



# REDES

*Grados Ing. Informática / Ing. de Computadores / Ing. del Software / Doble Grado  
Universidad Complutense de Madrid*

---

## TEMA 2. Conceptos de Transmisión de Datos

### **PROFESORES:**

Rafael Moreno Vozmediano  
Juan Carlos Fabero Jiménez  
Julio Septién del Castillo  
Alberto del Barrio García  
Inmaculada Pardines Lence

### **OTROS AUTORES:**

Rubén Santiago Montero  
Carlos González Calvo  
Eduardo Huedo Cuesta  
Joaquín Recas Piorno

---

# Contenido

1. Datos y señales
2. Tipos de señales
3. Propiedades de un canal de transmisión
4. Transmisión digital
5. Transmisión analógica
6. Multiplexación
7. Medios de transmisión

---

# 1. Datos y Señales

- Elementos de señal y elementos de datos
- Tasa de baudios y tasa de bits

# Datos y señales

- **Datos**

- Son las entidades de información que se transmiten
  - Pueden ser analógicos o digitales
- Datos Analógicos
  - Toman valores continuos dentro de un intervalo
  - Ejemplos: voz, vídeo, magnitudes físicas
- Datos Digitales
  - Son aquellos que toman valores discretos
  - Ejemplos: texto, ficheros de ordenador, datos binarios en general

- **Señales**

- Codificación eléctrica o electromagnética de los datos a transmitir, que hace posible la propagación a través de un medio de transmisión
  - Pueden ser analógicas o digitales
- Señales Analógicas
  - Señales eléctricas o electromagnéticas que varían de forma continua dentro de un rango de valores
  - Ejemplos: Línea telefónica analógica, señales de radio y TV, etc.
- Señales Digitales
  - Secuencias de pulsos eléctricos o electromagnéticos discretos y discontinuos (voltaje o luz)
  - Ejemplos: Señales binarias, por ejemplo, un 1 se representa mediante un voltaje positivo y un 0 mediante un voltaje negativo

# Datos y señales

- **Combinaciones posibles de datos y señales**

- Datos analógicos mediante señales analógicas
  - Ejemplo: telefonía analógica, radio y TV analógicas
  - En determinados casos es necesario usar técnicas de modulación de los datos en señales portadoras de distinta frecuencia (ej. AM, FM, etc.)
- Datos analógicos mediante señales digitales
  - Ejemplos: radio y TV digital, voz sobre IP, transmisión de audio/video por Internet
  - Es necesario convertir los datos analógicos a señales digitales mediante técnicas de digitalización (ej. PCM)
- Datos digitales mediante señales analógicas
  - Ejemplos: conexión por módem y ADSL
  - Es necesario convertir los datos digitales a señales analógicas mediante técnicas de modulación (ej. ASK, PSK, QPSK, QAM, etc.)
- Datos digitales mediante señales digitales
  - Ejemplos: redes de área local (Ethernet)
  - En general se pueden utilizar distintas técnicas de codificación digital (NRZ, NRZ-I, bipolar, Manchester, etc.)

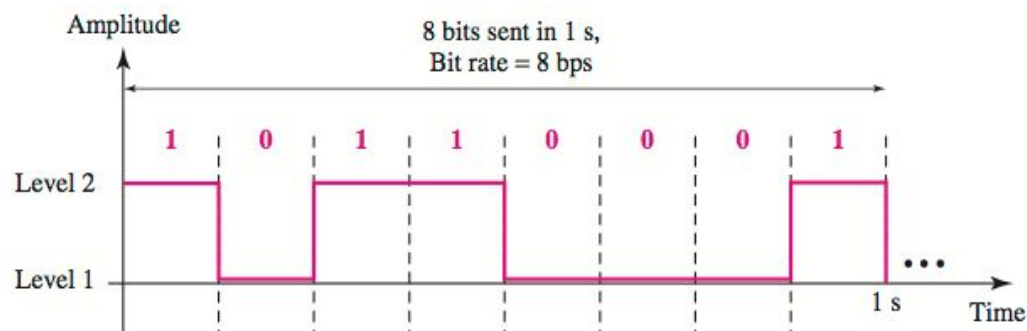
**NOTA:** *En este curso sólo se estudiarán las técnicas de transmisión de datos digitales (binarios) mediante señales analógicas y digitales*

# Datos y señales

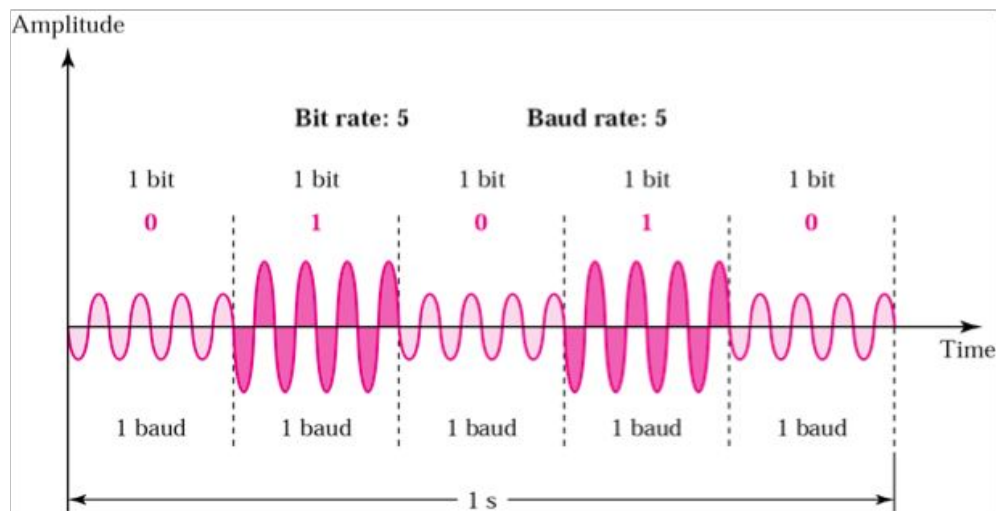
- ¿Cómo codificar datos binarios mediante señales analógicas o digitales?

- Introduciendo variaciones en el estado de la señal

- Señales digitales  $\Rightarrow$  distintos niveles de voltaje



- Señales analógicas  $\Rightarrow$  distintas formas de onda (ej. variaciones de la amplitud, frecuencia o fase)



# Datos y señales

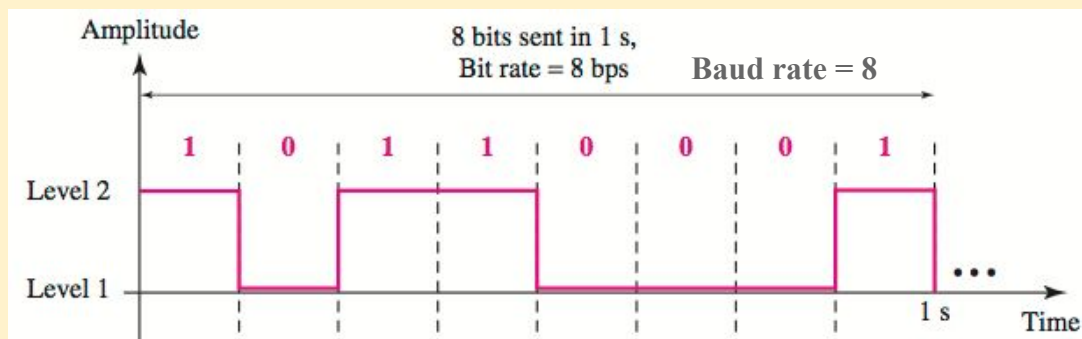
- **Elementos de señal (símbolos) y elementos de datos (bits)**
  - Un **elemento de señal o símbolo** es cada uno de los distintos estados de la señal (distintos niveles eléctricos o distintas formas de onda) que se utilizan para codificar los datos binarios
  - Cada elemento de señal puede representar uno o varios **elementos de datos o bits**:
    - $R$  = relación de bits por elemento de señal
      - También se denomina relación **bits por baudio**, como se verá más adelante.
    - En el caso más general, si queremos codificar  $R$  bits por elemento de señal, necesitaremos  $V=2^R$  símbolos o elementos de señal distintos ( $R=\log_2 V$ )
- Ejemplos:
  - $V = 2$  elementos de señal  $\Rightarrow R = 1$  bit por elemento de señal
  - $V = 4$  elementos de señal  $\Rightarrow R = 2$  bits por elemento de señal
  - $V = 8$  elementos de señal  $\Rightarrow R = 3$  bits por elemento de señal
  - $V = 16$  elementos de señal  $\Rightarrow R = 4$  bits por elemento de señal
  - ....

# Datos y señales

- Elementos de señal y elementos de datos (cont.)

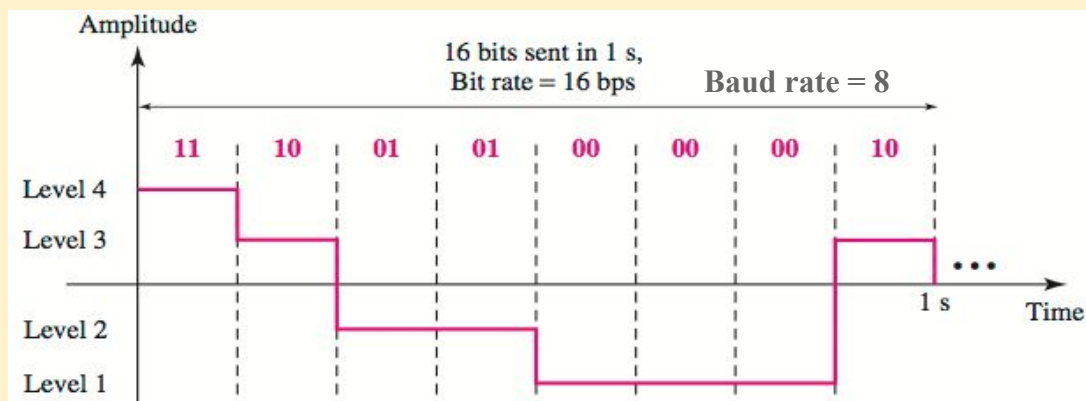
## Ejemplo 1 (señales digitales)

Dos elementos de señal ( $V=2^1$ )  
(2 niveles eléctricos)  $\Rightarrow$   
 $R = 1$  bit por elemento de señal



## Ejemplo 2 (señales digitales)

Cuatro elementos de señal ( $V=2^2$ )  
(4 niveles eléctricos)  $\Rightarrow$   
 $R = 2$  bits por elemento de señal





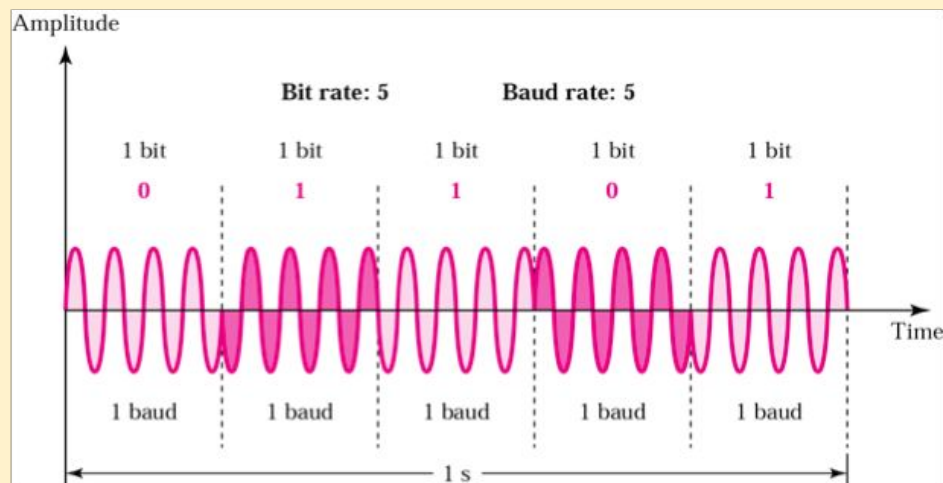
# Datos y señales

- Elementos de señal y elementos de datos (cont.)

## Ejemplo 3

### (señales analógicas)

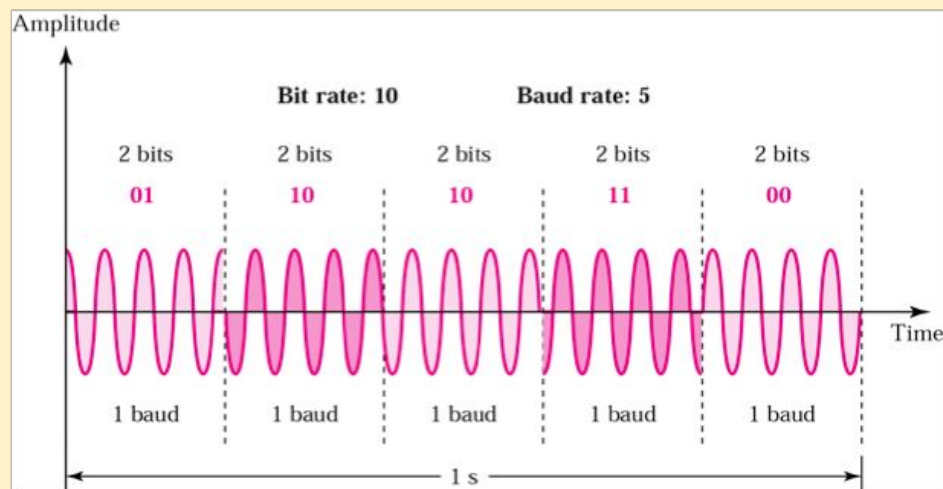
Dos elementos de señal ( $V=2^1$ )  
(2 fases distintas:  $0^\circ$  y  $180^\circ$ )  $\Rightarrow$   
 $R = 1$  bit por elemento de señal



## Ejemplo 4

### (señales analógicas)

Cuatro elementos de señal ( $V=2^2$ )  
(4 fases distintas:  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ )  $\Rightarrow$   
 $R = 2$  bits por elemento de señal



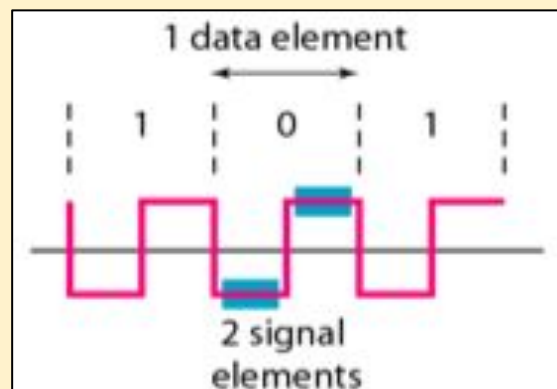
# Datos y señales

- **Elementos de señal y elementos de datos (cont.)**

- En ocasiones también se pueden utilizar técnicas de codificación que usan varios elementos de señal para codificar un bit o un grupo de bits (no cumplen la relación  $V=2^R$ )

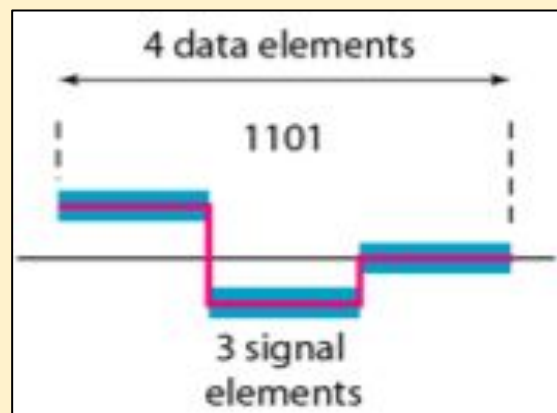
## Ejemplo 5

1 bit por cada 2 elementos de señal  
( $R=1/2$ )



## Ejemplo 6

4 bits por cada 3 elementos de señal  
( $R=4/3$ )



**NOTA:** Las distintas técnicas para codificar datos digitales mediante señales analógicas o digitales se estudiarán en detalle más adelante en este tema

# Datos y señales

- **Tasa de baudios y tasa de bits de un canal de transmisión**
  - **Tasa de baudios** (*baud rate*) de un canal de transmisión (análog. o digital)
    - Número de veces que puede cambiar el estado de la señal (cambios de nivel eléctrico o de forma de onda) por unidad de tiempo, es decir, nº de símbolos o elementos de señal por segundo
    - Ejemplo: en un canal de 100 baudios, se pueden transmitir 100 elementos de señal distintos por segundo
  - **Tasa de bits** (*bit rate*) o velocidad de transmisión de un canal de transmisión (analógico o digital)
    - Número de bits de datos que se transmiten por unidad de tiempo
    - Se mide en bits por segundo (**bps**)
  - Relación entre tasa de baudios y tasa de bits

R	Nº de bits por elemento de señal (también denominada relación <b>bits por baudio</b> )
B	Tasa de baudios
$C = R \times B$	Tasa de bits o velocidad de transmisión (bps)

# Datos y señales

- **Tasa de baudios y tasa de bits de un canal de transmisión (cont.)**

**Ejemplo:** Supongamos un canal de transmisión de 1200 baudios. Si utilizamos una codificación con  $V=2^R$  elementos de señal, con R bits por elemento de señal, ¿Cuál es la tasa de bits (en bps) cuando se usan  $V = 2, 4, 8, 16, 32, 64$  y 128 elementos de señal distintos?

Nº de elementos de señal (V)	Nº de bits por elemento de señal (R)	Tasa de Baudios (B)	Tasa de bits (C = R x B)
2	1	1200 baud	<b>1200 bps</b>
4	2	1200 baud	<b>2400 bps</b>
8	3	1200 baud	<b>3600 bps</b>
16	4	1200 baud	<b>4800 bps</b>
32	5	1200 baud	<b>6000 bps</b>
64	6	1200 baud	<b>7200 bps</b>
128	7	1200 baud	<b>8400 bps</b>

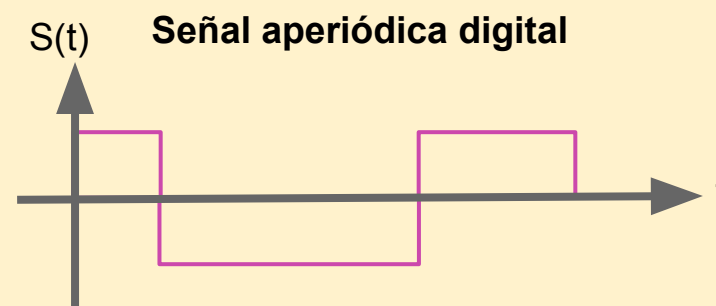
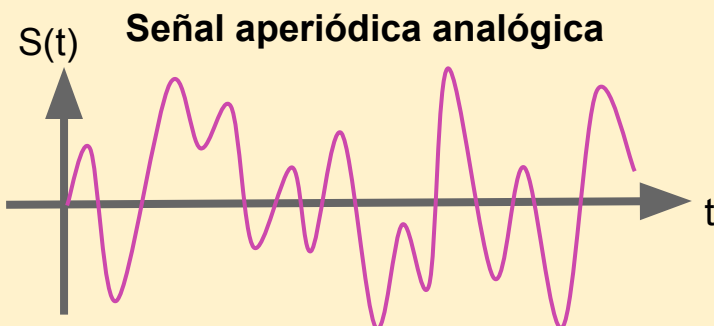
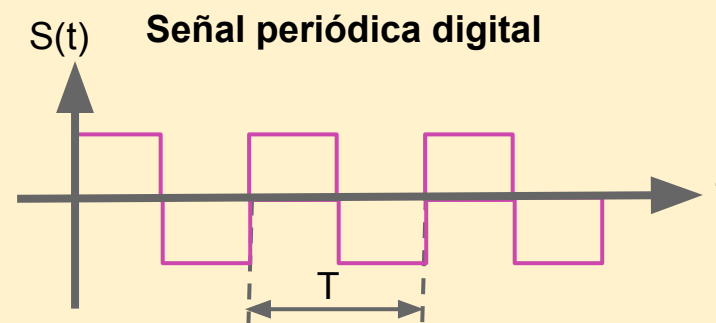
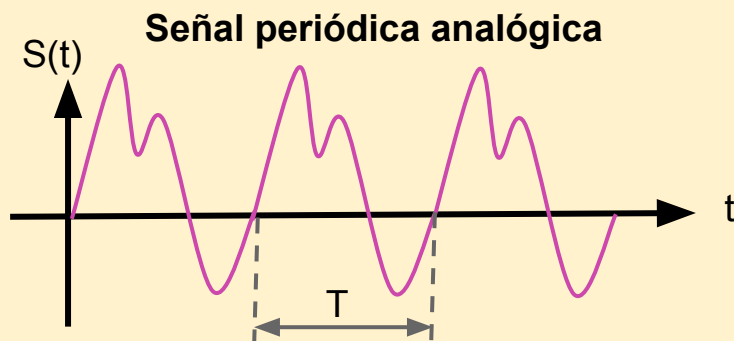
---

## 2. Tipos de señales

- Señales periódicas y aperiódicas
- Descomposición de Fourier:  
dominio de la frecuencia y dominio del tiempo
- Espectro en frecuencia y ancho de banda

# Tipos de señales

- **Señal continua o analógica**
  - Su intensidad varía de forma continua a lo largo del tiempo
- **Señal discreta o digital**
  - Su intensidad sólo toma determinados valores constantes a lo largo del tiempo
- **Señal periódica**
  - Es una señal cuyo patrón (analógico o digital) se repite a lo largo del tiempo:  
 $S(t+T) = S(t)$ ; siendo  $T$  el periodo de repetición de la señal
- **Señal aperiódica**
  - Es una función que no presenta ningún patrón de repetición



# Tipos de señales: señales periódicas

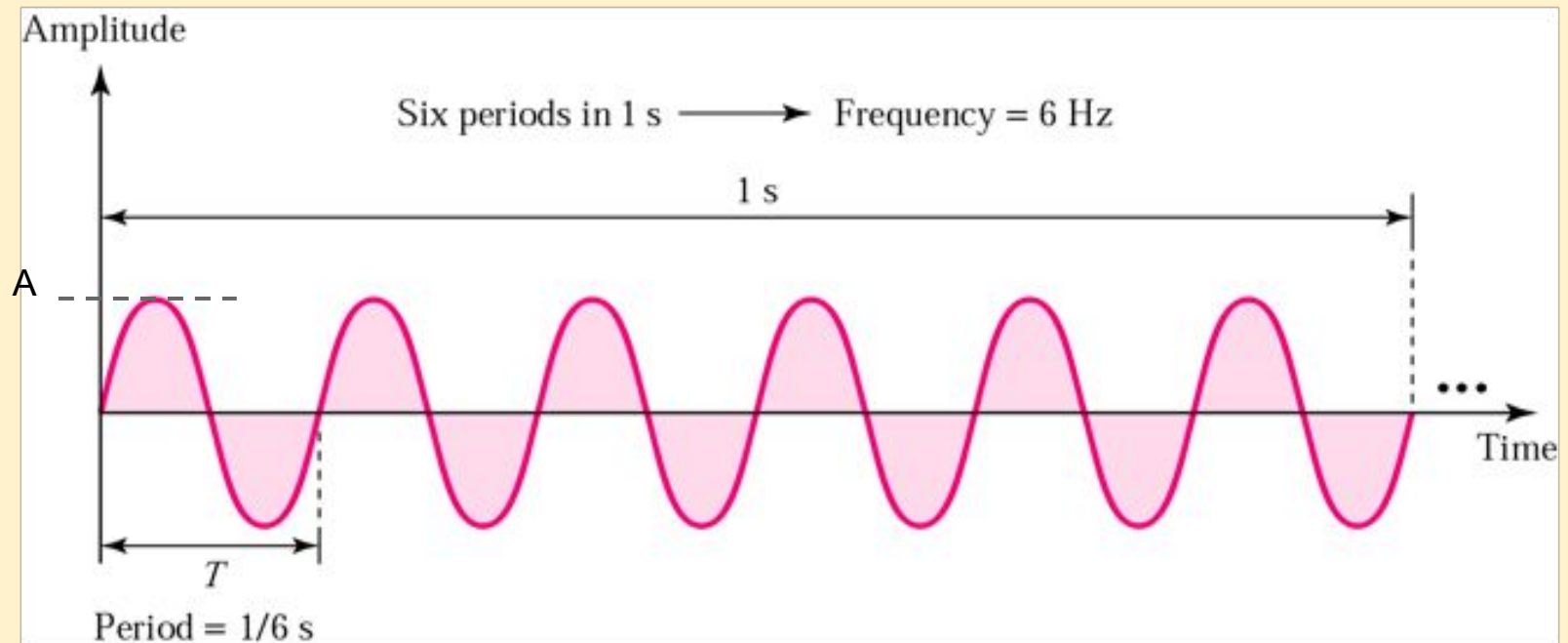
- **Señales periódicas simples**

- Señales con una única componente en frecuencia (ej. seno, coseno, etc.)
- Función seno:

- $s(t) = A \sin(2 \pi f t + \Phi)$ , siendo:

- $A$  → amplitud
- $f$  → frecuencia
- $\Phi$  → fase
- $T=1/f$  → periodo

## Ejemplo



# Tipos de señales: señales periódicas

- Periodo vs. Frecuencia: unidades

Unit	Equivalent	Unit	Equivalent
Seconds (s)	1 s	hertz (Hz)	1 Hz
Milliseconds (ms)	$10^{-3}$ s	kilohertz (KHz)	$10^3$ Hz
Microseconds ( $\mu$ s)	$10^{-6}$ s	megahertz (MHz)	$10^6$ Hz
Nanoseconds (ns)	$10^{-9}$ s	gigahertz (GHz)	$10^9$ Hz
Picoseconds (ps)	$10^{-12}$ s	terahertz (THz)	$10^{12}$ Hz

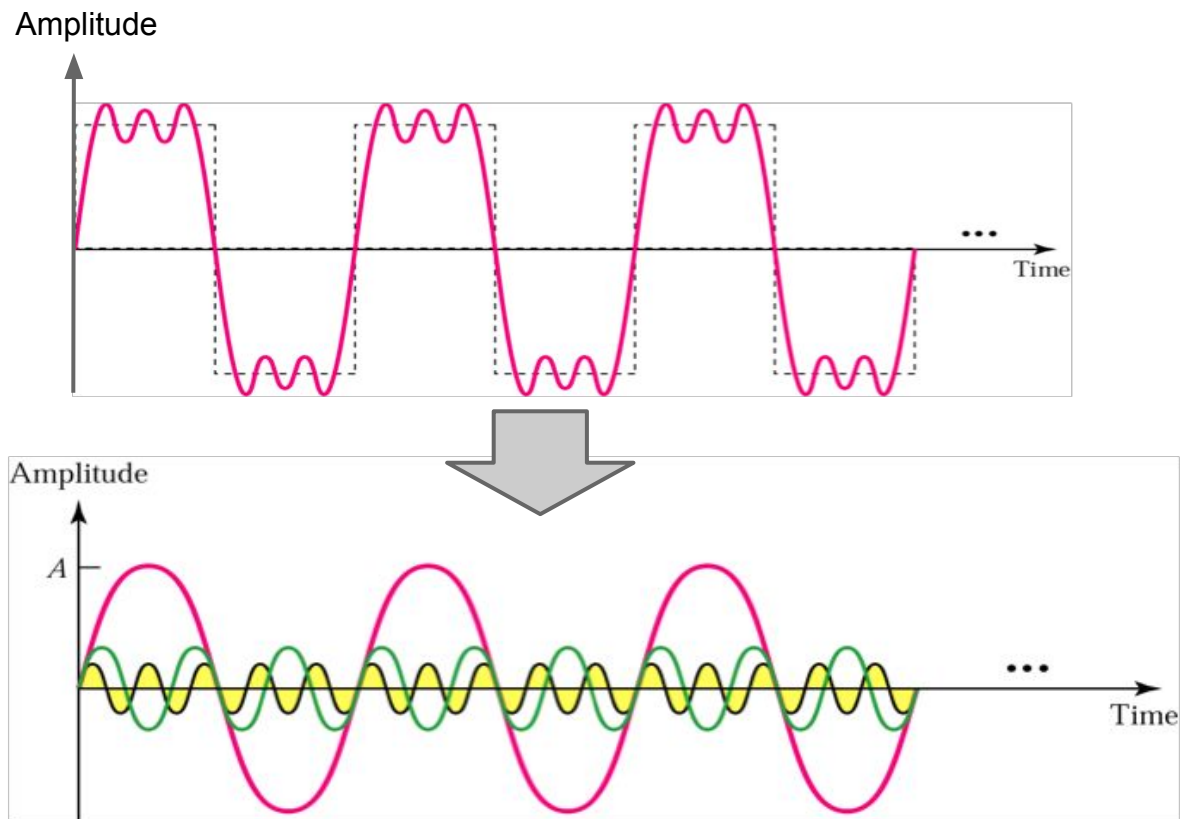


# Tipos de señales: señales periódicas

- **Señales periódicas compuestas: descomposición de Fourier**
  - Cualquier señal periódica en el dominio del tiempo se puede descomponer en una suma de componentes en frecuencia (funciones seno) o **armónicos**
  - Cada uno de los armónicos que componen la señal está caracterizado por tres parámetros:
    - Amplitud, Frecuencia y Fase

## Ejemplo:

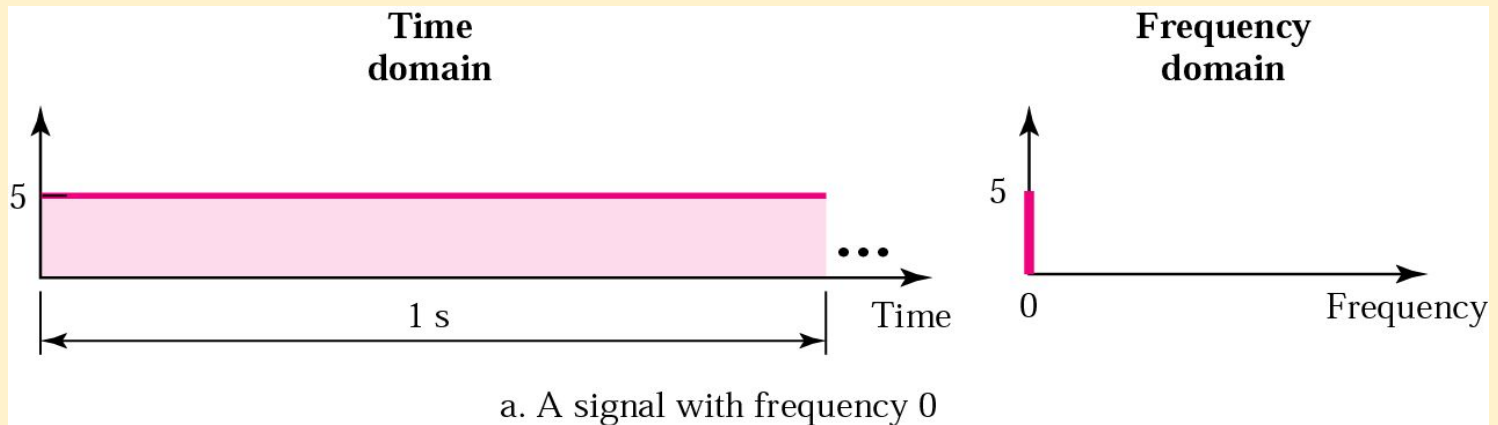
Señal analógica compuesta de tres armónicos ( $f$ ,  $3f$ ,  $5f$ )



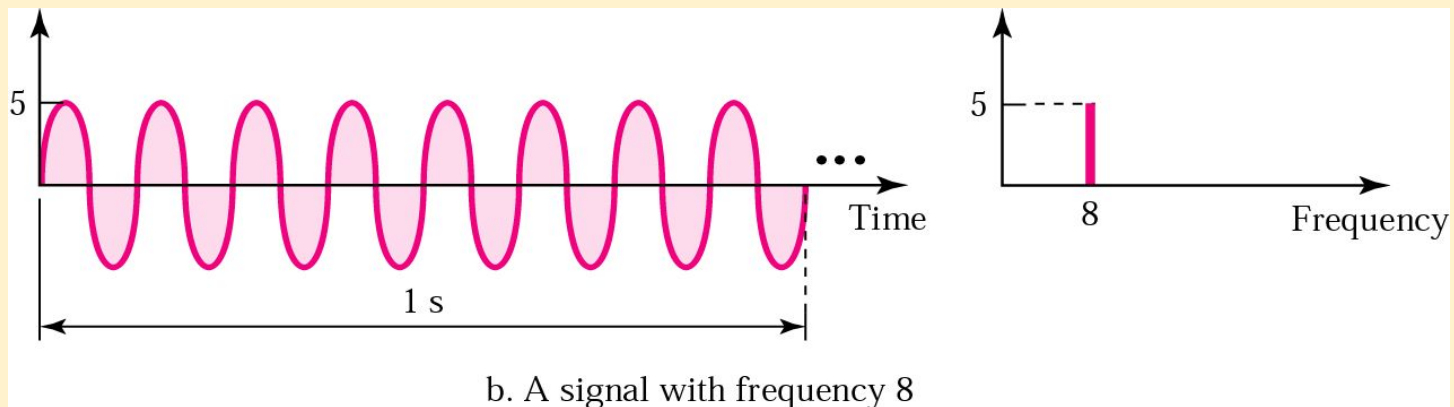
# Tipos de señales: señales periódicas

- **Dominio de la frecuencia y del tiempo**
  - Las representación en el dominio de la frecuencia de una señal consiste en representar la amplitud y frecuencia de cada uno de sus armónicos

## Ejemplo1: Señal simple continua (frecuencia $f = 0$ Hz)



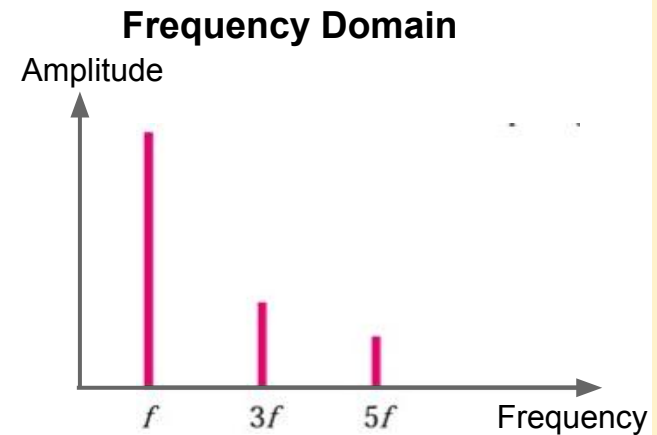
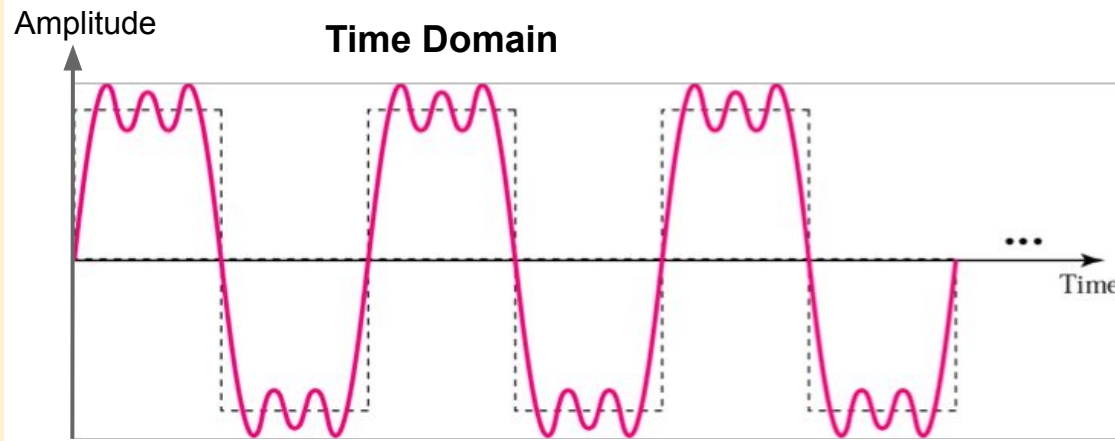
## Ejemplo 2: Señal simple senoidal (frecuencia $f = 8$ Hz)



# Tipos de señales: señales periódicas

- Dominio de la frecuencia y del tiempo (cont.)

**Ejemplo 3:** Señal compuesta (frecuencias  $f$ ,  $3f$  y  $5f$ )

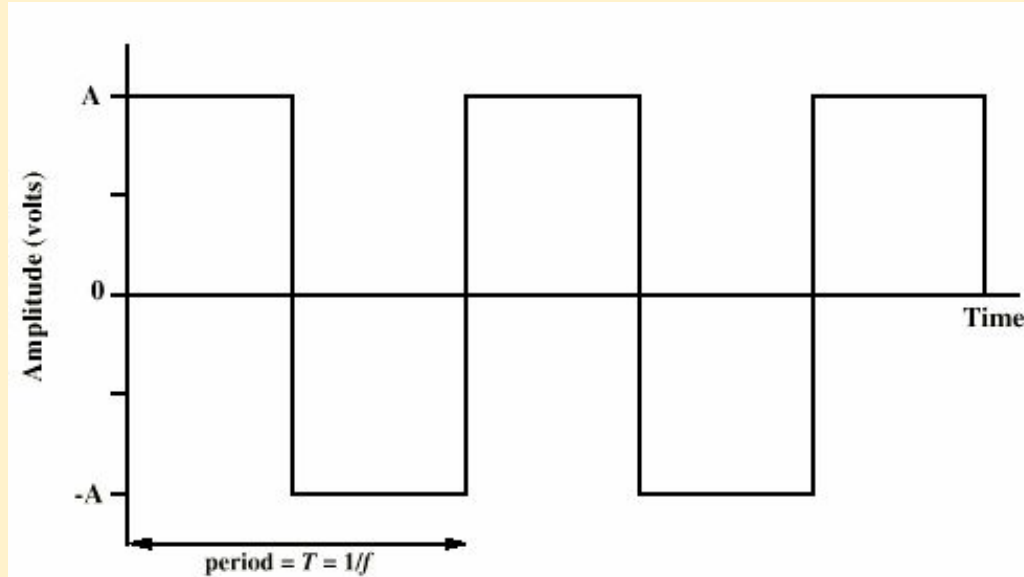


# Tipos de señales: señales periódicas

- Dominio de la frecuencia y del tiempo (cont.)

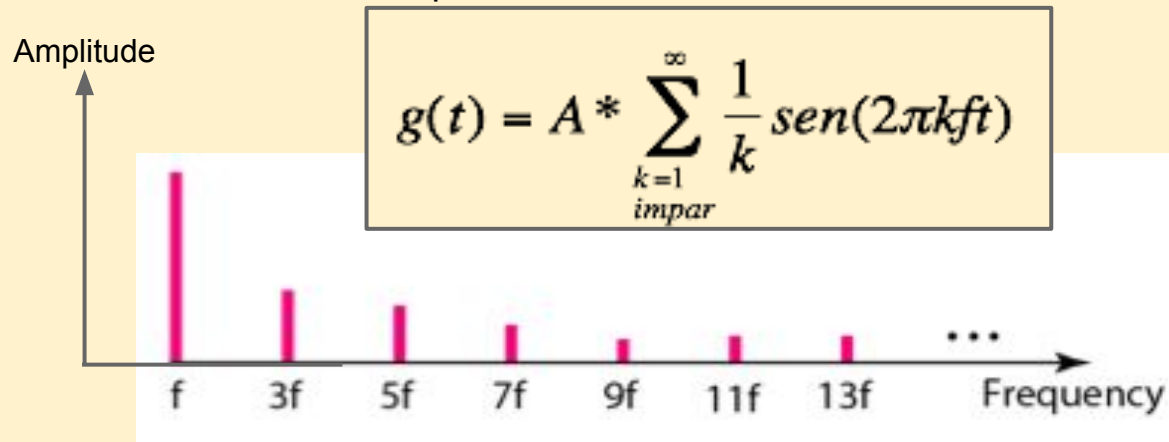
- Ejemplo 4: Señal digital periódica (señal cuadrada)

Dominio  
del tiempo



Descomposición de Fourier de una señal cuadrada

Dominio de  
la frecuencia



# Tipos de señales: señales periódicas

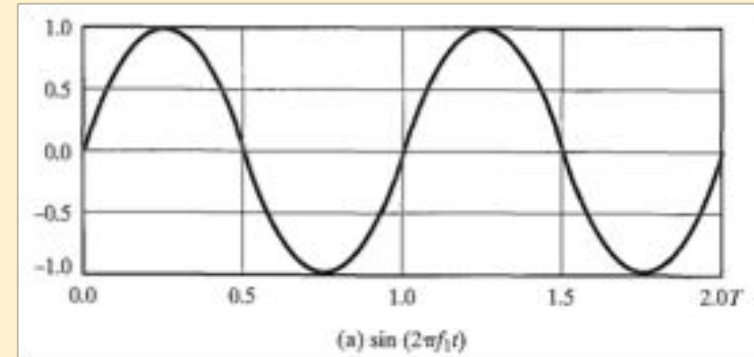
- **Ejemplo 4 (cont)**

Representación aproximada de una señal digital periódica cuadrada a partir de sus armónicos

- Usando sólo el armónico 1

La función cuadrada se aproxima por la siguiente función:

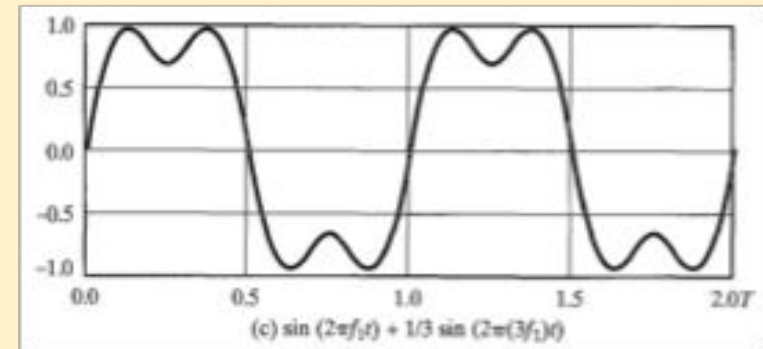
$$g_1(t) = A \sen(2\pi ft)$$



- Usando los armónicos 1 y 3

La función cuadrada se aproxima por la siguiente función:

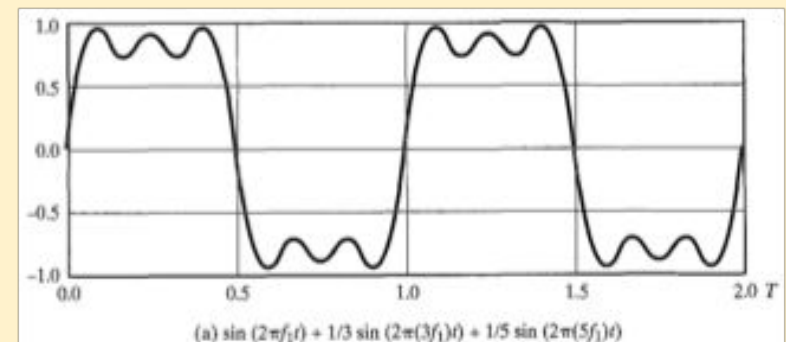
$$g_2(t) = A \sen(2\pi ft) + \frac{A}{3} \sen(6\pi ft)$$



- Usando los armónicos 1, 3 y 5

La función cuadrada se aproxima por la siguiente función:

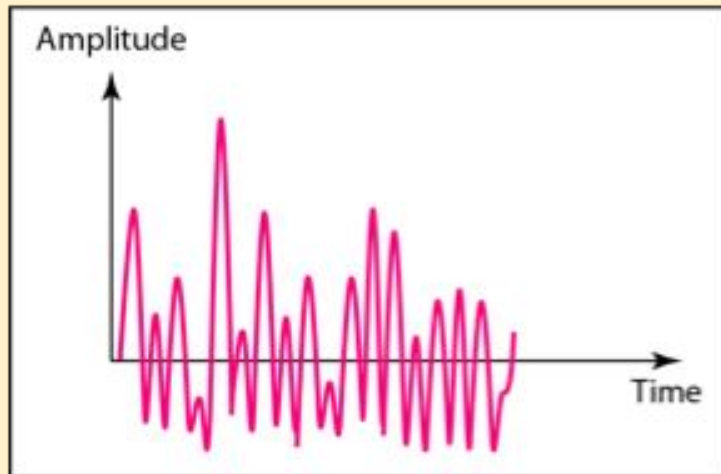
$$g_3(t) = A \sen(2\pi ft) + \frac{A}{3} \sen(6\pi ft) + \frac{A}{5} \sen(10\pi ft)$$



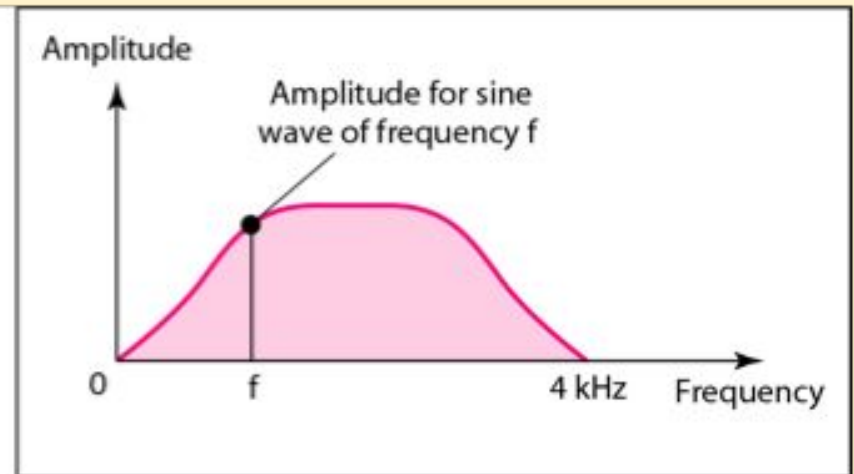
# Tipos de señales: señales aperiódicas

- **Descomposición de Fourier de señales aperiódicas**
  - Las señales aperiódicas son aquellas que no presentan ningún patrón de repetición
  - Cualquier señal aperiódica en el dominio del tiempo se puede descomponer en un conjunto continuo de componentes en frecuencia

## Ejemplo 1: señal analógica aperiódica



a. Time domain



b. Frequency domain

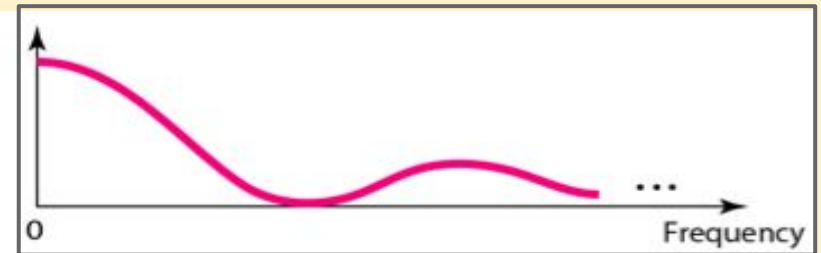
# Tipos de señales: señales aperiódicas

## Ejemplo 2: Señal digital aperiódica

- En general, las señales digitales suelen ser aperiódicas
- Estas señales también pueden descomponerse en un conjunto continuo de componentes en frecuencia con ancho de banda infinito



a. Time domain



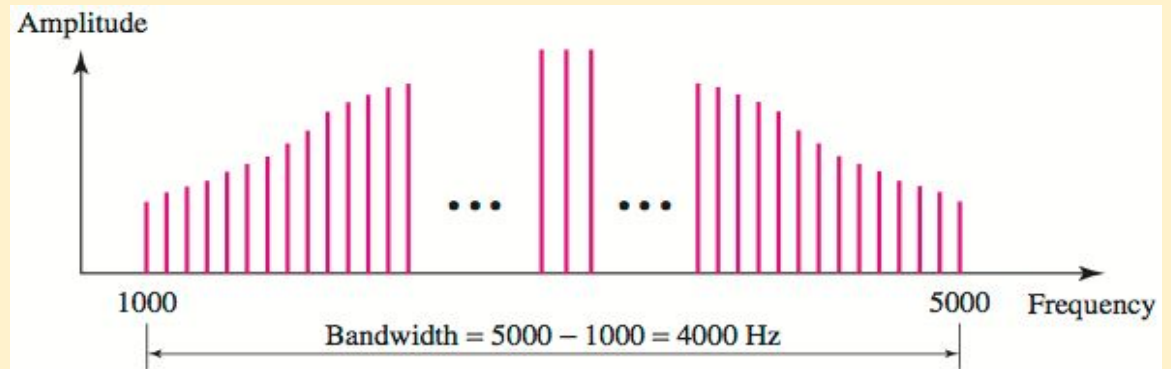
b. Frequency domain

# Espectro en frecuencias y ancho de banda

- **Espectro en frecuencias:** conjunto de componentes en frecuencia o armónicos que componen la señal
- **Ancho de banda absoluto:** diferencia entre la frecuencia más alta y la frecuencia más baja contenida en la señal (puede ser infinito)
- **Ancho de banda (efectivo):** parte del ancho de banda donde se concentra la mayor parte de la energía de la señal (suele ser limitado)

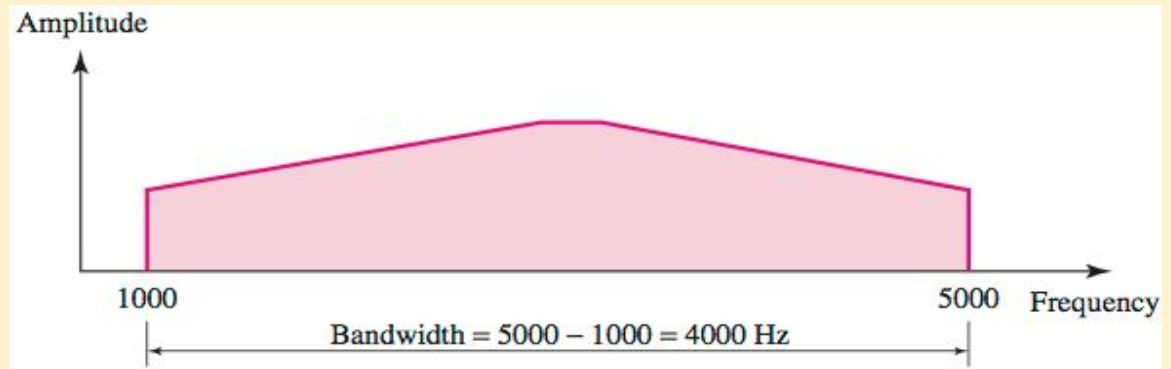
## Ejemplo 1:

Ancho de banda de una señal periódica



## Ejemplo 2:

Ancho de banda de una señal aperiódica





---

## **3. Propiedades de un canal de transmisión**

- Ancho de banda
- Atenuación
- Ruidos
- Teorema de Nyquist
- Teorema de Shannon

# Propiedades de una canal de transmisión

- **Ancho de banda de un canal de transmisión**

- El ancho de banda (H) de un canal es el rango de frecuencias que este canal puede transmitir para una distancia determinada sin atenuación

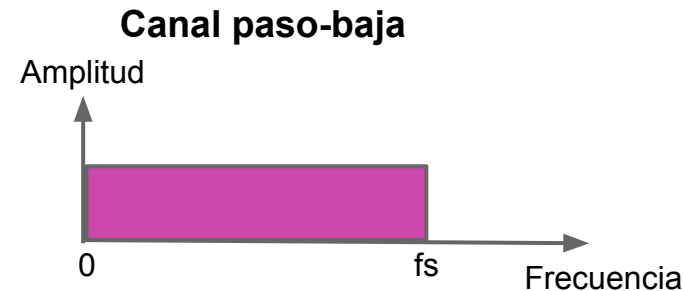
$$H = f_s - f_i$$

siendo:

- $f_i$  = frecuencia de corte inferior
- $f_s$  = frecuencia de corte superior
- Tipos de canales de transmisión

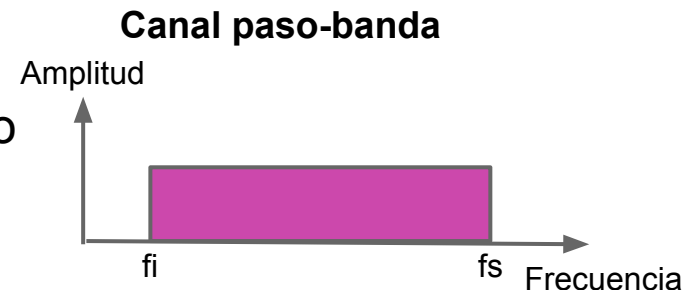
- **Canal paso-baja**

- La frecuencia de corte inferior es  $f_i=0$
- Deja pasar todas las frecuencias inferiores a  $f_s$  ( $f \leq f_s$ )



- **Canal paso-banda**

- La frecuencia de corte inferior es  $f_i > 0$
- Deja pasar todas las frecuencias dentro de la banda entre  $f_i$  y  $f_s$  ( $f_i \leq f \leq f_s$ )



# Propiedades de una canal de transmisión

- Relación entre ancho de banda del canal y velocidad de transmisión

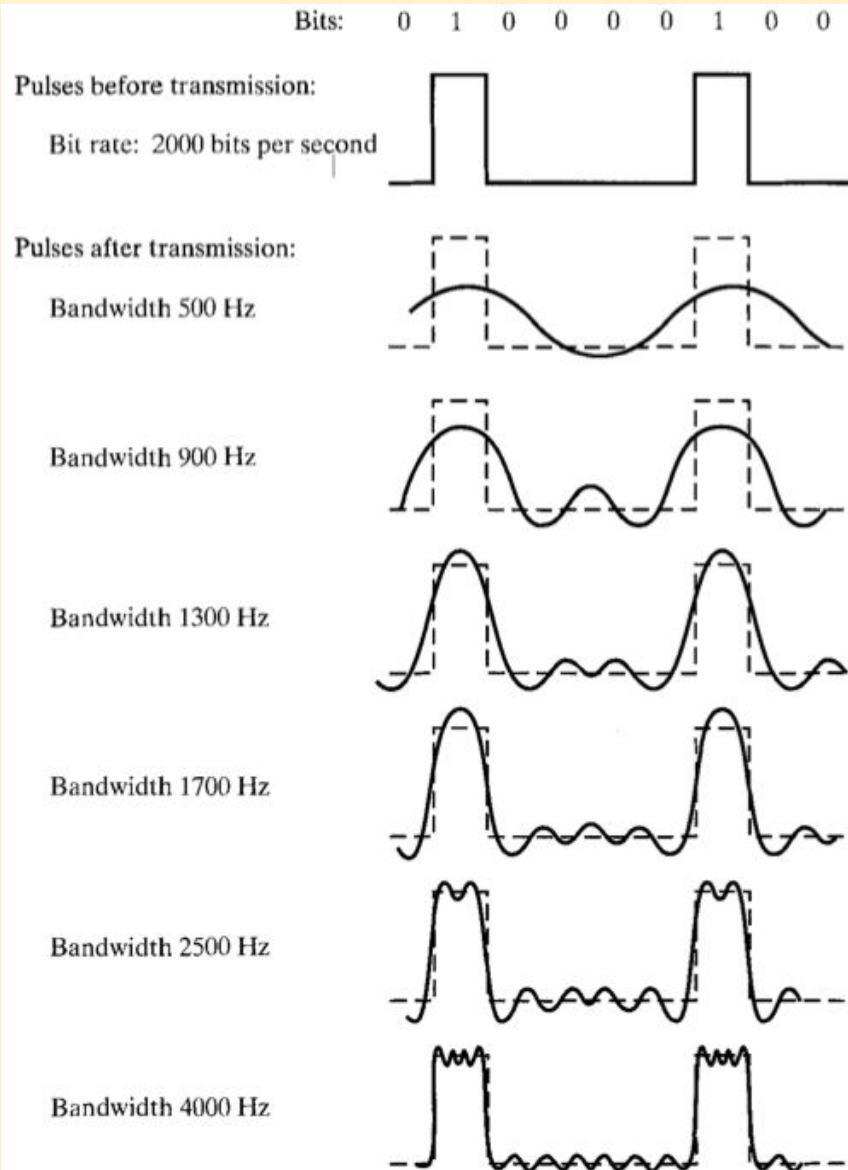
## Ejemplo:

- Queremos transmitir una señal binaria cuadrada (10101010...) a una velocidad de 2 Mbps. Para que la señal sea reconocible en el destino, queremos que se transmitan al menos los tres primeros armónicos (1,3,5)
  - Periodo y frecuencia de la señal
    - Cada bit durará  $T_{bit} = 1 / (2 \cdot 10^6)$  segundos = 0,5  $\mu$ s
    - El periodo de la señal cuadrada periódica será  $T = 1 \mu$ s
    - La frecuencia de la señal cuadrada será  $f = 1/T = 1$  MHz.
  - Frecuencia de los armónicos
    - Armónico 1  $\rightarrow$  Frecuencia  $f = 1$  MHz
    - Armónico 3  $\rightarrow$  Frecuencia  $3f = 3$  MHz
    - Armónico 5  $\rightarrow$  Frecuencia  $5f = 5$  Mhz
  - El canal de transmisión debe tener
    - Una frecuencia de corte inferior  **$f_i \leq f = 1$  MHz**
    - Una frecuencia de corte superior  **$f_s \geq 5f = 5$  MHz**
  - Necesitamos un ancho de banda  **$H = f_s - f_i = 4$  MHz** como mínimo

# Propiedades de una canal de transmisión

- Relación entre ancho de banda del canal y velocidad de transm. (cont.)

## Ejemplo (cont.)



# Propiedades de una canal de transmisión

- **Relación entre ancho de banda del canal y velocidad de transm. (cont.)**
  - Conclusión
    - A mayor velocidad de transmisión, mayor es el ancho de banda necesario en el canal de transmisión
    - Cuanto mayor es el ancho de banda del canal, mayor velocidad de transmisión se puede alcanzar
    - Existe una relación directa entre el ancho de banda de un canal (medido en Hz) y su capacidad de transmisión (medida en bps), por lo que habitualmente se tratan como términos sinónimos (aunque en realidad son conceptos distintos)
  - Teoremas de Nyquist y Shannon
    - Determinan la relación teórica entre el ancho de banda de un canal y su capacidad de transmisión (en bps)
      - Para un canal ideal (Nyquist)
      - Para un canal real sujeto a un determinado nivel de ruido (Shannon)

**NOTA:** *los teoremas de Nyquist y Shannon se estudian más adelante*

# Propiedades de una canal de transmisión

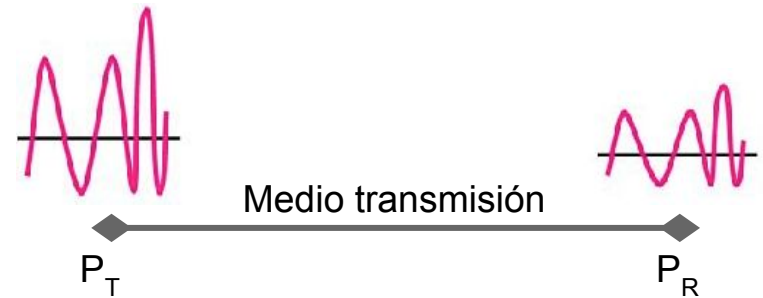
## ● Atenuación

- La energía de la señal decae con la distancia recorrida en el canal de transmisión
  - Para que el receptor pueda detectar e interpretar correctamente la señal recibida, ésta debe tener suficiente energía
  - La limitación en el ancho de banda de un canal viene causada por la elevada atenuación que sufren las frecuencias fuera del rango de las frecuencias de corte del canal
- La atenuación se expresa en decibelios (dB)

$$\text{Atenuación}_{\text{dB}} = 10 \cdot \log(P_R/P_T)$$

$P_T$  = Potencia de señal transmitida

$P_R$  = Potencia de señal recibida (atenuada)



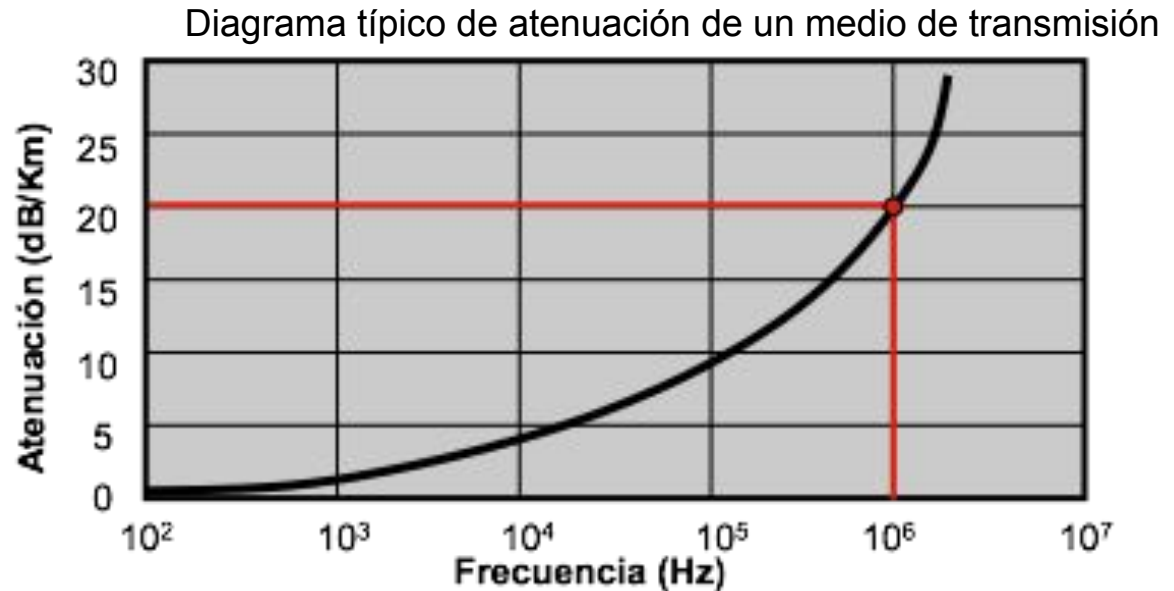
**Ejemplo:** Supongamos una señal que viaja por un medio de transmisión y su potencia se reduce a la mitad, es decir,  $P_R = 0,5 P_T$

$$\text{Atenuación}_{\text{dB}} = 10 \cdot \log(P_R/P_T) = 10 \cdot \log(0,5) = 10 \cdot (-0,3) = -3 \text{ dB}$$

# Propiedades de una canal de transmisión

- **Atenuación (cont.)**

- La atenuación es una función de:
  - La distancia
  - La frecuencia



**Ejemplo:** Señal de 1 MHz → Atenuación = 20 dB/Km

Distancia	Atenuación	Relación $P_R/P_T$
100 m	-2 dB	$10 \cdot \log(P_R/P_T) = -2 \rightarrow P_R/P_T = 0,6 \rightarrow P_R = 60\% P_T$
500 m	-10 dB	$10 \cdot \log(P_R/P_T) = -10 \rightarrow P_R/P_T = 0,1 \rightarrow P_R = 10\% P_T$
1 Km	-20 dB	$10 \cdot \log(P_R/P_T) = -20 \rightarrow P_R/P_T = 0,01 \rightarrow P_R = 1\% P_T$
2 Km	-40 dB	$10 \cdot \log(P_R/P_T) = -40 \rightarrow P_R/P_T = 0,001 \rightarrow P_R = 0,01\% P_T$

# Propiedades de una canal de transmisión

- **Ruido**

- Todos los medios de transmisión están sujetos a ciertos tipos de ruidos
- Los tipos de ruido más comunes son:
  - **Ruido térmico o ruido blanco:** se debe a la agitación de los electrones dentro del conductor
  - **Diafonía:** se debe al acoplamiento entre líneas o señales cercanas
  - **Ruido impulsivo o electromagnético:** se genera por perturbaciones electromagnéticas exteriores (tormentas, líneas de alta tensión, fallos en el sistema de comunicación, etc.)
- **Relación señal/ruido (SNR, Signal/Noise Ratio)**
  - Se define como la relación entre la potencia de la señal (S) y la potencia del ruido (N) en un punto determinado del canal de transmisión
  - Cuanto mayor es el valor de SNR, mayor será la calidad de la señal recibida
  - SNR se mide en decibelios

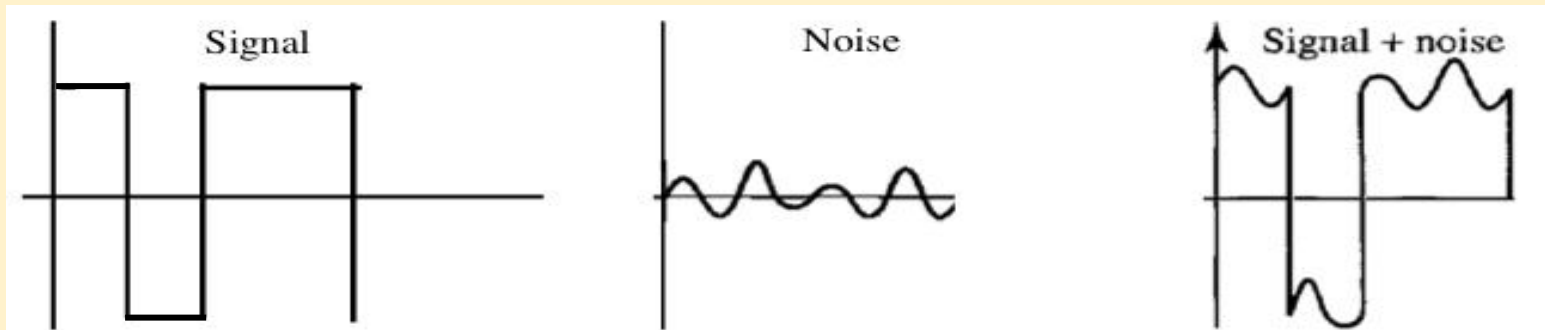
$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \cdot \log(S/N)$$



# Propiedades de una canal de transmisión

- Ruido (cont.)

## Ejemplo 1: Relación señal/ruido alta



Potencia media de la señal:  $S=60$  mWatt

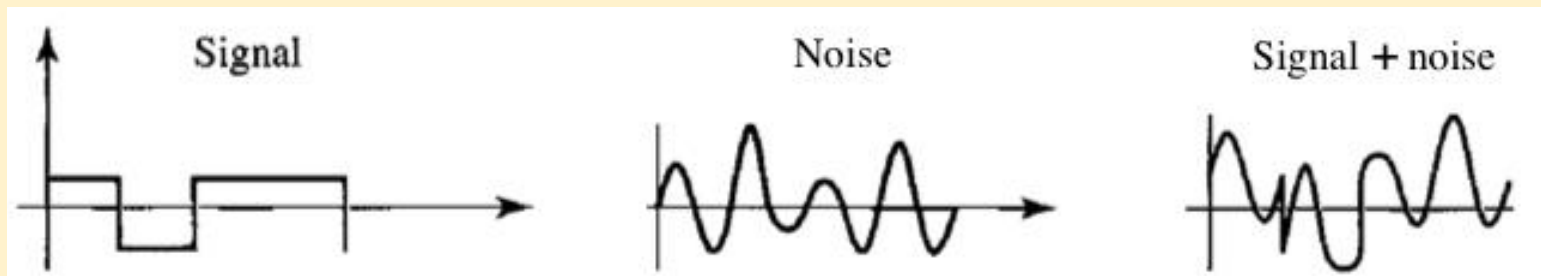
Potencia media del ruido:  $N=5$  mWatt



$$S/N = 60 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-3} = 12$$

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log(S/N) = 10 \cdot \log(12) = 10.8 \text{ dB}$$

## Ejemplo 2: Relación señal/ruido baja



Potencia media de la señal:  $S=6$  mWatt

Potencia media del ruido:  $N=5$  mWatt



$$S/N = 6 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-3} = 1.2$$

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log(S/N) = 10 \cdot \log(1.2) = 0.8 \text{ dB}$$

# Propiedades de una canal de transmisión

- **Capacidad de un canal ideal: Teorema de Nyquist**

- Relación entre ancho de banda y velocidad de transmisión (tasa de bits) en un canal ideal (sin ruido)

$$C_N = B_{\max} \cdot R = 2 \cdot H \cdot R$$

Siendo

$C_N \Rightarrow$  Tasa de bits alcanzable (bps), según el teorema de Nyquist

$B_{\max} = 2 \cdot H \Rightarrow$  Tasa de baudios máxima alcanzable

$H \Rightarrow$  Ancho de banda del canal

$R =$  N° de bits por elemento de señal (bits por baudio)

## Ejemplo

- Canal telefónico ideal:  $H=3000$  Hz  $\Rightarrow B_{\max} = 2 \cdot H = 6000$  baud
- Suponiendo una codificación de  $V=2^R$  elementos de señal ( $R=\log_2 V$ ) la tasa máxima de bits alcanzable será:

$$V = 2 \text{ elementos de señal } (R=1) \Rightarrow C_N = 6000 \cdot 1 = 6000 \text{ bps}$$

$$V = 4 \text{ elementos de señal } (R=2) \Rightarrow C_N = 6000 \cdot 2 = 12000 \text{ bps}$$

$$V = 8 \text{ elementos de señal } (R=3) \Rightarrow C_N = 6000 \cdot 3 = 18000 \text{ bps}$$

$$V = 16 \text{ elementos de señal } (R=4) \Rightarrow C_N = 6000 \cdot 4 = 24000 \text{ bps}$$

...

# Propiedades de una canal de transmisión

- **Capacidad de un canal real: Teorema de Shannon**

- Relación entre ancho de banda y velocidad de transmisión (tasa de bits) en un canal real (con ruido)

$$C_s = H \cdot \log_2(1 + S/N)$$

Siendo

$C_s \Rightarrow$  Tasa de bits máx. alcanzable (bps), según el teorema de Shannon

$H \Rightarrow$  ancho de banda del canal

$S/N \Rightarrow$  relación señal-ruido del canal

- Como vemos esta expresión no depende de la relación bit por baudio (R), sino que representa el límite superior de tasa de bits alcanzable por un canal de transmisión real

# Propiedades de una canal de transmisión

- **Capacidad de un canal real: Teorema de Shannon (cont.)**

## Ejemplo

- Sea un canal telefónico real con
$$H = 3000 \text{ Hz}$$
$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 30 \text{ dB} \rightarrow S/N = 1000$$
- Según el teorema de Shanon, la tasa de bits máxima alcanzable será:
$$C_s = 3000 \cdot \log_2(1 + S/N) = 29901 \text{ bps}$$
- Aplicando el teorema de Nyquist, suponiendo una codificación de  $V=2^R$  elementos de señal ( $R=\log_2 V$ ), si mantenemos la tasa de baudios máxima ( $B_{\text{max}} = 2 \cdot H = 6000 \text{ baud}$ ), el valor de  $C_s$  limita el n° máximo de elementos de señal que podemos emplear y la tasa de bits real que podemos alcanzar:
$$C_N = 6000 \cdot R \leq C_s = 29901 \Rightarrow R \leq 4,98$$
$$\Rightarrow R = 4 \text{ bits por elemento de señal}$$
$$\Rightarrow V = 16 \text{ elementos de señal}$$
$$\Rightarrow C_N = 24000 \text{ bps} \Rightarrow \text{tasa de bits real alcanzable}$$
- Para acercarnos al límite impuesto por  $C_s$ , podríamos reducir la tasa de baudios empleada y utilizar un mayor n° de elementos de señal. Por ejemplo:
  - Usando una tasa de baudios  $B = 5980 \text{ baud} < B_{\text{max}}$
  - Usando 32 elementos de señal ( $V=32$ )  $\Rightarrow R = 5 \text{ bits por elemento de señal}$
  - Obtenemos una tasa de bits:  $C = B \cdot R = 29900 \text{ bps}$

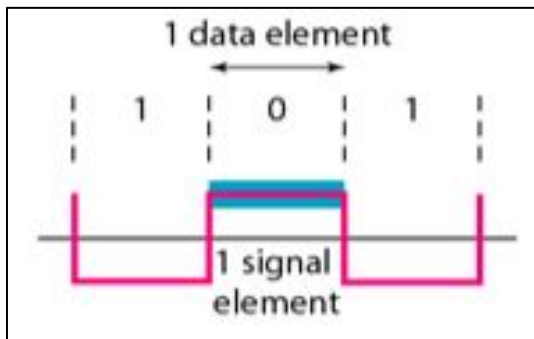
---

## **4. Transmisión digital**

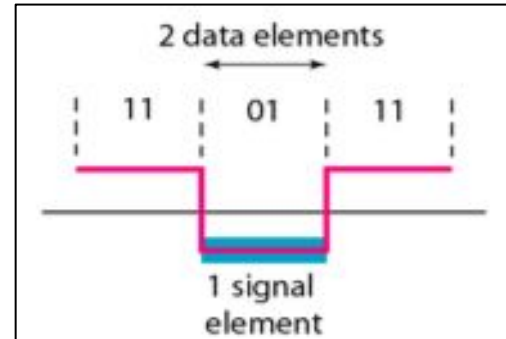
- Técnicas de codificación de línea
- Técnicas de codificación de bloque

# Transmisión Digital

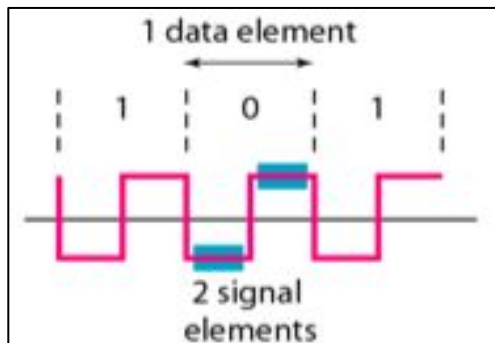
- La **transmisión digital** consiste en enviar datos digitales usando señales digitales
  - También se denomina **transmisión en banda base**
- Repaso: elementos de datos (= bits) vs. elementos de señal (= símbolos)
  - Tasa de bits (bps) vs. tasa de baudios (baud)
  - $R$  = relación de bits por elemento de señal (= bits por baudio)



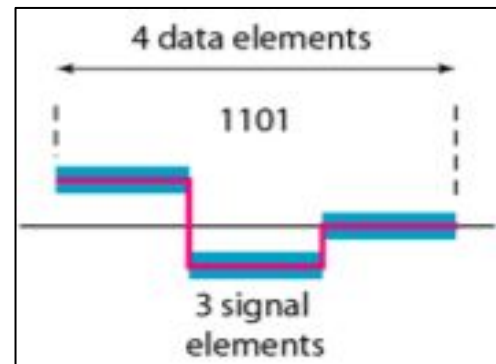
1 bit por cada elemento de señal  
( $R=1$ )



2 bits por cada elemento de señal  
( $R=2$ )



1 bit por cada 2 elemento de señal  
( $R=1/2$ )



4 bits por cada 3 elementos de señal  
( $R=4/3$ )

# Transmisión Digital

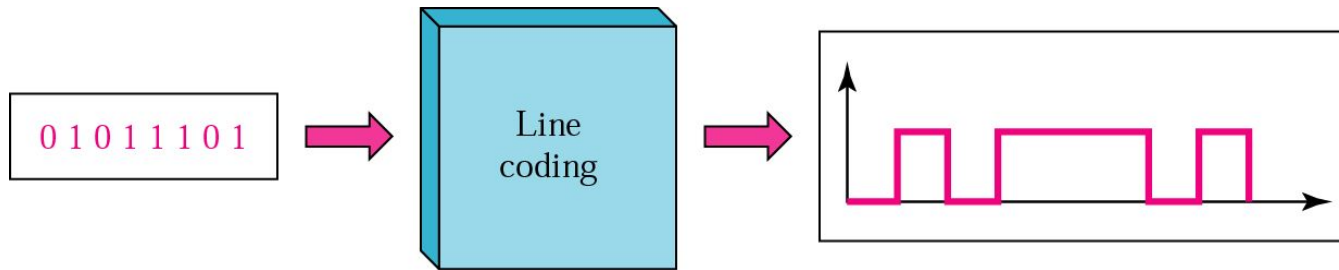
- **Objetivo de los esquemas de codificación digital:**

- Aprovechar el ancho de banda
  - Obtener la mejor relación bits por baudio ( $R$ ) posible, incrementando la tasa de bits, al mismo tiempo que se intenta reducir la tasa de baudios.
- Auto-sincronización
  - Para interpretar correctamente las señales recibidas, los intervalos de bits del receptor deben corresponder exactamente con los del transmisor.
  - Esto se consigue con transiciones en la señal que alerten al receptor del comienzo, de la mitad o del fin de un pulso.
- Evitar variaciones de la línea base
  - Para descodificar la señal digital, el receptor calcula la potencia media de la señal recibida (línea base) y determina el valor de cada bit comparando la potencia de la señal recibida con la línea base
  - Si existen largas cadenas de voltajes positivos o negativos, esto puede provocar variaciones de la línea base
- Evitar componentes de corriente continua (DC)
  - Si el nivel de voltaje en una señal es constante durante bastante tiempo, el espectro crea frecuencias muy bajas (componentes DC)
  - Esto da lugar a problemas en sistemas que no pueden pasar frecuencias bajas (canales paso-banda) o que utilizan acoplamiento eléctrico con transformador.

# Transmisión Digital

- **Técnicas de codificación digital**

- **Codificación de línea** (*line coding*), convierte una secuencia de bits en una señal digital



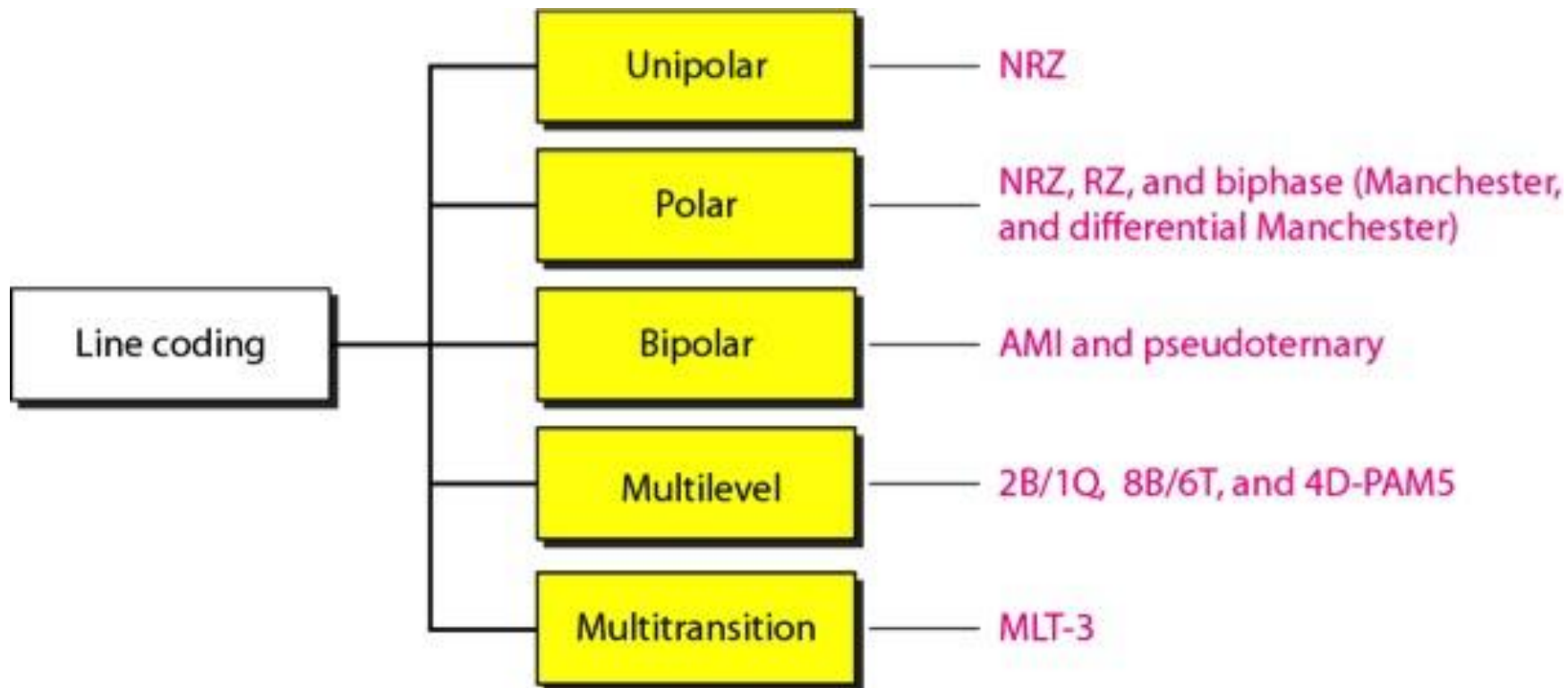
- **Codificación de bloque** (*block coding*) transforma bloques de  $m$  bits en códigos de  $n$  bits ( $n > m$ )
  - Estos códigos incluyen bits redundantes para garantizar sincronización y detección de errores
  - Los códigos de  $n$  bits resultantes se convierten, a su vez, en una señal digital usando técnicas de codificación de línea



# Transmisión Digital

- **Tipos de codificación de línea**

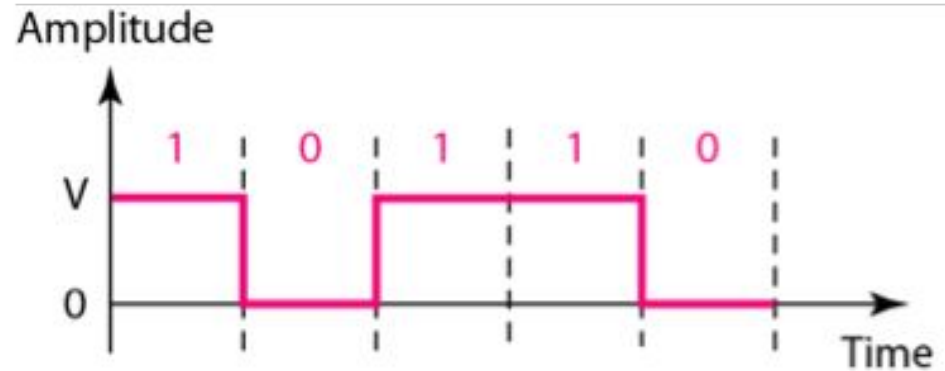
- Unipolar (NRZ)
- Polar (NRZ, RZ, bifase)
- Bipolar (AMI, Pseudoternaria)
- Multinivel: 2B1Q, 8B6T, 4D-PAM5
- Multitransición: MLT-3



# Transmisión Digital

- **Codificación unipolar**

- Utiliza voltajes  $\geq 0$  para representar los valores binarios
- **Sin retorno a cero (NRZ)**
  - 0 = Voltaje igual a 0 volt.
  - 1 = Voltaje positivo (V volt.)



- **Ventajas**

- Fáciles de implementar
- 1 bit por elemento de señal ( $R=1$ )

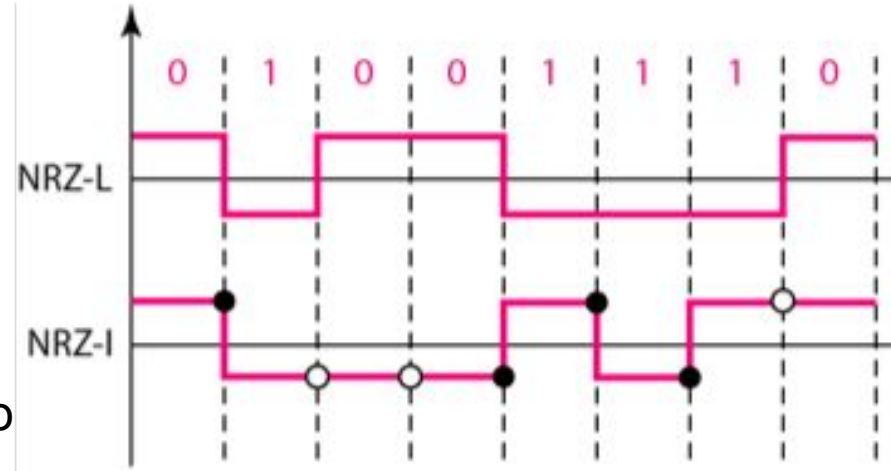
- **Inconvenientes**

- No tiene capacidad de sincronización
- Componente DC cuando hay cadenas de 0's o de 1's
- La línea base es distinta de cero y creciente cuando hay largas cadenas de 1's

# Transmisión Digital

- **Codificación polar NRZ (sin retorno a cero)**

- Utiliza dos niveles eléctricos con polaridades opuestas ( $-V$ ,  $+V$ )
- **Sin retorno a cero de nivel (NRZ-L)**
  - 0 = nivel alto/positivo
  - 1 = nivel bajo/negativo
- **Sin retorno a cero invertido (NRZ-I)**
  - 0 = no hay transición al comienzo del intervalo (un bit cada vez)
  - 1 = transición al comienzo del intervalo



- **Ventajas**

- Fáciles de implementar
- 1 bit por elemento de señal ( $R=1$ )

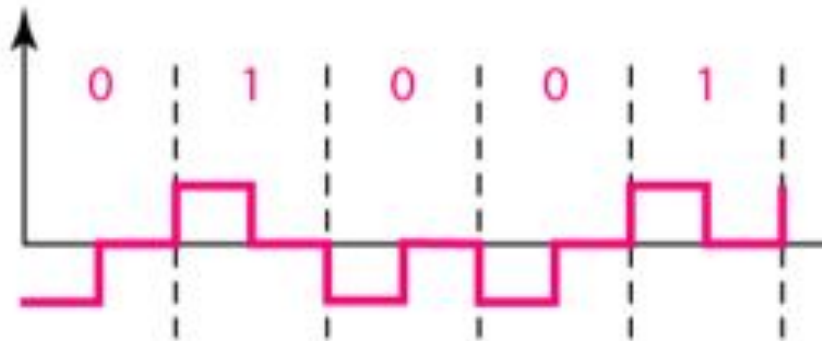
- **Inconvenientes**

- No tienen capacidad de sincronización
- NRZ-L: componente DC y línea base variable cuando hay largas cadenas de 0's o 1's
- NRZ-I: mejor comportamiento en componente DC y línea base cuando hay largas cadenas de 1's

# Transmisión Digital

- **Codificación polar RZ (con retorno a cero)**

- Utiliza tres niveles eléctricos (-V, 0, +V)
- Cada elemento de datos se codifica con una transición en medio  
0 = transición de -V a 0 en mitad del bit  
1 = transición de +V a 0 en mitad del bit



- **Ventajas**

- Permite la sincronización (1 transición por bit)
- No hay componente DC
- Valor medio de línea base = 0

- **Inconvenientes**

- Más complejo, al utilizar 3 niveles de voltaje
- Peor aprovechamiento de la tasa de baudios:  $R = 1/2$   
(2 elementos de señal por cada bit)

# Transmisión Digital

- **Codificación polar bifase**

- Utiliza dos niveles eléctricos de polaridad opuesta ( $-V$ ,  $+V$ )
- Cada elemento de datos se codifica con una transición en mitad del intervalo

- **Manchester**

0 = Nivel alto seguido de bajo

1 = Nivel bajo seguido de alto

- **Manchester diferencial**

0 = Presencia de transición al inicio del intervalo

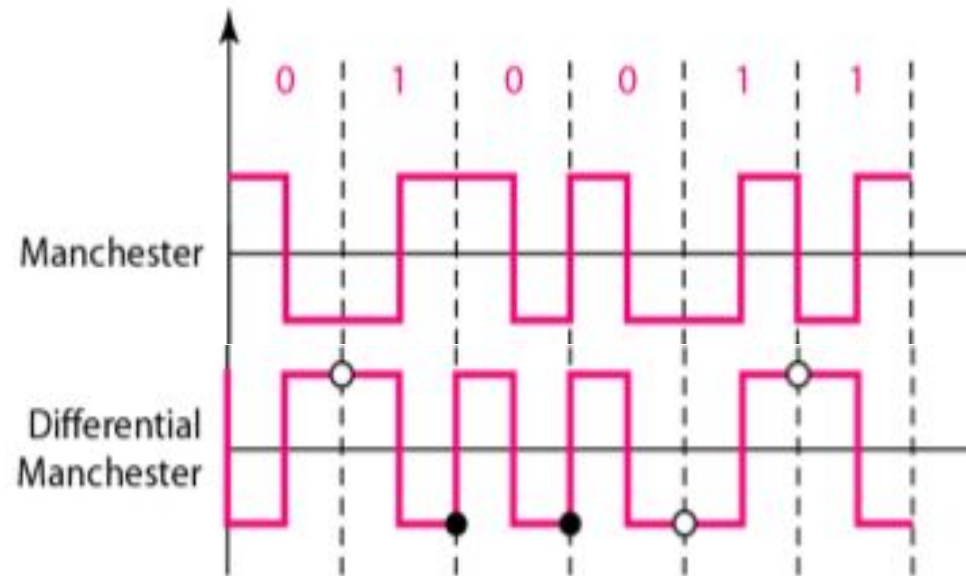
1 = Ausencia de transición al inicio del intervalo

- **Ventajas**

- Permite la sincronización (1 transición por bit)
- No hay componente DC
- Valor medio de línea base = 0

- **Inconvenientes**

- Peor aprovechamiento de la tasa de baudios:  $R = 1/2$   
(2 elementos de señal por cada bit)



# Transmisión Digital

- **Codificación bipolar**

- Utiliza tres niveles eléctricos (positivo, negativo y cero)

- **Bipolar con inversión de marca alternada (AMI)**

0 = Nivel de voltaje 0

1 = Nivel positivo o  
negativo alternante

- **Pseudoternaria**

0 = Nivel positivo o  
negativo alternante

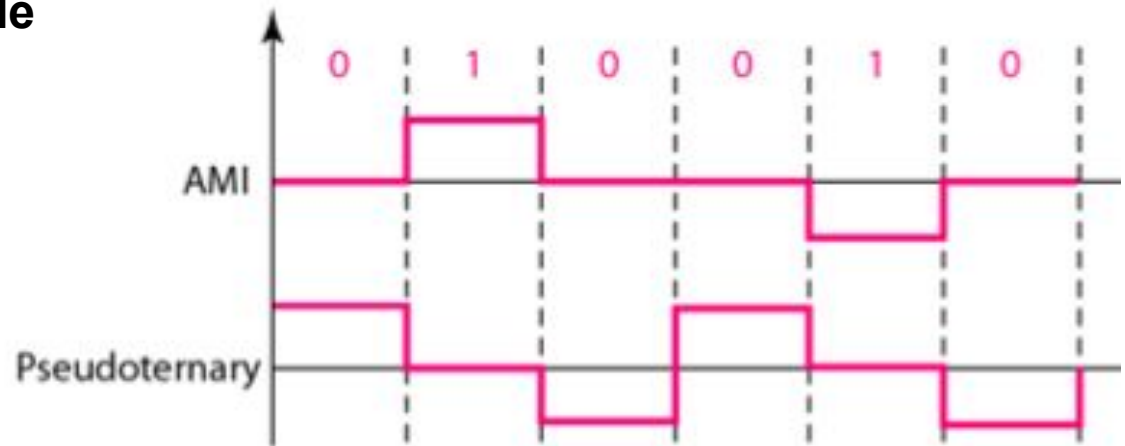
1 = Nivel de voltaje 0

- **Ventajas**

- No hay componente DC
- Valor medio de línea base = 0
- Capacidad de sincronización parcial (transiciones en cadenas largas de 1's en AMI o cadenas largas de 0's en pseudo)
- $R=1$  bit por elemento de señal

- **Desventajas**

- Más complejo, al utilizar 3 niveles de voltaje



# Transmisión Digital

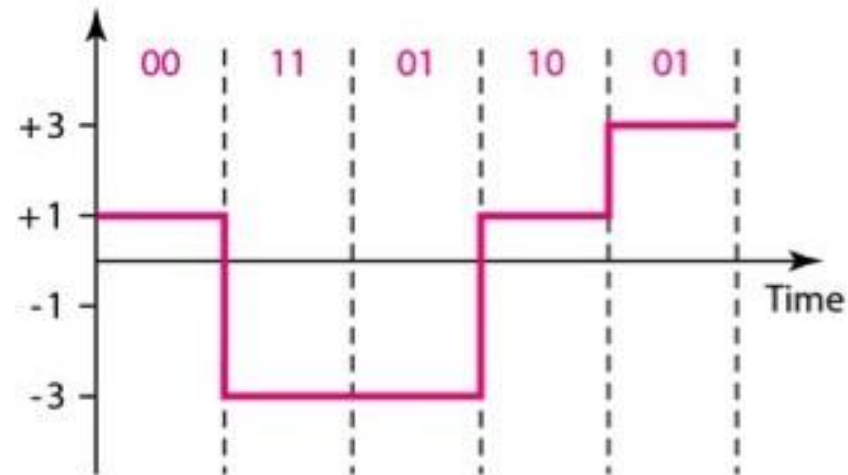
- **Codificación multinivel**

- Utiliza varios niveles eléctricos que permiten codificar varios bits por elemento de señal y por tanto incrementar la tasa de bits
- **Codificación 2B1Q (2 binario, 1 cuaternario)**
  - Codifica patrones de 2 bits por cada elemento de señal, donde la señal tiene cuatro niveles eléctricos (cuaternario): 2 niveles positivos y 2 negativos.

Previous level: positive      Previous level: negative

Next bits	Next level	Next level
00	+1	-1
01	+3	-3
10	-1	+1
11	-3	+3

Transition table



- **Ventajas**

- R=2 bits por elemento de señal

- **Desventajas**

- Más complejo, al utilizar 4 niveles de voltaje
- Puede existir componente DC y línea base variable
- No garantiza la sincronización

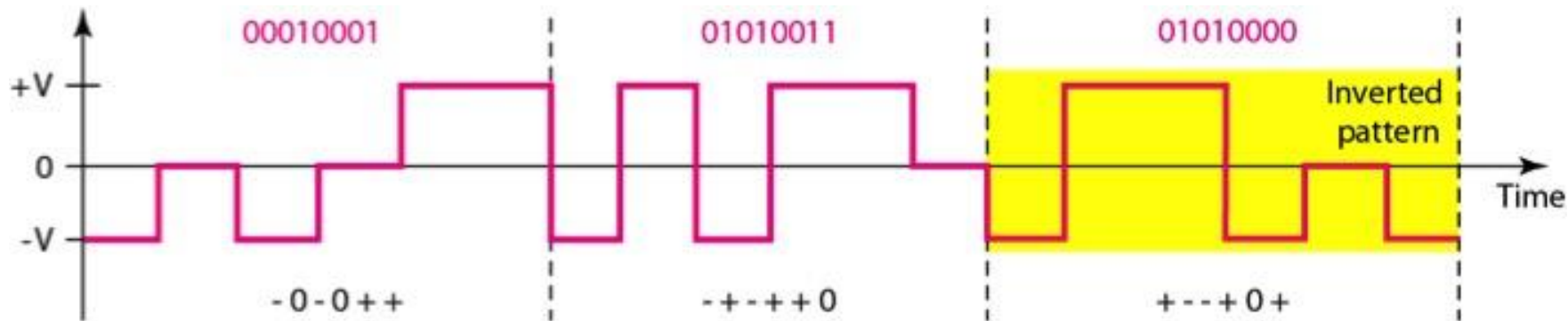
Se emplea en ensamblar/desensamblar por ejemplo

# Transmisión Digital

- **Codificación multinivel (cont.)**

- **Codificación 8B6T (8 binario, 6 ternario)**

- Codifica patrones de 8 bits mediante patrones de 6 elementos de señal, donde la señal tiene tres niveles eléctricos (ternario): +V, 0 y -V



- **Ventajas**

- $R=4/3$  bits por elemento de señal (8/6)
- Existen más patrones de señal ( $3^6=729$ ) que patrones de datos ( $2^8=256$ ), esto permite ofrecer capacidad de sincronización y equilibrio DC (para ello también se usan patrones invertidos)

- **Desventajas**

- Más complejo



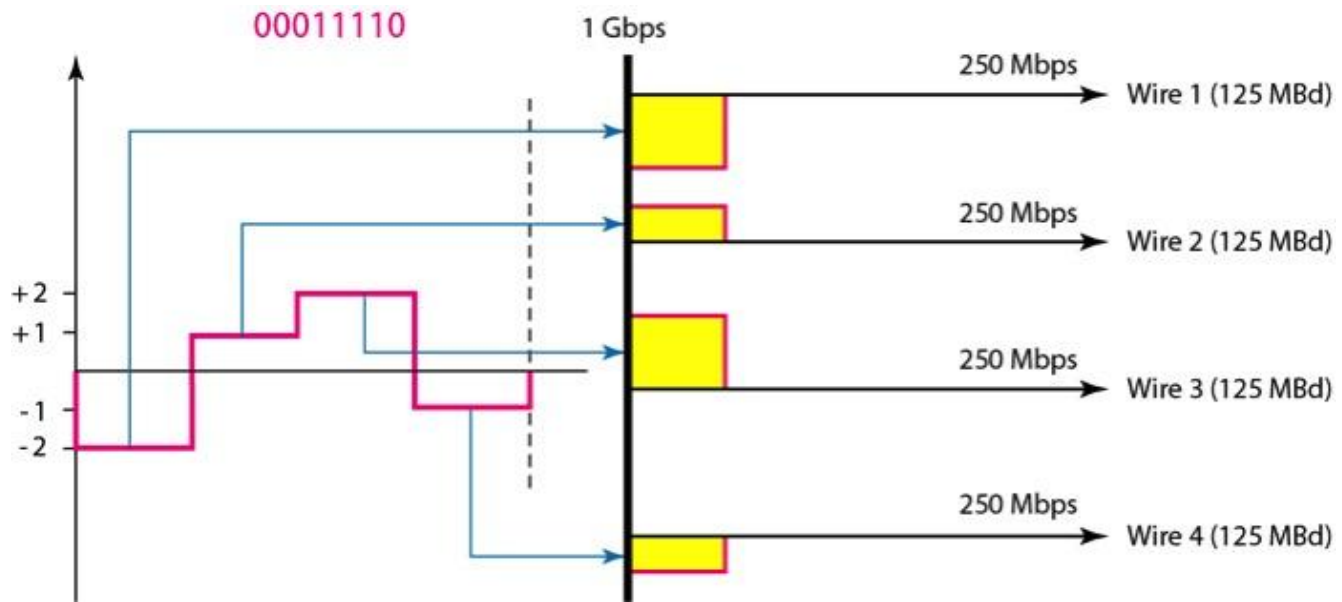
# Transmisión Digital

- **Codificación multinivel (cont.)**

- **Codificación 4D-PAM5**

**(4 dimensional, con modulación por amplitud de pulso de 5 niveles)**

- El término 4D significa que los datos se envían utilizando cuatro cables de forma simultánea
- La señal utiliza 4 niveles de voltaje (+2 V, +1V, -2V y -1V) más un nivel extra (0 V) utilizado para control (sincronización)
- Por cada cable se envían 2 bits por elemento de señal (similar a 2B1Q), lo que equivale a una codificación de 8 bits de datos por cada 4 elementos de señal ( $R=2$ )

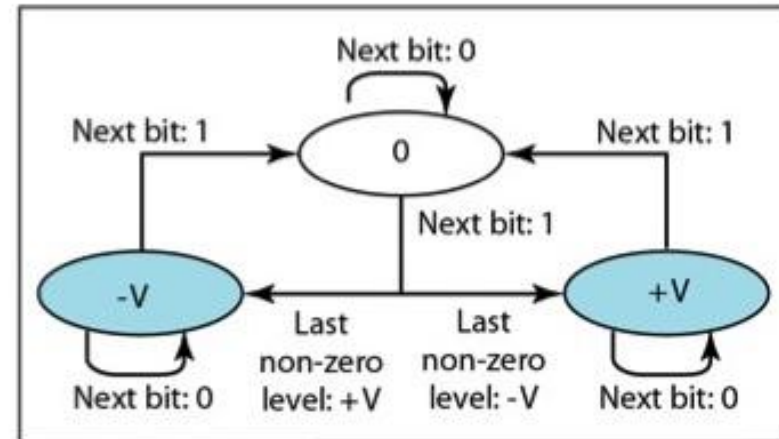
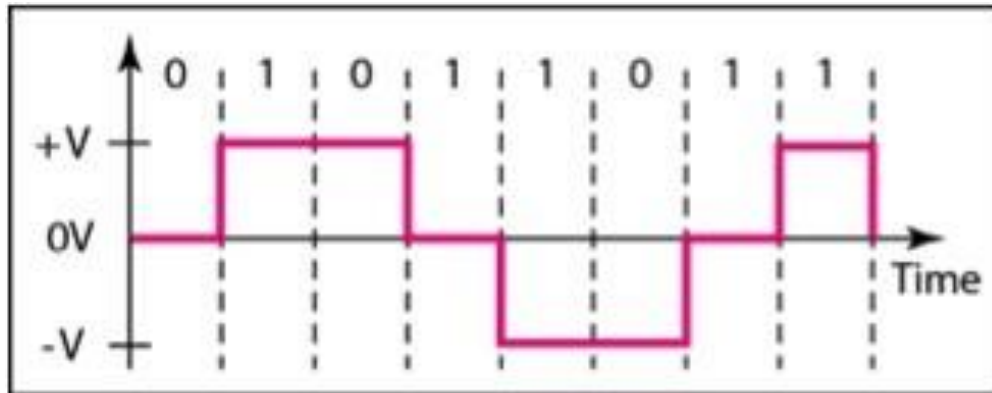


# Transmisión Digital

- Codificación multitransición

- MLT-3

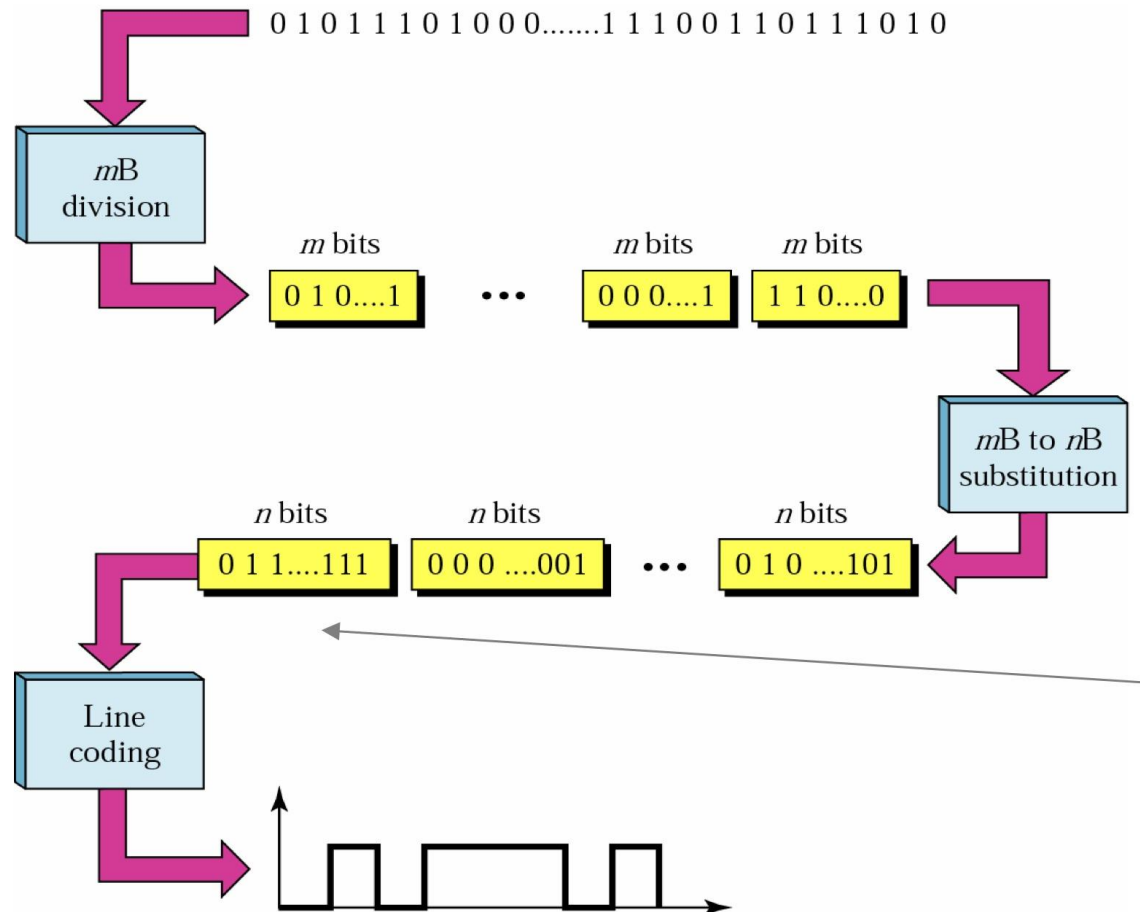
- Utiliza 3 niveles eléctricos (+V, 0 y -V)
- Se basa en reglas de transición para codificar los datos binarios
  - Si el siguiente bit es 0, no hay transición
  - Si el siguiente bit es 1, y el nivel eléctrico actual es  $\neq 0$ , el siguiente nivel es 0
  - Si el siguiente bit es 1, y el nivel eléctrico actual es  $= 0$ , el siguiente nivel es el opuesto al último nivel distinto de cero



# Transmisión Digital

- **Codificación de bloque**

- Transforma bloques de  $m$  bits en códigos de  $n$  bits ( $n > m$ )
  - Estos códigos incluyen bits redundantes para garantizar sincronización y detección de errores
  - Los códigos de  $n$  bits se codifican mediante técnicas de codificación de línea

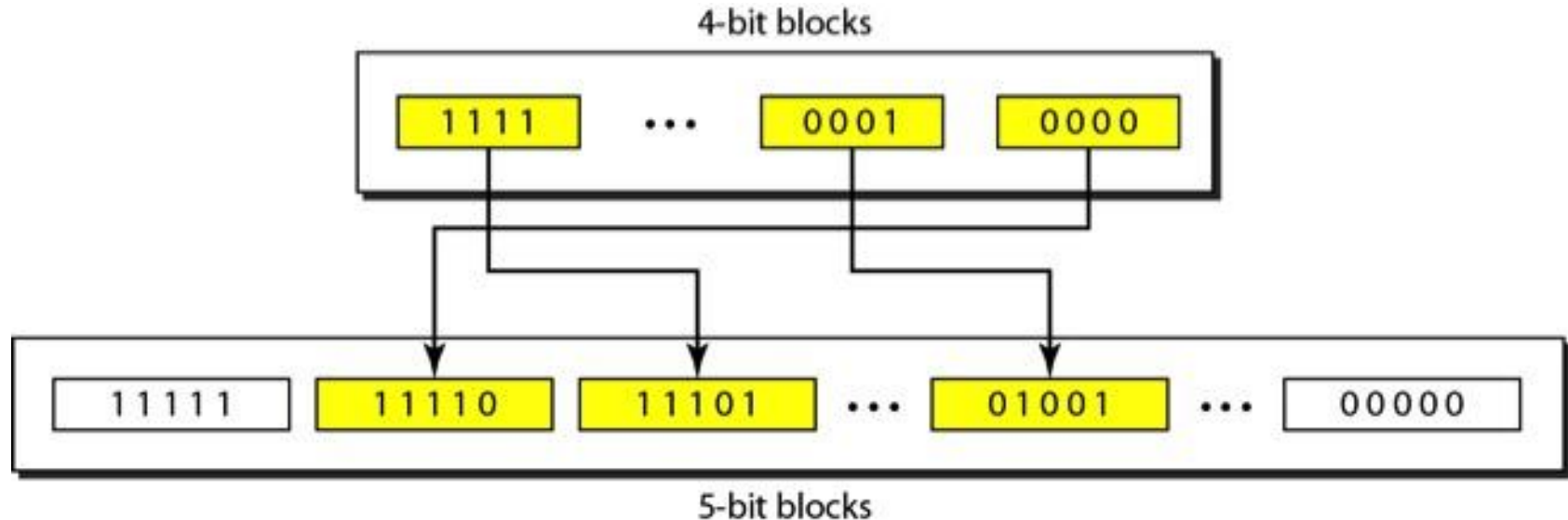


# Transmisión Digital

- **Codificación de bloque: ejemplo**

- Codificación 4B/5B

- Transforma bloques de datos de 4 bits en códigos de 5 bits



- Los códigos seleccionados nunca contienen más de un cero al principio, ni más de 2 ceros al final
  - Esto garantiza que nunca aparezcan más de 3 ceros consecutivos durante la transmisión
  - Luego se codifica mediante NRZ-I, que se comporta bien cuando no existen largas cadenas de ceros (buena sincronización, sin componente DC, ni variación en línea base)

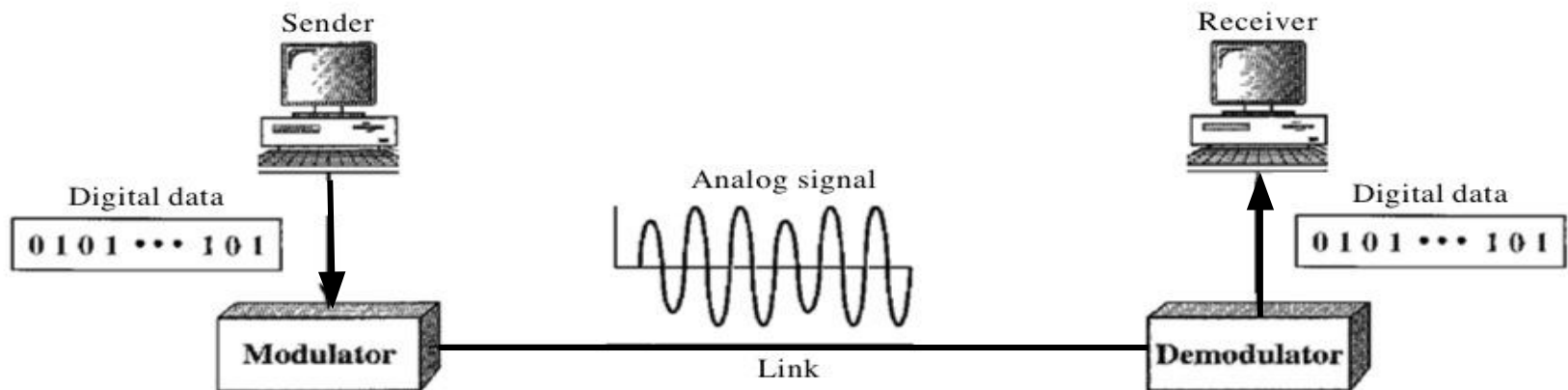
---

# **5. Transmisión analógica**

- Técnicas de modulación

# Transmisión Analógica

- La **transmisión analógica** consiste en enviar datos digitales usando señales analógicas
  - También se denomina **transmisión en banda ancha**
- **Técnicas**
  - **Modulación:** Conversión de datos digitales a una señal analógica
  - **Demodulación:** Conversión inversa
- **Módems** (modulador/demodulador)
  - Dispositivos que realizan la conversión de datos digitales a señales analógicas y viceversa



# Transmisión Analógica: Modulación

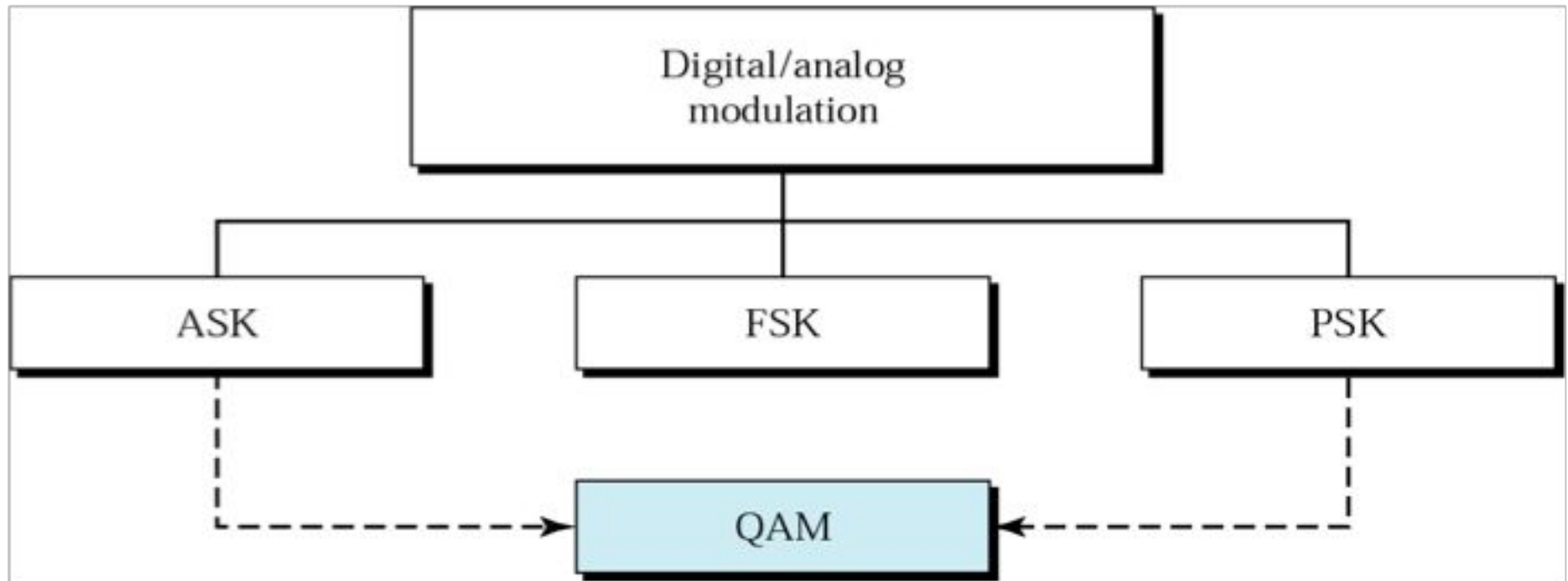
## Necesidad de la Modulación

- Rango de frecuencias de datos distinto al rango de frecuencias del medio
  - Los datos digitales poseen en general un gran número de componentes de frecuencia significativas (típicamente entre 0 y  $f$ )
  - En general, un medio de transmisión tiene un ancho de banda limitado (entre  $f_i$  y  $f_s$ )
  - Para evitar este problema, los datos digitales se pueden transformar (mediante técnicas de modulación) en señales analógicas con una frecuencia comprendida dentro del rango de frecuencias del medio
- Multiplexación por división de la frecuencia en medios de transmisión de gran ancho de banda
  - En lugar de utilizar este ancho de banda para transmitir un único flujo de datos digitales a gran velocidad, se puede dividir en varios subcanales para transmitir flujos de datos digitales de forma simultánea a una velocidad menor (multiplexación por división de frecuencia)
  - Para ello es necesario modular los datos digitales mediante señales analógicas de distinta frecuencia

# Transmisión Analógica: Modulación

- **Principales técnicas de modulación**

- Modulación en amplitud (AM o ASK)
- Modulación en frecuencia (FM o FSK)
- Modulación de fase (PM o PSK)
- Modulación en cuadratura (QAM)





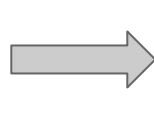
# Transmisión Analógica: Modulación

- **Modulación en Amplitud (ASK, Amplitude Shift Keying)**

- Utiliza una señal portadora con frecuencia y fase constante, pero dos niveles de amplitud distintos para representar el 1 y el 0 lógicos:

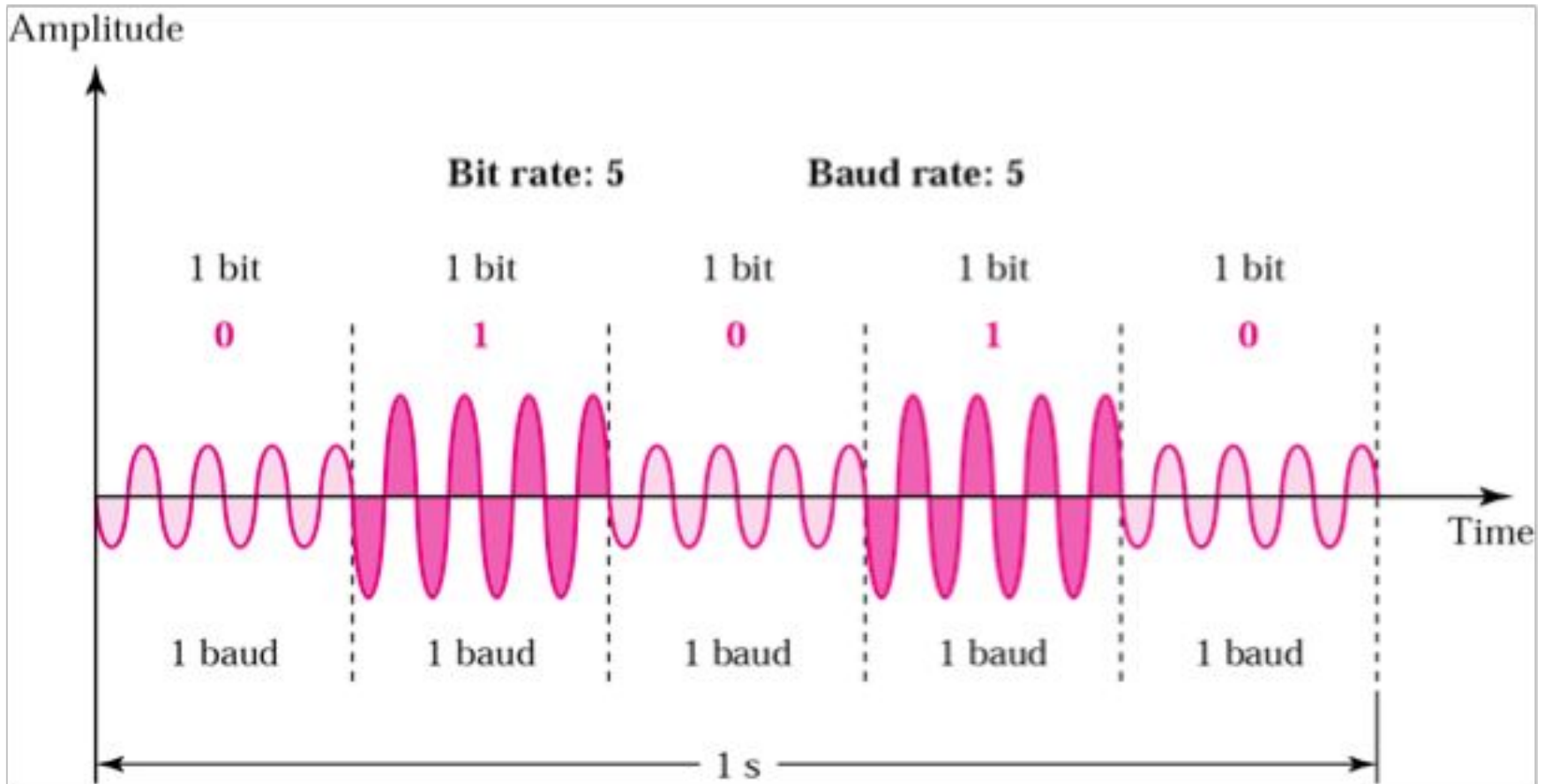
$$1 \rightarrow s(t) = A \sin(2\pi ft)$$

$$0 \rightarrow s(t) = B \sin(2\pi ft)$$



V=2 elementos de señal

R=1 bit por baudio

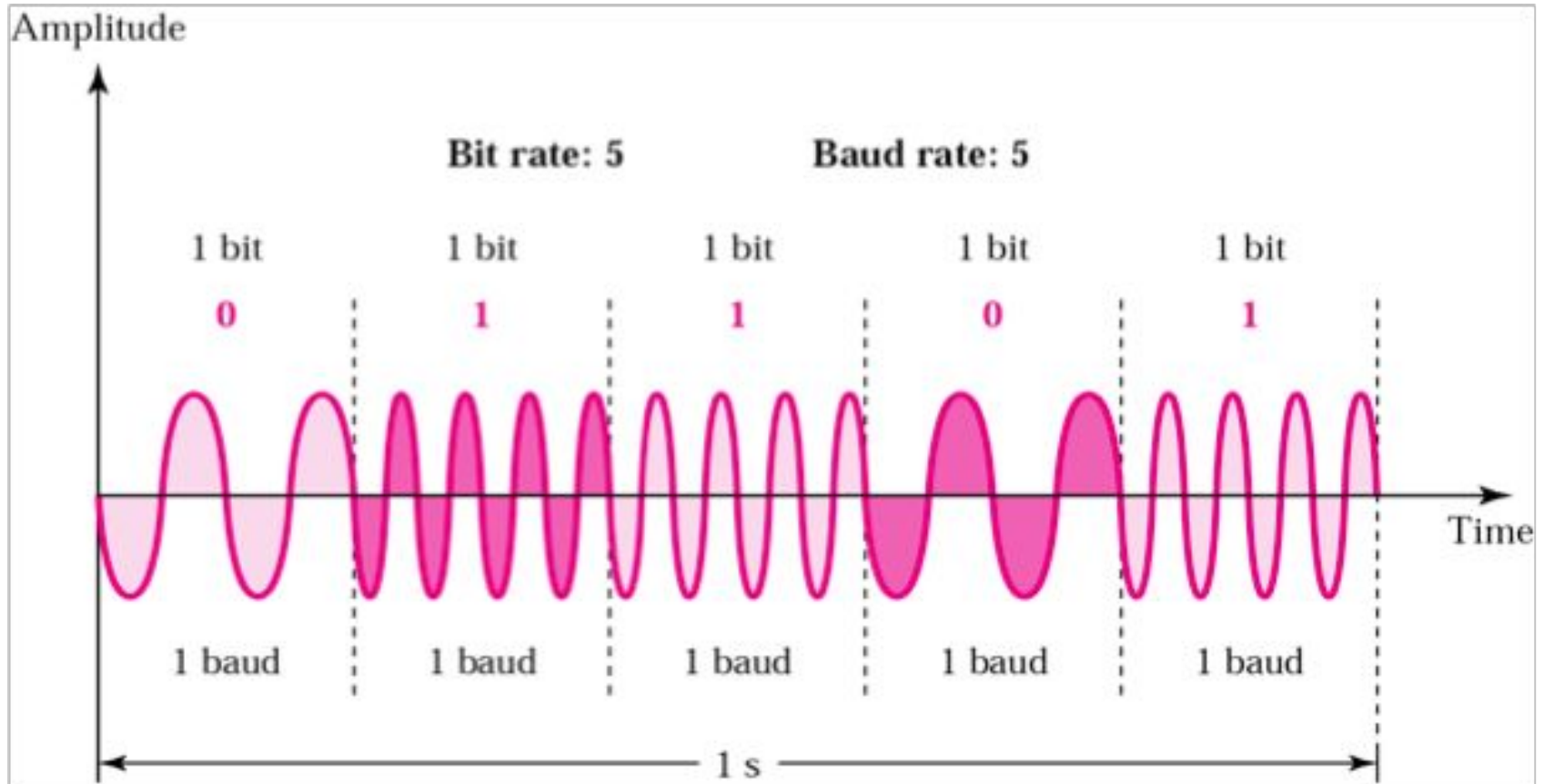


# Transmisión Analógica: Modulación

- **Modulación en Frecuencia (FSK, Frequency Shift Keying)**

- Utiliza una señal analógica portadora con amplitud y fase constantes, y con dos frecuencias distintas para representar el 1 y el 0 lógico:

$$\begin{array}{l} 1 \rightarrow s(t) = A \sin(2\pi f_1 t) \\ 0 \rightarrow s(t) = A \sin(2\pi f_2 t) \end{array} \quad \longrightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} V=2 \text{ elementos de señal} \\ R=1 \text{ bit por baudio} \end{array} \right.$$



# Transmisión Analógica: Modulación

---

- **Modulación en Fase (PSK, Phase Shift Keying)**
  - Utiliza una señal analógica portadora tiene amplitud y frecuencia constantes, pero varias fases distintas
  - Existen distintas variantes, según el nº de fases utilizadas
    - 2-PSK o BPSK (PSK Binario): dos fases ( $R=1$  bit por baudio)
    - 4-PSK o QPSK (PSK en cuadratura): cuatro fases ( $R=2$  bits por baudio)
    - 8-PSK: 8 fases ( $R=3$  bits por baudio)

# Transmisión Analógica: Modulación

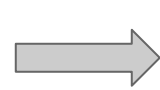
- **Modulación en Fase (cont.)**

- 2-PSK o BPSK (PSK Binario)

- Utiliza dos fases distintas para representar el 1 y el 0 lógicos, por ejemplo:

$$0 \rightarrow s(t) = A \sin(2\pi ft)$$

$$1 \rightarrow s(t) = A \sin(2\pi ft + \pi)$$



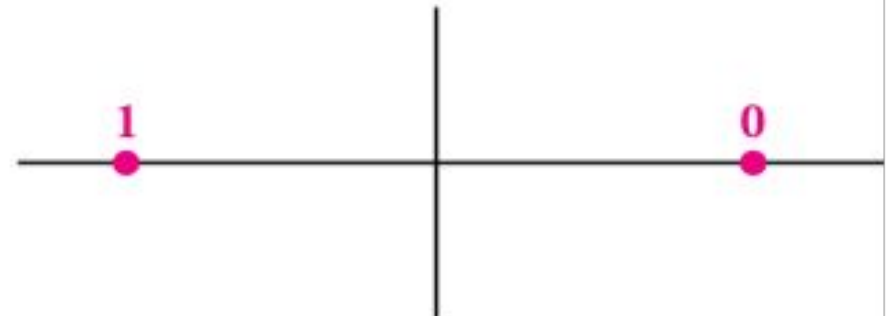
$\left\{ \begin{array}{l} V=2 \text{ elementos de señal} \\ R=1 \text{ bit por baudio} \end{array} \right.$

*(una fase de  $\pi$  radianes equivale a  $180^\circ$ )*

- Diagrama de constelación

Bit	Phase
0	0
1	180

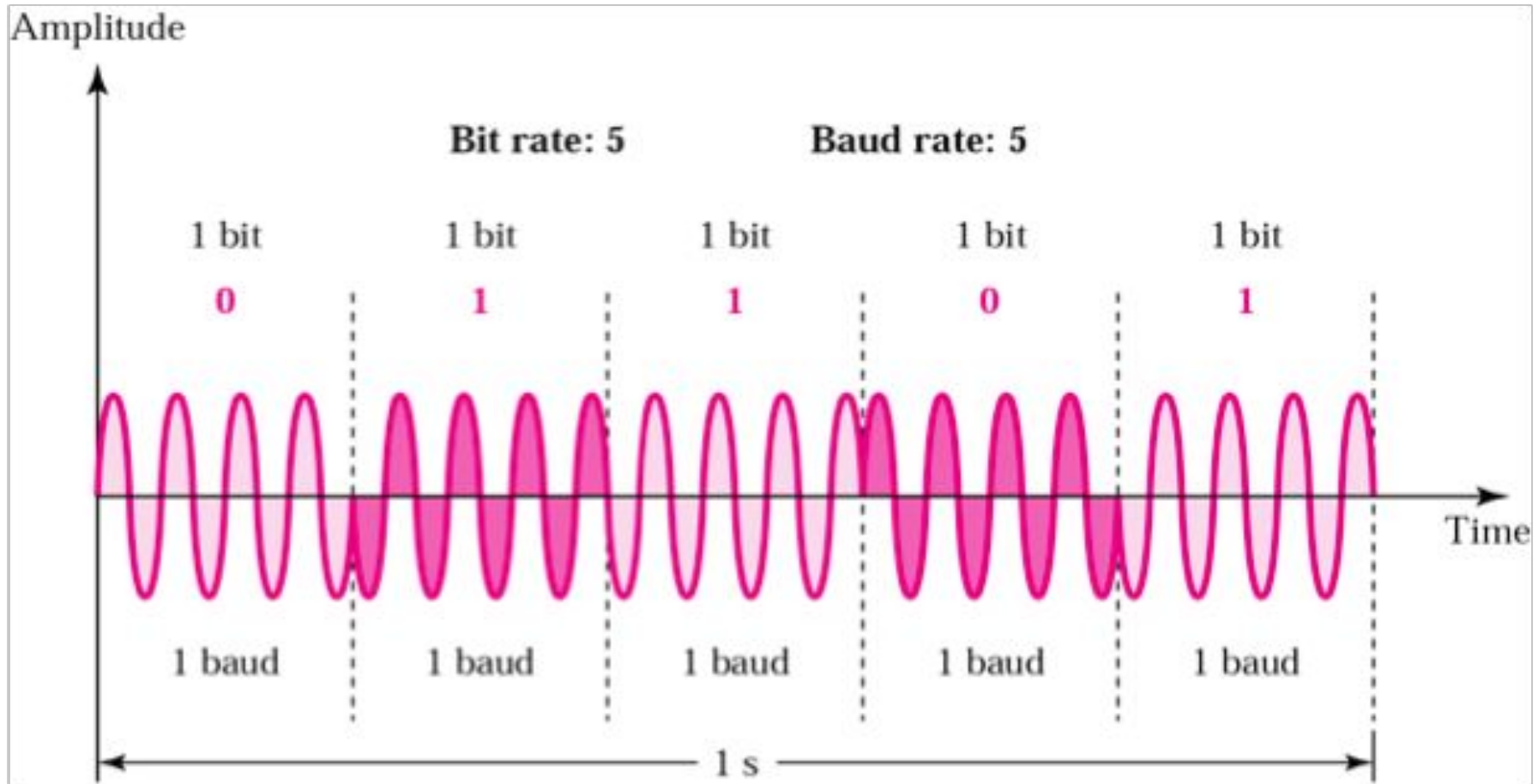
Bits



Constellation diagram

# Transmisión Analógica: Modulación

- **Modulación en Fase (cont.)**
  - 2-PSK o BPSK (cont.)
    - La forma de onda resultante sería la siguiente:



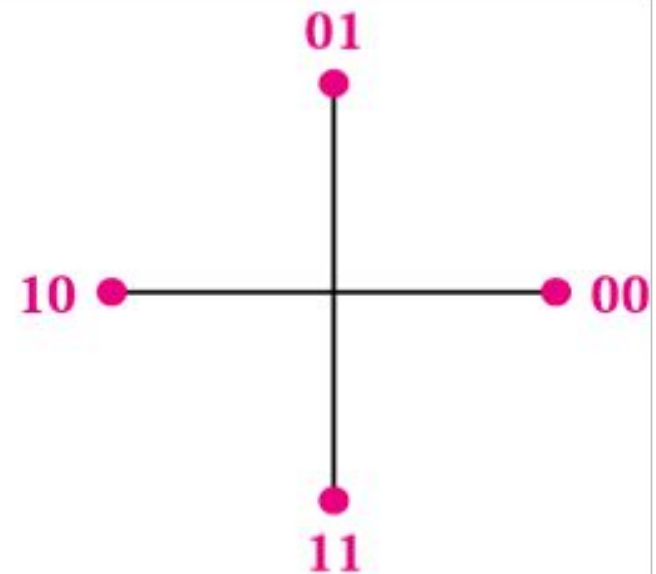
# Transmisión Analógica: Modulación

- **Modulación en Fase (cont.)**

- 4-PSK o QPSK (PSK en cuadratura)
  - Similar a BPSK, pero usa cuatro fases distintas en lugar de dos
    - $V=4$  elementos de señal  $\rightarrow R=2$  bits por baudio
  - Por ejemplo:

Dibit	Phase
00	0
01	90
10	180
11	270

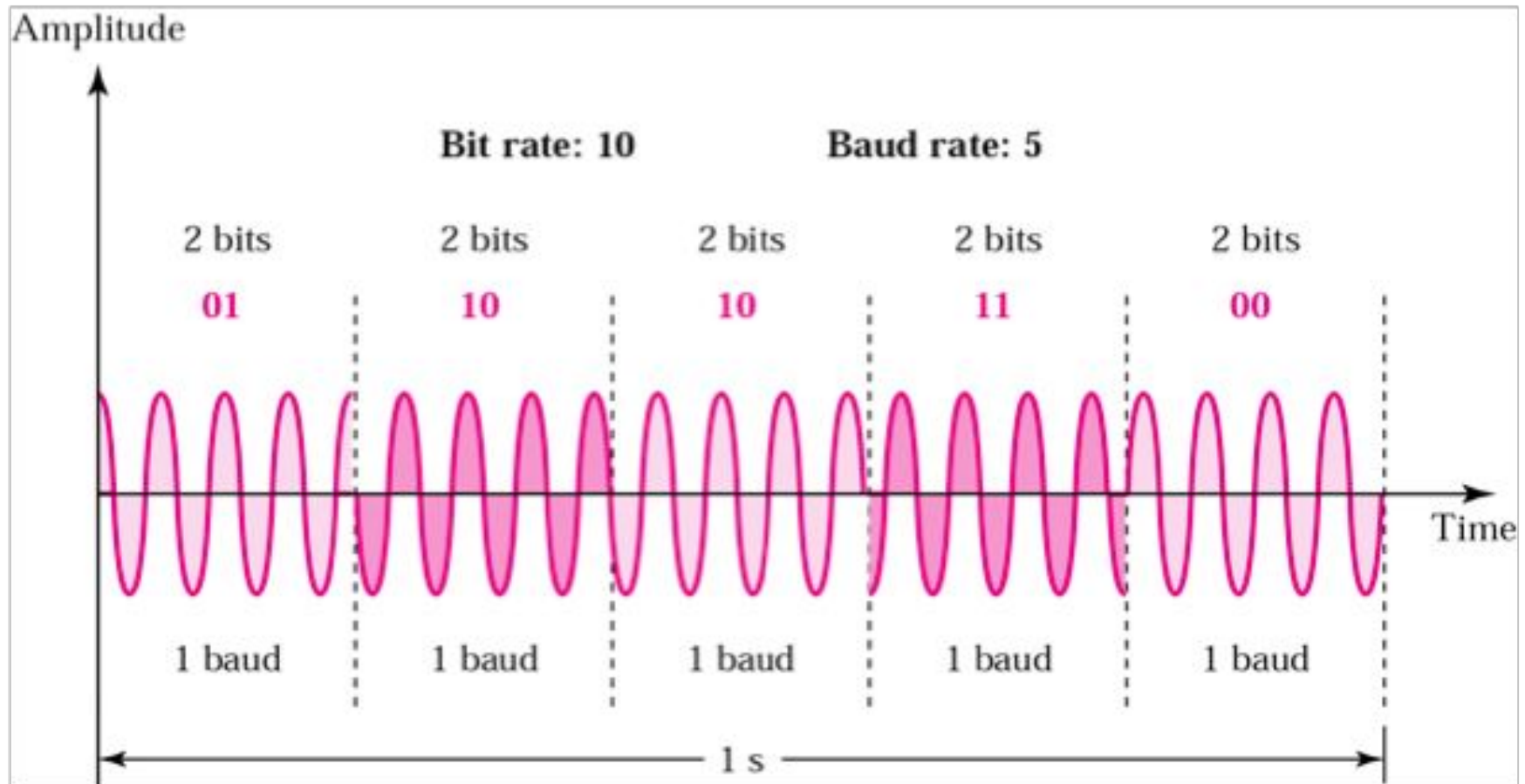
Dibit  
(2 bits)



Constellation diagram

# Transmisión Analógica: Modulación

- **Modulación en Fase (cont.)**
  - 4-PSK o QPSK (cont.)
    - La forma de onda resultante sería la siguiente:



# Transmisión Analógica: Modulación

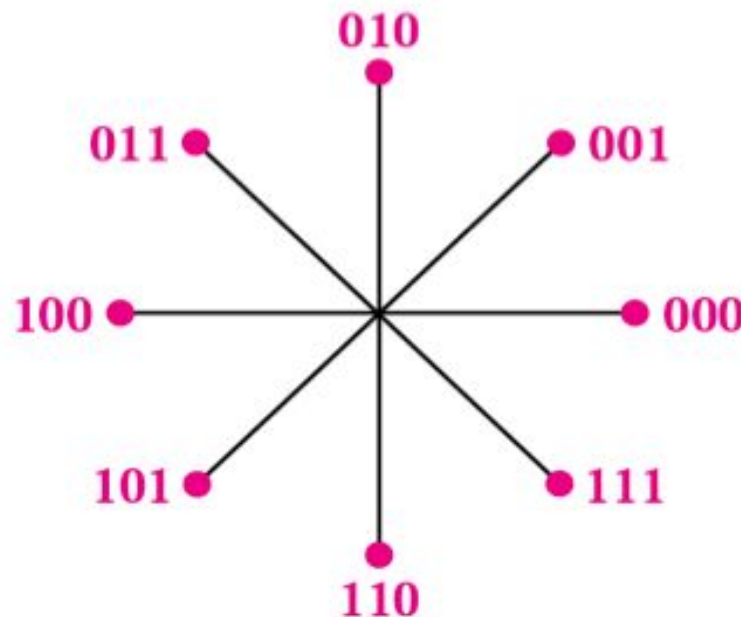
- **Modulación en Fase (cont.)**

- 8-PSK

- Similar a las anteriores pero usa ocho fases distintas
      - $V=8$  elementos de señal  $\rightarrow R=3$  bits por baudio
    - Por ejemplo:

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

Tribits  
(3 bits)



Constellation diagram



# Transmisión Analógica: Modulación

- **Modulación de amplitud en cuadratura (QAM)**

- Es una combinación de PSK y ASK
  - Utiliza varias fases y amplitudes distintas para codificar un mayor número de bits por baudio
  - Ejemplos:
    - 8-QAM:  $V=8$  elementos de señal  $\rightarrow R=3$  bits por baudio
    - 16-QAM:  $V=16$  elementos de señal  $\rightarrow R=4$  bits por baudio
    - 32-QAM:  $V=32$  elementos de señal  $\rightarrow R=5$  bits por baudio
    - etc.
  - Algunas técnicas QAM (por ejemplo, las usadas en ADSL), codifican hasta 15 bits por baudio

**Ejemplo:** El estándar V.32 de modem para conexión telefónica usa una modulación 32-QAM con un bit redundante a una velocidad de 2400 baudios. ¿Cuál es la tasa de bits en bps?

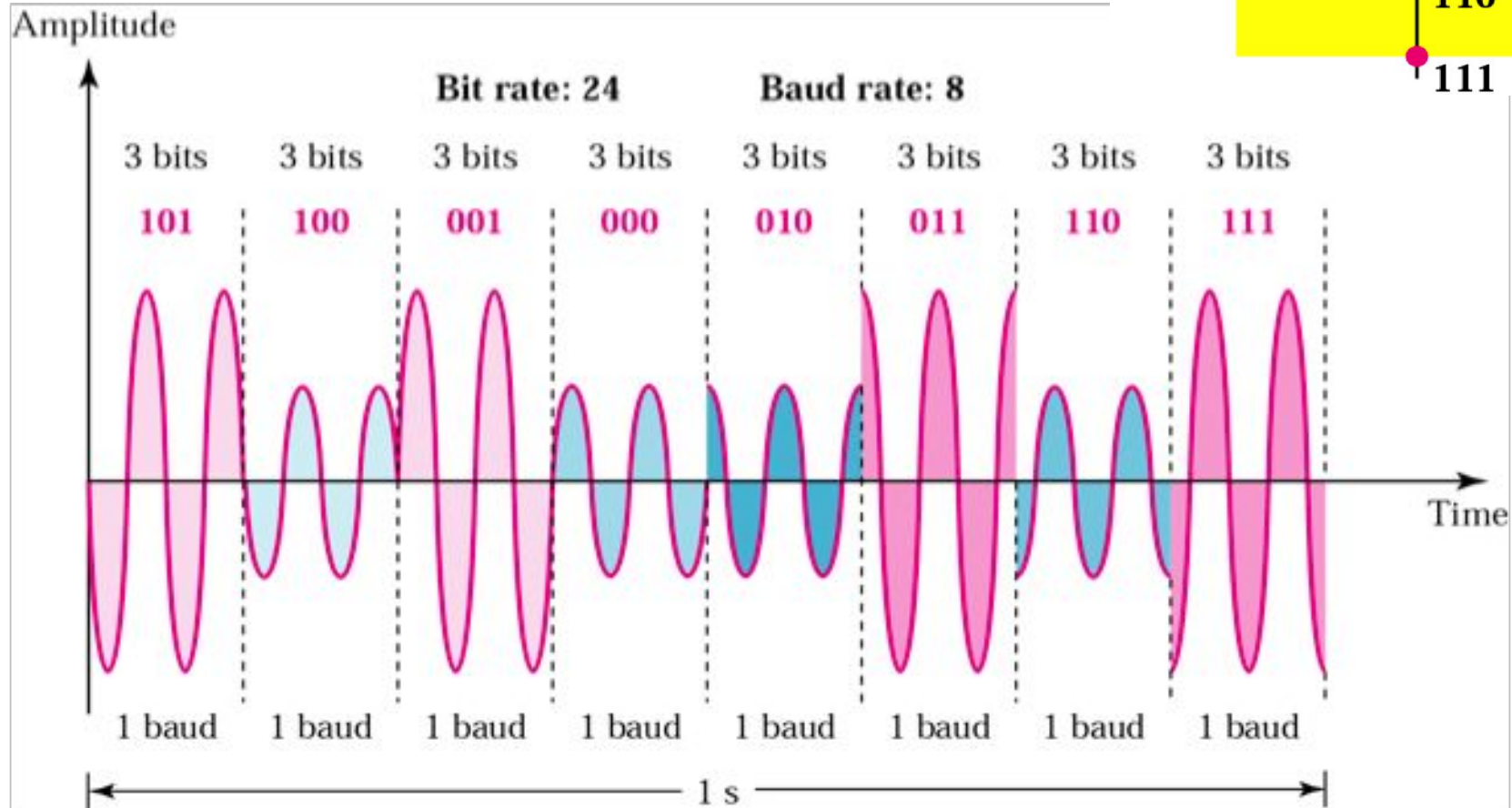
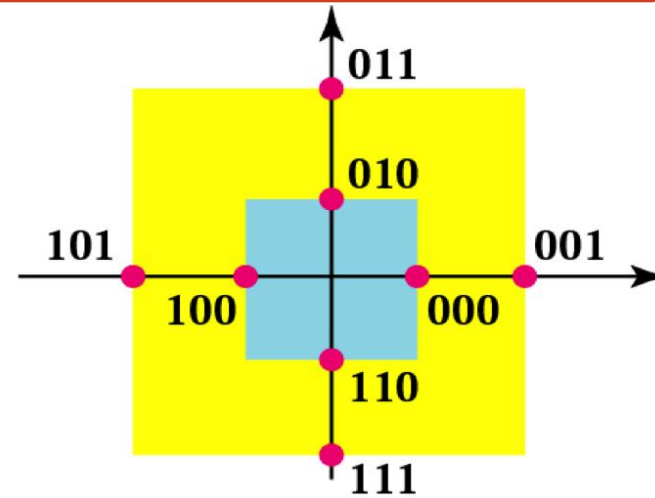
$$C = 2400 \text{ baudios} \times 4 \text{ bits/baudio} = 9600 \text{ bps}$$

# Transmisión Analógica: Modulación

- **Modulación de amplitud en cuadratura (cont.)**

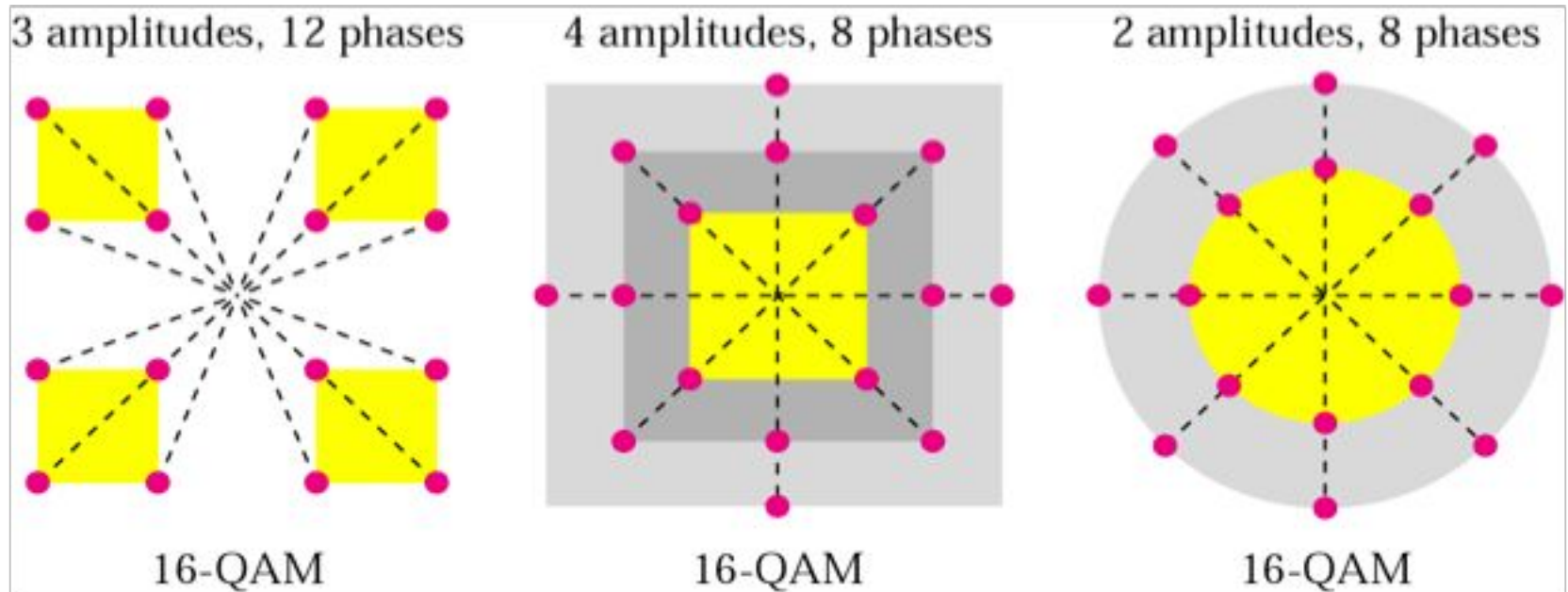
- Ejemplo 1: Modulación 8-QAM

- $V=8$  elementos de señal  $\rightarrow R=3$  bits por baudio
    - Se puede obtener combinando 4 fases distintas y 2 amplitudes
    - La forma de onda resultante es la siguiente:



# Transmisión Analógica: Modulación

- **Modulación de amplitud en cuadratura (cont.)**
  - Ejemplo 2: Modulación 16-QAM
    - $V=16$  elementos de señal  $\rightarrow R=4$  bits por baudio
    - Existen varias combinaciones alternativas de amplitudes y fases



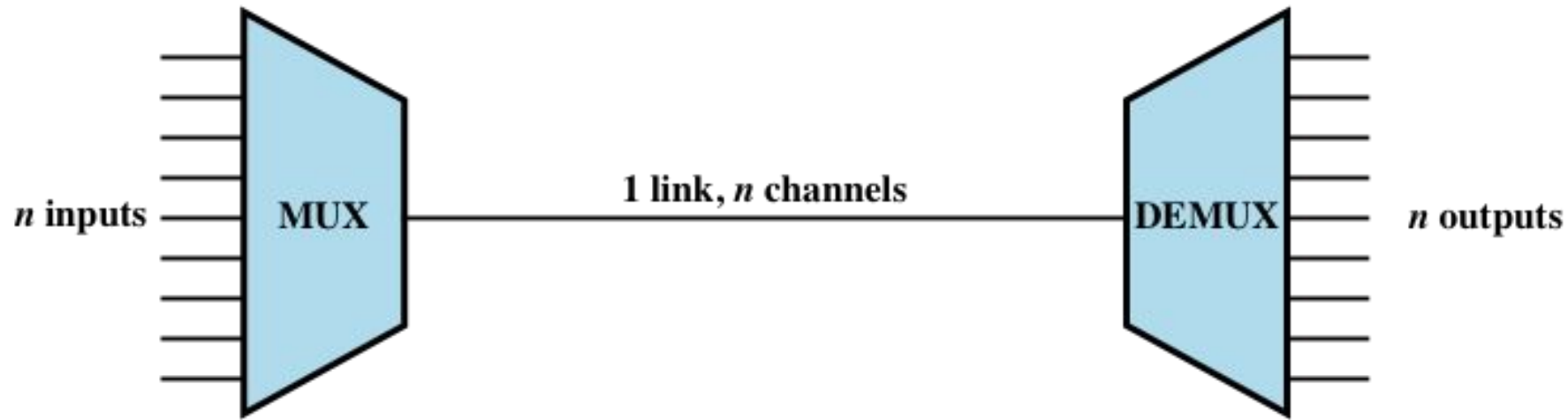
---

## 6. Multiplexación

- FDM
- TDM

# Aprovechamiento del Ancho de Banda

- **La multiplexación** es una técnica que permite la transmisión simultánea de múltiples señales a través de un mismo medio de transmisión
  - Permite compartir las líneas de transmisión entre múltiples usuarios o dispositivos de comunicación
  - Permite aprovechar de forma más eficiente el ancho de banda disponible en el medio de transmisión



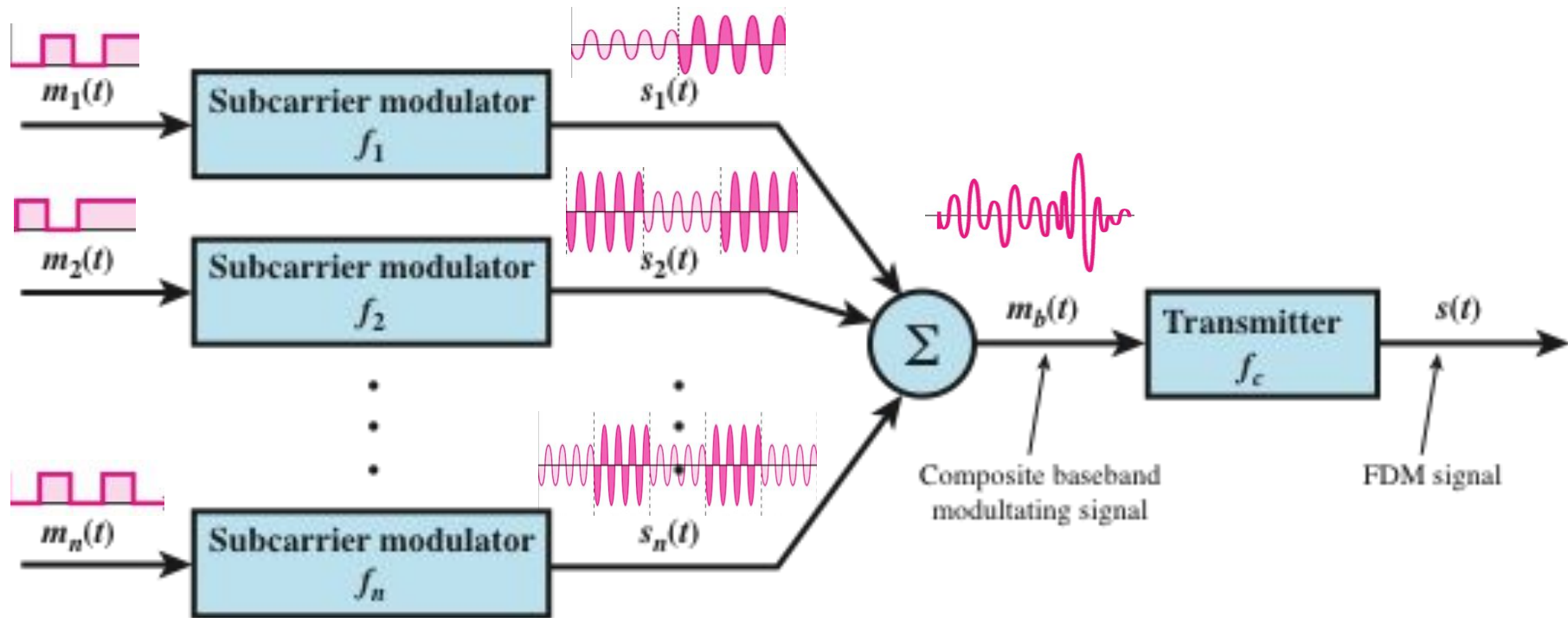
# Multiplexación FDM

- La multiplexación por división de la frecuencia (FDM = *Frequency Division Multiplexing*) es una técnica analógica que se aplica cuando el ancho de banda del enlace es superior al de las señales transmitidas
- El ancho de banda total del medio se divide en varios canales, cada uno de ellos con una banda de frecuencias distinta
  - Cada canal usa una frecuencia portadora distinta
  - Los datos digitales generados por cada dispositivo emisor se modulan a la frecuencia de cada canal, usando una técnica adecuada (ASK, PSK, QAM...)
  - Normalmente, es necesario dejar **bandas de guardia** o de seguridad entre los distintos canales para evitar que se solapen las señales (evitar interferencias)



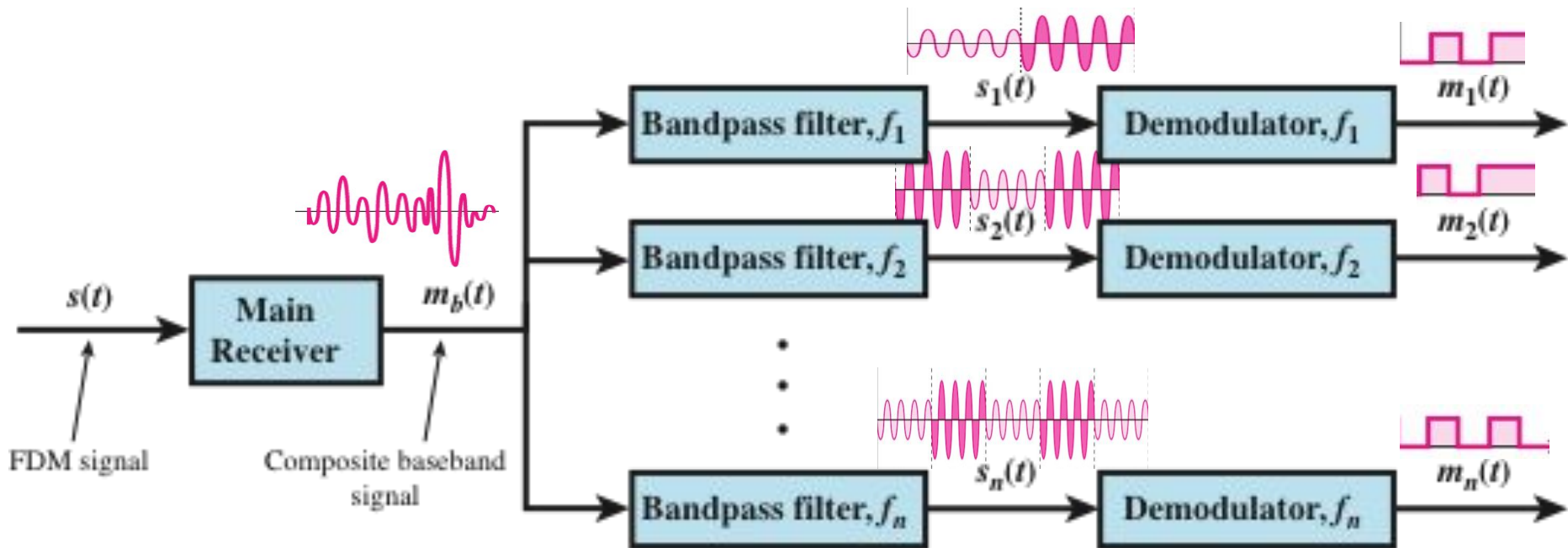
# Multiplexación FDM

- Transmisión usando multiplexación en frecuencia



# Multiplexación FDM

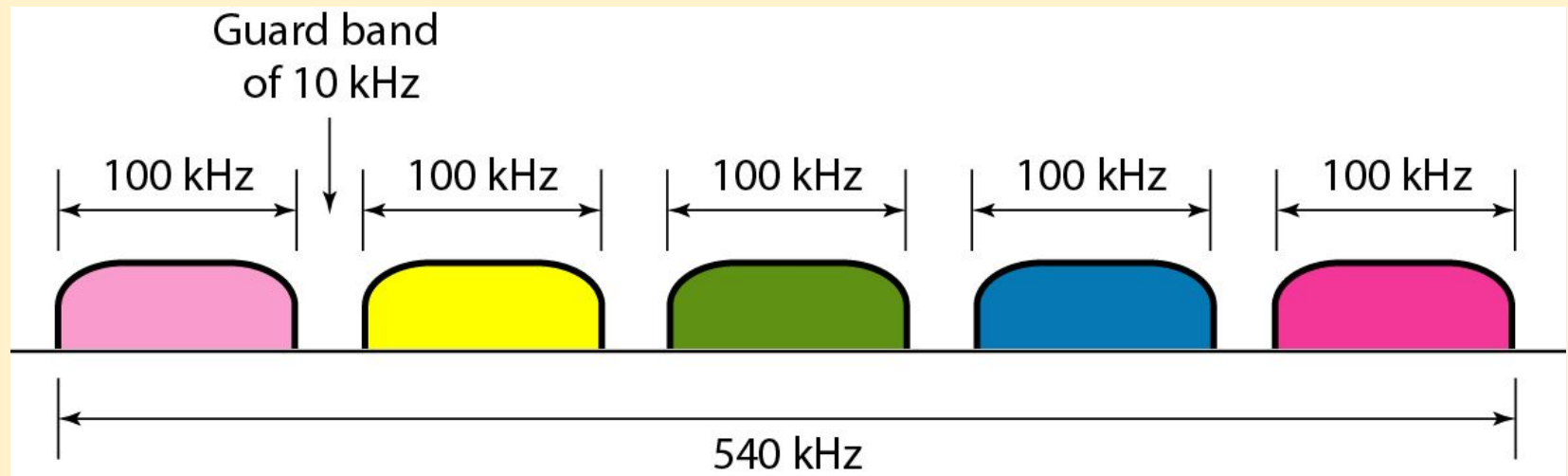
- Recepción FDM





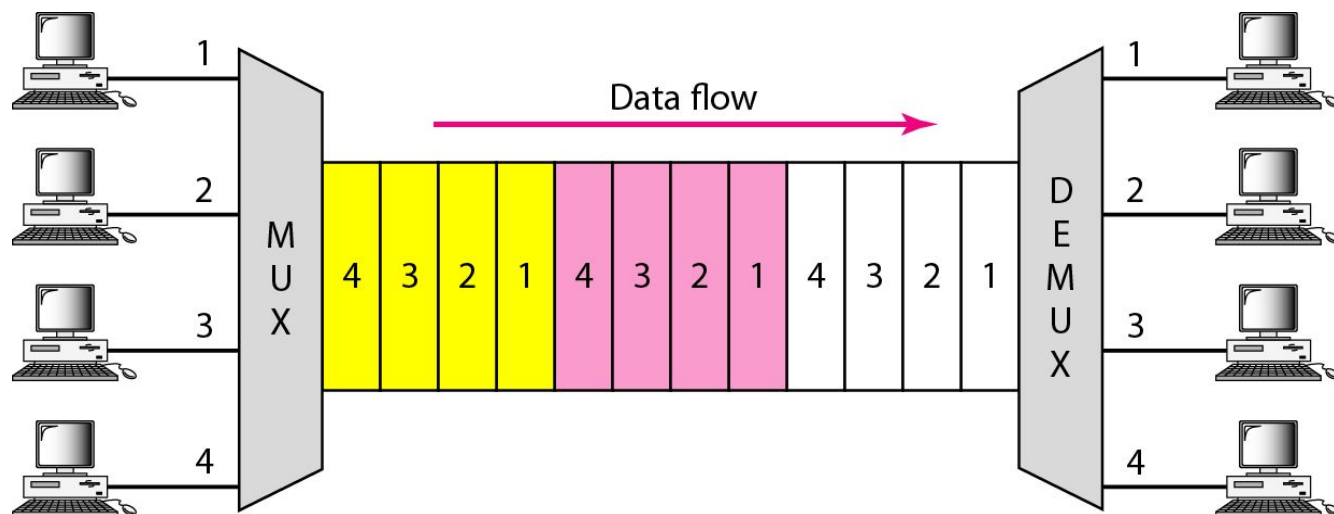
# Multiplexación FDM

**Ejemplo:** Se quieren multiplexar cinco canales de 100 kHz cada uno para enviarlos simultáneamente por un mismo medio de transmisión. En este caso es necesario utilizar bandas de guardia de 10 kHz para evitar interferencias entre los distintos canales. ¿Cuál es el ancho de banda mínimo necesario en el medio de transmisión?



# Multiplexación TDM

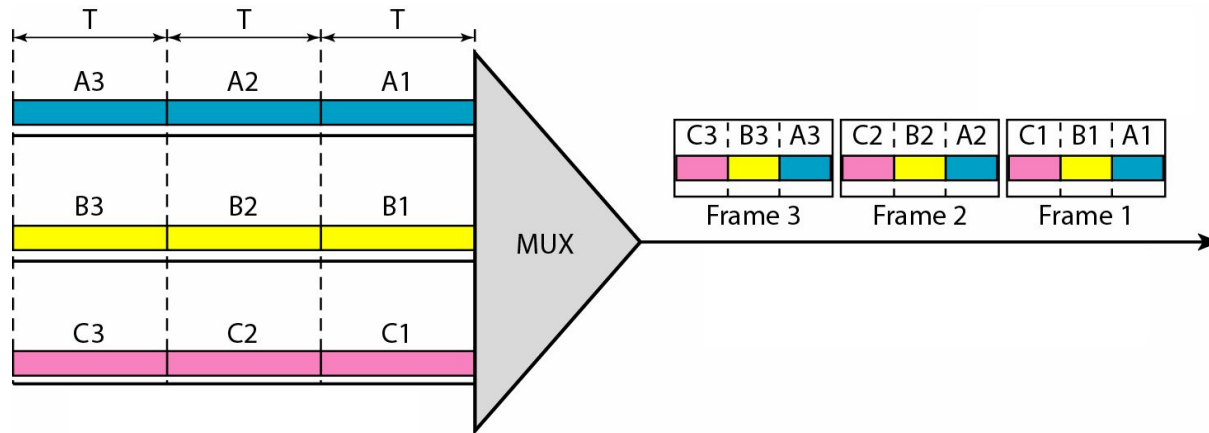
- La multiplexación por división del tiempo (TDM = Time Division Multiplexing) es un procesamiento digital que permite compartir el ancho de banda entre diferentes conexiones
- Consiste en repartir el tiempo de transmisión entre las distintas fuentes de datos
  - El tiempo de transmisión se divide en intervalos idénticos o ranuras temporales
  - Cada dispositivo de transmisión tiene asignado un intervalo o ranura para transmitir



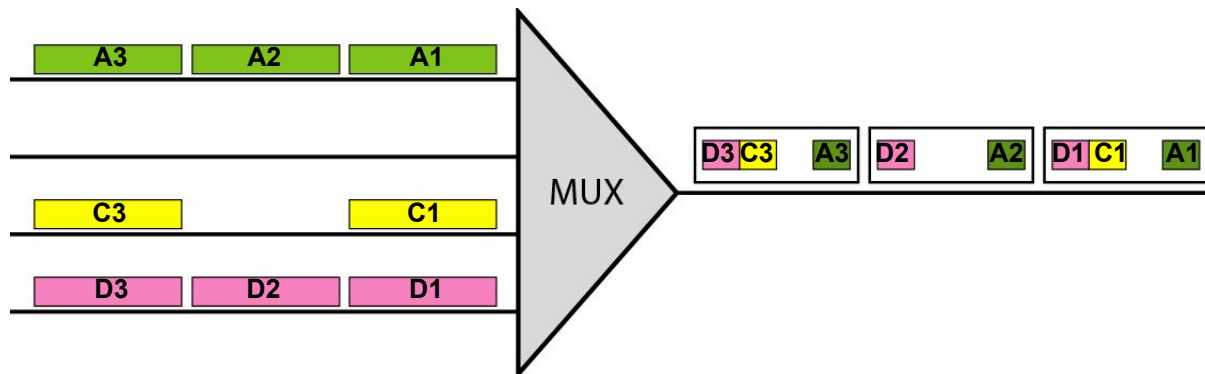
# Multiplexación TDM

- **TDM Síncrono**

- La asignación de ranuras temporales a cada dispositivo de transmisión es fija



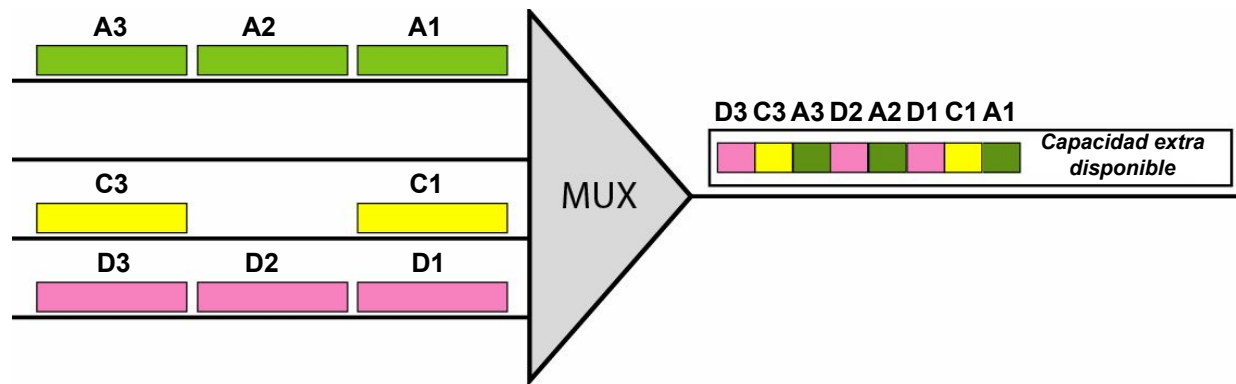
- Si un dispositivo no utiliza su ranura, ésta se desperdicia



# Multiplexación TDM

- **TDM Estadístico**

- Permite adaptarse a las necesidades de transmisión de los distintos dispositivos, mediante mecanismos de reserva dinámica bajo demanda de las ranuras temporales



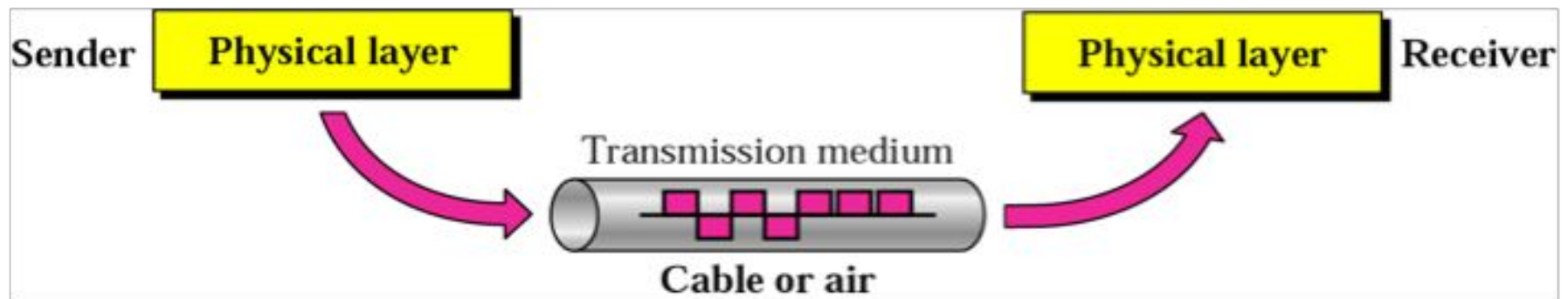
---

## **7. Medios de transmisión**

- Guiados o por cable (wired)
- No guiados o inalámbricos (wireless)

# Medios de Transmisión

- En una arquitectura de red, el tipo de medio de transmisión utilizado es una característica de la capa física
- Cualquier medio capaz de llevar información de la fuente al destino (aire, cable de cobre, fibra de vidrio...)
- Los medios de transmisión se dividen en:
  - **Medios de transmisión guiados o por cable (*wired*)**
    - Par trenzado (señales eléctricas por cable de cobre)
    - Cable coaxial (señales eléctricas por cable de cobre)
    - Fibra óptica (señales luminosas)
  - **Medios de transmisión no guiados o inalámbricos (*wireless*)**
    - Infrarrojos (IR)
    - Radio-frecuencia (RF)
    - Microondas



# Medios Guiados: Par trenzado

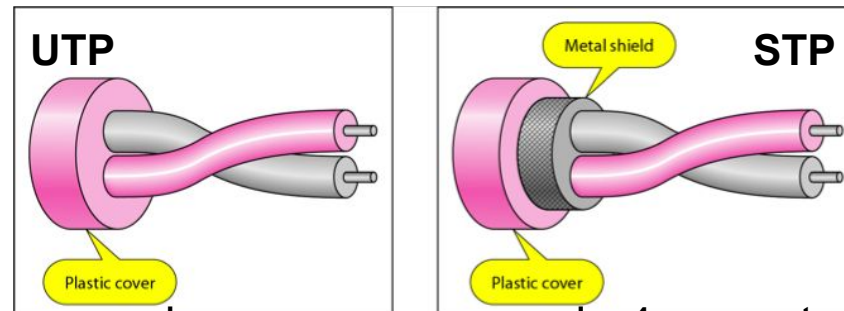
- **Forma y conectores**

- Dos hilos de cobre aislados y entrelazados (trenzados) en forma helicoidal

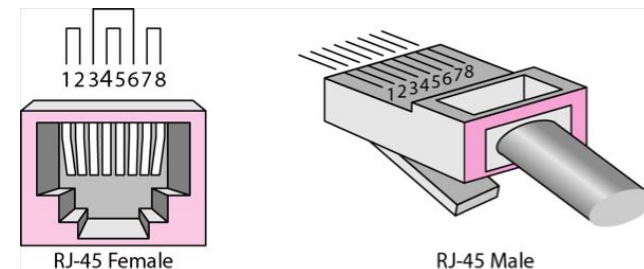
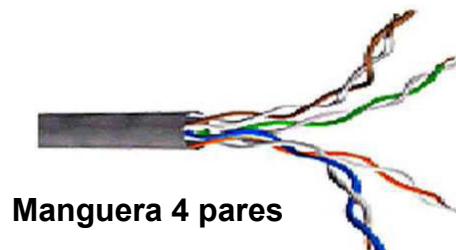


- Tipos de par trenzado

- UTP (*unshielded twisted pair*): Par trenzado no apantallado
- STP (*shielded twisted pair*): Par trenzado apantallado



- Habitualmente agrupados en mangueras de 4 pares trenzados (8 hilos)
  - Los conectores más comunes son de tipo RJ-45



# Medios Guiados: Par trenzado

- Existen distintas categorías de cables UTP que dependen del calibre, de la calidad del cable y de la longitud del trenzado.
- **UTP Cat 3 (UTP-3)**
  - Denominado cable de calidad de telefónica (*voice-grade*)
  - Frecuencias de hasta 16 MHz
  - **Aplicaciones**
    - Telefonía (bucle de abonado)
    - Redes de área local (Ethernet): hasta 10 Mbps (distancia  $\leq 100$  m)
- **UTP Cat 5 (UTP-5)**
  - Denominado cable de calidad de datos (*data-grade*)
  - Frecuencias de hasta 100 MHz
  - **Aplicaciones**
    - Redes de área local (Fast Ethernet): 100 Mbps (distancia  $\leq 100$  m)
- Atenuaciones típicas

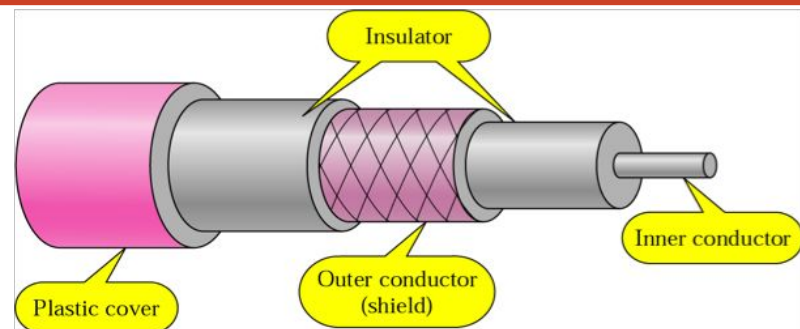
Frecuencia señal	1 MHz	4 MHz	16 MHz	25 MHz	100 MHz
Atenuación en UTP-3	26 db/Km	56 db/Km	131 db/Km	-	-
Atenuación en UTP-5	20 db/Km	41 db/Km	82 db/Km	104 db/Km	220 db/Km



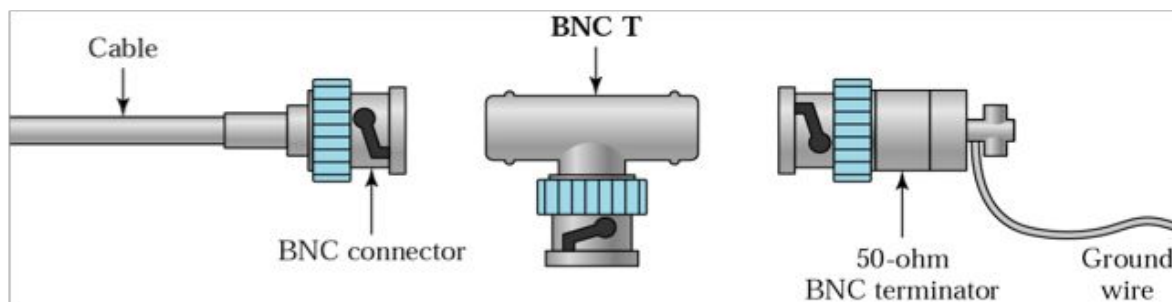
# Medios Guiados: Cable coaxial

- **Forma y tipos de conectores**

- Tiene un núcleo central, normalmente de cobre, rodeado de otro conductor



- Conectores típicos del cable coaxial (BNC usado en redes Ethernet)



- **Aplicaciones del cable coaxial**

- Distribución de señales de televisión (antenas y televisión por cable)
- Telefonía a larga distancia, reemplazado por fibra óptica
- LAN Ethernet en bus: 10Base2 (hasta 185 m) y 10Base5 (hasta 5000 m)

- **Cable coaxial vs. Par trenzado**

↑ Mayor inmunidad a ruidos e interferencias externas

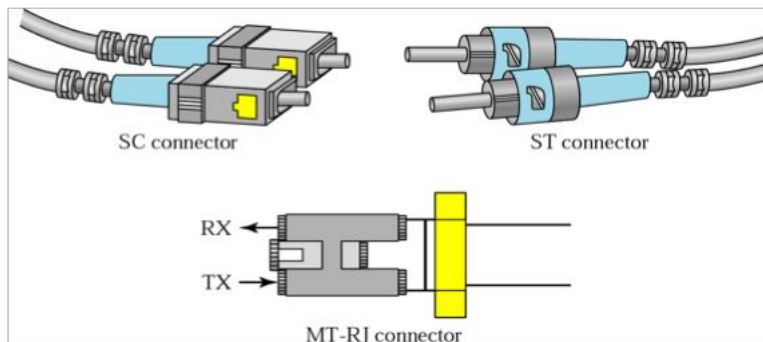
↑ Mayores distancias y mayor ancho de banda que el par trenzado

↓ Mayor coste

# Medios Guiados: Fibra óptica

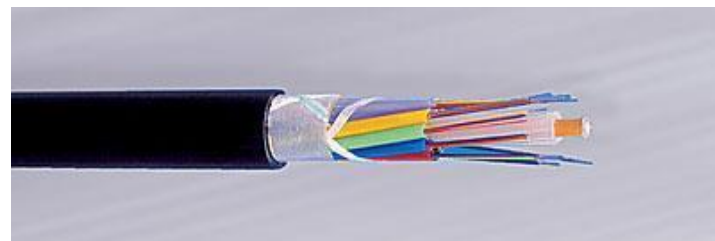
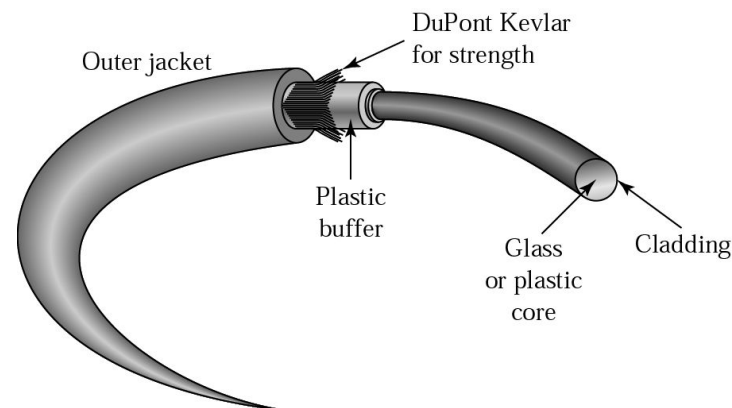
- **Forma y conectores**

- Núcleo de plástico o vidrio para transmitir señales en forma de luz
- Conectores típicos de fibra óptica



- **Agrupamiento de fibras**

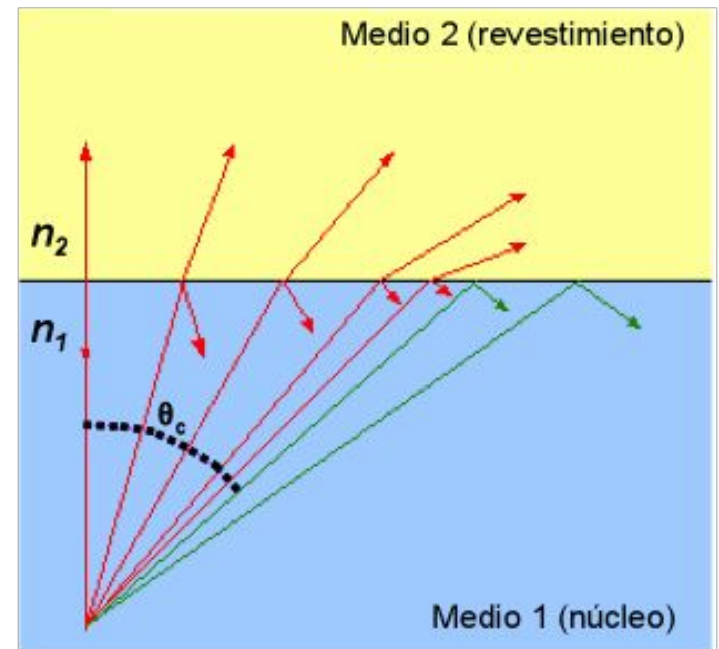
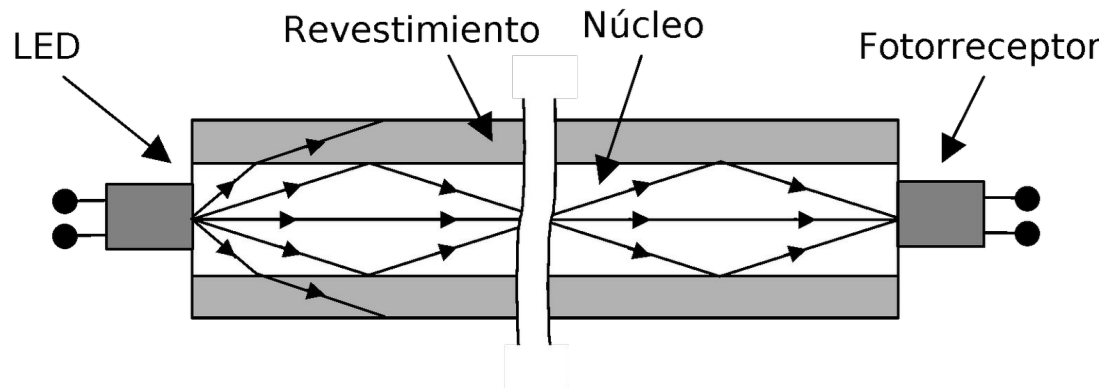
- Para conexiones de larga distancia, normalmente se agrupan en mangueras de varias decenas o incluso cientos de fibras
- Ejemplo: manguera de 60 fibras
  - 12 tubos de fibra x 5 fibras por tubo
  - Diámetro del tubo: 2,1 mm
  - Diámetro de la manguera: 10 mm
  - Peso por Km: 80 Kg



# Medios Guiados: Fibra óptica

## Funcionamiento de la fibra óptica: basado en la ley de Snell

- Cuando un haz de luz incide en la interfaz entre dos medios con distinto índice de refracción ( $n_1$  y  $n_2$ ), parte de la luz se refleja y parte de la luz se refracta al otro medio con un ángulo distinto
- Si el ángulo de incidencia supera un cierto **ángulo crítico** ( $\theta_c$ ), entonces toda la luz se refleja y no se produce refracción

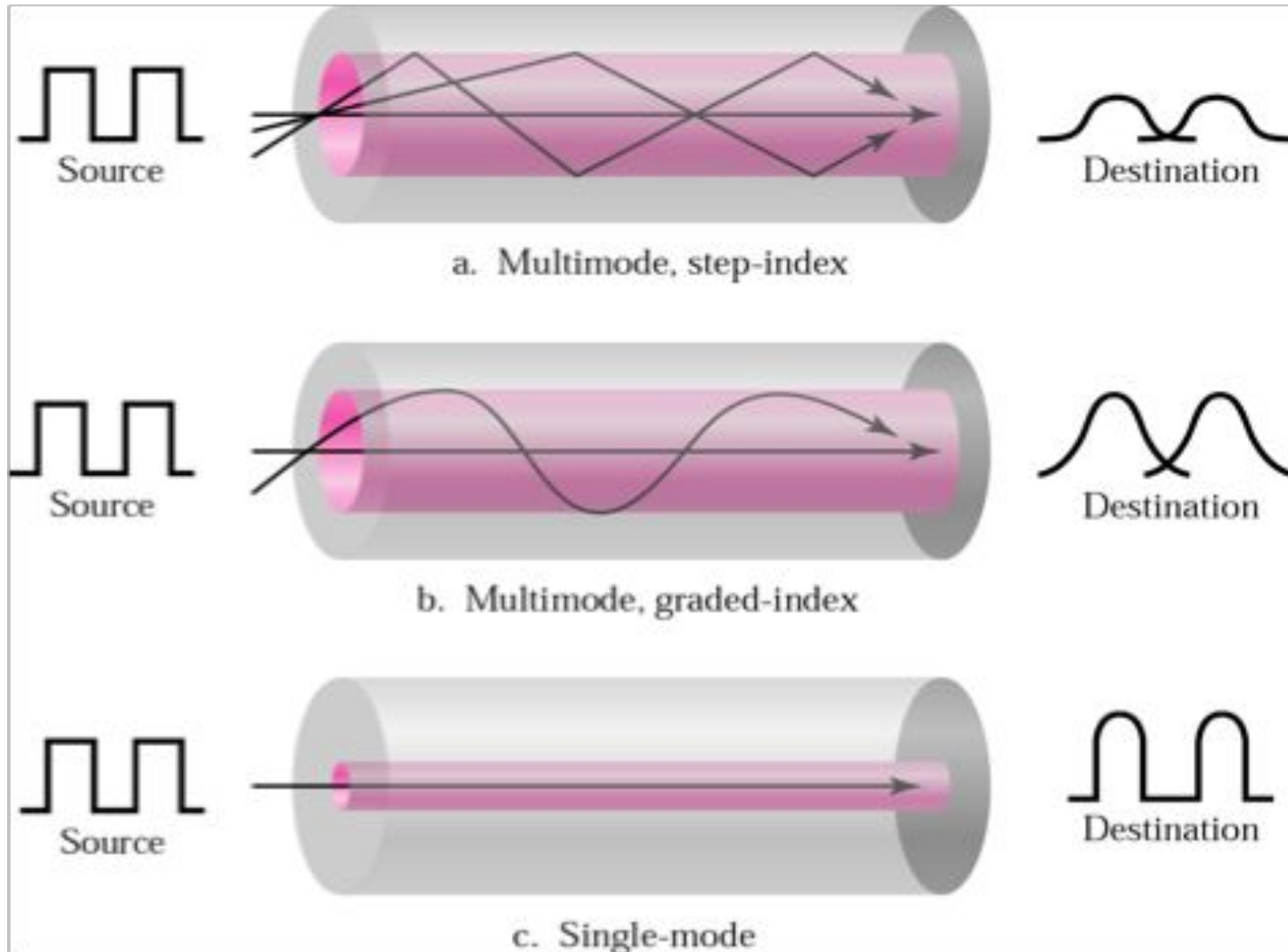


# Medios Guiados: Fibra óptica

---

- **Fibra Óptica Multimodo (multi-mode)**
  - La luz se difunde en múltiples direcciones
  - Mayores pérdidas y menores prestaciones en velocidad y distancia
  - Más económica y fácil de manipular
    - **Índice escalonado (step-index):** El núcleo tiene un índice de refracción constante en toda la sección
    - **Índice gradual (graded-index):** El índice de refracción en el núcleo no es constante, sino en gradiente, lo que obliga a los rayos de luz a curvarse
- **Fibra Óptica Monomodo (single-mode)**
  - La luz se difunde prácticamente en línea recta a través del núcleo
  - Diámetro del núcleo muy reducido (del orden de la longitud de onda de la luz)
  - Menos pérdidas y mayores prestaciones en velocidad y distancia
  - Más cara y difícil de manipular

# Medios Guiados: Fibra óptica



# Medios Guiados: Fibra óptica

---

- **Ventajas de la fibra óptica**

- Ancho de banda muy superior a los medios de cobre y menor atenuación
  - En pruebas de laboratorio (distancias cortas) se han alcanzado unos 100 Tbps
  - En larga distancia, se han conseguido alcanzar unos 13,5 Tbps para distancias de hasta 7.000 Km
- Totalmente inmune a las interferencias electromagnéticas externas
  - Menos errores de transmisión
- Los cables de fibra son muy delgados y ligeros
  - La instalación de una red de fibra óptica requiere conductos mucho más reducidos
  - Se pueden agrupar decenas de fibras en mangueras de reducido diámetro

- **Desventajas de la fibra óptica**

- Más cara que el par trenzado o el cable coaxial
- La manipulación de la fibra óptica es muy compleja
  - Necesidad de mayor especialización y equipos adecuados

# Medios Guiados: Fibra óptica

- **Aplicaciones de la fibra óptica**

- Telefonía de larga y media distancia y redes de acceso residencial
  - Enlaces telefónicos de larga distancia
    - Hasta 1.500 km
    - Entre 20.000 y 60.000 canales de voz simultáneos
  - Enlaces telefónicos metropolitanos
    - Longitud media de 12 Km
    - Hasta 100.000 canales de voz simultáneos
  - Fibra hasta el hogar o FTTH (*fibre to the home*)
    - La fibra se está empleando para implementar el último tramo de la instalación de telefonía (bucle de abonado)
    - Permite la transmisión simultánea de voz y datos a alta velocidad (100 Mbps), sustituyendo a la tecnología ADSL
- Redes de área local y metropolitana
  - Usado tradicionalmente en redes MAN (FDDI, DQDB, etc.)
  - Actualmente se utiliza también en redes LAN Ethernet de alta velocidad
    - Fast Ethernet - 100 Mbps (100Base-FX)
    - Gigabit Ethernet (1GbE) - 1Gbps (1000BASE-SX y 1000BASE-LX)
    - 10Gigabit Ethernet (10GbE) - 10 Gbps
    - 40Gigabit Ethernet (40GbE) - 40 Gbps
    - 100Gigabit Ethernet (100GbE) - 100 Gbps
    - Implementaciones futuras: Terabit Ethernet (1TbE)

# Medios no guiados: Wireless

---

- **Ondas de radiofrecuencia (RF)**

- Desde 3 KHz hasta 1 GHz
- Aplicaciones
  - Transmisión de radio AM y FM
  - Radio marítima
  - Televisión
  - Teléfonos inalámbricos

- **Microondas**

- Desde 1 GHz hasta 300 GHz
- Aplicaciones
  - Telefonía móvil
  - Comunicaciones por satélite
  - Redes LAN inalámbricas

- **Infrarrojos**

- Desde 300 GHz hasta 400 THz
- Aplicaciones
  - Conexiones de datos locales (transmisión a cortas distancias entre dispositivos dispuestos en "línea de visión")