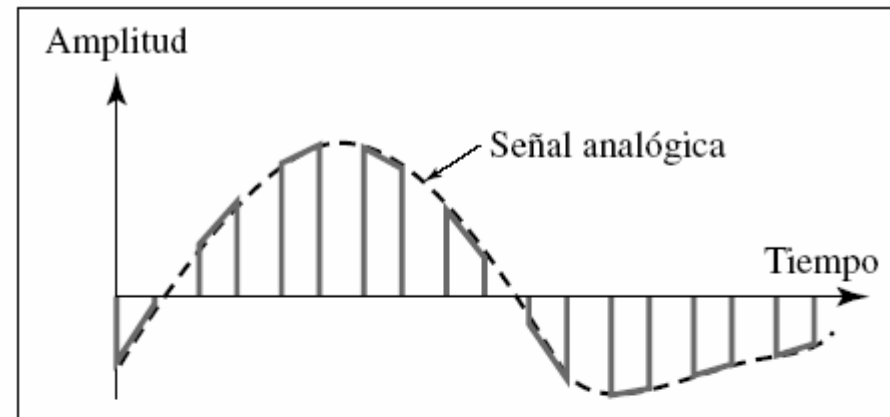


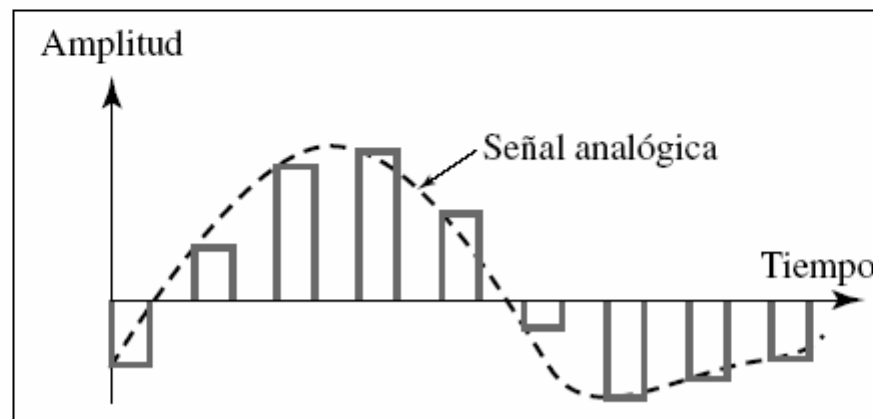
Figura 4.22 *Tres métodos de muestreos diferentes para PCM*



a. Muestreo ideal



b. Muestreo natural

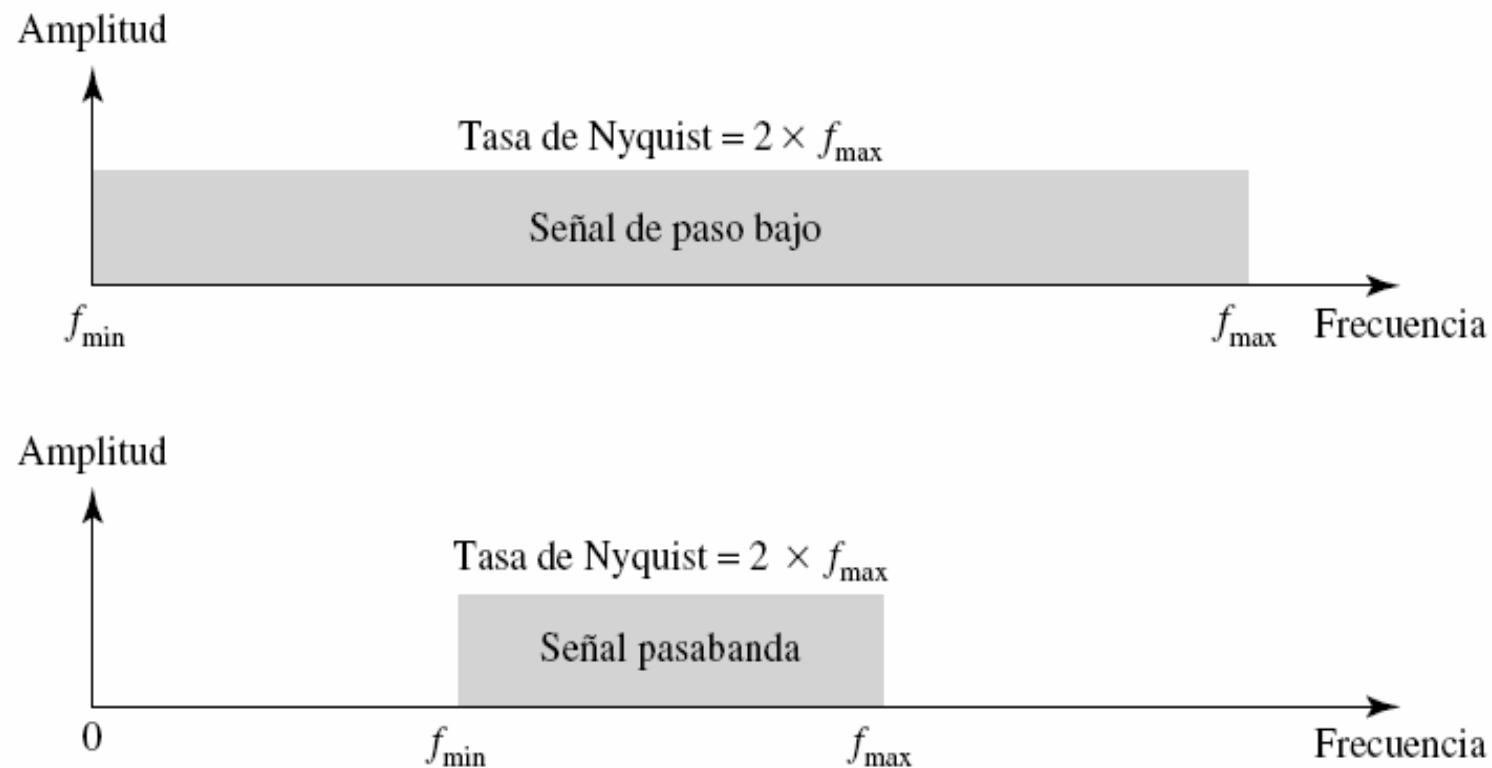


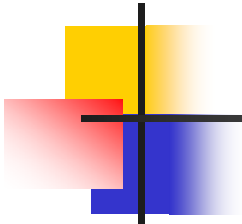
c. Muestreo de cresta plana

Nota

De acuerdo al teorema de Nyquist, la tasa de muestreo debe ser al menos 2 veces la frecuencia más alta contenida en la señal.

Figura 4.23 *Tasa de muestreo de Nyquist para señales de paso bajo y pasabanda.*



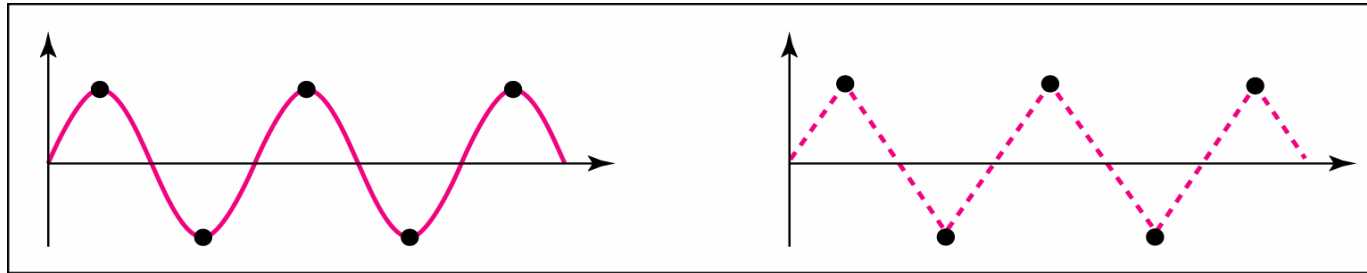


Ejemplo 4.6

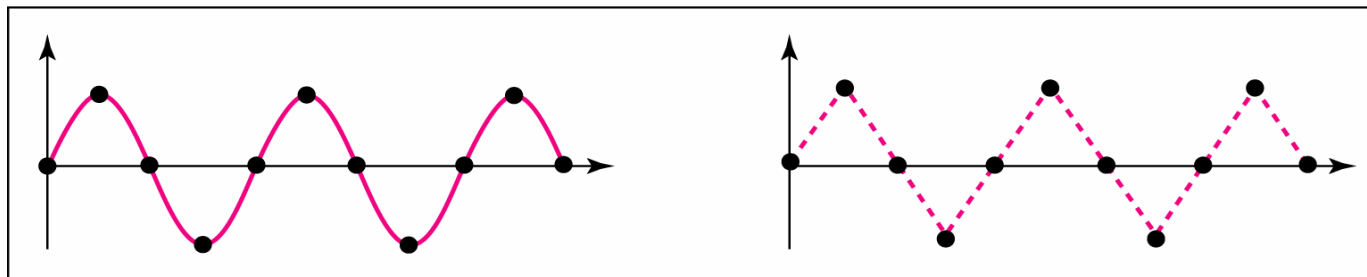
Para mostrar un ejemplo intuitivo del teorema de Nyquist, se va a muestrear una señal con onda sinusoidal con tres tasas de muestreo: $f_s = 4f$ (2 veces la tasa de Nyquist), $f_s = 2f$ (la tasa de Nyquist) y $f_s = f$ (la mitad de la tasa de Nyquist). La Figura 4.24 muestra el muestreo y la recuperación posterior de la señal.

Se puede ver que el muestreo con la tasa de Nyquist crea una buena aproximación de la señal original (parte a). El sobremuestreo de la parte b también puede crear la misma aproximación, pero es redundante e innecesaria. El muestreo por debajo de la tasa de Nyquist (parte c) no produce una señal que se parezca a la señal seno original.

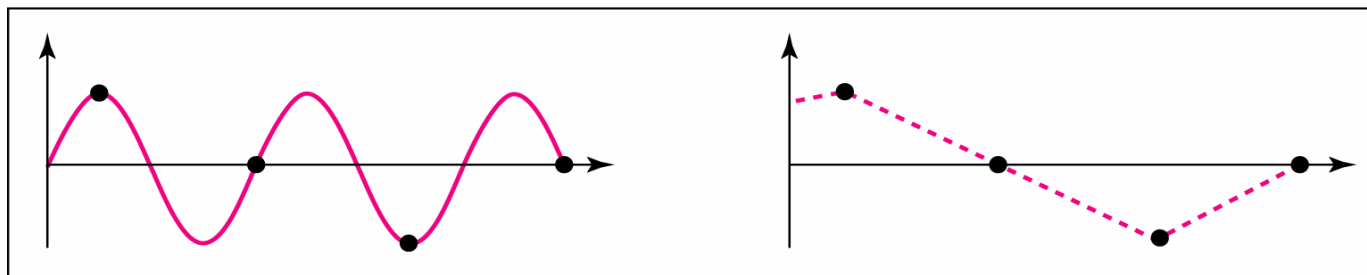
Figura 4.24 *Recuperación de una señal sinusoidal muestreada con diferentes tasas de muestreo.*



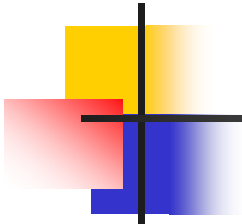
a. Tasa de muestreo de Nyquist: $f_s = 2f$



b. Sobremuestreo: $f_s = 4f$



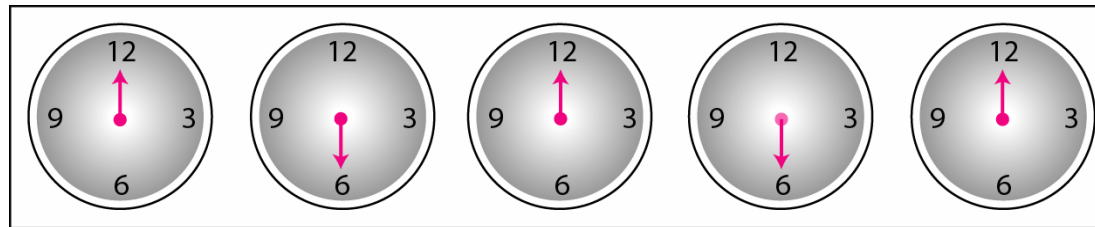
c. Inframuestreo: $f_s = f$



Ejemplo 4.7

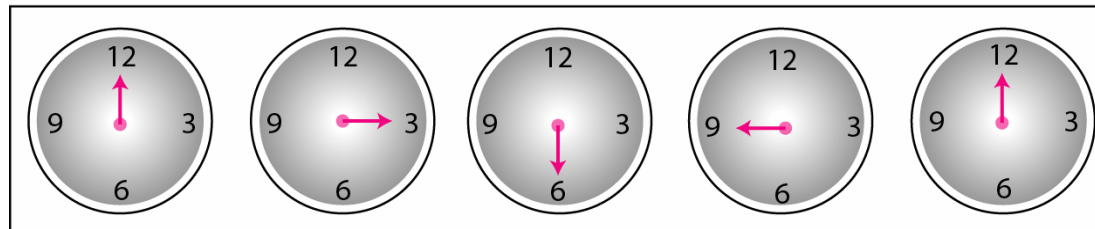
Consideremos una manecilla de un reloj. La manecilla de los minutos tiene un periodo de 60 s. De acuerdo con el teorema de Nyquist, es necesario muestrearla cada 30 s ($T_s = T$ or $f_s = 2f$). En la figura 4.25a, Los puntos de la muestra, en orden, son 12, 6, 12, 6, 12, y 6. El receptor de las muestras no puede decir si el reloj se está moviendo hacia adelante o hacia atrás. En la parte b, se muestrea al doble de la tasa de Nyquist (cada 15 s). Los puntos de la muestra, en orden, son 12, 3, 6, 9 y 12. El reloj se está moviendo hacia delante. En la parte c, se muestrea por debajo de la tasa de nyquist ($T_s = 3/4 T$ o $f_s = 4/3 f$). los puntos de la muestra, en orden, son 12, 9, 6, 3 y 12. Aunque el reloj se está moviendo hacia delante, el receptor cree que el reloj se está moviendo hacia atrás.

Figura 4.25 *Muestreo de un reloj con una sola manecilla.*



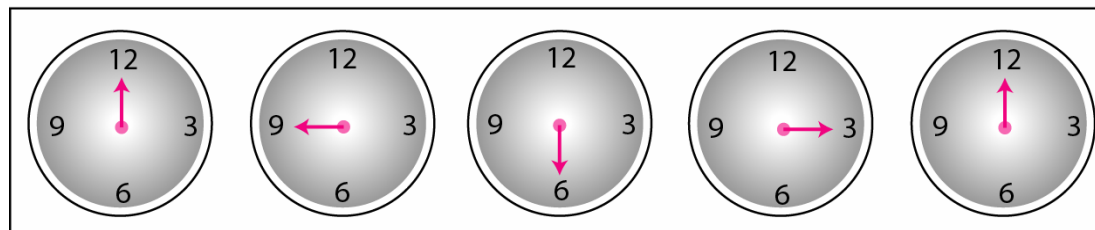
Las muestras pueden significar que el reloj se está moviendo hacia delante o hacia atrás.
(12-6-12-6-12)

a. Tasa de muestreo de Nyquist: $T_s = 1/2 T$



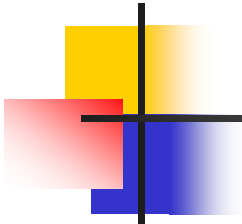
Las muestras muestran que el reloj se mueve hacia delante.
(12-3-6-9-12)

b. Sobremuestreo (por encima de la tasa de Nyquist): $T_s = 1/4 T$



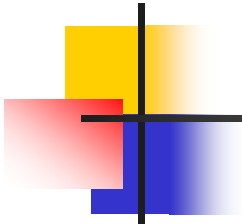
Las muestras muestran que el reloj se mueve hacia atrás.
(12-9-6-3-12)

c. Inframuestreo (por debajo de la tasa de Nyquist): $T_s = 3/4 T$



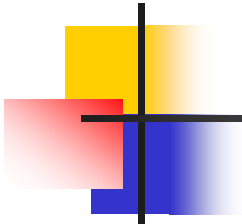
Ejemplo 4.8

Un ejemplo relacionado con el Ejemplo 4.7 es la aparente rotación hacia atrás de las ruedas de un coche que se mueve hacia delante en una película. Esto se puede explicar por el inframuestreo. Una película se graba a 24 marcos por segundo. Si una rueda gira más de 12 veces por segundo, entonces el inframuestreo crea la impresión de la rotación hacia atrás.



Ejemplo 4.9

Las compañías de teléfono digitalizan la voz asumiendo una frecuencia máxima de 4000 Hz. La tasa de muestreo es por tanto de 8000 muestras por segundo.

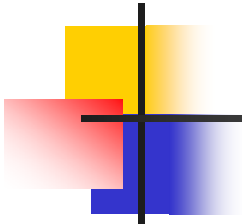


Ejemplo 4.10

Una señal de paso bajo compleja tiene un ancho de 200 KHz. ¿Cuál es la tasa de muestreo mínima para la señal?

Solución

El ancho de banda de una señal de paso bajo está entre 0 y f , donde f es la frecuencia máxima de la señal. Por tanto, se puede muestrear la señal a dos veces la frecuencia más alta (200 KHz). la tasa de muestreo es por tanto de 400.000 muestras por segundo.



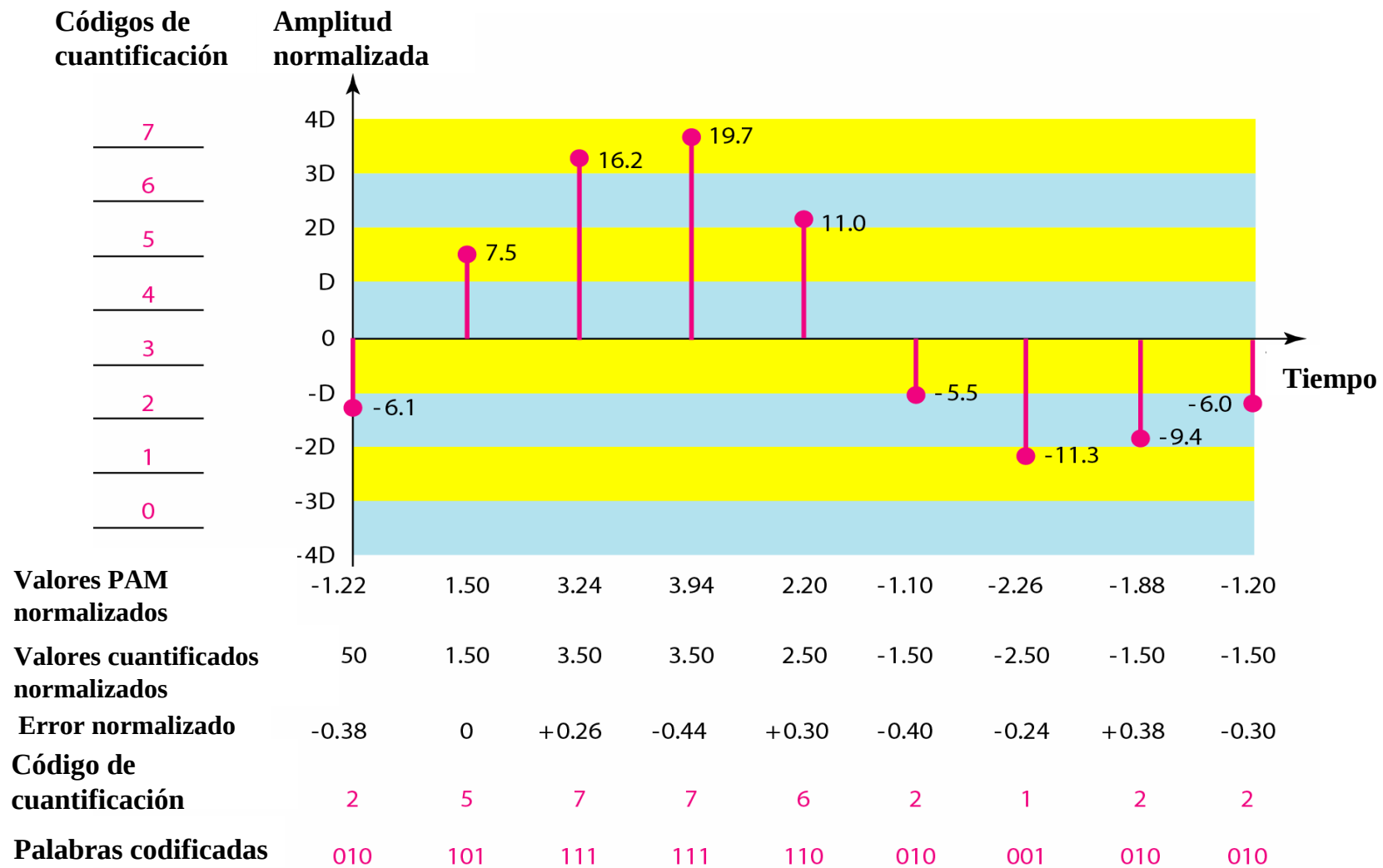
Ejemplo 4.11

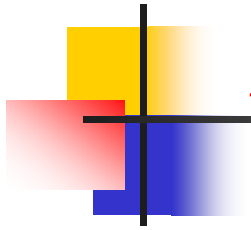
Una señal pasabanda compleja tiene un ancho de banda de 200 KHz. ¿Cuál es la tasa de muestreo mínima para la señal?

Solucion

No se puede encontrar la tasa de muestreo en este caso, debido a que no se conoce dónde comienza o finaliza el ancho de banda. No se conoce la frecuencia de la señal.

Figura 4.26 *Cuantificación y codificación de una señal muestreada.*





Ejemplo 4.12

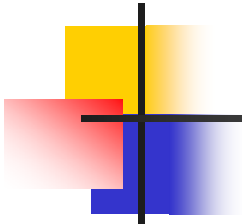
¿Cuál es el valor SNR_{dB} en el ejemplo de la Figura 4.26?

Solución

Se puede utilizar la fórmula para encontrar la cuantificación. Se tienen ocho niveles y 3 bits por muestra, así que

$$SNR_{dB} = 6,02(3) + 1,76 = 19,82 \text{ dB}$$

Incrementar el número de niveles incrementa el valor de SNR .



Ejemplo 4.13

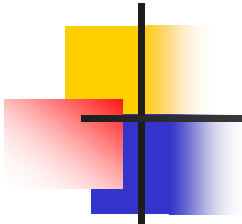
Una línea telefónica debe tener un SNR_{dB} por encima de 40. ¿Cuál es el número mínimo de bits por muestra?

Solución

Se calcula el número de bits como

$$SNR_{dB} = 6,02 n_b + 1,76 = 40 \rightarrow n = 6,35$$

Las compañías telefónicas normalmente asignan 7 u 8 bits por muestra.



Ejemplo 4.14

Se quiere digitalizar la voz humana. ¿Cuál es la tasa de bits asumiendo 8 bits por muestra?

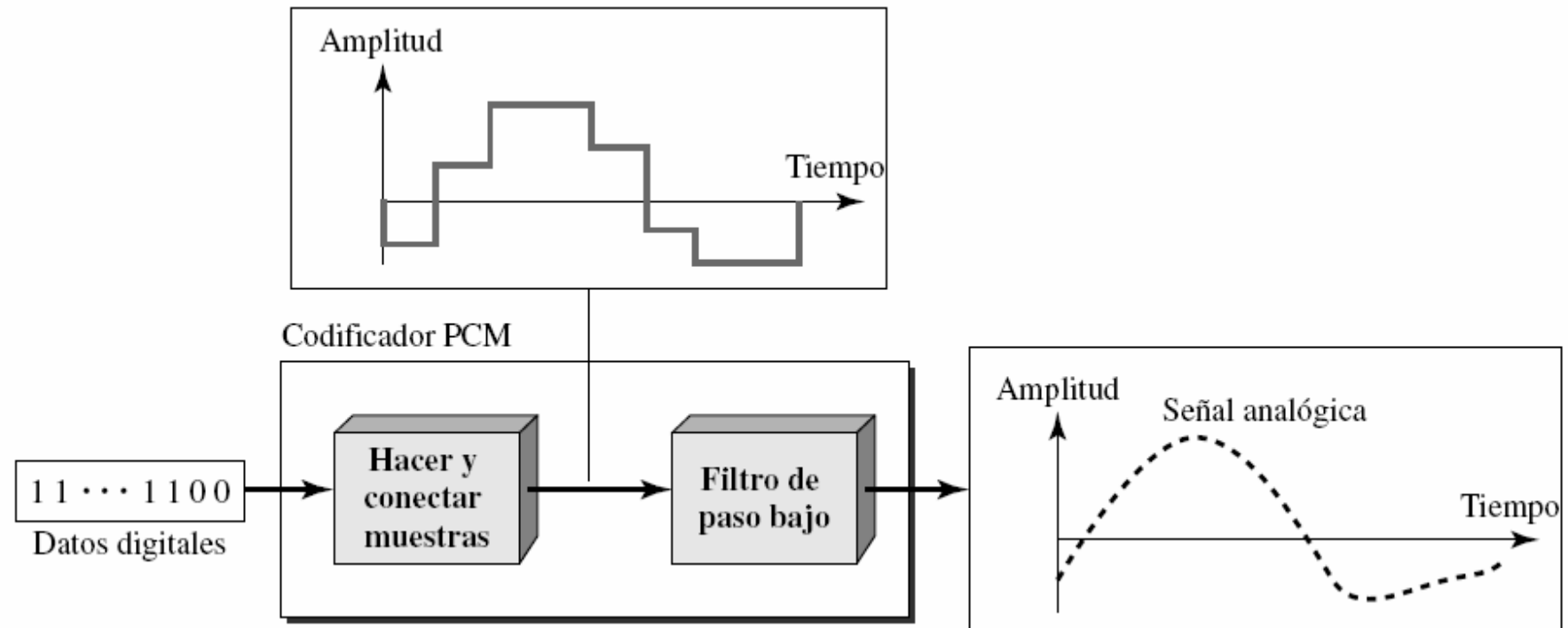
Solución

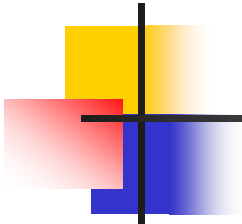
La voz humana normalmente contiene frecuencias comprendidas entre 0 y 4000 Hz. Por tanto, la tasa de muestreo y la tasa de bits se calculan de la siguiente forma:

$$\text{Tasa de muestreo} = 4000 \times 2 = 8000 \text{ muestras/s}$$

$$\text{Tasa de bits} = 8000 \times 8 = 64.000 \text{ bps} = 64 \text{ kbps.}$$

Figura 4.27 *Componentes de un decodificador PCM.*





Ejemplo 4.15

Se tiene una señal analógica de paso bajo de 4 KHz. Si se envía la señal analógica, se necesita un canal con un ancho de banda mínimo de 4 KHz. Si se digitaliza y se envían 8 bits por muestra, se necesita un canal de un ancho de banda mínimo de $8 \times 4 \text{ KHz} = 32 \text{ KHz}$.

Figura 4.28 *El proceso de la modulación delta.*

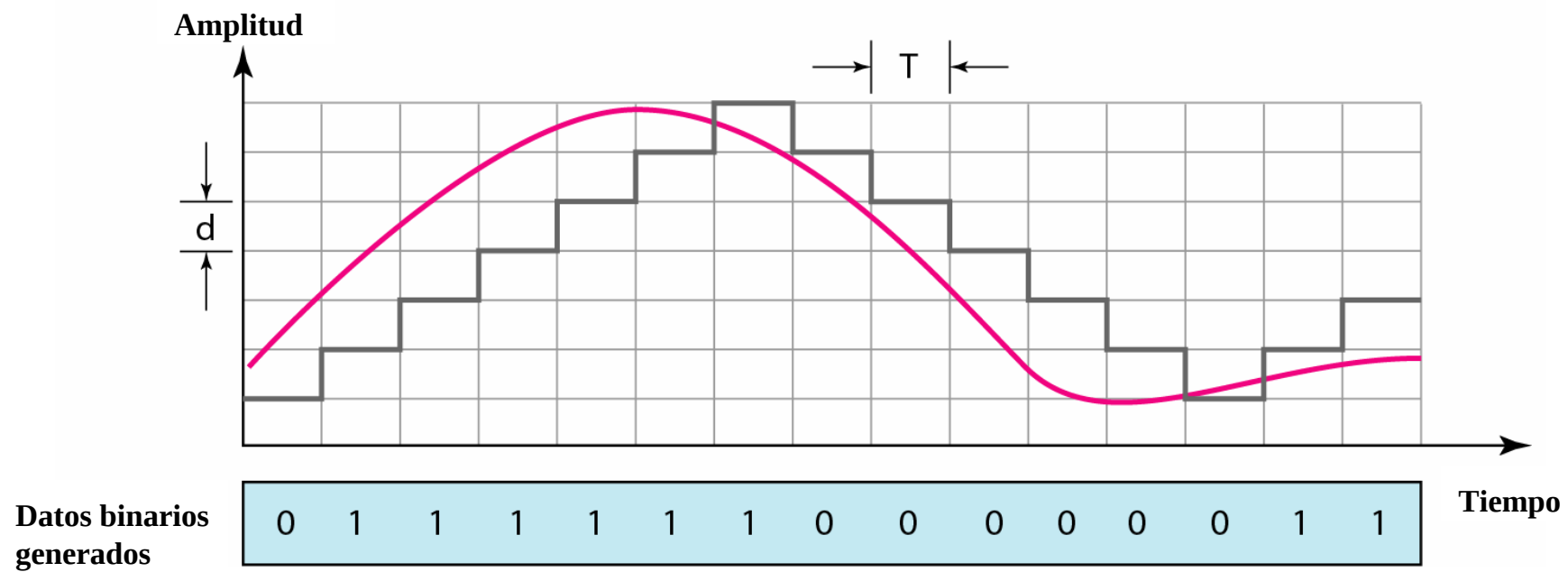


Figura 4.29 *Componentes de la modulación delta.*

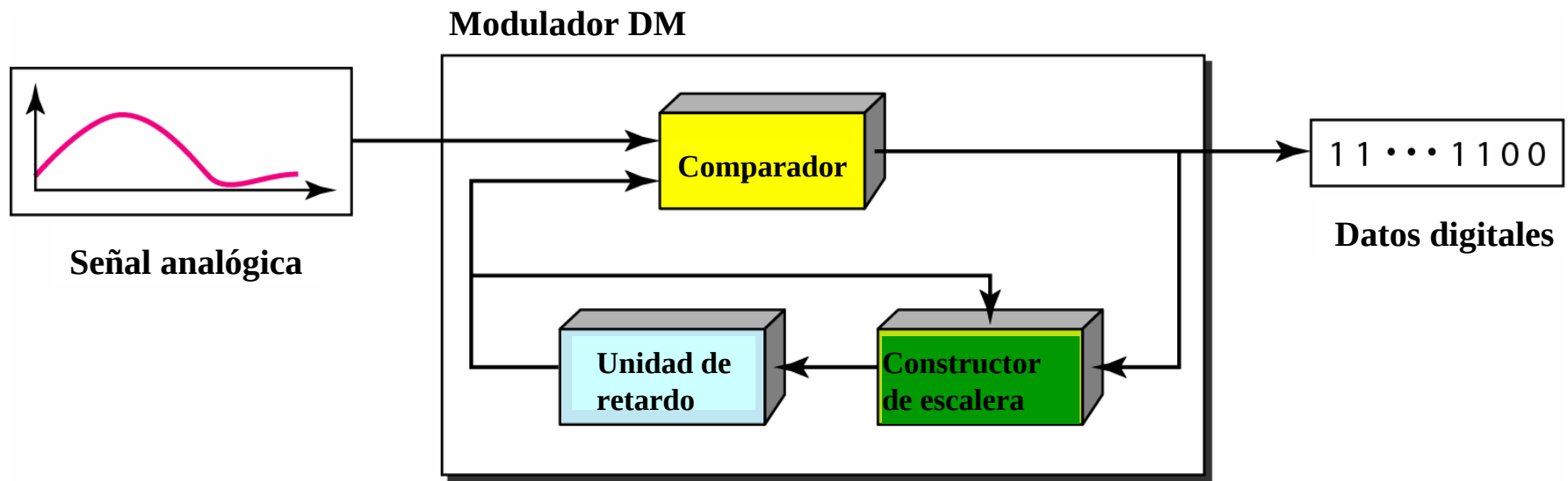
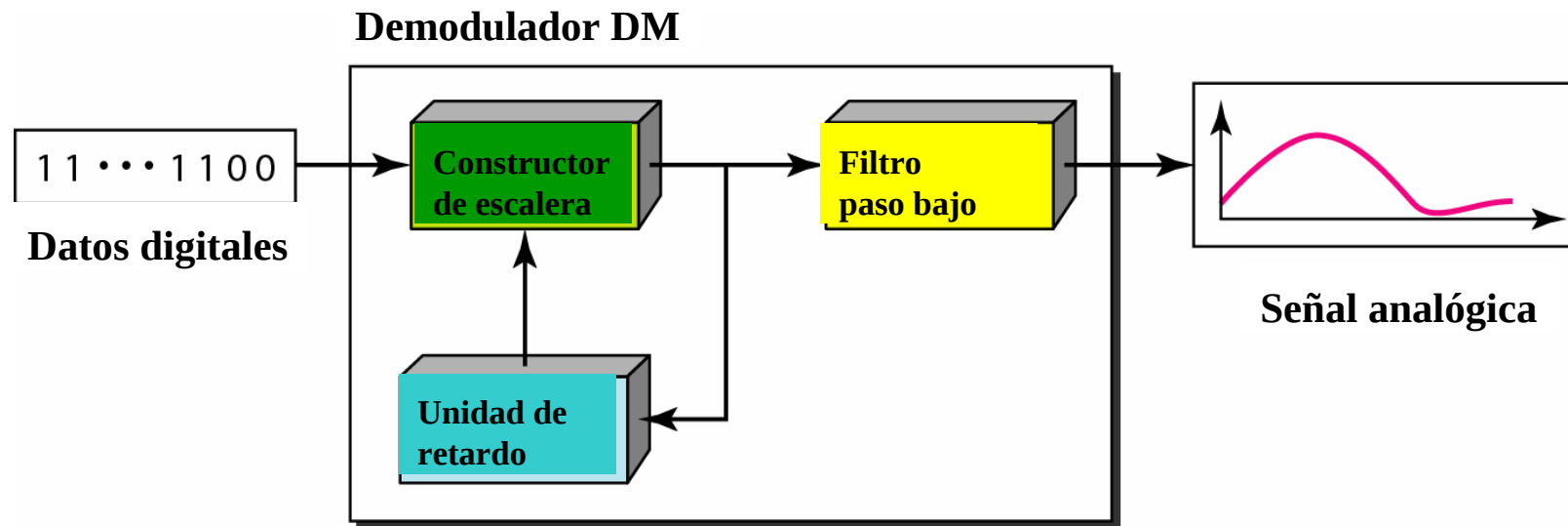


Figura 4.30 *Componentes de la demodulación delta.*



4-3 MODOS DE TRANSMISIÓN

La transmisión de datos binarios por un enlace se puede llevar a cabo en modo paralelo o en modo serie. En el modo paralelo, se envían varios bits con cada pulso de reloj. En el modo serie, solamente se envía un bit con cada pulso de reloj. Mientras que hay una única forma de transmitir los datos paralelos, hay tres subclases de transmisión serie: síncrona, asíncrona e isócrona.

Temas a tratar en esta sección:

Transmisión paralela

Transmisión serie

Figura 4.31 *Transmisión de datos y modos.*

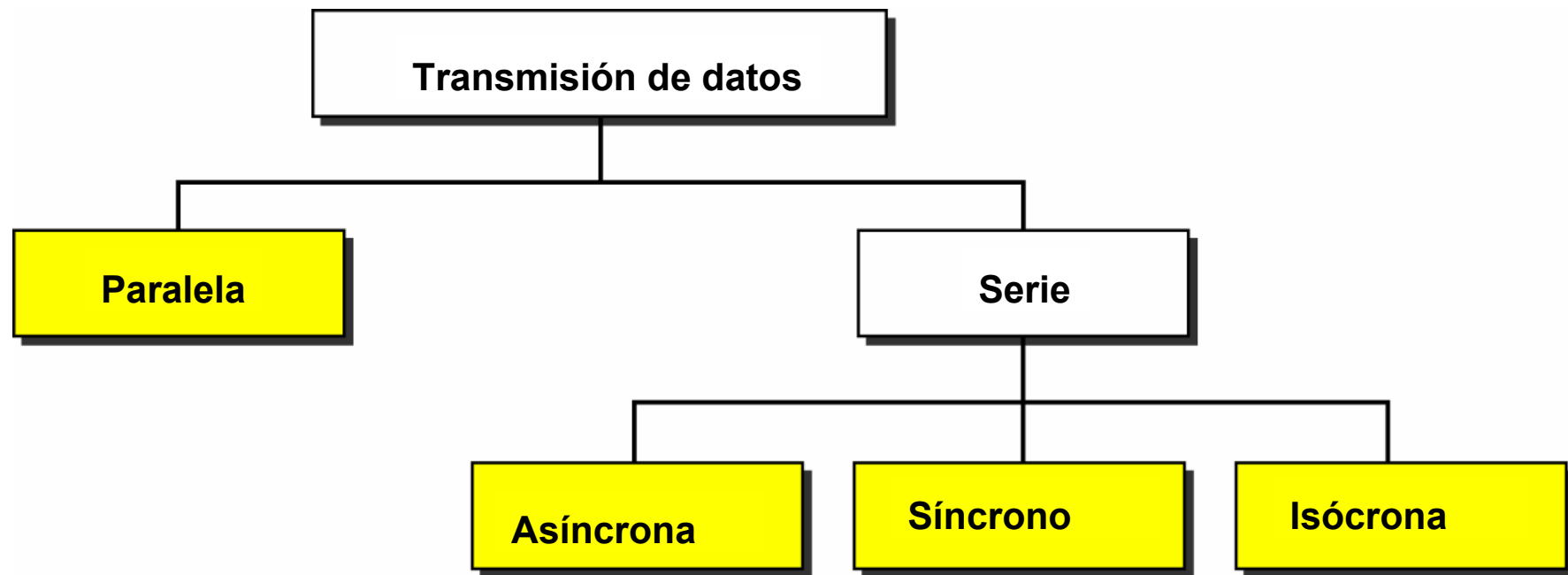


Figura 4.32 *Transmisión paralela*

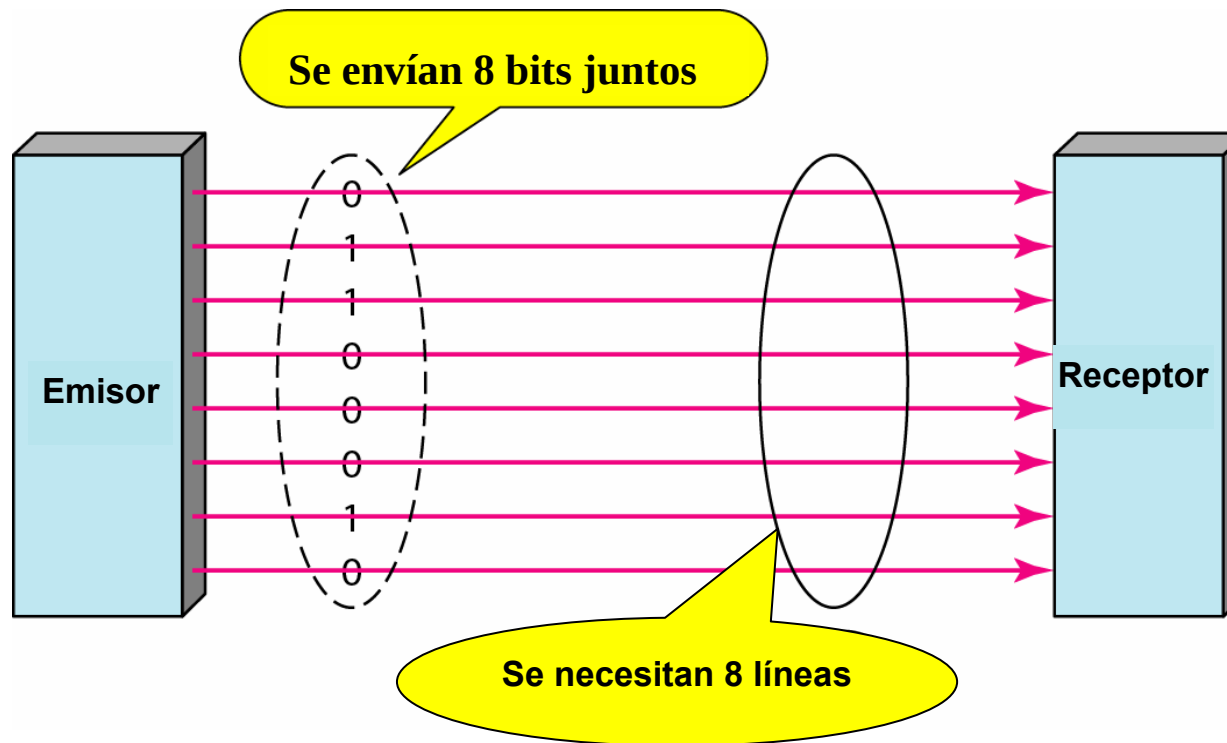
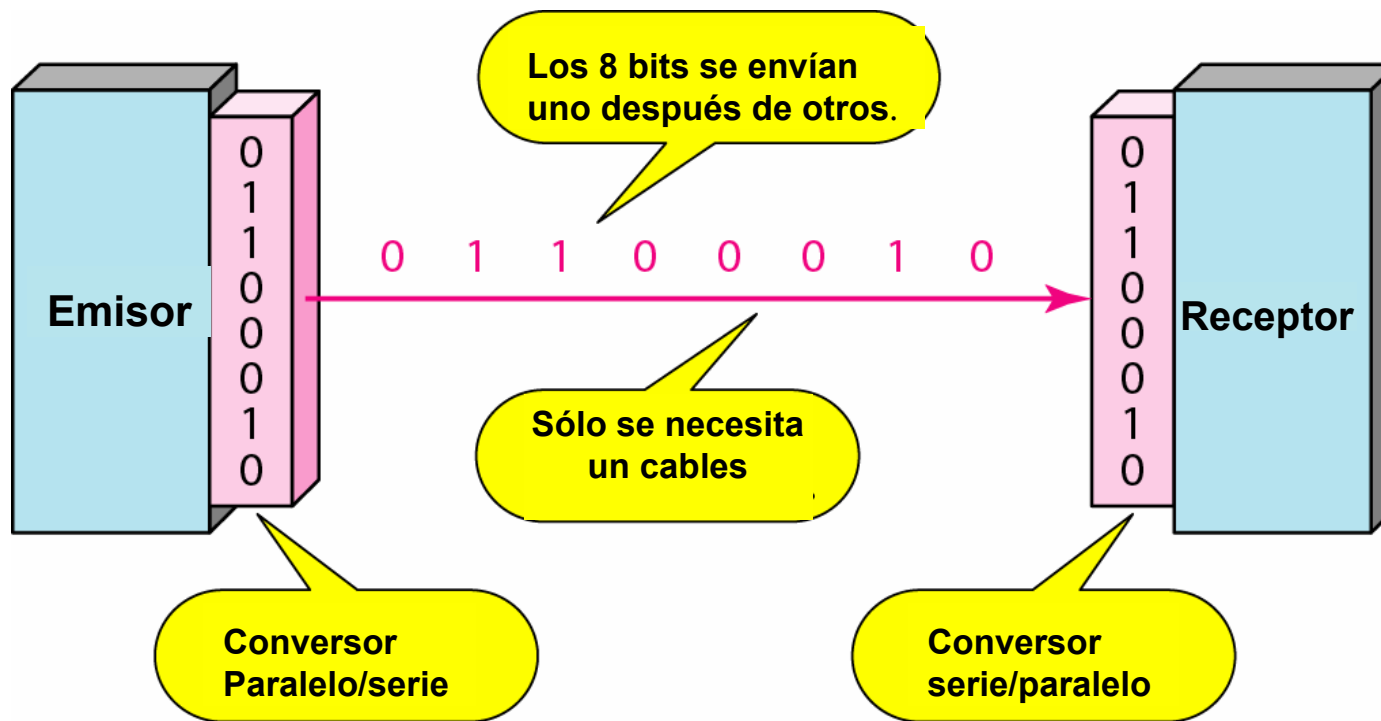


Figura 4.33 *Transmisión serie.*



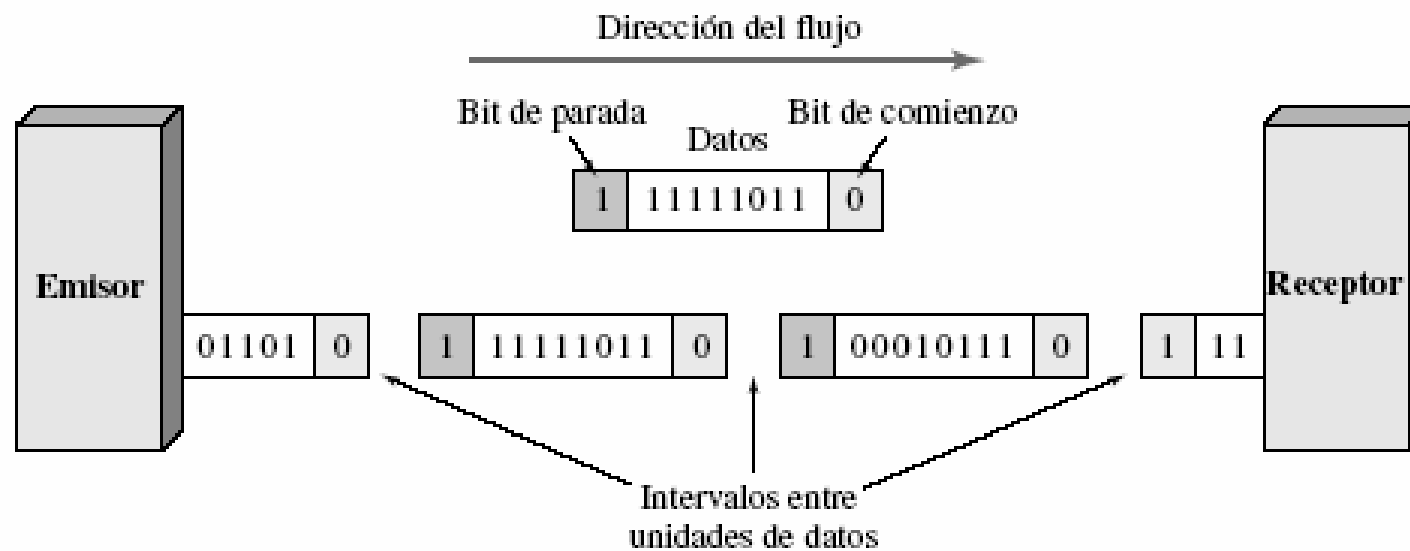
Nota

En la transmisión asíncrona, se envía un bit de inicio (cero) al principio y uno o más bits de parada (unos) al final de cada byte. Puede haber un intervalo entre cada byte.

Nota

**En este ámbito, asíncrono significa
“asíncrono a nivel de byte”,
pero los bits siguen estando
sincronizados; su duración es la misma.**

Figura 4.34 *Transmisión asíncrona.*



Nota

En la transmisión síncrona, se envía un bit detrás de otro, sin bits de inicio/parada o intervalos. Es responsabilidad del receptor agrupar los bits.

Figura 4.35 *Transmisión síncrona*

