

# Nivel físico

## Tema 2

Alcaraz, S., Roig, P.J.

Redes de Computadores  
Grado en Ingeniería de Tecnologías de la Información

Area de Arquitectura y Tecnología de Computadores  
Departamento de Física y Arquitectura de Computadores  
Universidad Miguel Hernández

{salcaraz,proig}@umh.es

04/05/2026

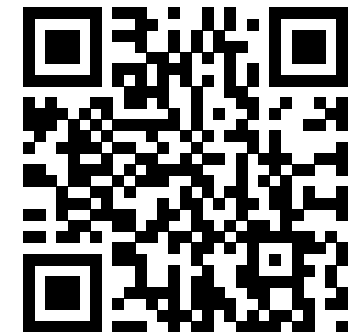


**Después de abordar la unidad, el estudiante será capaz de:**

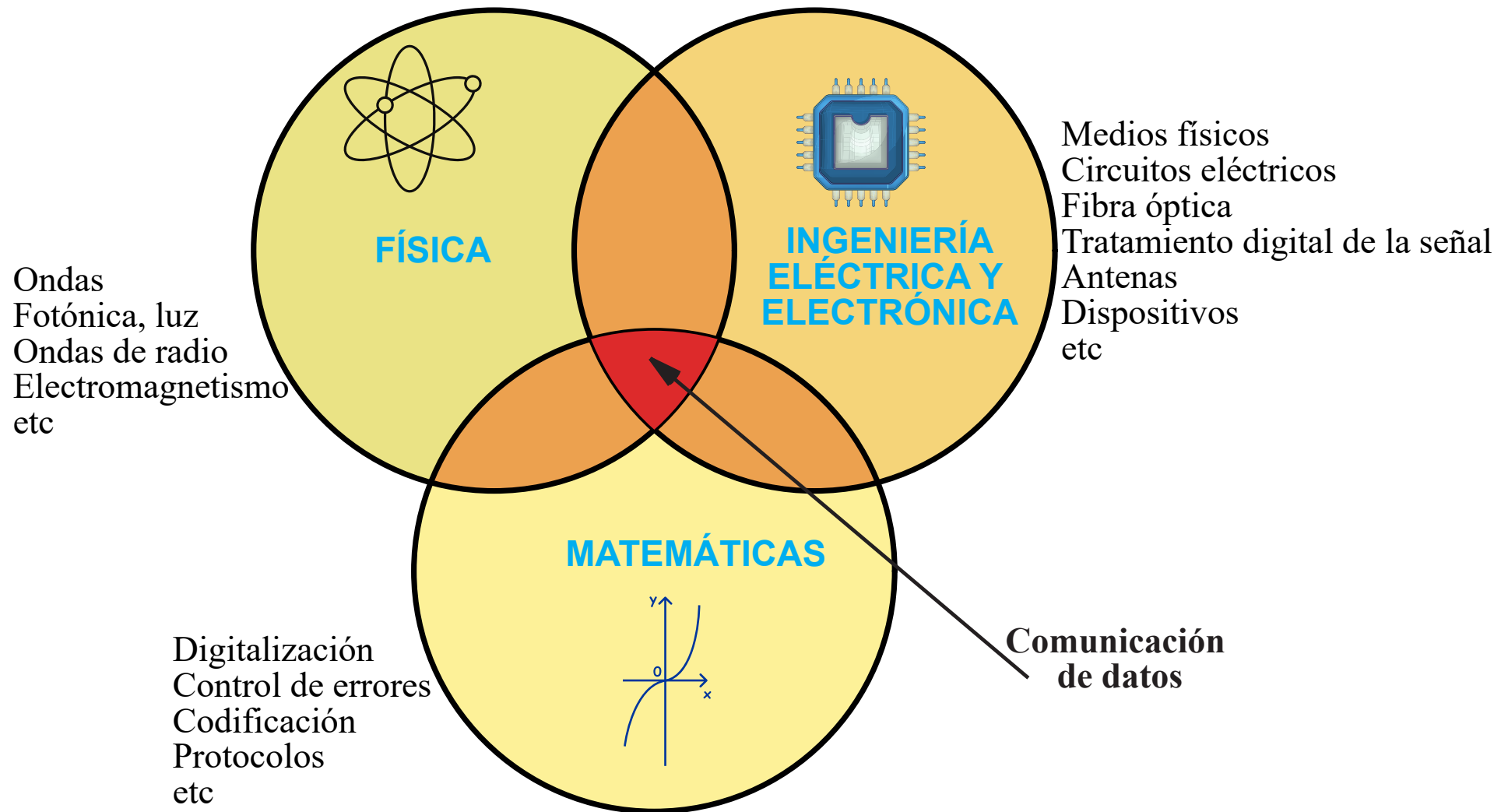
- Distinguir entre fuentes de información analógicos y digitales.
- Explicar cómo un audio, datos, imagen y vídeo se pueden representar mediante una señal electromagnética.
- Discutir las características de las ondas analógicas y digitales.
- Discutir las perturbaciones que afectan a la calidad de la señal y a la transferencia de la información sobre un medio de transmisión.
- Identificar los factores que afectan a la capacidad del canal.
- Discutir las características físicas del par trenzado, cable coaxial y fibra óptica.
- Comprender la codificación de datos analógicos/digitales mediante señales analógico/digitales.
- Presentar un resumen de los diferentes métodos de codificación digital y analógico.
- Conocer los sistemas de codificación.
- Explicar las diferentes técnicas de multiplexación.
- Conocer la aportación de la multiplexación al desarrollo de las redes de alta velocidad digitales.
- Identificar los elementos de las líneas de abonado digital

1. Introducción a la transmisión de datos
2. Señales digitales
3. Perturbaciones en la transmisión
4. Transmisión digital
5. Transmisión analógica
6. Codificación de datos
7. Multiplexación
8. Medios de transmisión
9. Líneas de abonado digital

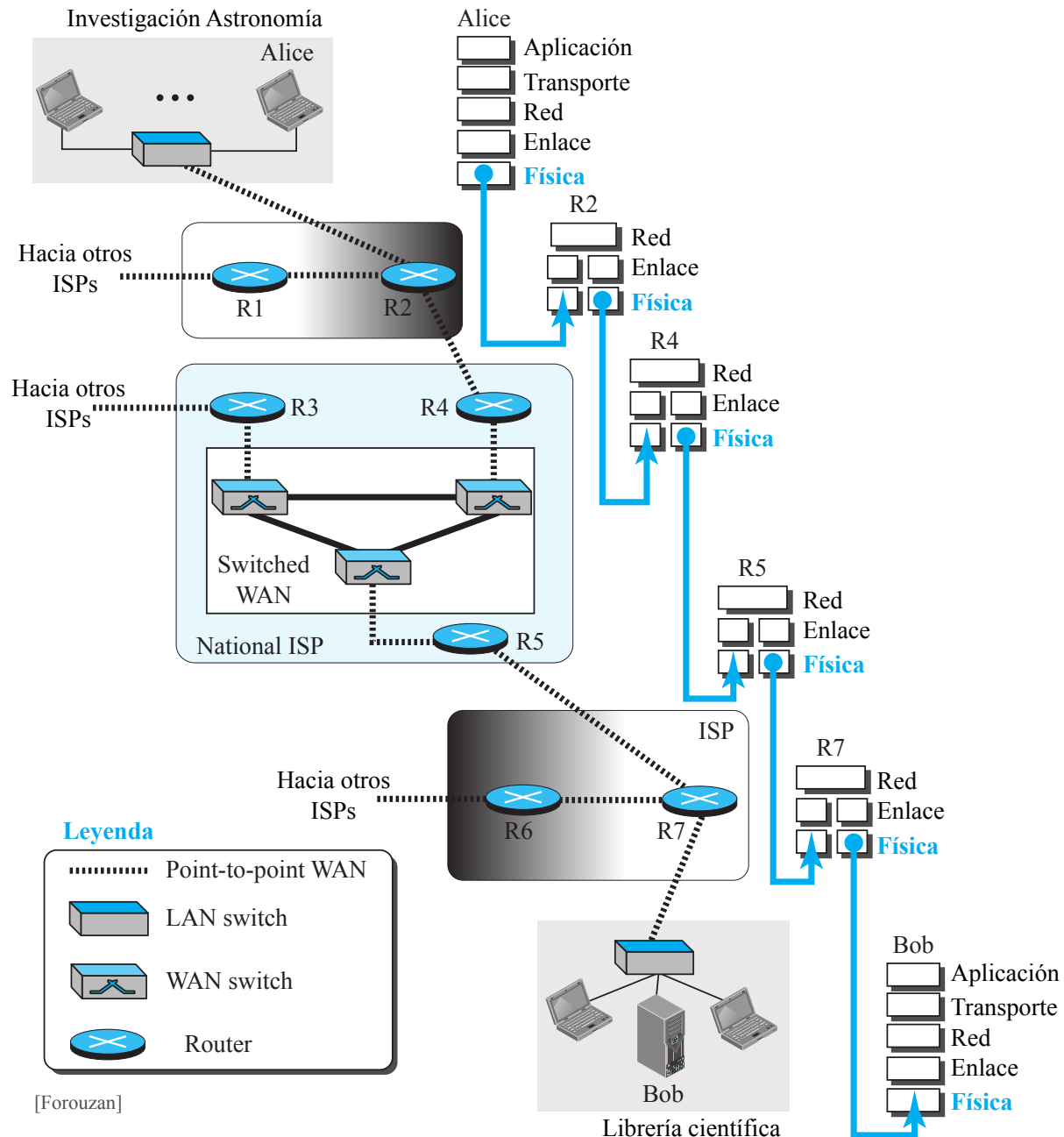
- 1. *Introducción a la transmisión de datos***
2. Señales digitales
3. Perturbaciones en la transmisión
4. Transmisión digital
5. Transmisión analógica
6. Codificación de datos
7. Multiplexación
8. Medios de transmisión
9. Líneas de abonado digital



# La esencia de la comunicación de datos



# Comunicación a nivel físico



# Datos y señales

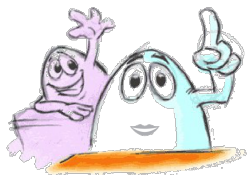
Los **datos** son las entidades (*tangibles*) que transmite el significado en el interior de un dispositivo:

- Un fichero con nombres y direcciones almacenadas en una unidad de disco duro.
- Los bits o elementos individuales de una película almacenada en un DVD.
- Los 1s y 0s binarios de música almacenados en un compact disc o en un iPod.
- Los pixels de una fotografía digitalizada por una cámara digital y almacenada en un pendrive SSD.

En cada uno de los ejemplos, la información puede ser capturada electrónicamente y almacenada en algún tipo de dispositivo de almacenamiento.

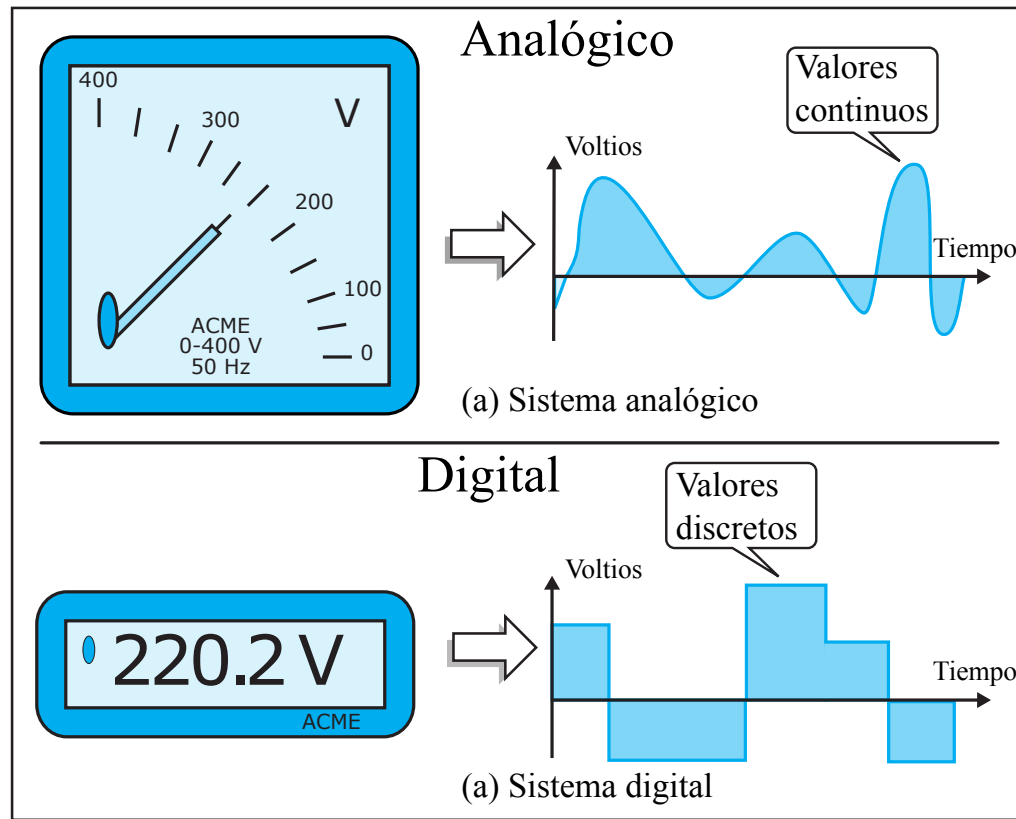
Las **señales** (*intangibles*) son impulsos eléctricos o electromagnéticos utilizados para codificar y transmitir los datos:

- Una transmisión de una conversación telefónica sobre una línea telefónica.
- Una entrevista en televisión transmitida sobre un sistema de satélite.
- Una transmisión de un documento sobre un cable paralelo entre un computador y la impresora.
- La descarga de una página web como una transferencia sobre la línea telefónica entre el ISP y el ordenador en un hogar residencial.



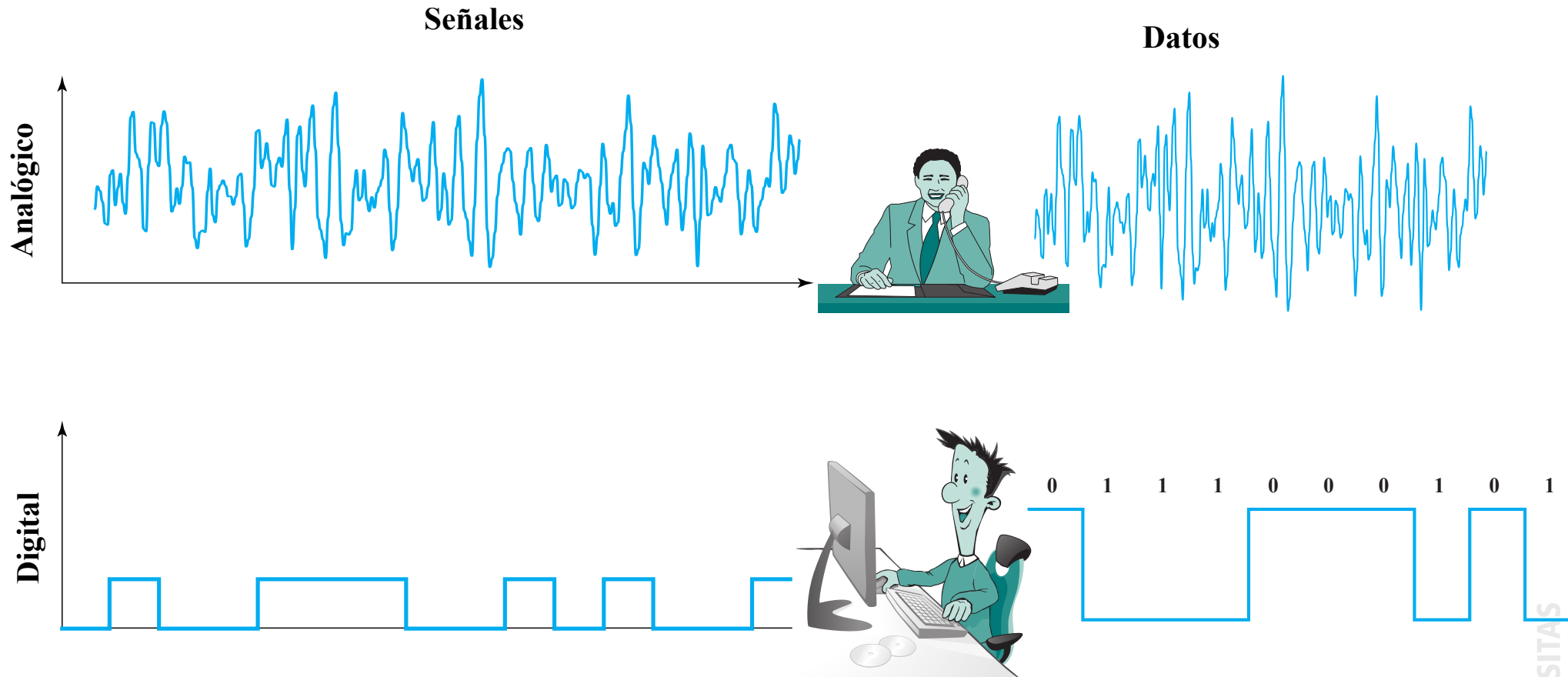
Los datos se transmiten sobre medios de transmisión mediante señales.

# Analógico y digital



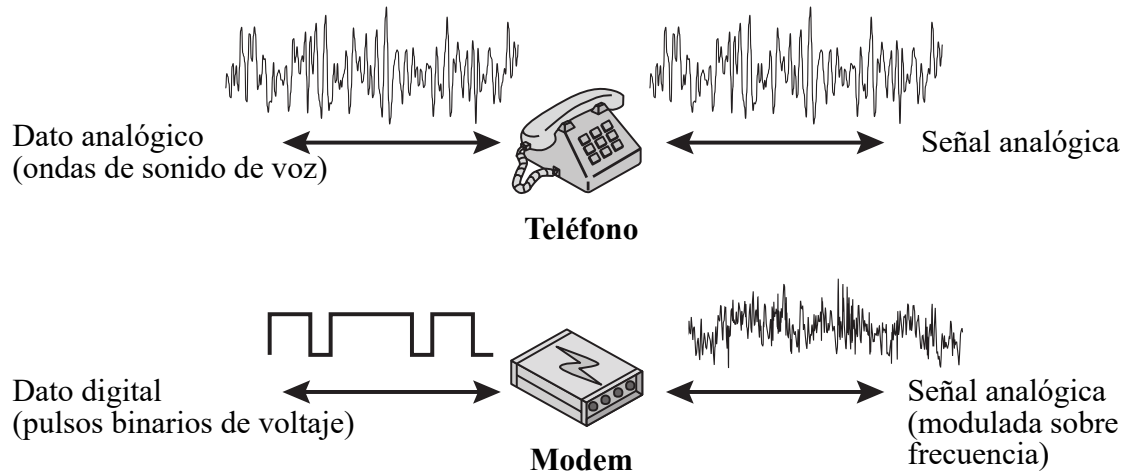
- Una **señal analógica** recorre todos los valores de forma **continua**.
- Una **señal digital** recorre ciertos valores de forma **discreta**.

# Señales/Datos analógicos y digitales

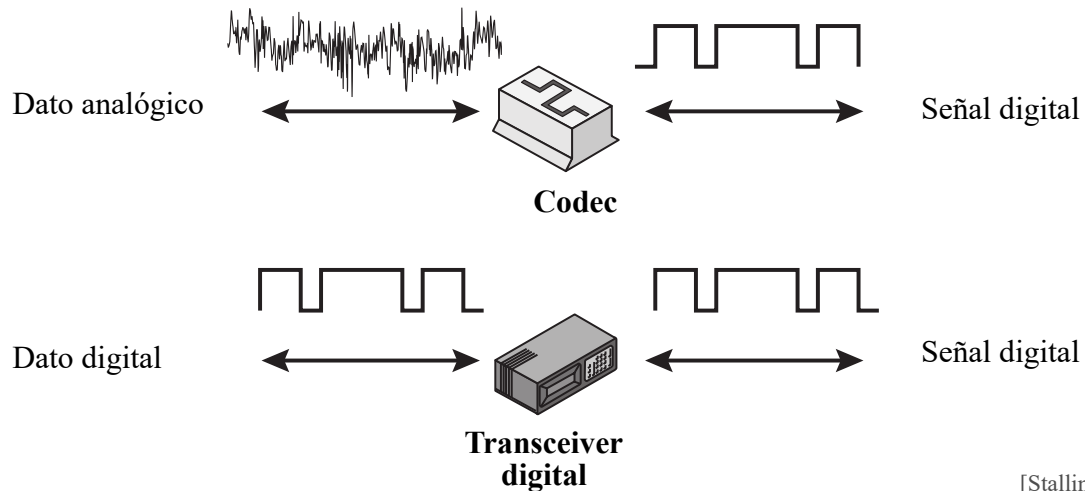


# Señales vs datos

**Señales analógicas:** Representa los datos mediante la variación continua de una onda electromagnética

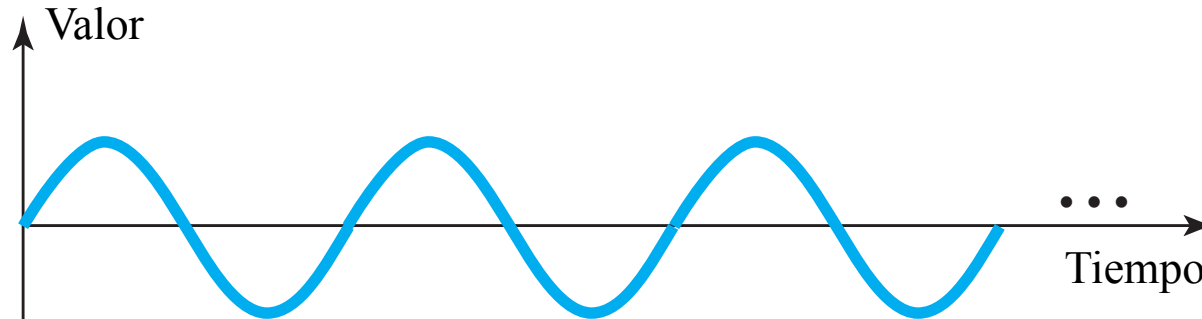


**Señales digitales:** Representa con una secuencia de pulsos de voltaje



[Stallings]

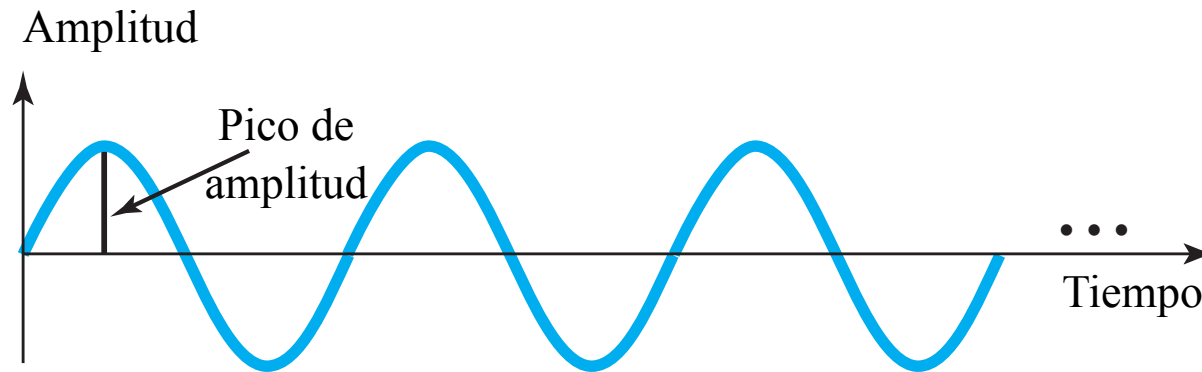
# Definición de una señal



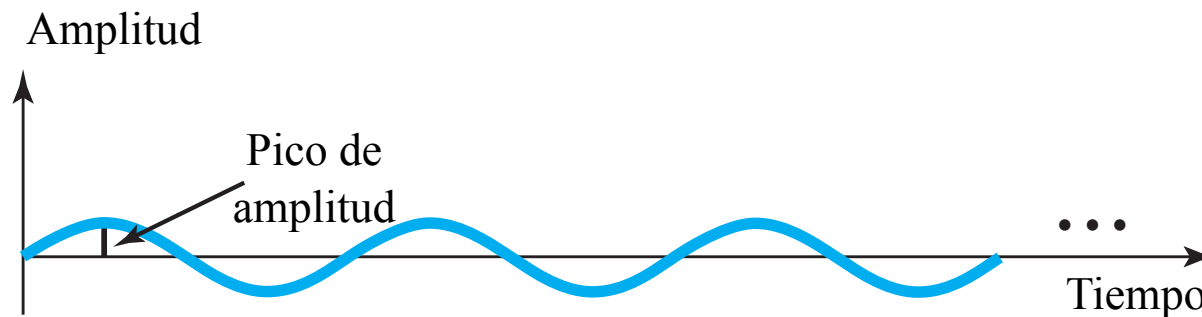
Se define **señal** como la variación de una magnitud física (electricidad, luz, etc) que se utiliza para transmitir información.

Parámetro	Acrónimo	Descripción	Unidades
Periodo	T	Tiempo en completar un ciclo completo	[seg]
Frecuencia	f	Ciclos por unidad de tiempo	[Hz]
Amplitud	A	Valor de la señal en un instante	[V, A, W]
Fase	P	Posición de la señal respecto al origen	[radianes]

# Amplitud



(a) Señal con pico de amplitud alto



(b) Señal con pico de amplitud bajo

La **amplitud (A)** (o **pico de amplitud**) de una señal es el valor absoluto de su intensidad mayor y es proporcional a la energía que transporta.

# Periodo y frecuencia

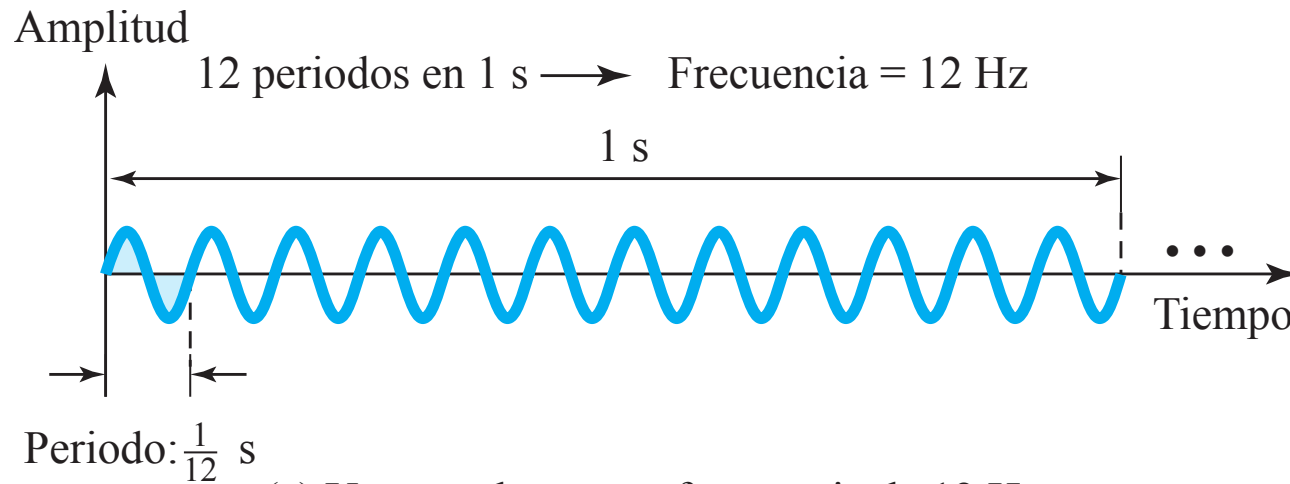
El **periodo (T)** se refiere a la cantidad de tiempo, en segundos, que una señal necesita para completar un ciclo.

La **frecuencia (f)** se refiere al total periodos (ciclos) en 1 s.

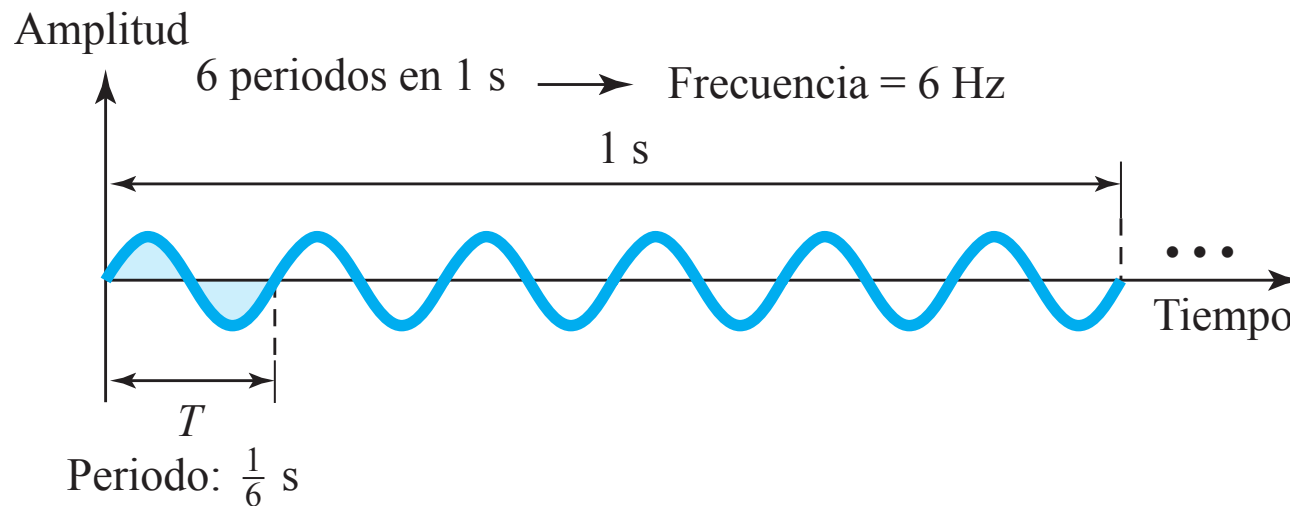
$$f = \frac{1}{T}$$

<i>Periodo (T)</i>		<i>Frecuencia (f)</i>	
<i>Unidad</i>	<i>Equivalencia</i>	<i>Unidad</i>	<i>Equivalencia</i>
Segundos (s)	1 s	Hertz (Hz)	1 Hz
Milisegundos (ms)	$10^{-3}$ s	Kilohertz (kHz)	$10^3$ Hz
Microsegundos ( $\mu$ s)	$10^{-6}$ s	Megahertz (MHz)	$10^6$ Hz
Nanosegundos (ns)	$10^{-9}$ s	Gigahertz (GHz)	$10^9$ Hz
Picosegundos (ps)	$10^{-12}$ s	Terahertz (THz)	$10^{12}$ Hz

# Misma amplitud y fase, pero diferente frecuencia

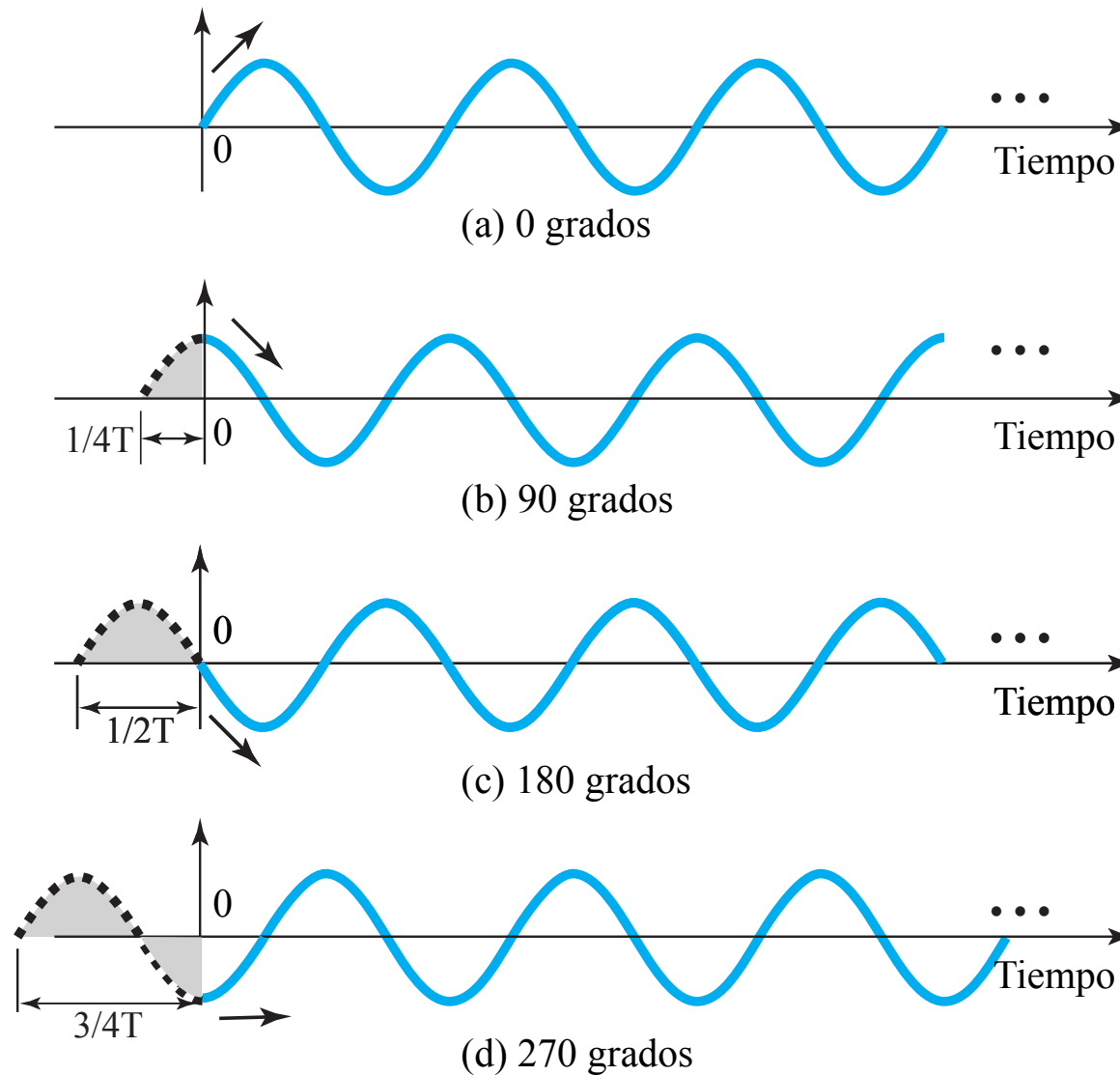


(a) Una señal con una frecuencia de 12 Hz



(b) Una señal con una frecuencia de 6 Hz

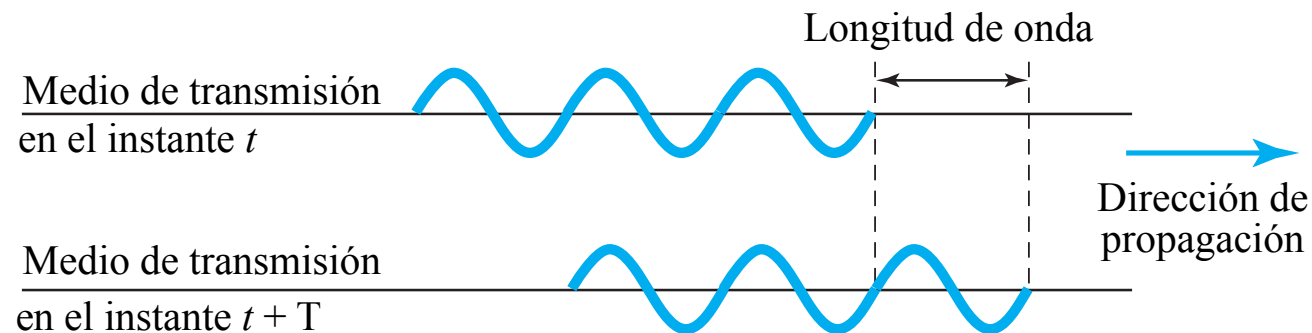
# Fase



La **fase (P)** o desplazamiento, describe la posición de la onda con respecto al tiempo 0.

# Longitud de onda

La **longitud de onda** es otra característica de las señales y relaciona la velocidad del medio con la frecuencia.



Utilizamos la longitud de onda para describir la transmisión de la luz en **fibra óptica**.

La longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia que una señal simple puede recorrer en un periodo.

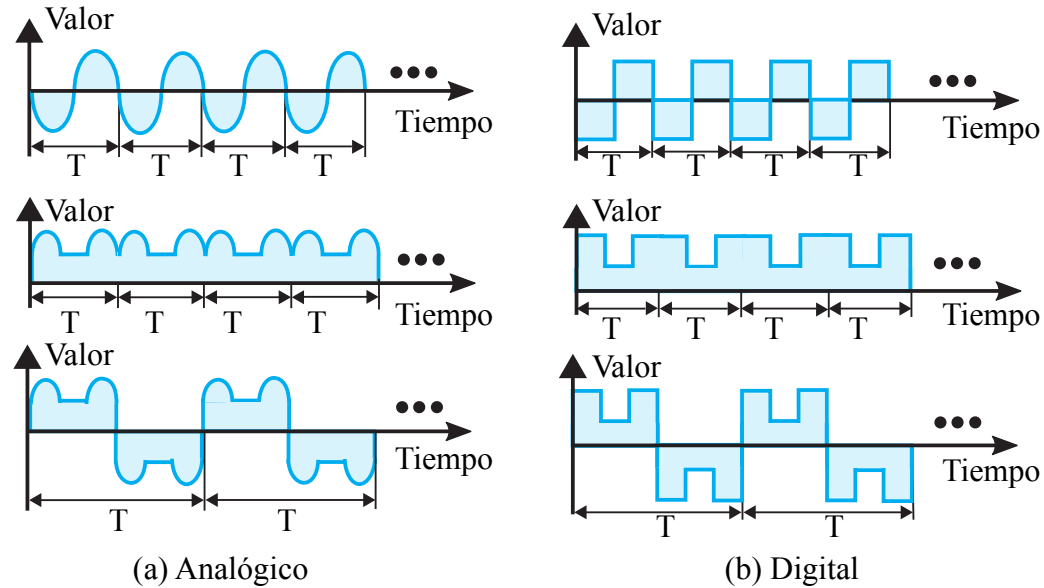
Se calcula a partir de la velocidad de propagación del medio (velocidad de la luz,  $c$ ) y del periodo ( $T$ ) de la señal (o frecuencia,  $f$ ):

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

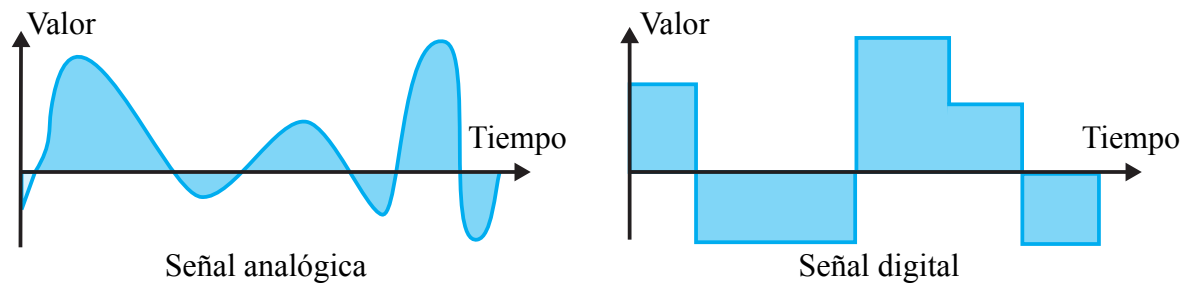
Normalmente se mide en  $\mu m$  (*microns* o *micras*).

# Señales periódicas y no periódicas

## Señal periódica

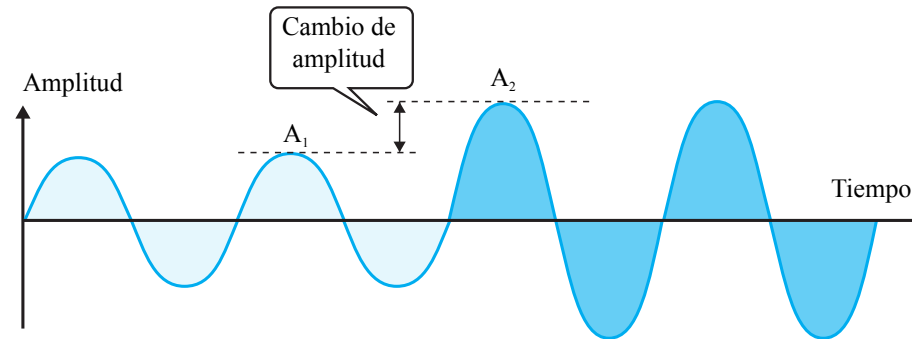


## Señal no periódica

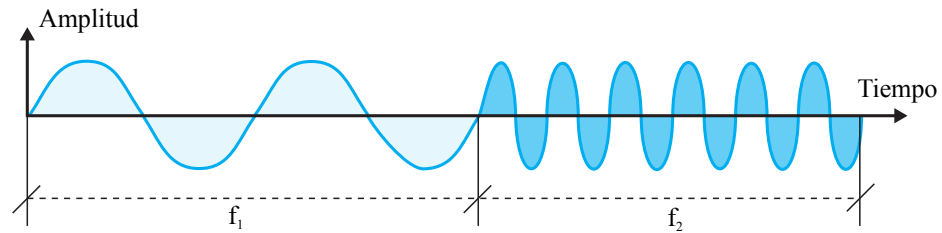


# Señales analógicas: cambio de magnitud

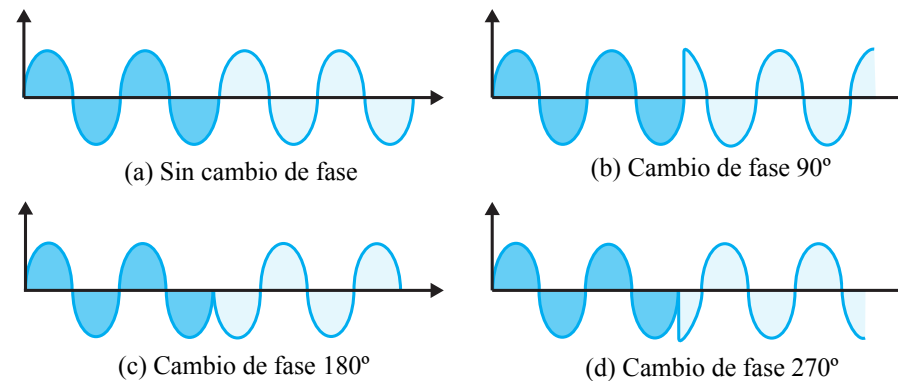
## Cambio de amplitud



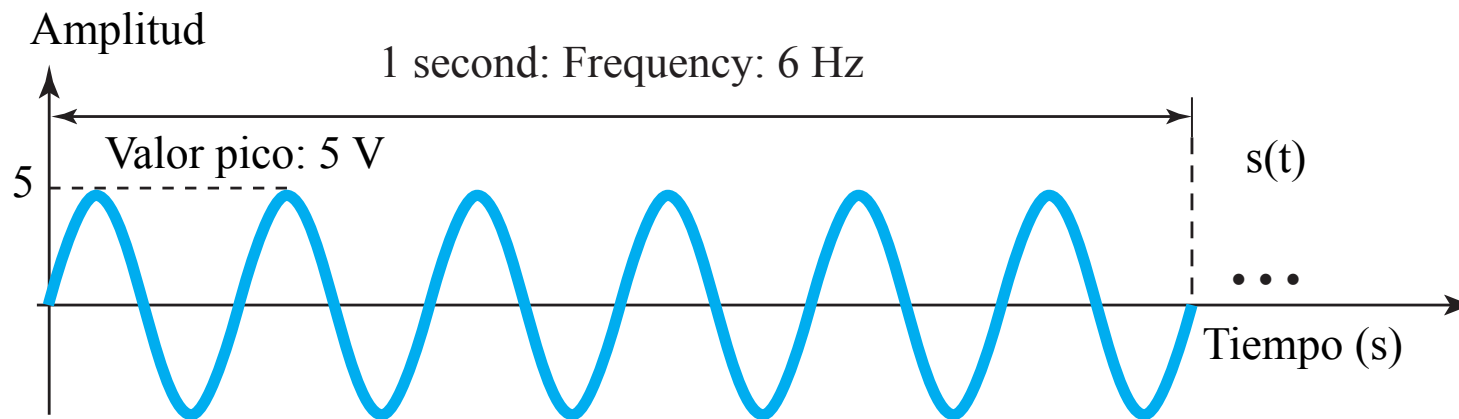
## Cambio de frecuencia



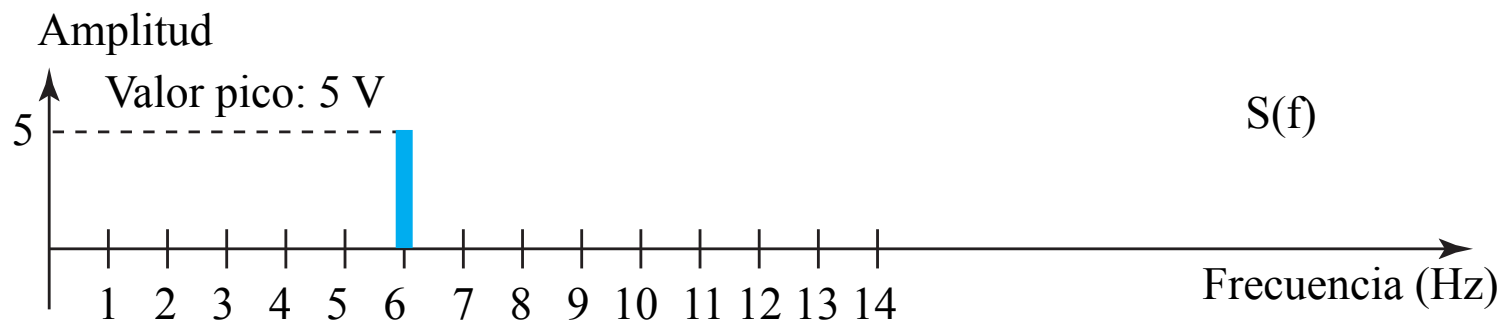
## Cambio de fase



# Dominio del tiempo vs frecuencia



(a) Onda sinusoidal en el **dominio del tiempo**  
(valor pico: 5 V, frecuencia: 6 Hz)

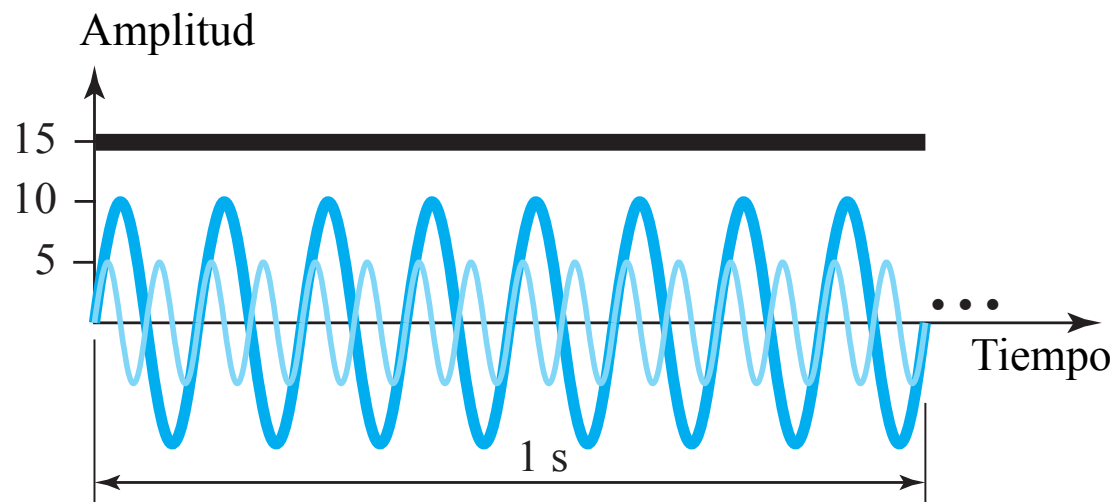


(b) La misma onda sinusoidal en el **dominio de frecuencia**  
(valor pico: 5 V, frecuencia: 6 Hz)

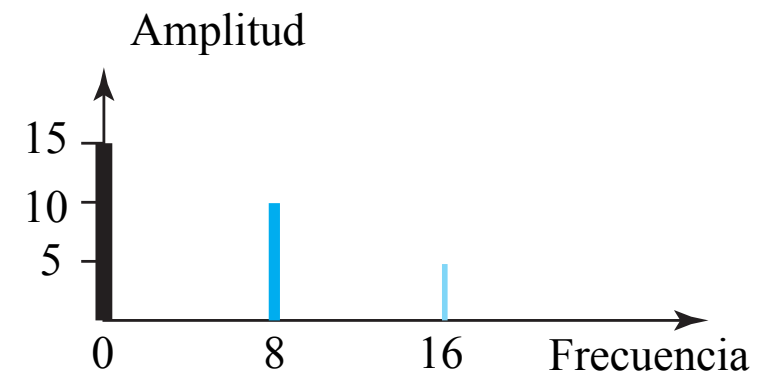
Una **señal periódica** completa en el dominio del tiempo puede ser representada como una sólo barra en el dominio de la frecuencia.

# Dominio del tiempo vs frecuencia: señales compuestas

Ondas sinusoidales de frecuencias 0, 8 y 16.



(a) Dominio del tiempo.

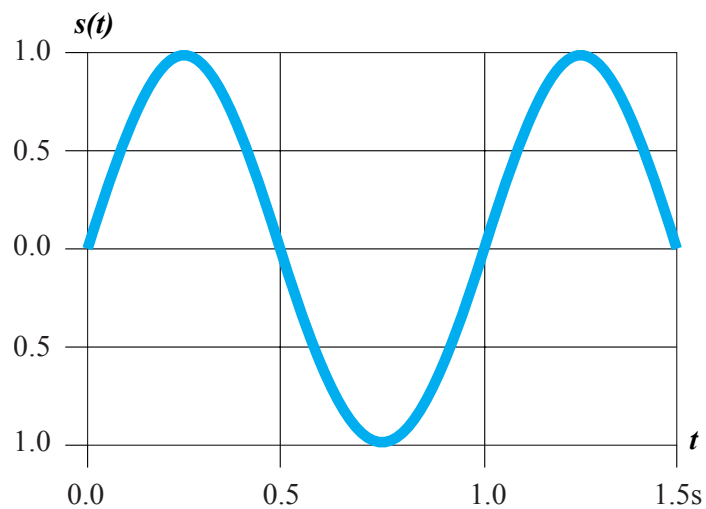


(b) Dominio de frecuencias.

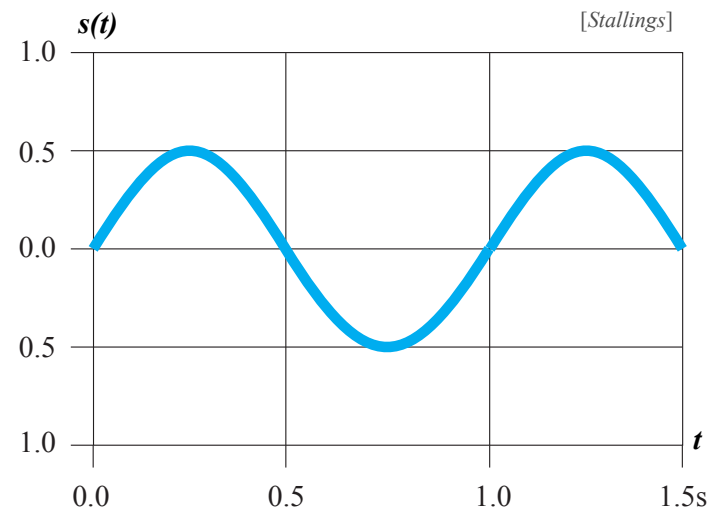
Ambas representaciones implican una misma realidad física.

# Componentes de frecuencia

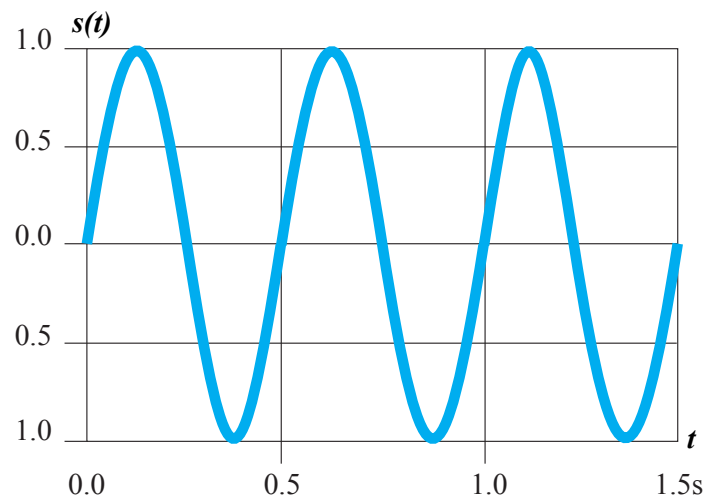
$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$$



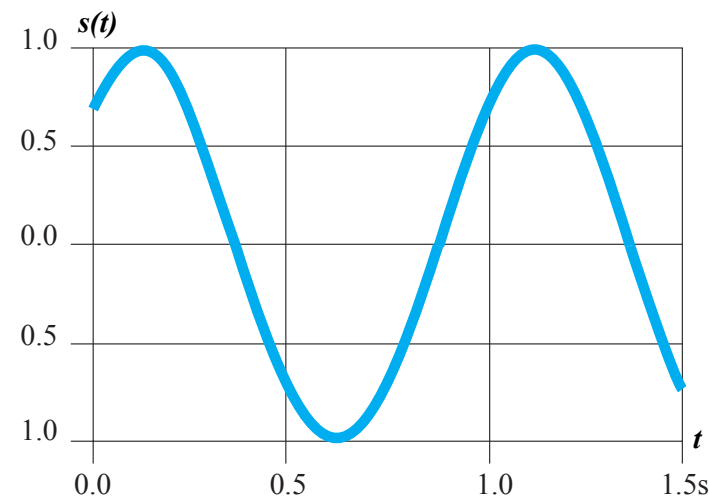
(a)  $A = 1, f = 1, \phi = 0$



(b)  $A = 0.5, f = 1, \phi = 0$

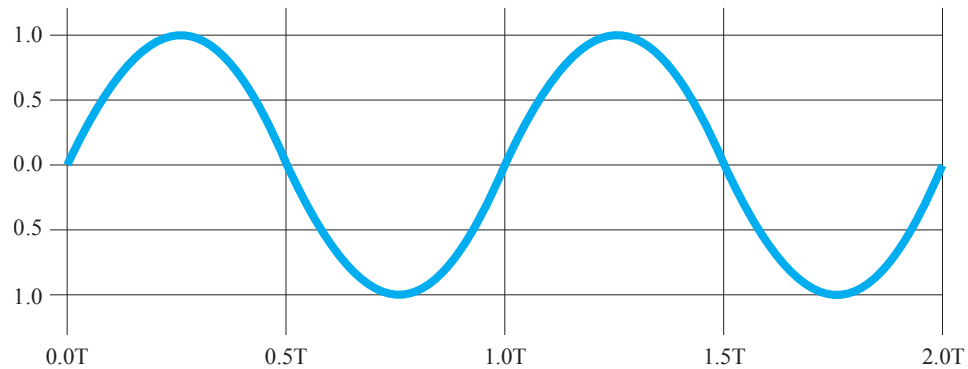


(c)  $A = 1, f = 2, \phi = 0$

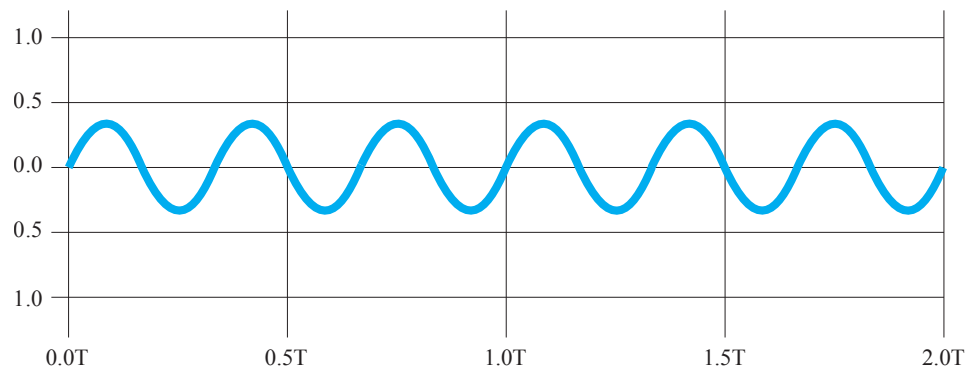


(d)  $A = 1, f = 1, \phi = \pi/4$

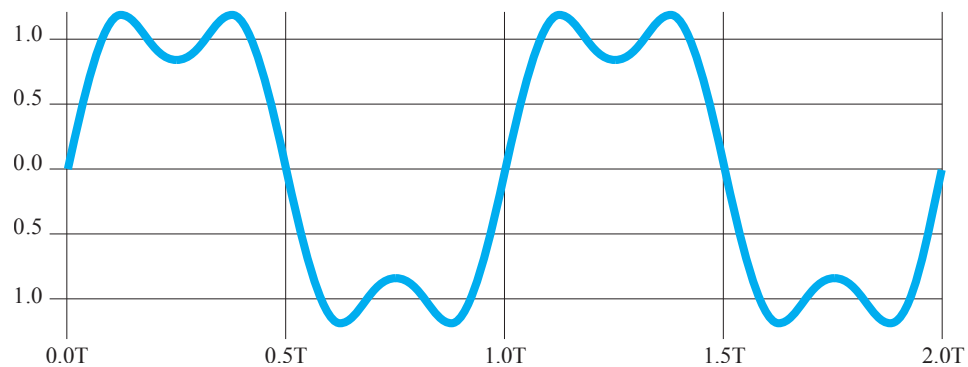
# Adición de componentes de frecuencia



$$s(t) = \sin(2\pi ft)$$

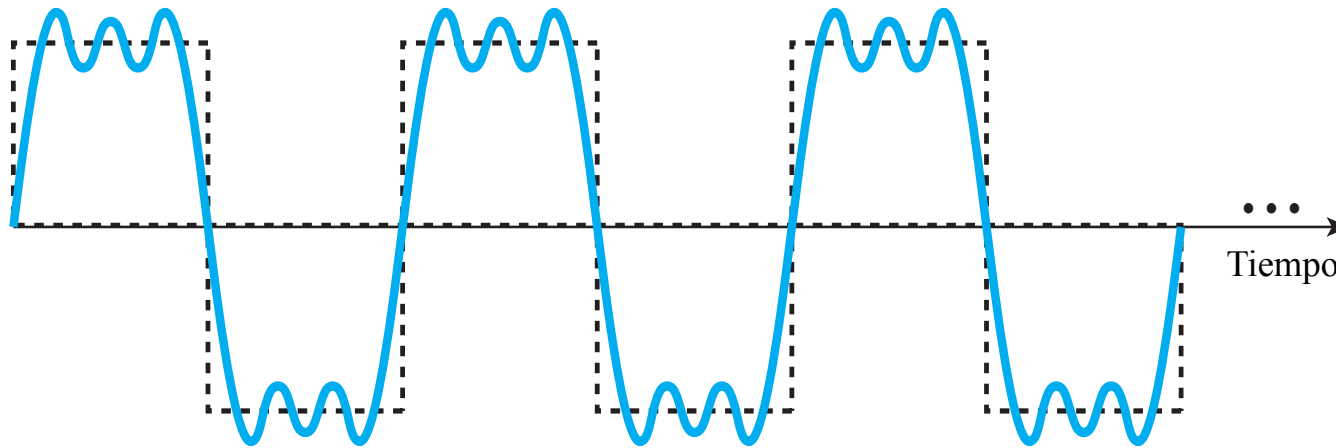


$$s(t) = \frac{1}{3} \sin(2\pi(3ft))$$



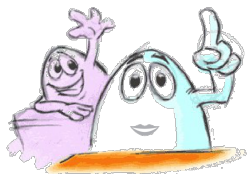
$$s(t) = \frac{4}{\pi} \left( \sin(2\pi ft) + \frac{1}{3} \sin(2\pi(3ft)) \right)$$

# Análisis de Fourier: señales compuestas



Las **señales simples** no son útiles en transmisión de datos; se necesitan **señales compuestas**, formadas por muchas (**infinitas**) componentes de frecuencias.

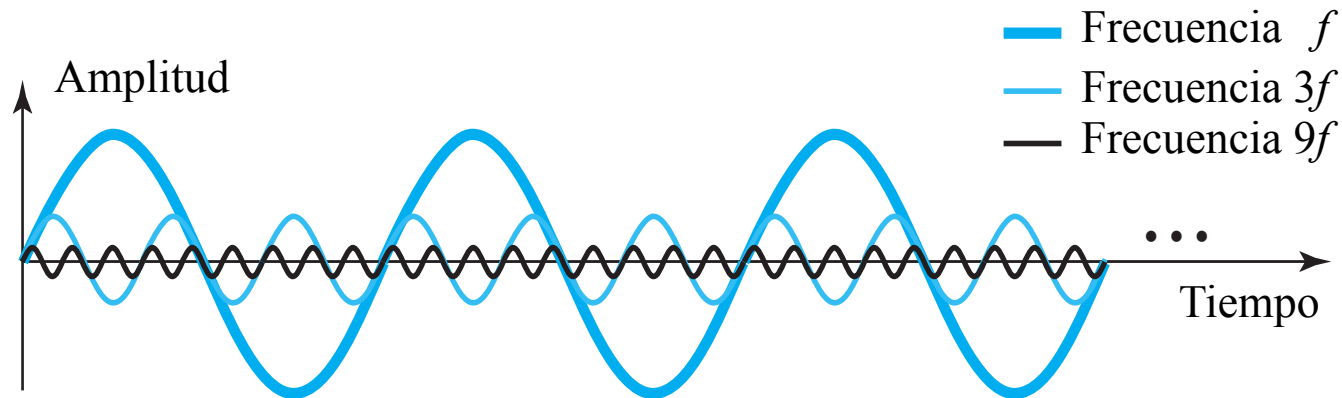
**Teorema de Fourier:** cualquier señal está formada por componentes sinusoidales de distintas frecuencias



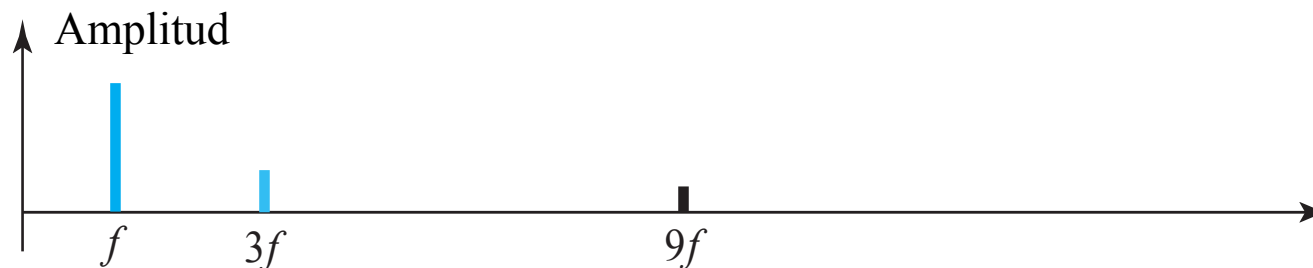
El desarrollo de la Serie de Fourier queda fuera del alcance de la asignatura.

# Descomposición de señales periódicas compuestas

$$s(t) = C_0 + C_1 \sin(2\pi f_1 t + \phi_1) + C_2 \sin(2\pi f_2 t + \phi_2) + \dots + C_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n)$$



(a) Descomposición en el dominio del tiempo de una señal compuesta

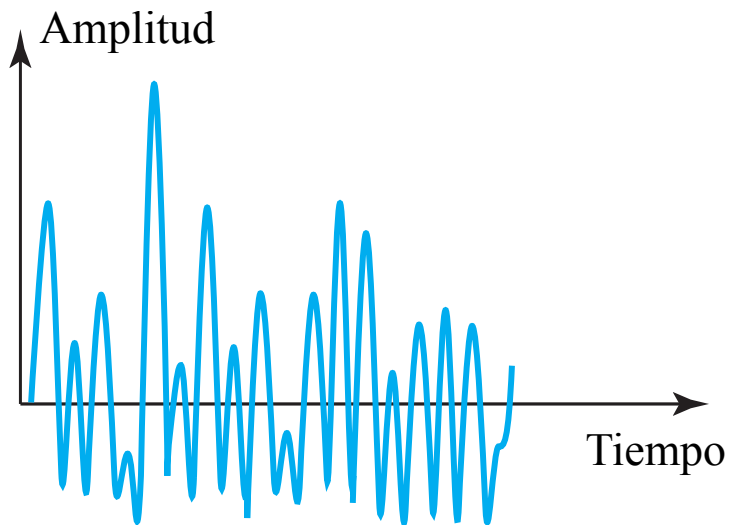


(b) Descomposición en el dominio de frecuencias de una señal compuesta

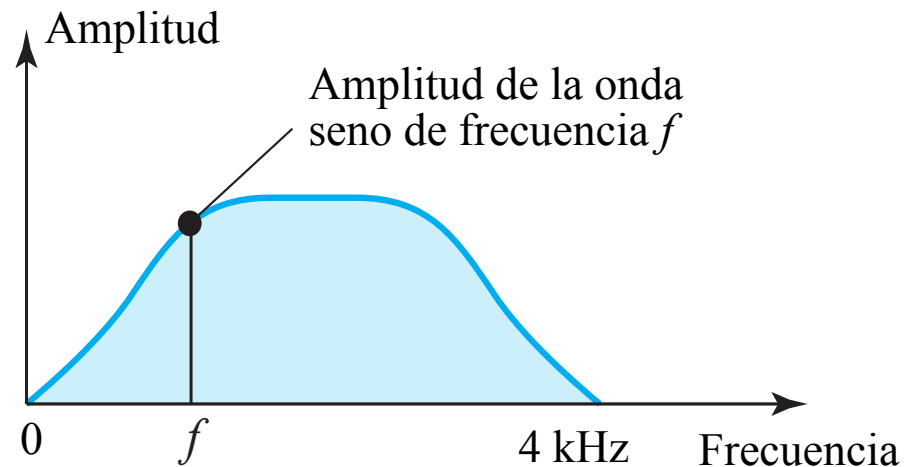
Cuantos más sumandos se consideren, más se parecerá la señal  $s(t)$  a la señal que queremos representar.

# Descomposición de señales no-periódicas compuestas

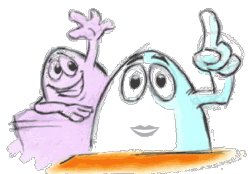
$$S(f) = \int s(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad S(f) = \int s(t)e^{j2\pi ft} dt$$



(a) Dominio del tiempo

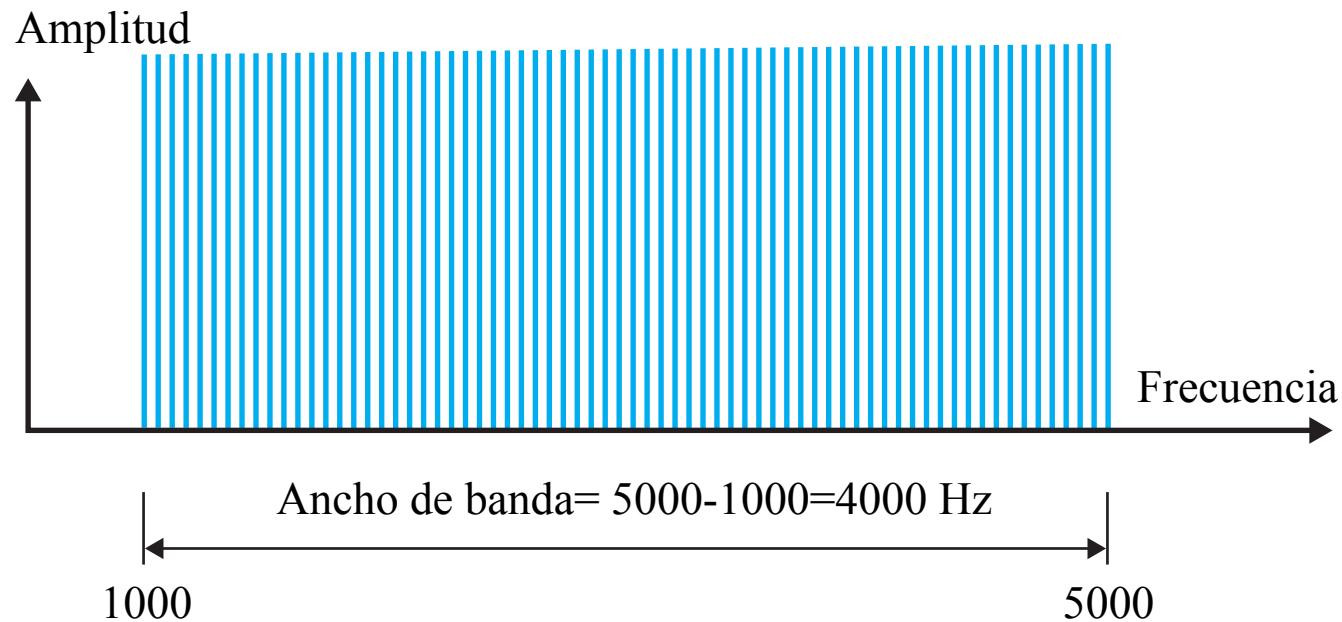


(b) Dominio de la frecuencia



Las señales no periódicas compuestas quedan fuera del alcance de la asignatura.

# Espectro de frecuencias y ancho de banda

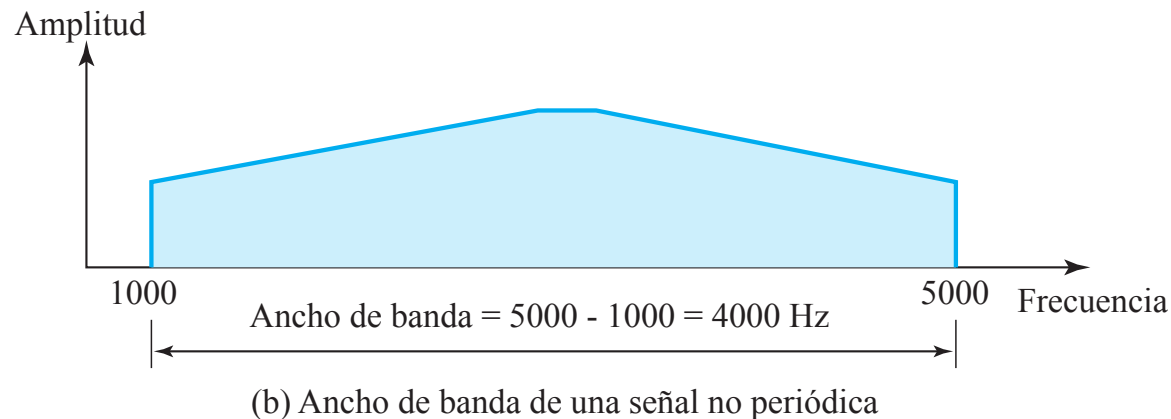
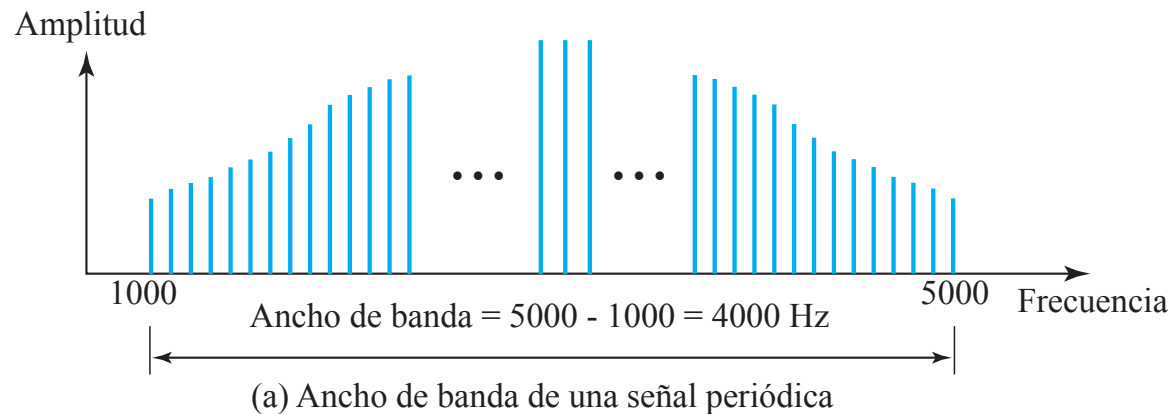


El **espectro de frecuencias** o **ancho de banda** ( $B$ ) es conjunto de frecuencias que constituyen una determinada señal.

Corresponde a la diferencia entre la frecuencia más alta y la más baja contenidas en una señal compuesta.

Se mide en Hz (Hertzios) o  $s^{-1}$ .

# Ancho de banda de señales compuestas

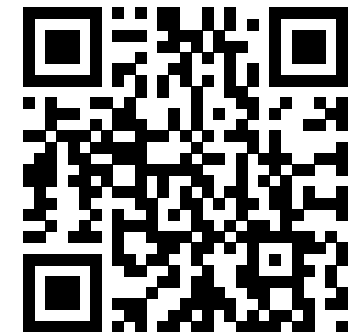


El ancho de banda de una señal periódica contiene todas las frecuencias **discretas** entre los extremos 1000 y 5000 (1001, 1002, ...).

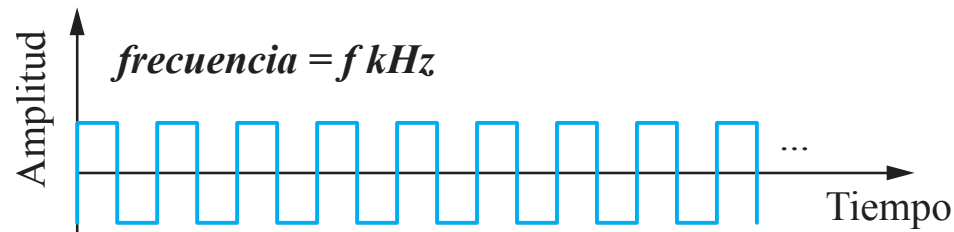
El ancho de banda de la señal no periódica tiene el mismo rango, pero las frecuencias son **continuas**.

En transmisión de datos se utilizan señales compuestas periódicas.

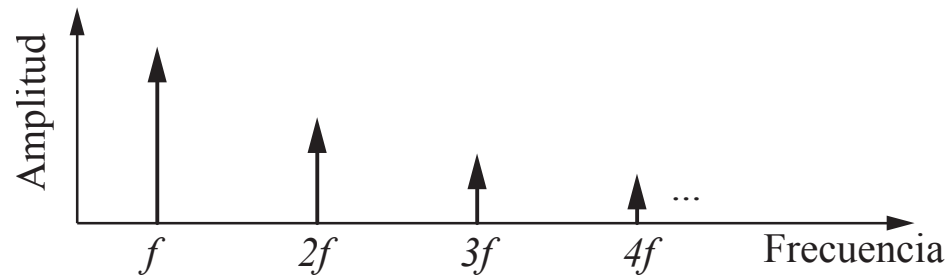
1. Introducción a la transmisión de datos
- 2. Señales digitales**
3. Perturbaciones en la transmisión
4. Transmisión digital
5. Transmisión analógica
6. Codificación de datos
7. Multiplexación
8. Medios de transmisión
9. Líneas de abonado digital



# Infinitas componentes de frecuencia



(a) Tren de pulsos de frecuencia



(b) Espectro de una señal digital periódica.

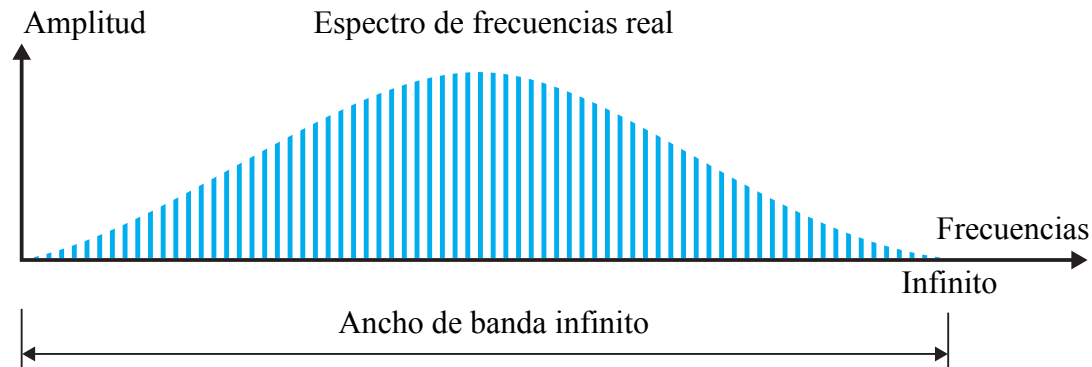
Una **señal digital** es una **señal analógica compuesta** con un **ancho de banda infinito**.

El ancho de banda infinito está formado por **infinitas componentes de frecuencia**.

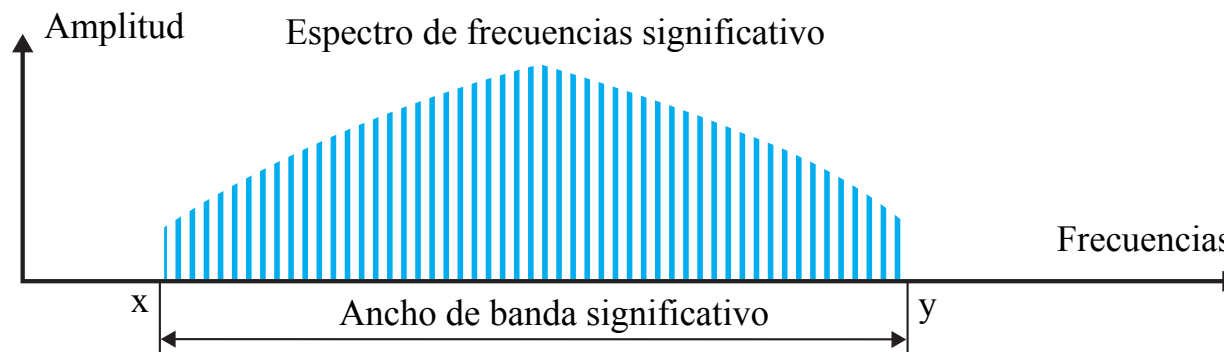
Las infinitas componentes de frecuencia son múltiplos de  $f$ .

La frecuencia  $f$  se denomina **frecuencia fundamental**.

# Espectro de frecuencias real y significativo

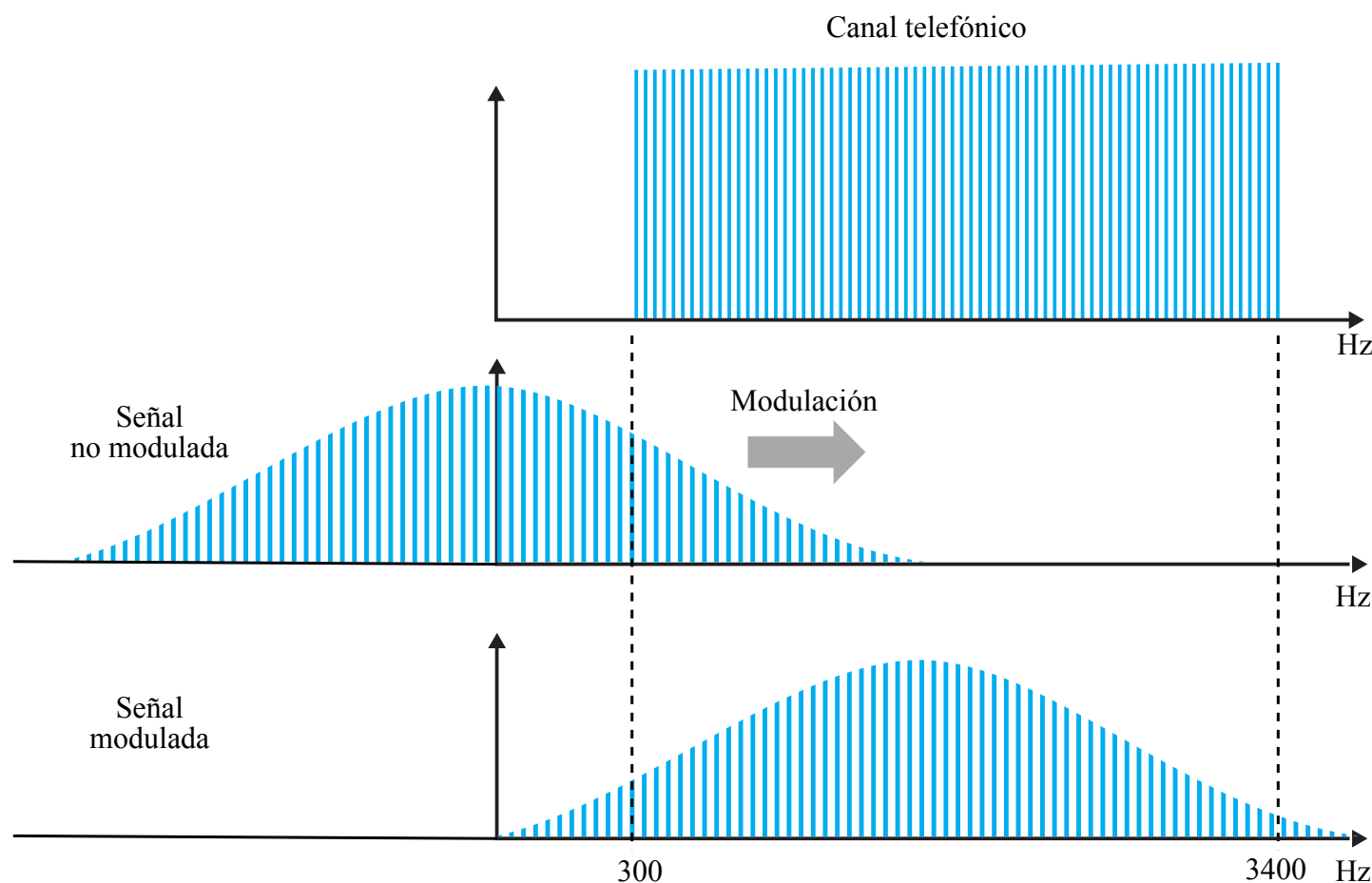


El **espectro de frecuencias real** (o **absoluto**) está formado por infinitas componentes de frecuencia.



El **espectro de frecuencias significativo** (o **relativo**) está formado por un  $n^{\circ}$  finito de componentes frecuenciales suficiente para identificar cada uno de los símbolos y donde se concentra la mayor parte de la energía de la señal.

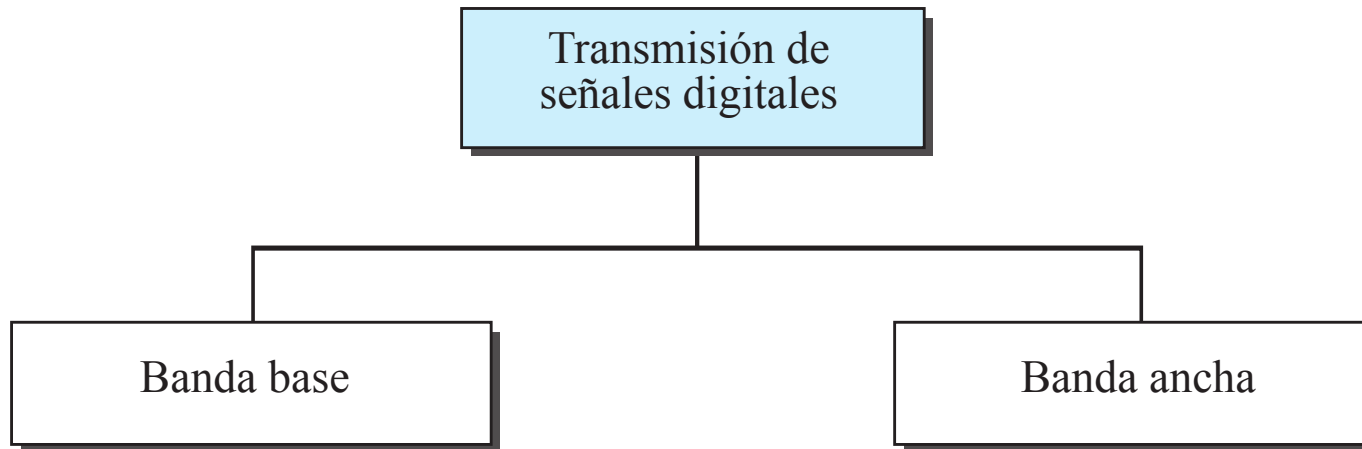
# Modulación



Se puede hacer una representación espectral de la señal a transmitir y del canal por donde se va a transmitir.

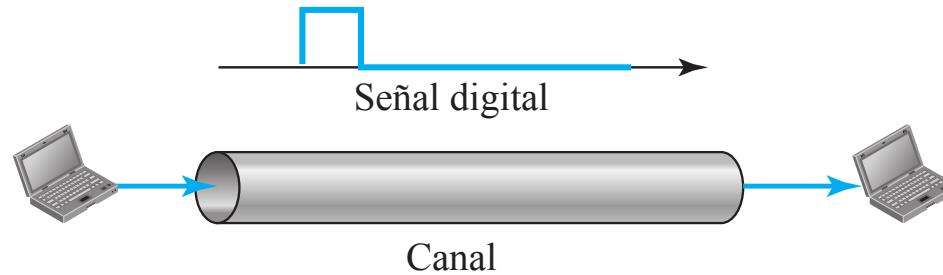
Si ambos espectros coinciden, la señal se puede transmitir tal cual por ese canal, si no coinciden, hay que transformar (**modular**) la señal antes de la transmisión.

# Transmisión de señales digitales



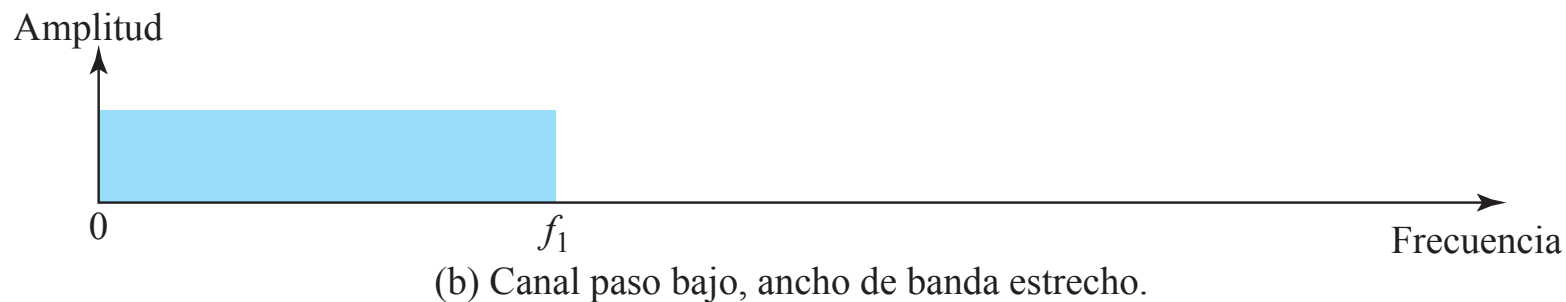
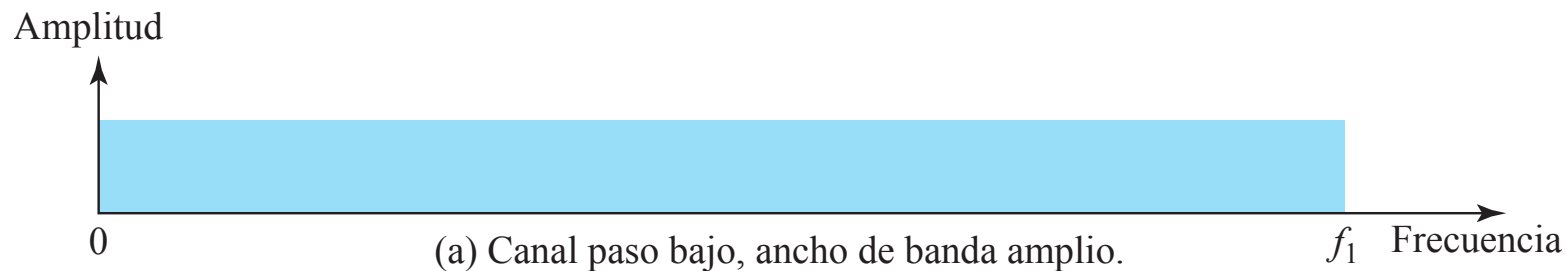
# Transmisión en banda base

Transmisión **banda base**: enviar una señal digital sobre un canal sin cambiar la señal digital a señal analógica.

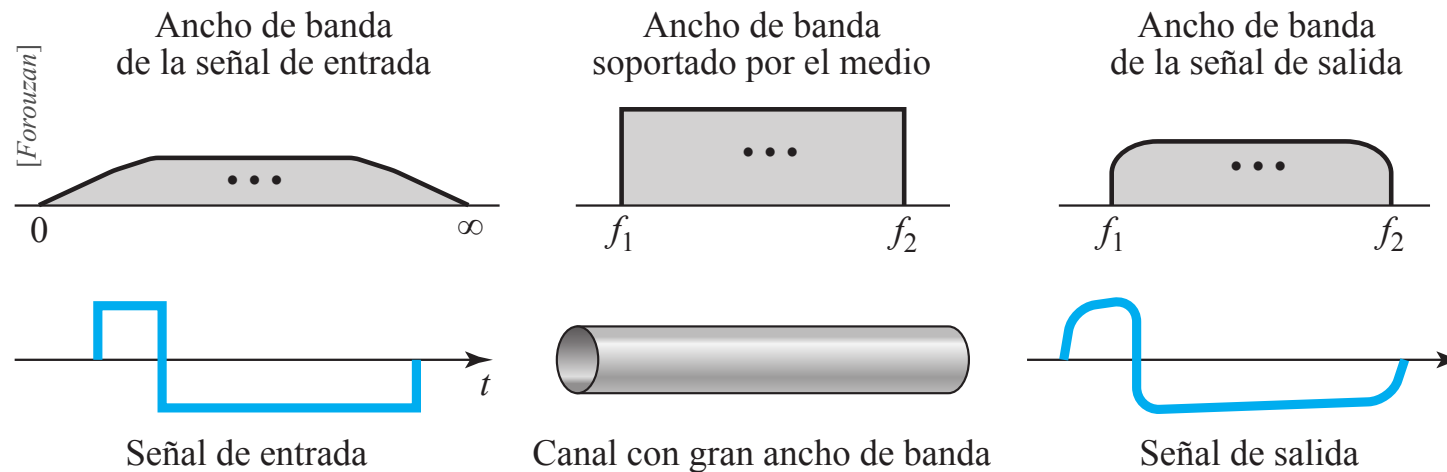


La transmisión banda base necesita de un **canal paso bajo** (canal con ancho de banda que comienza en cero).

Por lo tanto, se tiene un medio dedicado que tiene un único canal.



# Caso 1: Canal paso bajo con gran ancho de banda



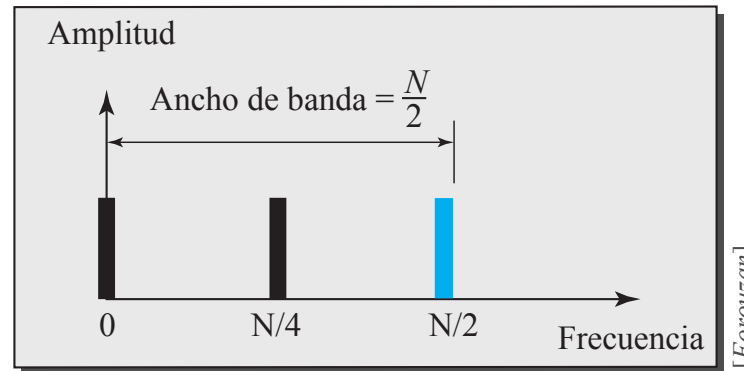
Si se quiere conservar la forma exacta es necesario enviar el espectro completo (rango continuo entre cero e infinito).

La variación de amplitudes en los bordes, generalmente, es despreciable.

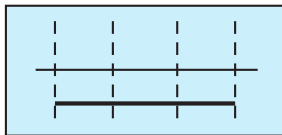
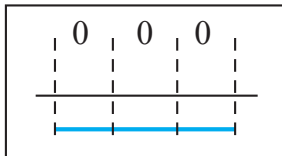
Medios: fibra óptica y cable coaxial.

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

# Caso 2: Canal paso bajo con ancho de banda limitado

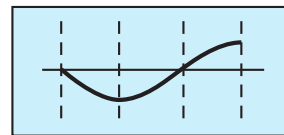
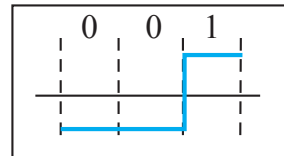


Digital: tasa bit  $N$



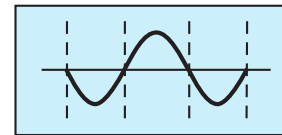
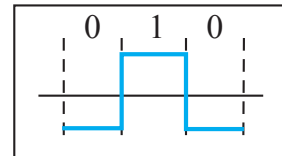
Analógica:  $f=0, \phi=180$

Digital: tasa bit  $N$



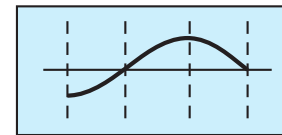
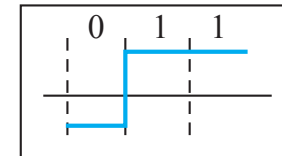
Analógica:  $f=N/4, \phi=180$

Digital: tasa bit  $N$



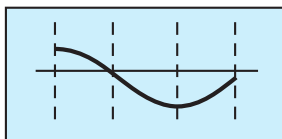
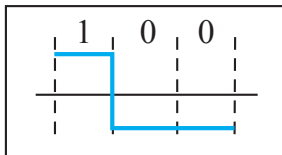
Analógica:  $f=N/2, \phi=180$

Digital: tasa bit  $N$



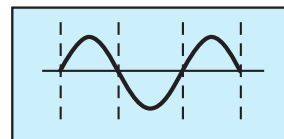
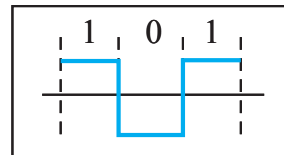
Analógica:  $f=N/4, \phi=270$

Digital: tasa bit  $N$



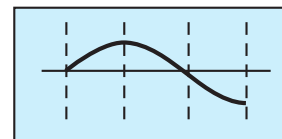
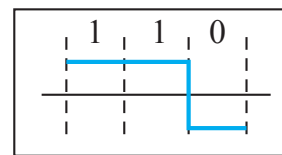
Analógica:  $f=N/4, \phi=90$

Digital: tasa bit  $N$



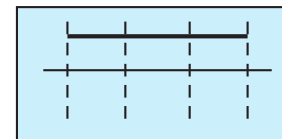
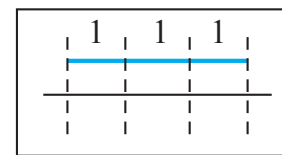
Analógica:  $f=N/2, \phi=0$

Digital: tasa bit  $N$



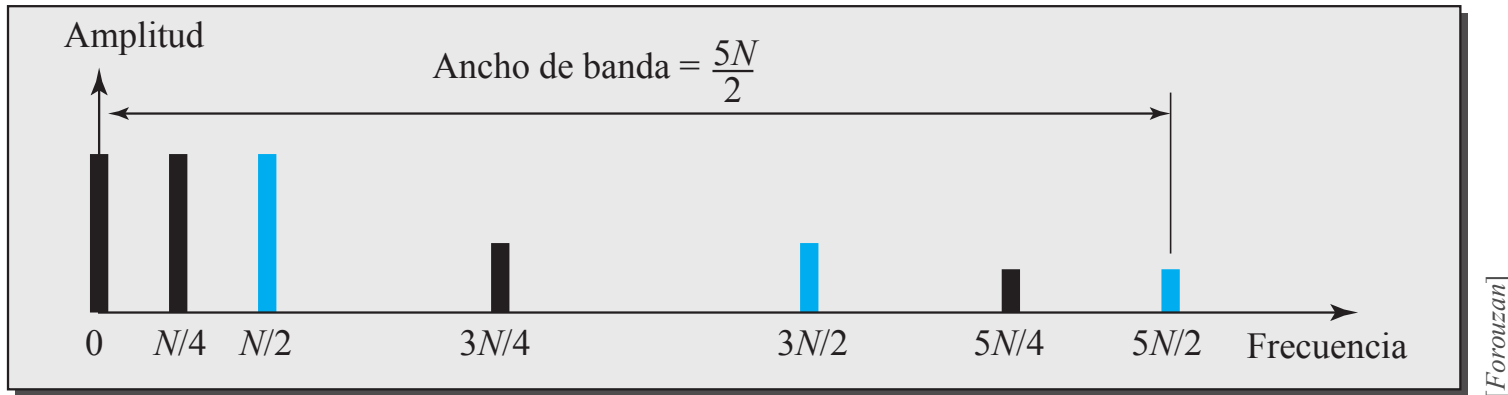
Analógica:  $f=N/4, \phi=0$

Digital: tasa bit  $N$

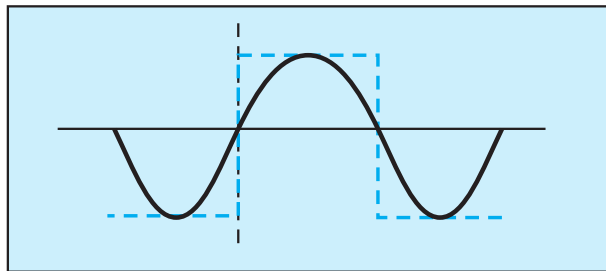
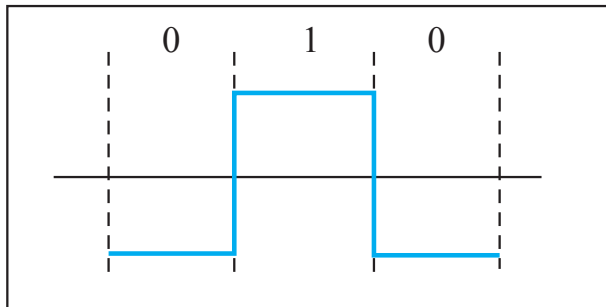


Analógica:  $f=0, \phi=0$

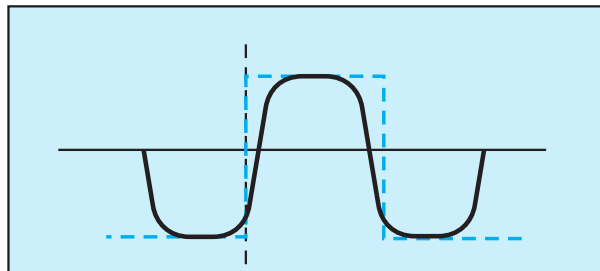
# Caso 3: paso bajo y ancho de banda limitado (mejorado)



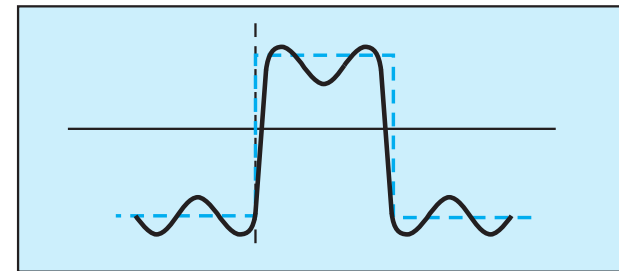
Digital: tasa de bit  $N$



Analógica:  $f=N/2$



Analógica:  $f=N/2$  y  $3N/2$



Analógica:  $f=N/2$ ,  $3N/2$  y  $5N/2$

# Frecuencia fundamental

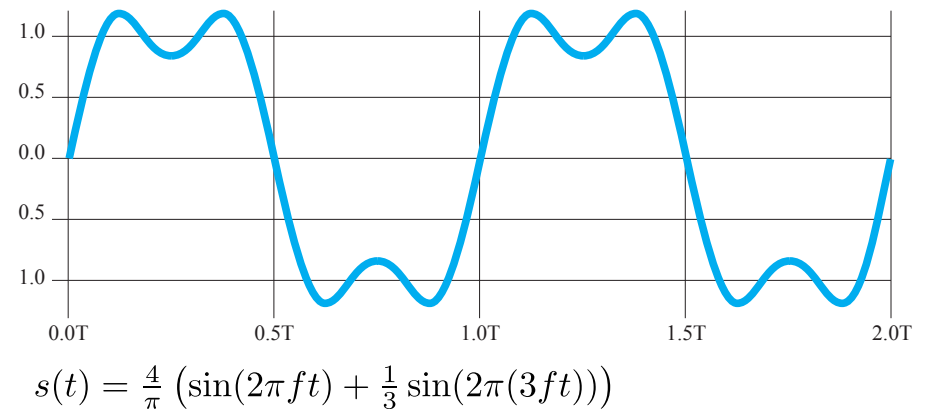
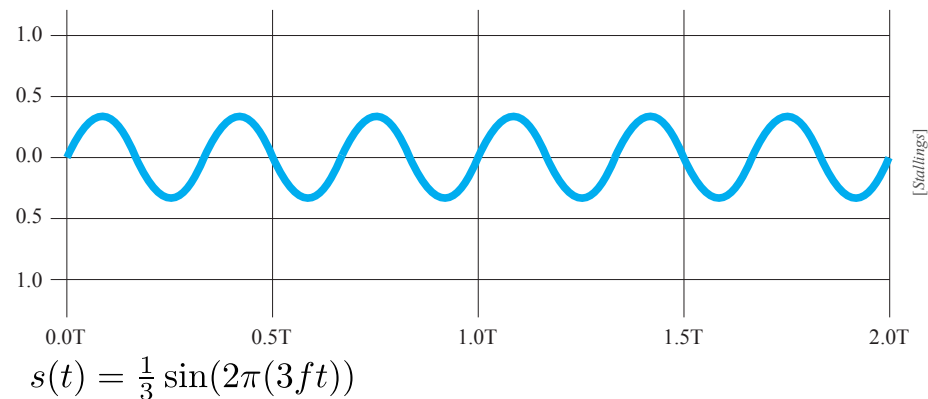
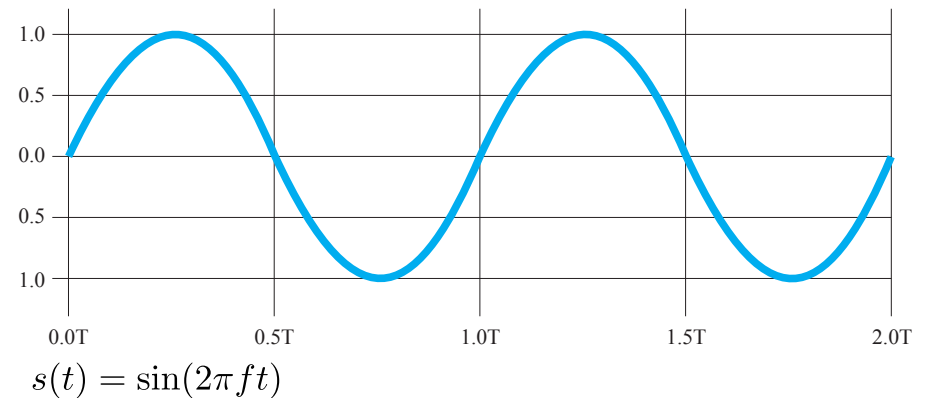
La frecuencia  $f = 1/T$  se denomina **frecuencia fundamental**.

La señal compuesta está formada por **armónicos** (frecuencias) que son múltiplo impar de la frecuencia fundamental:

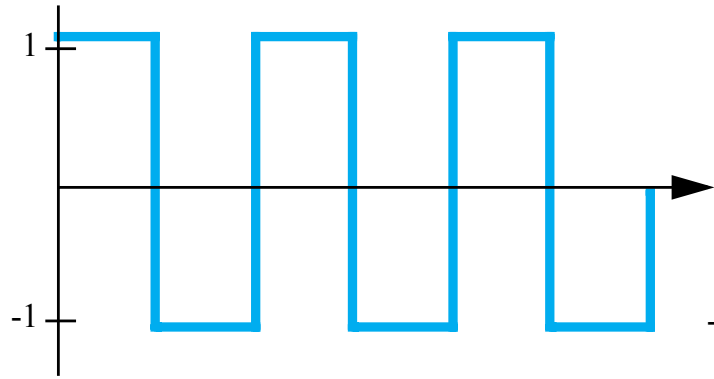
$$3f, 5f, 7f, \dots$$

que corresponde a los armónicos:

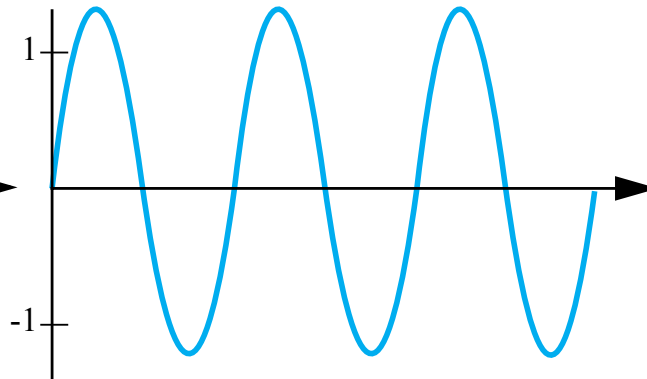
$$1^{\circ}, 2^{\circ}, 3^{\circ}, 4^{\circ}, \dots$$



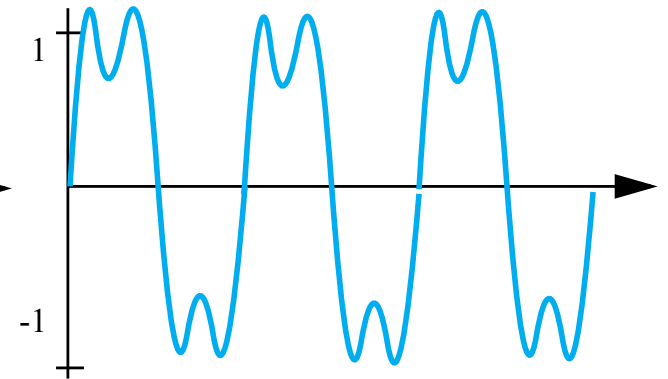
# Múltiples armónicos



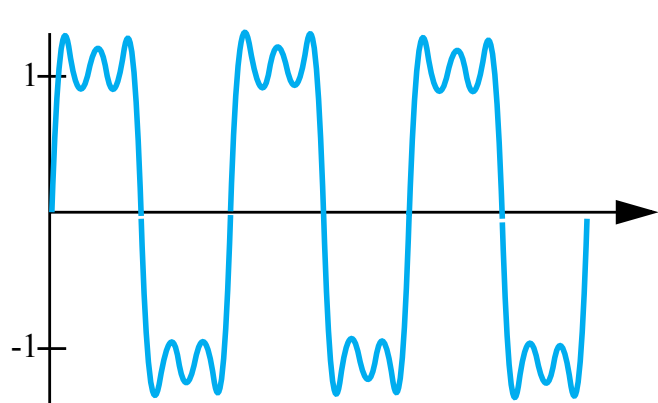
a) Gráfico de  $s(t)$



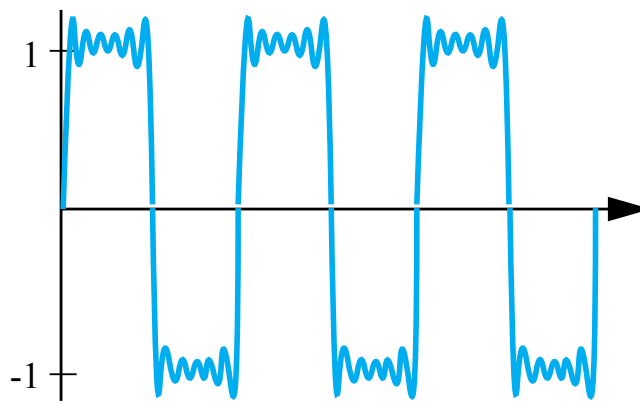
b) Aproximación de Fourier (1 armónico) de  $s(t)$



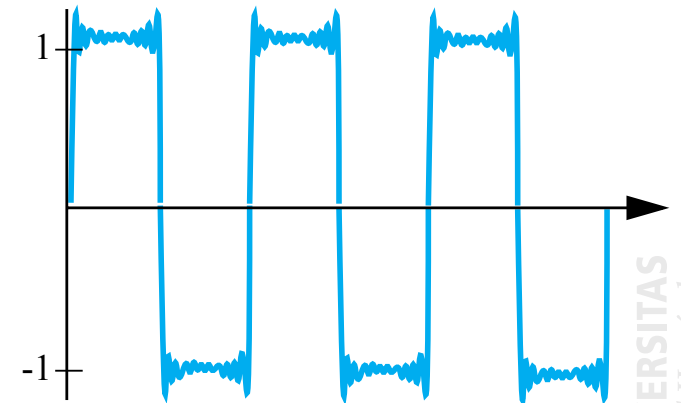
c) Aproximación de Fourier (3er. armónico) de  $s(t)$



d) Aproximación de Fourier (5er. armónico) de  $s(t)$



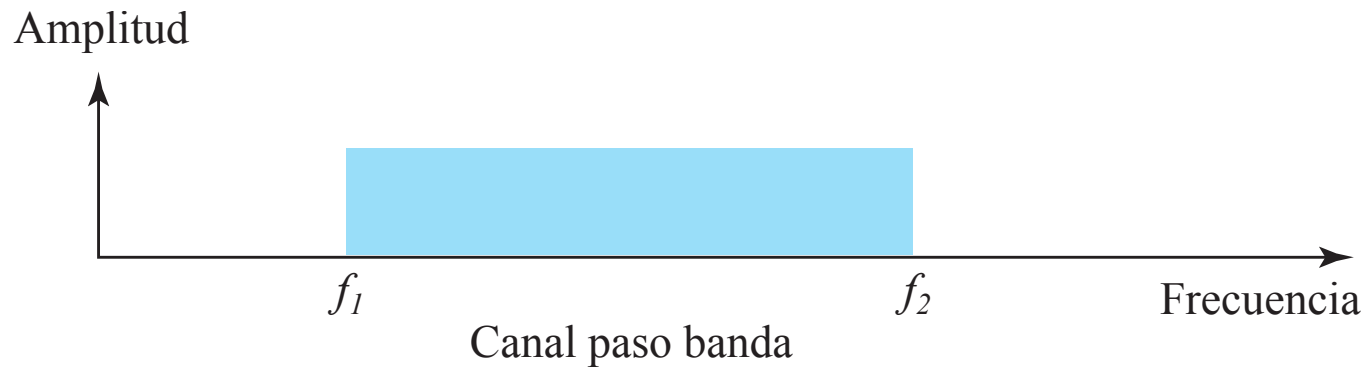
e) Aproximación de Fourier (11º armónico) de  $s(t)$



f) Aproximación de Fourier (21º armónico) de  $s(t)$

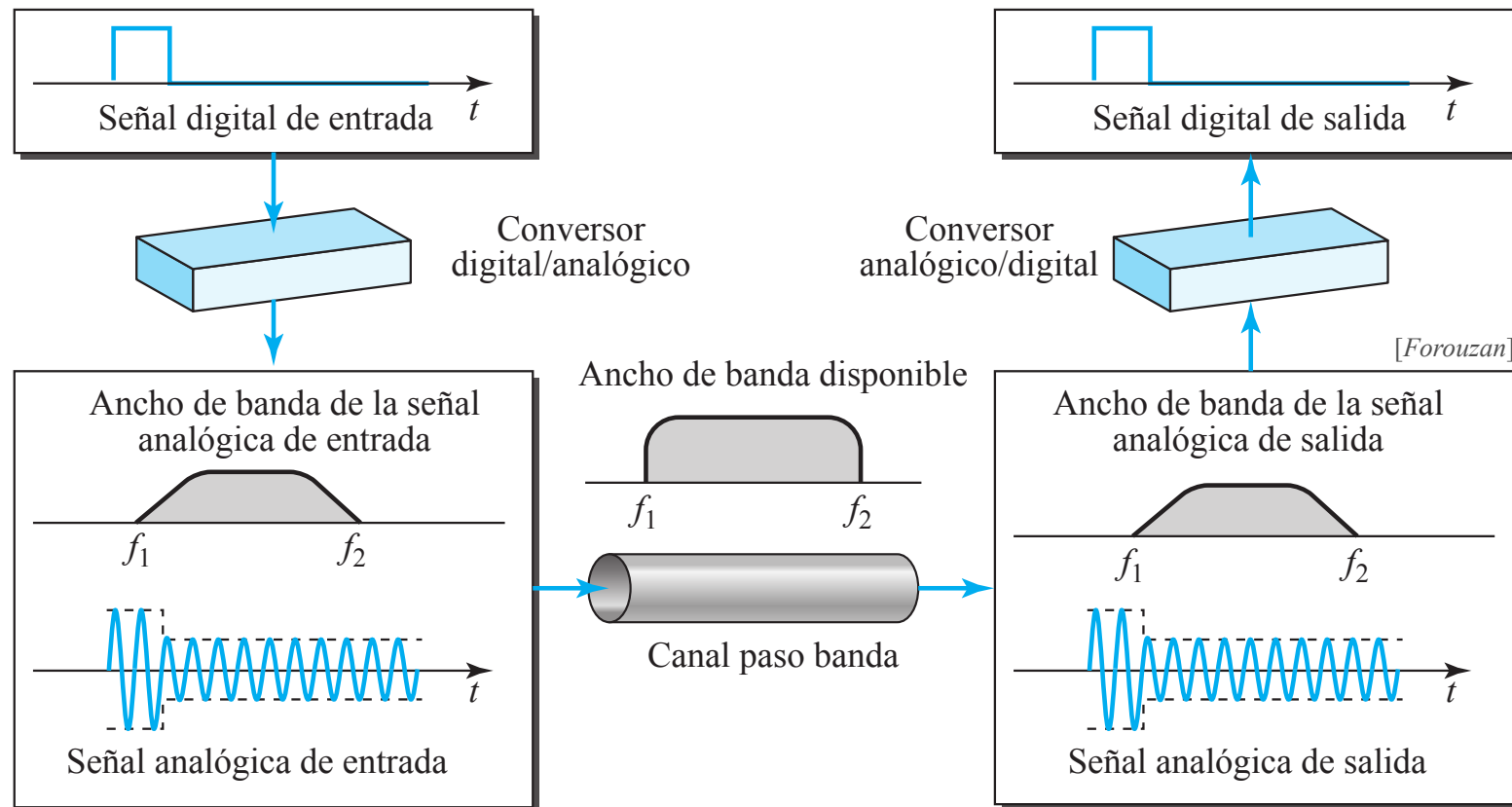
# Transmisión en banda ancha (mediante modulación)

Transmisión **banda ancha**: cambiar (**modular**) la señal digital a una señal analógica para su transmisión.



La **modulación** permite utilizar un **canal paso banda** (canal con ancho de banda que no comienza en cero).

# Modulación sobre paso banda



- 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.
- En este caso el dispositivo convertor se denomina **modem**.

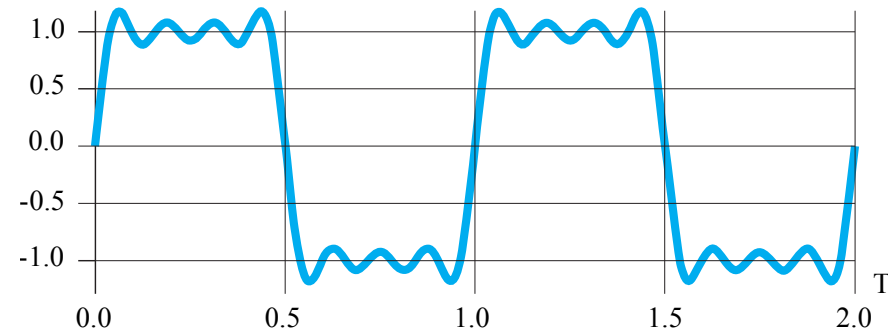
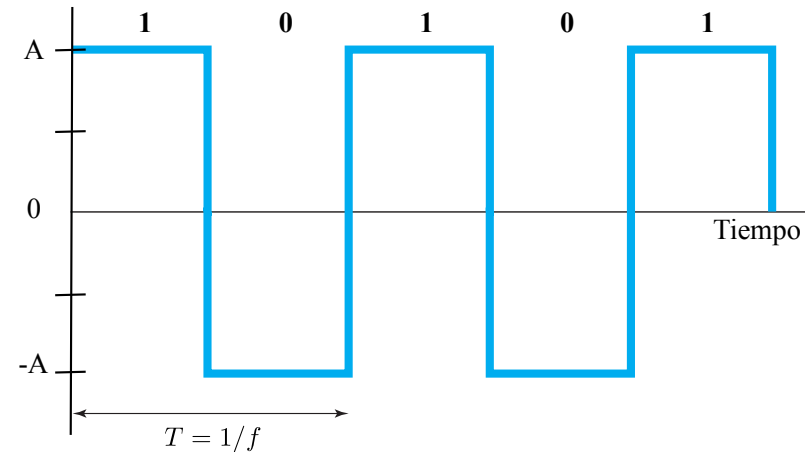
# Relación entre $V_t$ y ancho de banda del canal (I)

Supongamos la señal digital correspondiente a la secuencia binaria:

1010101...

Su desarrollo en serie de Fourier es:

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



y suponemos el ancho de banda limitado a las 4 primeras componentes, entonces, según el Teorema de Fourier:

$$s(t) = \frac{4}{\pi} \left( \sin(2\pi f t) + \frac{1}{3} \sin(2\pi(3f)t) + \frac{1}{5} \sin(2\pi(5f)t) + \frac{1}{7} \sin(2\pi(7f)t) \right)$$

# Relación entre $V_t$ y ancho de banda del canal (II)

En el caso de señal cuadrada, tenemos que:

$$V_t = \frac{\text{bits}}{T} = \frac{2}{1/f} = 2f \text{ bps}$$

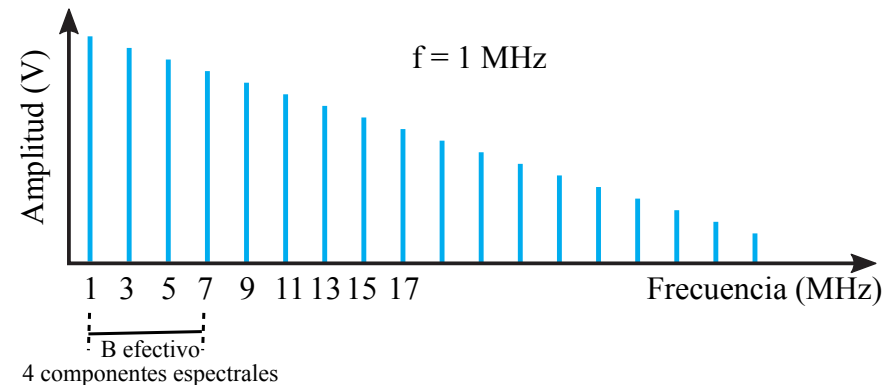
y el ancho de banda limitado a 4 componentes de frecuencia:  $f$ ,  $3f$ ,  $5f$ ,  $7f$ , entonces:

- Si  $f = 1 \text{ MHz}$ :

$$V_t = 2f = 2 \cdot 1 \text{ MHz} = 2 \text{ Mbps}$$

y es necesario un ancho de banda:

$$B_{\text{canal}} = 7 \text{ MHz} - 1 \text{ MHz} = 6 \text{ MHz}$$

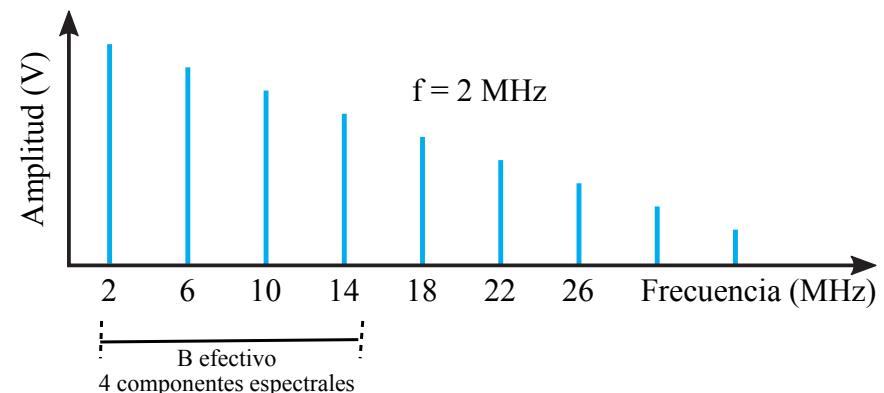


- Si  $f = 2 \text{ MHz}$ :

$$V_t = 2f = 2 \cdot 2 \text{ MHz} = 4 \text{ Mbps}$$

y es necesario un ancho de banda:

$$B_{\text{canal}} = 14 \text{ MHz} - 2 \text{ MHz} = 12 \text{ MHz}$$



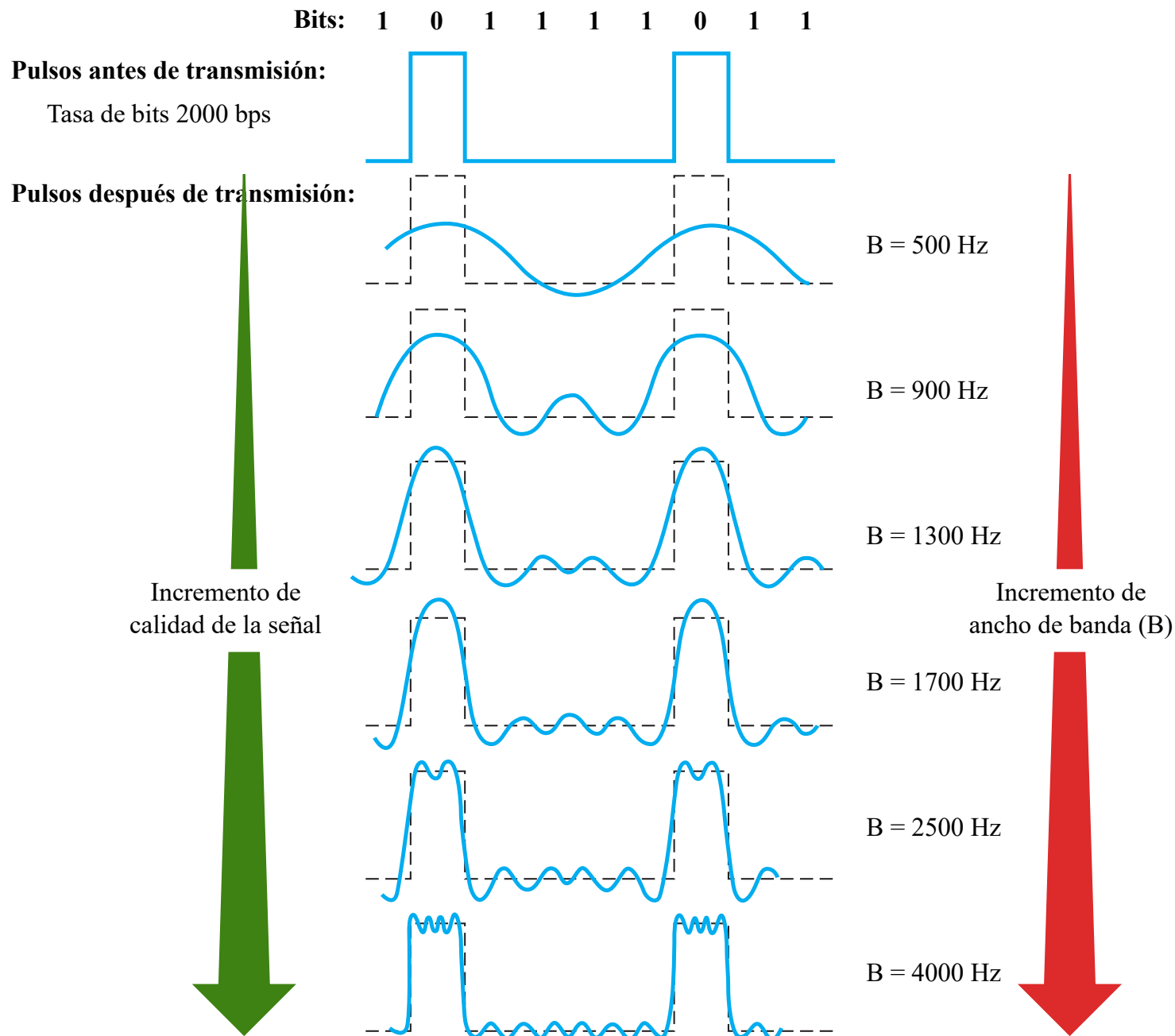
# Relación entre $V_t$ y ancho de banda del canal (III)

Supongamos el  $B_{canal} = 12 \text{ MHz}$ . Tenemos las siguientes opciones:

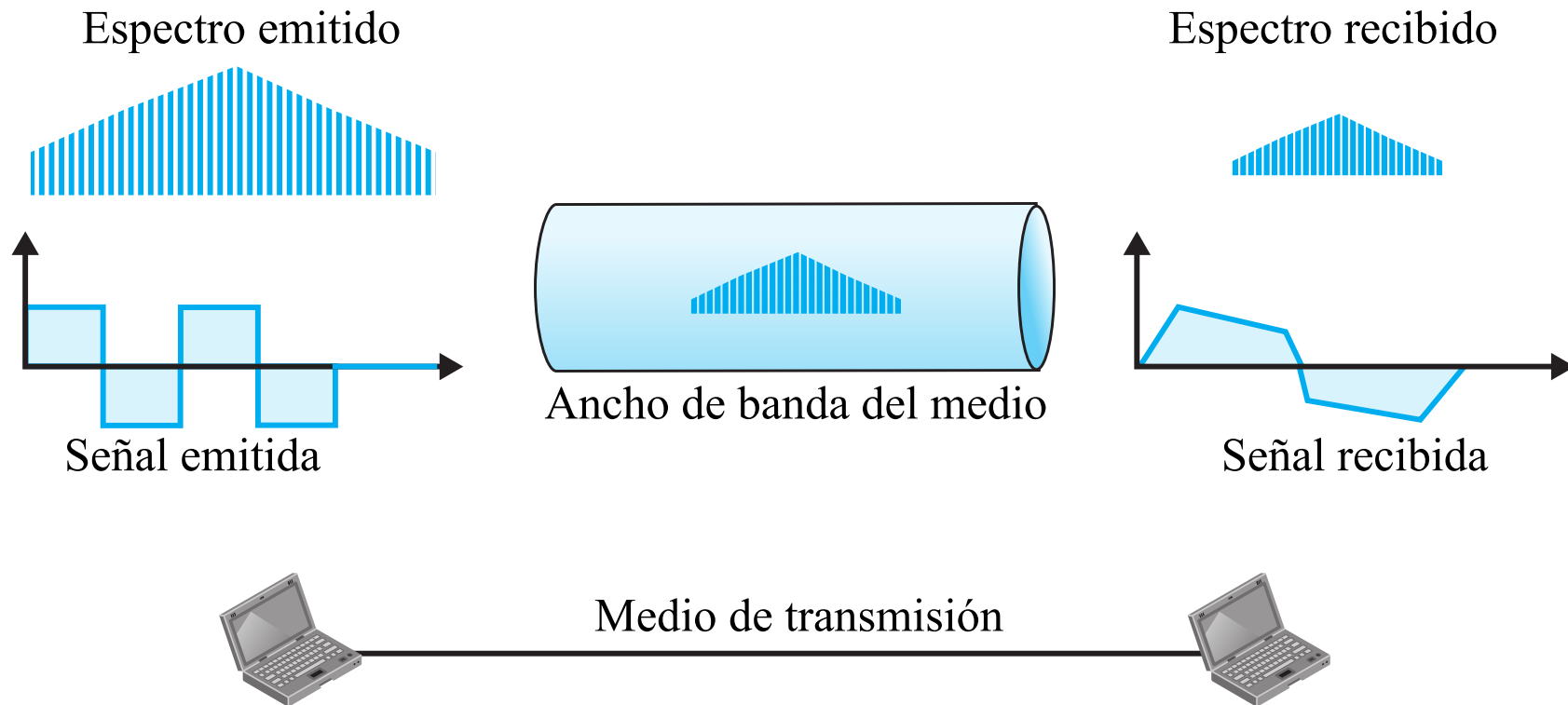
- ① **Mantener la velocidad de transmisión**, entonces:
  - Se mantiene la frecuencia de la señal ( $f = 1 \text{ MHz}$ ).
  - Por el canal cabrían 7 armónicos (componentes) en lugar de 4.
  - Por lo tanto, misma velocidad y mayor ancho de banda → **mayor calidad de señal**.
  
- ② **Mantener la calidad de la señal**, entonces:
  - Se aumenta la frecuencia de la señal ( $f = 2 \text{ MHz}$ ).
  - Se mantiene el nº de armónicos.
  - Por lo tanto, misma calidad y mayor ancho de banda → **mayor  $V_t$** .

Cuanto mayor es el  $B_{canal}$  mayor puede ser la  $V_t$  de la señal

# Relación entre $V_t$ y ancho de banda del canal (IV)



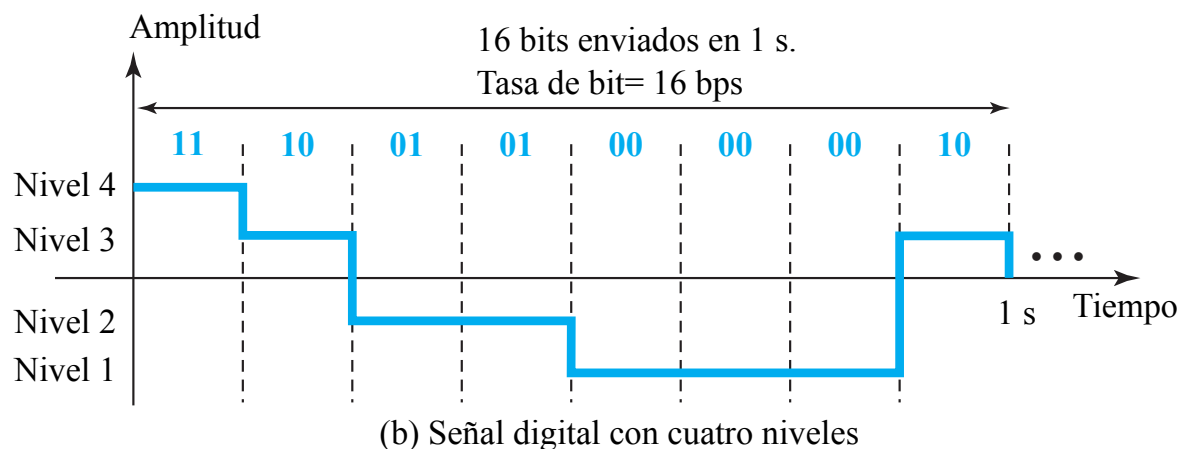
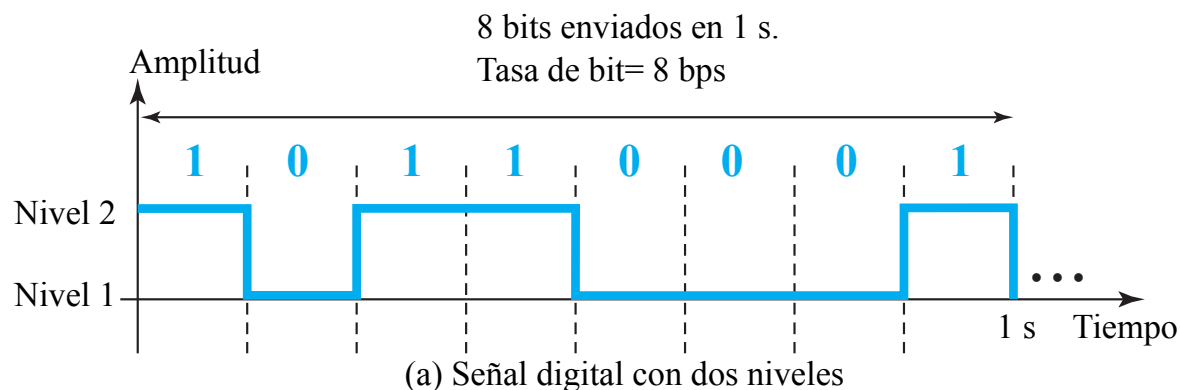
# Efecto del ancho de banda limitado del canal



Si el espectro significativo del medio es inferior al de la señal, se produce una alteración de la señal.

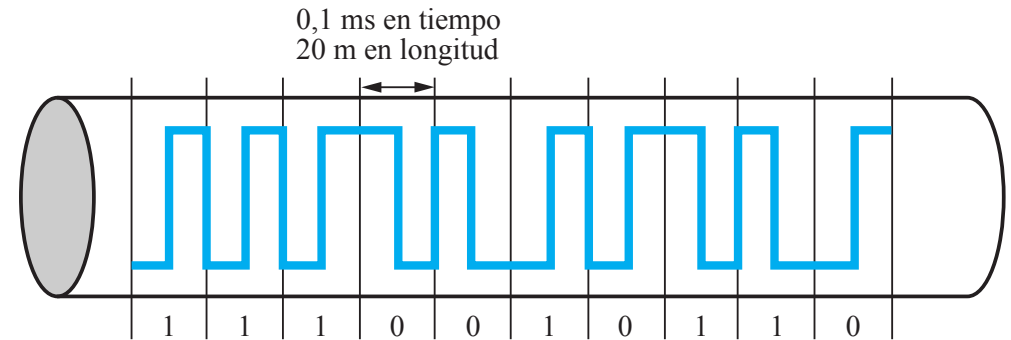
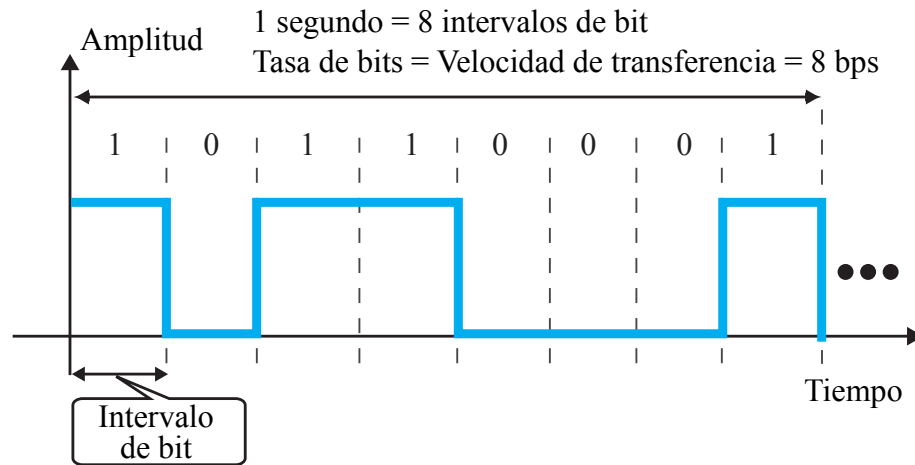
# Niveles en una señal digital

Una señal digital necesita, como mínimo, dos niveles, en cuyo caso, se puede enviar un bit en cada nivel.



En general, si una señal tiene  $L$  niveles, cada nivel necesita  $\log_2 L$  bits.

# Intervalo de bit y tasa de bit



La mayoría de las señales digitales son no periódicas, además, que el periodo y la frecuencia no son características apropiadas para describir una señal digital, en su lugar, se utilizan otros parámetros:

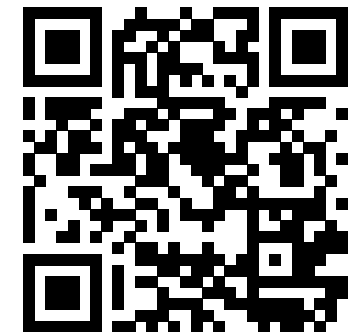
**Tasa de bit:** Cantidad de bits transmitidos en 1s. Se expresa en bits por segundo (bps). También utilizaremos el término **Velocidad de transferencia** ( $V_t$ ).

**Intervalo de bit:** Tiempo que tarda en transmitirse un bit (también se denomina duración o tiempo de bit). Se expresa en s.

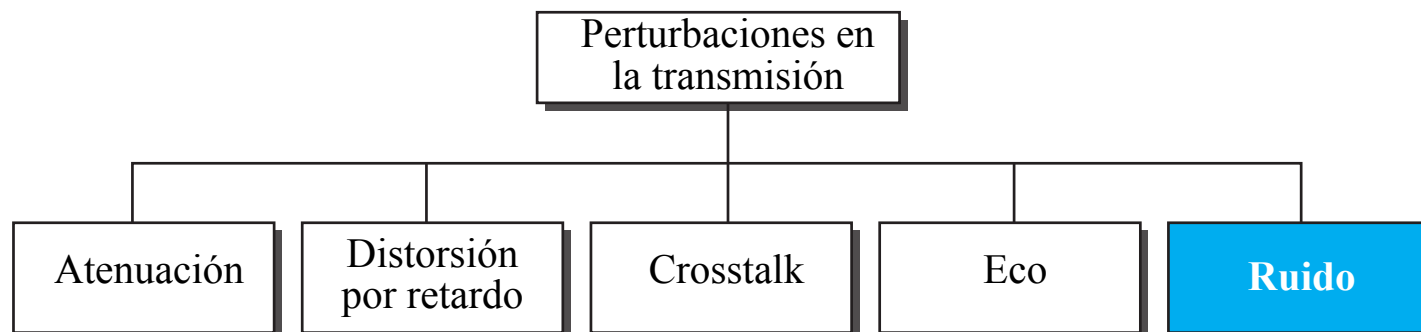
**Longitud de bit:** Es la distancia que ocupa un bit en el medio de transmisión:

$$\text{Longitud de bit} = \text{Velocidad de propagación} \times \text{Intervalo de bit}$$

1. Introducción a la transmisión de datos
2. Señales digitales
- 3. *Perturbaciones en la transmisión***
4. Transmisión digital
5. Transmisión analógica
6. Codificación de datos
7. Multiplexación
8. Medios de transmisión
9. Líneas de abonado digital



# Perturbaciones en la transmisión



Los medios de transmisión son imperfectos y provocan **perturbaciones** en la transmisión (alteración de las señales).

Una perturbación significa que la señal al principio del medio no es la misma que al final del medio.

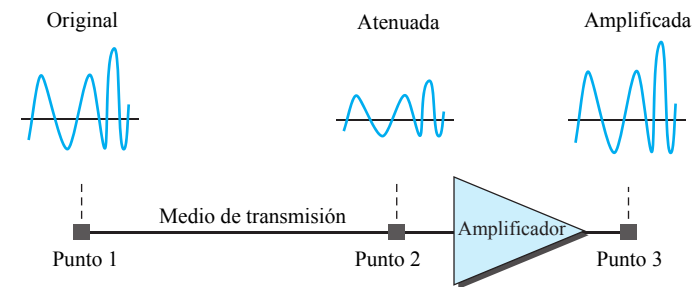
Las perturbaciones provocan que la señal enviada sea diferente a la señal recibida.

- En señales **analógicas**, produce **degradación** de la señal (la mayoría de las veces, aceptables).
- En señales **digitales**, produce **errores** (siempre fatales!!).

# Atenuación

La **atenuación** es la pérdida de energía de la señal debido a la resistencia del medio.

Se compensa con el uso de **amplificadores** de señal.



**decibelio (dB)**: unidad logarítmica que expresa la relación entre dos magnitudes (medida relativa):

- Si el nivel de decibelios de una señal es negativo, la señal es **atenuada**.
- Si es positivo, la señal es **amplificada**.

Si  $P_1$  y  $P_2$  es la potencia de la señal en los puntos 1 y 2, respectivamente:

$$dB = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

En caso de la potencia expresada en miliwatios ( $P_m$ ), entonces:

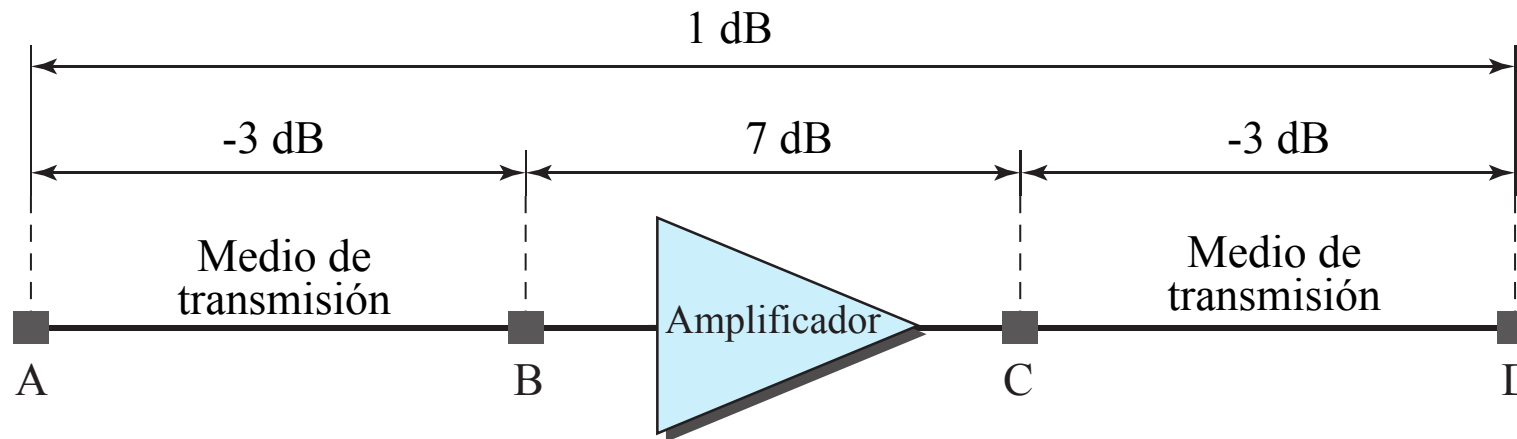
$$dB_m = 10 \log P_m$$

Justificación:

- Debido a que la energía decae de forma logarítmica
- Las ganancias y pérdidas se pueden calcular con sumas y restas

# Atenuación/ganancia

Los decibelios se pueden sumar (o restar) cuando se están midiendo varios puntos (en cascada), en lugar de dos.



La señal viaja de los puntos A al D.

La señal es atenuada cuando alcanza el punto B.

Entre los puntos B y C es amplificada.

Y otra vez, entre los puntos C y D la señal es atenuada.

El resultado final es:

$$dB = -3 + 7 - 3 = +1$$

con lo que la señal ha obtenido una **ganancia** de potencia.

# Atenuación

La **atenuación** depende del tipo de medio:

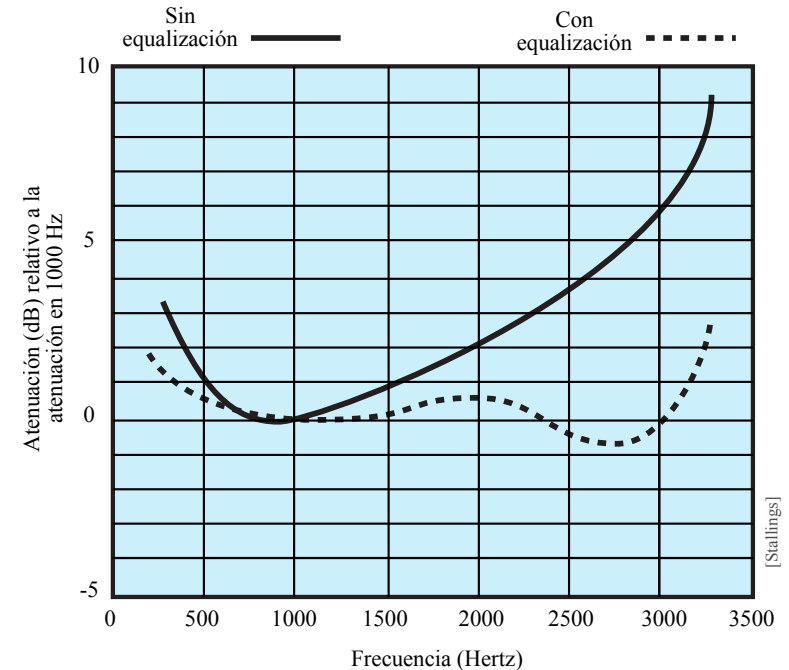
- Medios guiados: pérdida de energía logarítmica (db/Km).
- Medios no guiados: función de las condiciones atmosféricas.

Se utilizan **amplificadores** o **repetidores**, de modo que:

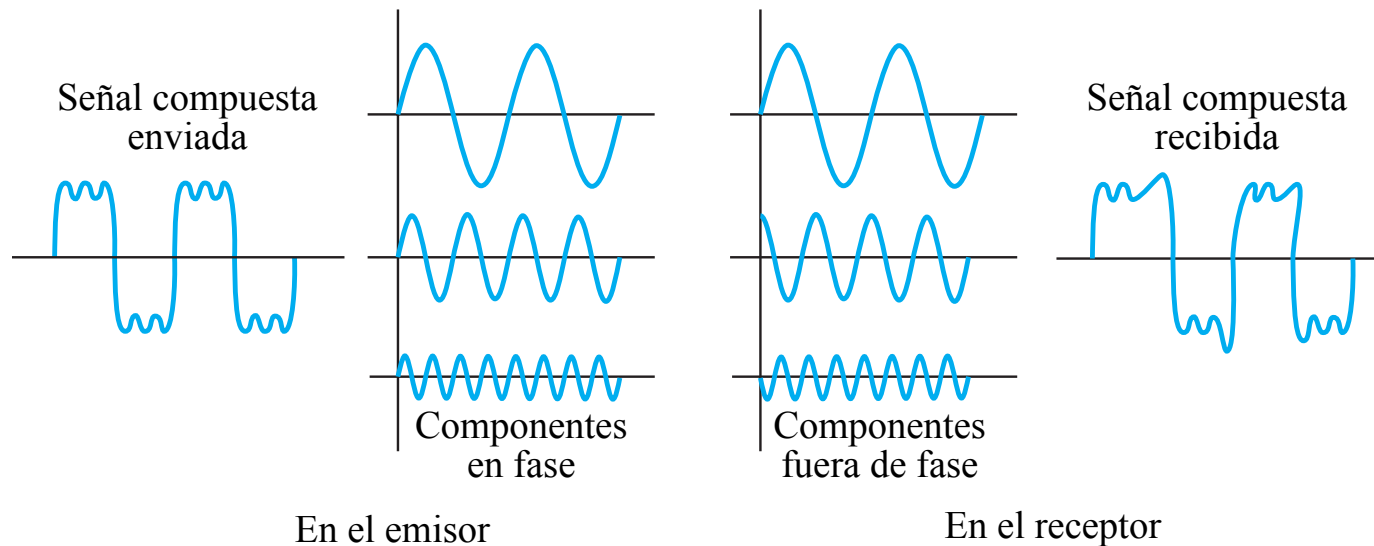
- La señal tenga suficiente potencia para que el receptor la detecte e interprete adecuadamente.
- La señal conserve un nivel suficientemente mayor que el ruido para ser recibida sin error.

No todas las componentes espectrales se atenúan igual pero, en general, existe una frecuencia de corte:

- Las frecuencias inferiores no presentan distorsión lineal de amplitud ni fase.
- Las frecuencias superiores se atenúan muy rápidamente.



# Distorsión por retardo



La **distorsión por retardo** es un cambio en la forma de la señal sinusoidal.

Propia de los medios guiados.

La distorsión se provoca por las diferentes velocidades de propagación en el medio de cada una de las frecuencias que forman una señal digital → algunos armónicos llegan retrasados con respecto a otros.

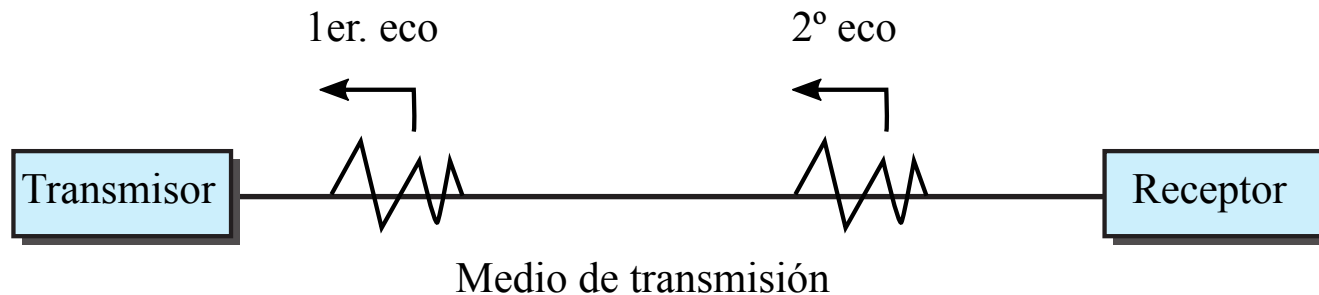
Provoca **interferencia de símbolos**.

Depende del medio y de la anchura de los pulsos.

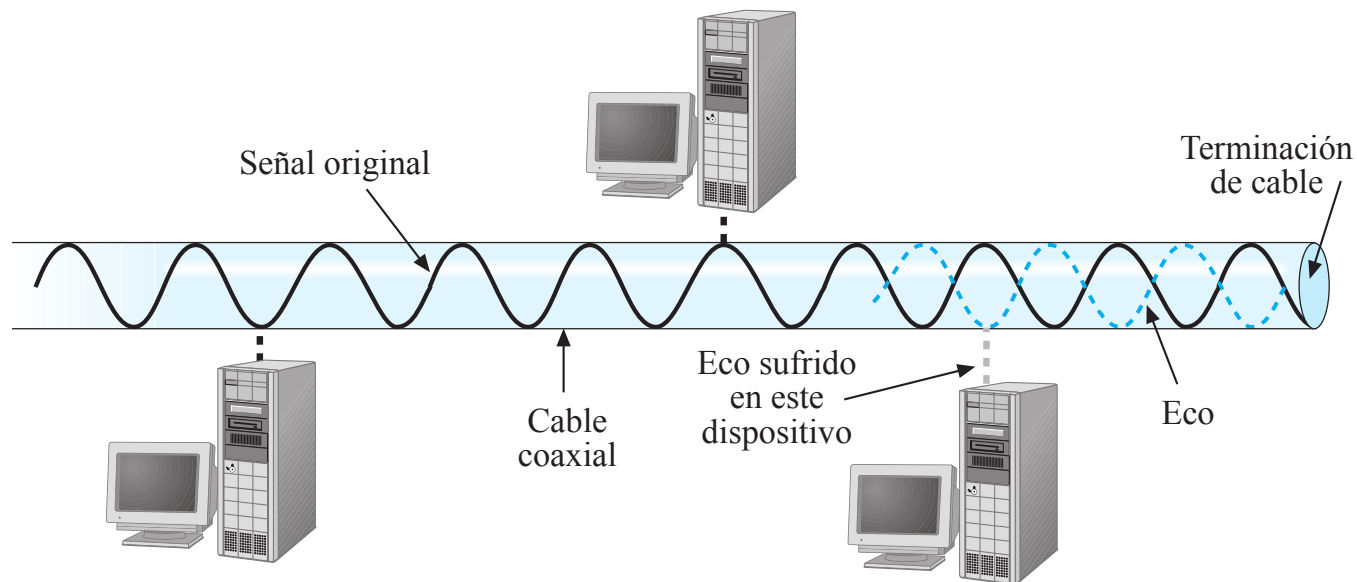
- Cuando más pequeños son los pulsos, se consigue más velocidad de transmisión, pero el efecto de la distorsión puede ser más grave.

Se soluciona con **técnicas de ecualización**.

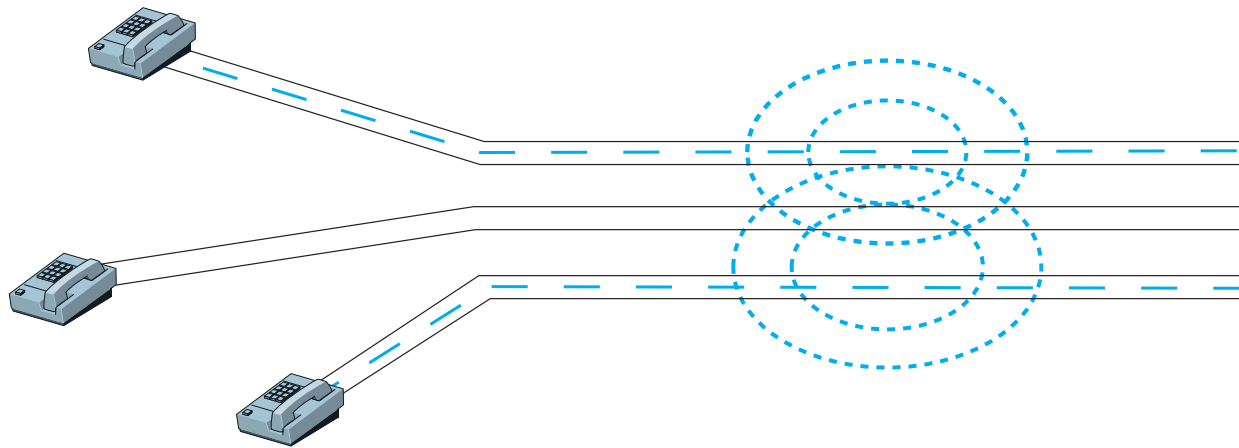
Aparece cuando un circuito produce un cambio en las características eléctricas de los conductores y parte de la onda transmitida se refleja, interfiriendo con la señal que viene en sentido contrario, o incluso, con ella misma, después de varias reflexiones.



**Solución:** supresores de eco, que adaptan la impedancia el cable absorbiendo la energía (resistencias conectadas a extremos de cable).



# Crosstalk (diafonía)



**Crosstalk** es el acoplamiento eléctrico no deseado entre señales en un medio de transmisión, debido a la inducción electromagnética entre circuitos circundantes.

Común en líneas telefónicas.

El efecto es que se escuchaban otras conversaciones.

El ruido de **intermodulación** es un tipo especial de crosstalk: dos señales de dos circuitos cercanos se combinan en una nueva señal, y suele producirse por un mal funcionamiento de los sistemas de transmisión.

Actualmente, con el uso de la fibra óptica y la mejora de los medios de comunicaciones, está totalmente resuelto.



Señal digital sin jitter



Señal digital con jitter

El **jitter** es el resultado de pequeñas irregularidades en la temporización de señales digitales.

Predominante en señales de audio y vídeo, que provoca cortes e inestabilidad de la señal.

Provocado por interferencias electromagnéticas, crosstalk y el uso de repetidores.

Básicamente, se reduce con la instalación de medios aislantes en los circuitos.

# Ruido térmico (blanco o gaussiano)

Depende de la temperatura.

Producido por el movimiento de los electrones en el medio de transmisión.

Distribución uniforme en frecuencia (ruido blanco).

No se puede eliminar:

- Limita las prestaciones.
- Es responsable de los errores de bits aislados.

El **ruido térmico** encontrado en un medio de ancho de banda de 1 Hz:

$$N_0 = kT \text{ w/Hz}$$

donde:

$k$ , constante de Boltzmann =  $1,3803 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ .

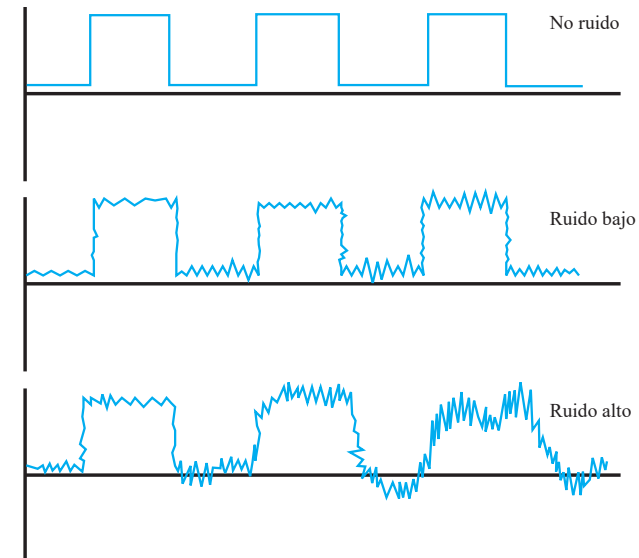
$T$ , temperatura en grados Kelvin.

Por lo tanto, el ruido térmico presente en un medio de ancho de banda  $B$  Hz y  $T$  °K:

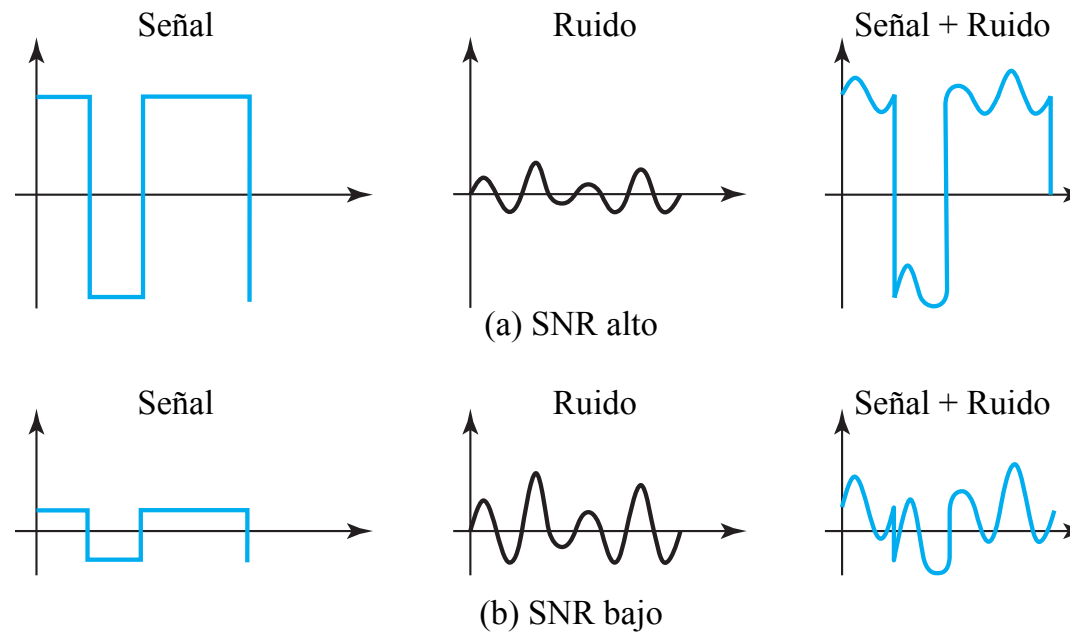
$$N = kTB$$

y expresado en dB:

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



# Relación señal-a-ruido (*SNR, Signal-to-Noise Ratio*)



La relación **señal-a-ruido** se define: Habitualmente se expresa *dB*:

Si las potencias en voltios:

$$SNR = \frac{\text{Potencia}_{\text{señal}}}{\text{Potencia}_{\text{ruido}}} = \frac{S}{N}$$

$$SNR_{dB} = 10 \log SNR$$

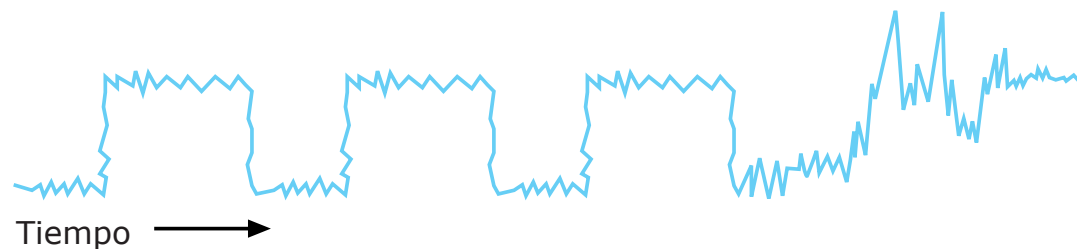
$$SNR_{dB} = 20 \log \frac{A_S}{A_N}$$

donde un SNR **alto** indica que la señal está **menos** corrompida que el ruido (buena calidad de señal), y un SNR **bajo** indica que la señal está **más** corrompida que el ruido (mala calidad de señal).

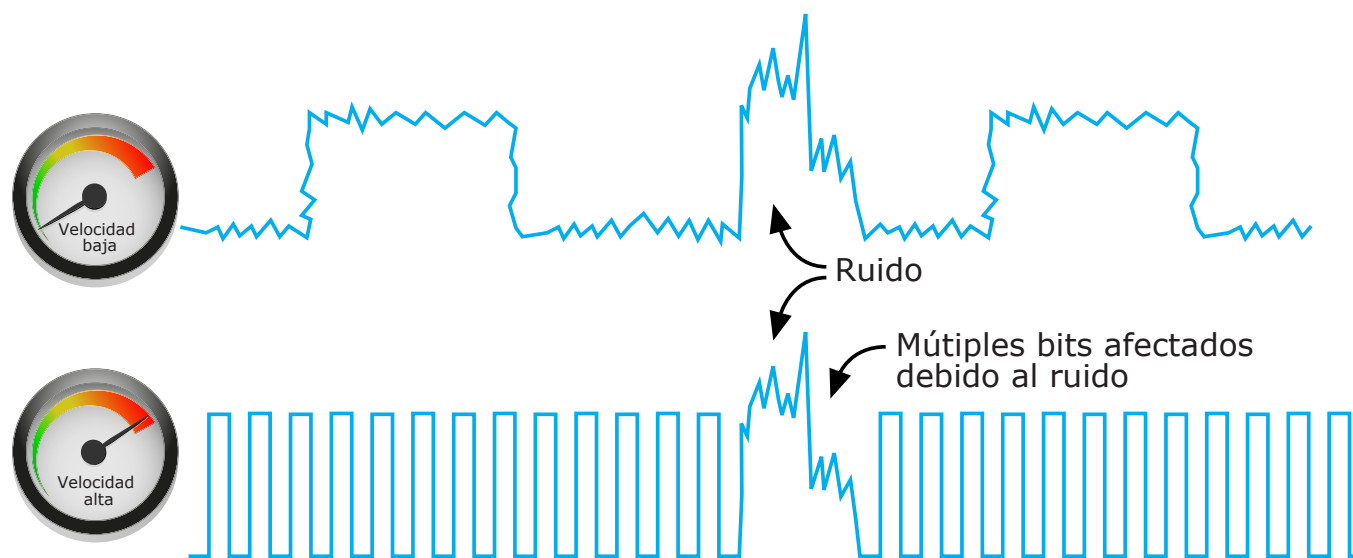
*SNR (Signal-to-Noise Ratio)* está directamente relacionado con el límite teórico de tasa de bits del medio de transmisión.

# Ruido impulsivo

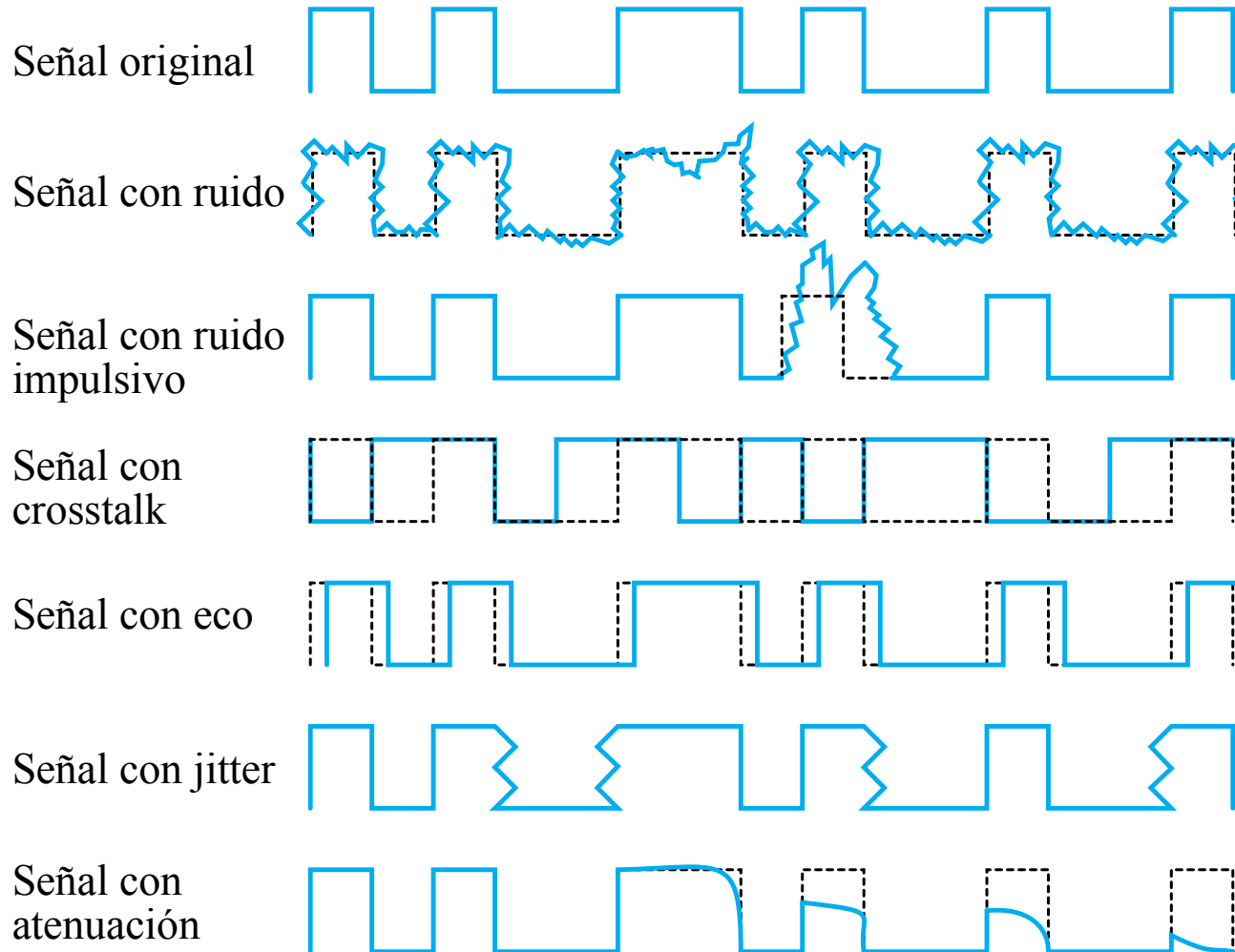
El **ruido impulsivo** son pulsos o picos irregulares y aleatorios, de corta duración y amplitud relativamente grande:



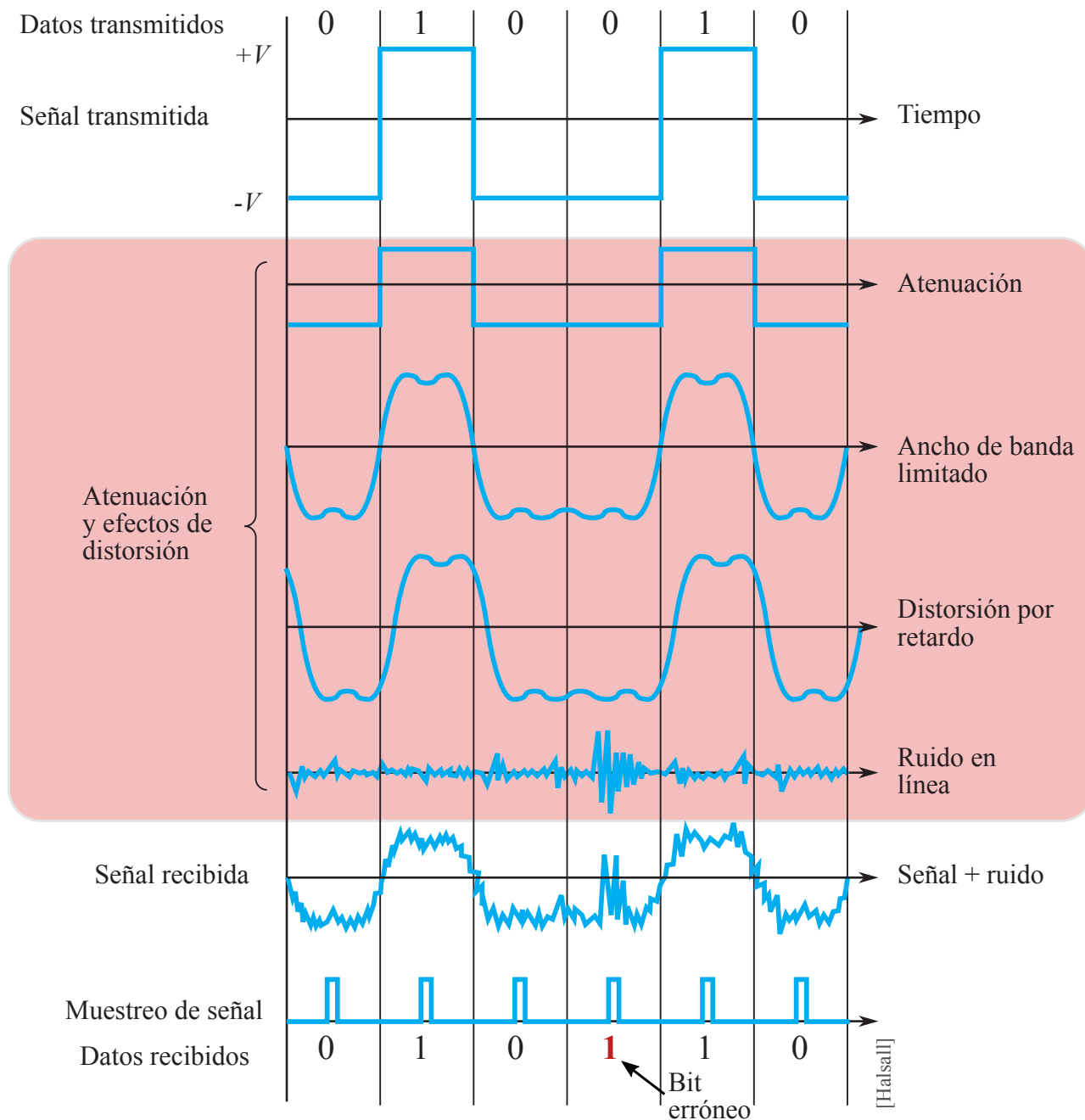
- Originado por perturbaciones electromagnéticas, tormentas atmosféricas, fallos o defectos en los sistemas de comunicación.
- No se pueden evitar.
- Suelen generar ráfagas de bits erróneos, que dependen de la velocidad.



# Errores más característicos (resumen)



# Combinación de perturbaciones: errores



# Limitaciones a la tasa de transmisión de datos

Uno de los aspectos más importantes en la comunicación de datos es la rapidez a la que se pueden enviar los datos, en bits por segundo, sobre un canal.

La tasa de transferencia de datos depende:

- El ancho de banda disponible.
- Los niveles de señal utilizados.
- La calidad del canal (nivel de ruido).

Hay dos expresiones para calcular las tasas de transmisión de datos teóricas:

- **Teorema de Nyquist**, para canales perfectos (sin ruido).
- **Capacidad de Shannon**, para canales imperfectos (con ruido).

Ambos teoremas son utilizados conjuntamente para calcular los límites y niveles de una señal.

# Canal sin ruido: tasa de bit de Nyquist

Para canales sin ruido (perfecto), la expresión Nyquist define la capacidad teórica máxima (en bits por segundo):

$$C = 2B \log_2 L$$

donde:

$B$  : ancho de banda del canal.

$L$  : número niveles de señal utilizado para representar los datos.

$C$  : capacidad del canal (en bps).

Parecería que, para un determinado  $B$  y aumentando  $L$ , conseguiríamos un aumento de la tasa de bits sin límite, pero no es cierto, porque con el aumento de niveles de señal utilizados obliga a incrementar la complejidad de los receptores para distinguir los diferentes niveles de señal.

Un aumento de los niveles de señal puede reducir la fiabilidad del sistema.

# Canal con ruido: capacidad de Shannon

Claude Shannon [1944] introduce la fórmula, denominada **Capacidad de Shannon**, para determinar la tasa de datos teórica máxima para un canal con ruido:

$$C = B \log_2(1 + SNR)$$

donde:

$B$  : ancho de banda del canal.

$SNR$  : relación señal-a-ruido.

$C$  : capacidad del canal en bits por segundo.

En la Capacidad de Shannon no intervienen la cantidad de niveles de la señal, lo que indica que, en canales con ruido e independientemente del nº de niveles utilizado, la tasa de transmisión de datos nunca puede ser superior a la capacidad del canal.

El **teorema de Shannon** nos indica que si la velocidad de transmisión de un canal es menor que  $C$ , es posible encontrar un código de señal adecuado para una transmisión con una probabilidad de error tan pequeña como se quiera.

Sólo considera ruido blanco (o gaussiano), no considera ni ruido impulsivo, atenuación ni distorsión por retardo, por lo que en la práctica, se consiguen tasas de transmisión mucho menores.

# Eficiencia espectral

La **eficiencia espectral** (o **eficiencia del ancho de banda**) de una transmisión digital es la cantidad de bits por segundo que puede ser soportado por Hertzio de ancho de banda.

Se obtiene a partir de la Capacidad de Shannon:

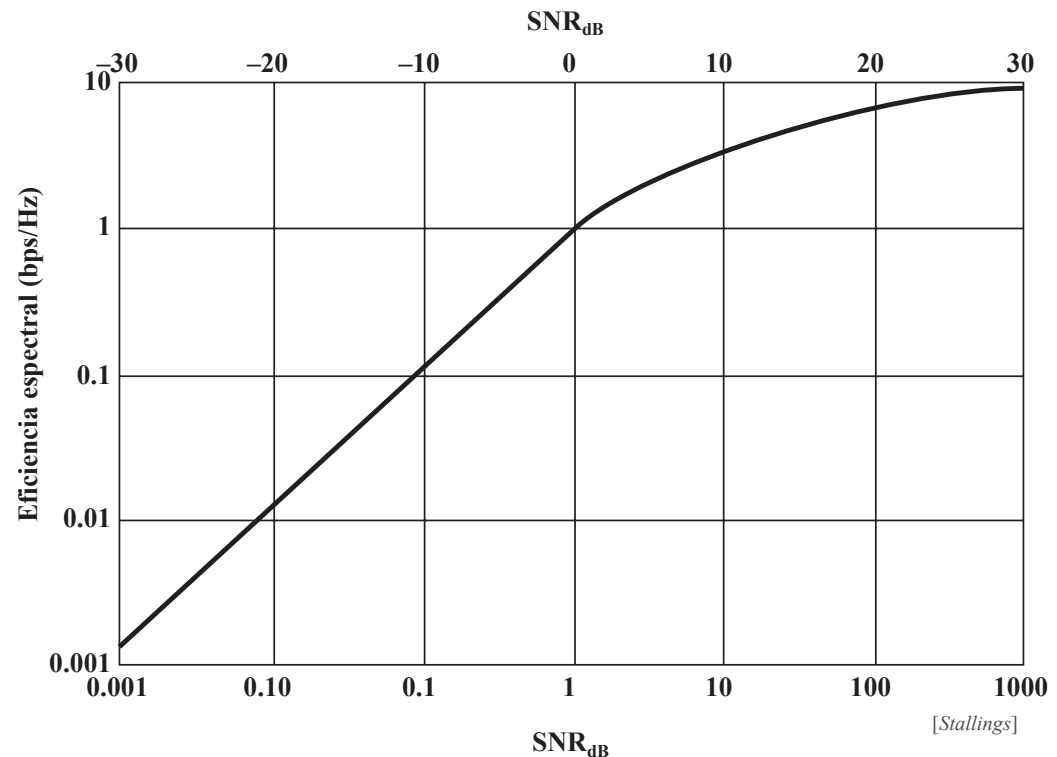
$$C = B \log_2(1 + SNR) \rightarrow \frac{C}{B} = \log_2(1 + SNR) \text{ bps/Hz}$$

Para

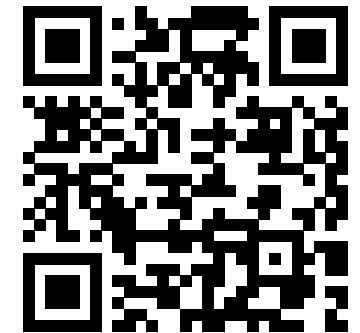
$$SNR = 1$$

se tiene que:

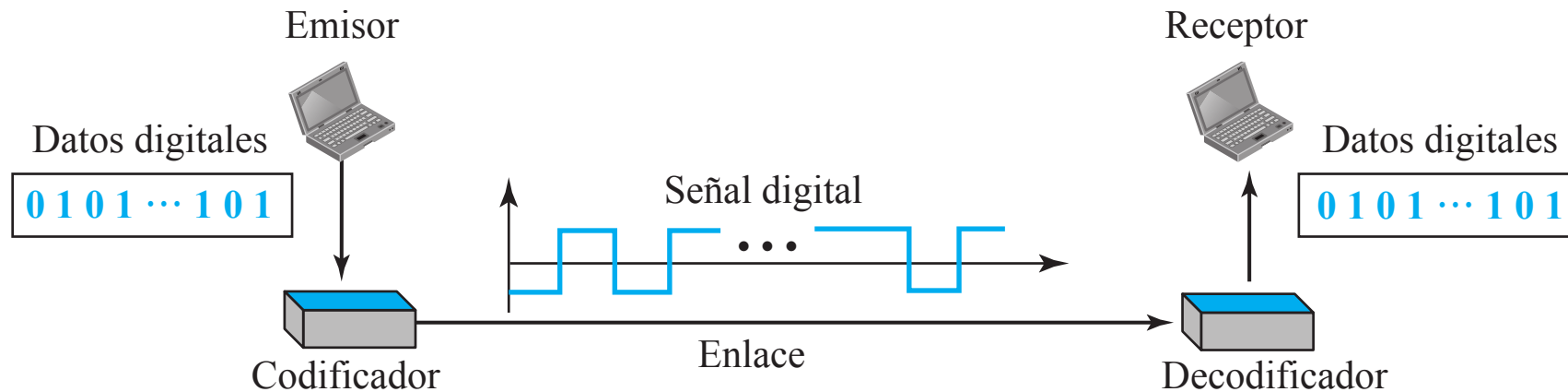
$$C/B = 1 \text{ bps/Hz}$$



1. Introducción a la transmisión de datos
2. Señales digitales
3. Perturbaciones en la transmisión
- 4. *Transmisión digital***
5. Transmisión analógica
6. Codificación de datos
7. Multiplexación
8. Medios de transmisión
9. Líneas de abonado digital



# Conversión digital-digital



**Codificación de línea:** proceso de convertir datos digitales en señales digitales:

- En el **emisor**, los datos digitales se convierten a señal digital.
- En el **receptor**, la señal digital se convierte a datos digitales.

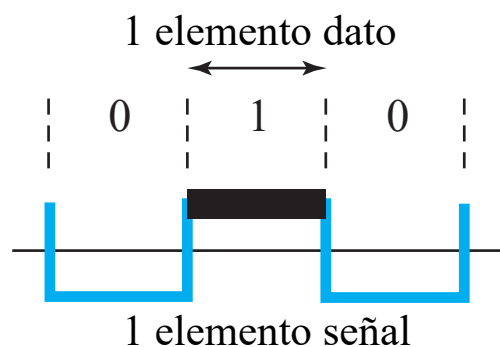
También se conoce como **modulación banda base**.

# Elemento señal vs elemento dato

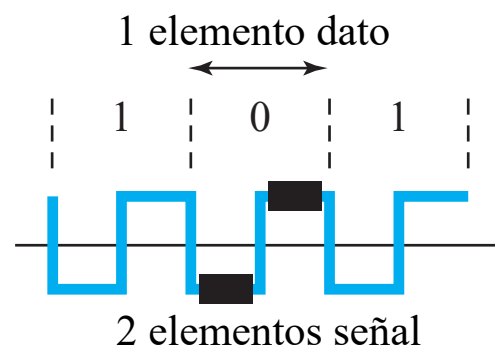
En comunicación de datos, el objetivo es enviar datos a través de señales. Si definimos:

- **Elemento dato** es la unidad más pequeña que representa la información: **bit**.
- **Elemento señal** es la unidad más corta (en el tiempo) de una señal digital: **símbolo**.

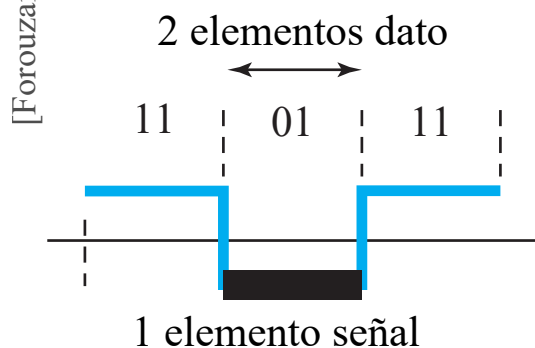
Definimos el ratio  $r$  como el número de elementos dato transportados por elementos señal.



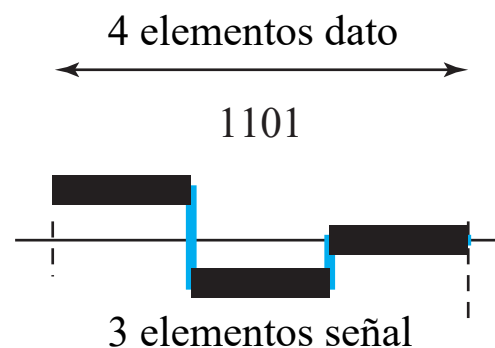
(a) Un elemento dato por un elemento señal ( $r = 1$ )



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



(c) Dos elementos dato por un elemento señal ( $r = 2$ )



(d) Cuatro elementos dato por tres elemento señal ( $r = \frac{4}{3}$ )

# Tasa de datos, tasa de señal y ancho de banda

**Tasa de datos (N)**, también denominada **tasa de bits** y **velocidad de transferencia**, define el número de elementos dato (bits) enviados en 1 s. Se mide en [bps].

**Tasa de señal (S)**, también denominada **tasa de pulsos**, **tasa de modulación** o **tasa de símbolos**, es el número de elementos señal (símbolos) en 1 s. Se mide en [baudio].

El **objetivo** de todo medio de transmisión es maximizar la tasa de datos ( $N$ ) con la mínima tasa de señal ( $S$ ). Si definimos:

$$S = N \cdot (1/r)$$

Además, como  $r$  depende del patrón de datos y se establece la tasa media de señal mediante el parámetro  $c$ , *factor de línea*, habitualmente  $c = 1/2$ , entonces:

$$S_m = c \cdot N \cdot (1/r)$$

Simplificando, el ancho de banda (Hz) es proporcional a la tasa de señal (baudios), por lo tanto, el ancho de banda mínimo:

$$B_{\text{mín}} = c \cdot N \cdot (1/r)$$

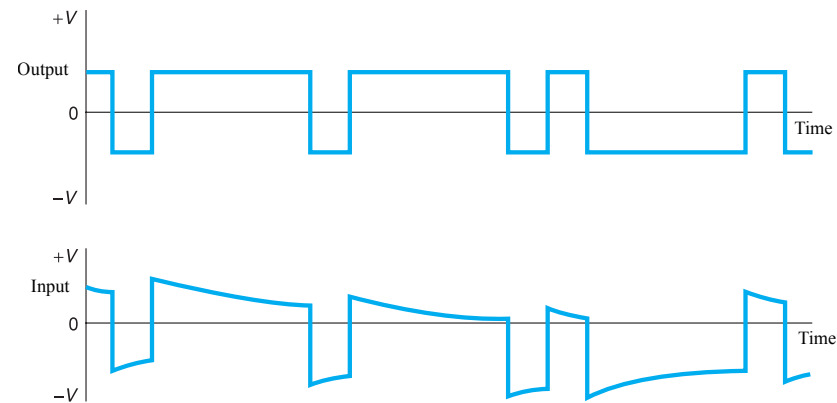
Podemos concluir que la máxima tasa de datos para un ancho de banda:

$$N_{\text{máx}} = (1/c) \cdot B \cdot r$$

# Aspectos de la transmisión digital (I)

## Derivación del valor referencia:

- Al decodificar la señal digital, el receptor calcula la media de la potencia de la señal recibida (referencia).
- La potencia de la señal recibida se evalúa en función del valor de referencia para determinar el valor del elemento de datos.
- Cadenas largas de 0s ó 1s provoca derivación del valor de referencia y dificulta al receptor la decodificación correcta.
- Los esquema de codificación evitan la derivación del valor de referencia.

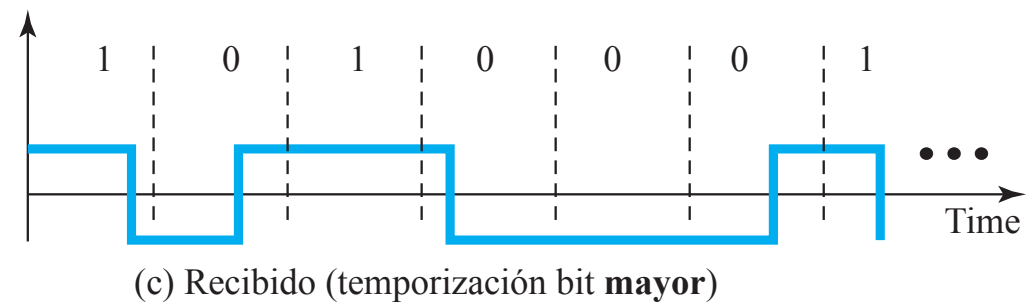
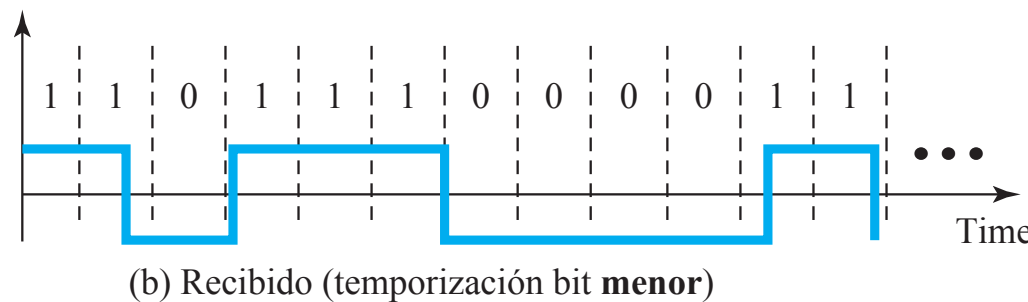
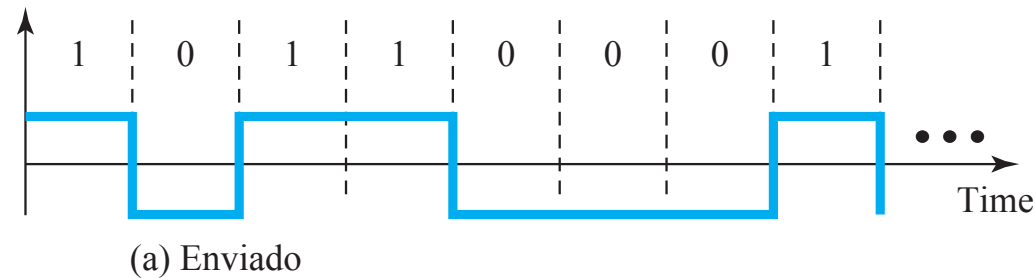


## Componente DC:

- Un nivel de voltaje constante durante un periodo de tiempo produce frecuencias muy bajas o cercanas a cero, denominadas componentes DC (*direct-current*).
- Los sistemas de transmisión eliminan la componente continua.

# Aspectos de la transmisión digital (II)

**Autosincronización:** en comunicación asíncrona, donde no hay sincronismo entre estaciones, es necesario incorporar información de tiempo en la señal digital.



El emisor envía 10110001, pero el receptor:

- Si la duración de bit es **menor**, receptor recibe/interpreta 110111000011.
- Si la duración de bit es **mayor**, receptor recibe/interpreta 1010001.

# Aspectos de la transmisión digital (III)

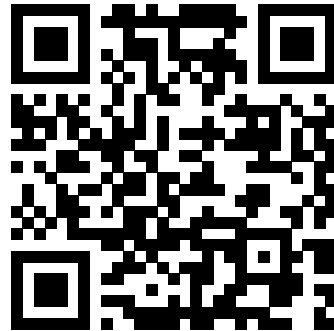
**Ancho de banda:** evidentemente, el objetivo es maximizar el ancho de banda.

**Detección de errores:** es deseable tener la capacidad para incluir la detección de errores en el código generado para detectar algunos o todos los errores de transmisión. Algunos disponen de esta capacidad.

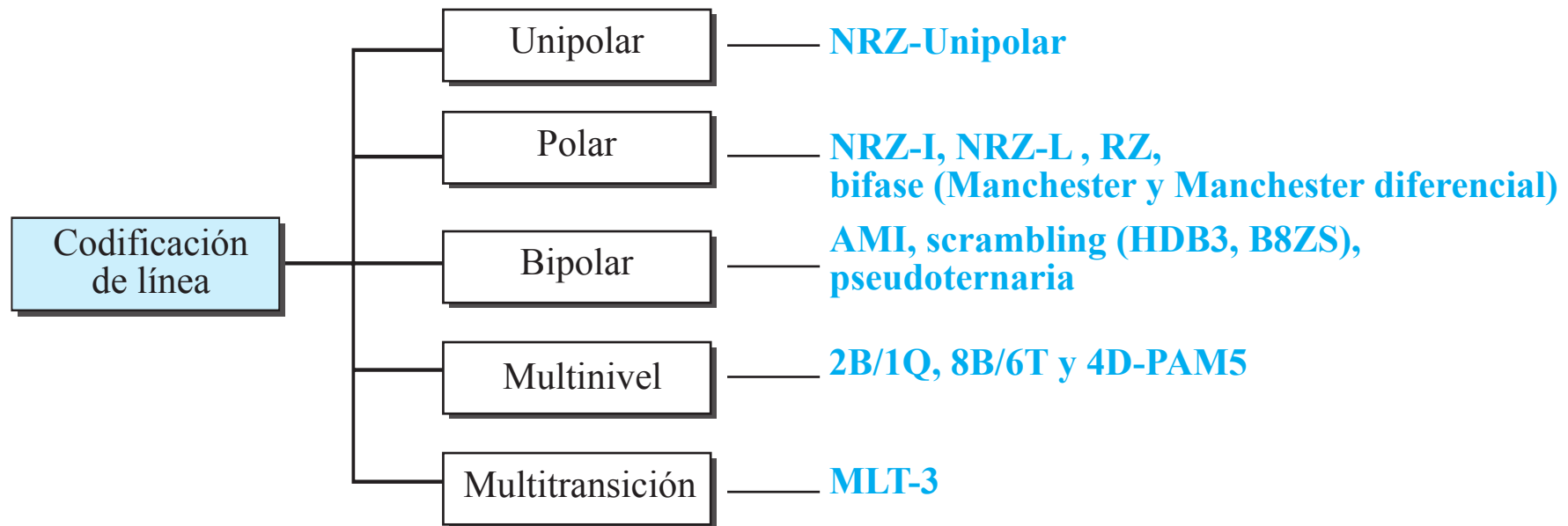
**Inmunidad frente a ruido e interferencias:** también es deseable esta característica.

**Complejidad:** un esquema complejo es más costoso de implementar que uno más sencillo. Por ejemplo, un sistema que utiliza cuatro niveles de señal es más difícil de interpretar de uno que sólo utiliza dos.

# Codificación digital



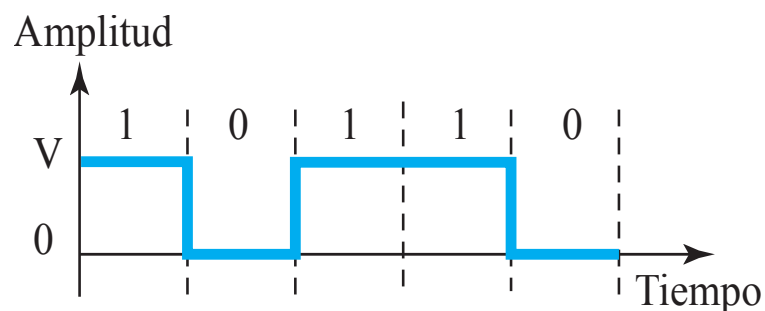
# Esquemas de codificación en línea



# Esquema unipolar

Codificación **unipolar**: todos los niveles de señal están en uno de los dos lados del eje de tiempo, arriba o abajo.

## **(Non-Return-to-Zero) unipolar**



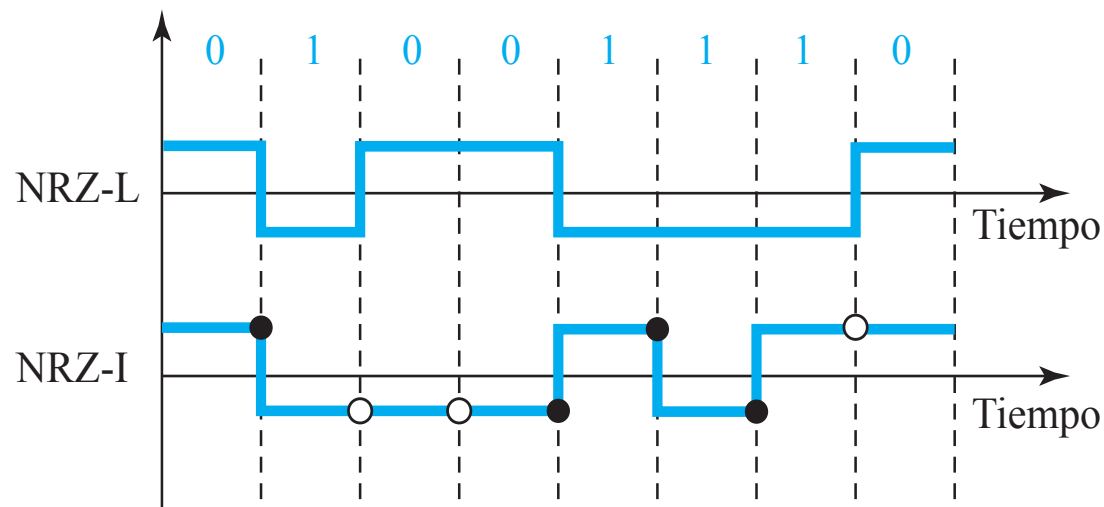
Se denomina NRZ porque la señal no retorna a 0 a mitad del intervalo de bit.

El esquema de de codificación unipolar NRZ actualmente está obsoleto en comunicación de datos.

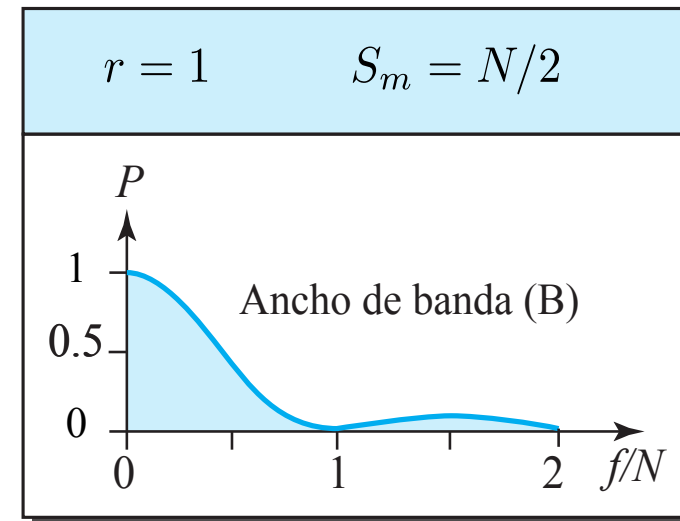
# NRZ (Non-Return-to-Zero) polar

Codificación **polar**: los voltajes de la señal están a ambos lados del eje del tiempo.

## Polar NRZ (*Non-Return-to-Zero*)



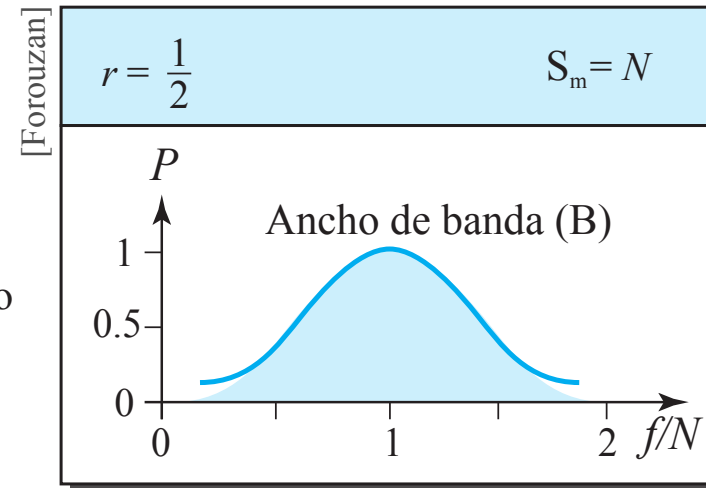
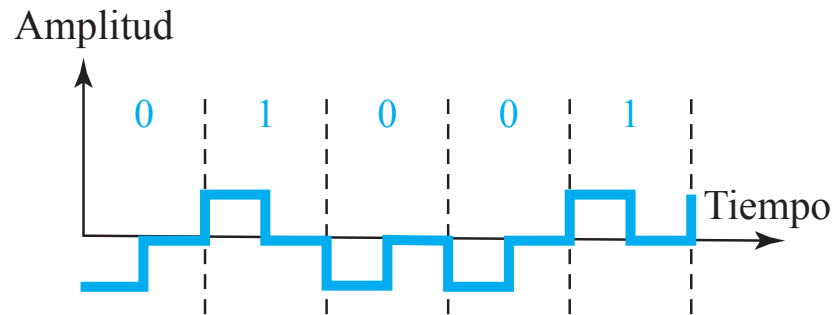
○ No inversión: siguiente bit es 0    ● Inversión: siguiente bit es 1



[Forouzan]

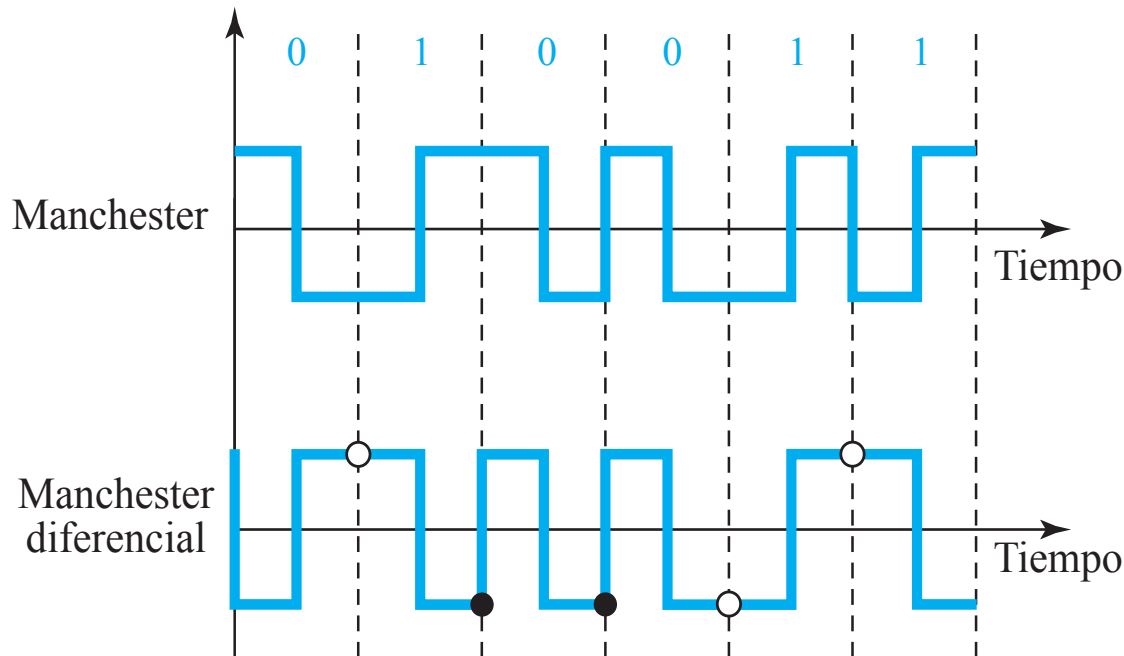
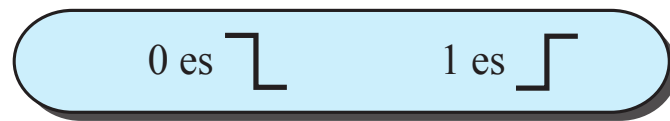
- No autosincronizado.
- Variaciones del valor de referencia en ambos esquemas.
- Problemas de sincronización (y de potencia de señal) con largas cadenas de 0s y 1s en NRZ-L, y en en NRZ-I con las cadenas de 0s.
- Componente DC: alta potencia en el entorno de la componente de frecuencia 0.

# Return-to-Zero (RZ)

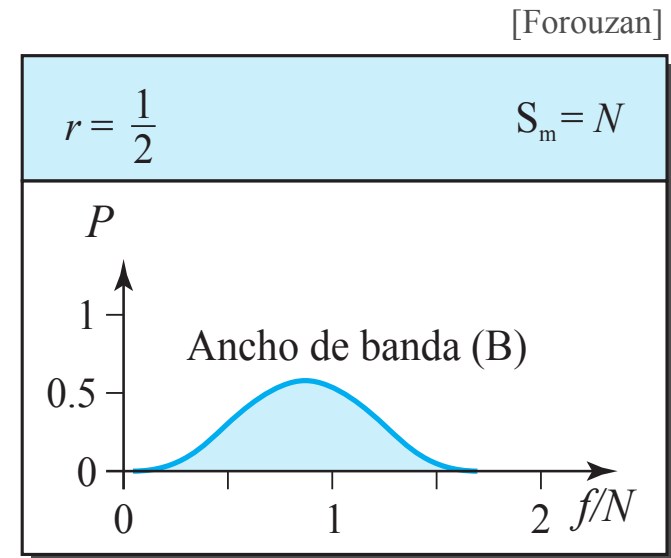


- Autosincronizado: transición a mitad del intervalo utilizada para sincronización.
- Ausencia de componente DC.
- La mayor desventaja es que necesita dos cambios de señal para cada bit, por lo que ocupa un gran ancho de banda.
- Actualmente en desuso, ha sido sustituido por las codificaciones Manchester.

# Esquemas bifase

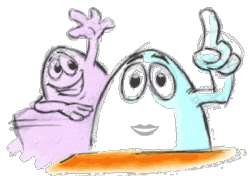
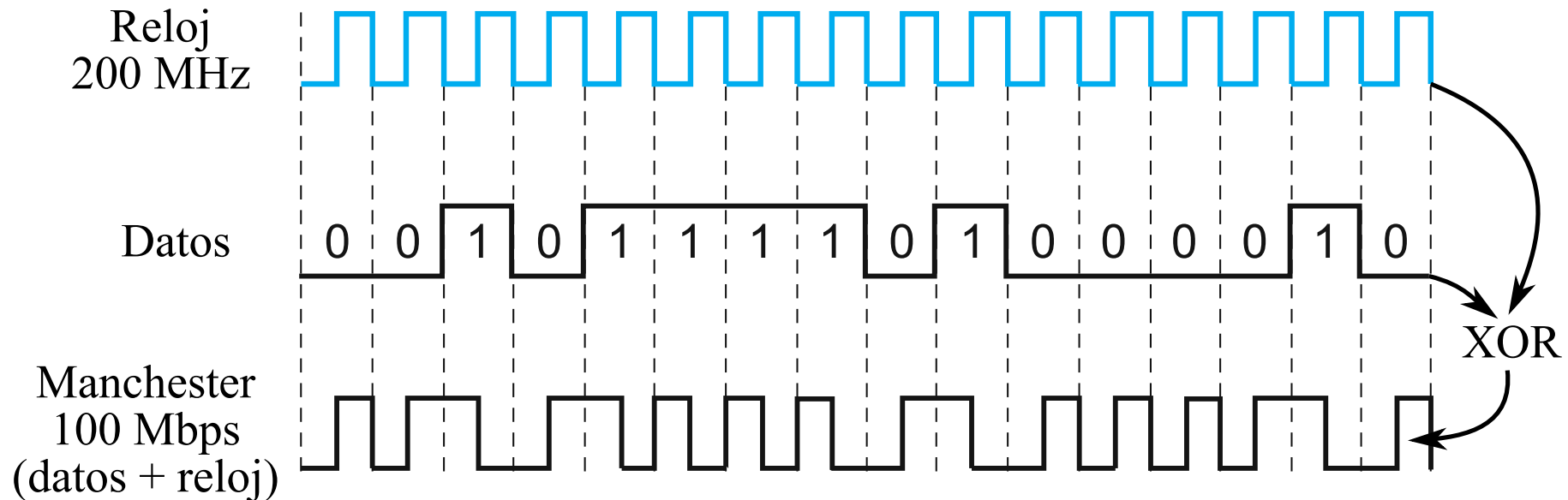


○ No inversión: siguiente bit es 1 ● Inversión: siguiente bit es 0



- Manchester resuelve los problemas de NRZ-L, y Manchester diferencial los de NRZ-I.
- No hay variaciones del valor de referencia.
- Autosincronizado: las transiciones a mitad del intervalo son utilizadas para sincronización.
- Ausencia de componente DC.
- El ancho de banda mínimo es 2 veces el de NRZ.
- Utilizado en codificación de Ethernet.

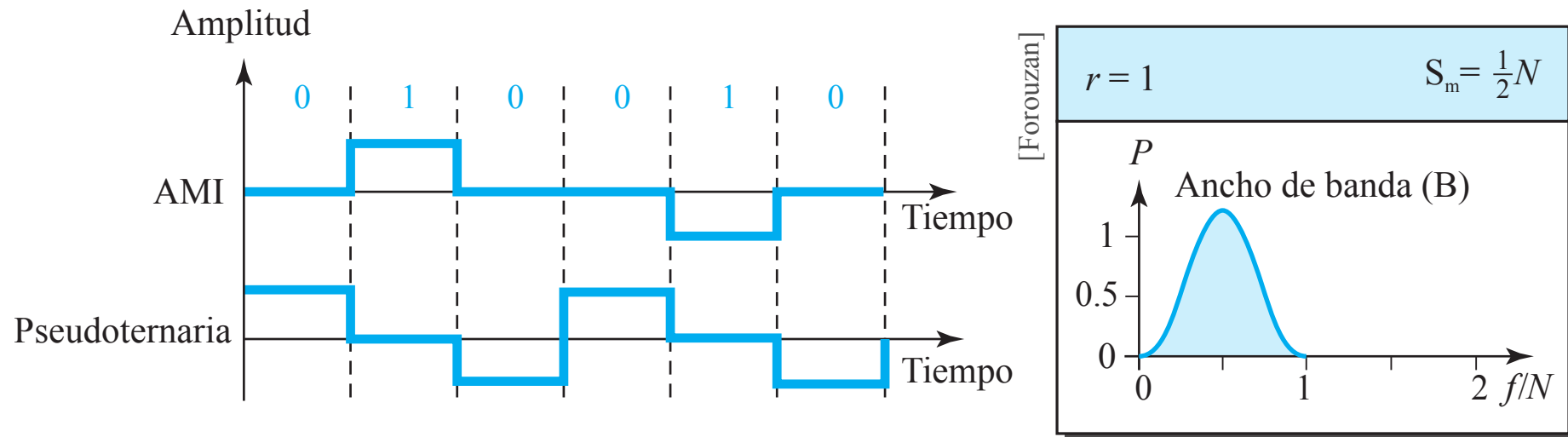
# Autosincronismo



Manchester tiene capacidad de autosincronización: los pulsos a mitad del intervalo sirven para autosincronismo (recuperación de reloj).

# Esquemas bipolares

Codificación **bipolar**: hay tres niveles de voltaje: cero, positivo y negativo.

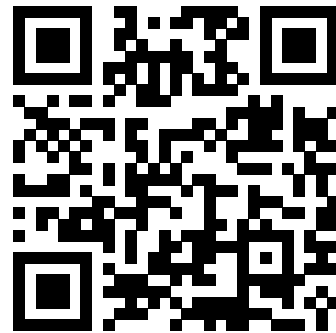


En **inversión de marca alternada** (*alternate mark inversion, AMI*), un voltaje 0 representa el bit 0, y los 1s son representados mediante voltajes positivos y negativos, alternativamente.

La variación de AMI, denominada **pseudoternaria**, el bit 1 es codificado con voltaje cero y los bits 0s son codificados con voltajes positivos y negativos, alternativamente.

- Misma tasa de señal que NRZ pero no tiene componente DC (una secuencia que crea un voltaje cero constante no tiene DC).
- Utilizado en comunicación a larga distancia.
- Problemas de sincronización en cadenas largas de 0s.

# Codificación multinivel



# Esquemas multinivel (mBnL)

El objetivo es incrementar el número de bits por baudio codificando un patrón de  $m$  elementos datos en un patrón de  $n$  elementos señal.

- Como sólo hay dos tipos de elementos dato (0s y 1s), significa que  $m$  elementos dato puede generar una combinación de  $2^m$  patrones de datos distintos.
- Con  $L$  niveles y  $n$  elementos señal se pueden generar  $L^n$  patrones de señal distintos.

Entonces:

- Si  $2^m = L^n \rightarrow$  cada patrón de datos se codifica con un patrón de señal.
- Si  $2^m < L^n \rightarrow$  sobran patrones de señal, que se pueden utilizar para prevención de variación de referencia, sincronización, detección de errores, etc.
- Si  $2^m > L^n \rightarrow$  la codificación de datos no es posible ya que algunos patrones de datos no se podrán codificar.

$mBnL$ :  $\left\{ \begin{array}{l} m, \text{ longitud del patrón binario,} \\ B, \text{ dato binario,} \\ n, \text{ longitud del patrón señal, y} \\ L, \text{ número de niveles de la señal.} \end{array} \right.$

Habitualmente se utilizan letras:

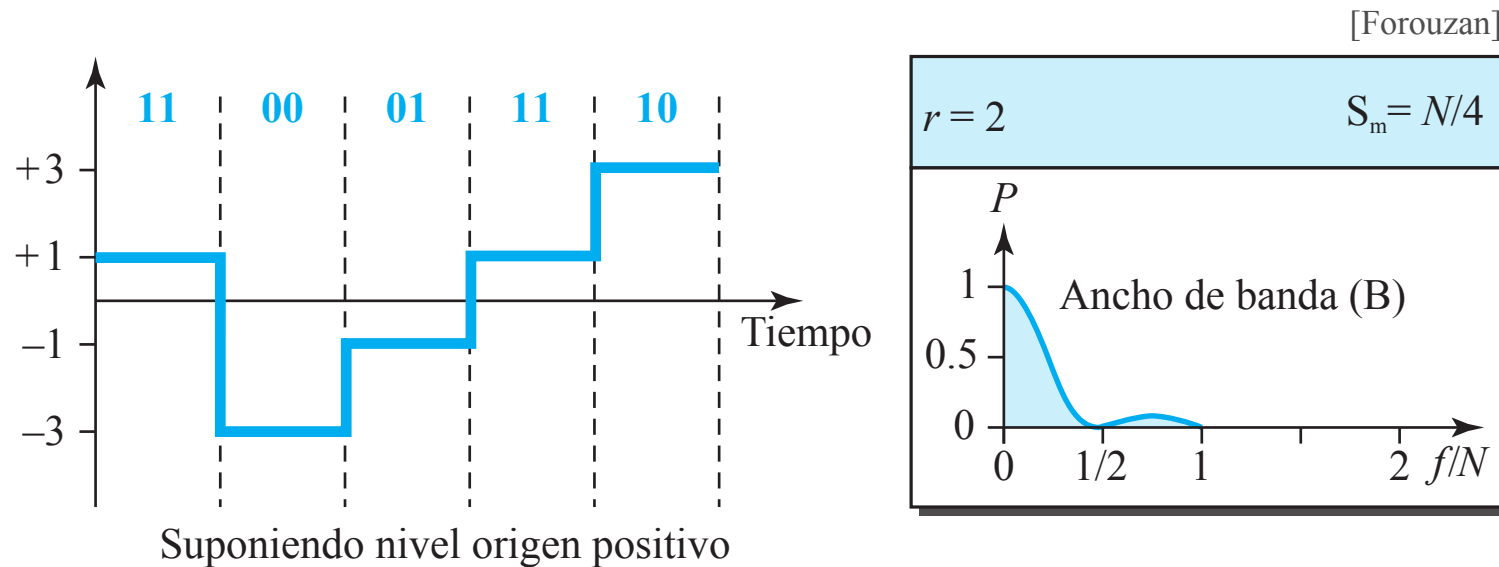
$L = 2 \rightarrow B$  (*Binary*)

$L = 3 \rightarrow T$  (*Ternary*)

$L = 4 \rightarrow Q$  (*Quaternary*)

# Código 2B1Q

Reglas: 00  $\rightarrow$  -3   01  $\rightarrow$  -1   10  $\rightarrow$  +3   11  $\rightarrow$  +1



En la codificación **2B1Q**, tenemos que  $m = 2$ ,  $n = 1$  y  $L = 4 \rightarrow Q$ .

Una tasa de señal media  $S_m = N/4$ , lo que implica que con 2B1Q la tasa de transmisión de datos es 2 veces superior a NRZ-L.

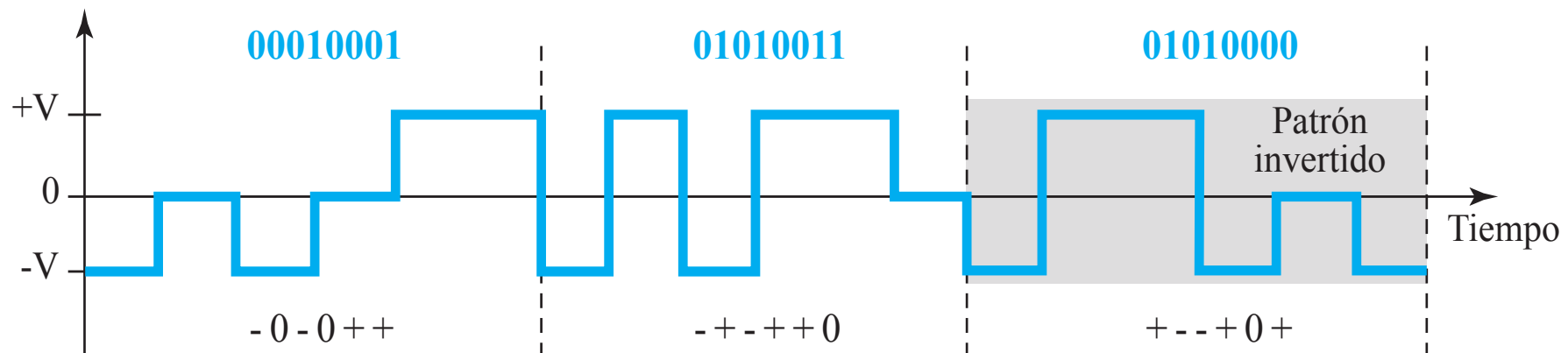
Utiliza 4 niveles de señal, incrementando la complejidad en la recepción.

No hay patrones de señal redundantes porque:

$$2^m = L^n \rightarrow 2^2 = 4^1$$

2B1Q se utiliza en tecnologías DSL (*Digital Subscriber Line*) para conexiones a alta velocidad utilizando líneas telefónicas de abonado.

# Código 8B6T



El código ocho binario, seis ternario, **8B6T**, se utiliza en cable 100Base-4T.

La idea es codificar un patrón de 8 bits (B) de datos ( $m = 8$ ), como un patrón de seis elementos de señal ( $n = 6$ ), donde la señal tiene tres niveles ( $L = 3 \rightarrow T$ ).

- Patrones de datos  $\rightarrow 2^m = 2^8 = 256$ .
- Patrones de señal  $\rightarrow L^n = 3^6 = 729$ .
- Por lo tanto, patrones redundantes  $\rightarrow L^n - 2^m = 729 - 256 = 473$  para sincronización y detección de errores.

Parte de la redundancia también se utiliza para proporcionar balanceo de DC.

$r = 8/6 \rightarrow$  la tasa media de señal es  $S_m = \frac{1}{2}N\frac{6}{8}$ .

En la práctica, el ancho de banda mínimo está cercano a  $B = 6N/8$ .

# Código 8B6T

Data	Code	Data	Code	Data	Code	Data	Code
00	--+0-+	20	---+00	40	-00+0+	60	0++0-0
01	0-++-+	21	+00+--	41	0-00++	61	+0+-00
02	0-+0-+	22	--+0-+	42	0-0+0+	62	+0+0-0
03	0-+0-0	23	+0-0-+	43	0-0+0+	63	+0+00-
04	--+0+0	24	+0-0+0	44	-00+0+	64	0++00-
05	+0--+0	25	--+0+0	45	00-0+0	65	++0-00
06	+0-0-+	26	+00-00	46	00-+0+	66	++00-0
07	+0+0-0	27	---+--	47	00-++0	67	++000-
08	--+0+0	28	0++-0-	48	00+000	68	0++-+-
09	0-++-0	29	+0+0--	49	++-000	69	+0++--
0A	0-+0+-	2A	+0+-0-	4A	+--+000	6A	+0+-+-
0B	0-+-0+	2B	+0+--0	4B	---+000	6B	+0+--+
0C	--+0-0	2C	0++--0	4C	0+-000	6C	0++--+
0D	+0+-0-	2D	++00--	4D	+0-000	6D	++0+--
0E	+0-0+-	2E	++0-0-	4E	0-+000	6E	++0+--
0F	+0--0+	2F	++0---0	4F	-0+000	6F	++0+--
10	0--+0+	30	+00-0+	50	+++0+0	70	000+--
11	-0-0+0	31	0+--0+	51	--+0+0	71	000+--
12	-0-+0+	32	0+-0-+	52	---+0+	72	000-++
13	-0-++0	33	0+-0-0	53	---+0+	73	000+00
14	0--++0	34	+0-0+0	54	+++0+0	74	000+0-
15	--00++	35	-0+0+0	55	--+0++	75	000+0-
16	--0+0+	36	-0+0-+	56	---+0+	76	000-0+
17	--0+0+	37	-0+0-0	57	---+0+	77	000-0+
18	--0+0+	38	+00+0-	58	---+0+	78	+++0-0

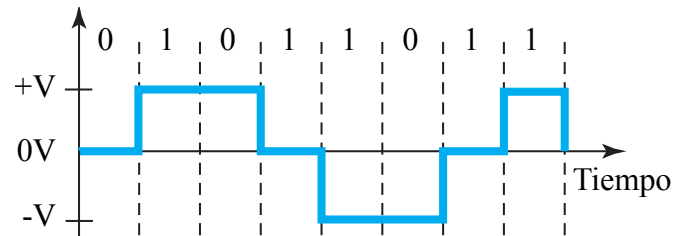
[Forouzan]

Data	Code	Data	Code	Data	Code	Data	Code
19	+0-0-+	39	0+--0-	59	-0-+++	79	+++0-
1A	---+0+	3A	0+0-0-	5A	0---+++	7A	+++0--
1B	+00-0+	3B	0+--0+	5B	0--0++	7B	0+0--
1C	+00+0-	3C	+0-0+0	5C	+--0++	7C	-00-++
1D	---+0-	3D	-0+0-0	5D	-000++	7D	-00+00
1E	+0-0-0	3E	-0+0+-	5E	0+++--	7E	+++0--
1F	-0+0-0	3F	-0+0+0	5F	0++-00	7F	+++000
80	-00+0+	A0	---+0-	C0	-0+0-+	E0	---+0-
81	0-0-++	A1	+--+00	C1	0-++0+	E1	---+0+
82	0-0-++	A2	+--+0-	C2	0-++0+	E2	---+0+
83	0-0-++	A3	+--+0-	C3	0-++0+	E3	---+0-
84	-00+0+	A4	---+0-	C4	-0+0-+	E4	---+0-
85	00-++0	A5	+++00-	C5	+0-++0	E5	+++000
86	00-++0	A6	+++0-0	C6	+0-++0	E6	+++0-0
87	00-++0	A7	+++00-	C7	+0-++0	E7	+++0-0
88	-000+0	A8	---+0-	C8	-0+0+0	E8	---+0-
89	0-0+00	A9	+--+0-	C9	0-++00	E9	---+0-
8A	0-0+00	AA	+--+0-	CA	0-++00	EA	---+0-
8B	0-000+	AB	+--+0-	CB	0-++00	EB	---+0+
8C	-0000+	AC	---+0-	CC	-0+00+	EC	---+0+
8D	00-+00	AD	+++0--	CD	+0-+00	ED	+++0-0
8E	00-0+0	AE	+++0--	CE	+0-0+0	EE	+++0-0
8F	00-00+	AF	+++0--	CF	+0-00+	EF	+++0-0
90	+0-++0	B0	+000-0	D0	+0-+0+	F0	+000-+
91	+0-++0	B1	0+00-0	D1	0+--0+	F1	0+0-0+
92	+0-++0	B2	0+00-0	D2	0+--0+	F2	0+00-+
93	+0-++0	B3	0+000-	D3	0+--0+	F3	0+0+0-
94	+0-++0	B4	-0000-	D4	+0-+0-	F4	+00+0-
95	--+0-+	B5	00+0-0	D5	-0+0-+	F5	00+0-0
96	--+0-+	B6	00+0-0	D6	-0+0-+	F6	00+0-+
97	--+0-+	B7	00+00-	D7	-0+0-+	F7	00+0-0
98	+0-++0	B8	+00-+-	D8	+0-0+0	F8	+000+-
99	+0-++0	B9	0+0-+-	D9	0+--00	F9	0+0+0-
9A	+0-++0	BA	0+0-+-	DA	0+--00	FA	0+00+-
9B	+0-++0	BB	0+0-+-	DB	0+--00	FB	0+0-0+
9C	+0-++0	BC	+00-+-	DC	+0-00+	FC	+00-0+
9D	---+00	BD	00+0-0	DD	-0+0+0	FD	00+0-0
9E	---+00	BE	00+0-0	DE	-0+0+0	FE	00+0+-
9F	---+00	BF	00+0-0	DF	-0+0+0	FF	00+0-0

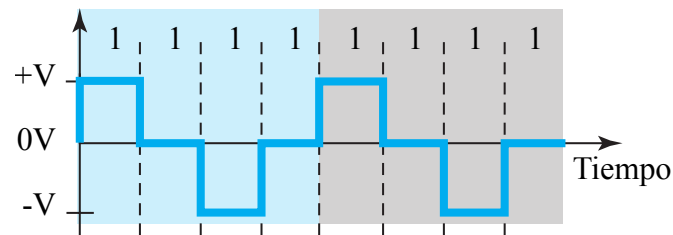
[Forouzan]

# Multitransición: MLT-3

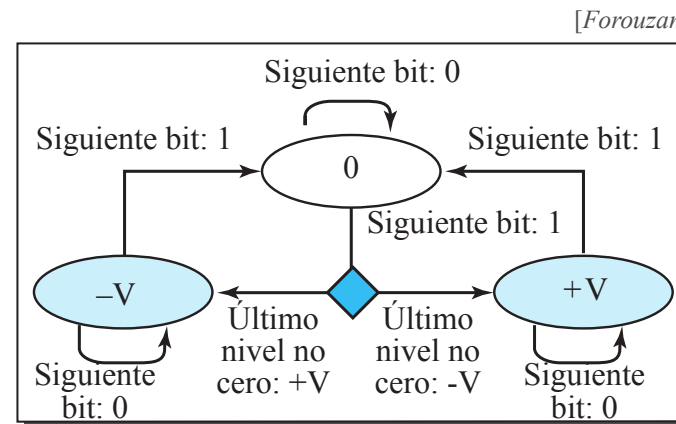
MLT-3, utiliza tres niveles (+V, 0 y -V) y tres reglas de transición:



(a) Caso típico



(b) Caso peor



(c) Reglas de transición de estados

¿Por qué utilizar MLT-3, con una relación de un bit por elemento de señal ( $r = 1$ ), si la tasa de señal es la misma que NRZ-I, pero con una complejidad mayor?

Porque reduce el ancho de banda necesario.

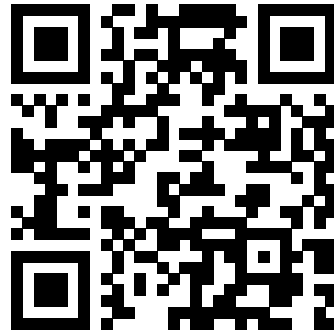
En el peor escenario, el patrón +V 0 -V 0 se repite cada 4 bits. Una señal no periódica ha cambiado a una señal periódica de 4 veces la duración de bit, que se puede simular con una señal analógica con una frecuencia  $N/4$ , es decir,  $S_m = N/4$ .

Por lo que es apropiado para enviar 100 Mbps por cable de cobre que no soporta más de 32 MHz (Ethernet 100 Mbps).

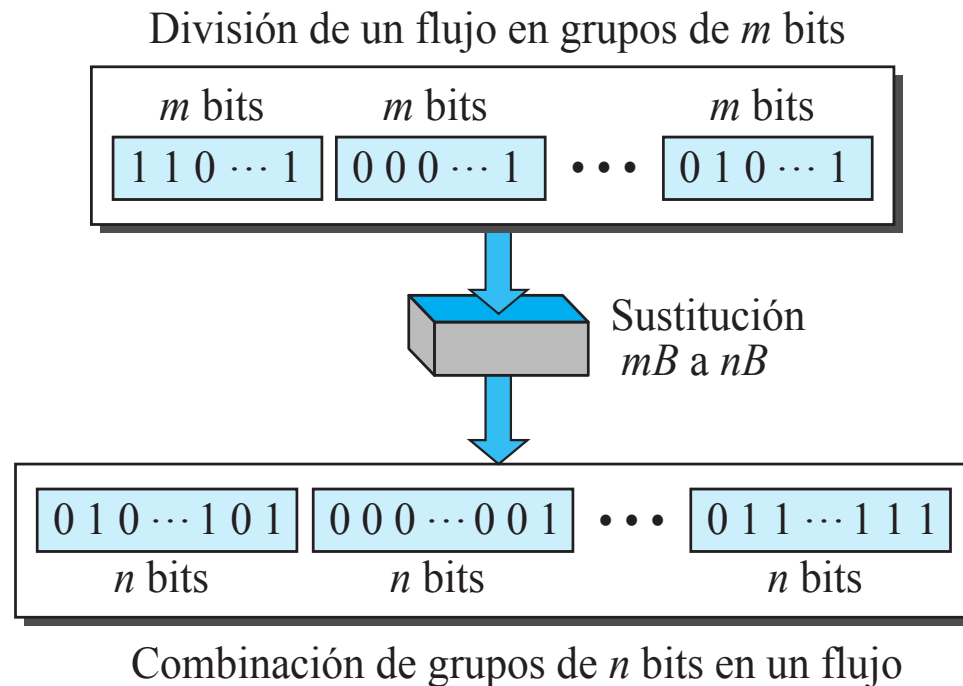
# Resumen de esquemas de codificación en línea

Categoría	Esquema	Bandwidth (media)	Características
Unipolar	NRZ	$B = N/2$	Caro, no auto-sincronización para largas cadenas 0s o 1s, DC
Polar	NRZ-L	$B = N/2$	No auto-sincronización para largas 0s ó 1s, DC
	NRZ-I	$B = N/2$	No auto-sincronización para largas 0s ó 1s, DC
	Bifase	$B = N$	Auto-sincronización, no DC, alto BW
Bipolar	AMI	$B = N/2$	No auto-sincronización para largas 0s, DC
Multilevel	2B1Q	$B = N/4$	No auto-sincronización largas bits dobles igual
	8B6T	$B = 3 N/4$	Auto-sincronización, no DC
	4D-PAM5	$B = N/8$	Auto-sincronización, no DC
Multitransition	MLT-3	$B = N/3$	No auto-sincronización para largas 0s

# Codificación de bloques



# Codificación de bloques



Se necesita redundancia para asegurar sincronización y proporcionar algún tipo de detección de error.

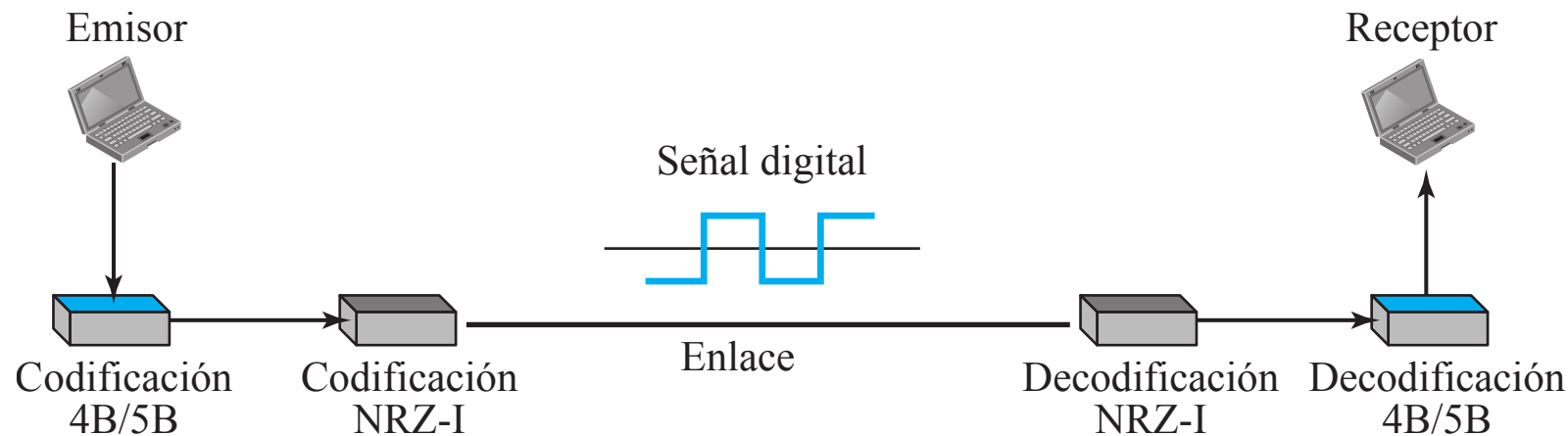
La codificación de bloques proporciona redundancia y mejora la codificación en línea.

La **codificación de bloques** definida por  $mB/nB$ , cambia un bloque de  $m$  bits en un bloque de  $n$  bits, donde es  $n > m$ .

La barra inclinada se utiliza para distinguir la codificación en bloques (por ejemplo, 4B/5B), de la codificación multinivel (por ejemplo, 8B6T).

# 4B/5B

El esquema **4B/5B** se diseña para combinarlo junto con NRZ-I, que tiene una tasa de señal buena, pero problemas de sincronización.



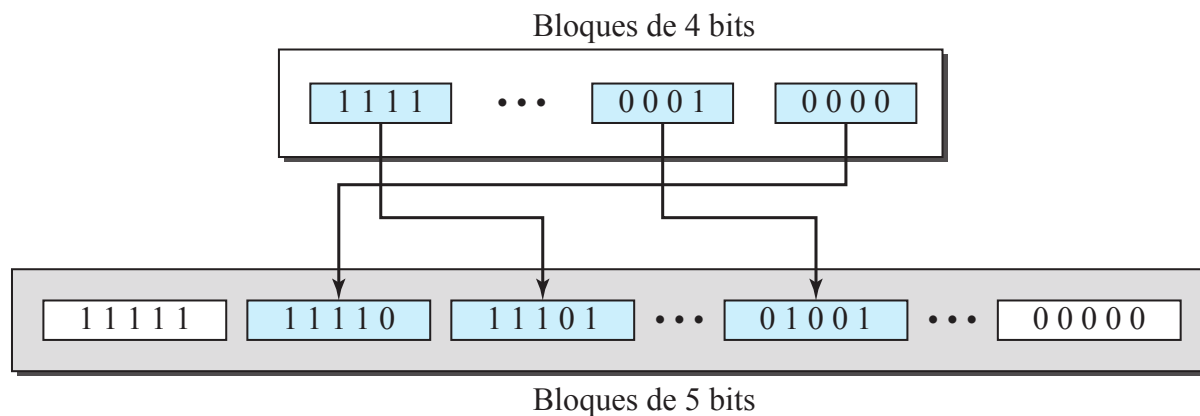
En el emisor, antes de la codificación NRZ-I, se realiza la codificación 4B/5B, con lo que el código de bloque resultante no tiene más de tres 0s consecutivos.

En el receptor, se realiza la decodificación NRZ-I, y posteriormente, 4B/5B.

# 4B/5B: sustitución

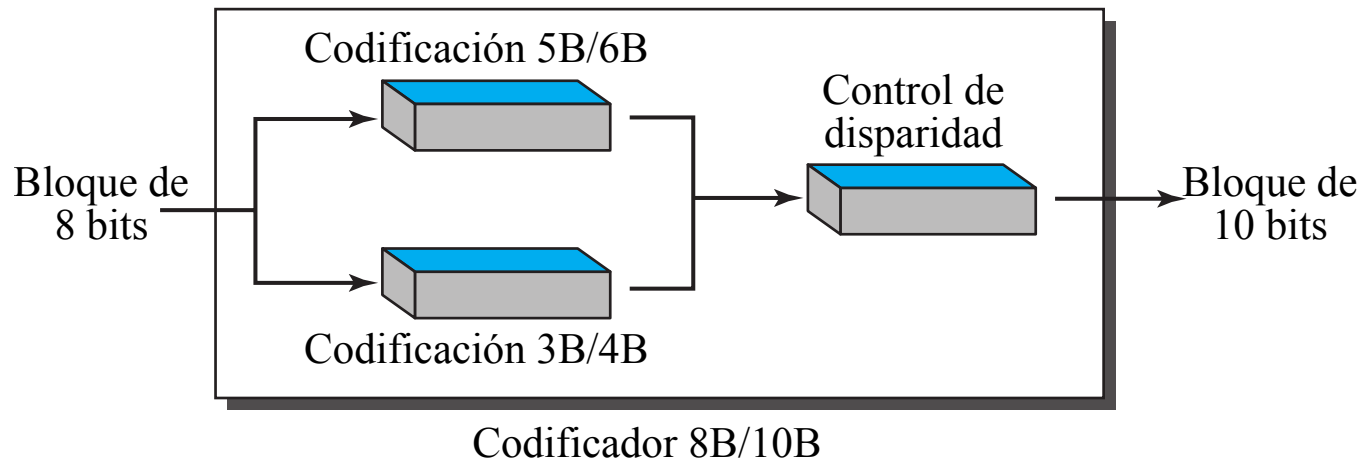
[Forouzan]

Secuencia de datos	Secuencia codificada	Secuencia de control	Secuencia codificada
0000	11110	Q (Quiet)	00000
0001	01001	I (Idle)	11111
0010	10100	H (Halt)	00100
0011	10101	J (Start delimiter)	11000
0100	01010	K (Start delimiter)	10001
0101	01011	T (End delimiter)	01101
0110	01110	S (Set)	11001
0111	01111	R (Reset)	00111
1000	10010		
1001	10011		
1010	10110		
1011	10111		
1100	11010		
1101	11011		
1110	11100		
1111	11101		



Las secuencias de bit no contempladas en la codificación corresponden a secuencias de bits erróneas.

# 8B/10B

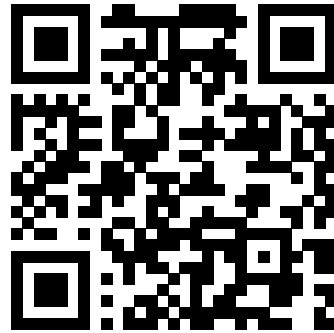


La codificación **8B/10B** codifica grupos de 8 bits de datos en códigos de 10 bits, y es una combinación de 5B/6B y 3B/4B:

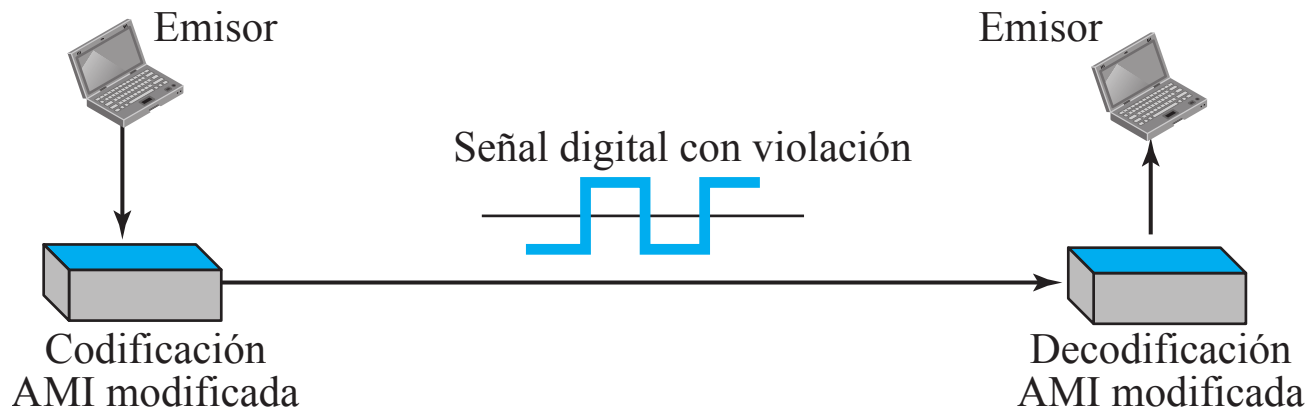
- Los cinco bits más significativos del bloque de 8 bits se envían al codificador 5B/6B.
- El resto de tres bits menos significativos se envían al codificador 3B/4B.
- Para prevenir largas cadenas de 0s ó 1s, utiliza un controlador de disparidad que controla el exceso de 0s y 1s.
- Si la secuencia de bits provoca disparidad, realiza el complemento de los bits, por lo que los 0s cambian a 1s, y viceversa.
- Además, la codificación tiene  $2^{10} - 2^8 = 768$  grupos redundantes que se pueden utilizar para chequeo de disparidad y detección de errores.

Esta técnica es superior a 4B/5B en términos de detección de errores y sincronización.

# Scrambling



# Scrambling



Los esquemas bifase para enlaces entre estaciones en una LAN no son apropiados para comunicación a larga distancia por sus requisitos de ancha de banda.

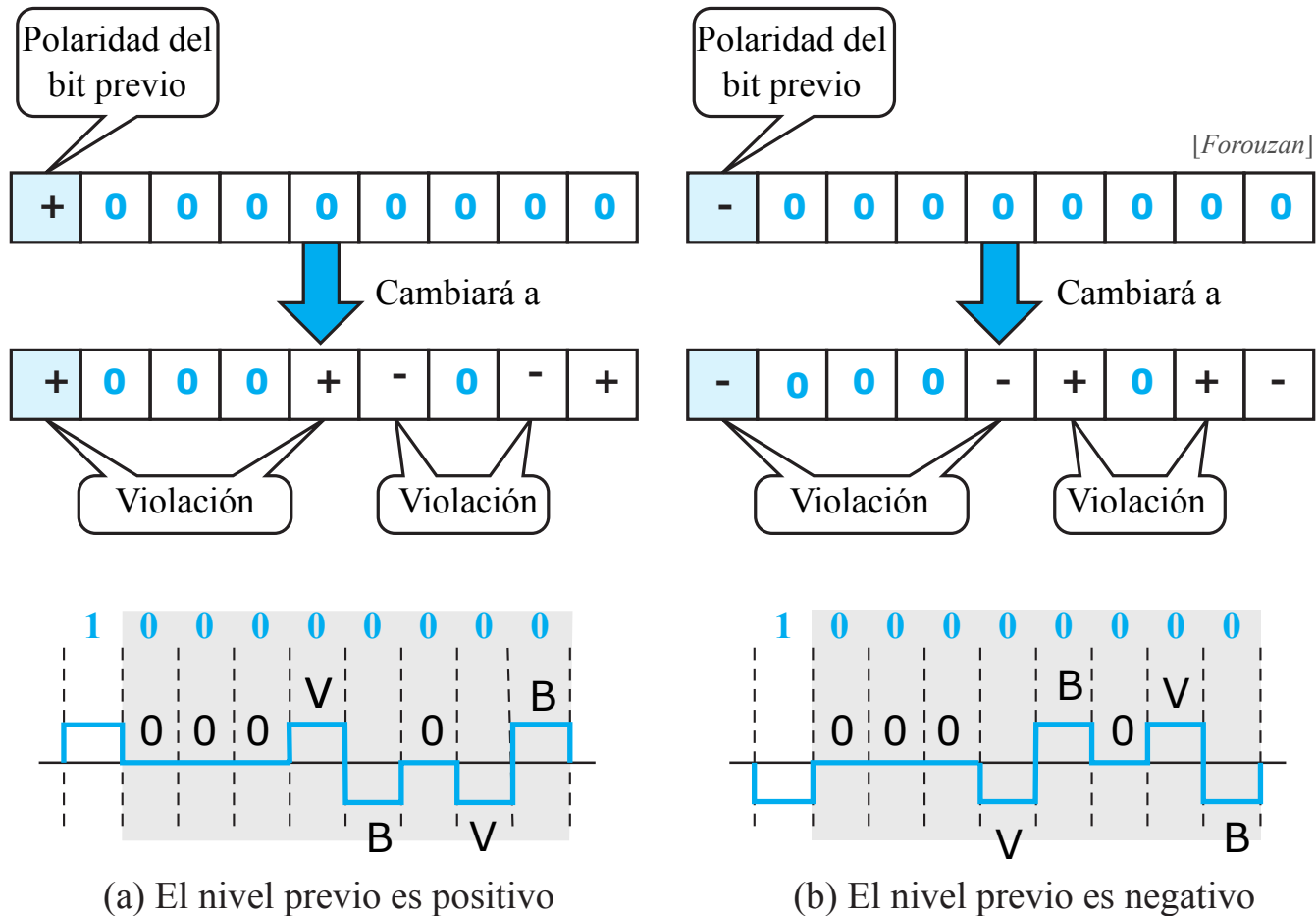
La combinación de codificación en bloque con NRZ no es apropiada tampoco para codificación a larga distancia por la componente DC.

Por otro lado, la codificación bipolar AMI tiene un ancho de banda estrecho y no crea componente DC, pero no resuelve el problema de sincronización con largas cadenas de 0s.

Con las técnicas de **scrambling**, se codifican las cadenas de 0s introduciendo pulsos adicionales (violaciones de código) siguiendo ciertas reglas.

A partir del esquema AMI, se definen: B8ZS y HDB3.

# Codificación B8ZS

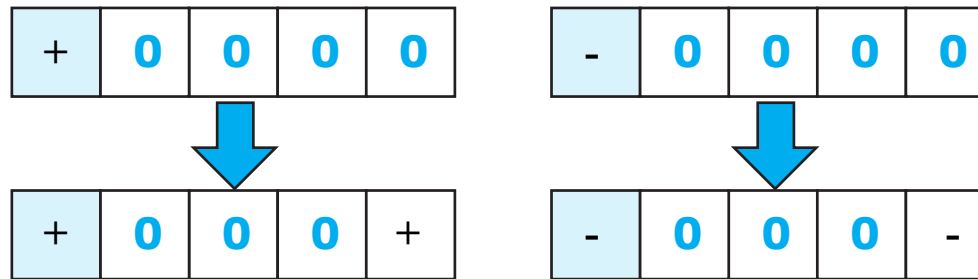


Si consideramos que en AMI, las polaridades (distintas de cero) consecutivas tienen que ser opuestas, entonces:

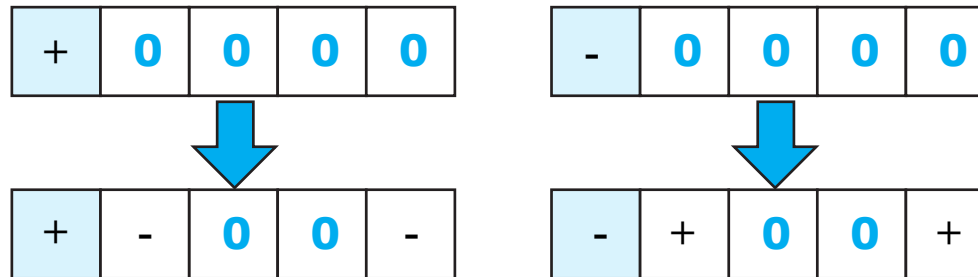
- **(B)ipolar:** el nivel de voltaje está conforme a las reglas AMI.
- **(V)iolación:** el nivel de voltaje viola las reglas AMI (polaridad opuesta de la anterior).

# Codificación HDB3

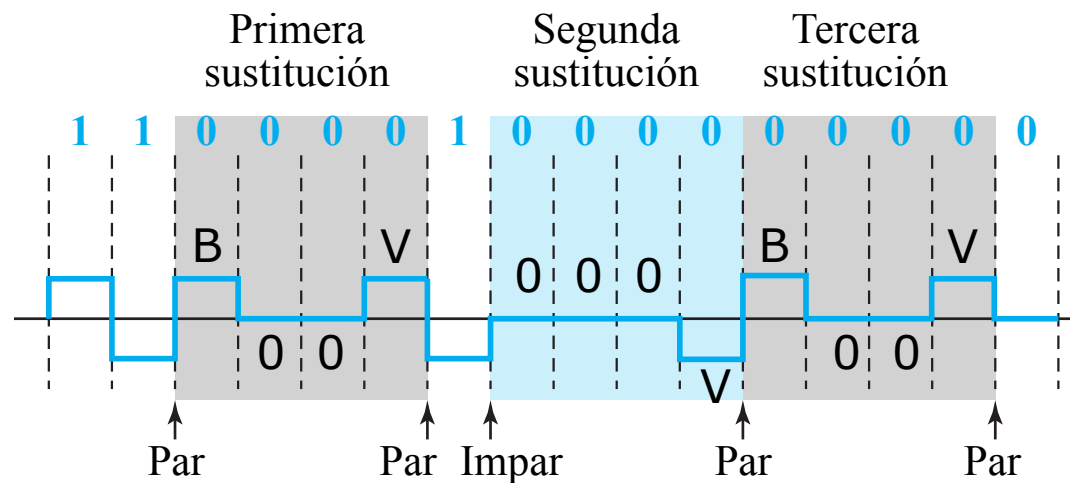
[Forouzan]



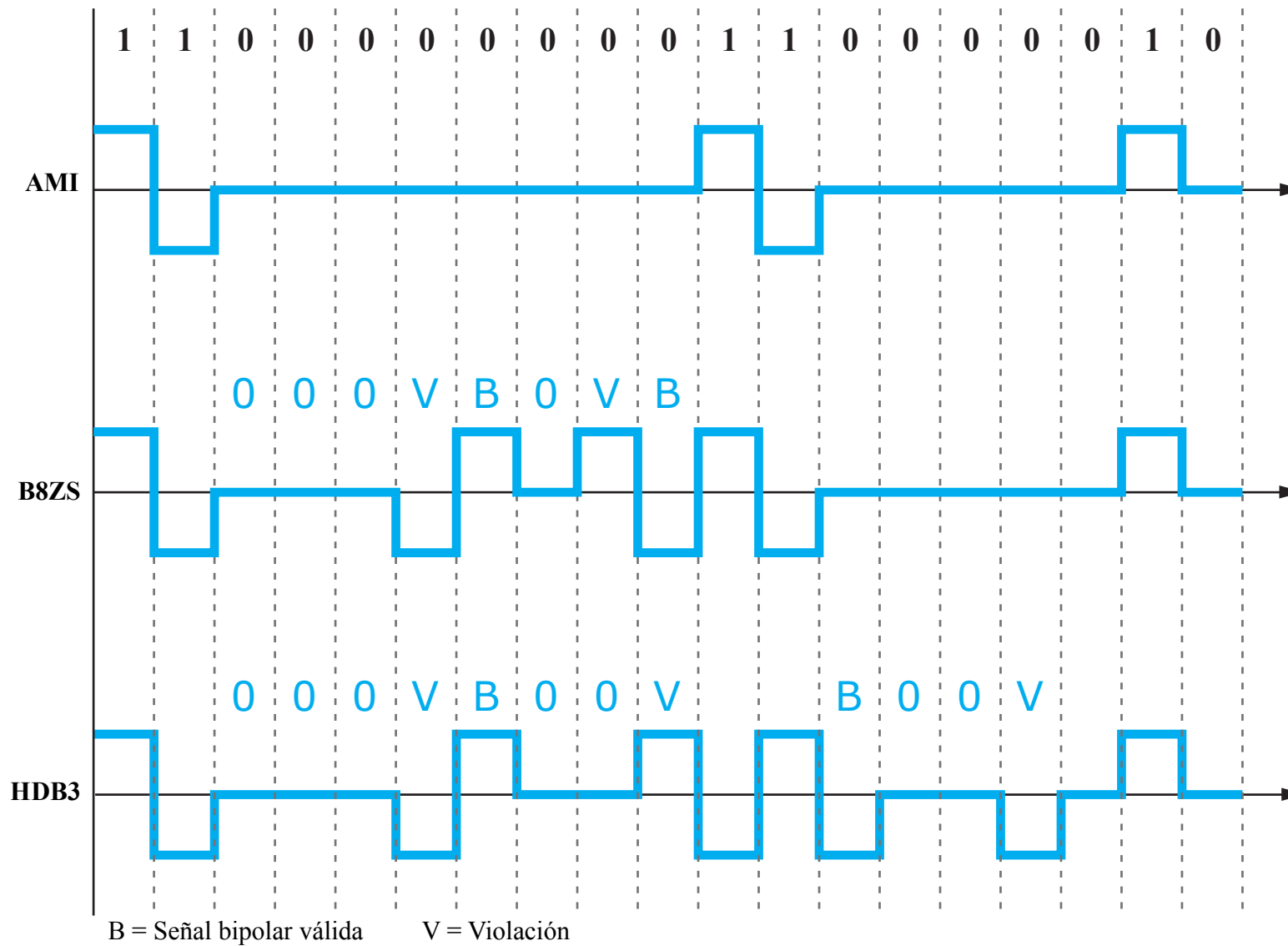
(a) Si el número de 1s desde la última sustitución es IMPAR



(b) Si el número de 1s desde la última sustitución es PAR

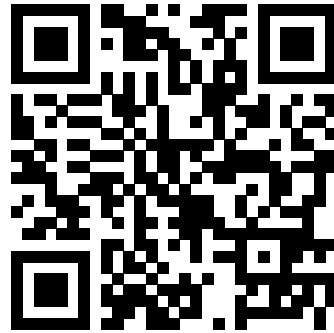


# Codificación con *scrambling*

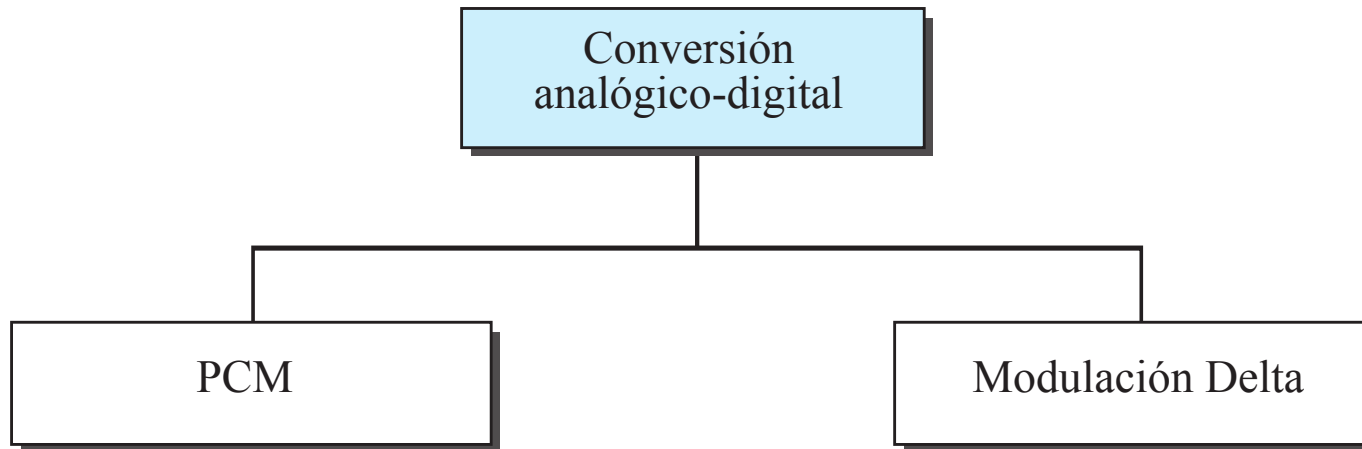


**Nota:** En la codificación de los bits previos, el  $n^o$  de '1s' ha sido *impar*, y la polaridad del bit previo *negativo*.

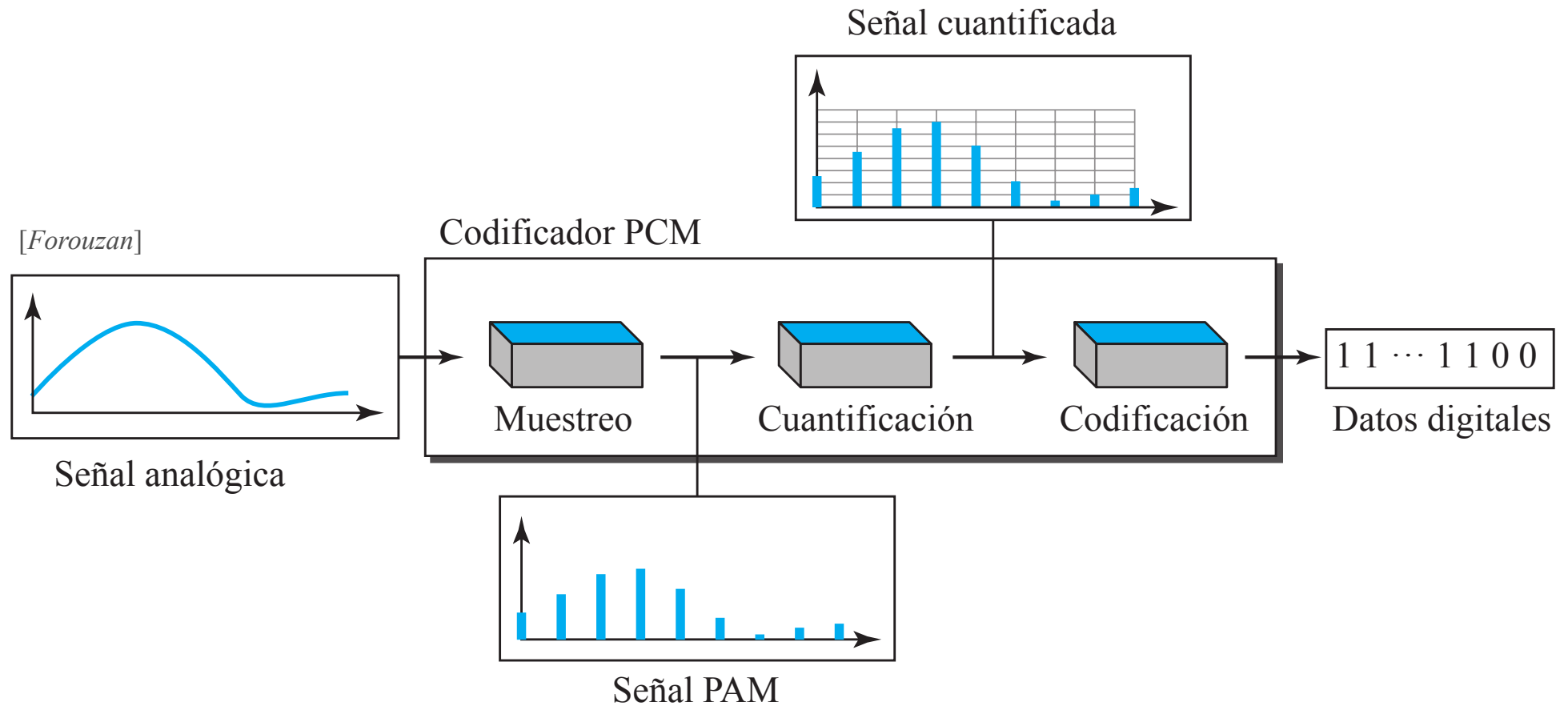
# Conversión analógico-digital



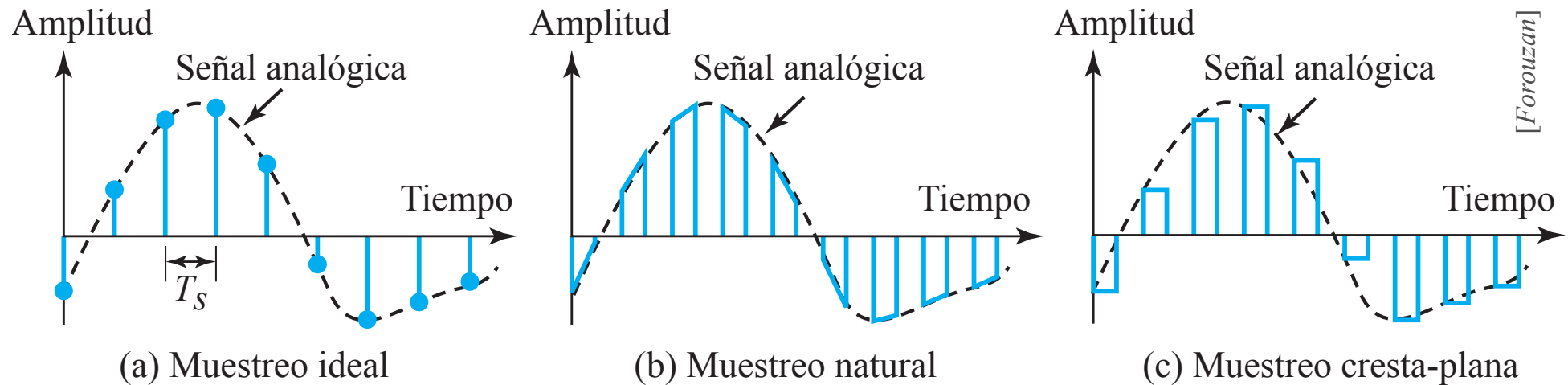
# Conversión analógico-digital



# Modulación por codificación de pulsos (PCM)



# PCM: muestreo (Paso 1)



La señal analógica se muestrea cada  $T_s$ , donde  $T_s$  es el intervalo (o periodo) de muestreo. La inversa del intervalo de muestreo se denomina tasa de muestreo o **frecuencia de muestreo** ( $f_s$ ):

$$f_s = \frac{1}{T_s}$$

Tipos de muestreo:

- **Ideal:** difícil de implementar.
- **Natural:**
- **Cresta-plana:** el más común.

El proceso de muestreo se conoce también como PAM (*Pulse Amplitude Modulation*).

Una consideración importante es la tasa de muestreo o frecuencia  $f_s$ .

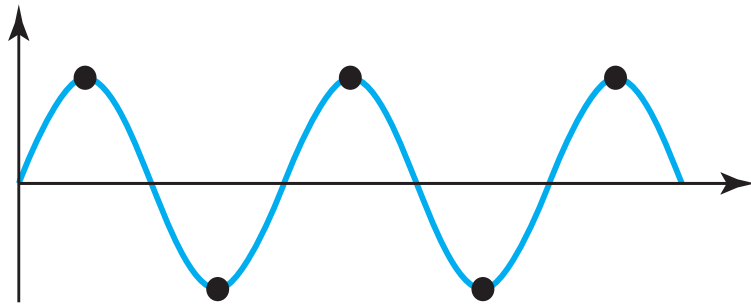
¿Cuáles son las restricciones sobre  $T_s$ ?

**Teorema de Nyquist:**

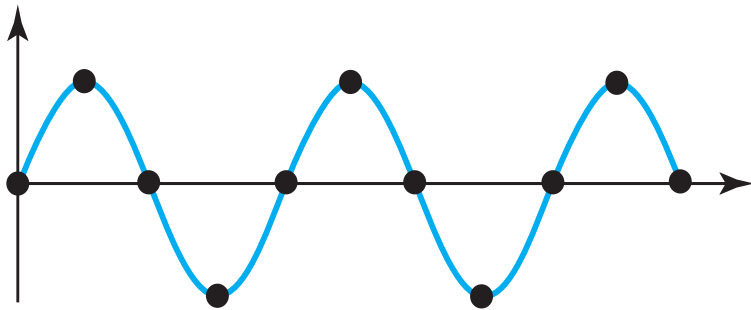
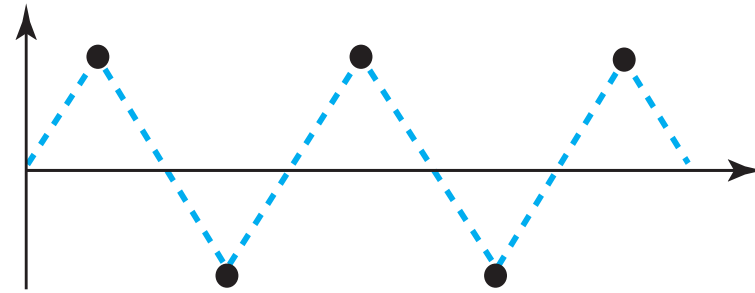
*Si una señal,  $s(t)$ , se muestrea a intervalos regulares de tiempo, con una frecuencia (**Frecuencia de Nyquist**,  $f_s$ ) mayor del doble de la frecuencia significativa más alta ( $f_{\text{máx}}$ ) de  $s(t)$ , entonces las muestras obtenidas contienen toda la información de la señal original.*

$$f_s \geq 2f_{\text{máx}} \rightarrow T_s \leq \frac{1}{2f_{\text{máx}}}$$

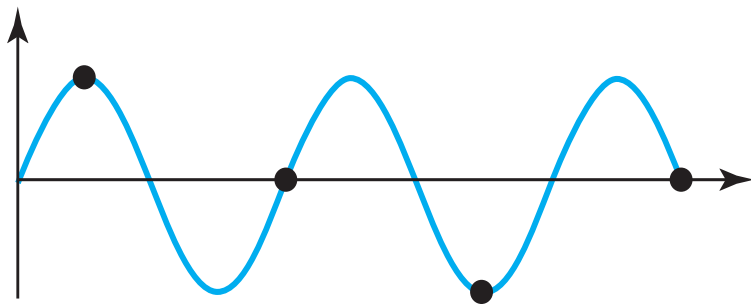
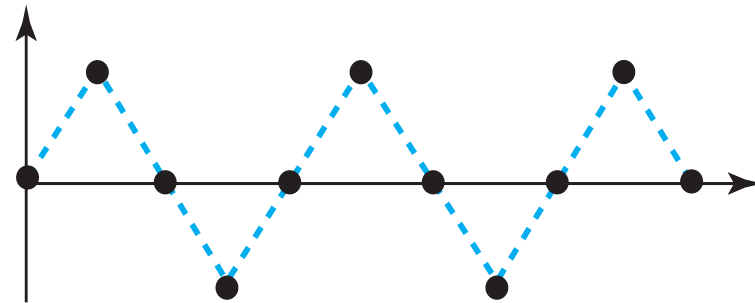
# Frecuencia de Nyquist: ejemplo (I)



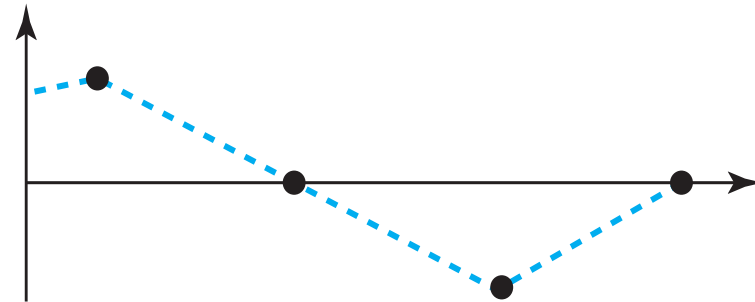
(a) Muestreo a tasa de Nyquist  $f_s=2f$



(b) Sobremuestreo:  $f_s=4f$

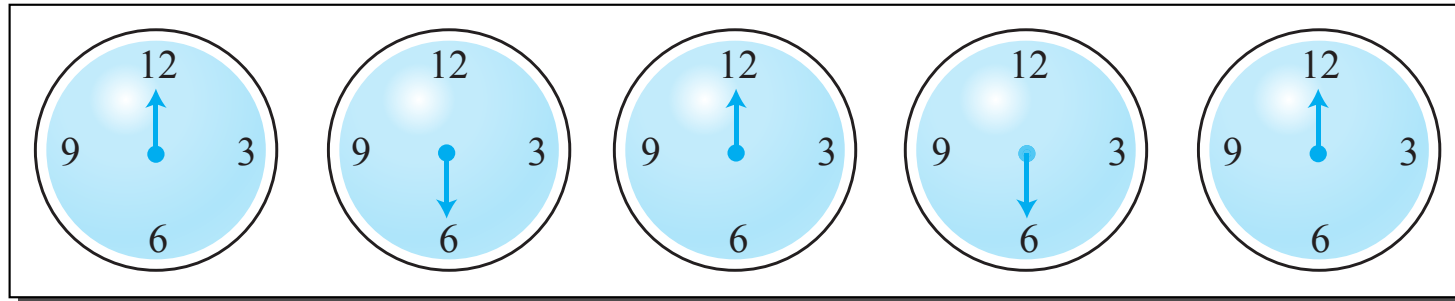


(c) Inframuestreo:  $f_s=f$



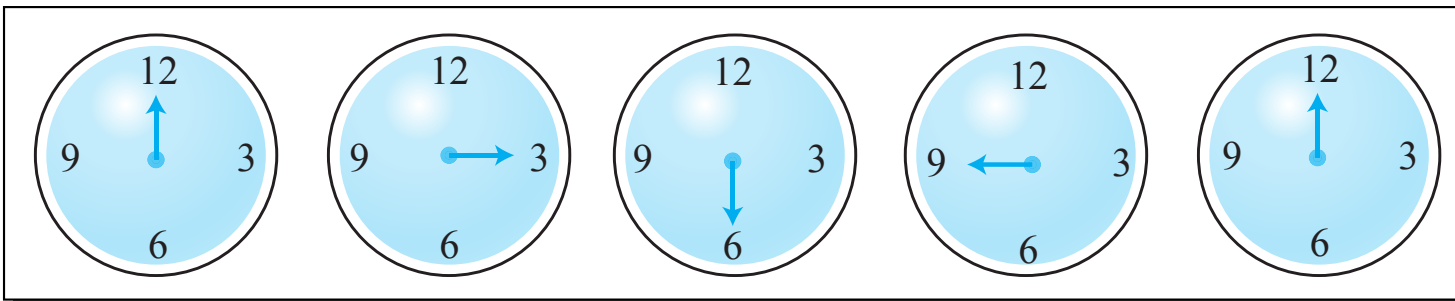
[Forouzan]

# Frecuencia de Nyquist: ejemplo (II)



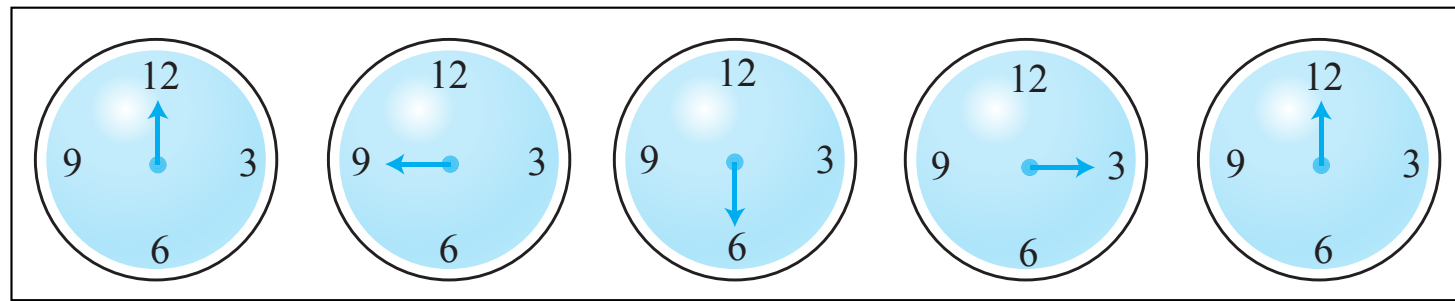
Las muestras pueden indicar que el reloj se está moviendo hacia delante o hacia atrás (12-6-12-6-12)

(a) Muestreo a tasa de Nyquist:  $T_s = T \frac{1}{2}$



Las muestras indican que se está moviendo hacia delante. (12-3-6-9-12)

(b) Sobremuestreo (superior a tasa de Nyquist):  $T_s = T \frac{1}{4}$



Las muestras indican que se está moviendo hacia atrás. (12-9-6-3-12)

(c) Inframuestreo (inferior a tasa de Nyquist):  $T_s = T \frac{3}{4}$

[Forouzan]

# PCM: cuantificación (Paso 2)

El resultado del muestreo es una serie de pulsos con valores de amplitud comprendidos entre las amplitudes máximas y mínimas de la señal.

El proceso de **cuantificación** es el siguiente:

- 1 Suponemos que la señal analógica tiene amplitudes instantáneas entre  $V_{\text{mín}}$  y  $V_{\text{máx}}$ .
- 2 Dividimos el rango en  $L$  zonas, cada una de altura  $\Delta$ :

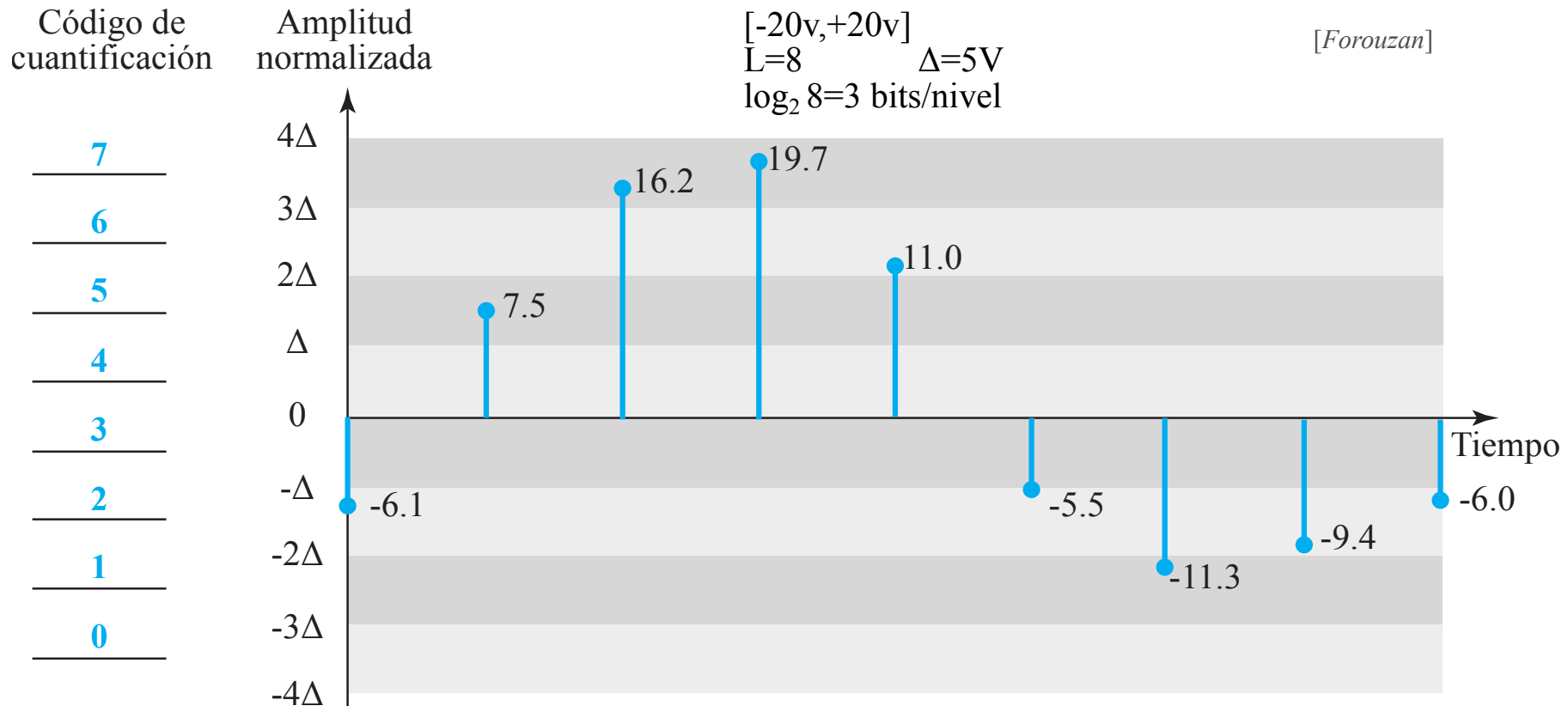
$$\Delta = \frac{V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}}}{L}$$

- 3 Asignamos los valores cuantificados de 0 a  $L - 1$  en los puntos medios de cada zona.
- 4 Aproximamos el valor de la amplitud de la muestra a los valores cuantificados.

## Ejemplo:

Supongamos una señal analógica muestreada y las amplitudes de las muestras están entre  $-20$  y  $+20$  V. Decidimos establecer ocho niveles ( $L = 8$ ), por lo tanto, tenemos que  $\Delta = 5$  V y  $\log_2 8 = 3$  bits/nivel.

# PCM: cuantificación (Ejemplo)



Valores PAM normalizados	-1.22	1.50	3.24	3.94	2.20	-1.10	-2.26	-1.88	-1.20
Valores cuantificados normalizados	-1.50	1.50	3.50	3.50	2.50	-1.50	-2.50	-1.50	-1.50
Error normalizado	-0.28	0	+0.26	-0.44	+0.30	-0.40	-0.24	+0.38	-0.30
Código de cuantificación	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
Codewords	<b>010</b>	<b>101</b>	<b>111</b>	<b>111</b>	<b>110</b>	<b>010</b>	<b>001</b>	<b>010</b>	<b>010</b>

## *¿Cuántos niveles de cuantificación $L$ establecer?*

En el ejemplo anterior hemos establecido  $L = 8$ .

La elección del número de niveles,  $L$ , depende del rango de amplitudes de la señal analógica y el nivel de precisión necesario en la recuperación de la señal:

- Si la amplitud de una señal fluctúa sólo entre dos valores, con dos niveles es suficiente.
- Si la señal, por ejemplo, la voz, tiene muchos valores de amplitud, son necesarios más niveles de cuantificación.
- En la digitalización de audio, normalmente se utiliza  $L = 256$ ; en la digitalización de video, se utilizan miles de niveles.

La elección de valores bajos de  $L$  incrementa el **error de cuantificación** si hay mucha fluctuación de la señal.

# PCM: error de cuantificación

Otro asunto a considerar es el **error** generado en el proceso de **cuantificación**, debido a los procesos de aproximación.

- Los valores de entrada al cuantificador son reales, y los valores de salida son aproximados, elegidos en el valor medio de la zona.
- Si el valor de entrada también estuviera en el valor medio de la zona (exactamente) no habría error de cuantificación, en otro caso, se produce un determinado error.

Supongamos el ejemplo anterior:

- La amplitud normalizada de la tercera muestra es 3,24, pero el valor cuantificado normalizado es 3,50.
- Significa que se ha producido un error de +0,26.

En definitiva, el valor de error de cualquier muestra es menor que  $\Delta/2$ , es decir:

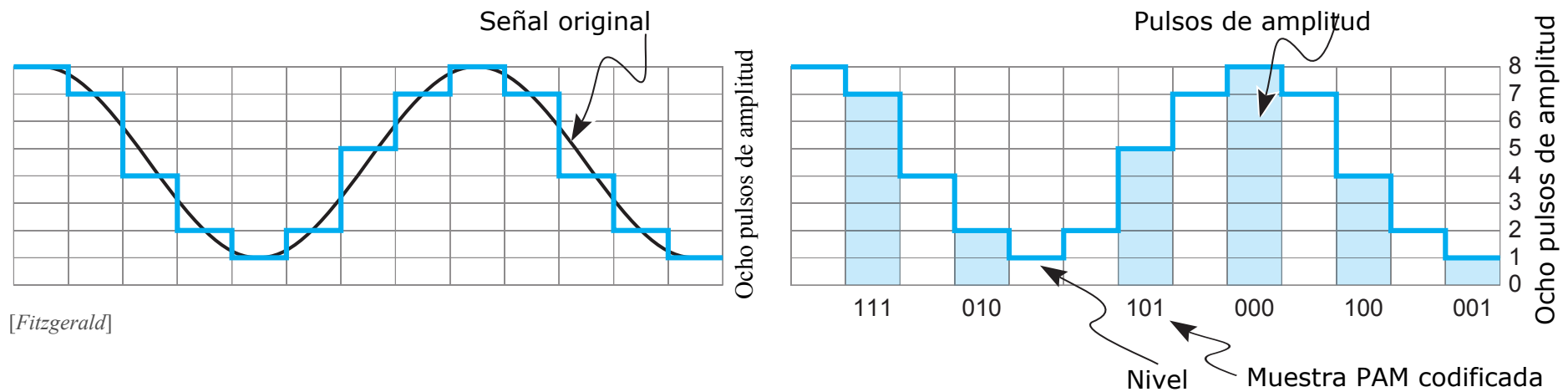
$$-\Delta/2 \leq error \leq \Delta/2$$

El error de cuantificación cambia la SNR de una señal, reduciendo el límite superior de la capacidad establecida por Shannon.

Finalmente, la contribución del error de cuantificación al  $SNR_{dB}$  de una señal depende del número de niveles de cuantificación ( $L$ ) o del número de bits por muestra ( $n_b$ ):

$$SNR_{dB} = 6,02n_b + 1,76 \text{ dB}$$

# PCM: codificación (Paso 3)



Después de que cada muestra ha sido cuantificada al número de bits por muestra establecido, cada muestra debe ser **codificada** a un codeword de  $n_b$  bits. Por ejemplo:

- Una muestra cuantificada 2  $\Rightarrow$  se codifica 010.
- Una muestra cuantificada 5  $\Rightarrow$  se codifica 101.
- Etc.

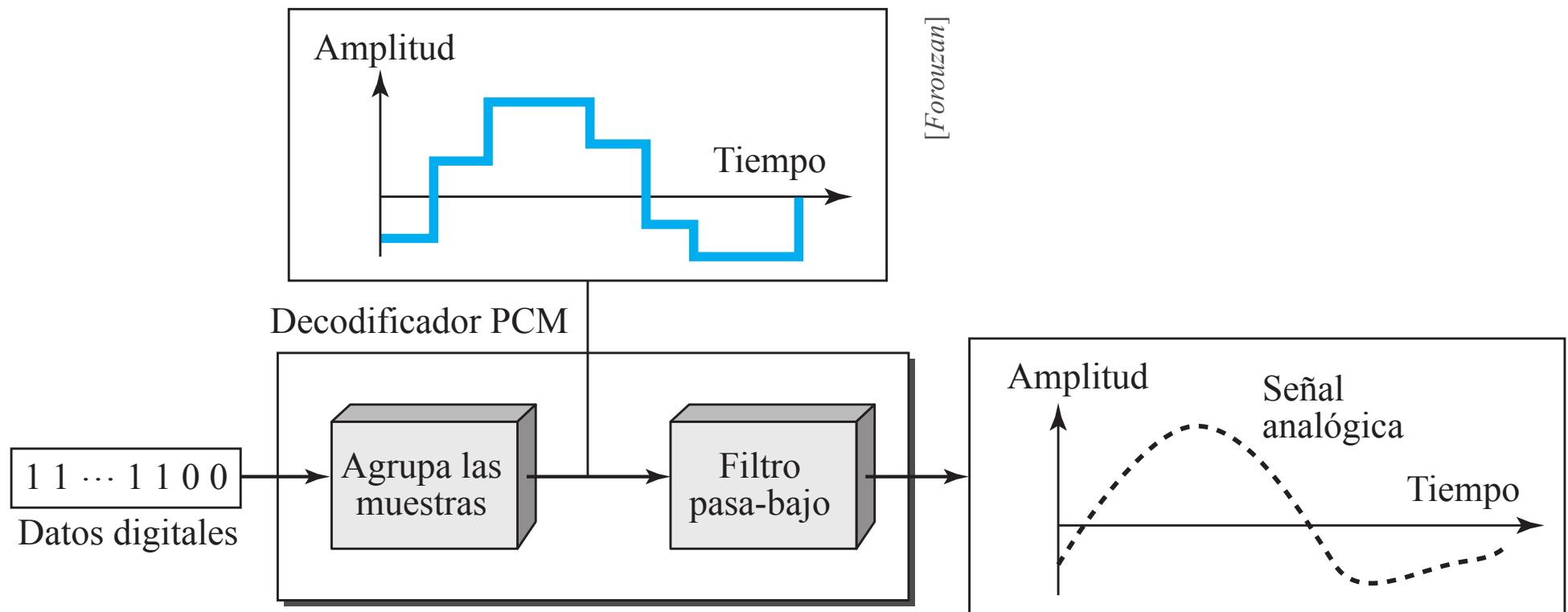
El número de bits de cada muestra viene determinado por el número de niveles ( $L$ ) de cuantificación: si el número de niveles es  $L$ , entonces el número de bits:

$$n_b = \log_2 L$$

Y, por lo tanto, la tasa en bits:

$$N = f_s \cdot n_b$$

# PCM: decodificación



El proceso de **decodificación**:

En primer lugar convierte los codewords en pulsos.

Los pulsos son filtrados para obtener una señal analógica (suavizada).

Si la señal ha sido muestreada a la misma (o mayor) tasa de muestreo de Nyquist, y si hay suficientes niveles de cuantificación, la señal original será regenerada.

# $B_{\text{mín}}$ en PCM

¿Cuál será el **ancho de banda mínimo** necesario para la señal digitalizada, dada una señal analógica de ancho de banda  $B_{\text{analog}}$ ?

El ancho de banda mínimo de una señal codificada en línea:

$$B_{\text{mín}} = c \cdot N \cdot \frac{1}{r}$$

si tenemos una tasa de bits:

$$N = n_b \cdot f_s$$

entonces:

$$B_{\text{mín}} = c \cdot n_b \cdot f_s \cdot \frac{1}{r} = c \cdot n_b \cdot 2B_{\text{analog}} \cdot \frac{1}{r}$$

Si suponemos  $r = 1$  (en NRZ o señal bipolar) y  $c = 1/2$  (lo más usual), entonces:

$$B_{\text{mín}} = n_b \cdot B_{\text{analog}}$$

Lo que significa que el ancho de banda mínimo de la señal digital es  $n_b$  veces mayor que el ancho de banda de la señal analógica (es el coste de la digitalización).

# Modulación por codificación de pulsos (PCM): ejemplo

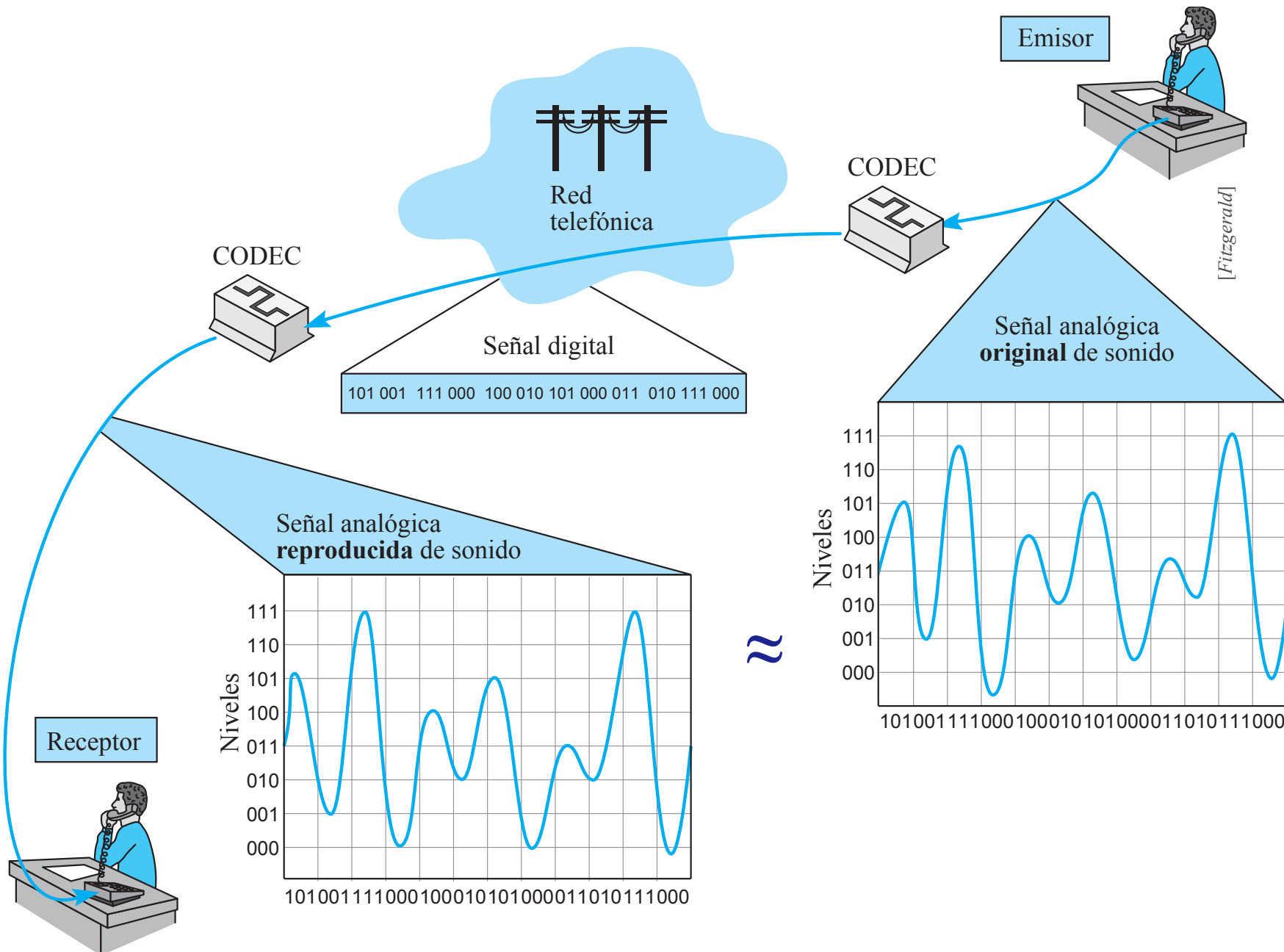
**Ejemplo:** Digitalización de la voz para la transmisión a través del bucle analógico.

- El bucle local analógico de red telefónica tiene un ancho de banda de 4000 Hz.
- La señal de voz se muestrea a una frecuencia del doble ( $f_s$ ) de su frecuencia significativa más alta, por tanto, se requieren 8000 muestras/seg (muestras PAM).
- Para convertir las muestras PAM a digital, se codifican a binario con signo.
- Habitualmente se utilizan 256 niveles diferentes ( $L$ ), por tanto, se necesitan 8 bits por muestra ( $n_b$ ).

Por lo tanto, para la digitalización de la señal de voz, se necesitan 8000 muestras/s · 8 bits/muestra = 64 kbps, como se muestra a continuación:

$$N = f_s \cdot n_b = 2 \cdot B \cdot \log_2 L = 2 \cdot 4 \text{ kHz} \cdot \log_2 256 = 64 \text{ kbps}$$

# Modulación por codificación de pulsos (PCM): ejemplo voz

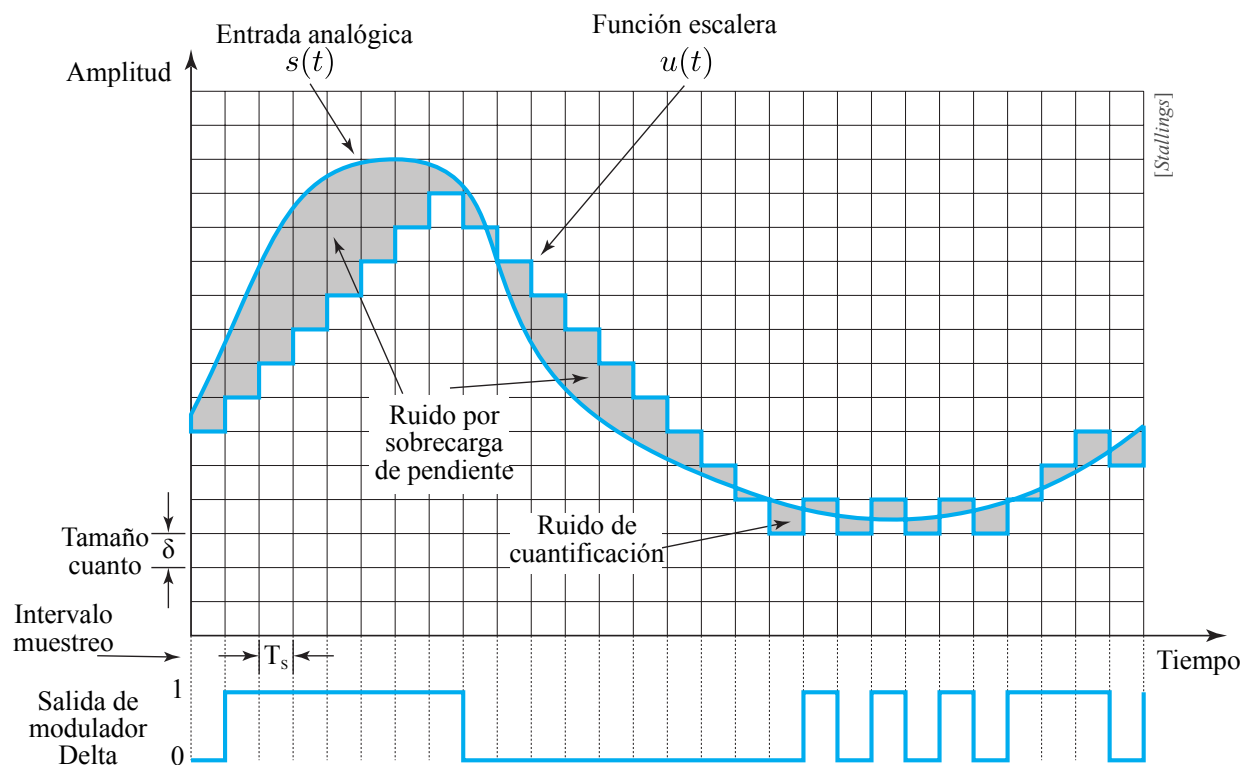


# Modulador Delta

Para cada instante de muestreo, la señal analógica de entrada  $s(t)$  se compara con el valor más reciente de la función escalera  $u(t)$ :

Si  $s(t) > u(t) \rightarrow$  genera un 1.

Si  $s(t) \leq u(t) \rightarrow$  genera un 0.

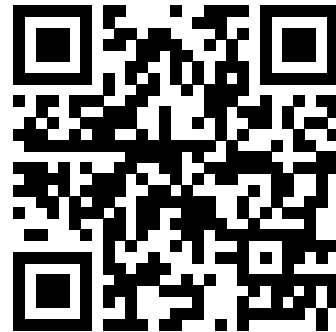


Si  $\uparrow \delta$  entonces se produce  $\uparrow$  **ruido de cuantificación** debido a variaciones lentas de la señal.

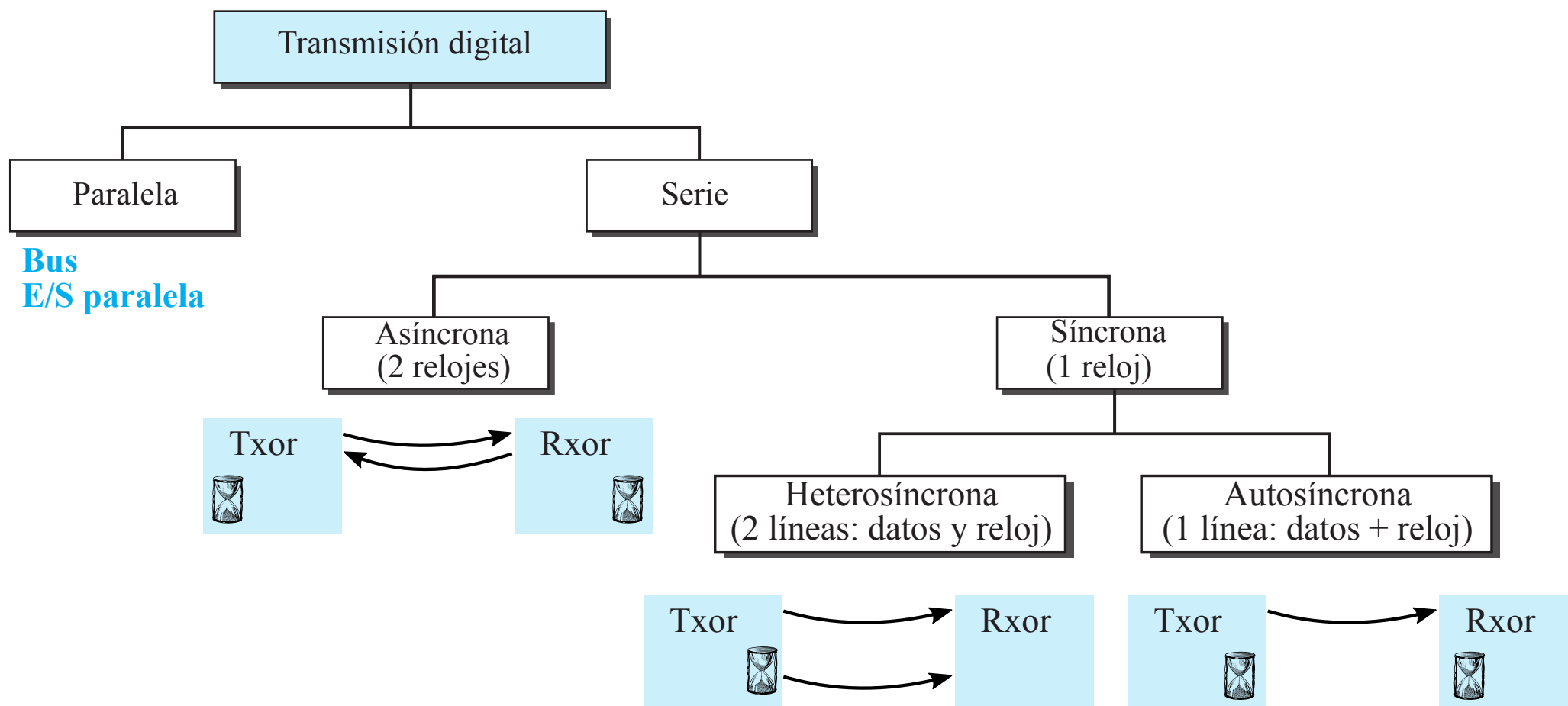
Si  $\downarrow \delta$  entonces se produce  $\uparrow$  **ruido de sobrecarga** debido a variaciones rápidas de la señal.

Es más sencillo y proporciona mejor SNR que PCM para una misma tasa de bit.

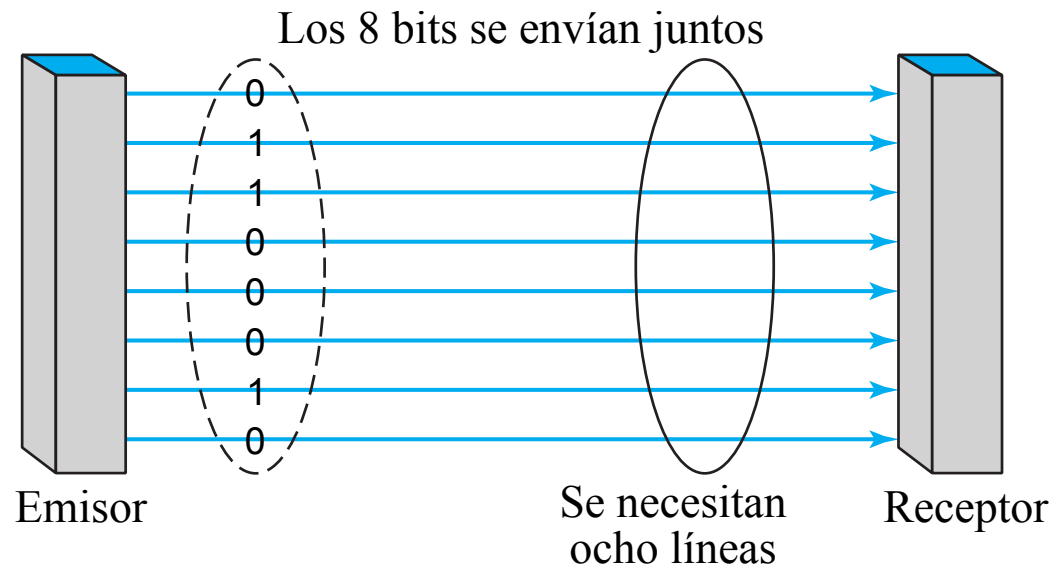
# Modos de transmisión digital



# Modos de transmisión digital



# Transmisión paralela



El mecanismo de **transmisión paralela** utiliza  $n$  cables para enviar  $n$  bits de forma simultánea.

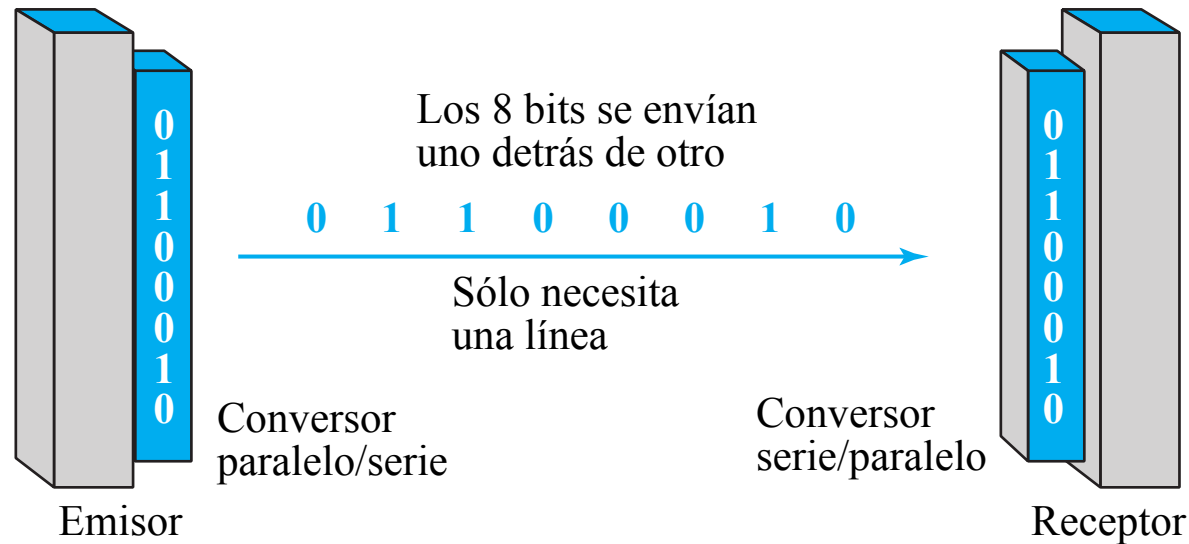
Cada bloque de  $n$  bits se transmite en cada instante.

La principal **ventaja** es la velocidad, ya que se incrementa en un factor de  $n$  con respecto a la serie.

Pero tiene como **inconveniente** el coste.

Uso restringido a buses de comunicaciones.

# Transmisión serie

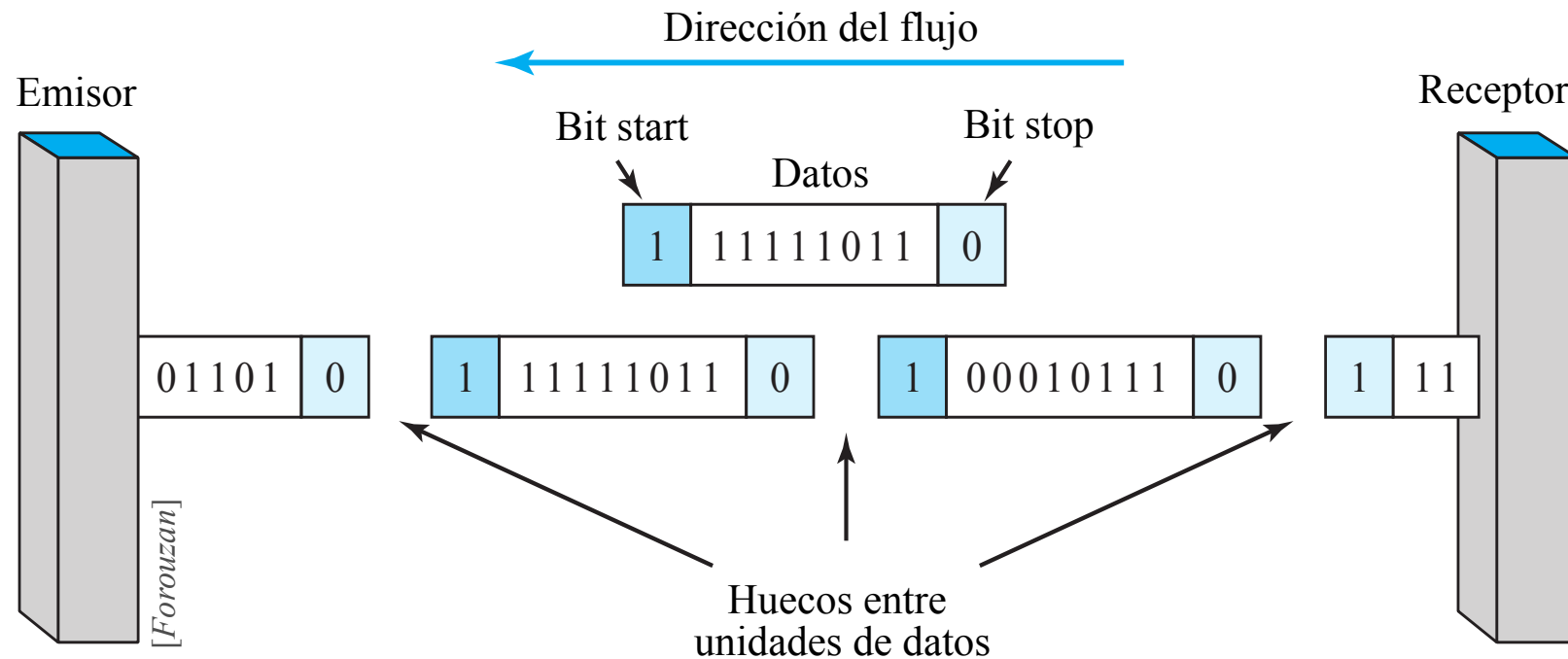


En la **transmisión serie**, los bits circulan uno detrás de otro, por lo tanto, sólo se necesita un canal para transmitir  $n$  bits entre dispositivos.

La principal **ventaja** sobre la transmisión paralela es el coste, que se reduce en un factor de  $n$ .

Como la comunicación dentro de los dispositivos es paralela, se necesitan dispositivos de conversión paralelo-serie y serie-paralelo.

# Transmisión serie asíncrona



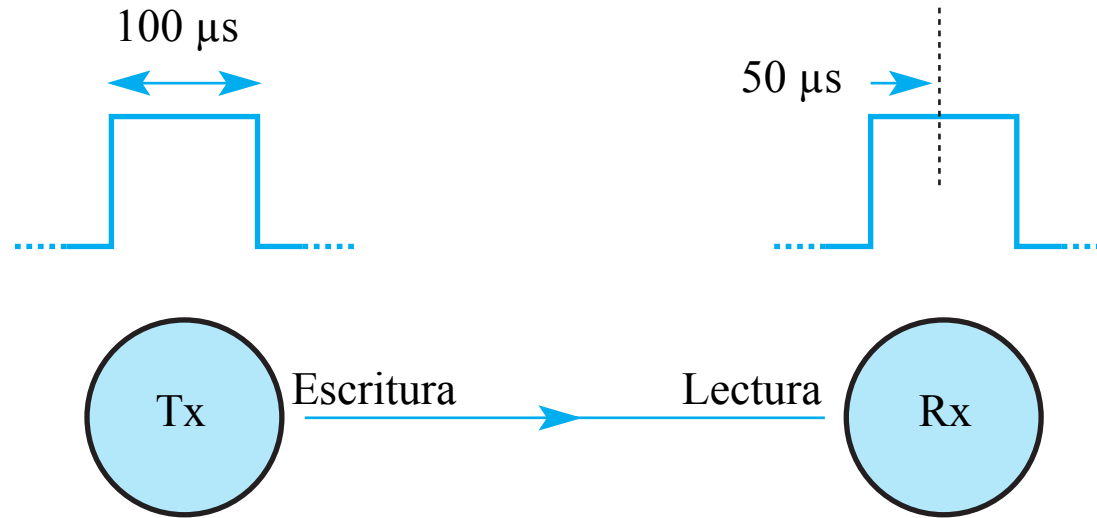
En transmisión **asíncrona**, la señal no tiene requerimientos de tiempo, y la información se recibe e interpreta en función de unos patrones, que consiste en la agrupación de bits en unidades de 8 (bytes).

Para avisar de la llegada de un grupo de bits, se añade un bit (o varios) de **start**, y para el fin del grupo de bits, se añaden uno (o varios) bits de **stop**.

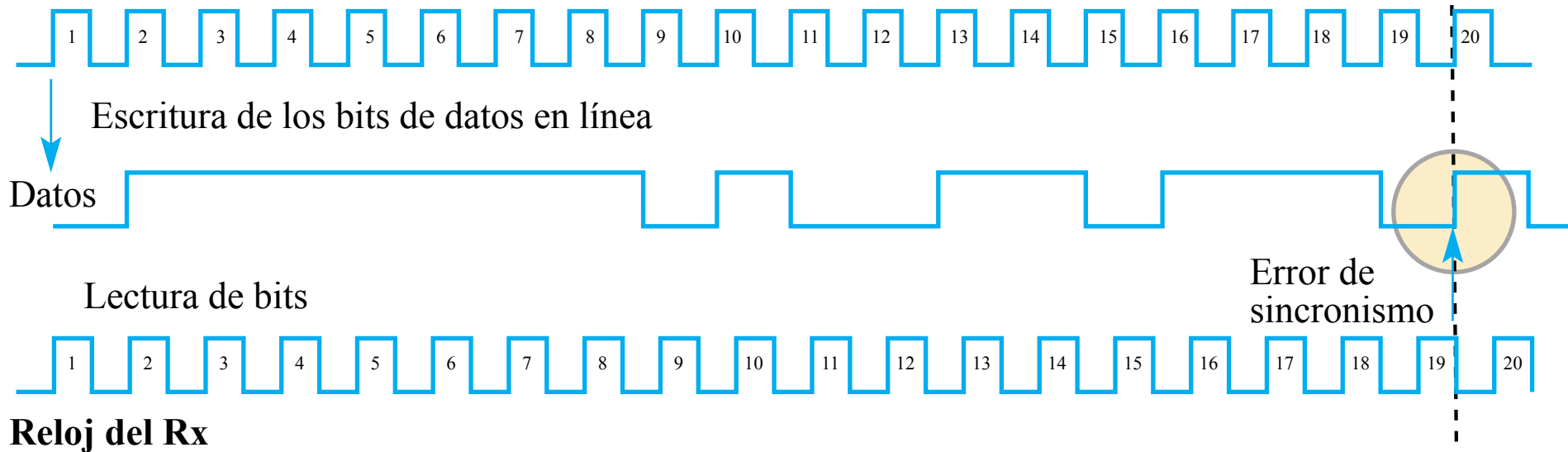
Además, la transmisión de cada grupo puede ir seguida de un **hueco** (gap) de longitud variable.

La necesidad de sincronización queda restringida a la duración de 1 byte, ya que el receptor puede resincronizar con la llegada del nuevo byte.

# Problemas de sincronización

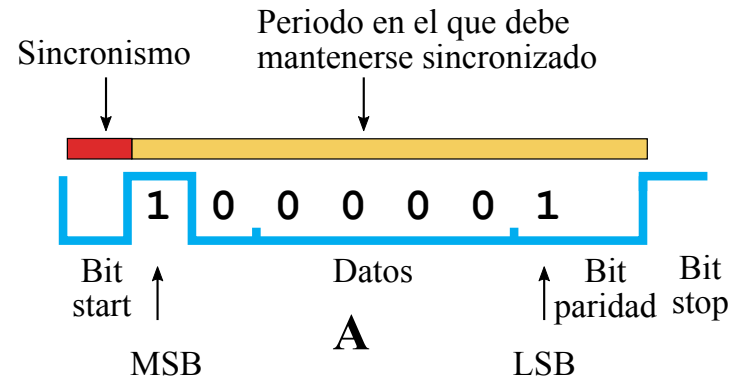


## Reloj del Tx

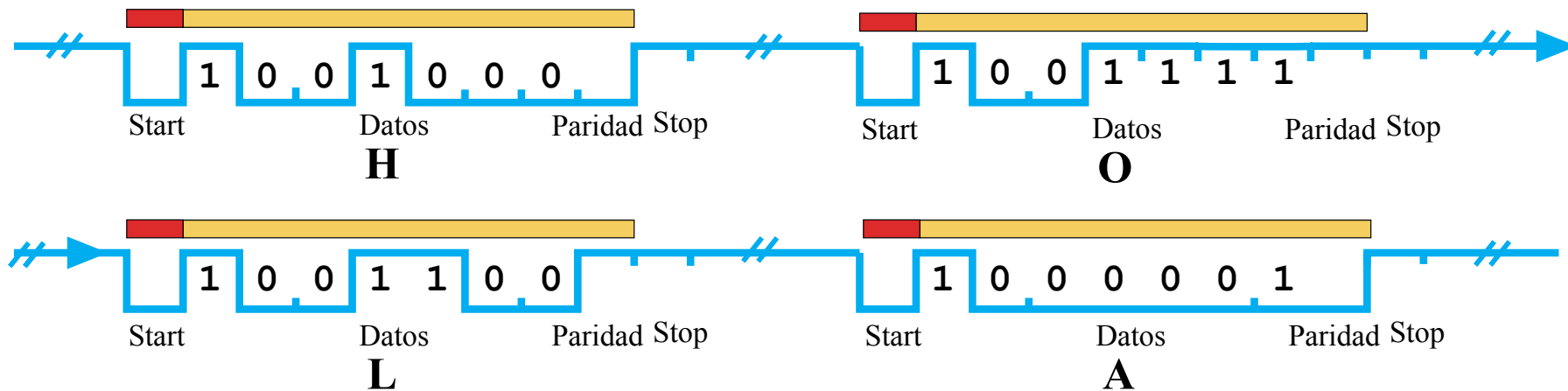


# Ejemplo de sincronización

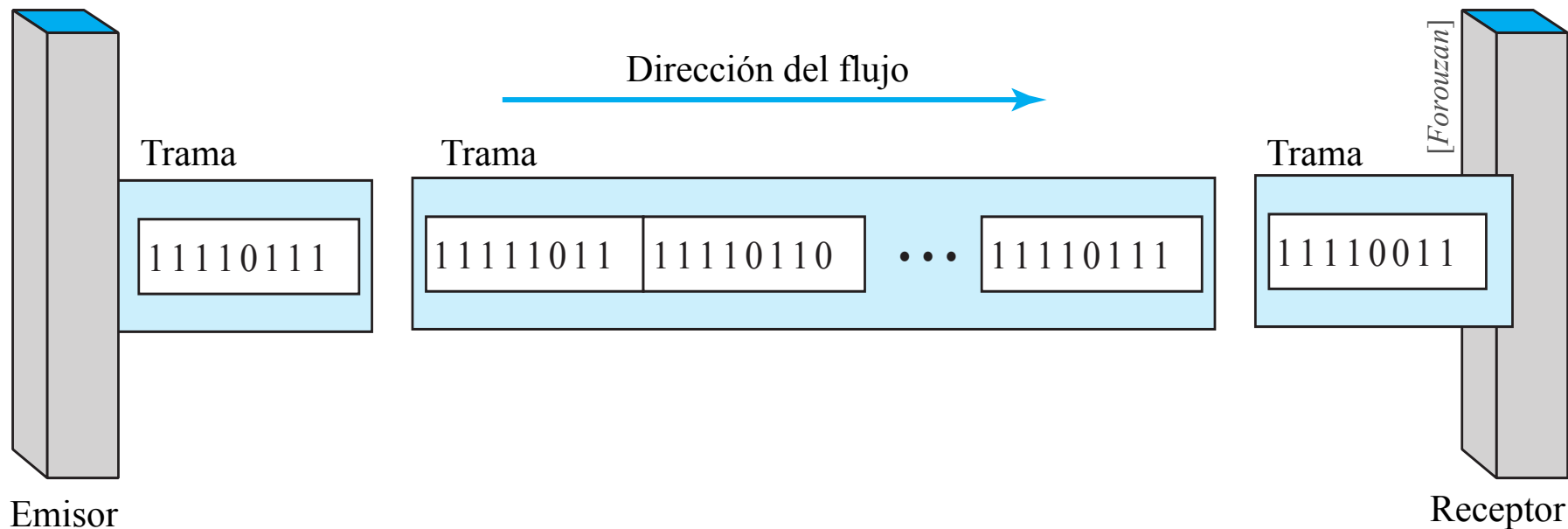
Código ASCII  
1 bit de START  
Paridad PAR  
1 bit de STOP



Mensaje: **HOLA**



# Transmisión serie síncrona



En transmisión **síncrona**, el flujo de bits se combina en tramas, que pueden contener múltiples bytes.

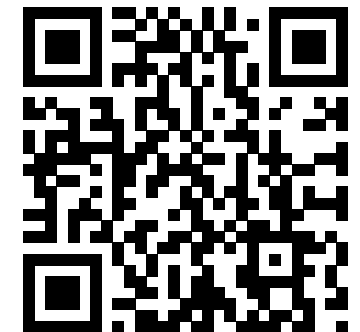
Cada trama se transmite sin gaps entre ellas.

El receptor es el encargado de recibir las tramas e interpretar los diferentes bytes.

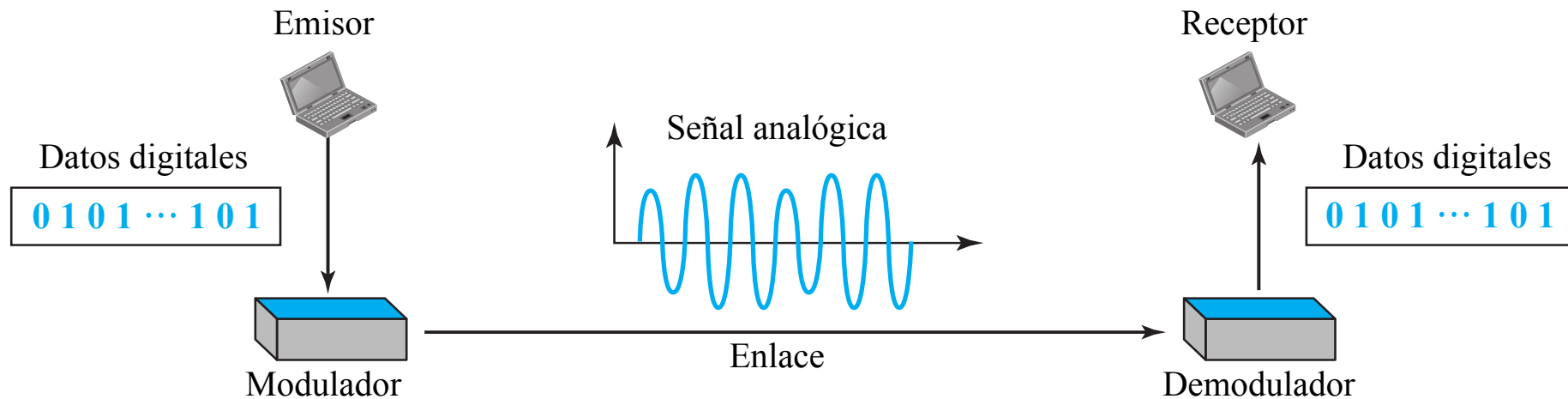
Al no existir *gaps* ni bits de *start* ni *stop*, no hay mecanismos implícitos para ayudar al receptor a recibir las tramas, por lo que el mecanismo de temporización es muy importante.

La principal ventaja de la transmisión síncrona es la velocidad.

1. Introducción a la transmisión de datos
2. Señales digitales
3. Perturbaciones en la transmisión
4. Transmisión digital
- 5. *Transmisión analógica***
6. Codificación de datos
7. Multiplexación
8. Medios de transmisión
9. Líneas de abonado digital



# Conversión digital-analógico

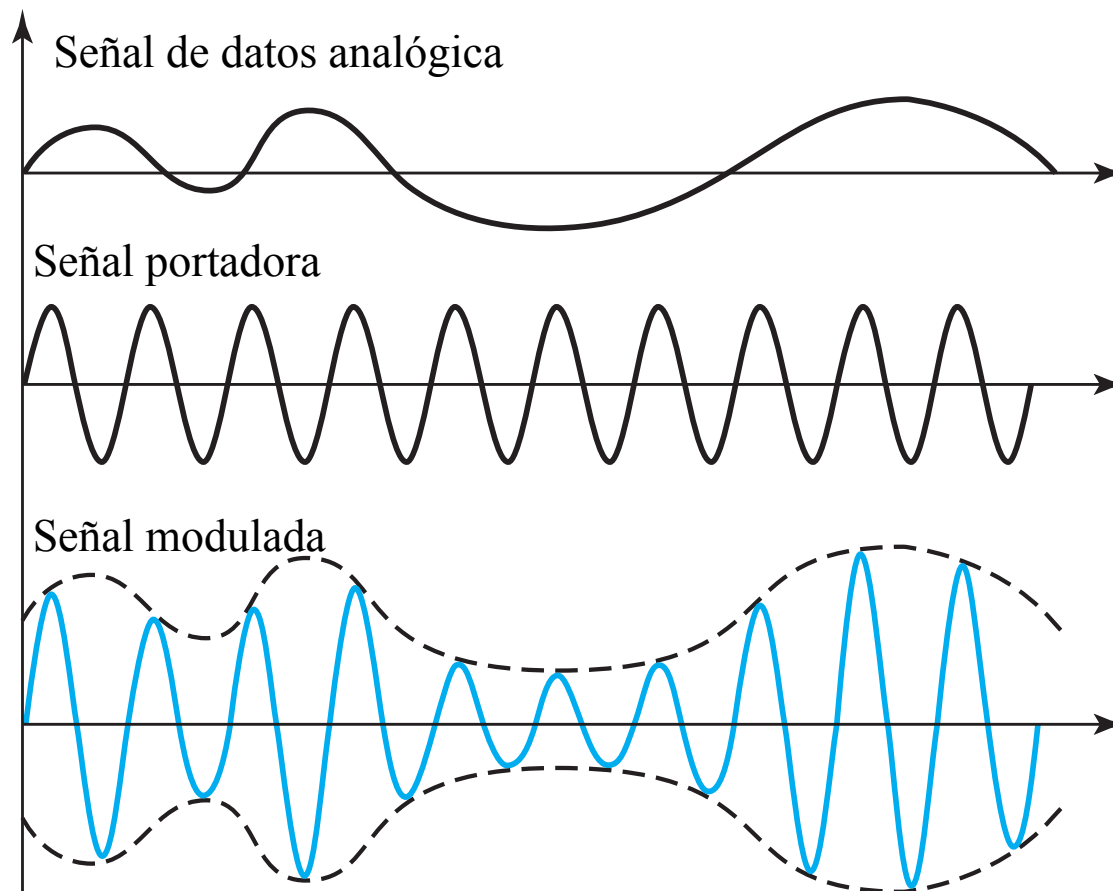


En telecomunicaciones y redes de computadores, se necesita la **modulación digital** para convertir secuencias de bits digitales en una señal pasa banda capaz de viajar por canales analógicos.

La señal pasa banda se obtiene a partir de una señal portadora sinusoidal modulada en amplitud, frecuencia o fase.

El proceso se denomina **modulación digital pasa banda** o simplemente, **modulación digital**.

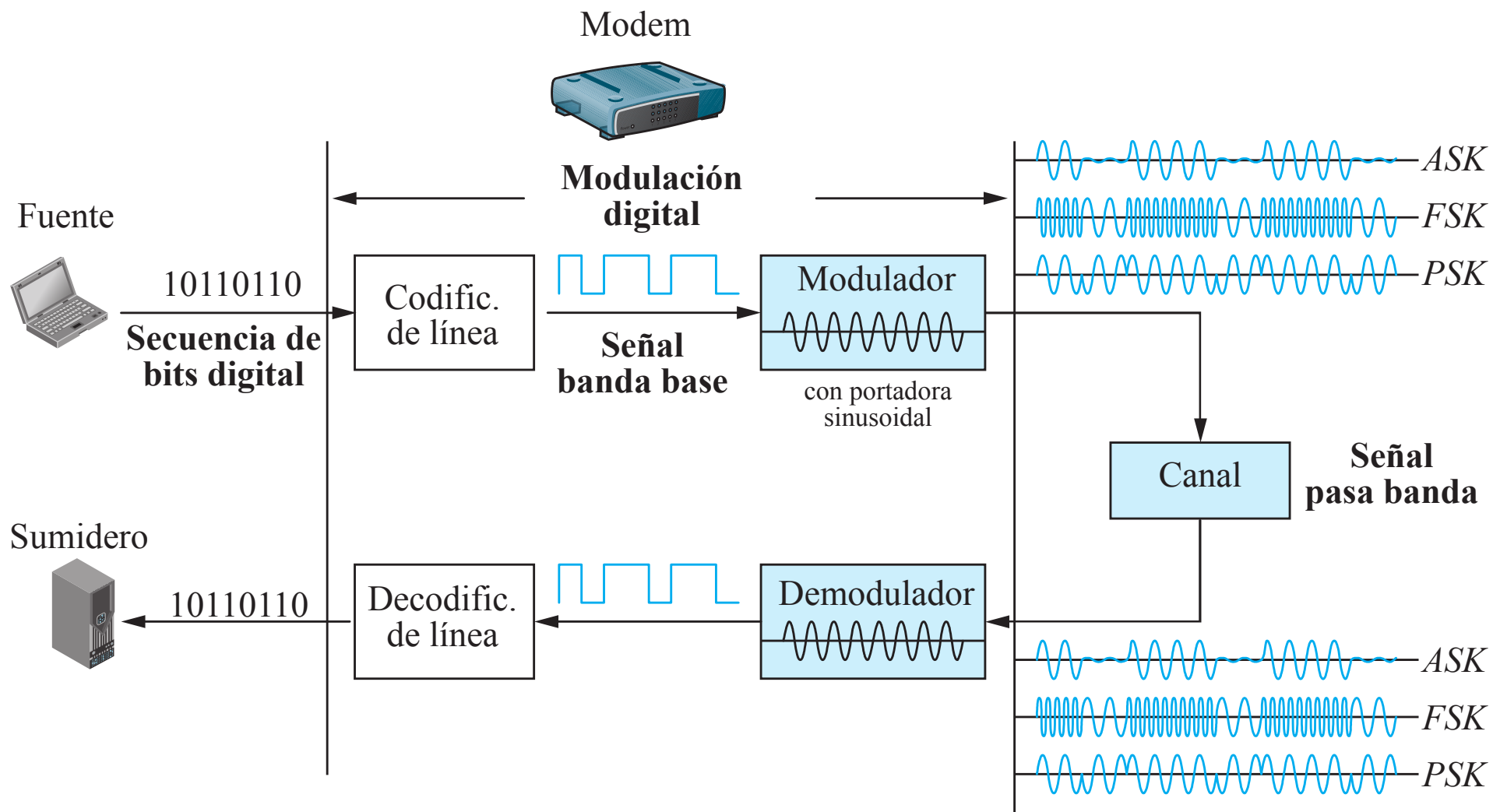
# Modulación



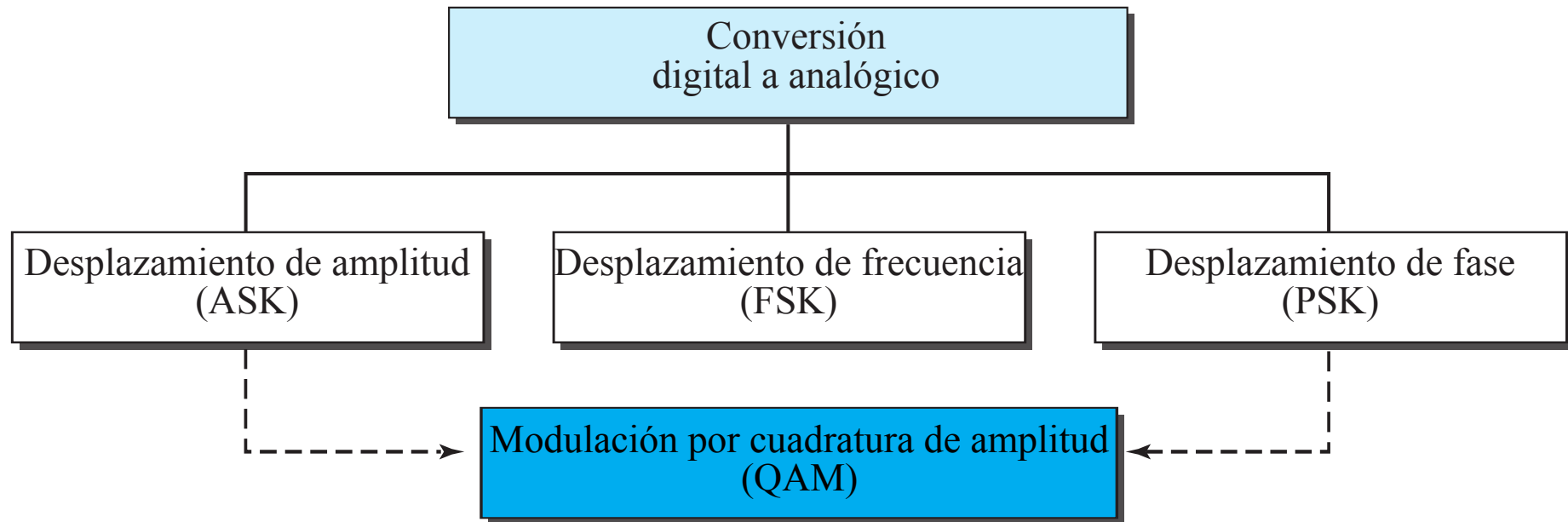
Utilizamos el término **modulación** para referirnos a los cambios realizados en la portadora según los datos a enviar.

Basicamente, consiste en la combinación de la señal portadora + señal de datos.

# Modulación digital



# Conversión digital-analógico: tipos



# Aspectos de la conversión digital-analógico

Recordemos la relación entre la tasa de señal y la tasa de datos:

$$S = N \cdot \frac{1}{r} \quad [\text{baudios}]$$

donde:

- $S$  es la tasa de señal (tasa de baudios),
- $N$  es la tasa de datos y
- $r$  es el ratio de elementos datos por elemento de señal.

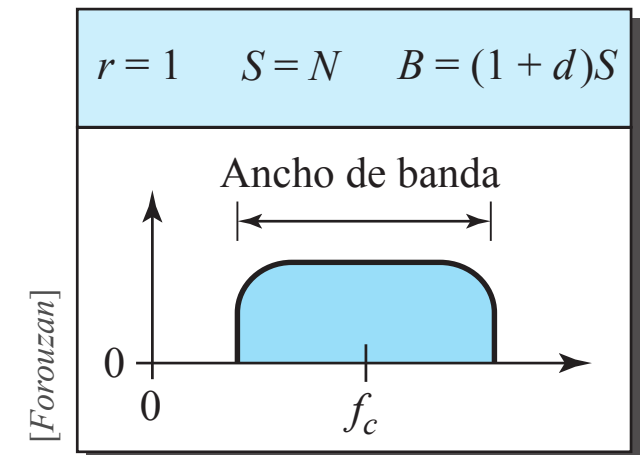
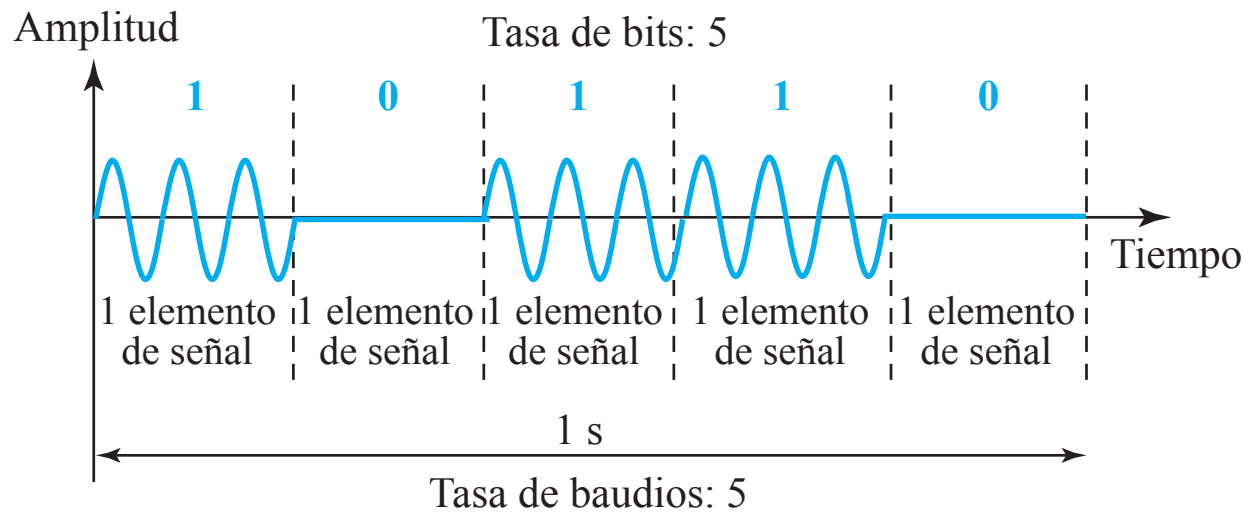
Si  $L$  es número de elementos de señal diferentes, entonces:

$$r = \log_2 L$$

En transmisión analógica de datos digitales, la tasa de baudios siempre es menor o igual que la tasa de bits.

# BASK (Binary Amplitude Shift Keying)

$$s(t) = \begin{cases} A_1 \cos(2\pi f_c t + \phi) & \equiv 1 \text{ binario} \\ A_2 \cos(2\pi f_c t + \phi) & \equiv 0 \text{ binario} \end{cases}$$



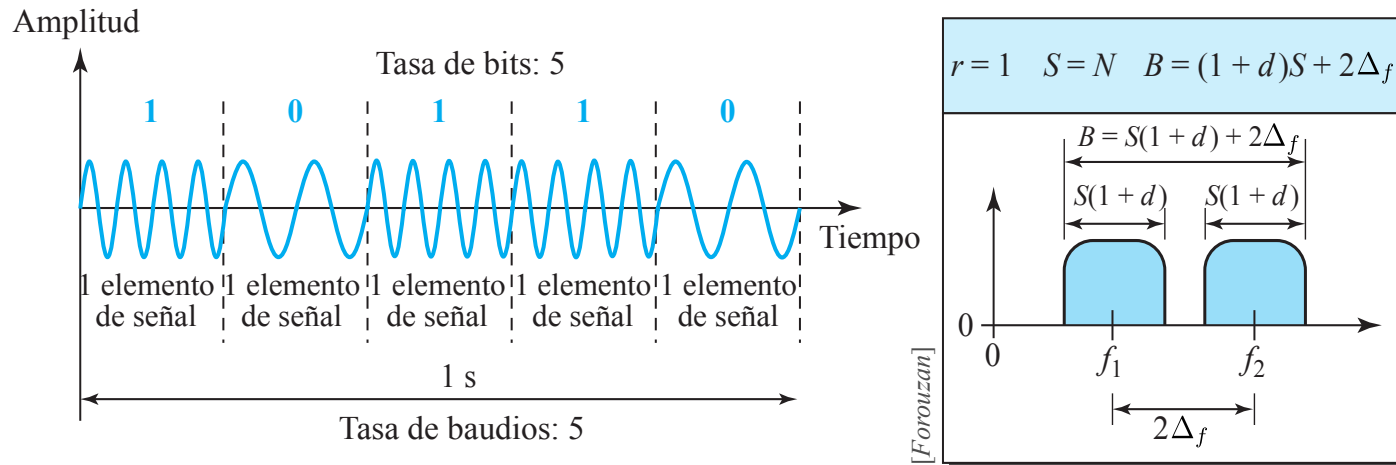
**ASK** es la técnica de modulación más sencilla.

El ancho de banda es proporcional a la tasa de baudios y se distribuye entorno a una **frecuencia central** ( $f_c$ ), siendo  $d$  el **factor de filtrado de línea** ( $0 \leq d \leq 1$ ):

$$B = (1 + d) \cdot S$$

# BFSK (*Binary Frequency Shift Keying*)

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_2 t + \phi) & \equiv 1 \text{ binario} \\ A \cos(2\pi f_1 t + \phi) & \equiv 0 \text{ binario} \end{cases}$$



En **FSK** (o **BFSK**) se consideran las frecuencias,  $f_1$  y  $f_2$  para los elementos dato 0 y 1.

El punto medio de ambos anchos de banda vienen definidos por  $f_1$  y  $f_2$ .

Tanto  $f_1$  como  $f_2$  están separados  $\Delta_f$  del punto central entre ambas dos bandas. La diferencia entre ambas frecuencias es  $2\Delta_f$ .

Para una correcta operación de BFSK, el valor mínimo de  $2\Delta_f$  es  $S$ .

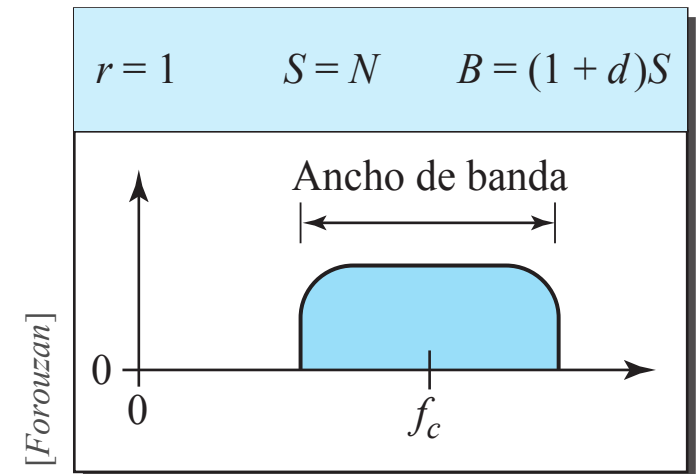
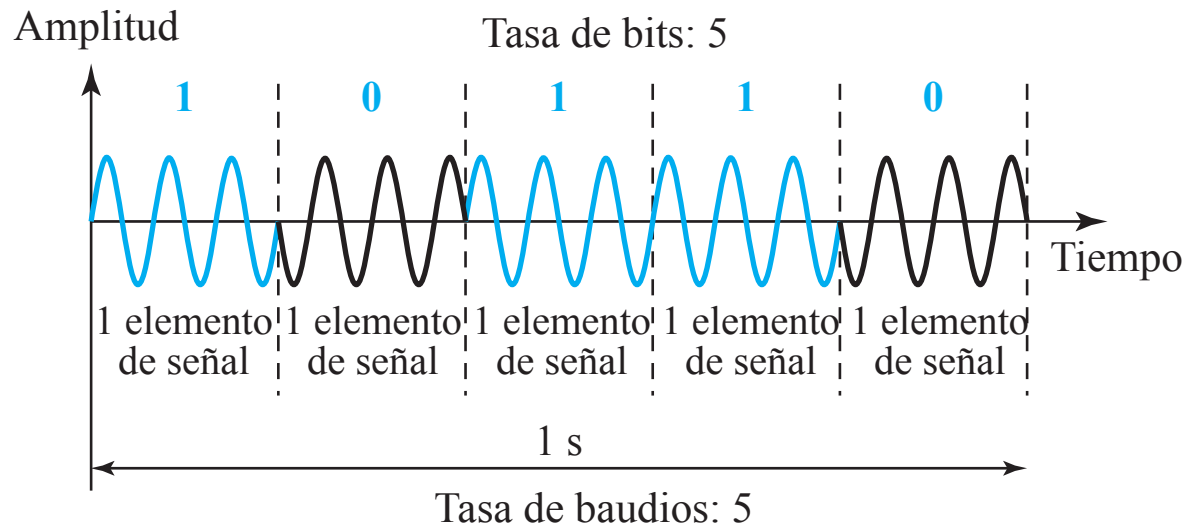
El mayor inconveniente es el ruido de intermodulación.

El ancho de banda se distribuye entorno a ambas frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ , siendo  $d$  el factor de filtrado de línea ( $0 \leq d \leq 1$ ):

$$B = (1 + d) \cdot S + 2\Delta_f$$

# BPSK (Binary Phase Shift Keying)

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi ft) & \equiv 1 \text{ binario} \\ A \cos(2\pi ft + \phi) & \equiv 0 \text{ binario} \end{cases}$$

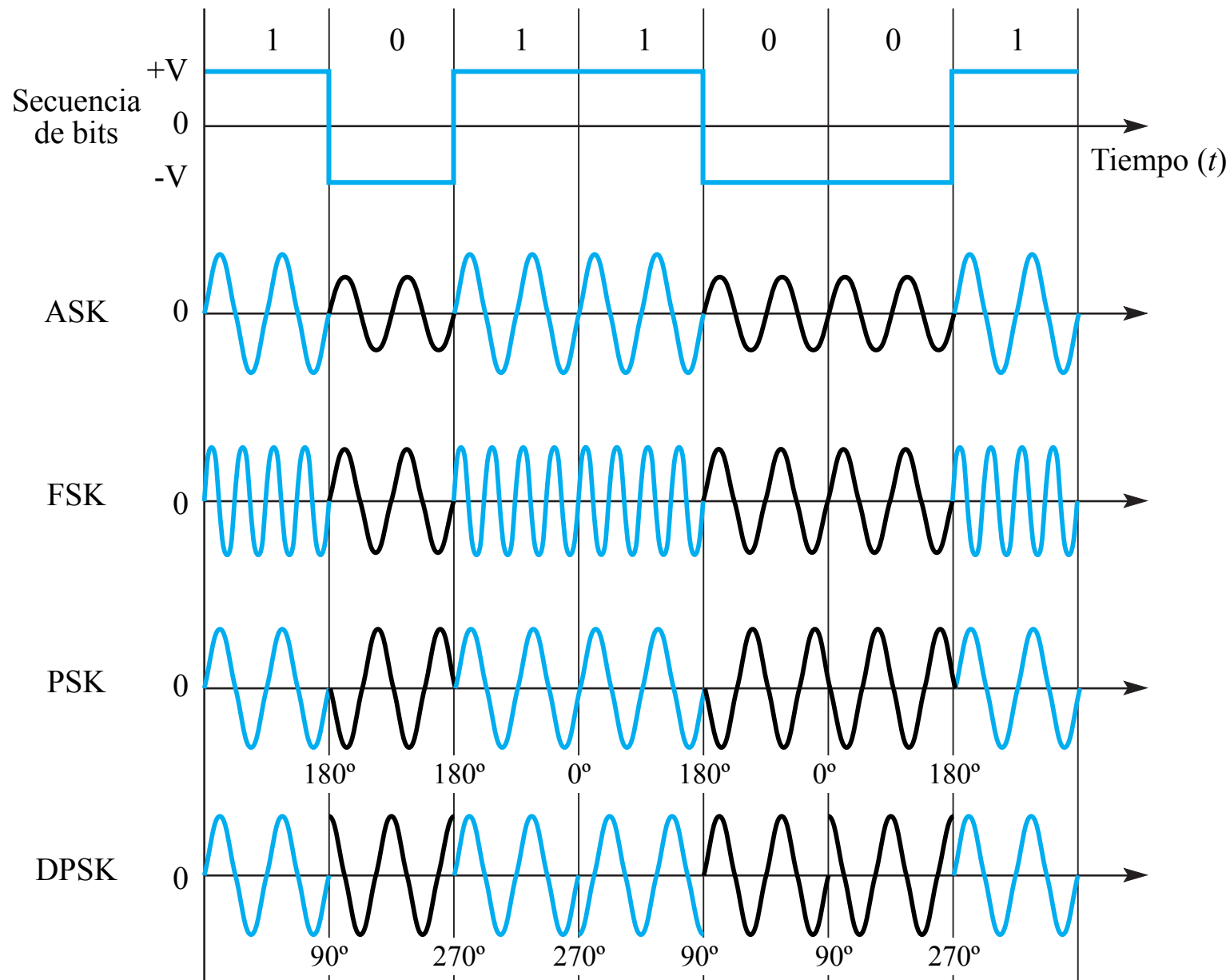


En **PSK**, hay dos elementos de señal, uno con fase  $0^\circ$  y otro con fase  $180^\circ$ .

El ancho de banda es proporcional a la tasa de baudios y se distribuye entorno a una frecuencia central ( $f_c$ ), siendo  $d$  el factor de filtrado de línea ( $0 \leq d \leq 1$ ):

$$B = (1 + d) \cdot S$$

# Modulaciones binarias (resumen)



# Modulaciones multinivel

En las modulaciones multinivel, se tiene que:

- $S < N$
- $c = 1 \rightarrow N = r \cdot S$
- $B = S \cdot (1 + d)$

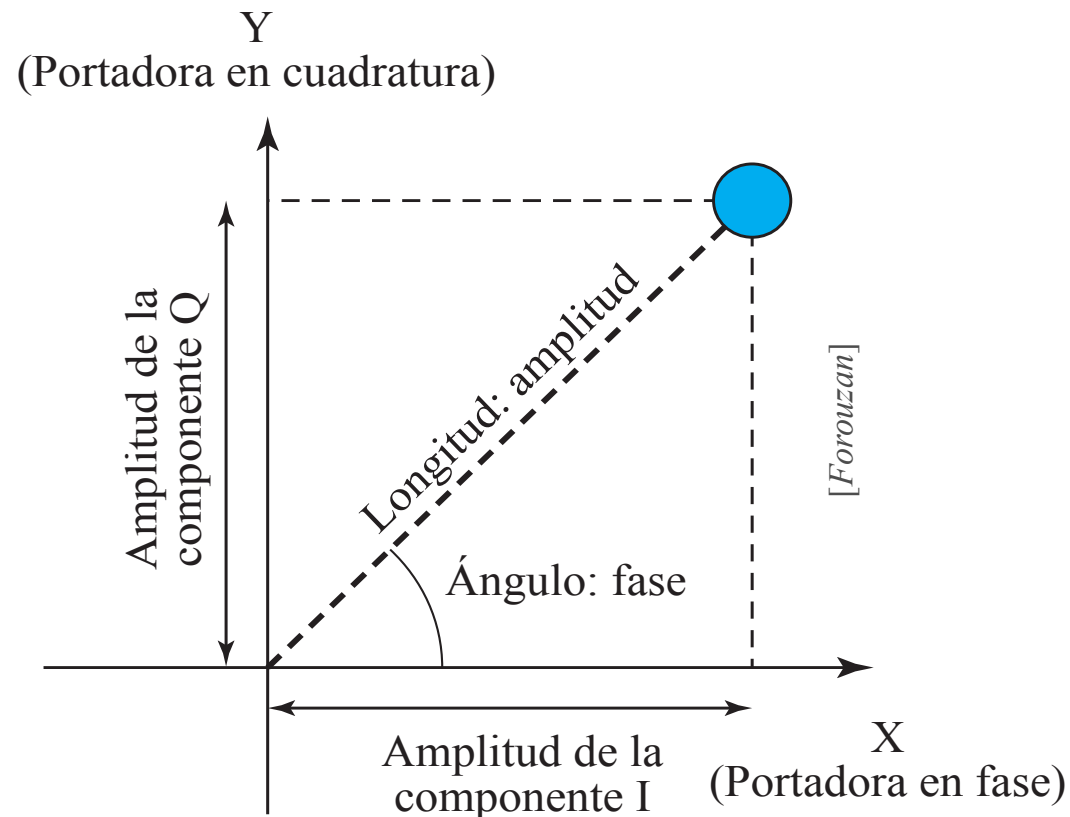
Por lo que:

$$B = (1 + d) \cdot \frac{1}{r} \cdot N$$

Por ejemplo, si consideramos  $S = 2400$  baudios y  $d = 0$  entonces algunas modulaciones multinivel son:

<b>Modulación</b>	<b>r</b>	<b>N (bps)</b>
BPSK	1	2400
QPSK	2	4800
8PSK	3	7200
16PSK	4	9600
...		

# Diagramas de constelación (I)



Los **diagramas de constelación** se utilizan para definir la **amplitud** y la **fase** de un elemento de señal, especialmente cuando se utilizan dos portadoras (amplitud y fase).

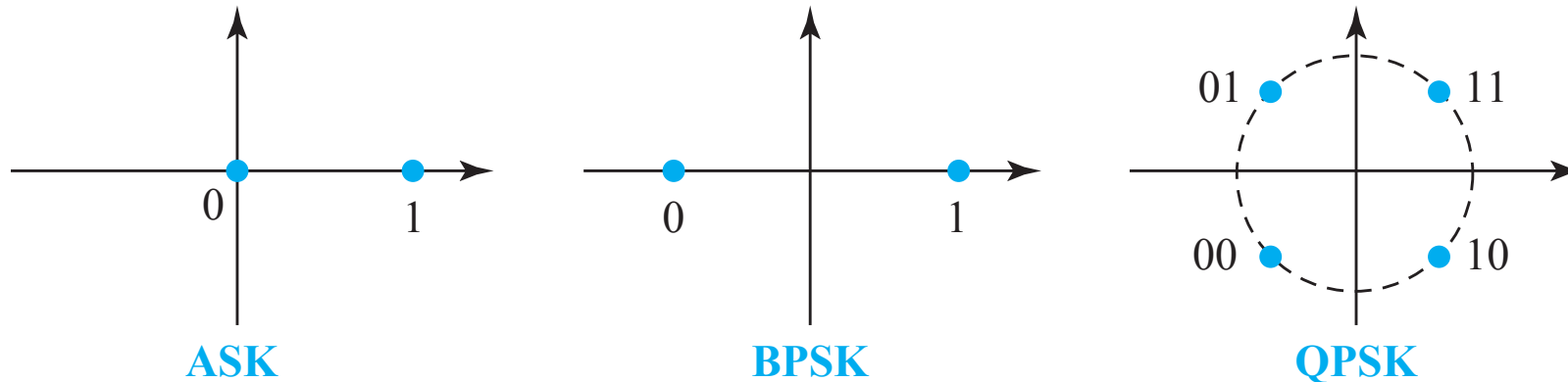
El eje X está relacionado con la portadora en fase o amplitud.

El eje Y está relacionado con la componente de la cuadratura (multicomponente).

La longitud del vector es la amplitud de la señal.

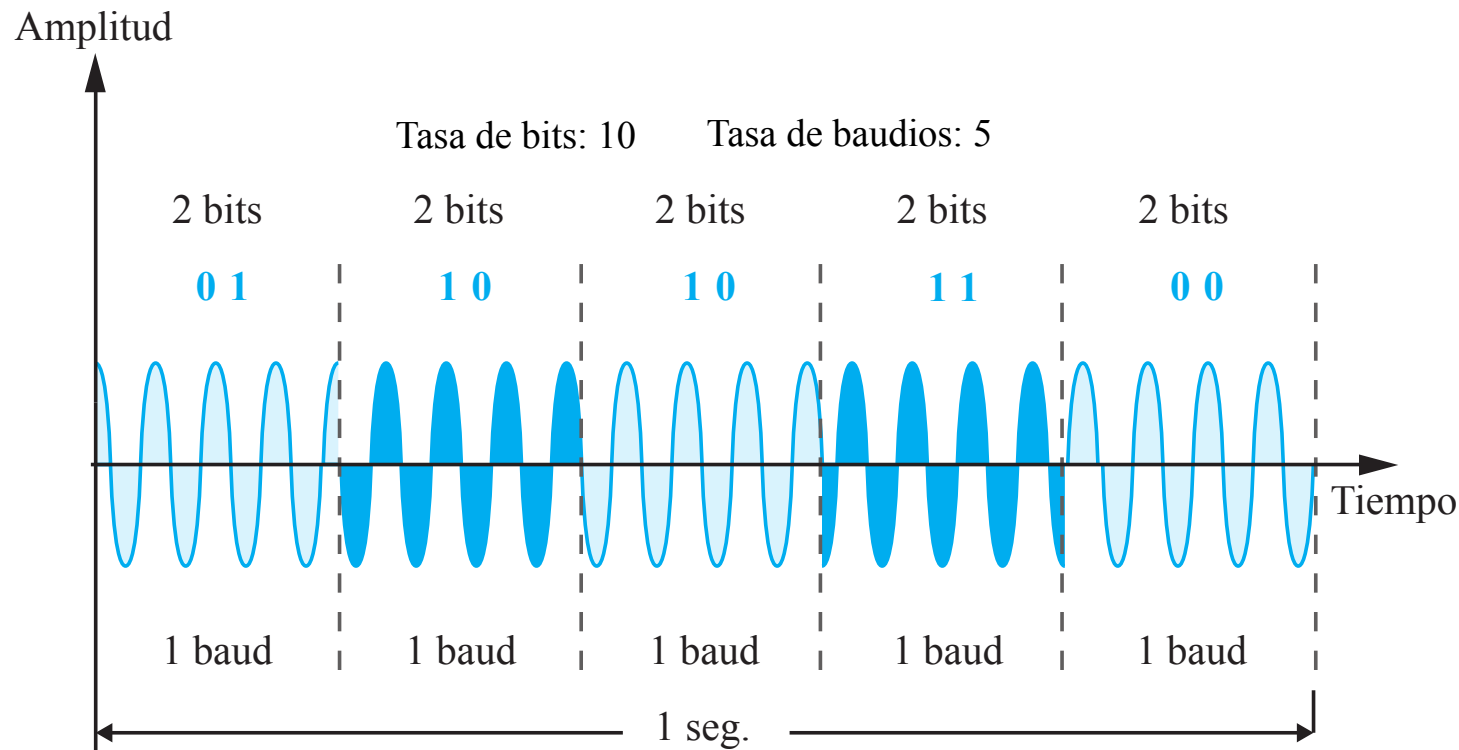
El ángulo del vector es la fase.

# Diagramas de constelación (II)



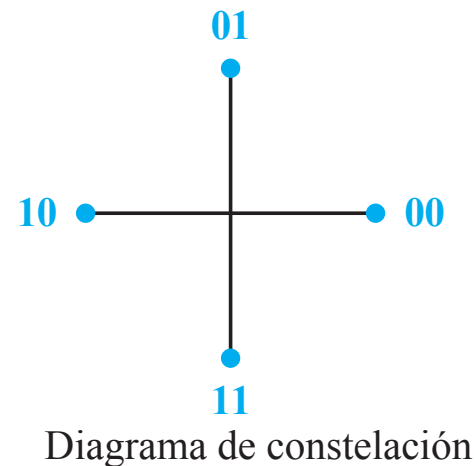
- ASK sólo utiliza una portadora, y los puntos en el eje X representan las dos amplitudes.
- BPSK también utiliza sólo una portadora, con dos niveles de fase.
- QPSK está formado por dos portadoras, una con dos amplitudes y la otra con 2 fases, en total, 4 elementos de señal.

# Modulación 4-PSK (*Phase Shift Keying*)



Elemento dato	Elemento señal
00	0°
01	90°
10	180°
11	270°

$$r = 2$$
$$L = 4$$



# Modulación (*8-Phase Shift Keying*)

Elemento dato    Elemento señal

000	0
001	45
010	90
011	135
100	180
101	225
110	270
111	315

$$L = 8 \rightarrow r = \log_2 8 = 3$$

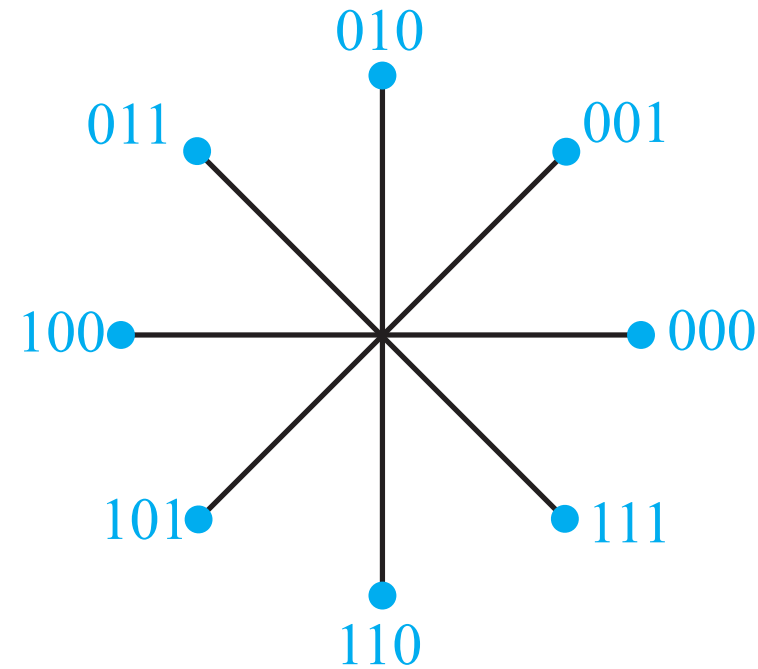
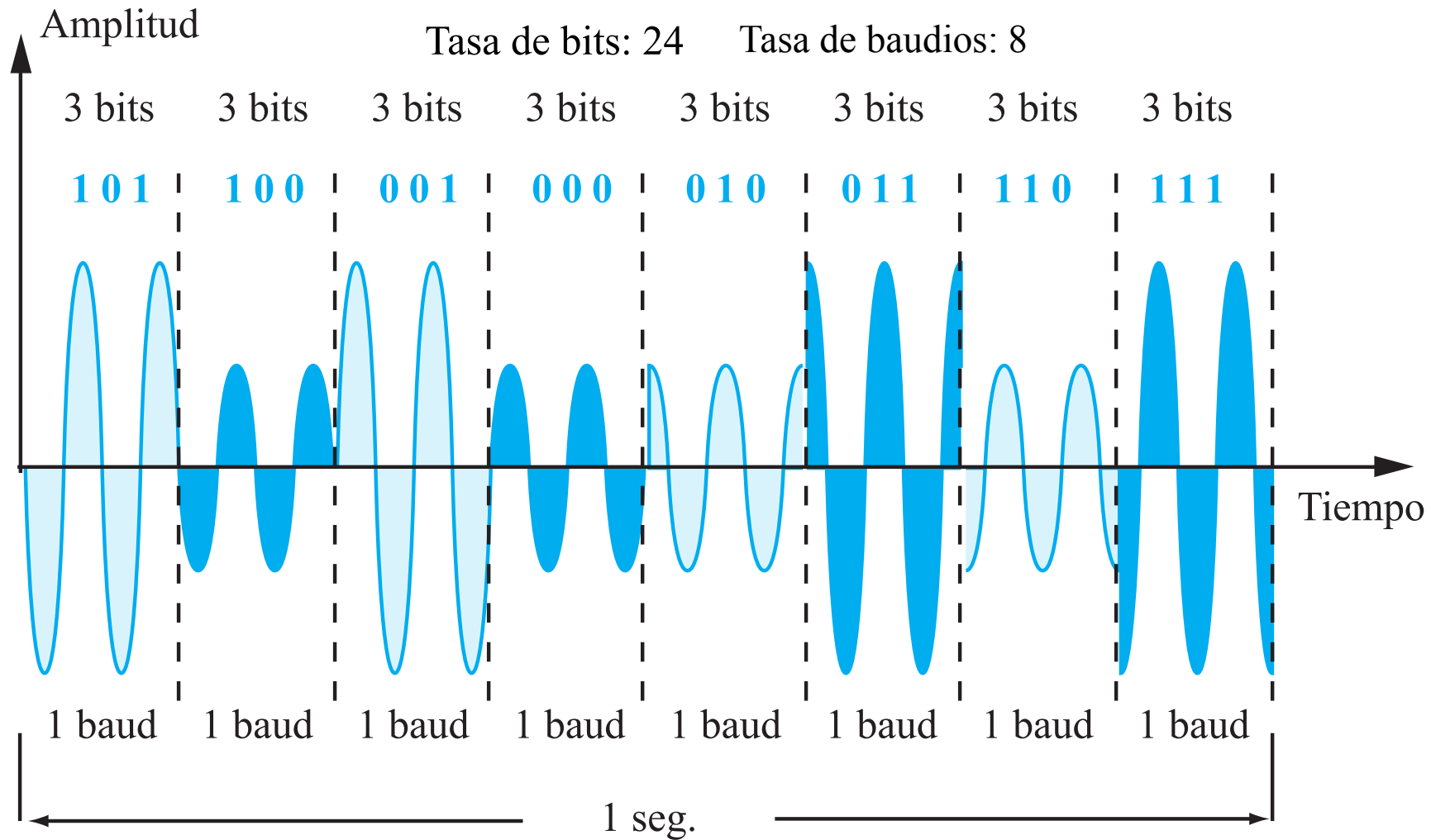


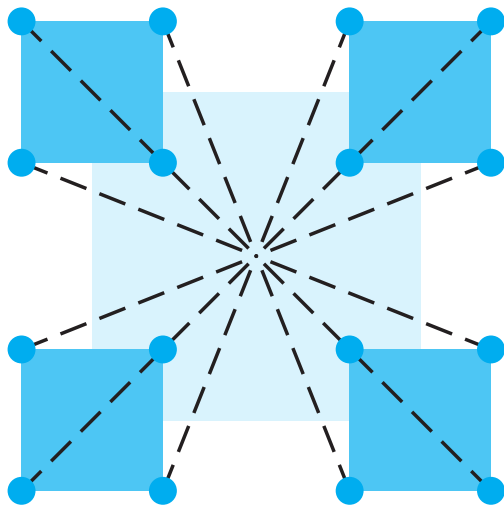
Diagrama de constelación

# Modulación 8-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*)



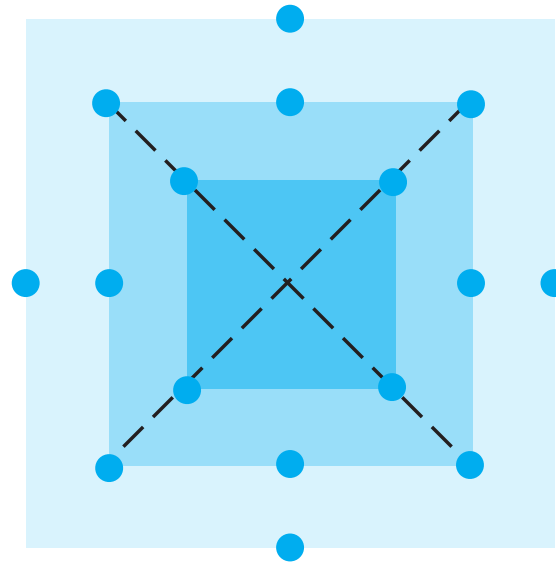
# Modulación 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*)

3 amplitudes  
12 fases



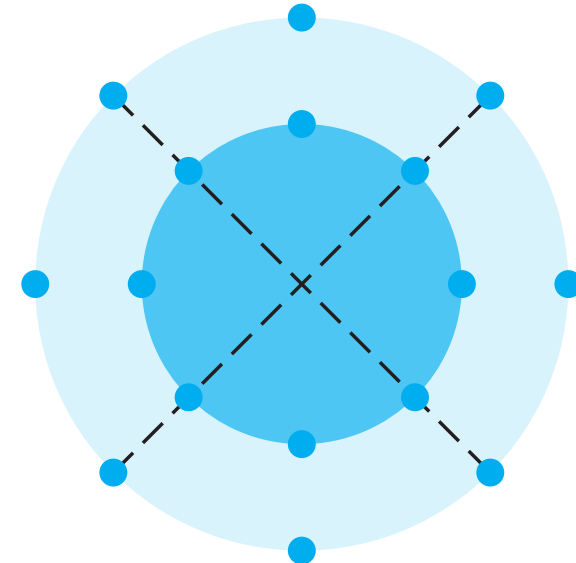
16-QAM

4 amplitudes  
8 fases



16-QAM

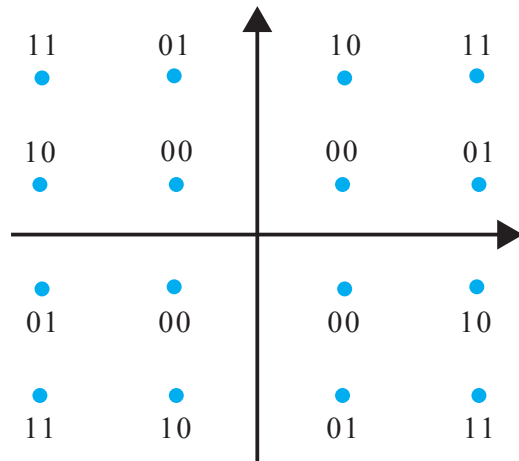
2 amplitudes  
8 fases



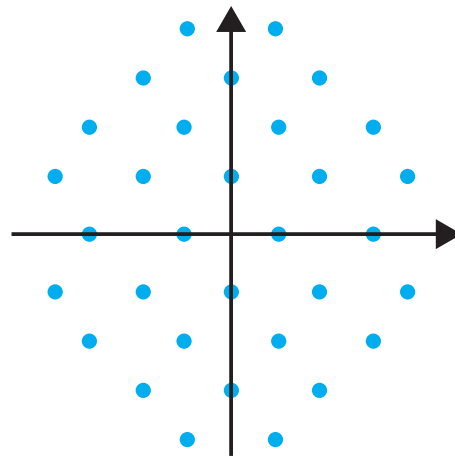
16-QAM

El ancho de banda requerido para la transmisión QAM es el mismo que para la transmisión ASK y PSK.

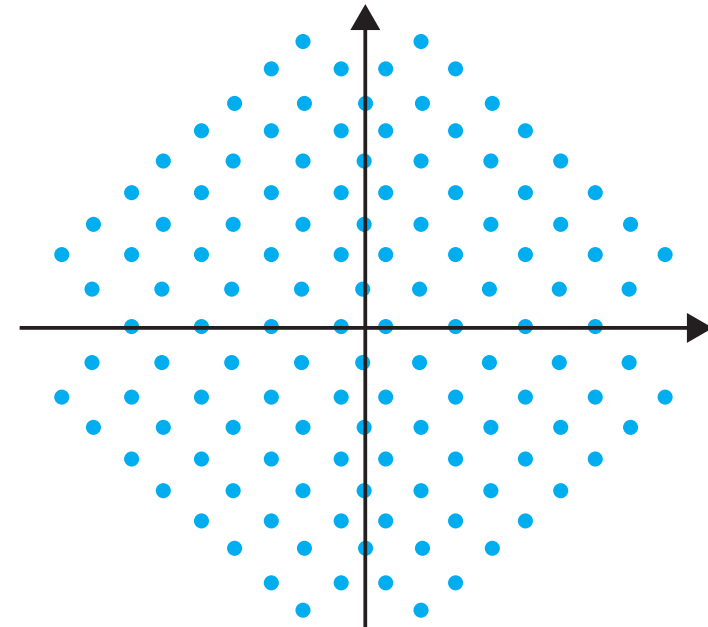
# Otras constelaciones QAM



Constelación V.22 bis  
16-QAM



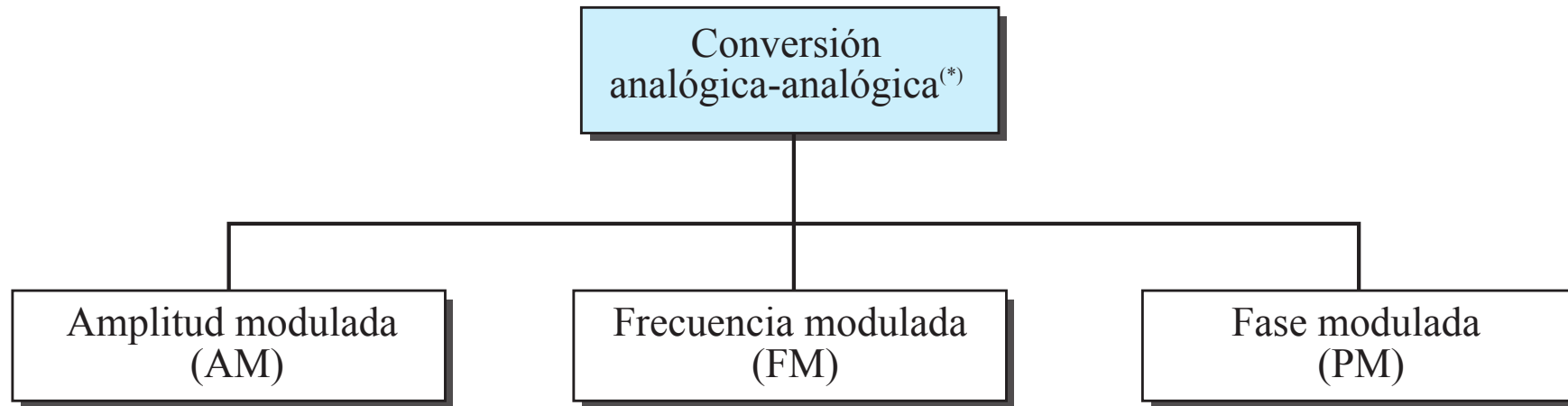
Constelación V.32  
32-QAM



Constelación V.33  
128-QAM

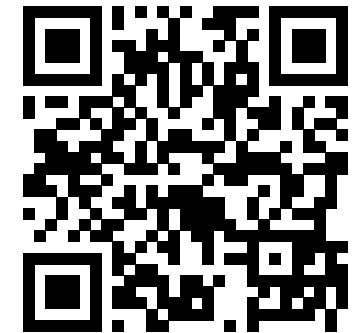
Las técnicas QAM se utilizan en dispositivos modems.

# Conversión analógico-analógico



(\*) Contenido fuera del alcance de esta asignatura.

1. Introducción a la transmisión de datos
2. Señales digitales
3. Perturbaciones en la transmisión
4. Transmisión digital
5. Transmisión analógica
- 6. Codificación de datos**
7. Multiplexación
8. Medios de transmisión
9. Líneas de abonado digital



# Conversión de datos y señales

Una de las formas más comunes de transmitir datos entre emisor y receptor es de forma textual mediante una secuencia de caracteres.

Para distinguir un carácter de otro, cada carácter se representa mediante un patrón binario único de 1s y 0s.

Al conjunto de todos los caracteres y símbolos junto a su correspondiente patrón binario, se denomina, **código de datos** o **sistema de codificación**.

Los más utilizados son: EBCDIC, ASCII y Unicode.

# EBCDIC

*Extended Binary Coded Decimal Interchange Code (EBCDIC).*

Utilizado por los mainframes de IBM.

Código de 8 bits, permitiendo  $2^8 = 256$  posibles combinaciones de símbolos.

Incluye mayúsculas, minúsculas, dígitos, símbolos especiales, puntuación.

Caracteres de control LF y CR.

Bits		4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
		3	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	
		2	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	
		1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	
8	7	6	5																
0	0	0	0	NUL	SOH	STX	EXT	PF	HT	LC	DEL			SMM	VT	FF	CR	SO	SI
0	0	0	1	DLE	DC <sub>1</sub>	DC <sub>2</sub>	DC <sub>3</sub>	RES	NL	BS	IL	CAN	EM	CC		IFS	IGS	IHS	IUS
0	0	1	0	DS	SOS	FS		BYP	LF	EOB	PRE			SM			ENQ	ACK	BEL
0	0	1	1			SYN		PN	RS	UC	EOT					DC <sub>4</sub>	NAK		SUB
0	1	0	0	SP												<	(	+	
0	1	0	1	&										!	\$	.	)	:	⌋
0	1	1	0	—												%	-	>	?
0	1	1	1												@		=	"	
1	0	0	0		a	b	c	d	e	f	g	h	i						
1	0	0	1		j	k	l	m	n	o	p	q	r						
1	0	1	0			s	t	u	v	w	x	y	z						
1	0	1	1																
1	1	0	0		A	B	C	D	E	F	G	H	I						
1	1	0	1		J	K	L	M	N	O	P	Q	R						
1	1	1	0			S	T	U	V	W	X	Y	Z						
1	1	1	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9						

# ASCII

*American Standard Code for Information Interchange (ASCII).*

Código de 7 bits, permitiendo  $2^7 = 128$  posibles combinaciones de símbolos.

Es el sistema de codificación más utilizado, estandarizado por el gobierno de EE.UU.

Incluye mayúsculas, minúsculas, dígitos, símbolos especiales, puntuación.

Caracteres de control LF y CR.

El octavo bit se utiliza para detección de errores.

		High-Order Bits (7, 6, 5)							
		000	001	010	011	100	101	110	111
Low-Order Bits (4, 3, 2, 1)	0000	NUL	DLE	SPACE	0	@	P	`	p
	0001	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
	0010	STX	DC2	"	2	B	R	b	r
	0011	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
	0100	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t
	0101	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
	0110	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
	0111	BEL	ETB	`	7	G	W	g	w
	1000	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
	1001	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
	1010	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
	1011	VT	ESC	+	;	K	[	k	{
	1100	FF	FS	'	<	L	\	l	
	1101	CR	GS	-	=	M	]	m	}
	1110	SO	RS	.	>	N	^	n	~
	1111	SI	US	/	?	O	_	o	DEL

# Unicode

Uno de los inconvenientes de EBCDIC y ASCII que sólo pueden representar símbolos en lenguaje inglés.

Es un código de 16 bits.

Tampoco puede representar símbolos técnicos utilizados en matemáticas e ingeniería.

Unicode proporciona valores de codificación para cada carácter y para cada lenguaje, independiente de la plataforma.

ASCII está soportado por Unicode.

Actualmente, soporta más de 110 lenguajes.

`www.unicode.org`

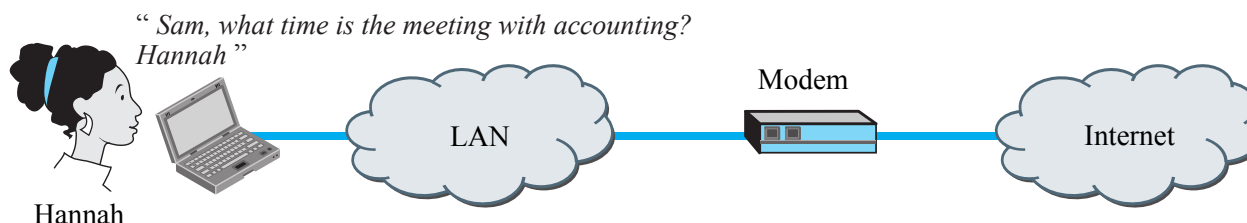
# Ejemplo de codificación

El mensaje “*Transfer \$1200.00*” sería:

Texto	EBCDIC	ASCII	Unicode
T	1110 0011	1010100	0000 0000 0101 0100
r	1001 1001	1110010	0000 0000 0111 0010
a	1000 0001	1100001	0000 0000 0110 0001
n	1001 0101	1101110	0000 0000 0110 1110
s	1010 0010	1110011	0000 0000 0111 0011
f	1000 0110	1100110	0000 0000 0110 0110
e	1000 0101	1100101	0000 0000 0110 0101
r	1001 1001	1110010	0000 0000 0111 0010
space	0100 0000	0100000	0000 0000 0010 0000
\$	0101 1011	0100100	0000 0000 0010 0100
1	1111 0001	0110001	0000 0000 0011 0001
2	1111 0010	0110010	0000 0000 0011 0010
0	1111 0000	0110000	0000 0000 0011 0000
0	1111 0000	0110000	0000 0000 0011 0000
.	0101 1100	0101110	0000 0000 0010 1110
0	1111 0000	0110000	0000 0000 0011 0000
0	1111 0000	0110000	0000 0000 0011 0000

# Conversión datos a señal: ejemplo

Suponemos el envío del siguiente mensaje mediante e-mail:

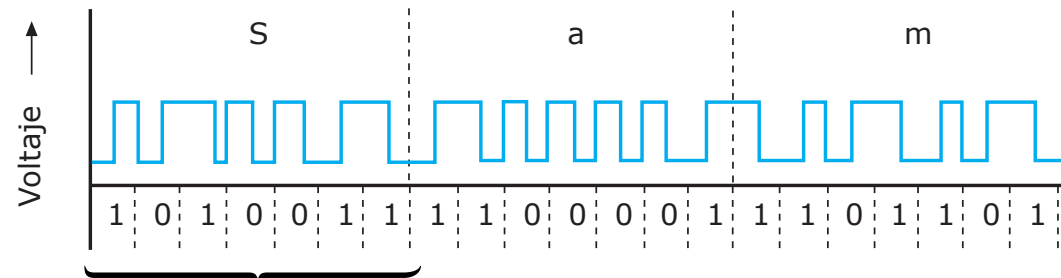


Suponemos que el software utiliza ASCII, por el tanto, el texto codificado ASCII:

Cadena ASCII:	1010011	1100001	1101101	...
Mensaje:	S	a	m	...

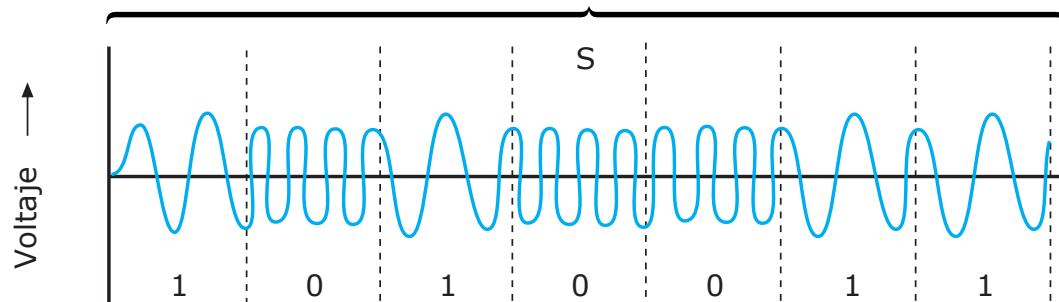
## Digital → digital:

El mensaje ASCII (digital) se transmite sobre la LAN, utilizando Manchester diferencial (digital).

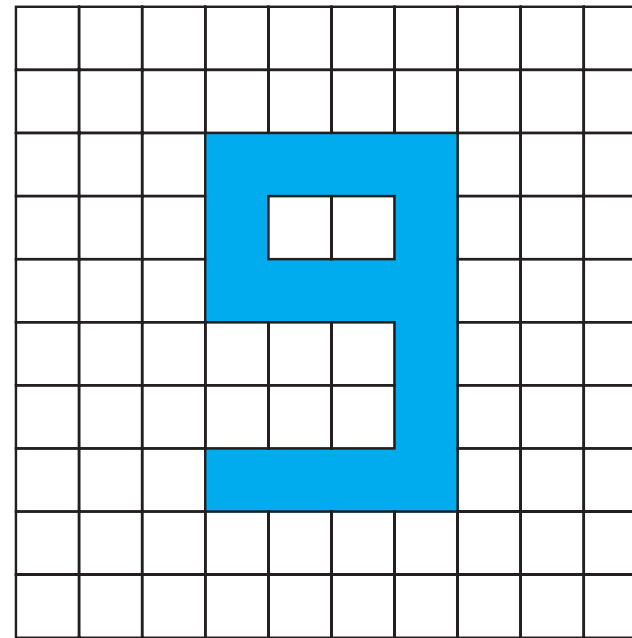
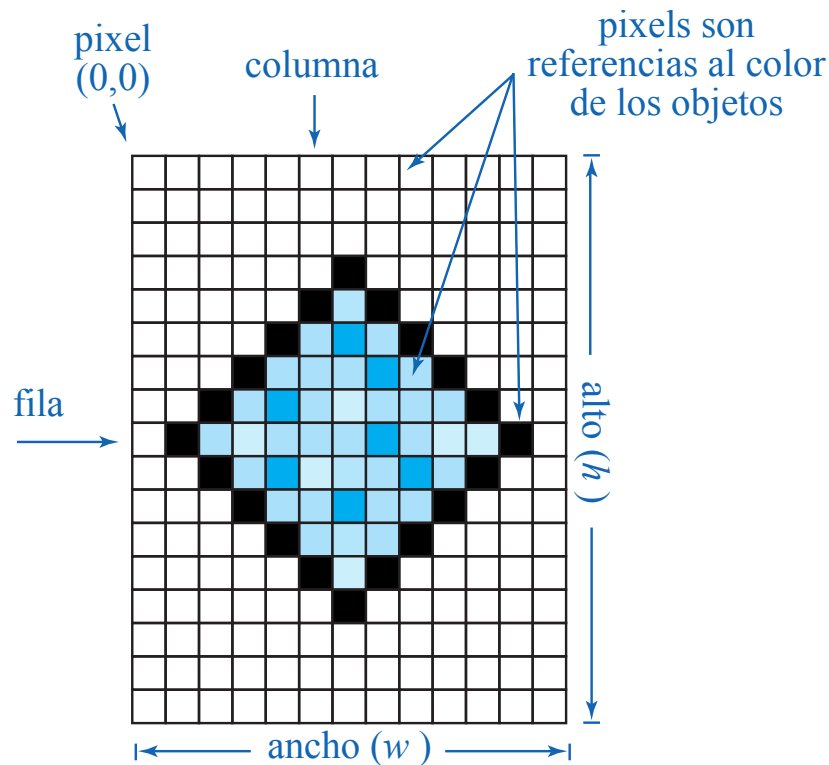


## Digital → analógico:

El modem convierte la señal digital en analógica (FSK) para viajar por medios analógicos en Internet.



# Codificación digital de imágenes



0000000000  
0000000000  
000**1111**000  
000**1001**000  
000**1111**000  
000000**1000**  
000000**1000**  
000**1111**000  
0000000000  
0000000000

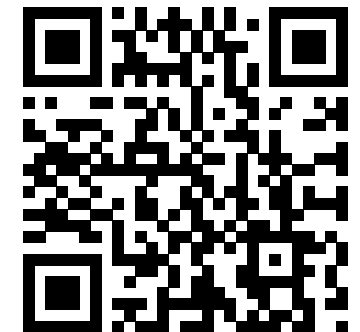
(b) Código binario

Una imagen digital es una rejilla rectangular de **pixels** (elementos de imagen) donde el color de cada pixel se define de forma individual.

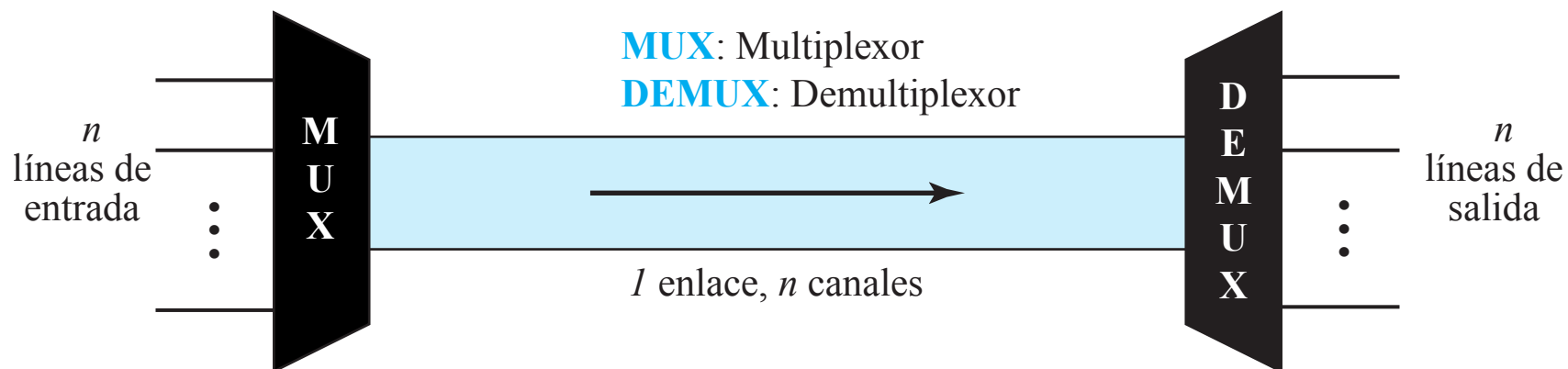
Por lo tanto, la cantidad de bits necesarios para codificar una imagen digital de  $w \times h$  pixels y  $L$  colores (o tonos):

$$bits = w \cdot h \cdot \log_2 L$$

1. Introducción a la transmisión de datos
2. Señales digitales
3. Perturbaciones en la transmisión
4. Transmisión digital
5. Transmisión analógica
6. Codificación de datos
- 7. Multiplexación**
8. Medios de transmisión
9. Líneas de abonado digital



# Multiplexación



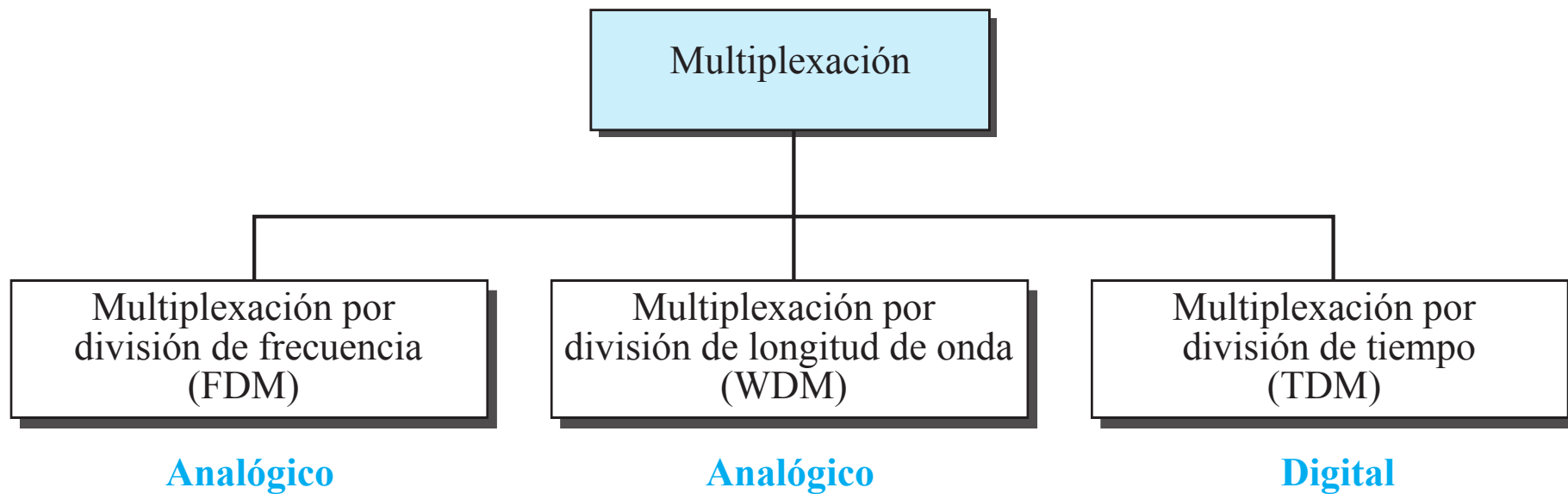
La **multiplexación** es el conjunto de técnicas que permite la transmisión simultánea de múltiples señales a lo largo de un enlace.

En un sistema multiplexado,  $n$  líneas comparten el ancho de banda del enlace.

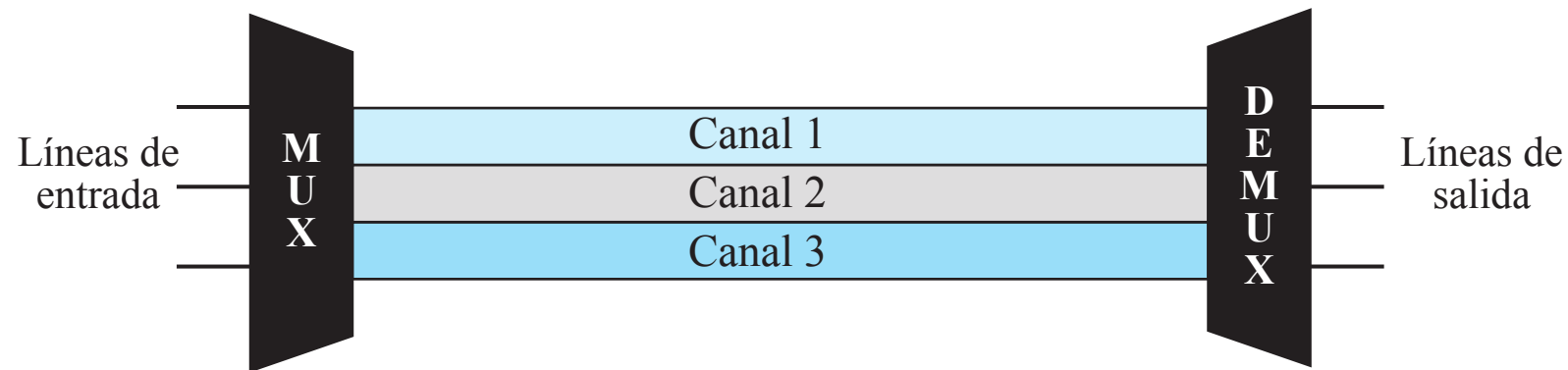
El **multiplexor (MUX)** combina las líneas en un sólo flujo de datos (muchos a uno).

En el **demultiplexor (DEMUX)**, separa el flujo de datos en cada una de las transmisiones (muchos a uno) y lo envía a la línea correspondiente.

# Multiplexación

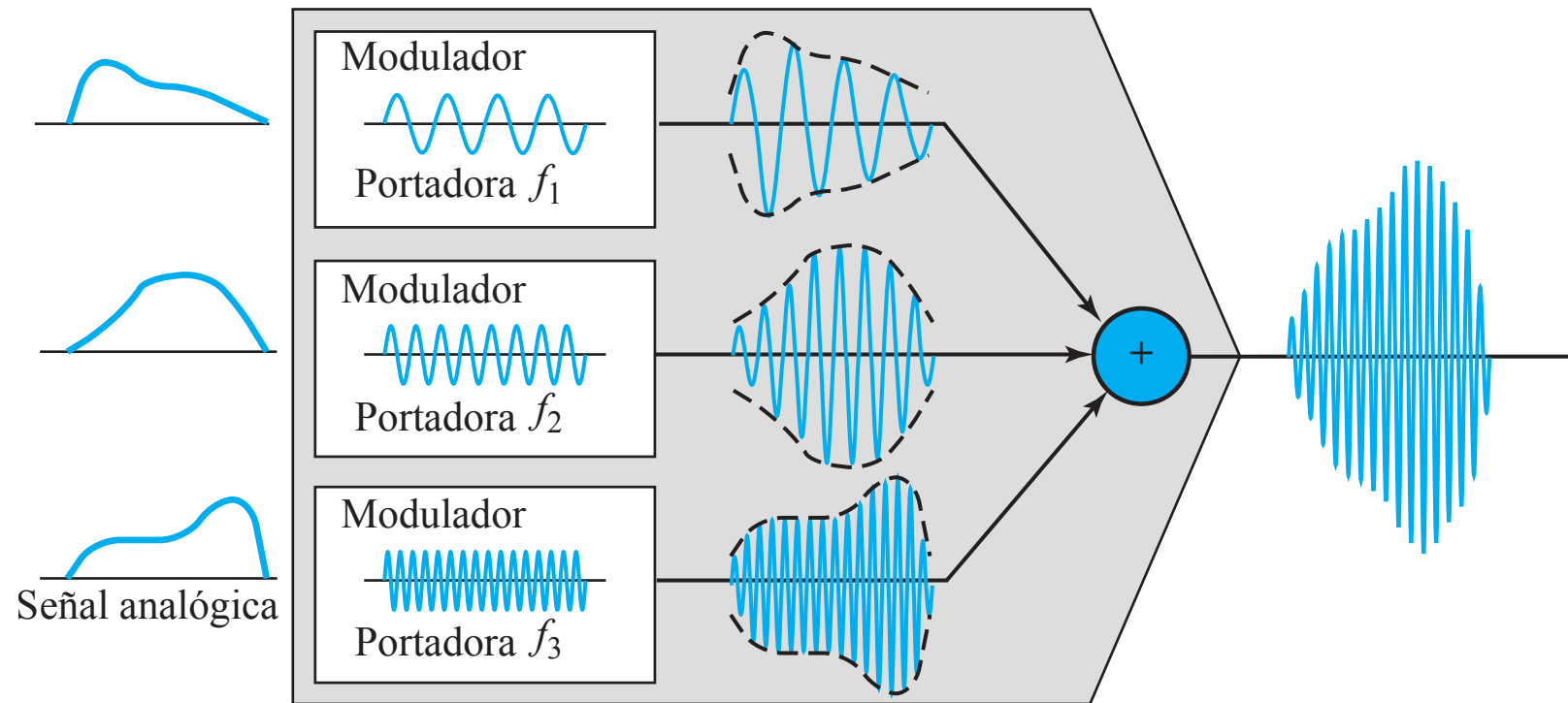


# FDM, *Frequency-division multiplexing*



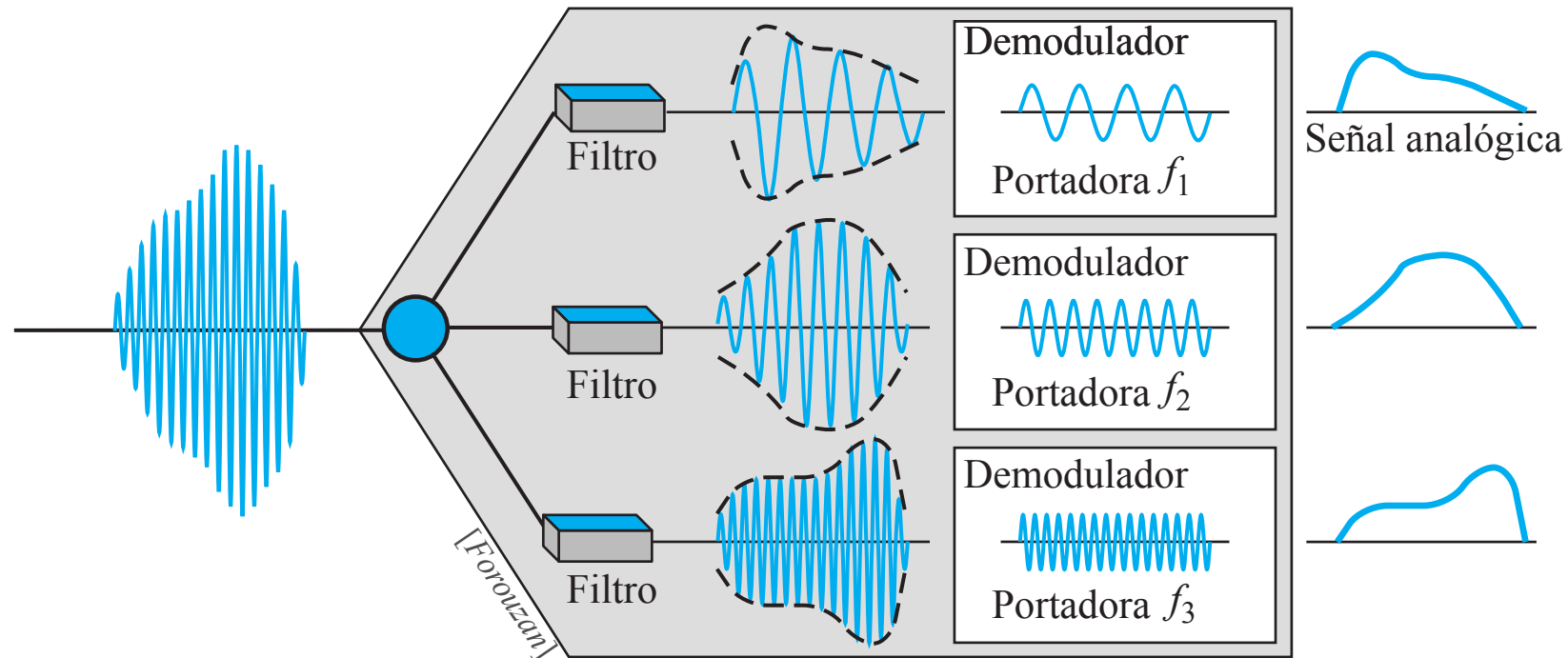
La **multiplexación por división de frecuencia (FDM)** es una técnica **analógica** que se aplica cuando el ancho de banda de un enlace (en Hz) es mayor que el ancho de banda de las señales a transmitir.

# FDM: multiplexor



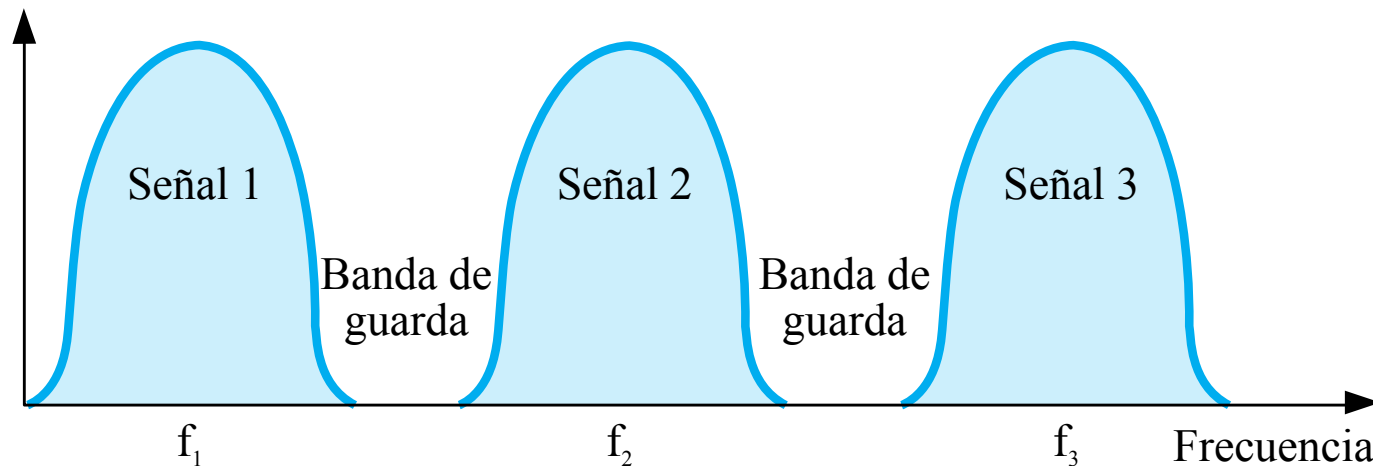
En el MUX, diferentes señales analógicas se modulan sobre diferentes portadoras, y posteriormente, combinada en una señal analógica.

# FDM: demultiplexor



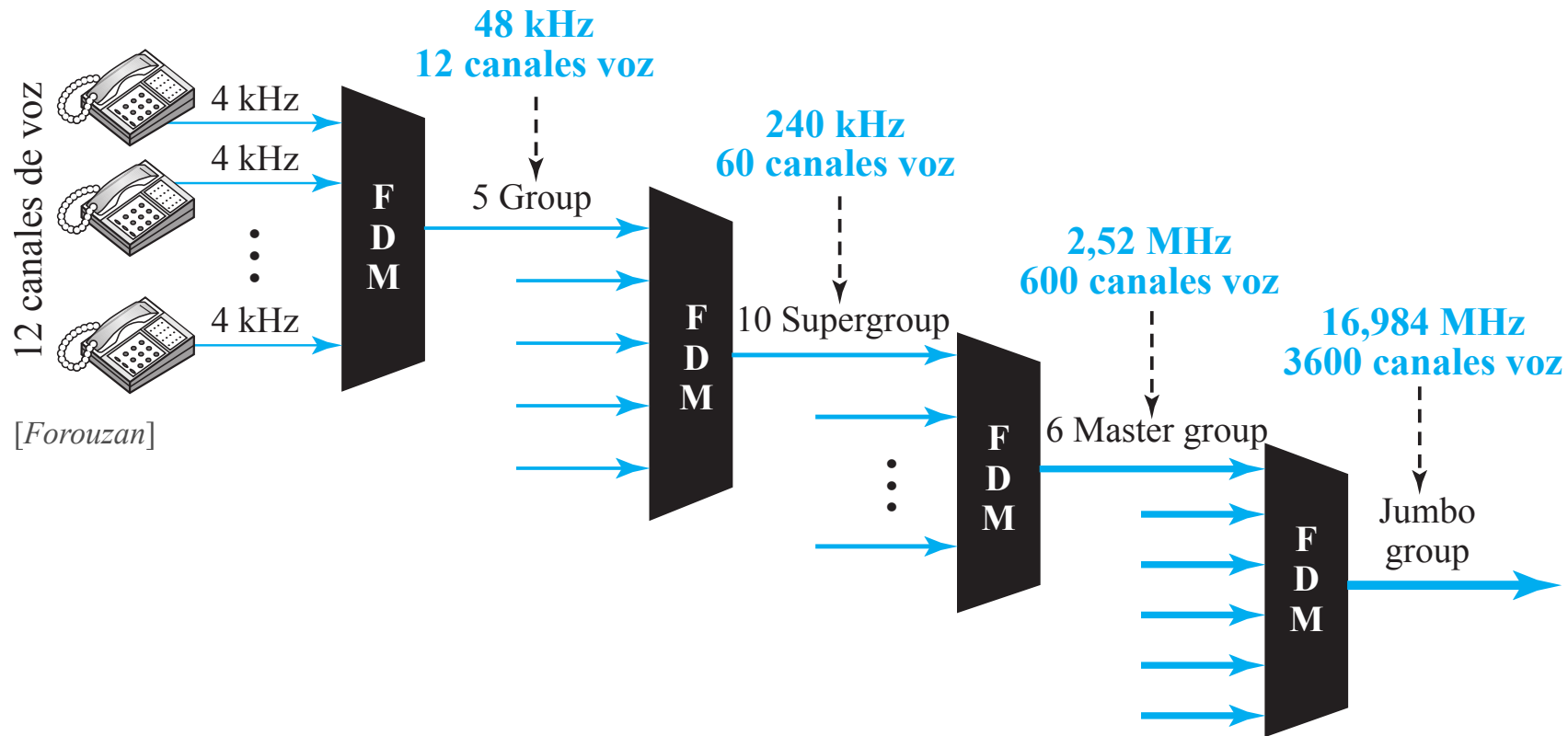
En el DEMUX, la señal analógica combinada se descompone en las diferentes portadoras mediante el uso de filtros, demodulada y enviadas a los dispositivos correspondientes.

# FDM: bandas de guarda



Las **bandas de guarda** establecen una separación entre los diferentes canales para evitar interferencias.

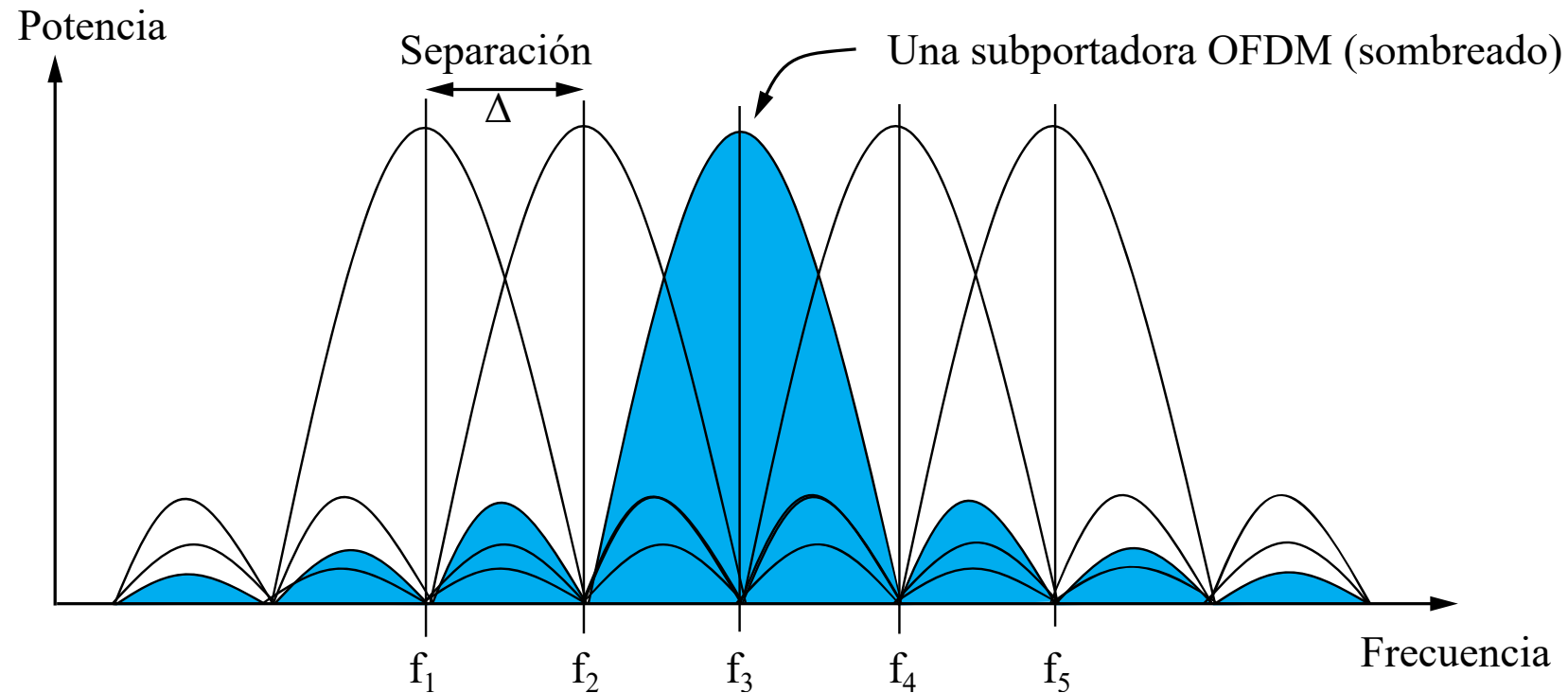
# Jerarquía analógica



Tradicionalmente, y con el fin de maximizar la eficiencia de su infraestructura, las compañías telefónicas han multiplexado líneas de bajo ancho de banda en otras de ancho de banda superior, de esta forma, líneas conmutadas o alquiladas son combinadas en canales más grandes.

Para líneas analógicas han utilizado FDM.

# OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)



Cuando se envían datos digitales, es posible dividir el espectro eficientemente sin utilizar bandas de guarda.

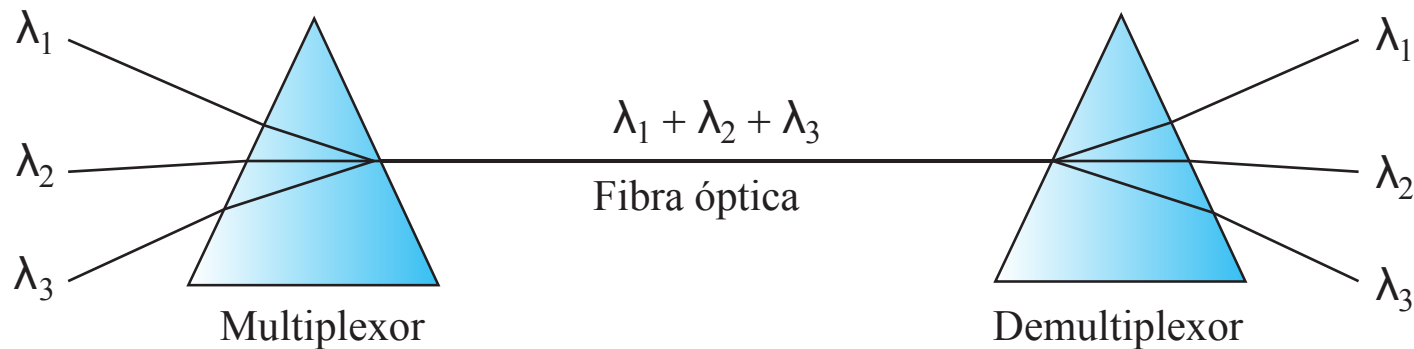
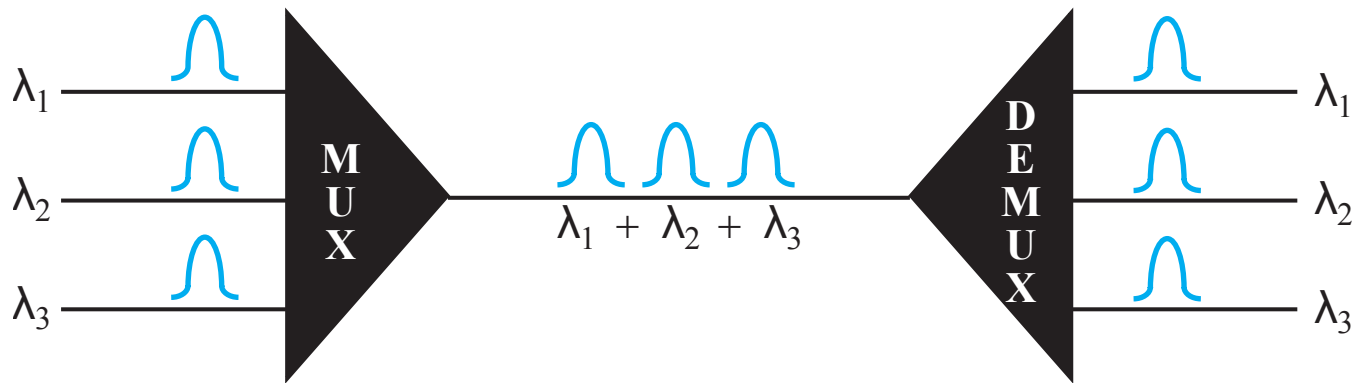
En OFDM, el canal se divide en diferentes subportadoras, que envían la información (bits), de forma independiente (QAM).

Las subportadoras están estrechamente empaquetadas en el dominio de la frecuencia. Por lo tanto, las señales de cada subportadora se extienden a las adyacentes.

Cada subportadora está diseñada para que sea cero en el centro de las subportadoras adyacentes. Por lo tanto, las subportadoras pueden muestrearse en sus frecuencias centrales sin interferencia de sus vecinas.

IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.16 (WiMax)

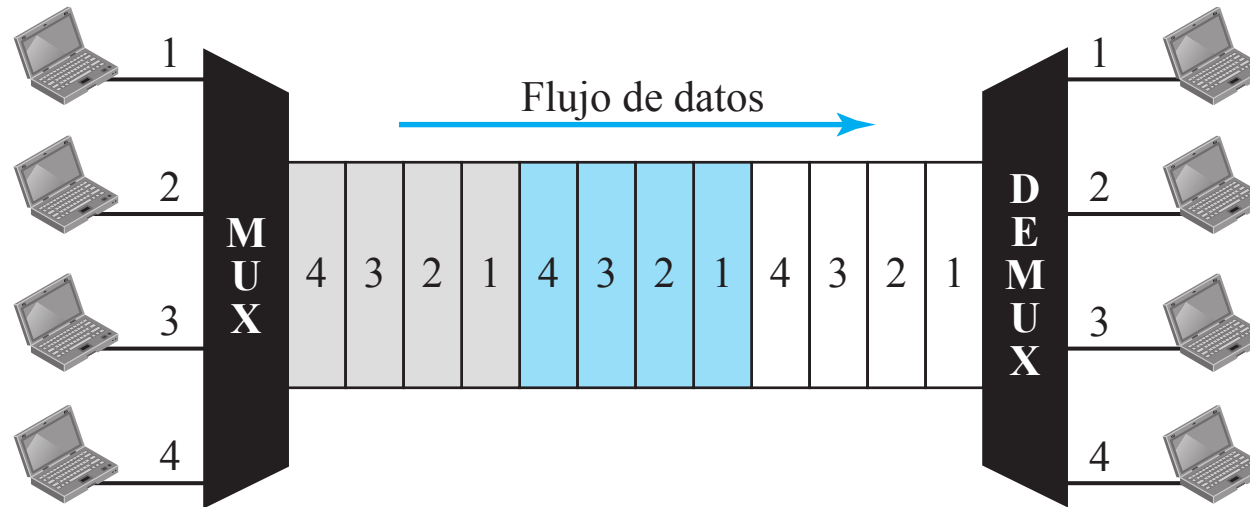
# WDM, *Wavelength-division multiplexing*



La **multiplexación por división de longitud (WDM)** de onda ha sido diseñado para altas tasas de transmisión en **fibra óptica**.

Conceptualmente, WDM es lo mismo que FDM, la combinación de señales ópticas (señales analógicas a muy altas frecuencias) transmitidos sobre canales de fibra óptica.

# TDM, *Time-division multiplexing* (I)



La **multiplexación por división de tiempo** es un proceso **digital** que permite a diferentes conexiones compartir un enlace de gran ancho de banda.

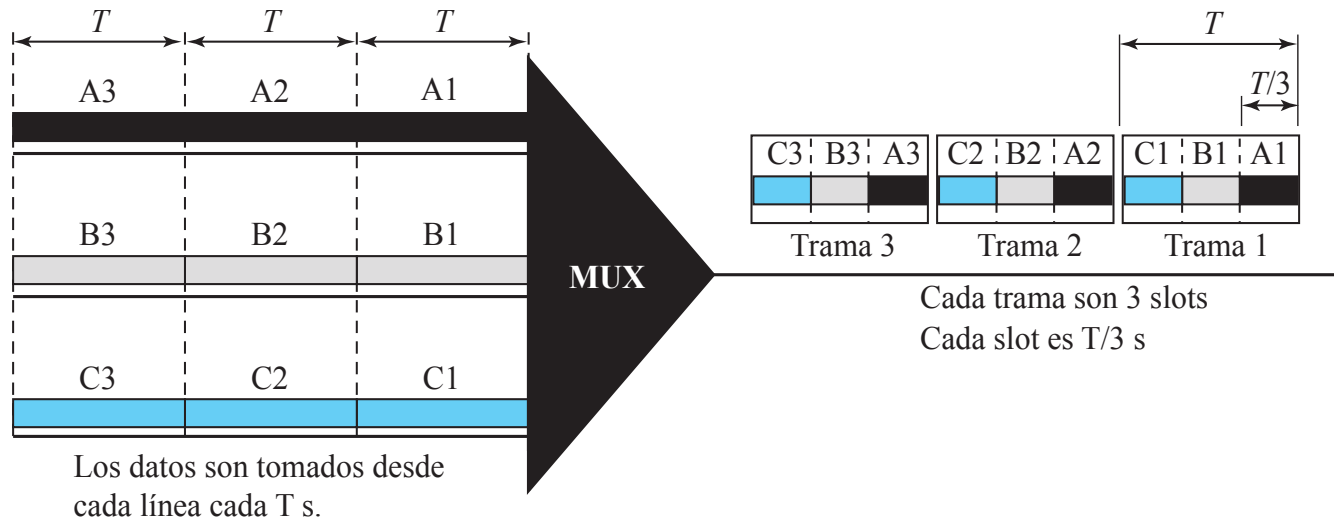
En lugar de ocupar una porción (como en FDM), se comparte el tiempo.

Cada conexión ocupa un tiempo del enlace.

Tipos de TDM: **síncrona** y **estadística**.

# TDM síncrona

En TDM síncrona, cada conexión tiene una asignación en la señal multiplexada, incluso aunque no tenga datos para enviar.



El flujo de datos de cada conexión se divide en unidades, y cada unidad ocupa un slot de tiempo: puede ser 1 bit, 1 byte o bloque de datos.

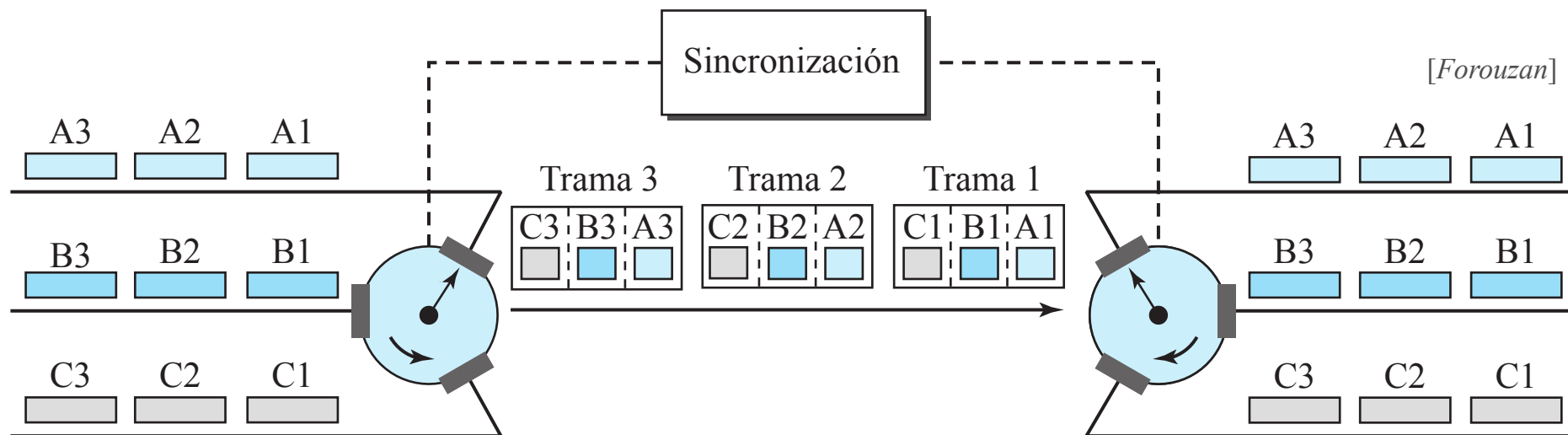
Cada unidad de entrada, se convierte en una unidad de salida y ocupa un slot.

La duración de cada slot de salida es  $n$  veces más pequeño que la duración de un slot de entrada.

Si un slot de entrada es  $T$  s, entonces el slot de salida será  $T/n$  s, siendo  $n$  el número de conexiones.

En TDM, la tasa de datos tiene que ser  $n$  veces más rápido y la duración del slot  $n$  veces más pequeña.

# TDM síncrona: entrelazado



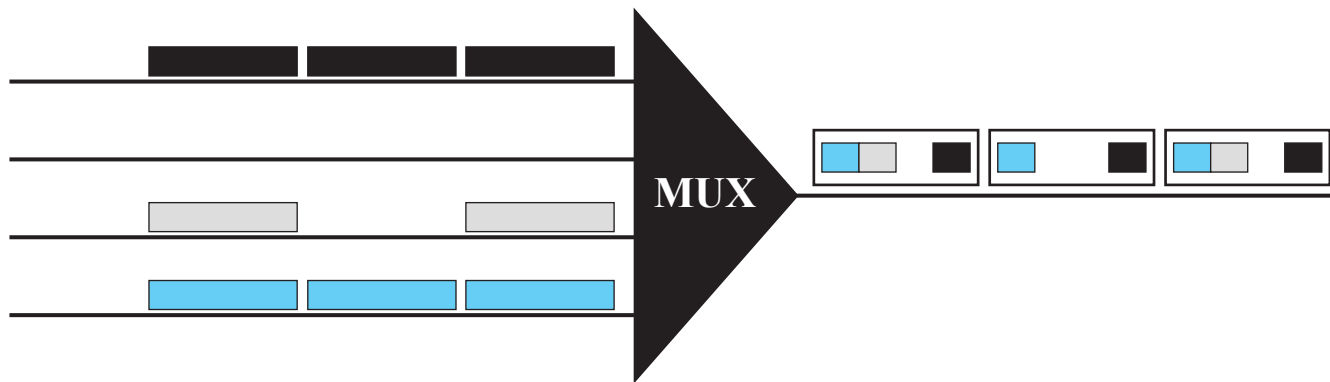
TDM se puede asimilar a dos conmutadores rotativos rápidos.

Los conmutadores están sincronizados y rotan a la misma velocidad, pero en direcciones opuestas, de manera que van aceptando las porciones de datos de las conexiones y enviando al medio.

En el destino, a partir de la rotación, van entregando las porciones de datos a los dispositivos destino.

# TDM síncrona: inconvenientes

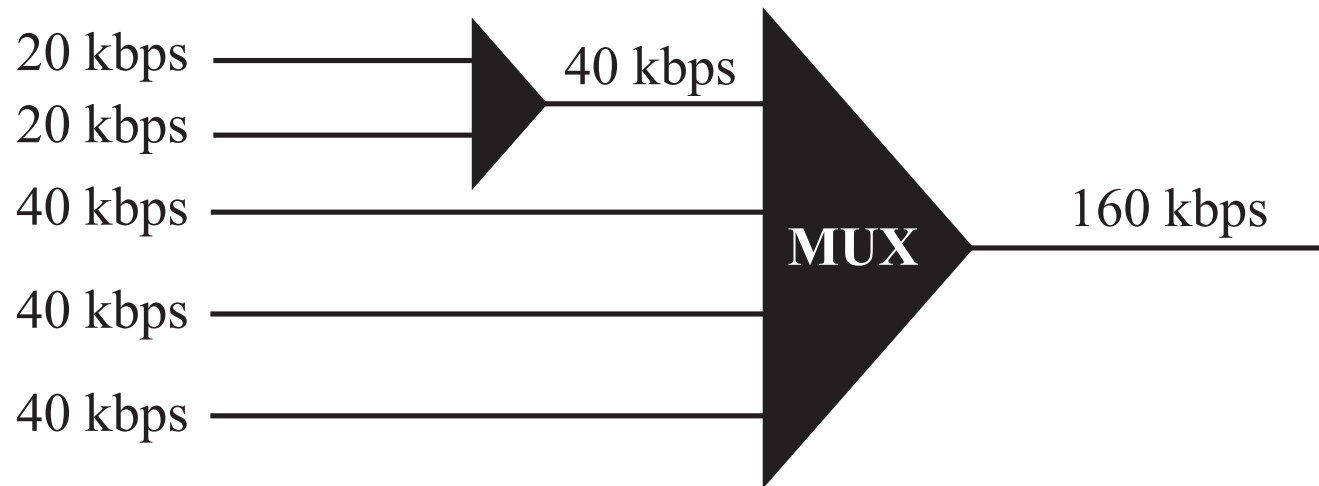
**Slots vacíos:** TDM síncrona no es eficiente porque si una fuente no tiene datos para enviar, el correspondiente slot de la trama de salida viajará vacío.



**Gestión de tasas de datos:** Para la gestión de tasas de datos diferentes, se han propuesto varias estrategias (o combinación de ellas):

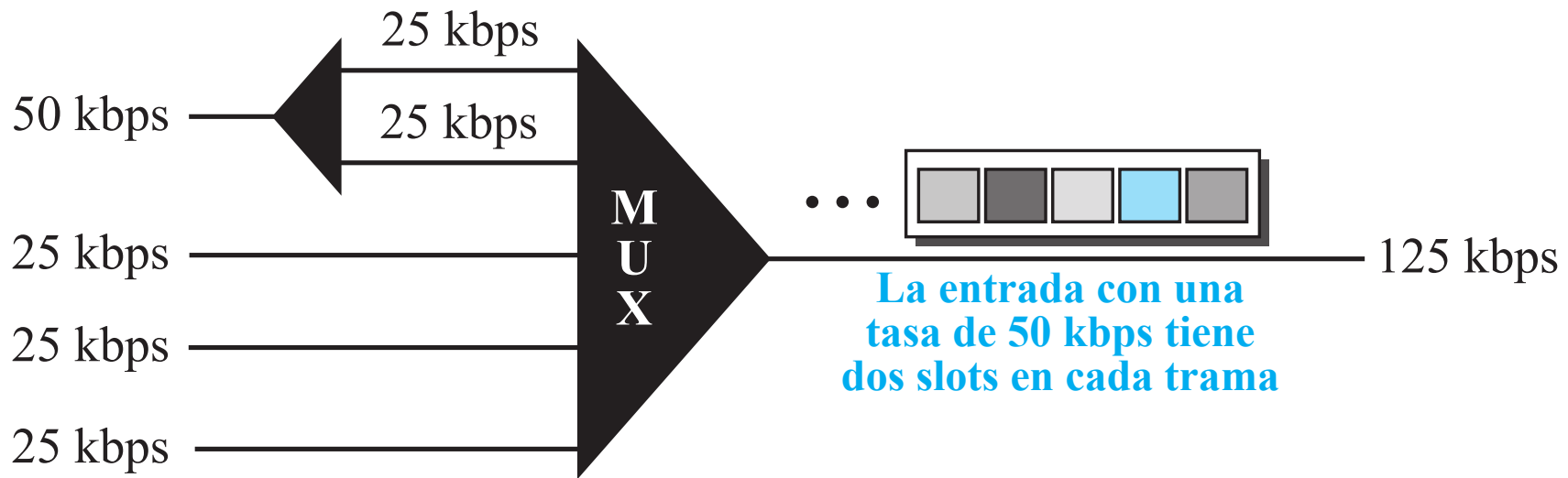
- Multiplexión multinivel
- Asignación multi-slot
- Inserción de pulsos

# TDM: Multiplexión multinivel



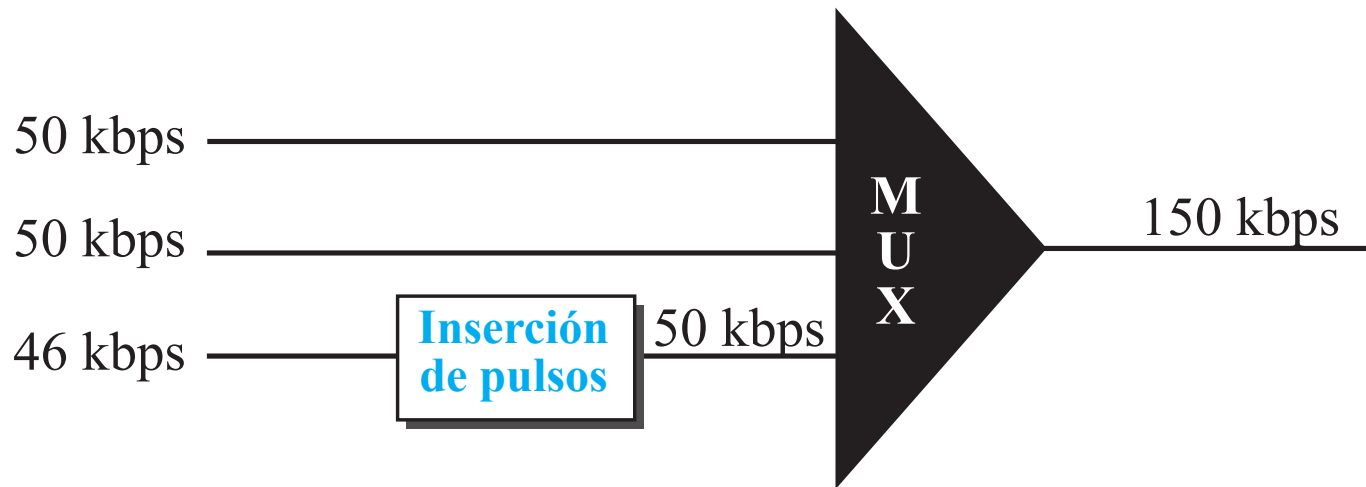
La multiplexión multinivel se utiliza cuando la tasa de datos de una entrada es múltiplo de otras.

# TDM: Asignación multi-slot



Algunas veces es más eficiente permitir más de un slot en una trama procedente de la misma línea de entrada.

# TDM: Inserción de pulsos



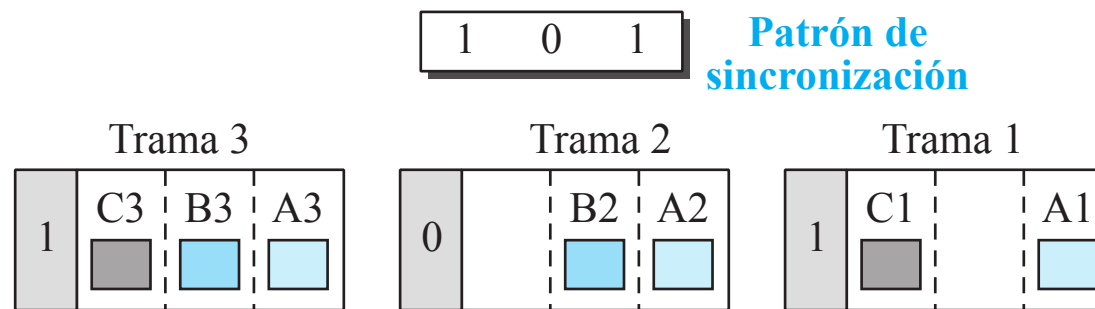
Cuando la tasa de datos de alguna fuente no es múltiplo entero de las otras.

Tampoco se pueden aplicar ninguna de las técnicas anteriores.

La solución es insertar pulsos para elevar la tasa de datos y equiparar al resto de fuentes.

Inserta bits (pulsos) ficticios en la línea con menor tasas de datos.

# TDM síncrona: bits de sincronización



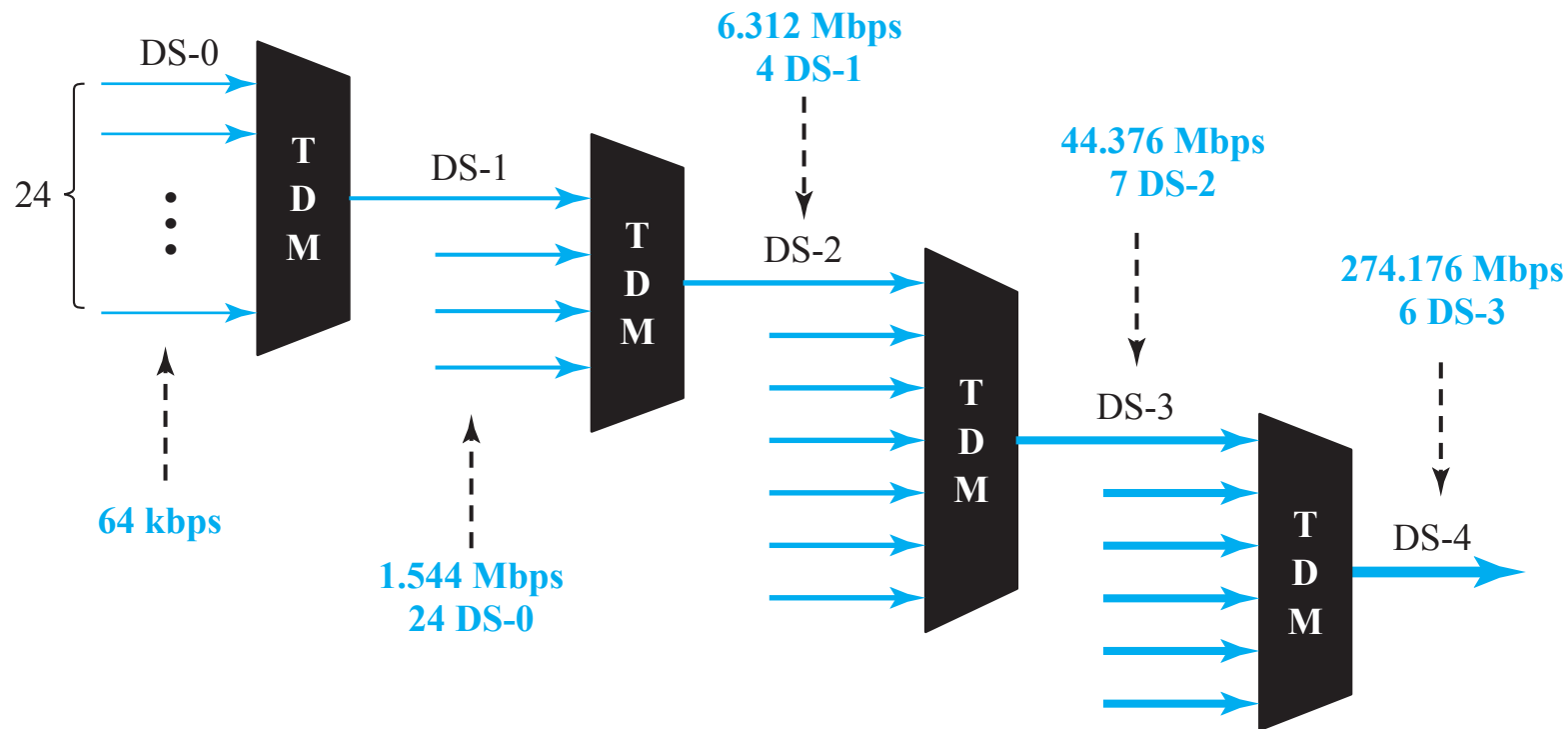
La sincronización entre multiplexor y demultiplexor es de vital importancia: *si falla la sincronización, los bits contenidos en el canal pueden ser recibidos por una conexión equivocada.*

Para conseguir la sincronización, se añaden uno o varios bits de sincronización al principio de cada trama, denominados **bits de entramado** o **bits de sincronización**.

Los bits de sincronización siguen un patrón trama a trama, y permite al demultiplexor conseguir la sincronización así como separar los slots de forma correcta.

Habitualmente es una secuencia de 0s y 1s de forma alternada.

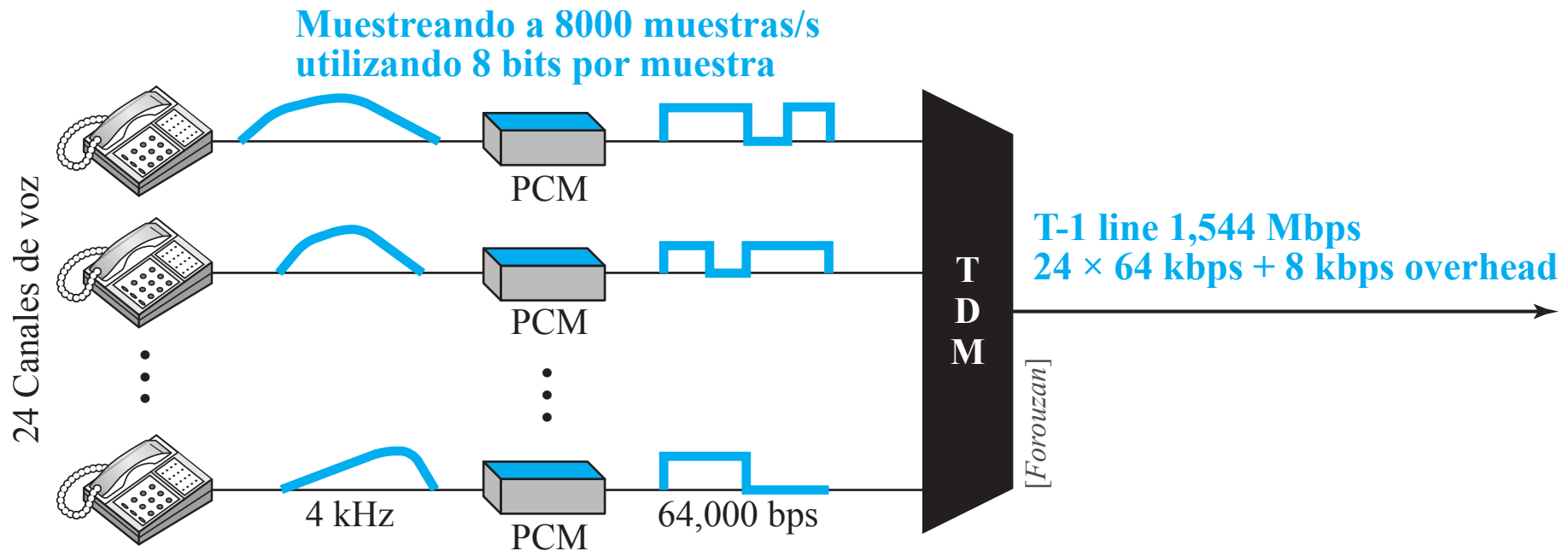
# TDM síncrona: jerarquía digital



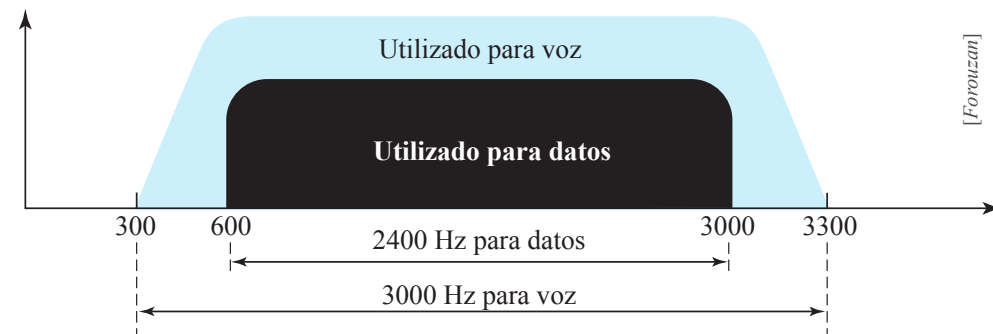
El despliegue de las **redes telefónicas digitales** se ha desarrollado mediante la jerarquía digital.

<i>Servicio</i>	<i>Linea</i>	<i>Tasa (Mbps)</i>	<i>Canales de voz</i>
DS-1	T-1	1.544	24
DS-2	T-2	6.312	96
DS-3	T-3	44.736	672
DS-4	T-4	274.176	4032

# Línea T para multiplexación de líneas telefónicas

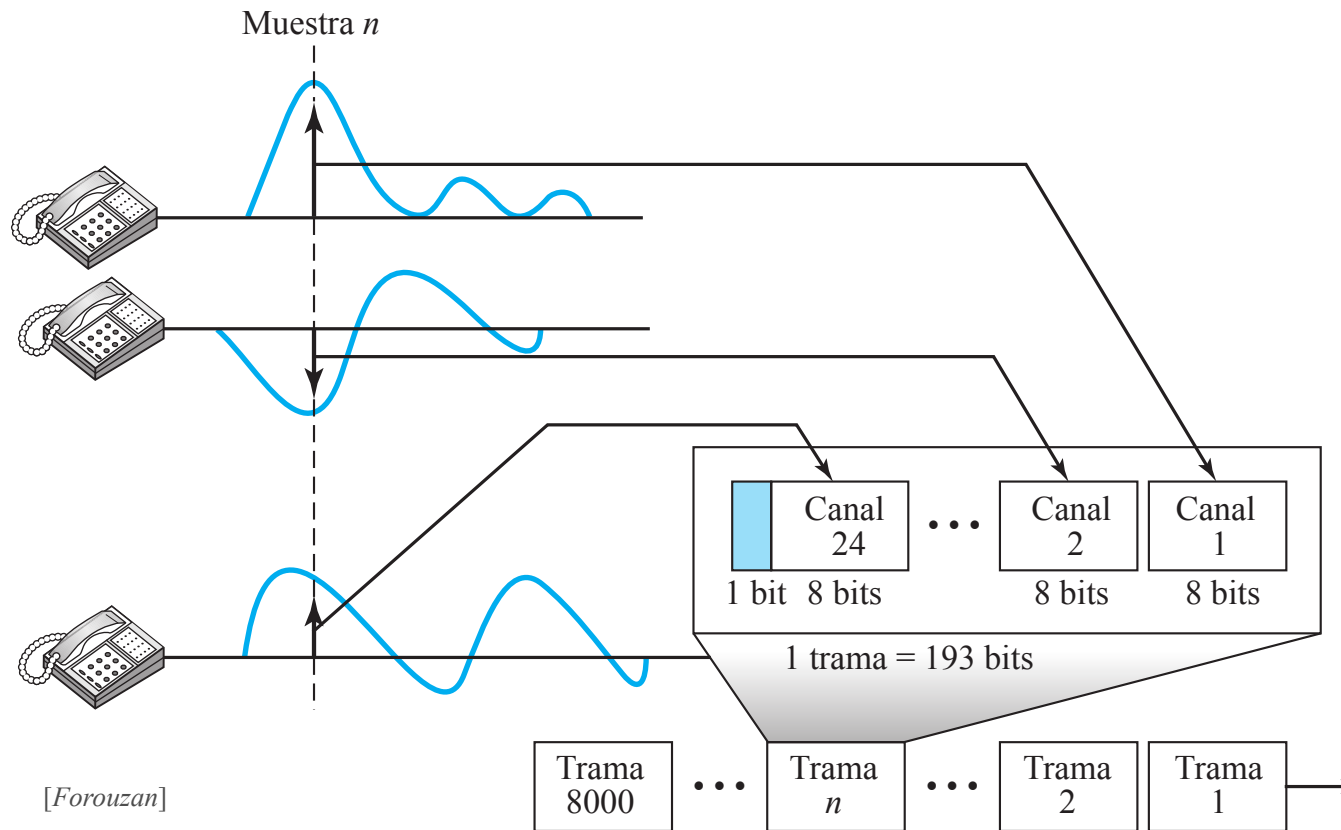


Las líneas T se diseñan para transmisión digital, aunque también se pueden utilizar para transmisión analógica (teléfono convencional), para lo que utiliza muestreo de señales analógicas (PCM) y TDM.



Se establece la frecuencia máxima para la transmisión de voz en 4000 Hz, de ahí la frecuencia de muestreo a 8000 Hz.

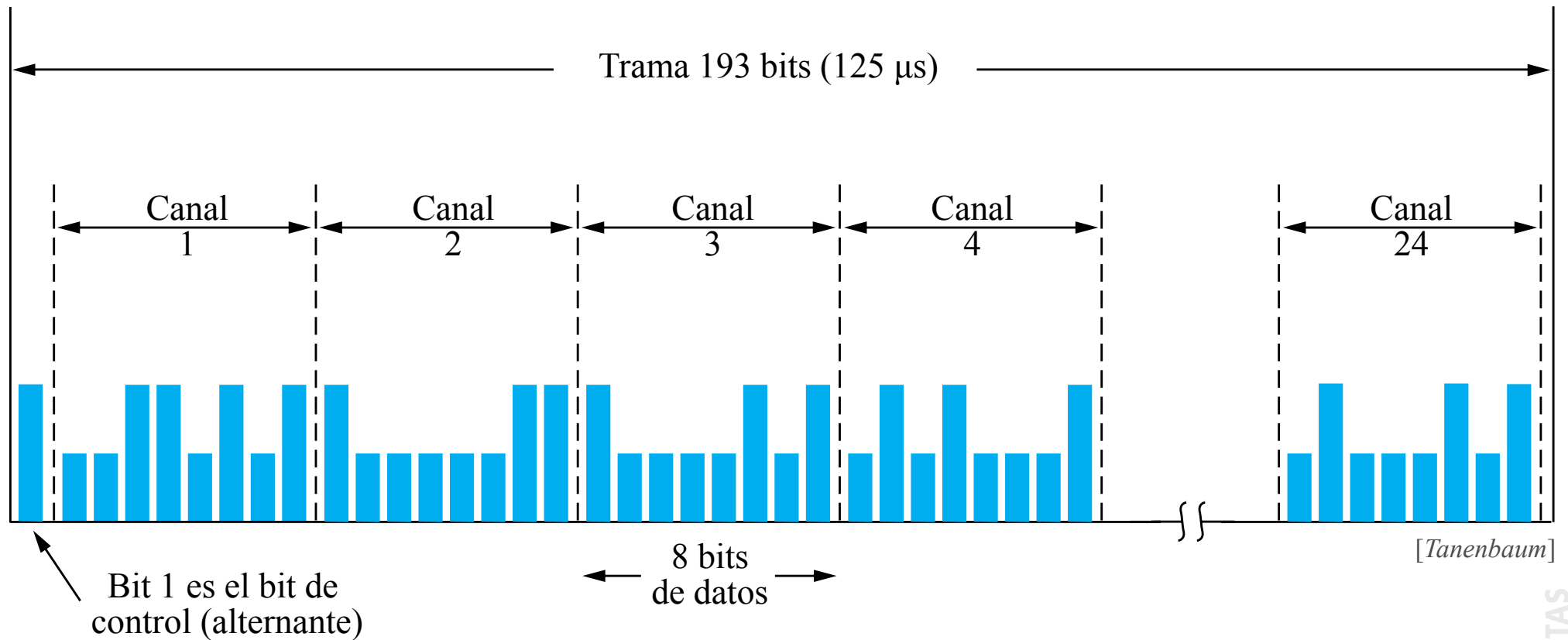
# Estructura de trama T1 (I)



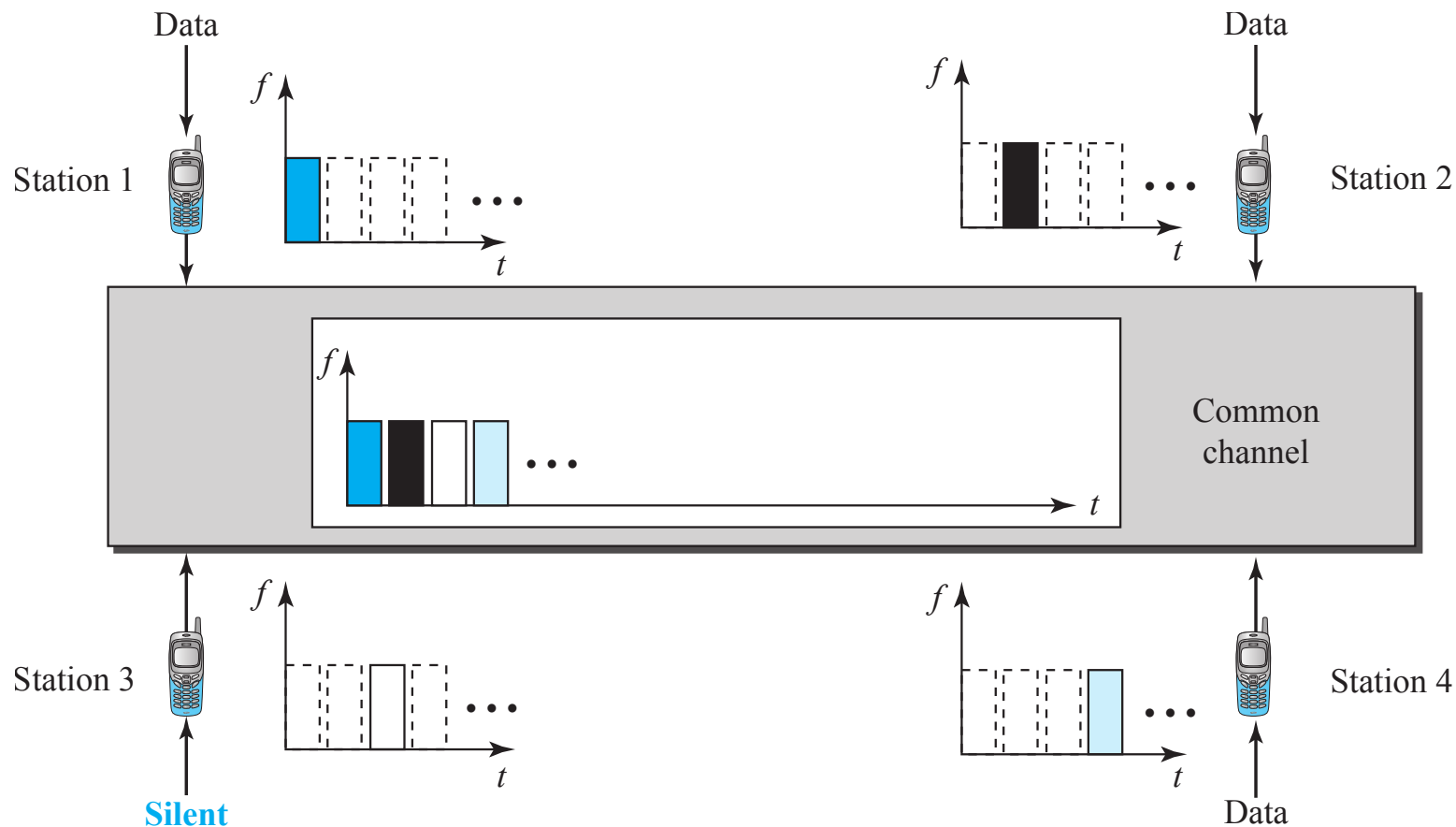
$$\text{T-1: } 8000 \text{ tramas/s} = 8000 \times 193 \text{ bps} = 1,544 \text{ Mbps}$$

DS-1 requiere 8 kbps de overhead, utilizado para los bits de sincronización en transmisión analógica sobre T1 mediante PCM.

# Estructura de trama T1 (II)

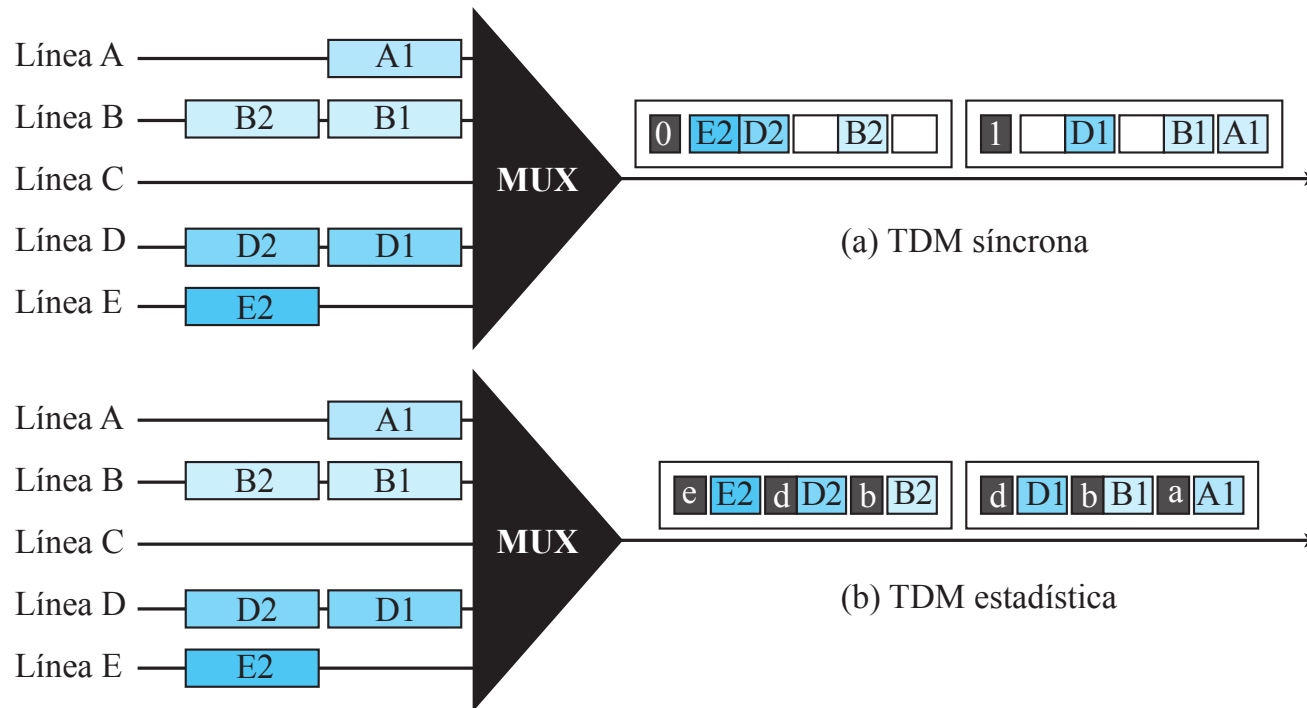


# TDM en telefonía móvil



- A partir de la generación 2G de telefonía móvil utiliza TDM síncrona.
- Se comparte en el tiempo el ancho de banda de un canal.
- Divide el ancho de banda disponible en bandas, que se comparten, simultáneamente por diferentes dispositivos.

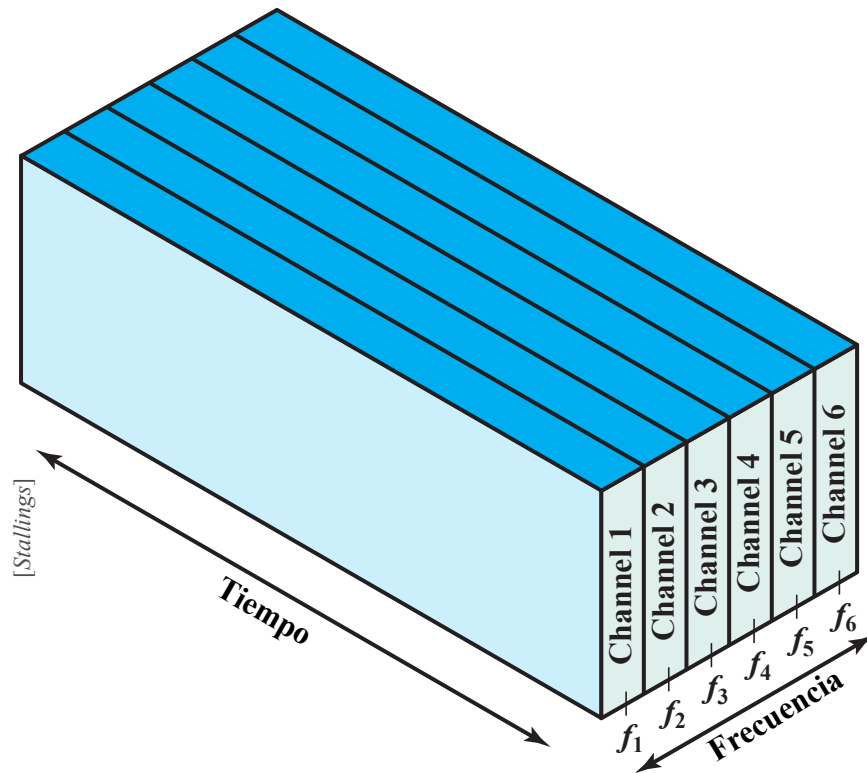
# Multiplexación por división de tiempo estadística (TDME)



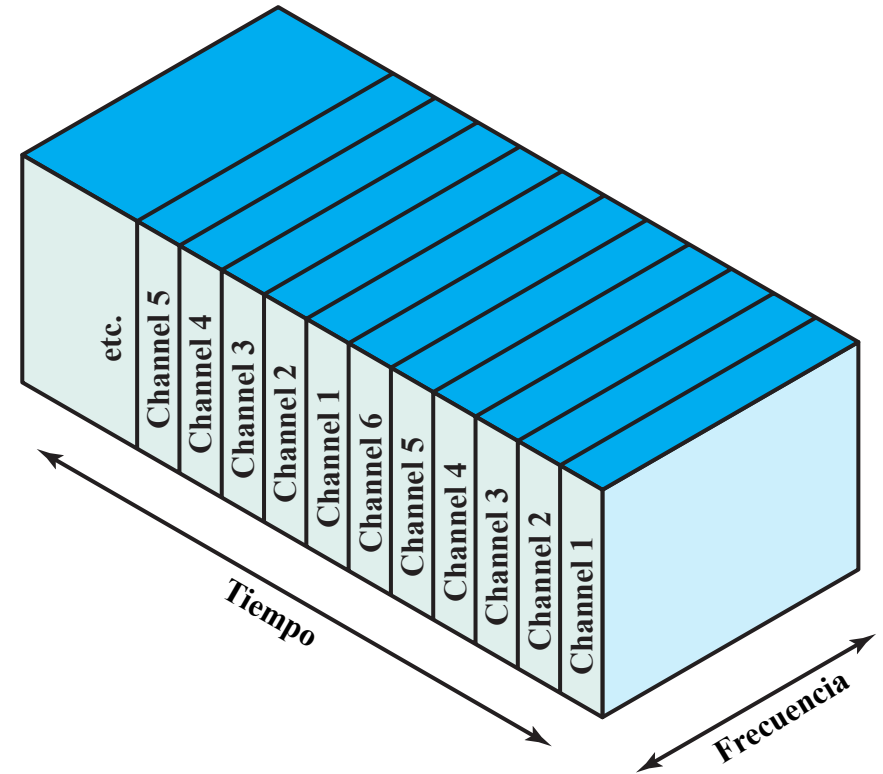
En la **multiplexación por división de tiempo estadística (TDME)** los slots se asignan dinámicamente para mejorar la eficiencia del ancho de banda:

- Cada slot debe de contener la dirección del dispositivo destino.
- El tamaño del slot suele ser mucho mayor que con TDM síncrona.
- TDME no necesita bits de sincronización.
- Habitualmente, el ancho de banda de un canal TDME es menor que la suma de los anchos de banda de los canales no multiplexados.

# División de frecuencia vs tiempo

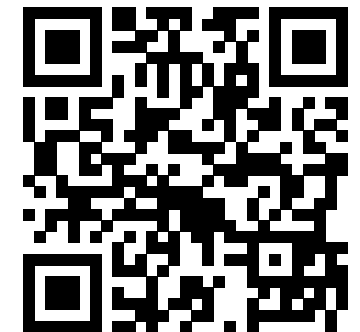


(a) Multiplexión por división de frecuencia

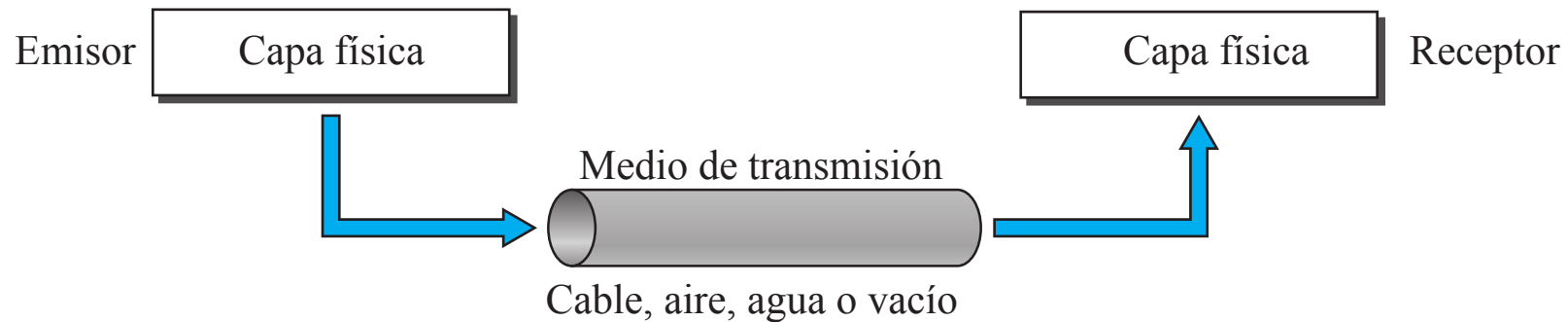


(b) Multiplexión por división de tiempo

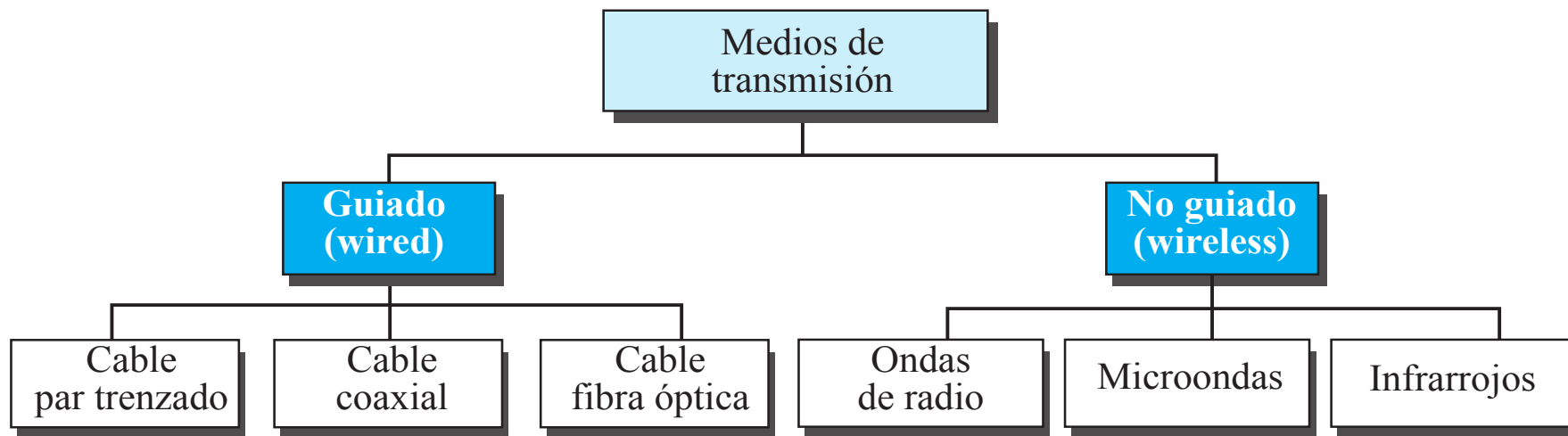
1. Introducción a la transmisión de datos
2. Señales digitales
3. Perturbaciones en la transmisión
4. Transmisión digital
5. Transmisión analógica
6. Codificación de datos
7. Multiplexación
- 8. Medios de transmisión**
9. Líneas de abonado digital



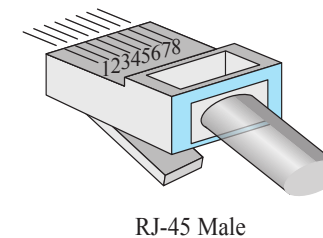
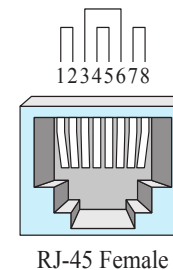
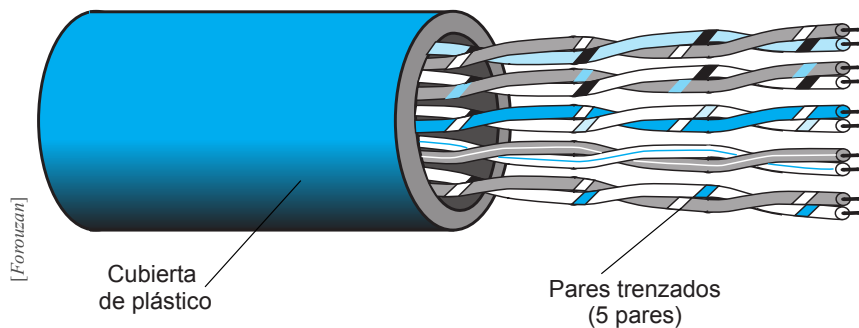
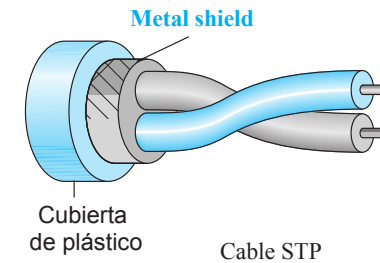
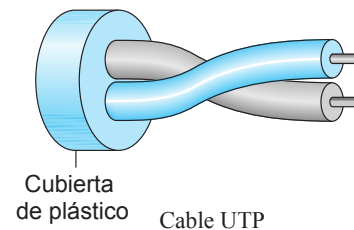
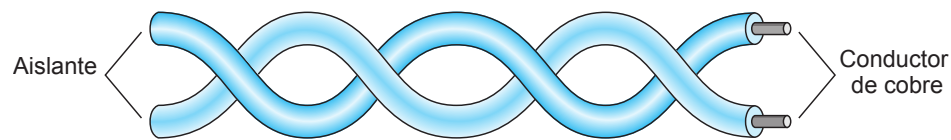
# Medios de transmisión



Se define **medio de transmisión**, en general, como algo que puede transportar información de una fuente a un destino.



# Cable par trenzado



## Ventajas:

- Coste y mantenimiento
- Fácil instalación y despliegue

## Inconvenientes:

- Reducido ancho de banda
- Seguridad
- Atenuación

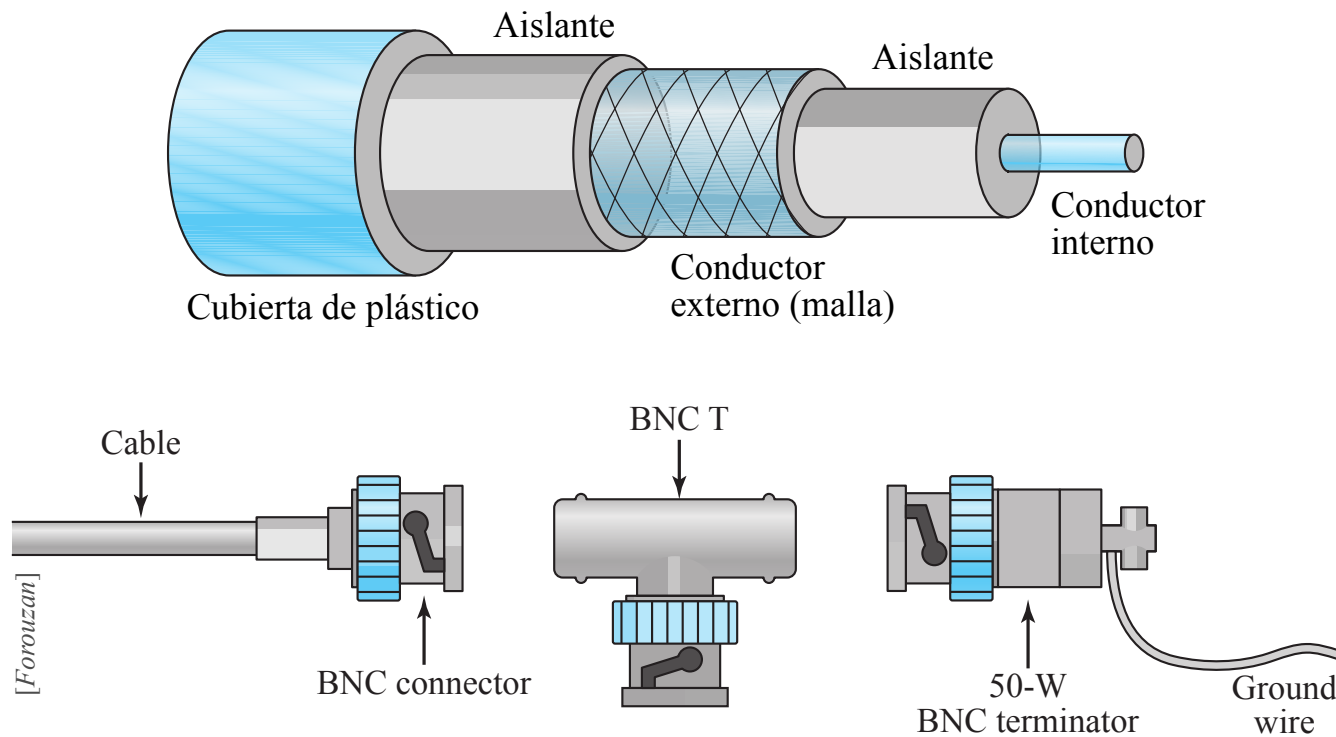
## Aplicaciones:

- Telefonía
- LANs

# Cable par trenzado: categorías

<b>Categoría</b>	<b>Especificación</b>	<b>Mbps</b>	<b>Uso</b>
1	Cable par trenzado no apantallado utilizado en telefonía	< 0,1	Teléfono
2	Cable par trenzado no apantallado utilizado, originariamente, en líneas T	< 2	Líneas T
3	CAT 2 mejorado utilizado en LANs	10	LANs
4	CAT 3 mejorado utilizado en redes Token rings	20	LANs
5	Cable 24 AWG con revestimiento	100	LANs
5E	CAT5 mejorado para minimizar interferencias electromagnéticas y crosstalk	125	LANs
6	Cable mejorado que debe alcanzar hasta los 200 Mbps	200	LANs
7	Cable mejorado con apantallamiento y trenzado por cada par	600	LANs

# Cable coaxial



## Ventajas:

- Idem. par trenzado

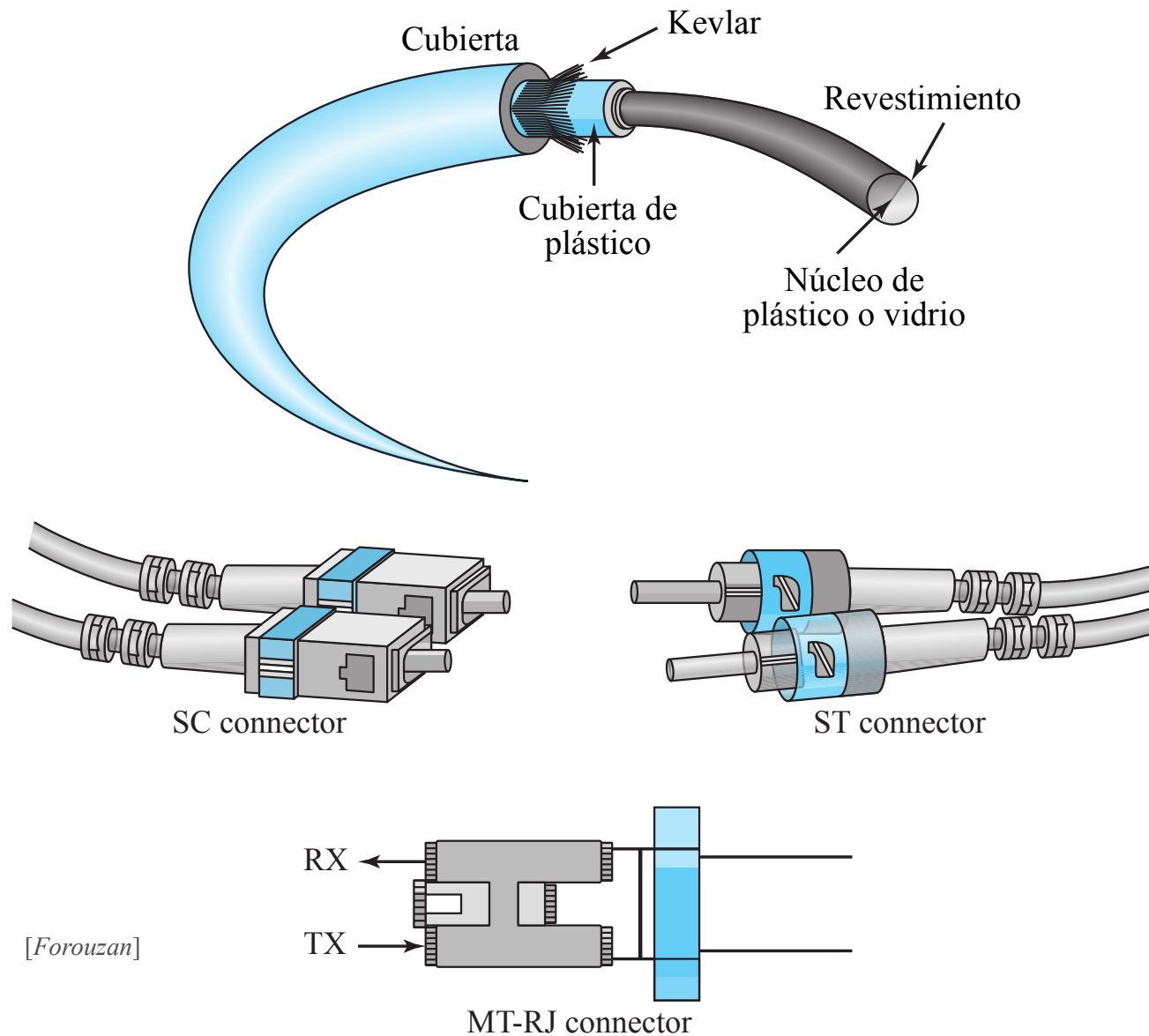
## Inconvenientes:

- Idem par trenzado

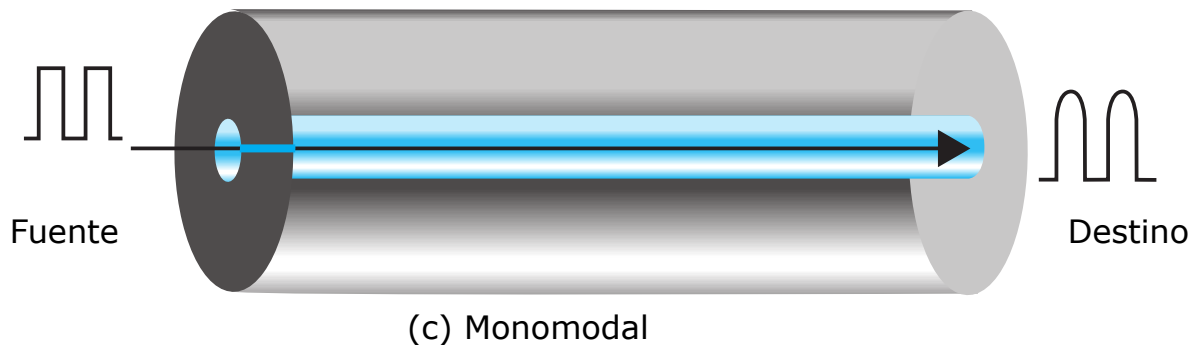
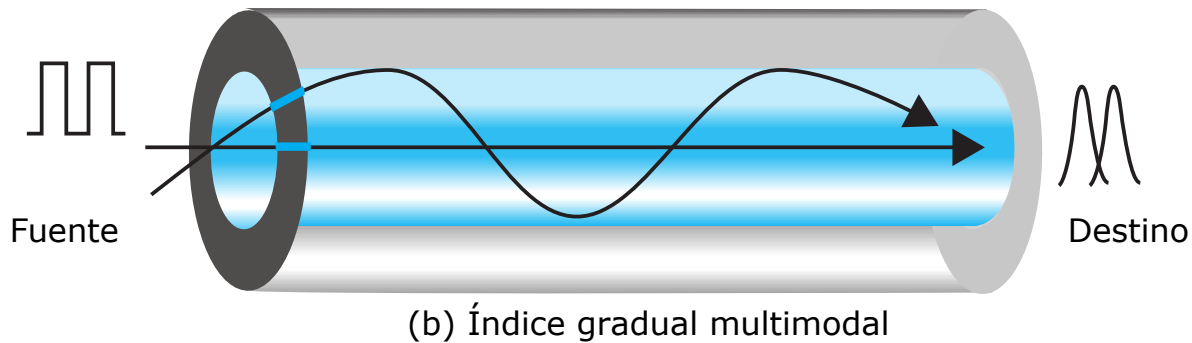
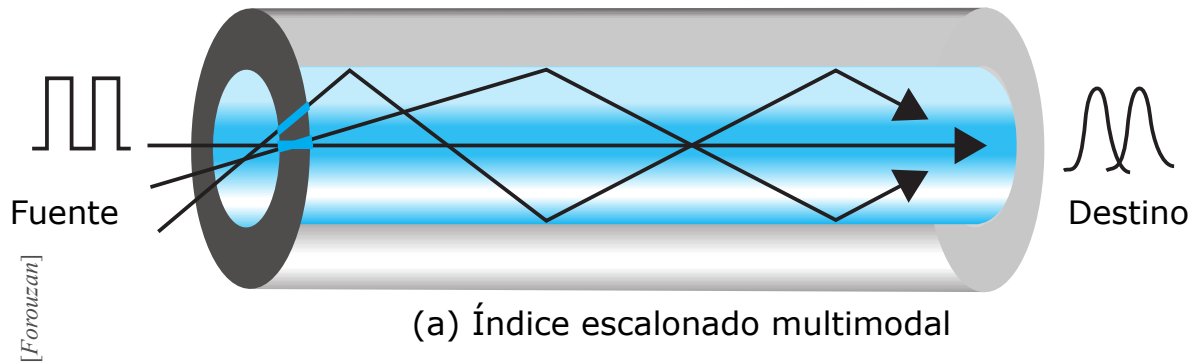
## Aplicaciones:

- Telefonía
- MAN
- LAN (obsoleto)
- Periféricos (obsoleto)

# Fibra óptica



# Fibra óptica



## Ventajas:

- Aislamiento electromagnético
- Baja atenuación
- Elevado ancho de banda
- Reducido tamaño y peso
- Seguridad

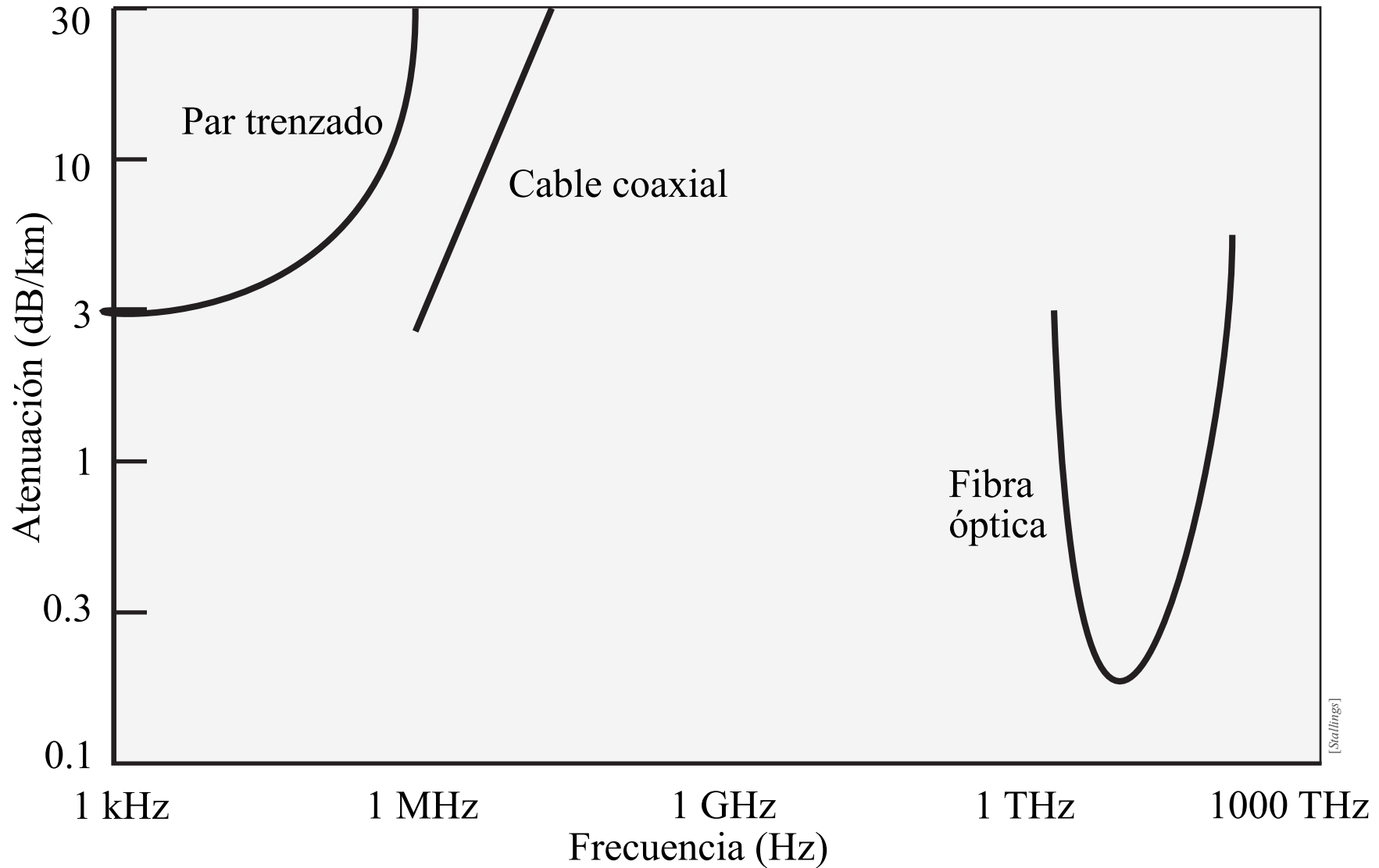
## Inconvenientes:

- Coste
- Instalación
- Mantenimiento

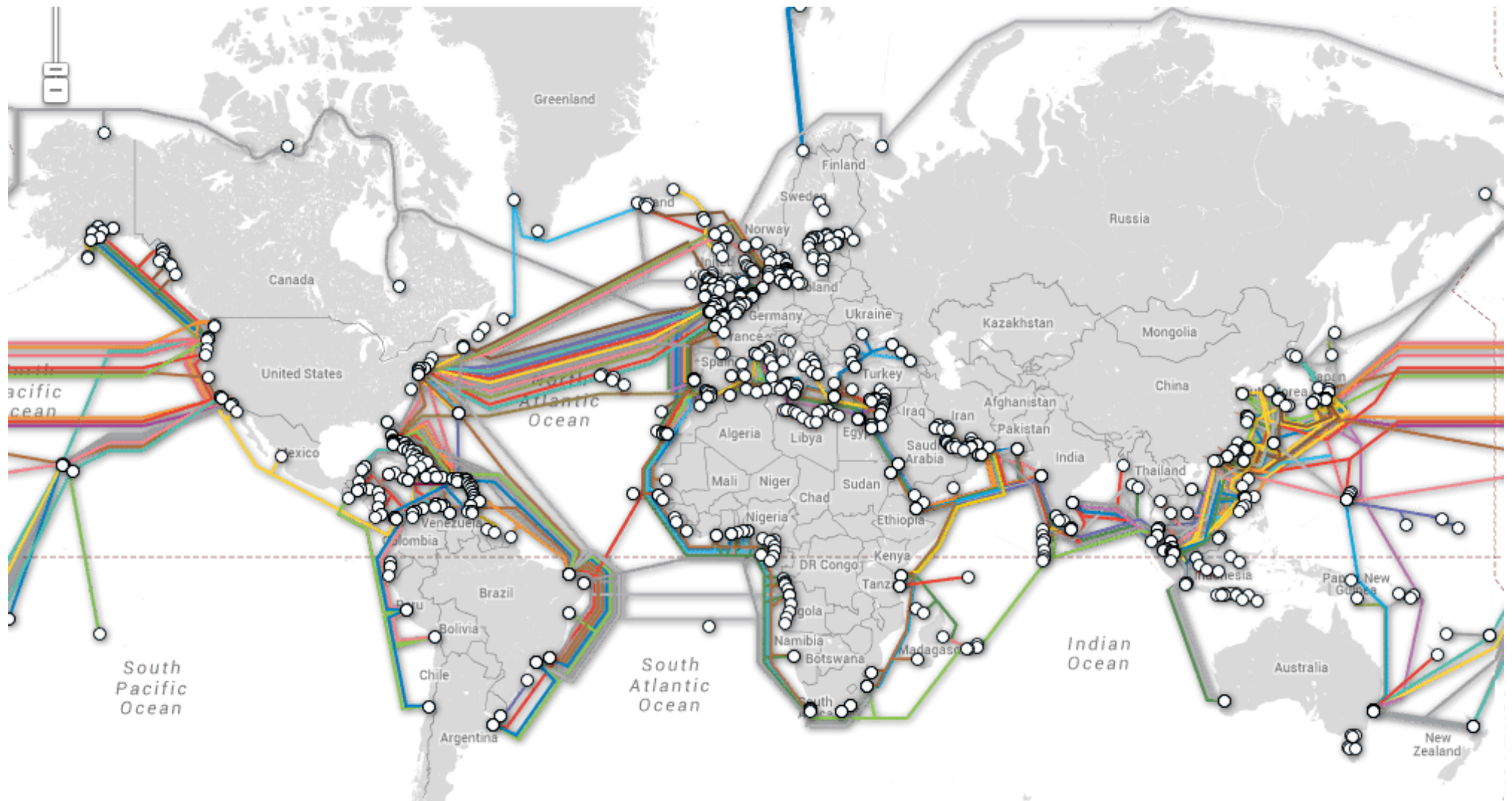
## Aplicaciones:

- WAN
- MAN
- LAN (backbone)

# Atenuación de medios guiados



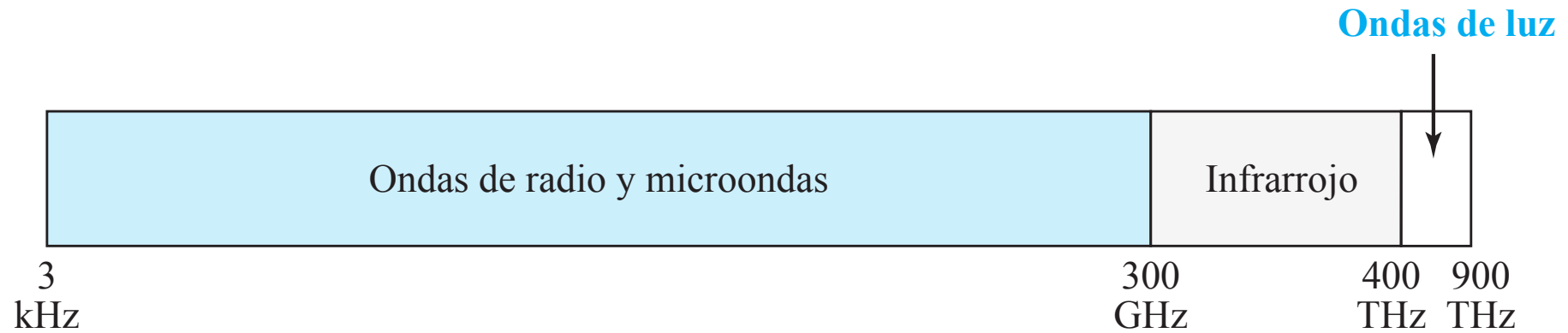
# Fibra óptica trans-oceánica



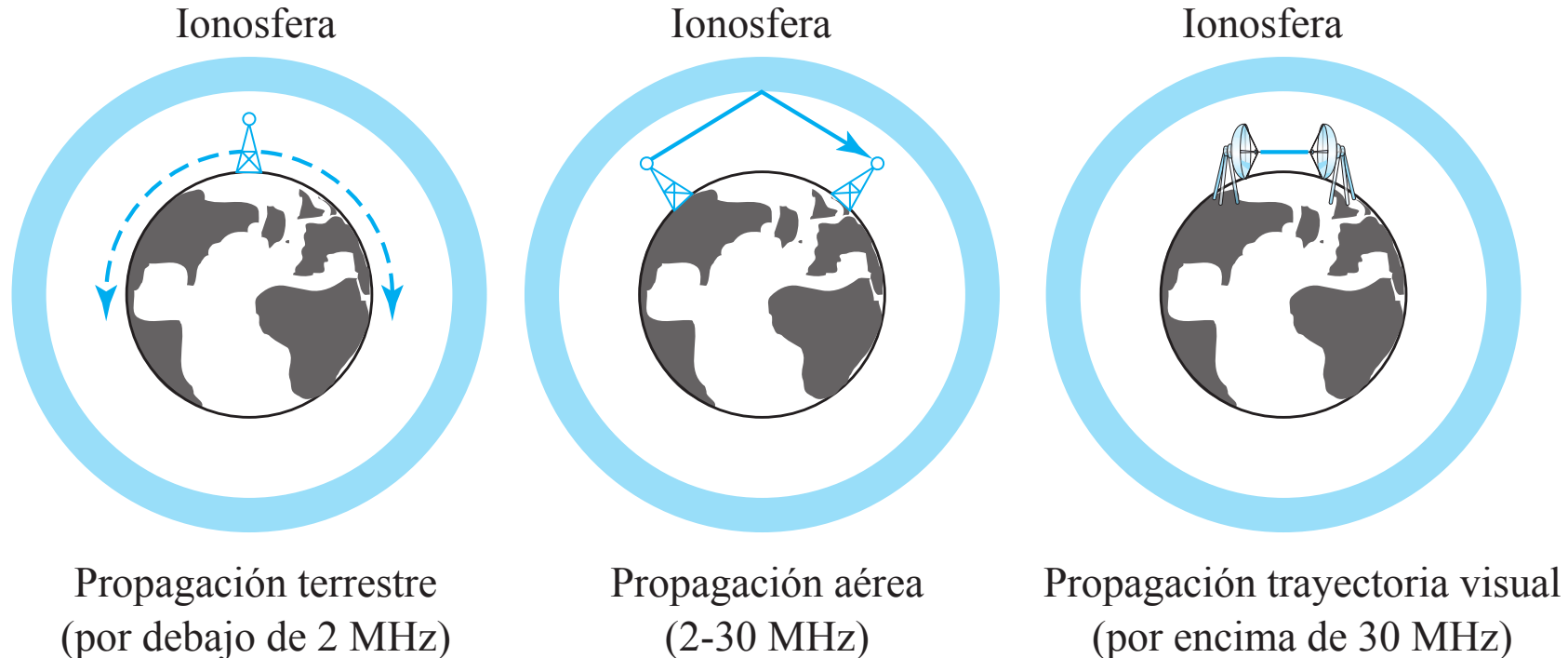
Miguel Hernández

# Medios inalámbricos

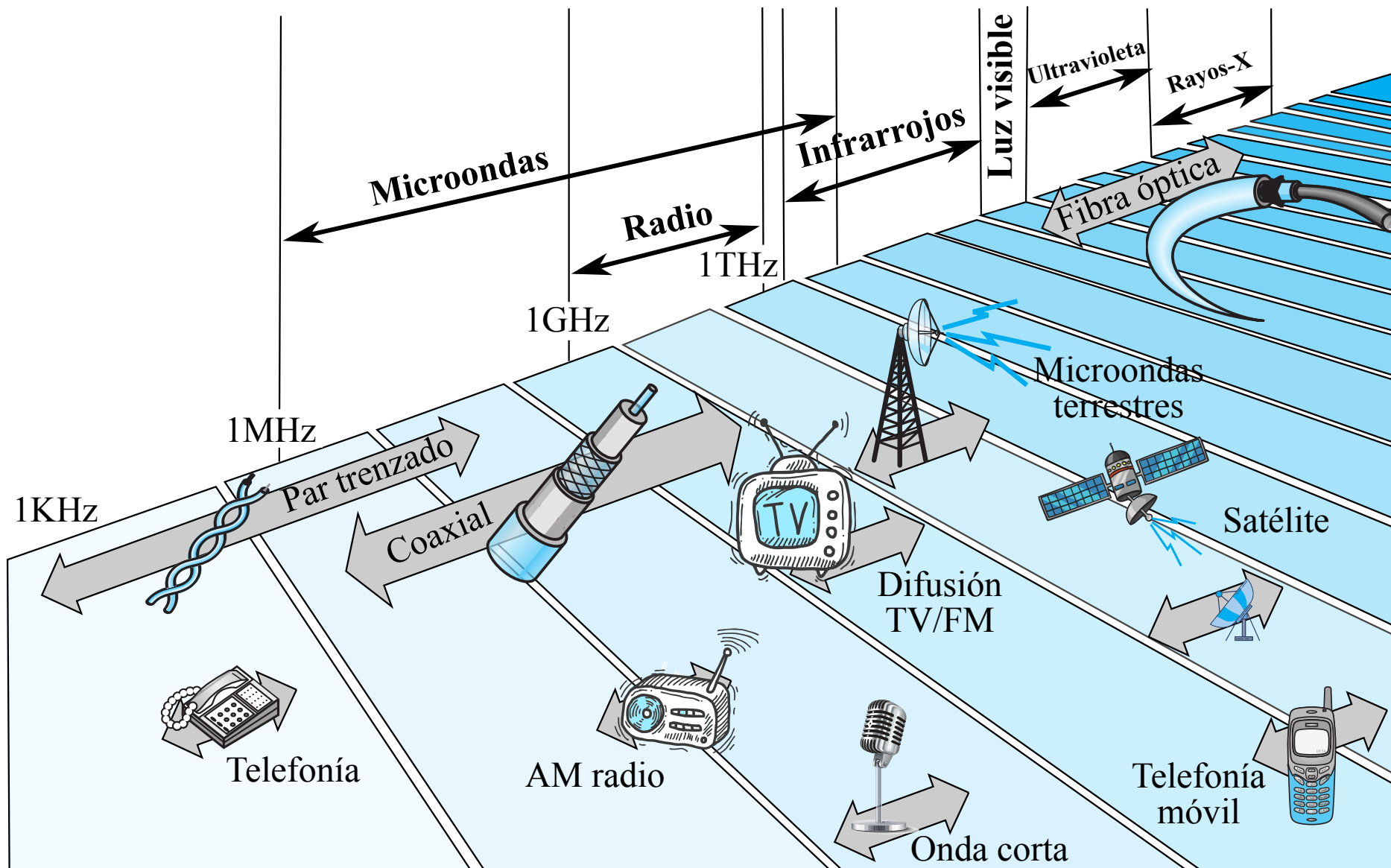
Espectro electromagnético en comunicación inalámbrica.



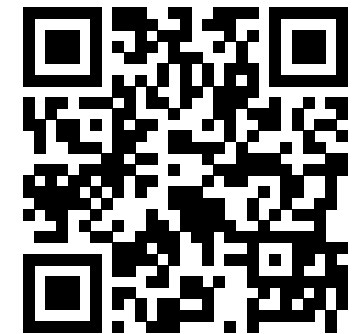
Métodos de propagación de señales inalámbricas.



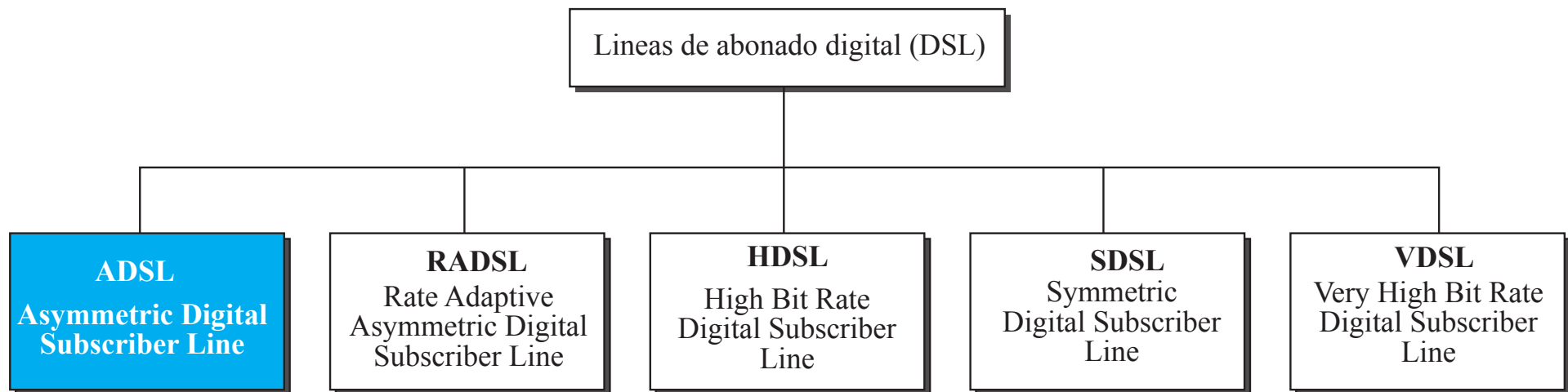
# Espectro electromagnético



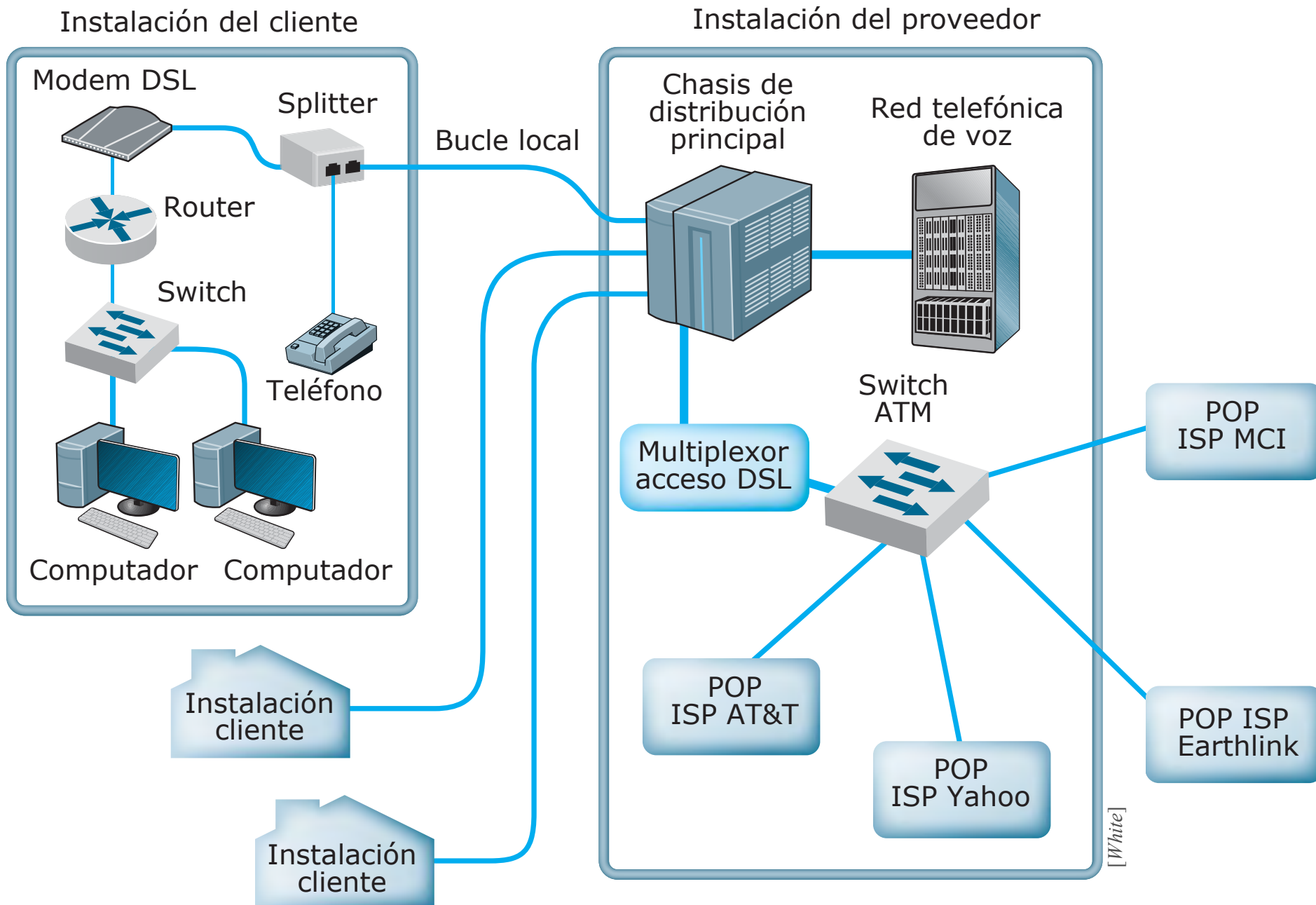
1. Introducción a la transmisión de datos
2. Señales digitales
3. Perturbaciones en la transmisión
4. Transmisión digital
5. Transmisión analógica
6. Codificación de datos
7. Multiplexación
8. Medios de transmisión
- 9. Líneas de abonado digital**



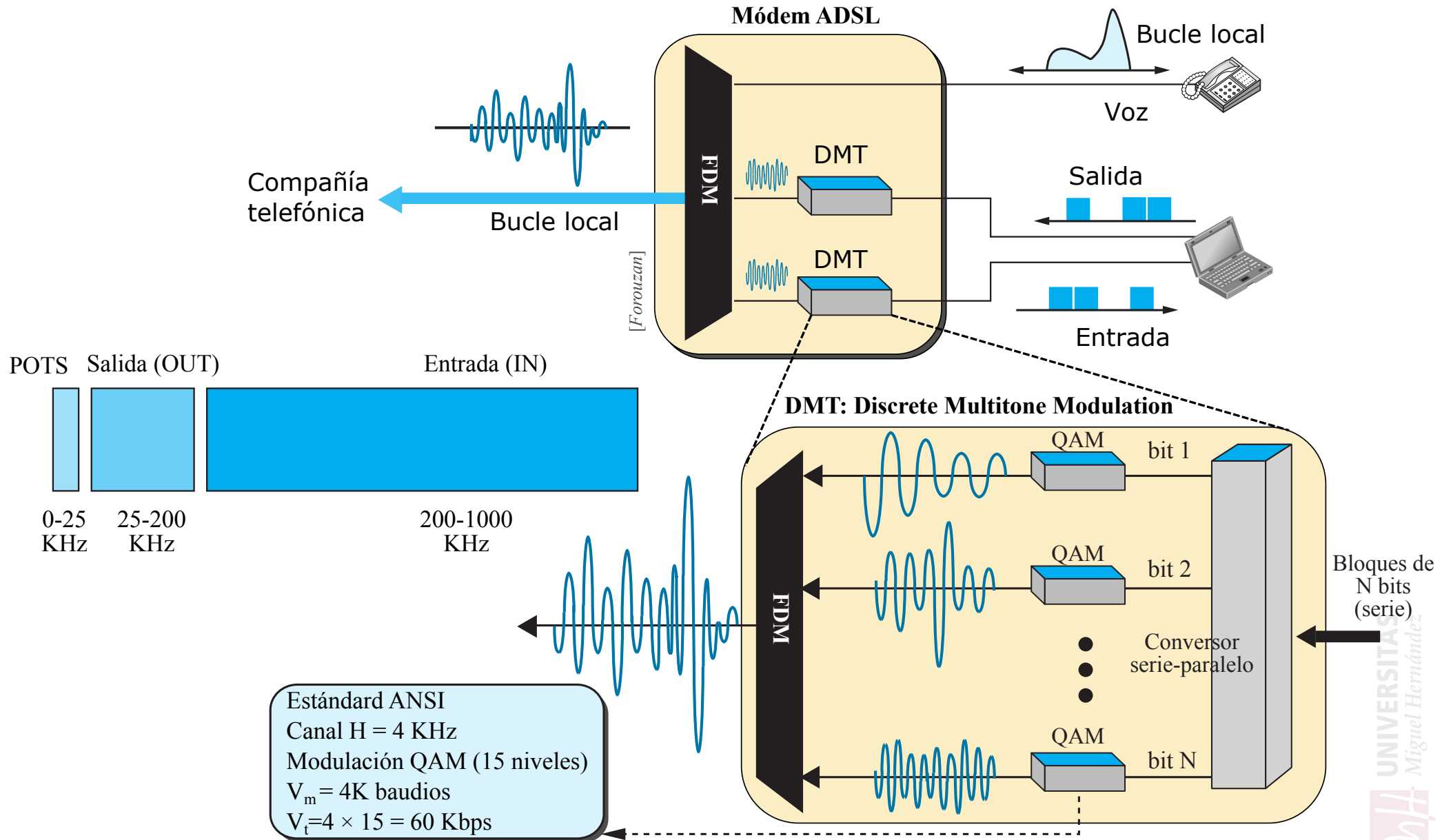
# Líneas de abonado digital



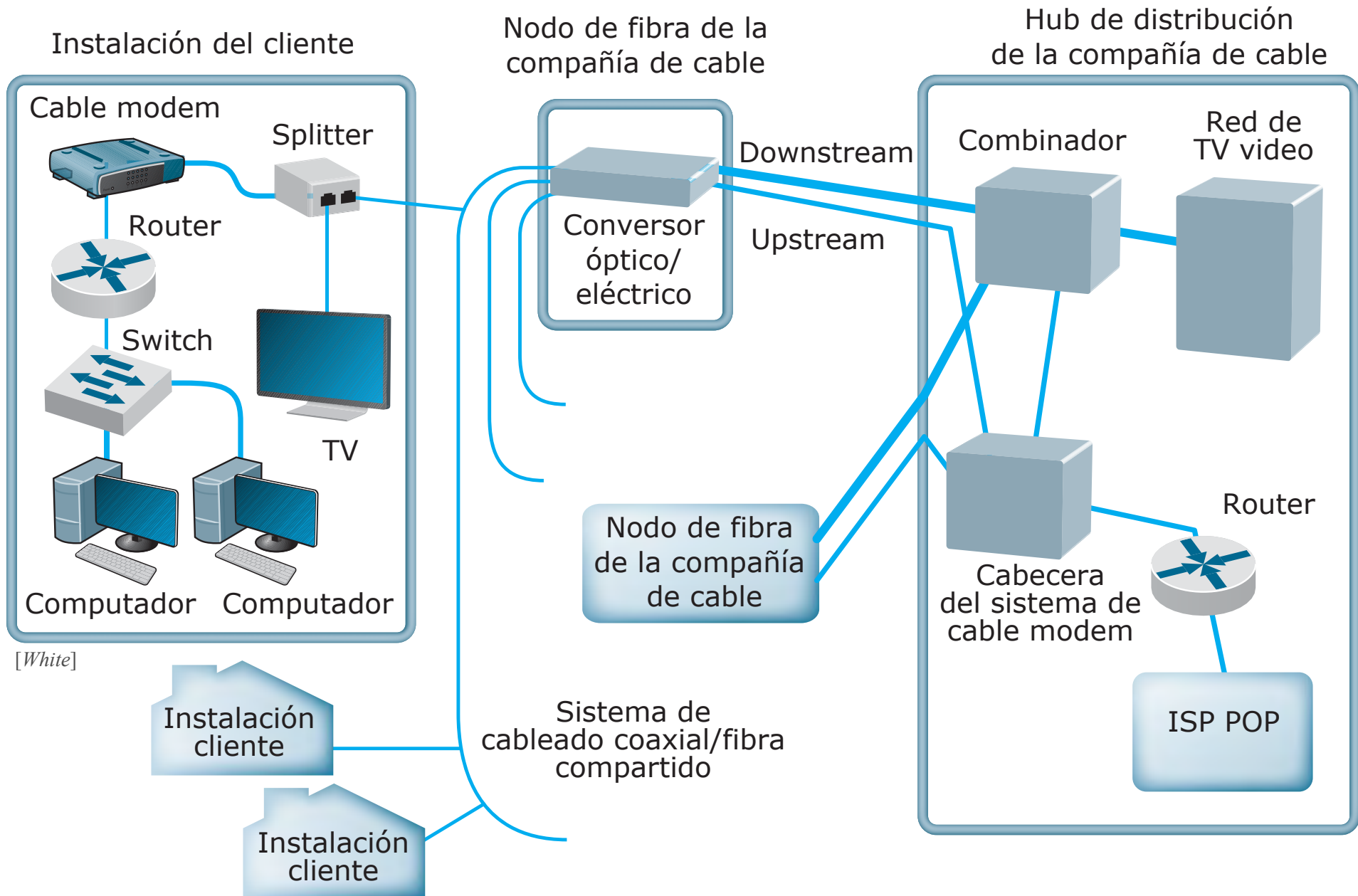
# Arquitectura DSL



# ADSL



# Cable modem



# Cuestiones de revisión

**El estudiante debería ser capaz de responder a las siguientes cuestiones:**



Diferencia entre medios guiados y no guiados.

Diferencia entre señal electromagnética analógica y digital.

¿Cuáles son las tres características importantes de una señal periódica?

¿Cuántos radianes hay en un círculo completo de 360 grados?

¿Cuál es la relación entre la longitud de onda y la frecuencia de una onda sinusoidal?

Define la frecuencia fundamental.

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

¿Qué es la atenuación?

Define la capacidad de canal.

Lista y define brevemente los factores que se pueden utilizar para evaluar o comparar las técnicas de codificación digital-digital.

¿Qué es la codificación diferencial?

Explica la diferencia entre NRZ-L y NRZ-I.

Explica dos técnicas de codificación digital-digital binarias multinivel.

Define la codificación bifase y describe dos técnicas de codificación bifase.

Explica la función de *scrambling* en el contexto de la codificación digital-digital.

¿Qué función realiza el modem?

¿Cuántos valores binarios se representan mediante ASK y cuáles son sus limitaciones?

¿Cuál es la diferencia entre QPSK y DQPSK?

¿Qué es QAM?

¿Qué nos dice el teorema del muestreo en relación al muestreo requerido para señales analógicas?

¿Cuál es la diferencia entre FDM y TDM?

¿Cuál es la diferencia entre TDM y TDME?

¿Cuál es la diferencia entre ADSL y Cable-modem?



# UNIVERSITAS

*Miguel Hernández*