

Transmisión de datos y redes de comunicaciones

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).***

Temas a tratar en esta sección:

Codificación de línea

Esquemas de codificación de línea

Codificación de bloques

Aleatorización

Codificación y decodificación de línea.

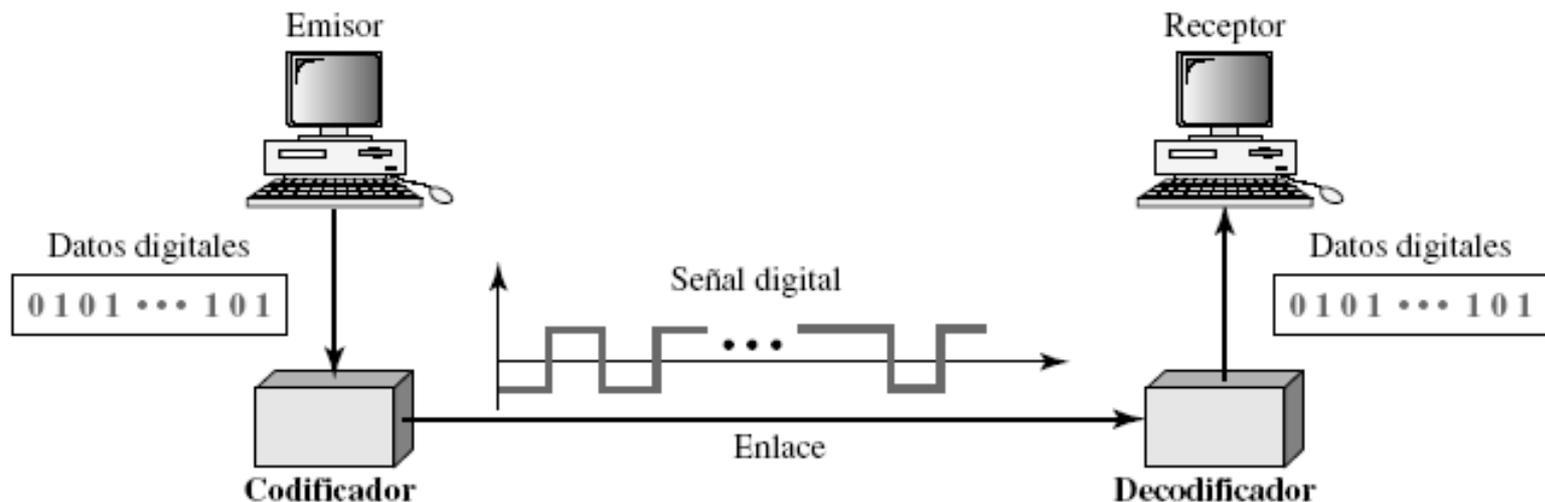
- o Es la representación de datos digitales utilizando señales digitales.
- o La conversión involucra tres técnicas: **codificación de línea** (siempre necesaria), **codificación de bloques** y la **aleatorización (scrambling)**.

o Codificación de línea:

Proceso de convertir datos digitales en señales digitales.

Convierte una secuencia de bits codificándolos a una señal digital.

Los datos, en forma de texto, números, imágenes gráficas, audio o voz, se almacenan en la memoria de un PC en secuencia de bits, "0"s y "1"s. *Estos números binarios deben* convertirse a señales digitales, es decir a niveles de voltaje o corriente (u otro tipo de símbolos) para su transmisión por la línea. Este proceso se llama *codificación de línea*.



Características:

Bit. En las comunicaciones de datos, el objetivo es enviar bits de datos. Un bit es la entidad más pequeña que puede representar un elemento de información.

Símbolo. En una comunicaciones de datos digitales, los bits son transportados por símbolos (variaciones de voltaje). Un símbolo es la unidad más corta (en cuanto a tiempo) de una señal digital.

En otras palabras, los bits son transportados; los símbolos son los portadores.

Elemento de señal frente a elemento de datos:

o Elemento de datos:

Es la unidad más pequeña que representa un elemento de información (el bit).

Es lo que se necesita enviar.

Son transportados.

o Elemento de señal:

Transporta elementos de datos.

Es lo que se envía.

Son los portadores.

o Tasa ' r ': Es el número de elementos de datos (número de bits), transportados por cada elemento de señal (número de transiciones).

Tasa de datos frente a tasa de señales:

o Tasa de datos o tasa de bits:

Define el número de elementos de datos enviados en un segundo (bps).

o Tasa de señales o tasa de pulsos o tasa de modulación o tasa de baudios:

Define el número de elementos de señal enviados en un segundo (baudios).

El objetivo es aumentar la tasa de datos, reduciendo la tasa de señal.

o Tasa de baudios 'S':

Es la relación entre tasa de datos y tasa de baudios.

Se definen tres casos:

Peor: Cuando se necesita la máxima tasa de señales.

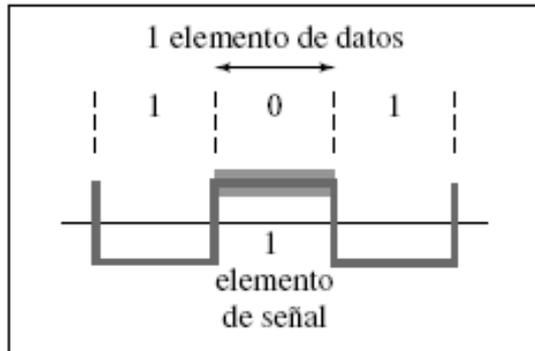
Mejor: Cuando se necesita la mínima tasa de señales.

Medio: más interesante en comunicaciones de datos.

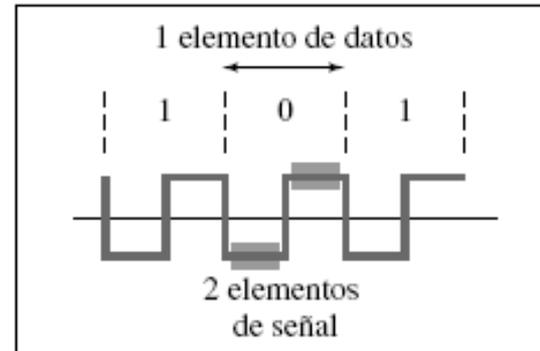
$$S = c * N * 1/r \text{ baudios.}$$

Donde N son los bps; c es el factor de caso y r el nº de elementos de datos transportados por cada elemento de señal.

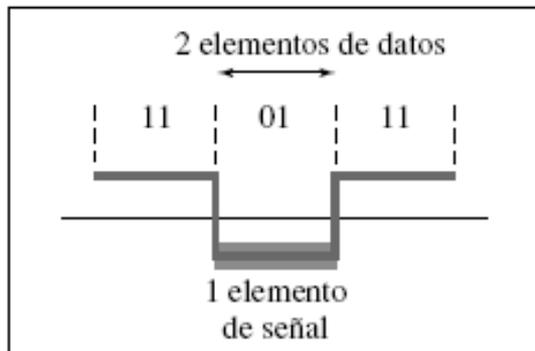
Figura 4.2 *Elemento de la señal frente a elemento de datos.*



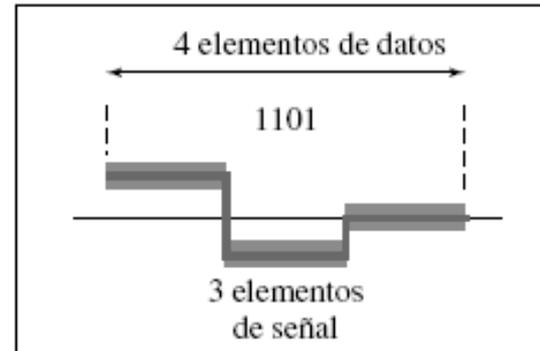
a. Un elemento de datos por un elemento de señal ($r = 1$)



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:

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

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:

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

Ancho de banda:

- o Aunque el ancho de banda real de una señal digital es infinito, el ancho de banda efectivo es finito.
- o La tasa de baudios, determina el ancho de banda requerido para una señal digital.

Se puede decir que el ancho de banda es proporcional a la tasa de señales o tasa de baudios.

- o El ancho de banda mínimo se define como:

$$B_{\min} = c * N * 1/r$$

- o Conociendo el ancho de banda del canal, se puede obtener la tasa de datos máxima:

$$N_{\max} = 1/c * B * r$$

Un objetivo en la comunicación de datos es incrementar la tasa de bit, al mismo tiempo que se reduce la tasa de símbolos. Si se incrementa la tasa de bit, se incrementa la velocidad de transmisión. Si se reduce la tasa de símbolos, se reducen los requisitos de ancho de banda.

Variaciones de la línea base:

- o Línea base: media de la potencia de la señal recibida.
- o La potencia de la señal recibida se evalúa contra la línea base para determinar el valor del elemento de datos.

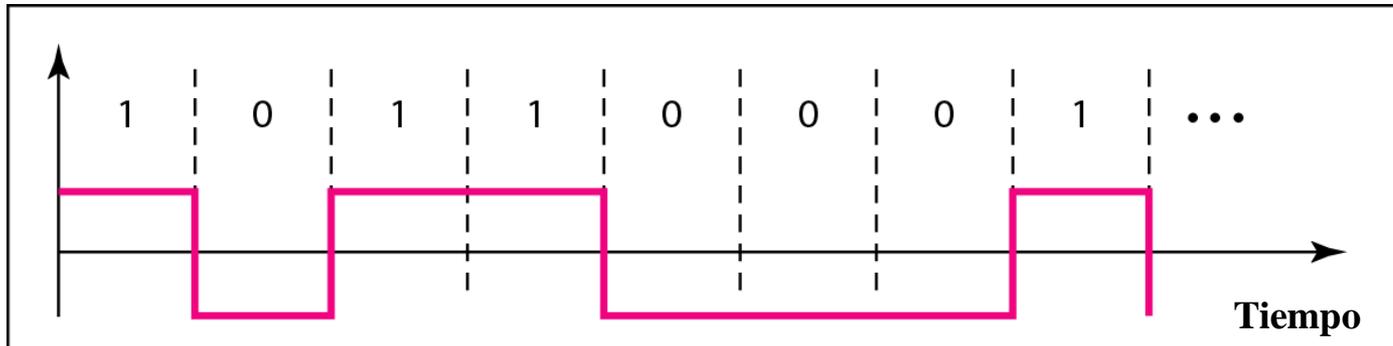
Componentes DC:

- o Cuando un nivel de voltaje en una señal digital es constante durante bastante tiempo, el espectro crea frecuencias muy bajas (resultado del análisis de Fourier).
- o Estas frecuencias cercanas al cero, son denominadas componentes DC (Direct Current).
- o Estas frecuencias cercanas al cero dan problemas en sistemas que no pueden pasar frecuencias bajas o sistemas con acoplamiento eléctrico con transformador.
- Por ejemplo, una línea telefónica no puede pasar frecuencias por debajo de los 300 Hz.
- Un enlace de larga distancia puede utilizar uno o más transformadores para aislar eléctricamente diferentes partes de la línea.

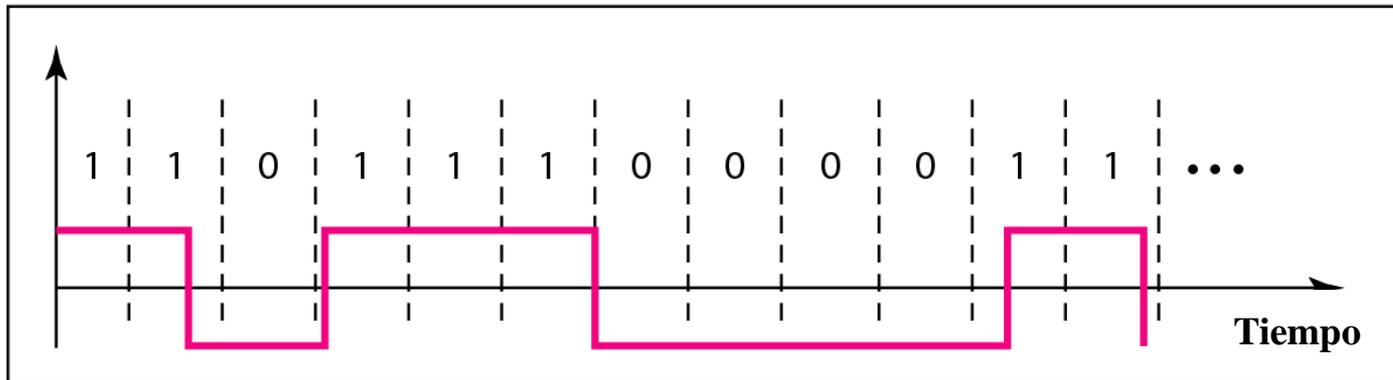
Autosincronización:

- Para interpretar correctamente las señales recibidas, los intervalos de bits del receptor deben corresponder exactamente con los del transmisor. Si el reloj de receptor es más rápido o más lento, los intervalos no coincidirán y el receptor podría malinterpretar las señales.
- Una señal digital con autosincronización incluye información sobre el tiempo en los datos transmitidos. Esto se consigue con transiciones en la señal que alerten al receptor del comienzo, de la mitad o del fin de un pulso. Si el reloj de receptor no está sincronizado, estas transiciones pueden reiniciar el reloj.

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*

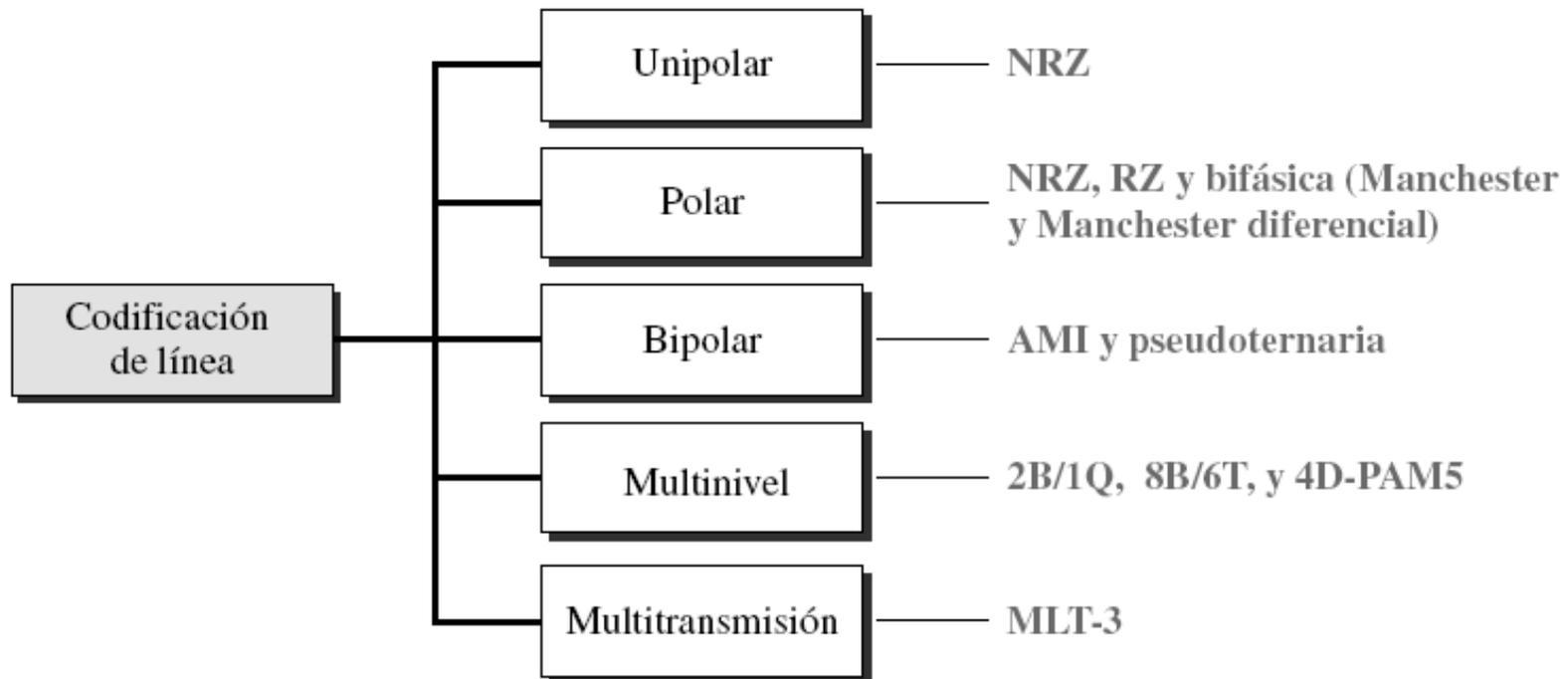


Figura 4.5 Esquema unipolar NRZ

Esquema unipolar:

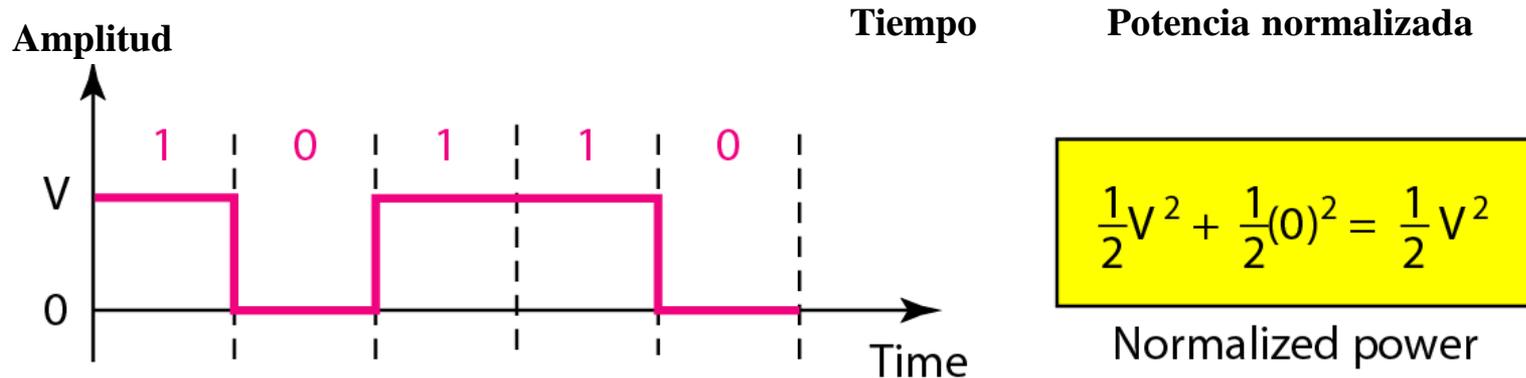
o Todos los niveles de señal se encuentran a un lado del eje del tiempo, o por encima o por debajo.

o NZR (Sin retorno a cero):

Un voltaje positivo define un bit a 1 y un voltaje a cero define un bit a cero.

Se denomina NZR debido a que la señal no retorna a cero en la mitad del bit.

Problema 1: tiene un **componente DC**, no compatible para algunos equipos y medios.



Esquemas polares:

o Los voltajes se encuentran a ambos lados del eje del tiempo.

NZR (Sin retorno a cero):

Se utilizan dos niveles de amplitud de voltaje.

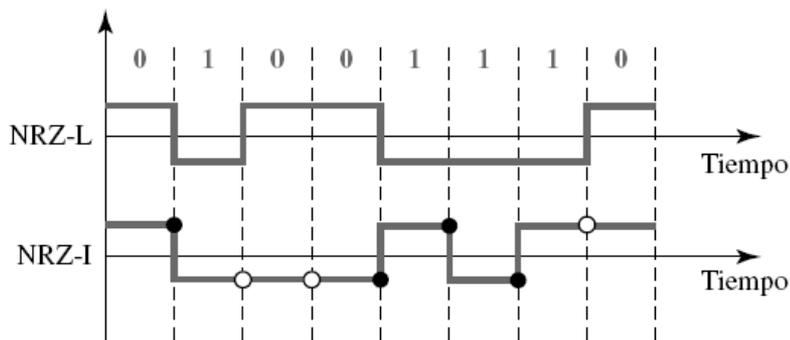
NZR-L (Level):

El nivel de voltaje determina el valor del bit.

NZR-I(Invertido):

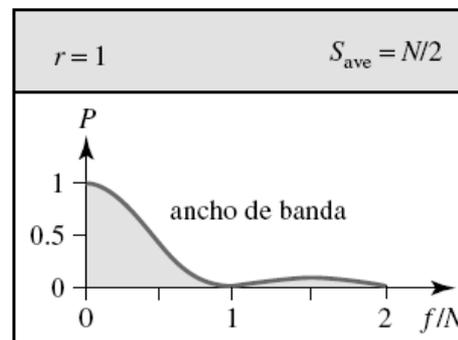
La inversión o falta de inversión en el nivel de voltaje determina el valor del bit. Si no hay cambio, el bit es cero y si hay cambio, el bit es uno.

Tanto NZR-L como NZR-I padecen de problemas con la variación de la línea base, sincronización, componentes DC. Pero es más acusado en NZR-L.



○ Sin inversión:
el siguiente bit es 0

● Con inversión:
el siguiente bit es 1



Esquema RZ polar.

RZ (Con retorno a cero):

Utiliza tres valores: positivo, negativo y cero.

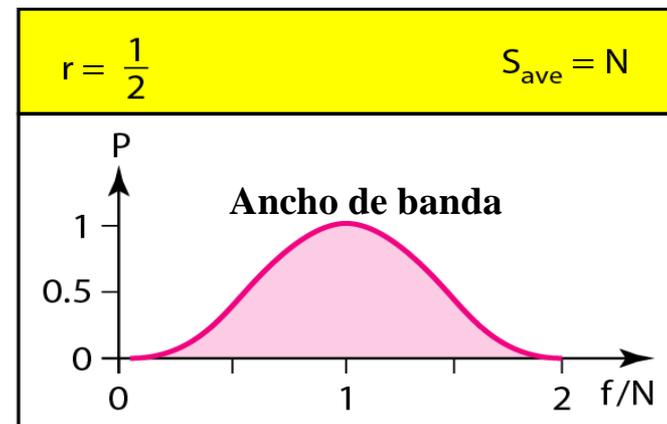
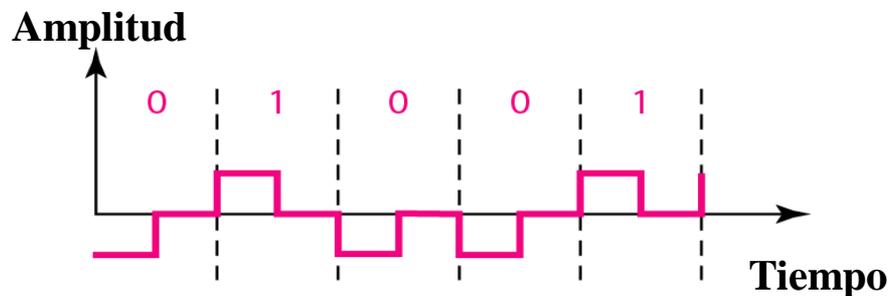
La señal cambia durante el bit.

Soluciona el problema de sincronización de los esquemas NZR.

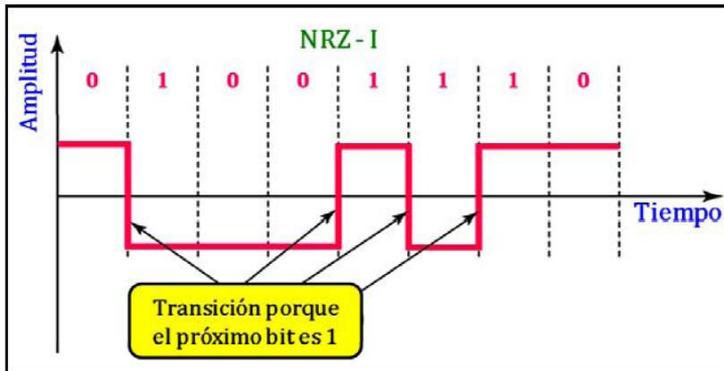
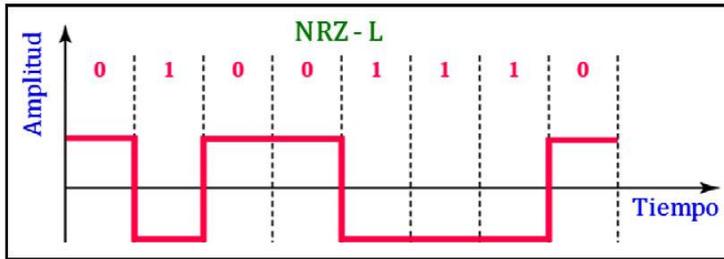
Padece problemas de mayor ocupación de ancho de banda al requerir dos cambios de señal para codificar un bit.

Es más complejo de crear y discernir.

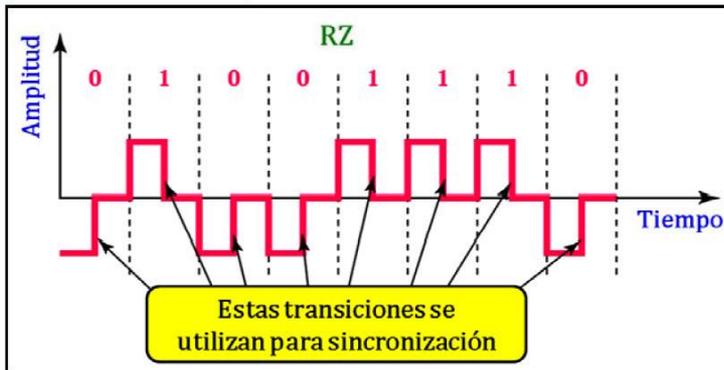
No hay problemas con los componentes DC.



Polar NRZ-L y NRZ-I



Polar RZ



← **Solución a problema 1:** codificación NRZ-L. Desaparece el componente de DC.

El RS-232 usa NRZ para 1 entre -3 y -25 V y para 0 entre $+3$ y $+25$ V.

Problema 2: problema de sincronía NRZ-L cuando hay muchos 0 ó 1.

← **Solución parcial a problema 2:** codificación NRZ-I. La sincronía se resuelve con transiciones para los 1 que son más frecuentes que los 0.

← **Solución completa a problema 2:** codificación RZ. La sincronía se resuelve con transiciones a cero en la mitad bit, tanto para los 0 y 1.

Problema 3: utiliza 3 niveles de señal y 2 símbolos (cambios) para transportar 1 bit. Es compleja y necesita mayor BW, aunque es más eficiente que las anteriores.

Ya no se utiliza.

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

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

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

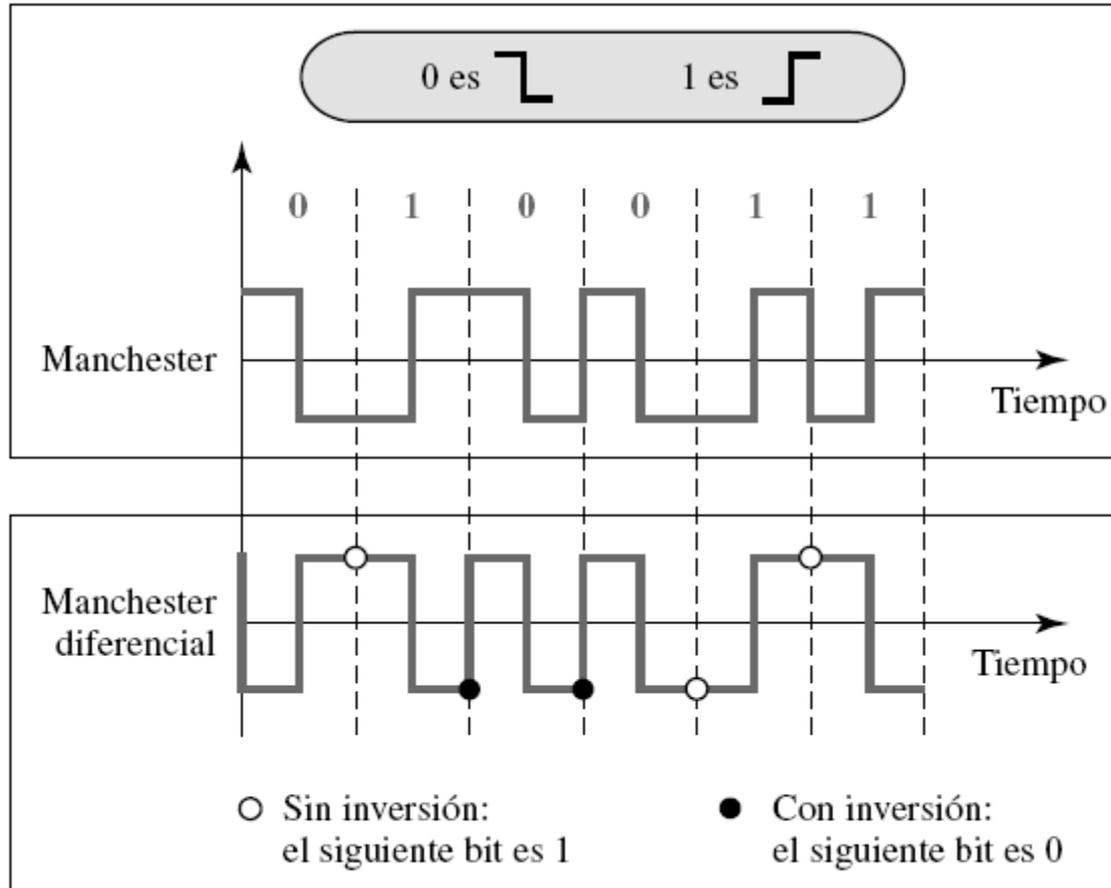
Solución

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 4.8 Bifásica polar: Esquemas Manchester y Manchester diferencial.

Bifásica:

La señal cambia en medio del intervalo del bit, pero sin retorno a cero, continuando el resto del intervalo en el polo opuesto. De manera que la primera mitad del periodo determina el valor del bit y la segunda sincroniza.

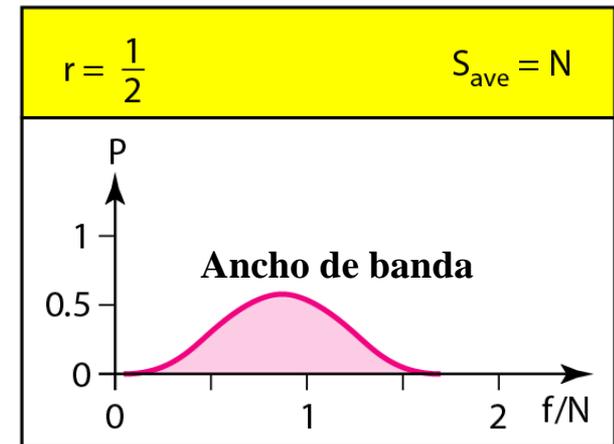


Manchester:

Combina las ideas de RZ y NRZ-L. El voltaje permanece en un nivel durante la primera mitad y transiciona a otro nivel en la segunda mitad.

Solución a problema 3: la codificación Manchester. Hace lo mismo que RZ pero con sólo 2 niveles de señal.

Se utiliza en redes LAN Ethernet.



Manchester diferencial:

Combina las ideas de RZ y NRZ-I. Siempre hay una transición en la mitad del bit.

Se utiliza en redes LAN Token Ring.

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

Ambos esquemas, solucionan los problemas asociados a las codificaciones NRZ.

Sin embargo el ancho de banda mínimo para estos esquemas el doble que los NRZ.

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

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

Esquemas bipolares: AMI y pseudoternaria.

Esquemas bipolares o binarias multinivel:

o Se utilizan tres niveles: positivo, negativo y cero.

o AMI (Inversión de marca alternada):

La palabra *marca* proviene de la telegrafía y significa 1.

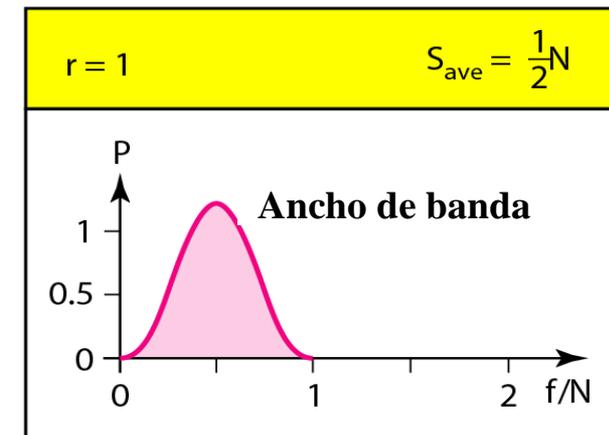
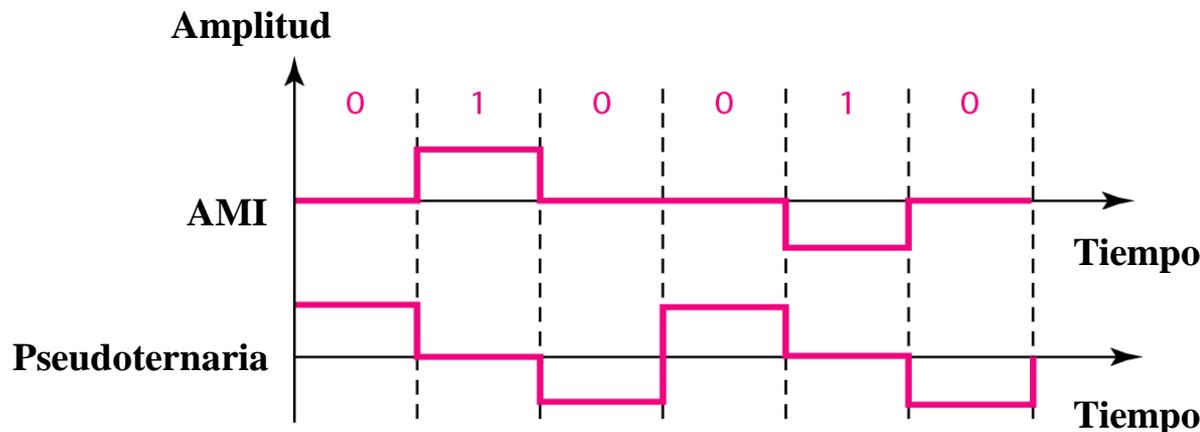
Así AMI significa inversión a 1 alterno. Los unos se representan con valores alternados positivos y negativos. Un valor de voltaje neutral representa el 0.

AMI se utiliza en comunicaciones de larga distancia, pero tiene el problema de la sincronización cuando aparecen largas secuencias de 0. La técnica de aleatorización lo soluciona.

PseudoTernaria:

Variación de AMI en la que un bit a 1 se codifica como un voltaje cero y un bit a cero se codifica alternando voltajes positivos y negativos.

- El esquema bipolar se desarrolló como alternativa al NRZ.
- No existe componente DC.
- Se utiliza normalmente para comunicaciones a larga distancia.
- Tiene problema de sincronización si aparecen largas secuencias de ceros.



Esquemas multinivel:

o El objetivo es incrementar el número de bits por baudio, codificando un patrón de m elementos de datos en un patrón de n elementos de señal. Los diferentes símbolos permiten diferentes niveles de señal.

o Estos tipos de clasificación se denominan $mBLn$, donde:

m es la longitud del patrón binario.

B significa dato binario.

n es la longitud del patrón señal.

L es el número de niveles de la señal, utilizando con frecuencia caracteres para representar valores:

B (binario) para $L = 2$.

T (ternario) para $L = 3$.

Q (cuaternario) para $L = 4$.

c

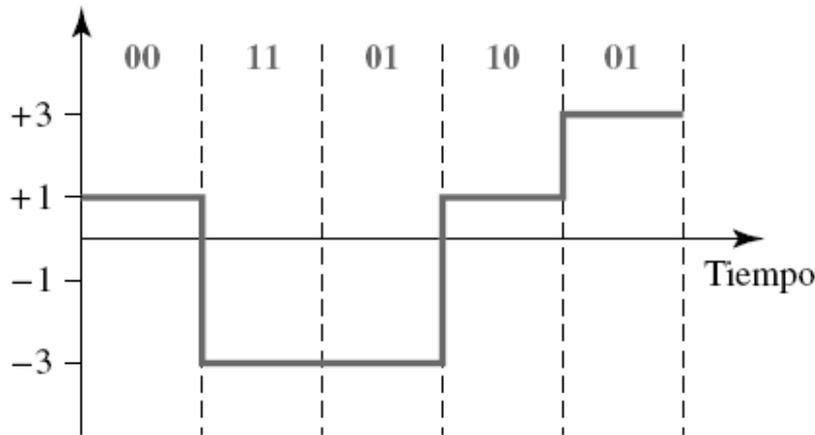
En los esquemas $mBnL$, un patrón de m elementos de datos se codifica como un patrón de n elementos de señal donde $2^m \leq L^n$.

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

Se pueden enviar datos el doble de rápido que con NRZ-L, ya que la tasa de señales media es $S=N/4$.



Asumiendo un nivel original positivo

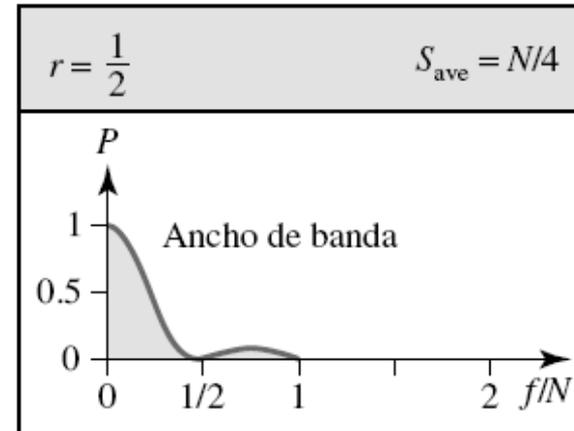
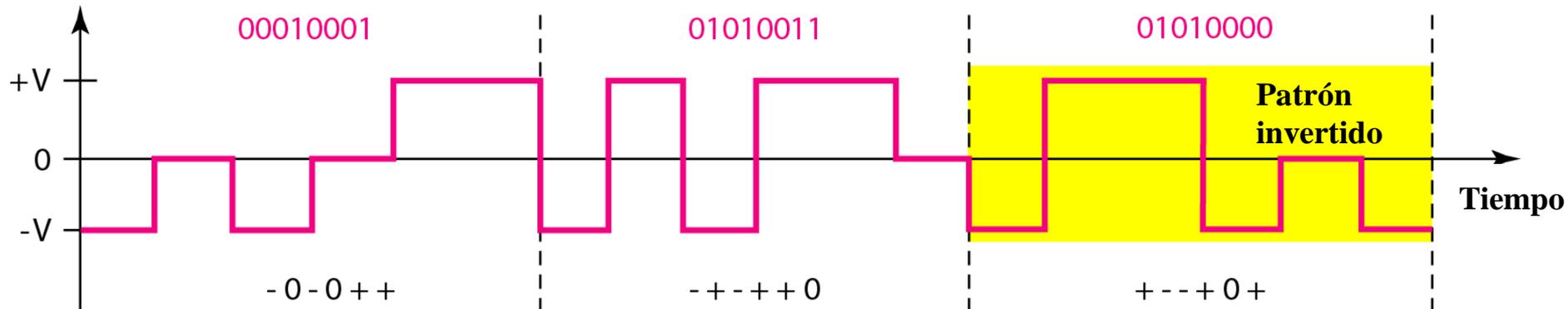
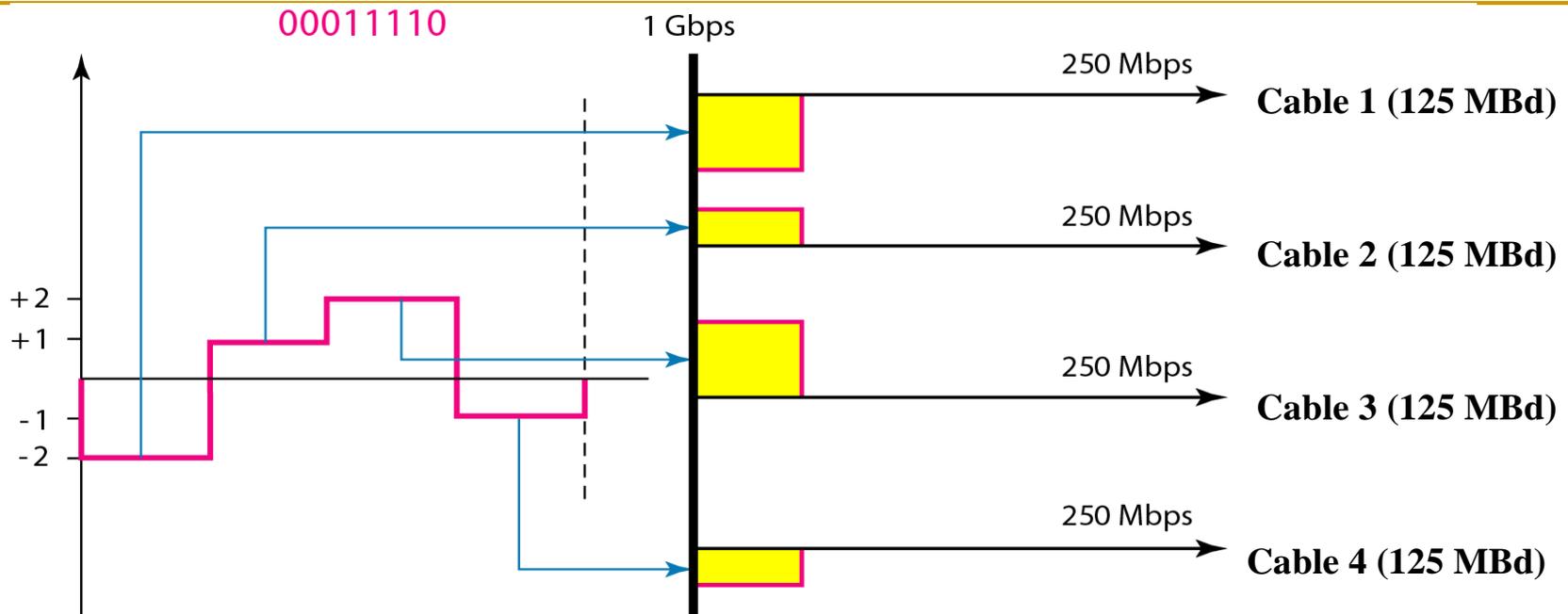


Figura 4.11 *Esquema multinivel 8B6T.*



Hay $3^6 - 2^8 = 222$ elementos redundantes que ofrecen sincronización, detección de errores y equilibrio DC.

Figura 4.12 *Esquema multinivel 4D-PAM5.*



4D significa que los datos se envían utilizando cuatro cables simultáneamente. Utiliza cinco niveles de voltajes -2, -1, 0, 1 y 2. Sin embargo el 0 es usado como detección de errores.

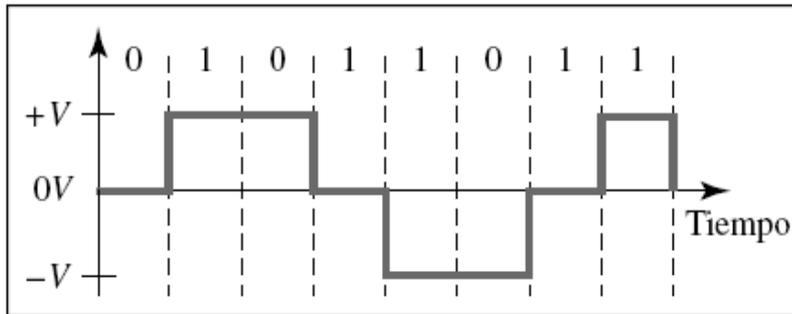
Este esquema tiene muchos elementos redundantes que pueden usarse como detección de errores.

Esquema de multitransmisión MLT-3.

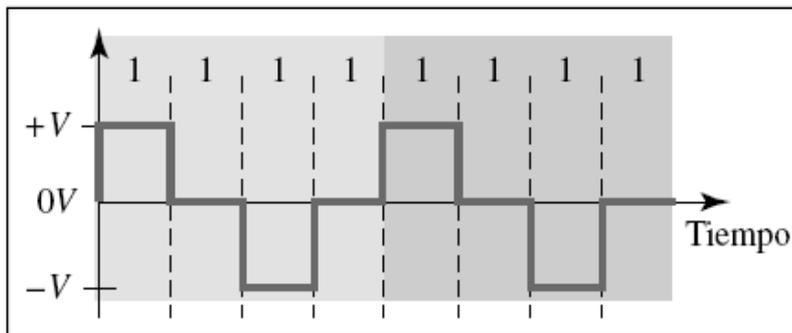
Esquema de codificación diferencial con más de dos reglas de transición.

o Utiliza tres niveles ($V+$, 0 , $V-$) y tres reglas de transición para moverse entre niveles.

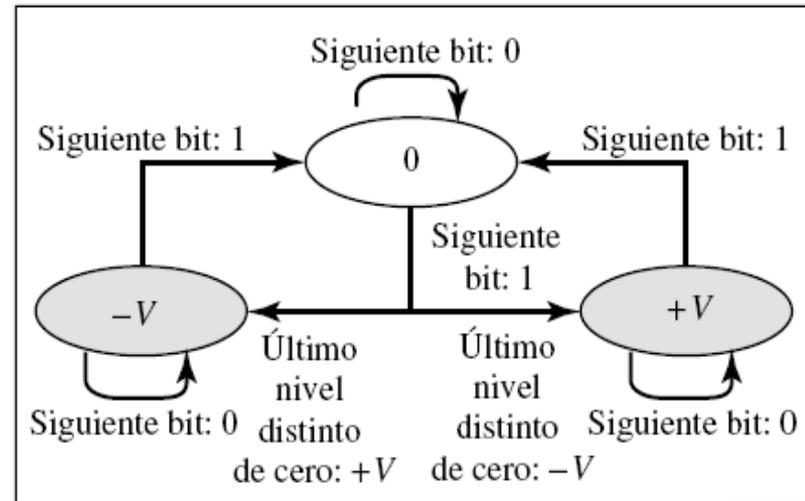
Es un esquema adecuado cuando se necesitan enviar datos a 100 Mbps en un medio físico que no soporte más de 32 MHz.



a. Caso típico



b. Caso peor



c. Estados de transición

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

<i>Categoría</i>	<i>Esquema</i>	<i>Ancho de banda (medio)</i>	<i>Características</i>
Unipolar	NRZ	$B = N/2$	Costoso, sin autosincronización si hay largas secuencias de 0 o 1, DC
Unipolar	NRZ-L	$B = N/2$	Sin autosincronización si hay largas secuencias de 0 o 1, DC
	NRZ-I	$B = N/2$	Sin autosincronización para largas secuencias de 0, DC
	Bifásica	$B = N$	Autosincronización, no DC, gran ancho de banda
Bipolar	MI	$B = N/2$	Sin autosincronización para largas secuencias de 0, DC
Multinivel	2B1Q	$B = N/5$	Sin autosincronización para largas secuencias de mismos bits dobles
	8B6T	$B = 3N/4$	Autosincronización, no DC
	4D-PAM5	$B = N/8$	Autosincronización, no DC
Multilínea	MLT-3	$N/3$	Sin autosincronización para largas secuencias de 0

Codificación de bloques:

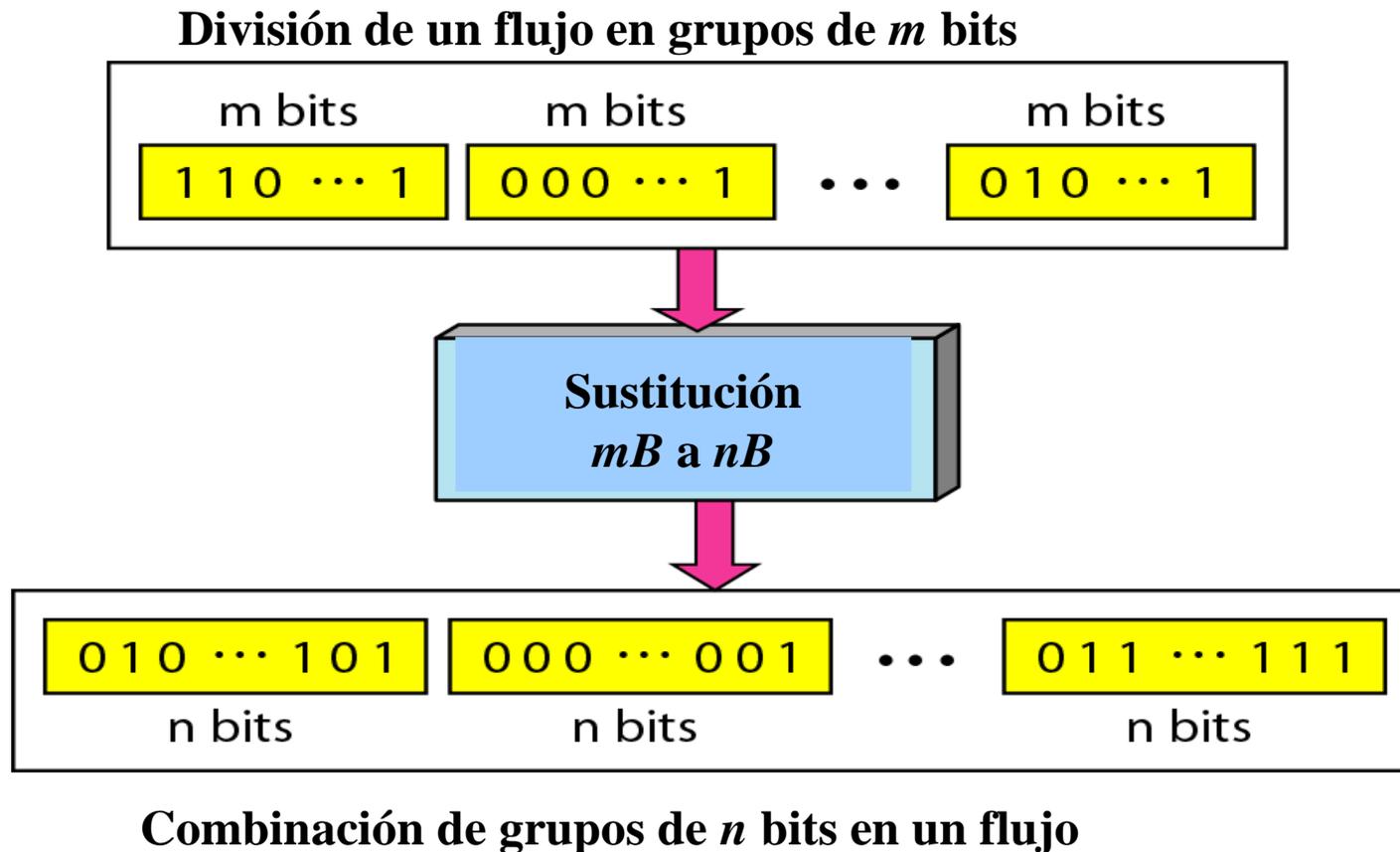
- o Proporciona la redundancia necesaria para asegurar la sincronización y detección de errores.
- o La codificación de bloques se conoce como codificación mB/nB .
- o Reemplaza cada grupo de m bits por un grupo de n bits.
- o Involucra tres etapas:

División: Una secuencia de bits se divide en grupos de m bits.

Sustitución: Se sustituye un grupo de m bits por un grupo de n bits.

Combinación: Los grupos de n bits se combinan para formar un flujo.

Figura 4.14 *Concepto de codificación de bloques*



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

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

Diseñado para su utilización en combinación con NRZ-I, suprimiendo el problema de la sincronización que padece este esquema de codificación.

- La idea es sustituir grupos de 4 bits por grupos de 5 bits, no teniendo más de un 0 a la izquierda y no más de 2 ceros a la derecha.
- Hay $2^5 - 2^4 = 16$ elementos redundantes que se utilizan para el control de la transmisión.
- Soluciona uno de los problemas de la codificación NRZ-I pero aumenta más de un 20 % la tasa de baudios.

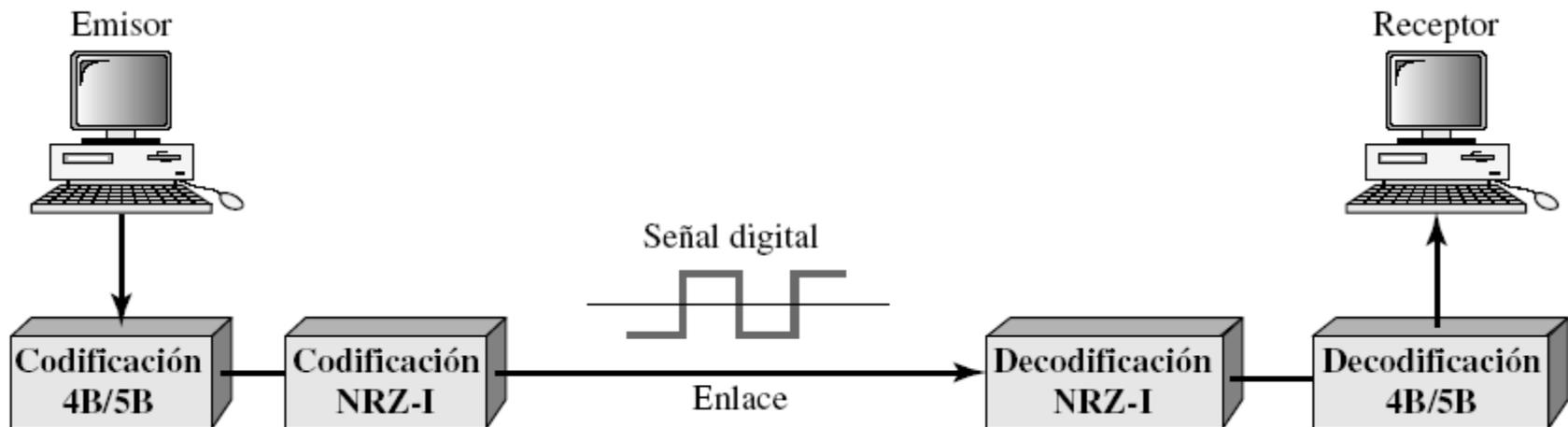
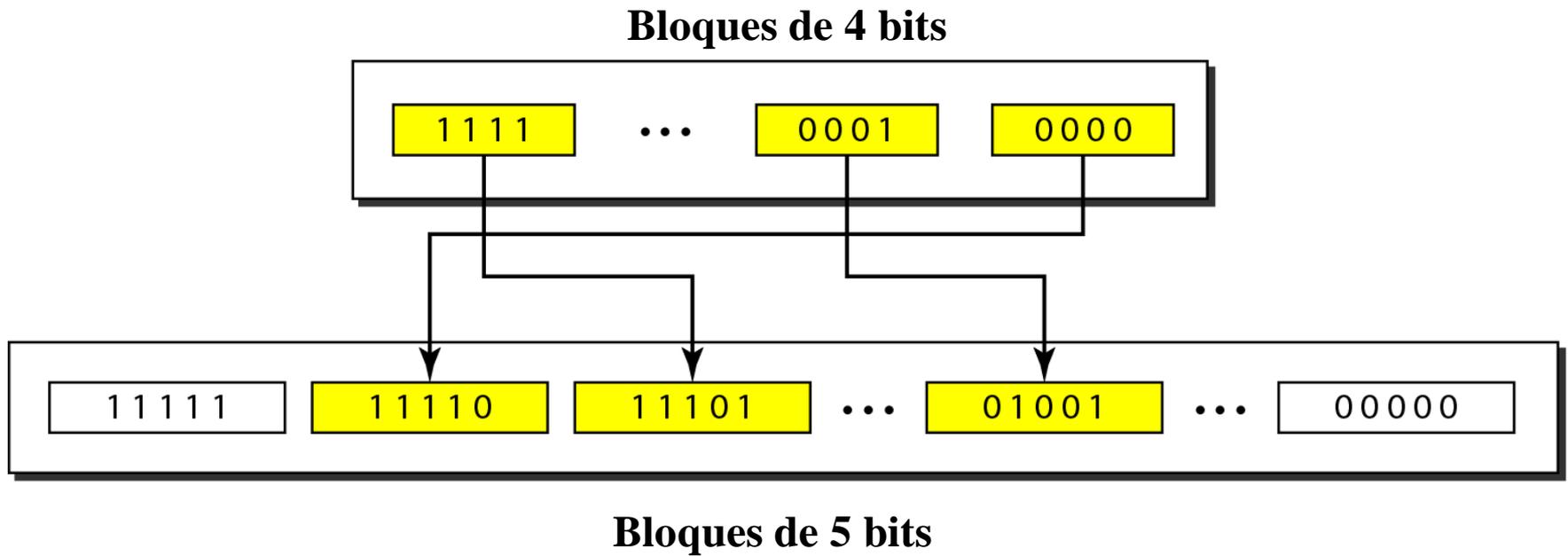


Tabla 4.2 *Proyección de códigos en 4B/5B.*

<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.*



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 utilizcando 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.

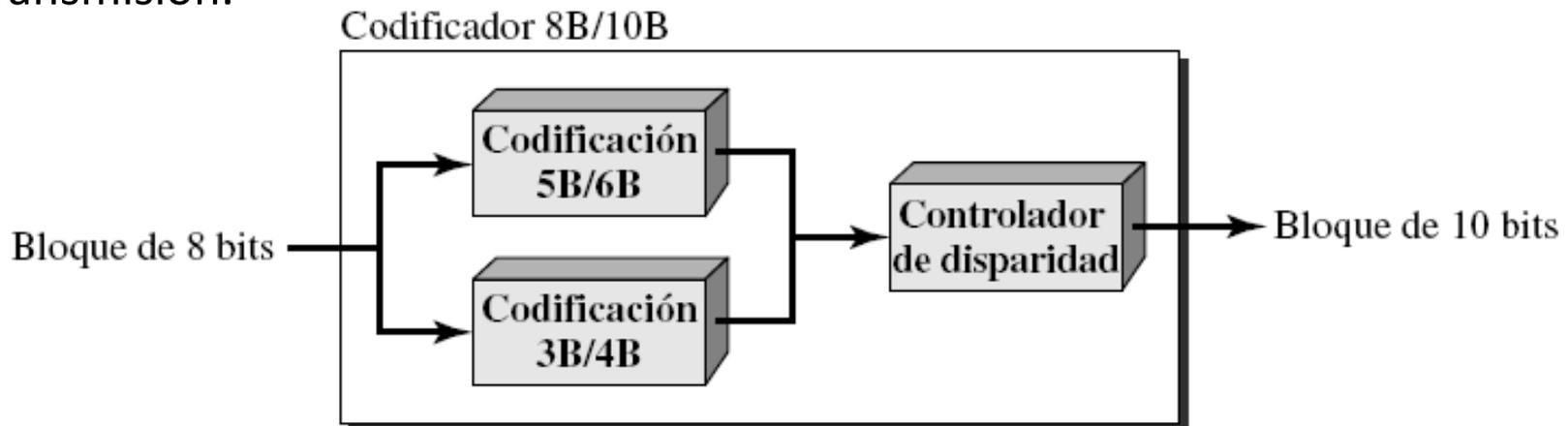
Figura 4.17 Codificación de bloques 8B/10B.

Similar a 4B/5B.

En un bloque de 8 bits, los 5 más significativos son codificados con 5B/6B y los 3 bits menos significativos son codificados con 3B/4B. Simplificando la tabla de proyección.

Se utiliza un controlador de disparidad que sigue la pista del exceso de 0 sobre 1 y viceversa, complementando el bloque si así sucediera.

Hay $2^{10} - 2^8 = 768$ elementos redundantes que se utilizan para el control de la transmisión.



**B8ZS sustituye ocho ceros
consecutivos con 000VB0VB.**

AMI utilizado con aleatorización.

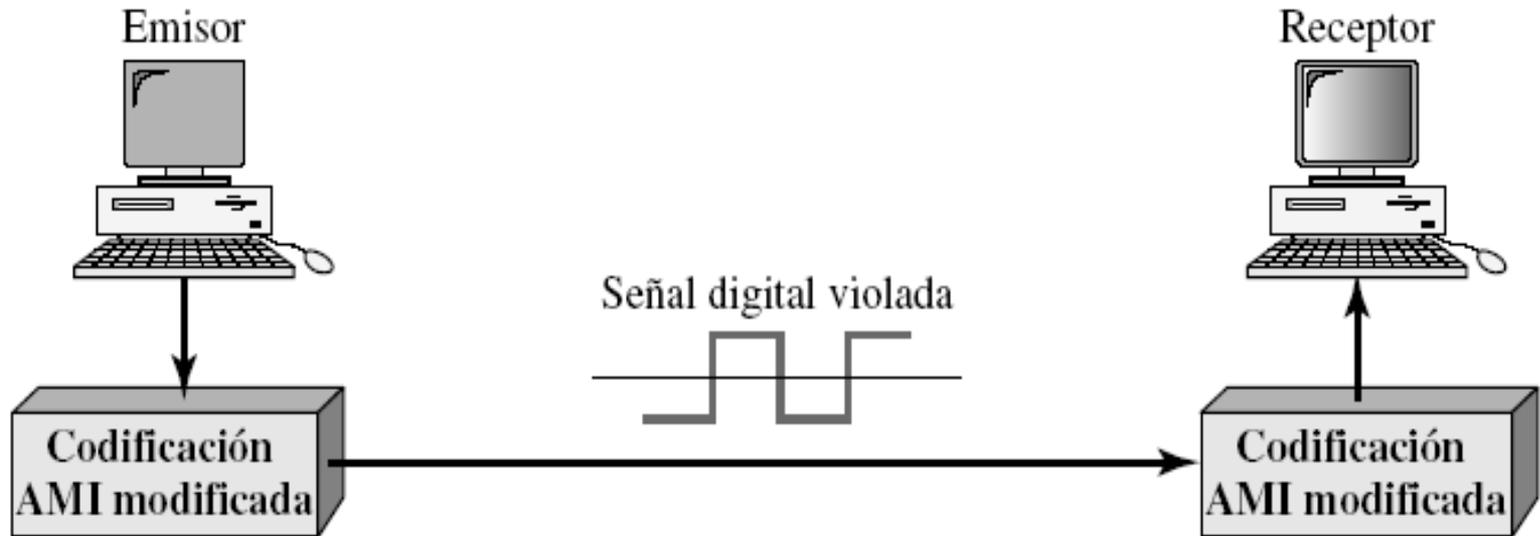
Aleatorización:

Utilizada para establecer comunicación a largas distancias.

Modifica la codificación AMI, resolviendo el problema de la sincronización en una larga secuencia de ceros.

El sistema inserta los pulsos requeridos de acuerdo a las reglas de aleatorización definidas.

La aleatorización se realiza al mismo tiempo que la codificación.



Aleatorización B8ZS (Bipolar con sustitución de ocho ceros)

Utilizada normalmente en Norte América.

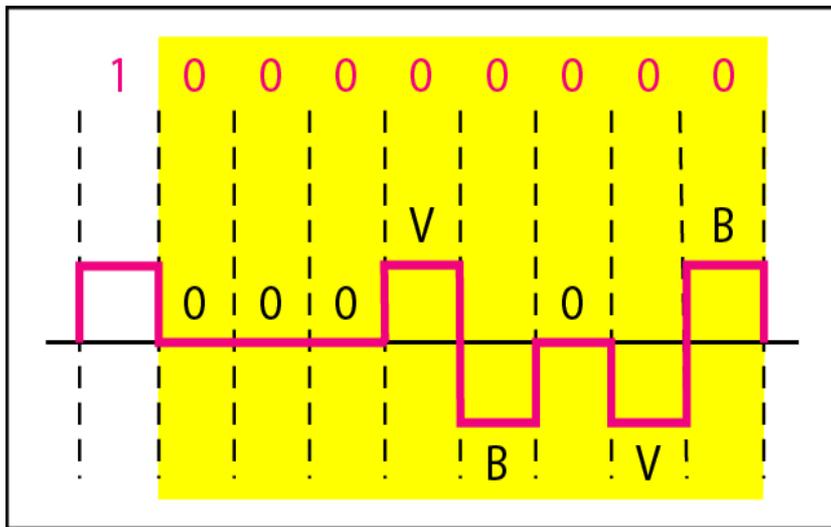
Sustituye ocho ceros consecutivos con 000VB0VB.

La V indica violación, rompiendo la regla de la codificación AMI.

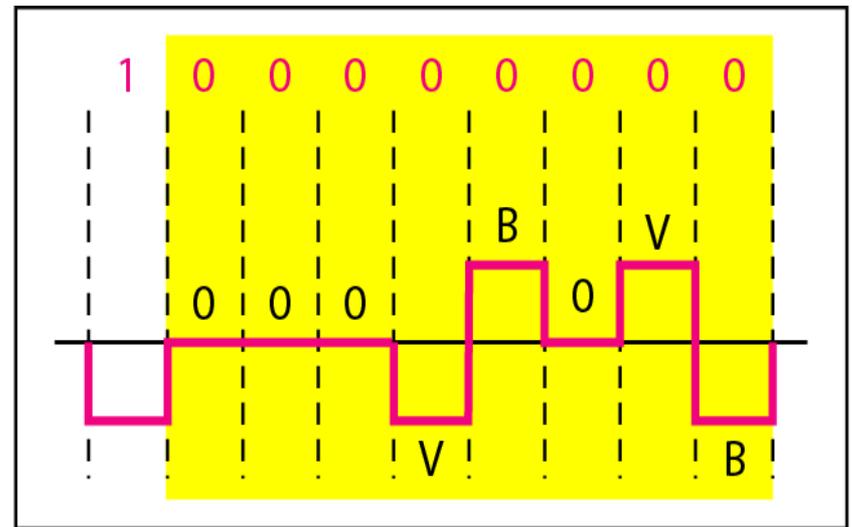
La B indica Bipolar.

No cambia la tasa de bits.

Mantiene el equilibrio DC.



a. El nivel anterior es positivo.



b. El nivel anterior es negativo.

Aleatorización HDB3 (Bipolar de alta densidad con tres ceros)

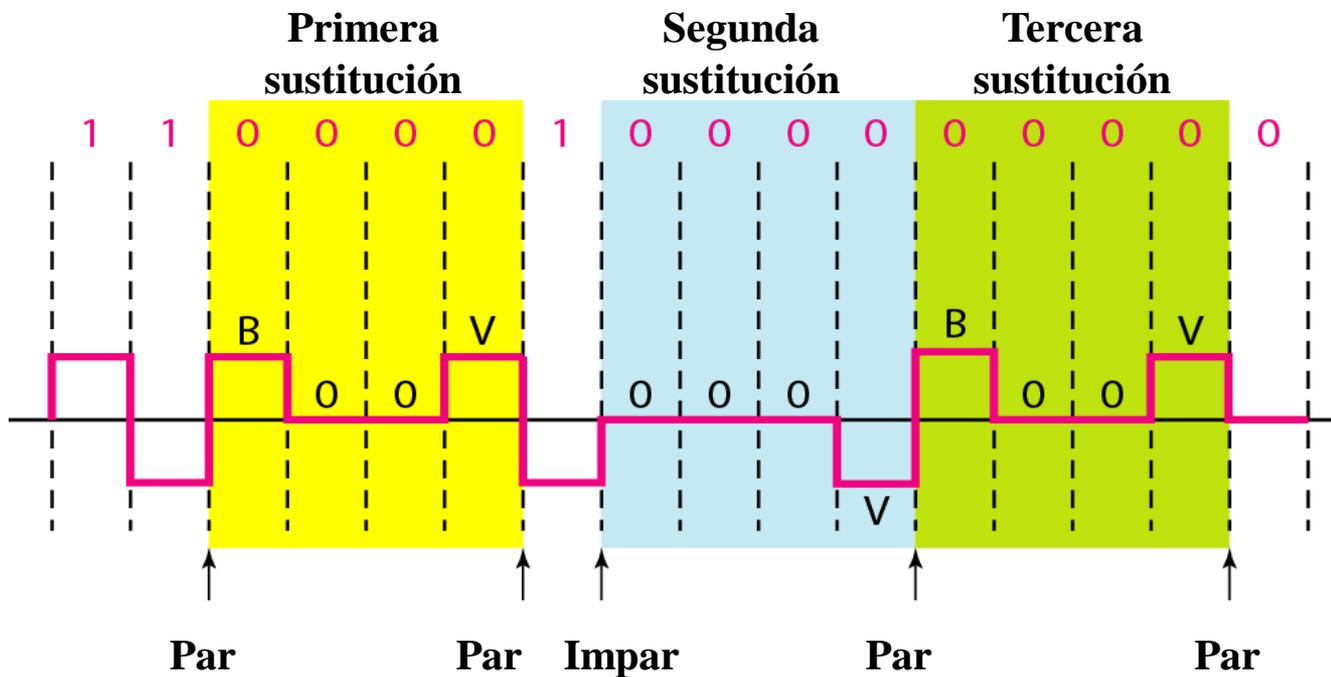
Utilizada normalmente fuera de Norte América.

Cuatro ceros consecutivos son reemplazados por 000V o B00V.

La razón para dos sustituciones diferentes es mantener un número par de pulsos distintos de cero después de cada sustitución.

1. Si el número de pulsos distinto de cero después de la última sustitución es impar, el patrón de sustitución será 000V.
2. 1. Si el número de pulsos distinto de cero después de la última sustitución es par, el patrón de sustitución será B00B.

Así se consigue siempre que el número total de pulsos distinto de cero sea par.



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)

Componentes de un codificador PCM

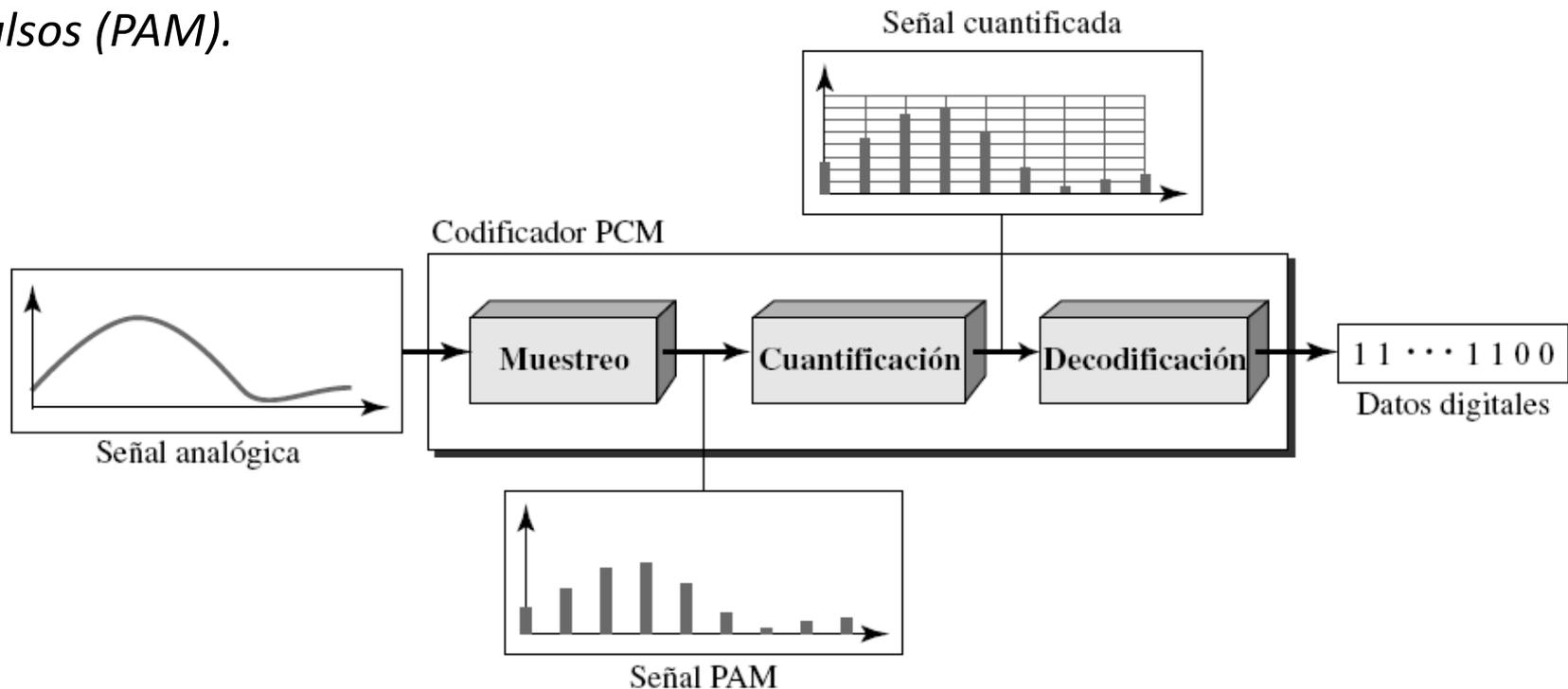
Un codificador PCM tiene tres procesos: **Muestreo**, **Cuantificación** y **codificación**.

Muestreo:

La señal analógica es muestreada cada T_s s, donde T_s es el intervalo de muestreo o periodo.

El inverso de T_s se denomina *tasa de muestreo* o *frecuencia de muestreo* y se denota como f_s .

El proceso de muestreo también se conoce como *modulación por amplitud de pulsos (PAM)*.



El proceso de muestro es conocido como modulación por amplitud de pulsos (PAM).

Tasa de muestreo:

o De acuerdo al teorema de Nyquist, debe ser al menos el doble de la frecuencia más alta contenida en la señal.

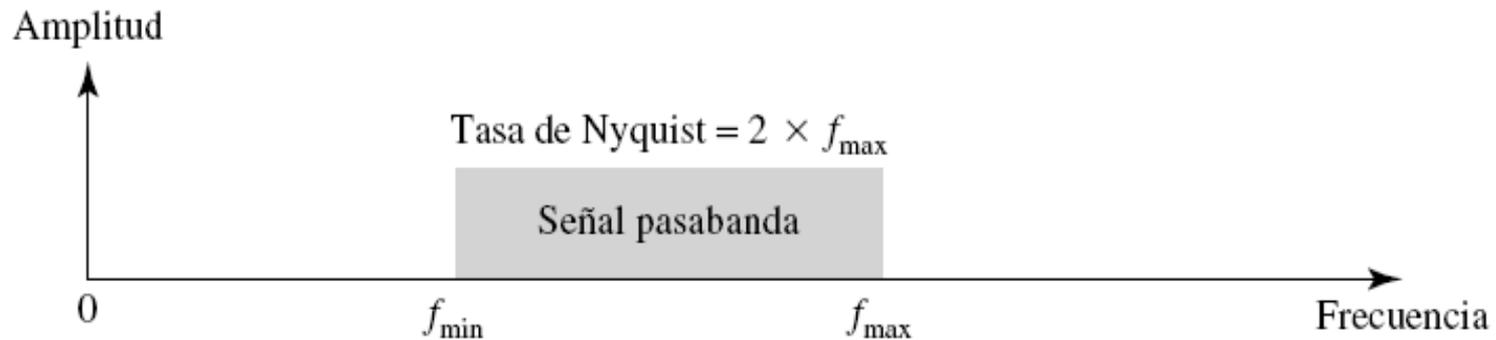
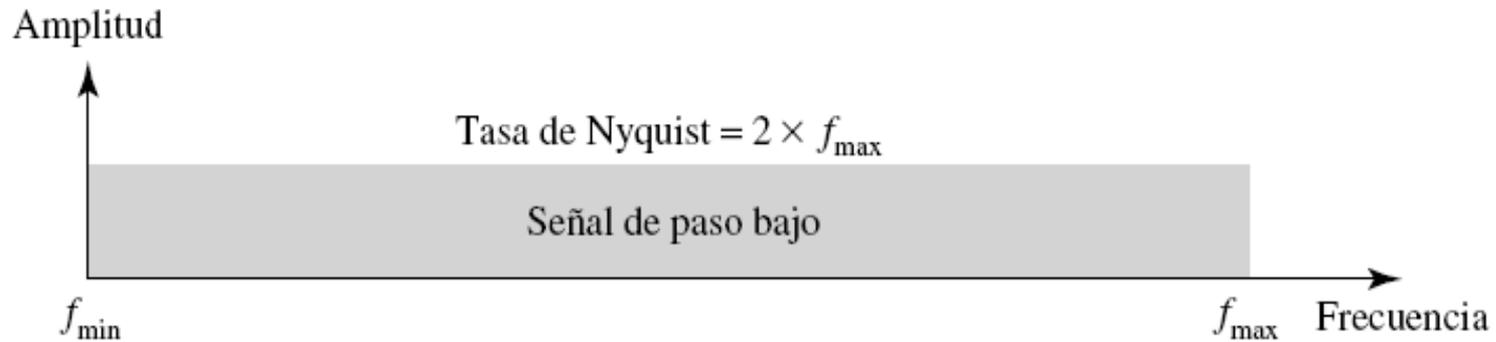
o Una señal con ancho de banda infinito no puede ser muestreada.

o Si la señal es de *paso bajo*, la frecuencia más alta es el ancho de banda.

o Si es *paso banda*, el ancho de banda es menor que la frecuencia más alta.

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.*



Cuantificación:

La señal original se compone de un grupo de valores continuos en el tiempo, para discretizarla se divide en un grupo finito de magnitudes discretas entre un limite superior y un limite inferior.

Del proceso de muestreo se obtiene una serie de pulsos con valores de amplitud comprendidos entre la mínima y la máxima amplitud de la señal.

Este conjunto puede ser entero o con valores no enteros entre dos límites, haciendo imposible su uso en el proceso de codificación.

Para hacerlo posible, se siguen cuatro etapas de cuantificación:

o Se asume que la señal analógica tiene amplitudes instantáneas entre V_{min} y V_{max} .

o Se divide el rango en L zonas, cada una de un ancho Δ (delta).

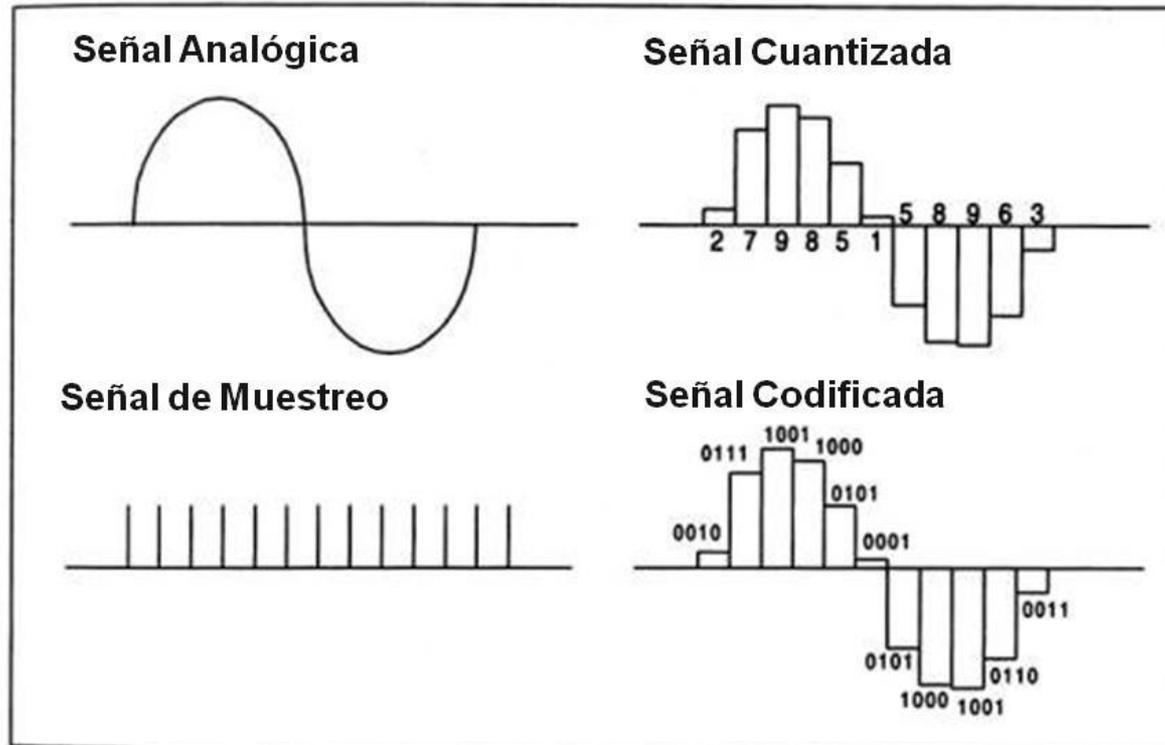
$$\Delta = \frac{V_{max} - V_{min}}{L}$$

o Se asignan valores cuantificados en el punto medio de cada zona.

o Se aproxima el valor de la amplitud de la muestra a los valores cuantificados.

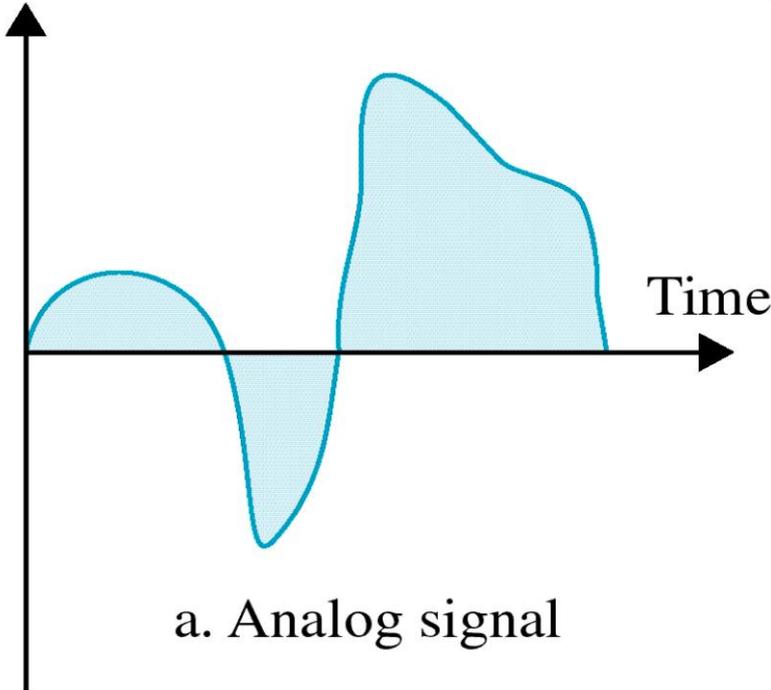
Si se hace corresponder un dígito a cada nivel de manera que exista correspondencia uno a uno entre los niveles y el conjunto de los enteros reales, se puede construir una tabla de valores para representar binariamente cada valor de la señal en cada uno de los intervalos de muestreo.

De esta manera se logra digitalizar una señal continua. Veamos una figura con mas detalles...

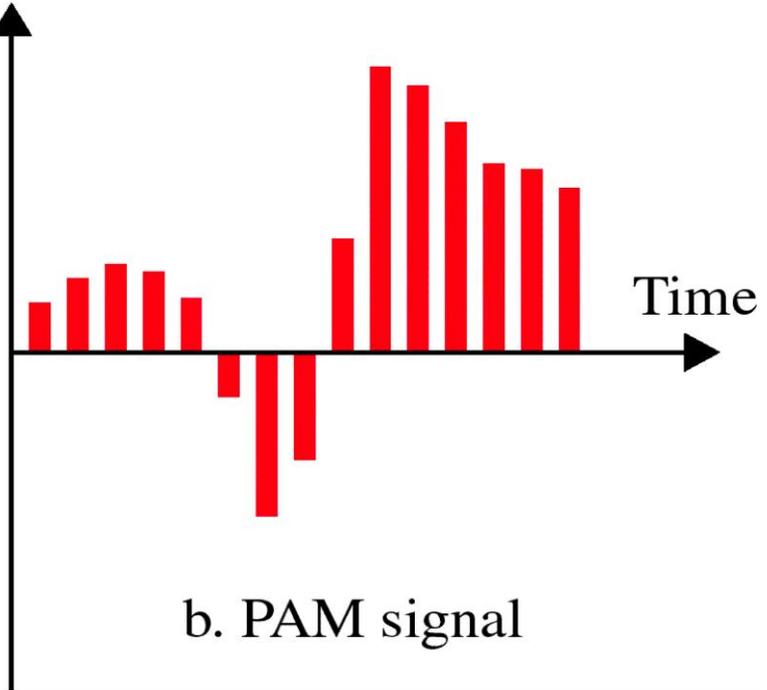


PAM

Amplitude

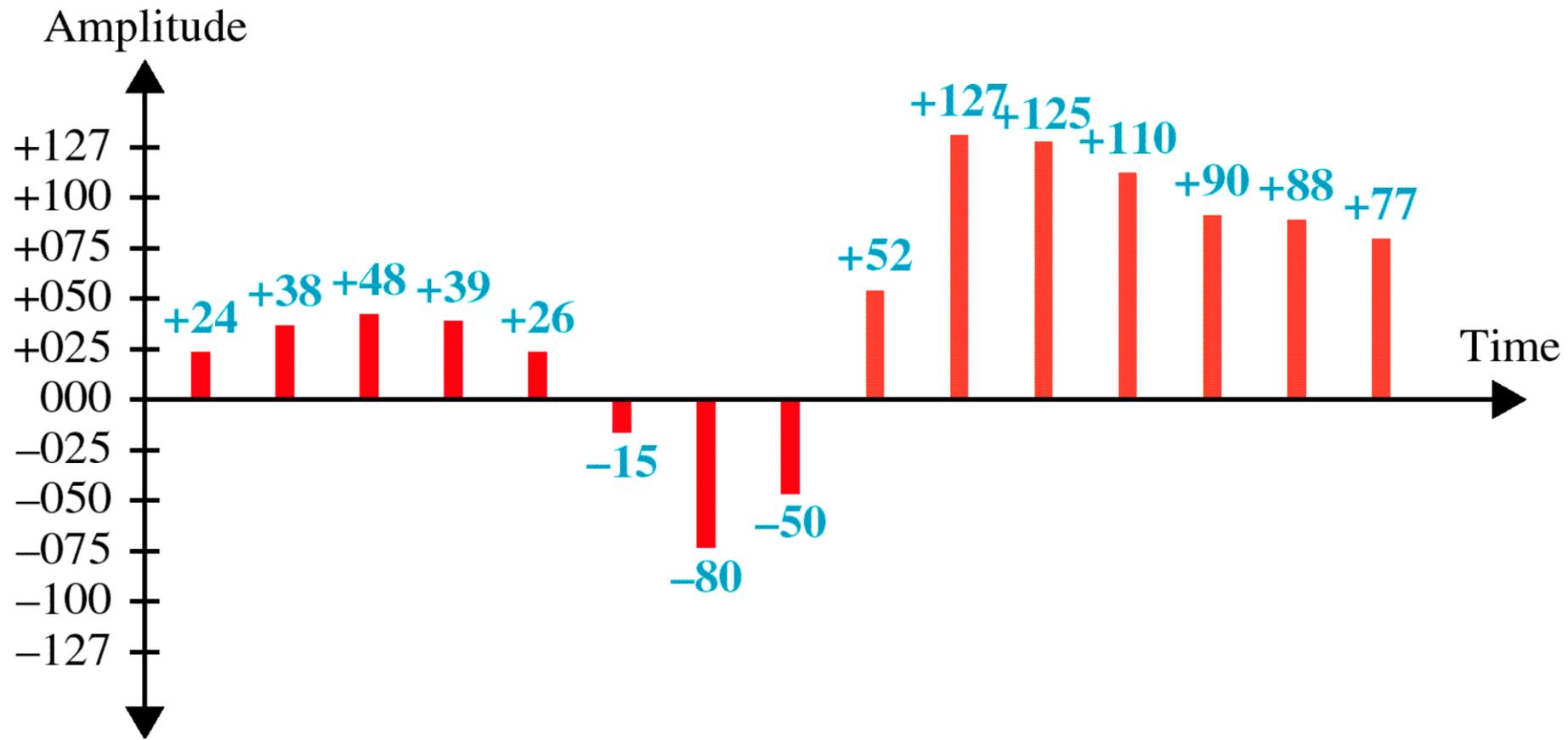


Amplitude



- La señal analógica se muestrea con una determinada frecuencia y se genera una señal de pulsos discretos.
- PAM es el primer paso del método Modulación por codificación en pulsos (PCM)

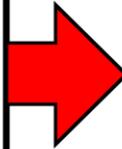
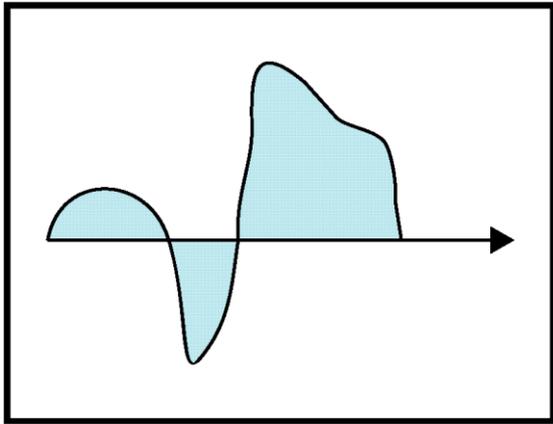
Señal PAM cuantificada



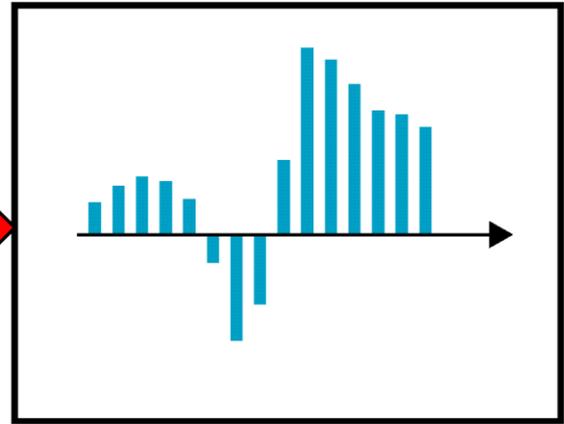
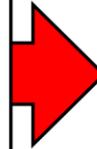
Magnitudes de señal utilizando cuantificación

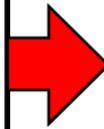
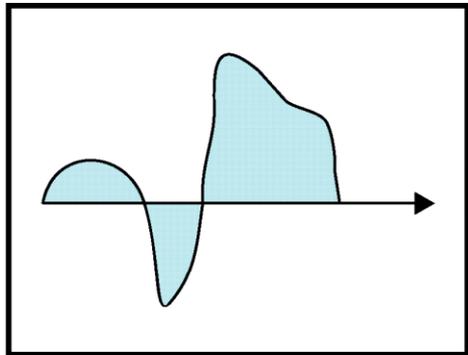
+024	00011000	-015	10001111	+125	01111101
+038	00100110	-080	11010000	+110	01101110
+048	00110000	-050	10110010	+090	01011010
+039	00100111	+052	00110110	+088	01011000
+026	00011010	+127	01111111	+077	01001101

Sign bit
+ is 0 - is 1

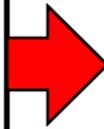
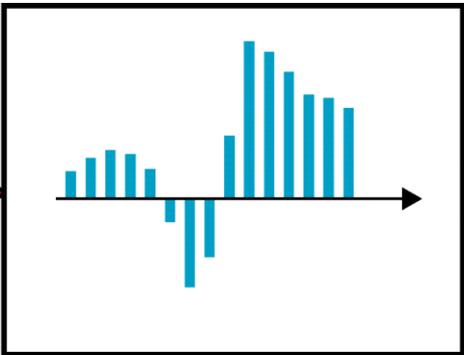


PAM

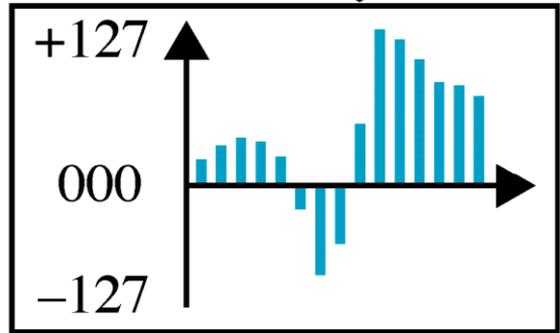


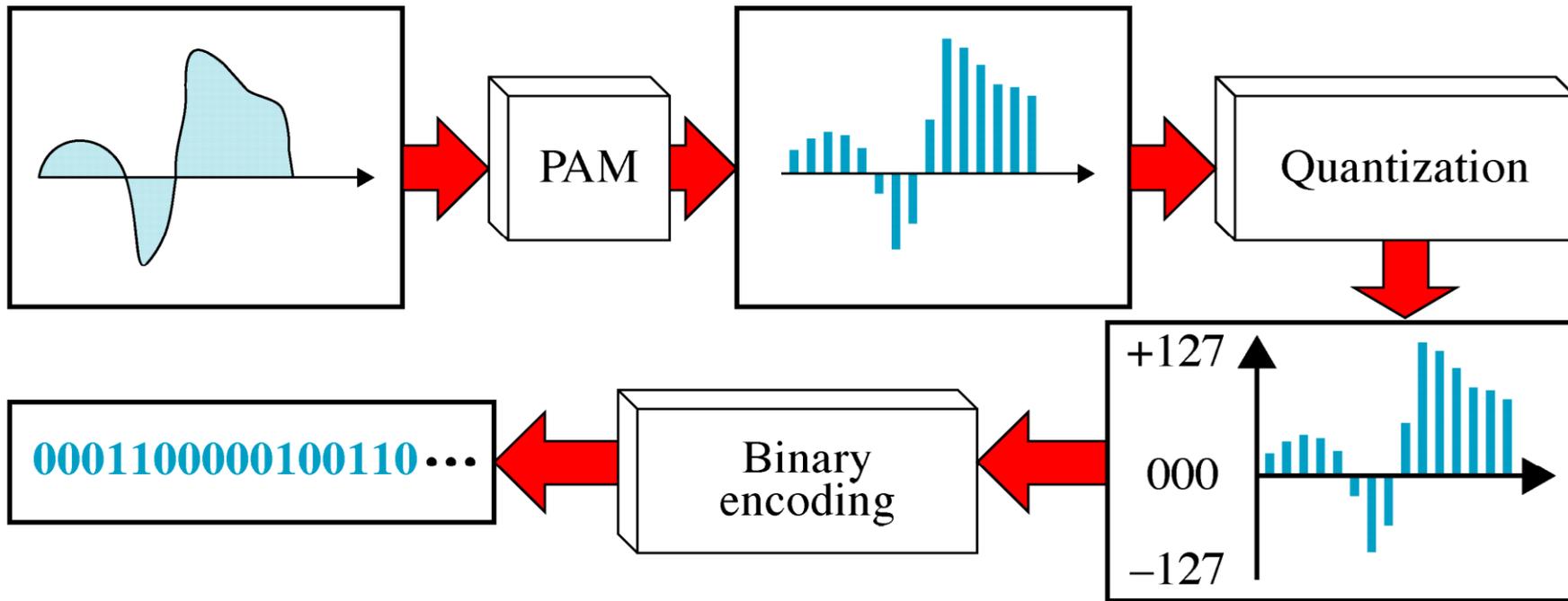


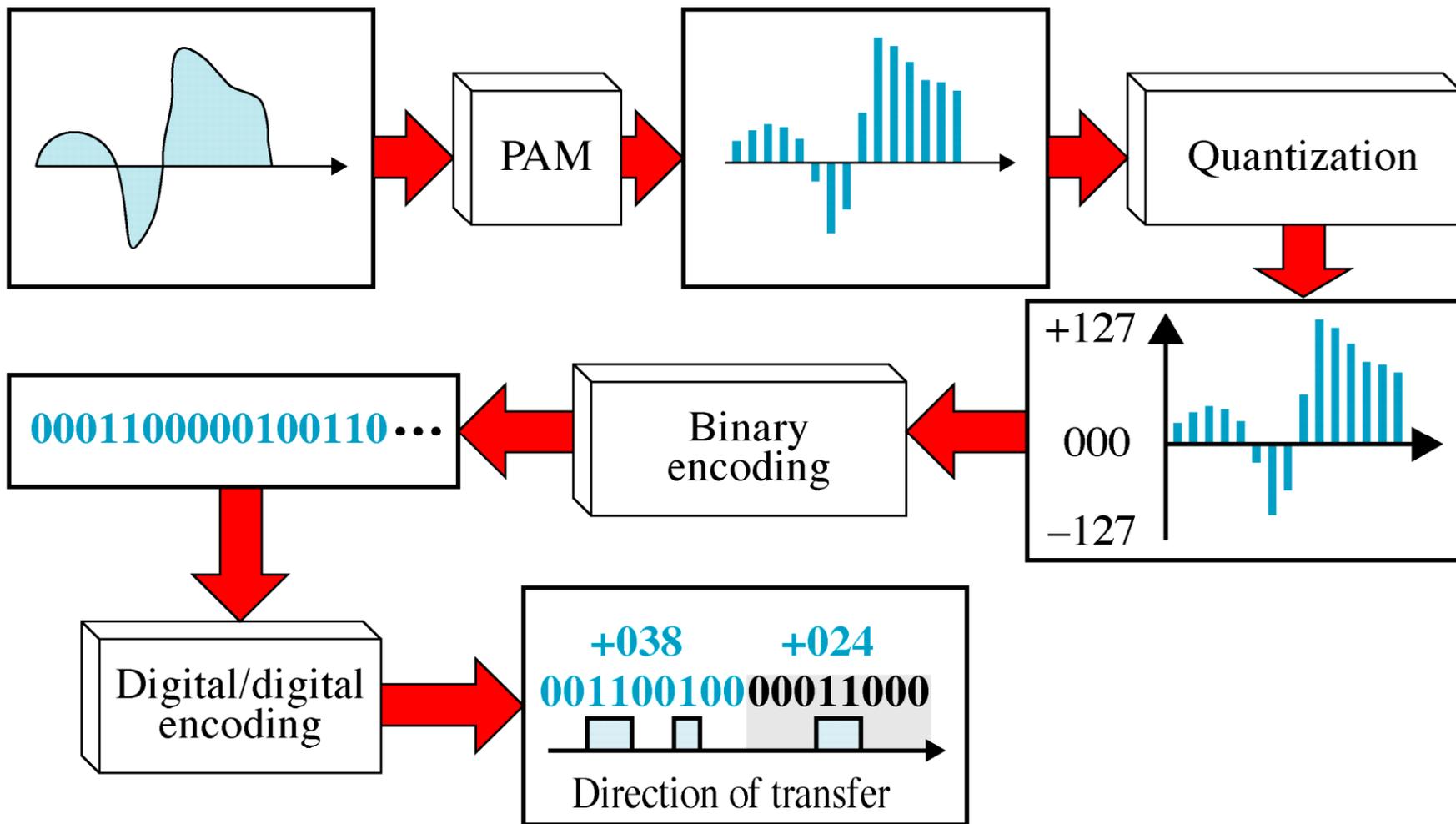
PAM



Quantization

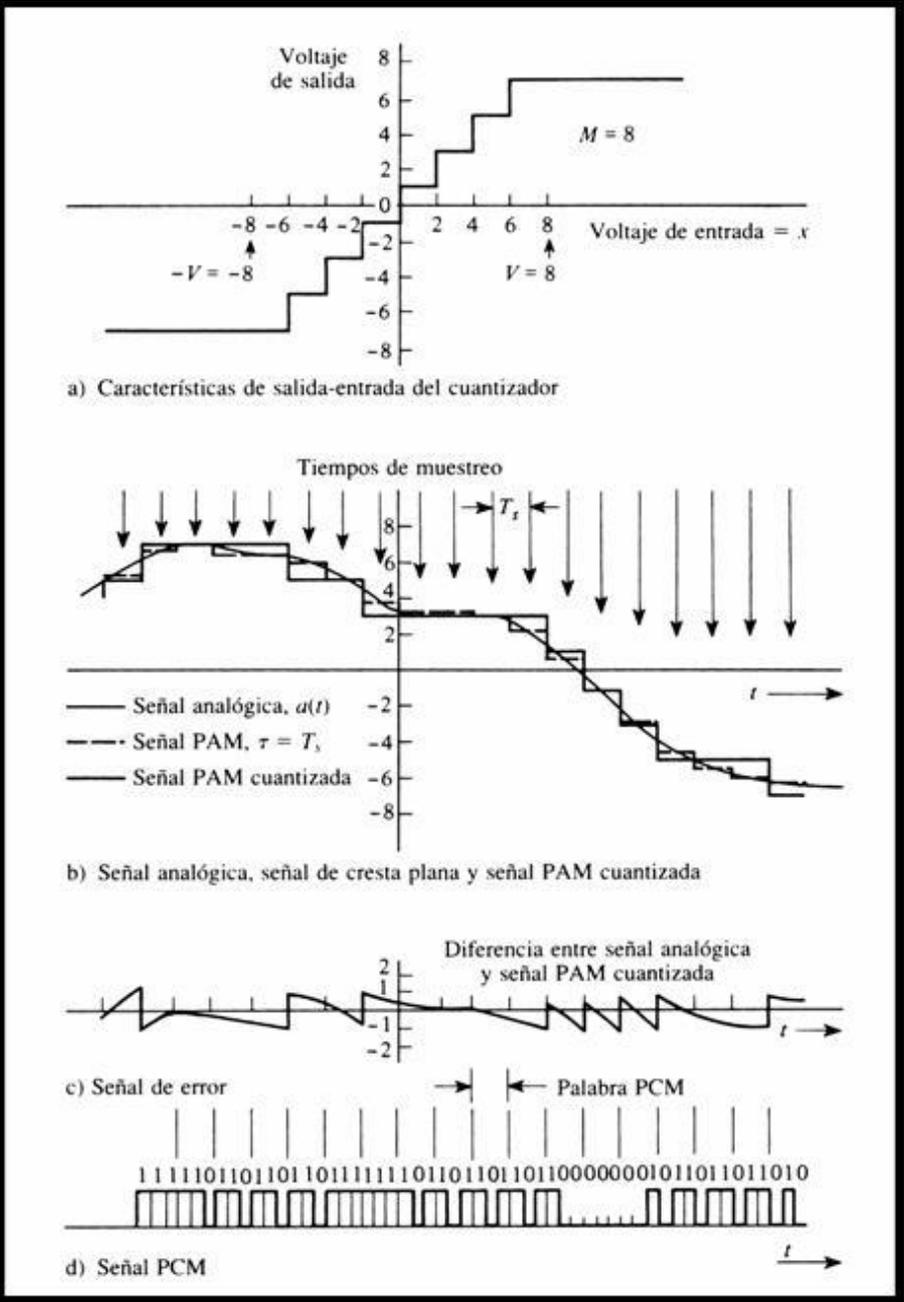






Proceso de Digitalización

Formas de Ondas en un Sistema PCM



Tres métodos de muestreo diferentes para PCM

Existen tres métodos de muestreo, **ideal**, **natural** y **de cresta plana**.

Ideal:

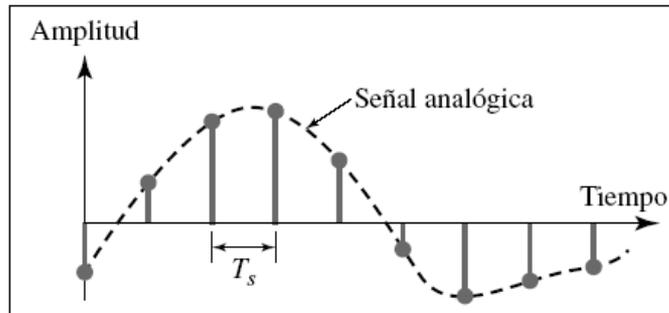
- o Se muestrean los pulsos de la señal analógica.
- o No se puede implementar fácilmente.

Natural:

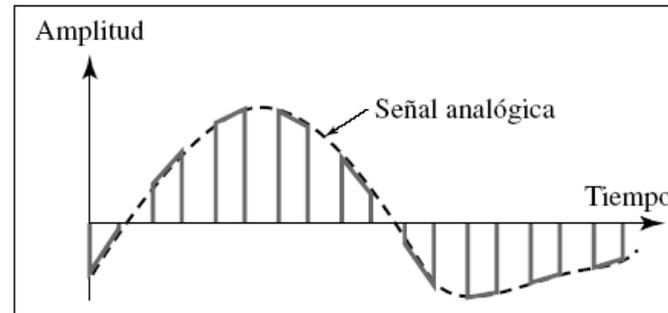
- o Un conmutador de alta velocidad se enciende solo durante un pequeño periodo de tiempo cuando está realizando el muestreo. Obteniendo una secuencia de muestras que retienen la forma de la señal analógica.

Cresta plana:

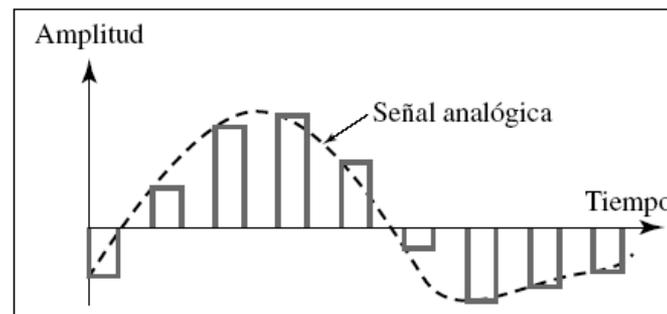
- o Es el más común.
- o Crea muestras de cresta plana utilizando un circuito.



a. Muestreo ideal



b. Muestreo natural



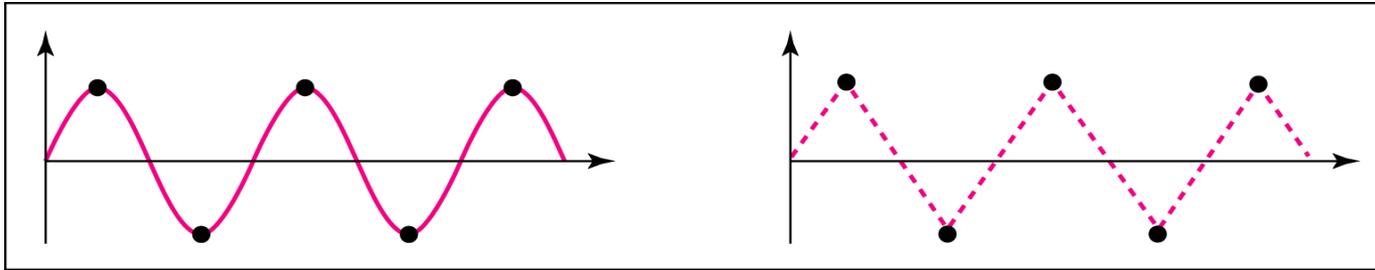
c. Muestreo de cresta plana

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.

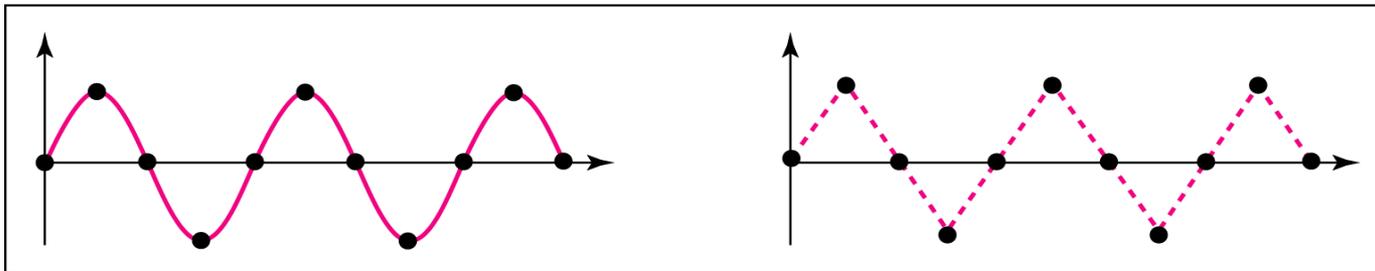
Se puede ver que el muestreo con la tasa de Nyquist crea una buena aproximación de la señal original (parte a). El sobremuestreo de la parte b también puede crear la misma aproximación, pero es redundante e innecesaria.

El muestreo por debajo de la tasa de Nyquist (parte c) no produce una señal que se parezca a la señal seno original.

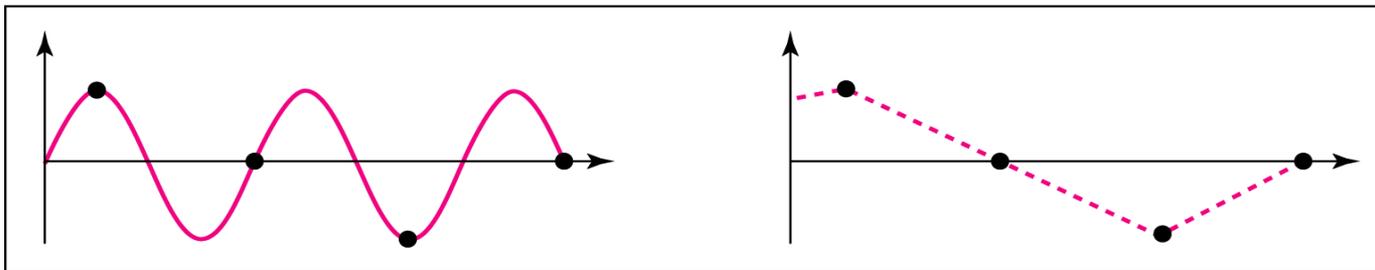
Figura 4.24 *Recuperación de una señal sinusoidal muestreada con diferentes tasas de muestreo.*



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



b. Sobremuestreo: $f_s = 4f$



c. Inframuestreo: $f_s = f$

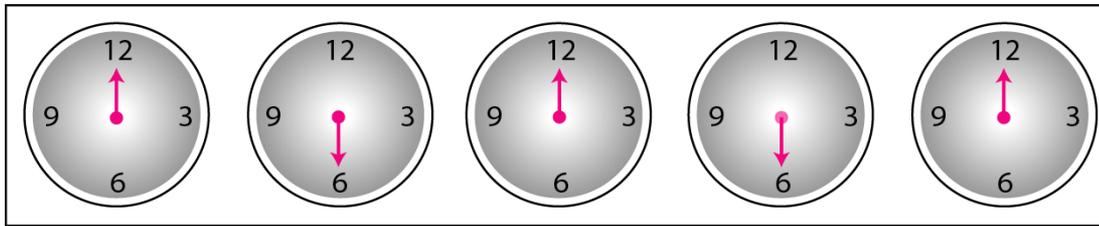
Consideremos una manecilla de un reloj. La manecilla de los minutos tiene un periodo de 60 s. De acuerdo con el teorema de Nyquist, es necesario muestrearla cada 30 s ($T_s = T$ or $f_s = 2f$).

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 adelante.

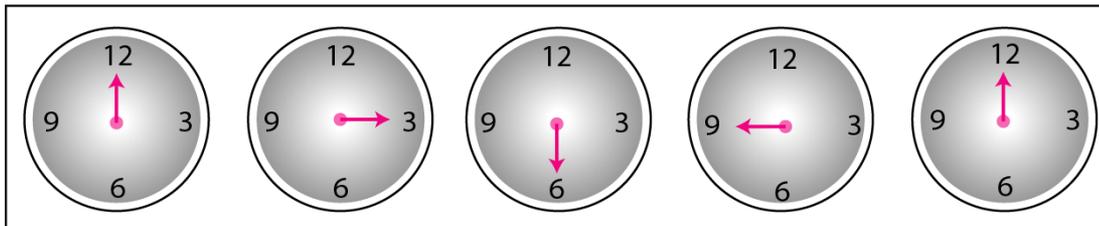
En la parte c, se muestrea por debajo de la tasa de nyquist ($T_s = 3/4 T$ o $f_s = 4/3 f$). los puntos de la muestra, en orden, son 12, 9, 6, 3 y 12. Aunque el reloj se está moviendo hacia adelante, el receptor cree que el reloj se está moviendo hacia atrás.

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



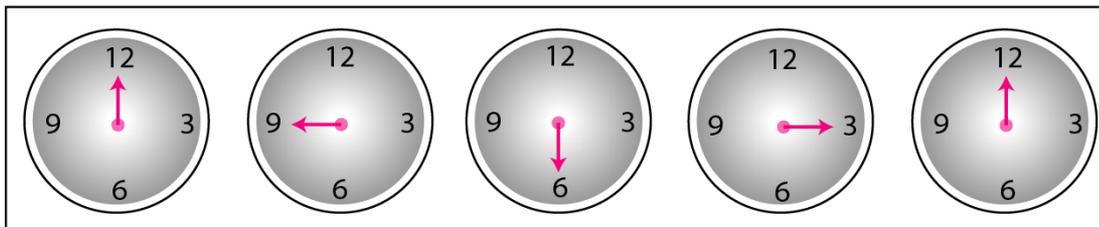
Las muestras pueden significar que el reloj se está moviendo hacia delante o hacia atrás.
(12-6-12-6-12)

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): $T_s = 3/4 T$

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.

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.

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

Solución

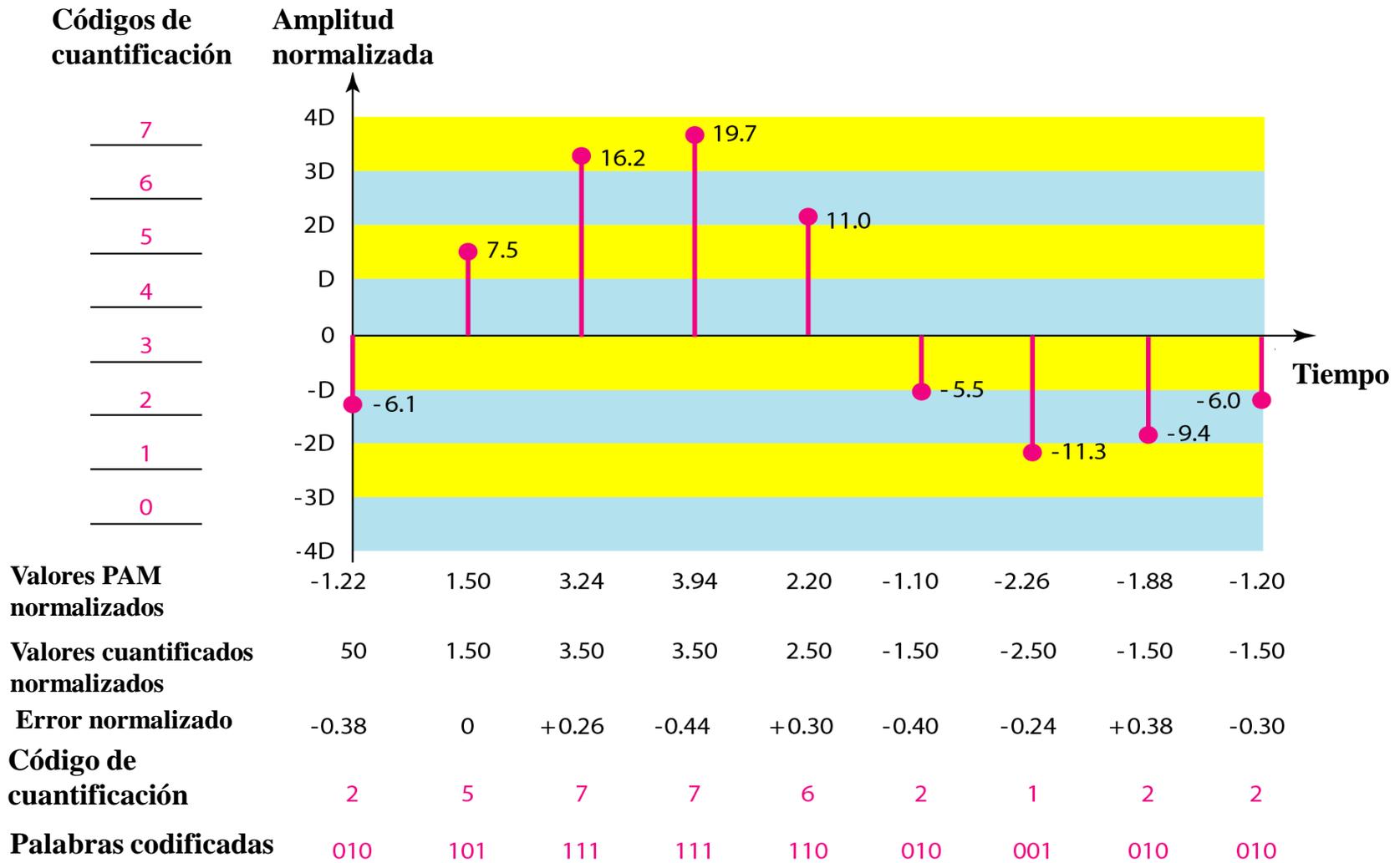
El ancho de banda de una señal de paso bajo está entre 0 y f , donde f es la frecuencia máxima de la señal. Por tanto, se puede muestrear la señal a dos veces la frecuencia más alta (200 KHz). la tasa de muestreo es por tanto de 400.000 muestras por segundo.

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.*



¿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.

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

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

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

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

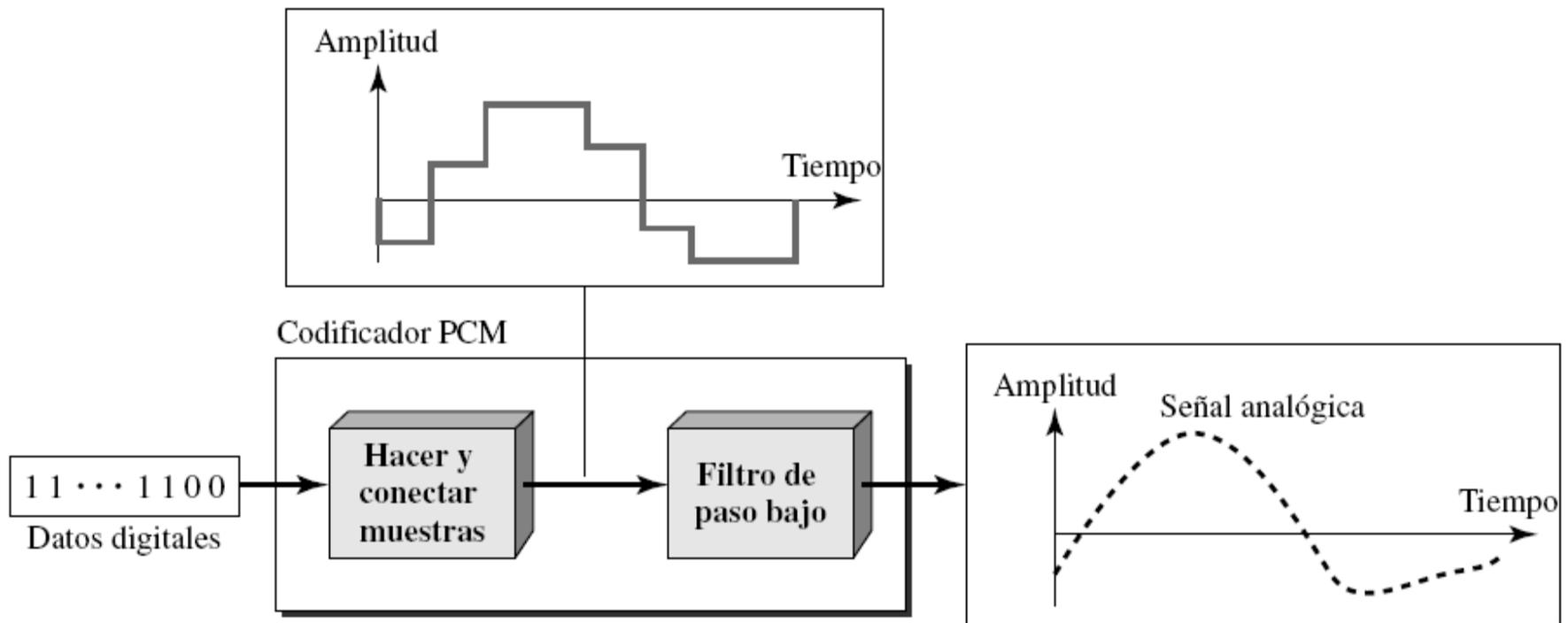
Solución

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.*



Niveles de cuantificación:

- o La elección de L , *depende del rango de amplitudes de la señal analógica y de la precisión con la que se quiera recuperar la señal.*
- o Un valor bajo de L *incrementa el error de cuantificación.*

Error de cuantificación:

- Es la diferencia entre el valor cuantificado de la muestra y el valor real de la muestra.
- El valor del error para cualquier muestra es de
$$-\Delta/2 \leq \text{error} \leq \Delta/2 .$$
- El error de cuantificación cambia la tasa de señales a ruido de la señal, reduciendo la capacidad de Shannon.
- La contribución del error al SNRdB = $6,02 \cdot nb + 1,76$ dB y donde nb son bits por muestra.

Cuantificación no uniforme:

- o En muchas aplicaciones, la distribución de amplitudes instantáneas no es uniforme.
- o Hace variar la altura de, siendo mayor en amplitudes más bajas y menor cerca de las mayores.
- o La cuantificación no uniforme reduce el SNRdB de la cuantificación.

Codificación:

- A cada nivel de cuantificación se le asigna un código binario distinto, formando la señal codificada y lista para ser transmitida.
- El número de bits por muestra es determinado por los niveles de cuantificación, siendo, $nb = \log_2 L$.
- La tasa de bits es el producto de la tasa de muestreo (fs) y el número de bits por muestra (nb).

Recuperación de la señal original:

- Requiere un decodificador PCM.
- El decodificador utiliza un circuito para convertir las palabras del código en un pulso que mantenga la amplitud hasta el siguiente pulso.
- Completada la señal escalera, se pasa a través de un filtro paso bajo para suavizar la señal escalera en una señal digital.

Ancho de banda de PCM:

-El ancho de banda mínimo de la señal digital es *nb veces mayor que el ancho de banda de la señal analógica, es decir:*

$$B_{min} = n_b \cdot B_{analog}$$

-Es el precio a pagar por la digitalización.

Tasa de datos máxima de un canal: (véase tasa de bits de Nyquist).

Ancho de banda mínimo requerido:

$$B_{min} = N / 2 \cdot \log_2 L \text{ Hz} \text{ siendo } N, \text{ la tasa de datos máxima de un canal.}$$

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 $8 \times 4 \text{ KHz} = 32 \text{ KHz}$.

Modulación delta (DM):

Técnica mucho menos compleja que PCM.

PCM encuentra la amplitud de la señal en cada muestra y DM encuentra el cambio en la muestra anterior.

Modulador:

Utilizado en el emisor para crear un flujo de bits a partir de la señal analógica.

El proceso registra los cambios positivo o negativos, denominados delta .

Si δ es positivo, se registra un 1 y 0 en caso contrario.

El modulador construye una segunda señal en forma de escalera para poder comparar la señal analógica.

En cada intervalo de muestreo, se compara el valor de la señal analógica con el último valor de la señal escalera.

Se necesita una unidad de retardo para mantener la función de escalera durante un periodo comprendido entre dos comparaciones.

Figura 4.28 *El proceso de la modulación delta.*

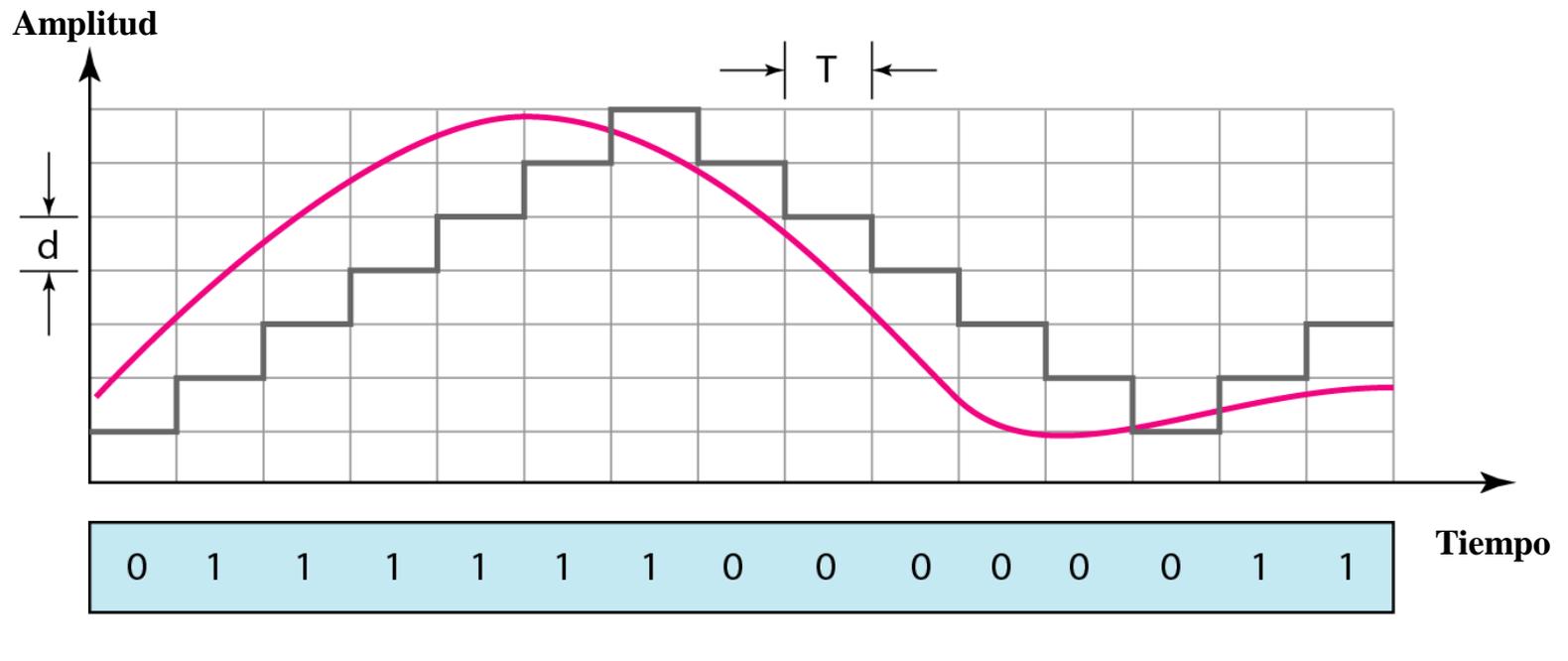


Figura 4.29 Componentes de la modulación delta.

Demodulador:

Toma la señal de datos y, utilizando un constructor de señal de escalera y la unidad de retardo, crea la señal analógica.

DM adaptativo:

Para conseguir mejores prestaciones se adapta el valor de de acuerdo a la amplitud de la señal analógica.

Error de cuantificación:

Siempre se introduce un error de cuantificación, pero este es mucho menor que para PCM.

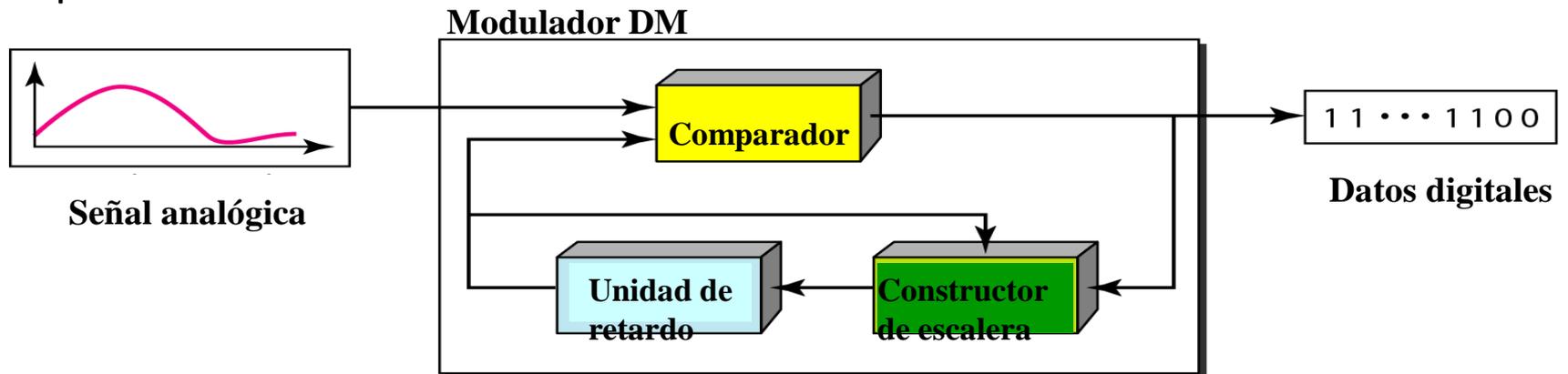
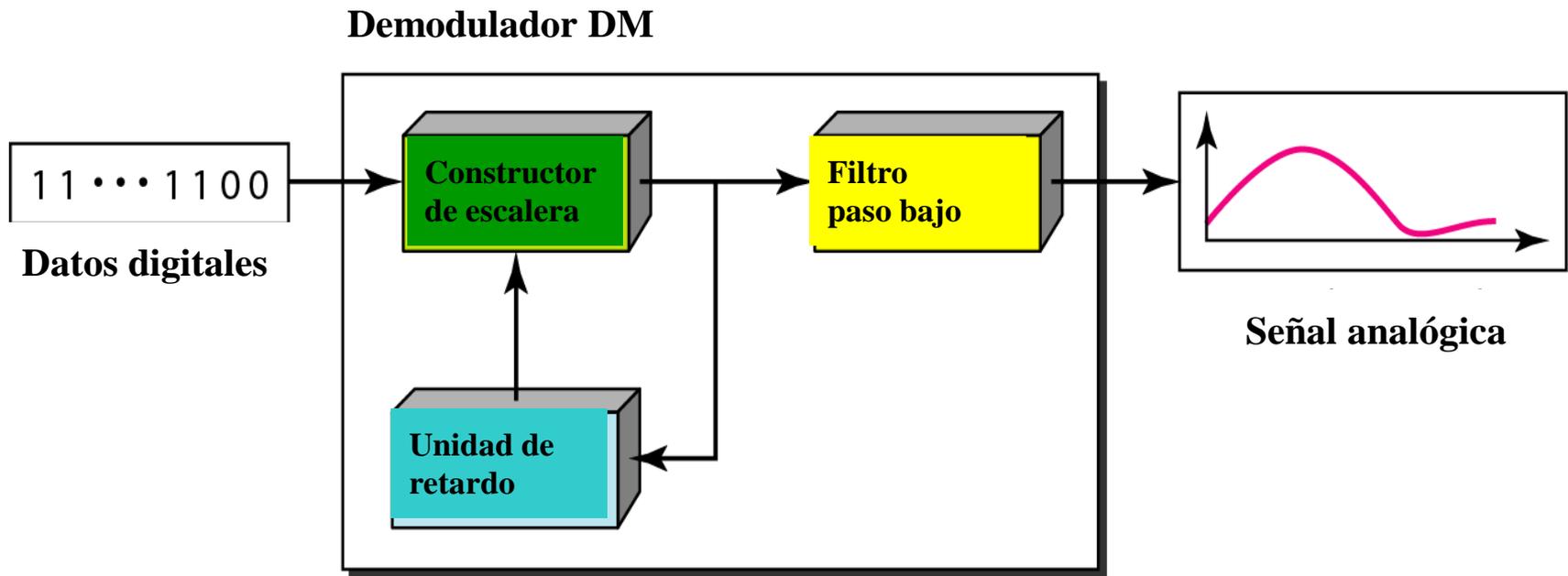


Figura 4.30 *Componentes de la demodulación delta.*



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.*

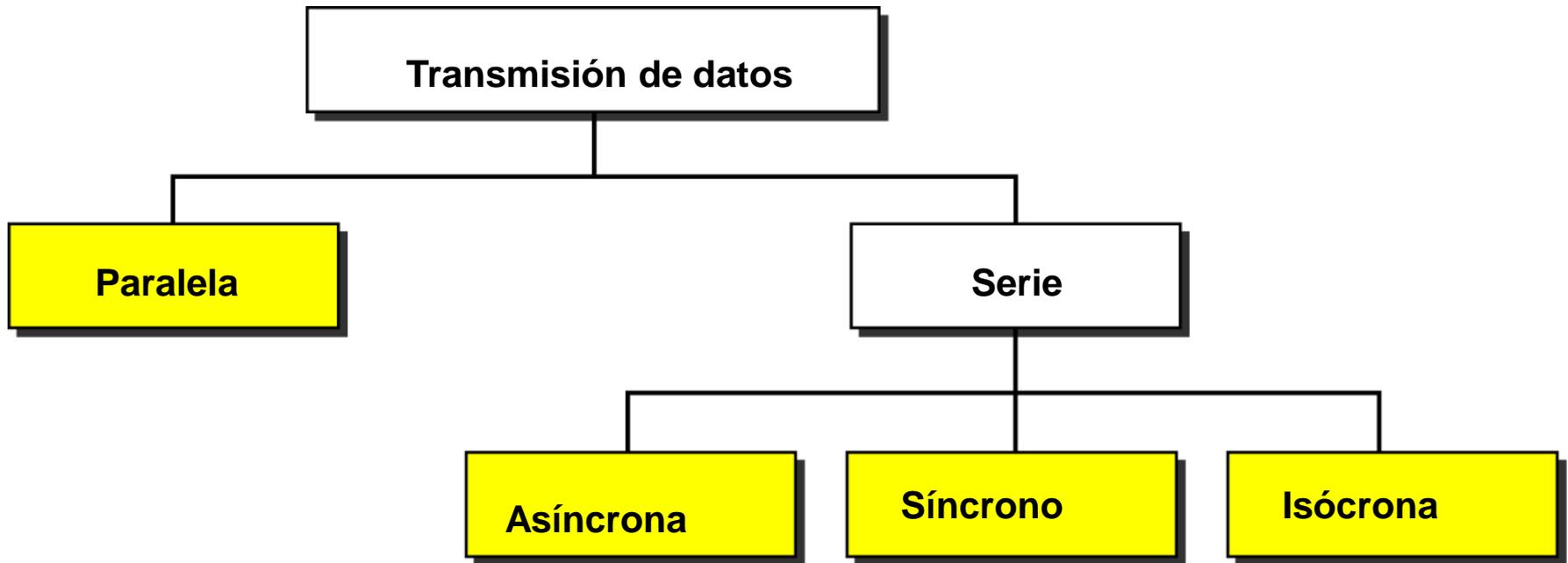
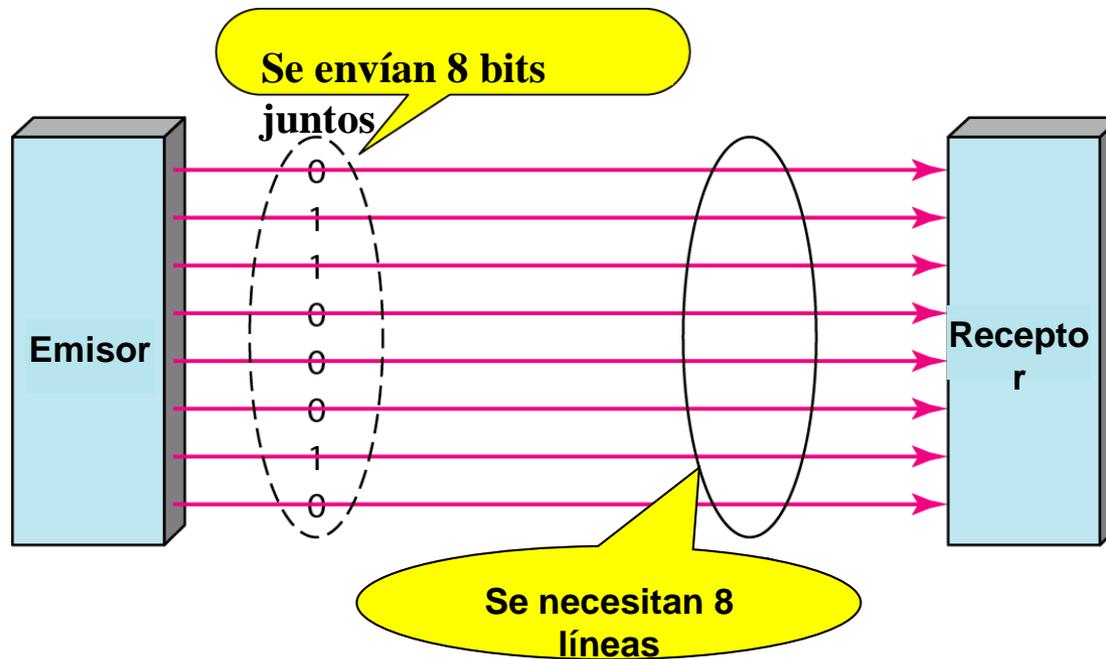


Figura 4.32 *Transmisión paralela*

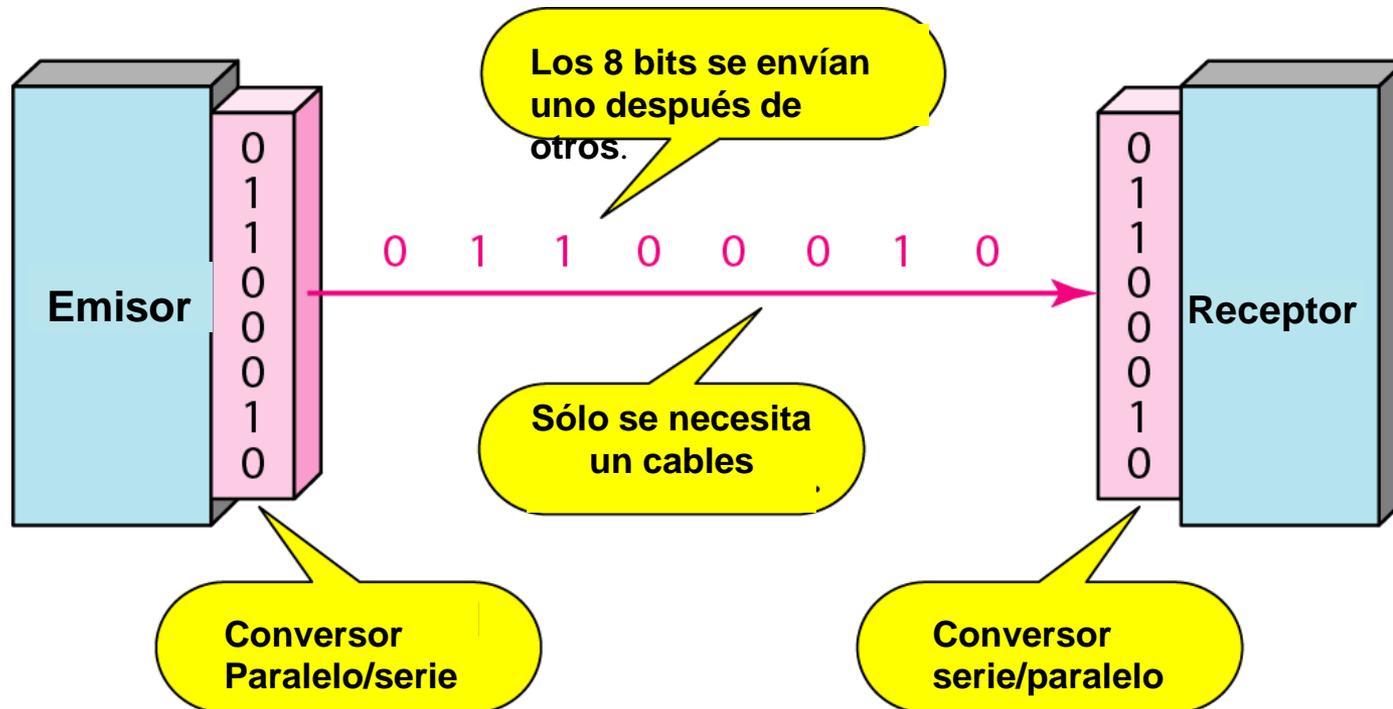


Se usan n hilos para enviar n bits simultáneamente a cada pulso de reloj.

Ventaja: Velocidad de transferencia superior en un factor n a la transmisión serie.

Desventaja: Coste elevado, limitando su uso a distancias cortas.

Figura 4.33 *Transmisión serie.*



Se usa un solo hilo, ya que se envía un bit sigue a otro.
Ventaja: reducción de costes en un factor n .

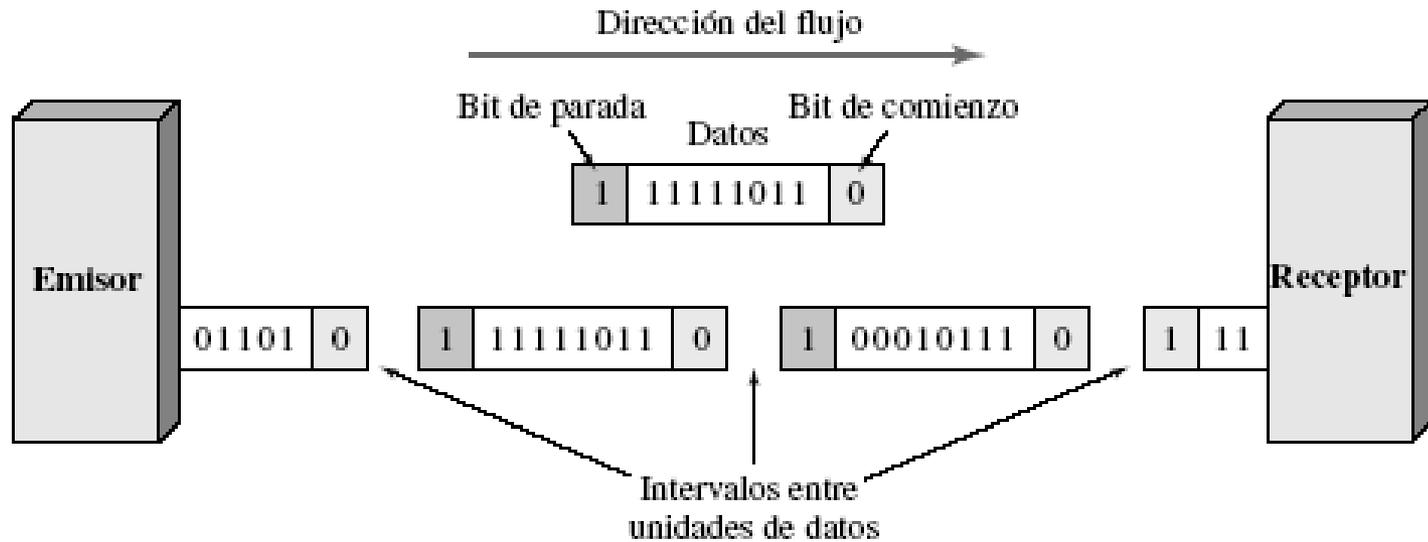
Transmisión asíncrona:

- Esto es así cuando la temporización de la señal no es importante.
- La información se recibe y se traduce usando patrones acordados.
- Los patrones se basan en agrupar el flujo de bits en bytes.
- Para que el receptor sepa cuando le llega un nuevo grupo, se añade un bit extra al principio de cada byte llamado bit de inicio (cero).
- Para que sepa cuando finaliza el grupo, se añaden uno o más bits al final de cada byte llamados bit de parada (unos).
- Hay que entender que la asincronía es entre grupos de byte, pero dentro de cada byte si se está sincronizado.
- Recomendado para comunicaciones de baja velocidad.

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.

**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.*

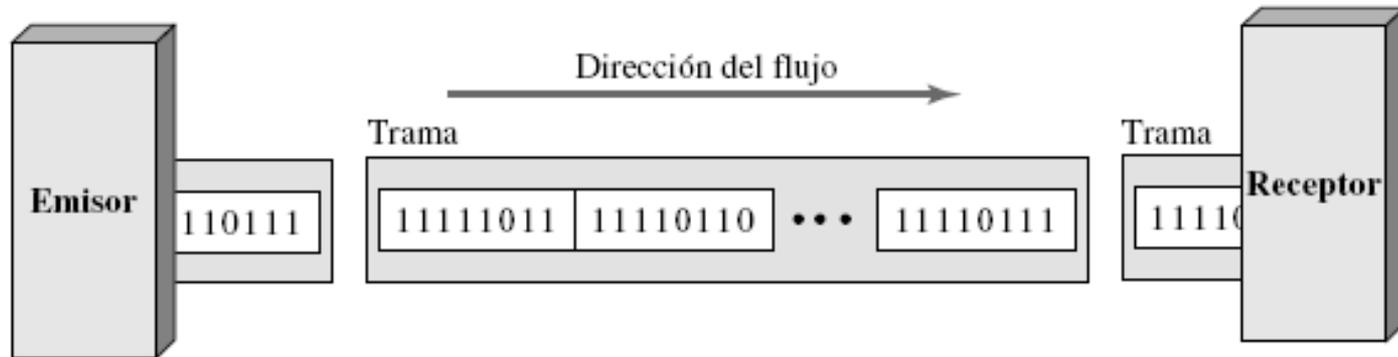


Transmisión síncrona:

- Se envían un bit detrás de otro, sin bit de inicio/parada o intervalos.
- La agrupación de los bits es responsabilidad del receptor.
- Aquí la temporización se vuelve muy importante, ya que la exactitud de la información depende de cómo lleve la cuenta de bits el receptor.
- La sincronización a nivel de byte se lleva a cabo en el nivel de enlace de datos.
- Recomendado para comunicaciones de alta velocidad.

**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*



Isócrona:

- Garantiza que los datos lleguen a una tasa fija, evitando retardos desiguales entre tramas.
- Recomendado para transmisiones de audio y video en tiempo real.