

# **Redes de Computadores**

## **Tema 2 – Capa Física**

**Juan Segarra, Natalia Ayuso y Jesús Alastrauey**



**Departamento de  
Informática e Ingeniería  
de Sistemas  
Universidad Zaragoza**

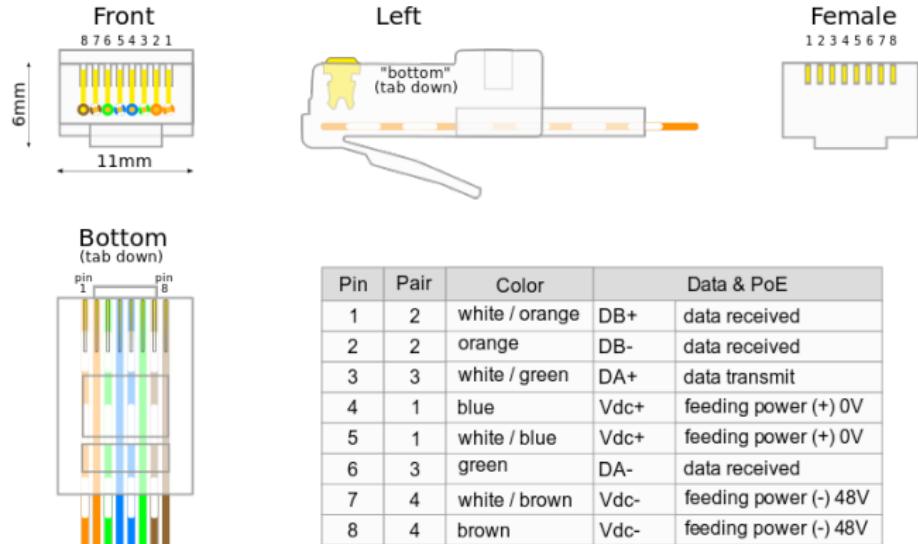
- 1. Introducción**
- 2. Conceptos y terminología**
- 3. Medios de transmisión**
- 4. Transmisión digital**
- 5. Capacidad de un canal con ruido**
- 6. Sincronismo**
- 7. Modos de transmisión**

## 1. Introducción

# 1 Introducción

La capa física se encarga de la **interfaz física** entre las tecnologías de transmisión de la red:

- Especificaciones **mecánicas** de conectores y cables
- Especificaciones **electromagnéticas** de la señal
- Especifica cómo emitir los bits e **interpretar** la señal



## 2. Conceptos y terminología

2.1. Señal

2.2. Señal periódica

2.3. Análisis de Fourier

2.4. Espectro electromagnético

2.5. Sistema de comunicaciones

2.6. Decibelios

Ganancia/atenuación de un sistema

Relación señal/ruido

Valores absolutos de potencia

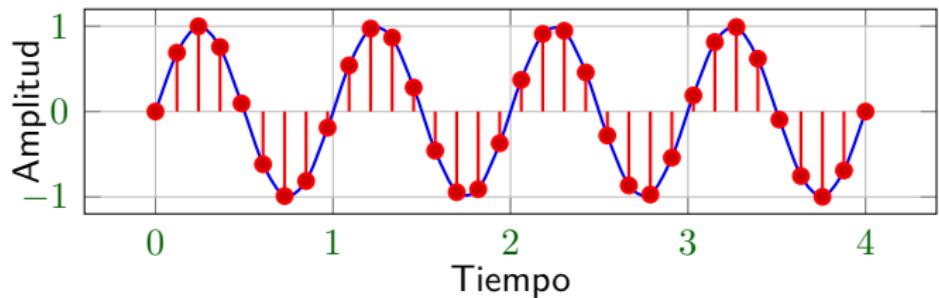
Curiosidad: observación de precipitaciones

2.7. Cálculo de un enlace

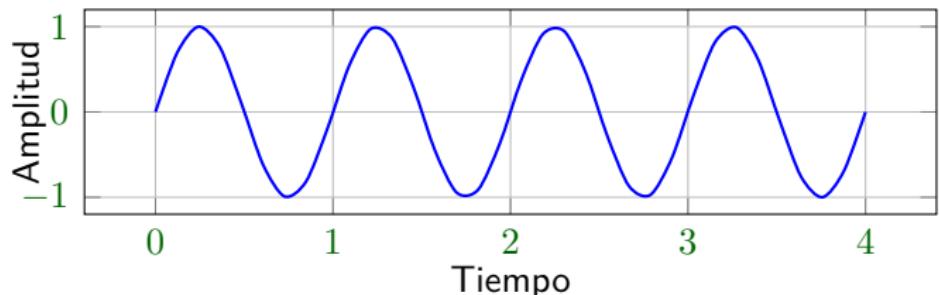
## 2.1 Señal

Señal: función que transmite información

- Continua:  $x(t)$  vs. discreta:  $x(kT)$



- Periódica: se repite un patrón a lo largo del tiempo

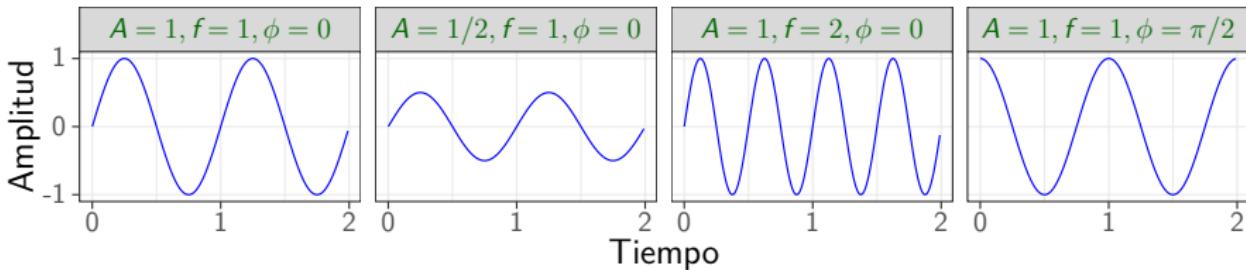


Señal continua periódica

## 2.2 Señal periódica

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

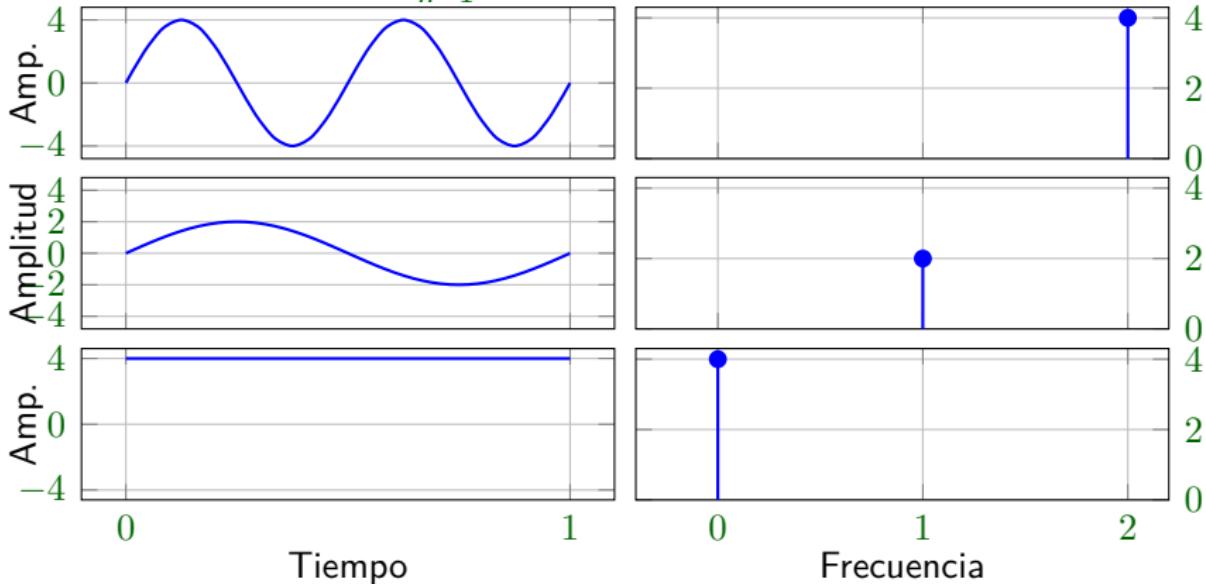
- **Amplitud ( $A$ )**: valor máximo de la señal, en voltios (V)
- **Frecuencia ( $f$ )**: razón a la que se repite la señal, en Hercios (Hz)
- **Periodo ( $1/f$ )**: tiempo transcurrido entre dos repeticiones consecutivas de la señal, en segundos (s)
- **Fase ( $\phi$ )**: posición relativa de la señal dentro de un periodo, en radianes (rad)



## 2.3 Análisis de Fourier

- Toda señal periódica puede representarse como la suma de múltiples señales sinusoidales

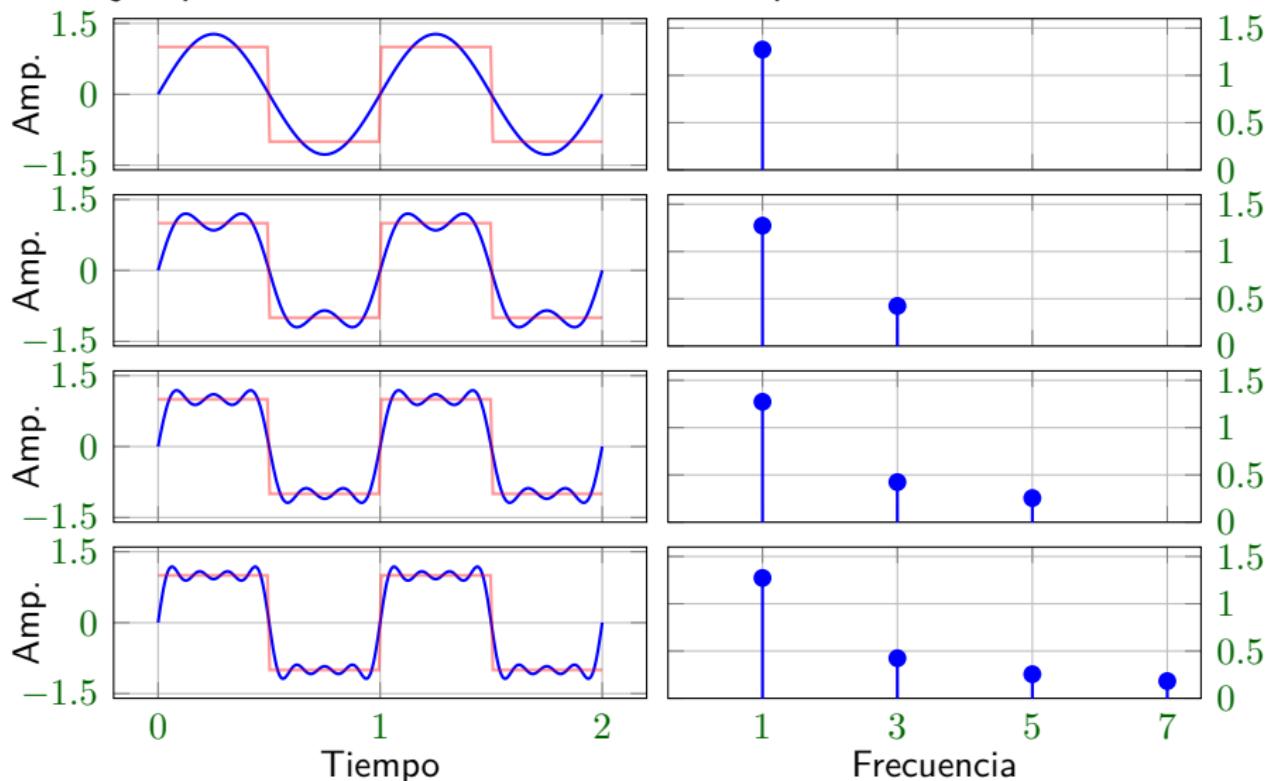
$$s(t) = \frac{1}{2}A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \sin(2\pi n f_0 t) + B_n \cos(2\pi n f_0 t)]$$



- Componente continua (DC): parte de la señal que no varía con el tiempo

## 2.3 Análisis de Fourier (II)

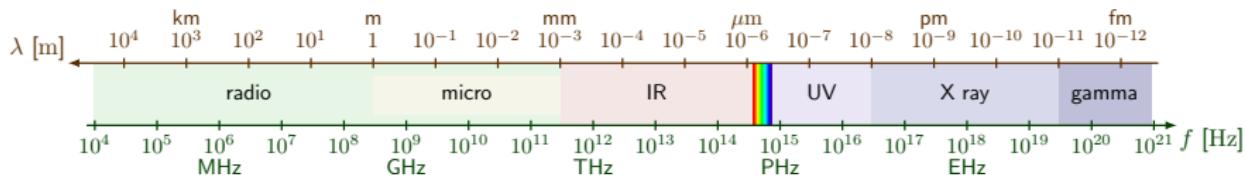
- Ejemplo: onda cuadrada de 1 Hz, amplitud 1 V



## 2.4 Espectro electromagnético

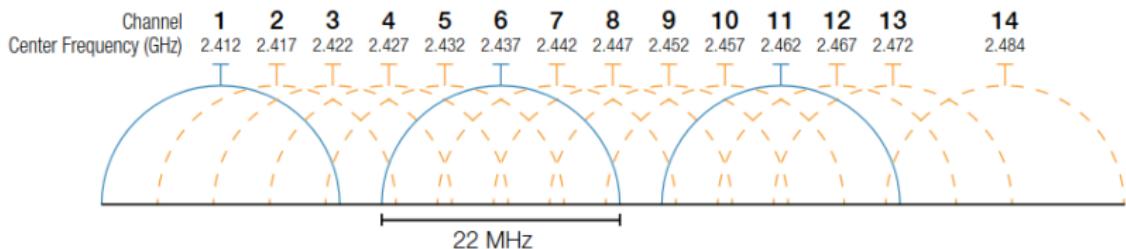


- Onda electromagnética: forma de propagación de la radiación electromagnética
- Espectro electromagnético: distribución energética del conjunto de ondas electromagnéticas



## 2.4 Espectro electromagnético (II)

- Ancho de banda de frecuencias ( $B$ ): rango de frecuencias que forman la señal
  - Voz: 100–7000 Hz →  $B = 6900 \text{ Hz}$
  - Teléfono: 300–3400 Hz →  $B = 3100 \text{ Hz}$
  - Wi-Fi (802.11g): canales de  $B = 22 \text{ MHz}$  en banda 2.4 GHz

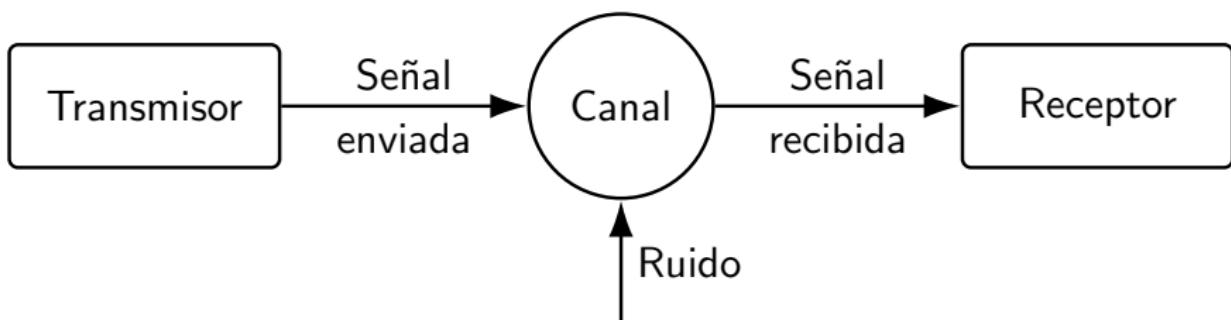


Fuente: Tektronix. Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements.

- Se transmite por una banda limitada de frecuencias
  - Por limitaciones físicas/tecnológicas
  - Por legislación

## 2.5 Sistema de comunicaciones

- Diagrama general:



- Elementos básicos:

- Transmisor: genera una señal que será enviada a través del canal
- Canal: medio por el que se envía la señal
- Receptor: procesa la señal recibida

## 2.6 Decibelio (dB)

- Los decibelios (dB) se usan para expresar la relación (logarítmica) entre dos magnitudes  $M_1$  y  $M_2$ :

$$10 \cdot \log_{10} \left( \frac{M_1}{M_2} \right)$$

- Facilita la comparación de magnitudes con un rango amplio de valores
- Usos:
  - Ganancia/atenuación de un sistema
  - Relación entre potencia de señal y ruido
  - Medida de valores absolutos de potencia
  - Cálculo de enlaces

## 2.6.1 Ganancia/atenuación

- Ganancia ( $G_{dB}$ ) / Atenuación ( $L_{dB}$ ) de un sistema:

$$G_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_s}{P_e}$$

$$L_{dB} = -10 \cdot \log_{10} \frac{P_s}{P_e} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_e}{P_s}$$

con  $P_s$  y  $P_e$  potencias a la salida y entrada del sistema.

- Se cumple que:

$$G_{dB} = -L_{dB}$$

## 2.6.1 Ganancia/atenuación (II)



- Ejemplo: una señal con un nivel de potencia de 10 mW se envía a través de una línea de transmisión. La potencia a la salida es 5 mW, la atenuación es:

$$L_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_e}{P_s} = 10 \cdot \log_{10} \frac{10 \text{ mW}}{5 \text{ mW}} = 10 \cdot 0.3 = 3 \text{ dB}$$

- El decibelio es una medida relativa, no absoluta.  
Si  $P_e = 1000 \text{ mW}$  y  $P_s = 500 \text{ mW}$ ,  $L_{dB} = 3 \text{ dB}$
- Utilidad: los cálculos de potencias cuando hay ganancias o atenuaciones se reducen a sumas y restas

## 2.6.1 Ganancia/atenuación: ejercicio



☞ Considera un sistema con  $P_e = 4 \text{ mW}$ , una línea de transmisión con  $L_{dB} = 12 \text{ dB}$ , un amplificador con  $G_{dB} = 35 \text{ dB}$  y otra línea de transmisión con  $L_{dB} = 10 \text{ dB}$ . ¿Cuál es la potencia de salida  $P_s$ ?

## 2.6.2 Relación señal/ruido

- Relación entre potencia de señal y ruido (SNR)

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{S}{N} \right)$$

- Algunos valores:
  - Punto de acceso WiFi: SNR recomendado = 20 dB
  - Receptor GPS: SNR minimo = 4 dB
- Ejemplo: calcula la SNR de un sistema con potencia de señal de 1000 mW y potencia de ruido de 1 mW:

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1000 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} \right) = 30 \text{ dB}$$

## 2.6.3 Valores absolutos de potencia



- Medida de valores absolutos de potencia:

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_{mW}}{1 \text{ mW}}$$

- Ejemplo: la potencia de transmisión del interfaz WiFi en un portátil es 32 mW (`$ iw dev wlo1 info | grep txpower`)

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log_{10} \frac{32 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} = 15 \text{ dBm}$$

- Ejemplo: la potencia de la señal recibida en un teléfono móvil es -100 dBm (puede verse en los ajustes del teléfono)

$$P_{mW} = 10^{\frac{P_{dBm}}{10}} = 10^{\frac{-100 \text{ dBm}}{10}} = 0.1 \cdot 10^{-9} \text{ mW} = 0.1 \text{ pW}$$

## 2.6.3 Valores absolutos de potencia (II)



- Comparación de valores absolutos en vatios y dBm

Potencia (W)	Potencia (dBm)
1 W	+30
100 mW	+20
10 mW	+10
5 mW	+7
1 mW	0
500 µW	-3
100 µW	-10
10 µW	-20
1 µW	-30
100 nW	-40

- Ejemplo: redes 3G y 4G/LTE:

	EXCELENTE	BUENA	ACEPTABLE	MALA	SIN COBERTURA
3G	> -70 dBm	(-70, -85) dBm	(-85, -100) dBm	(-100, -110) dBm	< -110 dBm
4G / LTE	> -90 dBm	(-91, -105) dBm	(-106, -110) dBm	(-111, -120) dBm	< -120 dBm

## 2.6.3 Valores absolutos de potencia (III)



☞ La antena DSS-65 situada en el Complejo de Comunicaciones con el Espacio Profundo de Madrid (Madrid Deep Space Communications Complex, MDSCC<sup>i</sup>) recibe de la sonda espacial OSIRIS-REx una señal de  $7.0 \cdot 10^{-19}$  kW. Calcula la potencia de la señal recibida en dBm.

☞ La antena DSS-63 situada en el Complejo de Comunicaciones con el Espacio Profundo de Madrid (Madrid Deep Space Communications Complex, MDSCC<sup>i</sup>) recibe de la sonda espacial Stereo A una señal de -115.8 dBm. Calcula la potencia de la señal recibida en vatios.

## 2.6.3 Valores absolutos de potencia (IV)



- ✍ Una señal de 15 dBm llega a un amplificador con una ganancia de 10 dB, ¿qué potencia en dBm se tiene a su salida?

Potencia de salida:  $P_s = 15 \text{ dBm} + 10 \text{ dB} = 25 \text{ dBm}$

- ✍ Dada una señal con una atenuación de 1 dB/m, si el emisor transmite 10 dBm y el receptor requiere una señal de -20 dBm, ¿cuál es la distancia máxima entre ambos?

Atenuación máxima:  $10 \text{ dBm} - (-20) \text{ dBm} = 30 \text{ dB}$

Distancia máxima:  $30 \text{ dB} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1 \text{ dB}} = 30 \text{ m}$

## 2.6.4 Factor de reflectividad equivalente



474

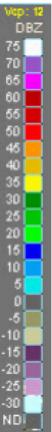
- Una red de radares meteorológicos observa las precipitaciones
  - Por ejemplo, radar de Zaragoza
- $Z$ : factor de reflectividad de un objeto remoto
- $Z_0$ : factor de reflectividad de una gota de agua de 1 mm en 1 m<sup>3</sup>



Fuente: AEMET.

$$L_Z(\text{dBz}) = 10 \cdot \log_{10} \frac{Z}{Z_0}$$

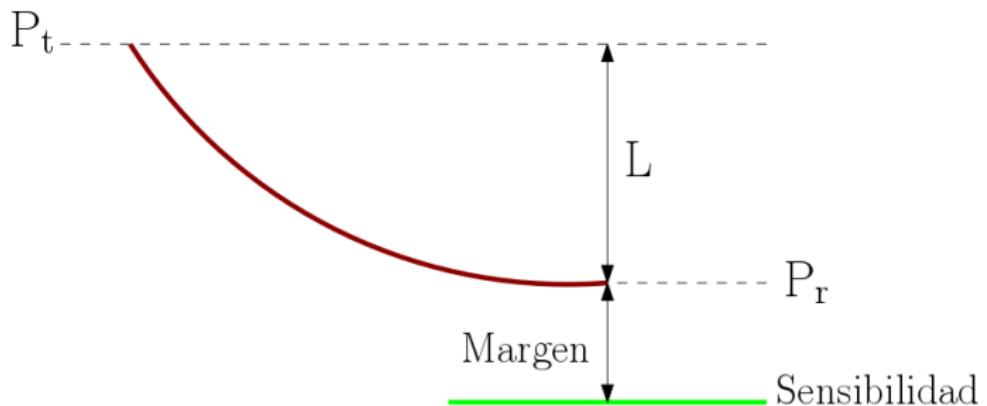
$L_Z$ (dBz)	Intensidad precipitación
10	Niebla
20	Lluvia fina
35	Lluvia moderada
45	Lluvia fuerte
60	Lluvia fuerte, probable granizo



Fuente: NOAA dBZ scale for weather radar.

## 2.7 Cálculo de un enlace

- Esquema simplificado:



$$P_t - L = P_r \geq S_r + M$$

con  $P_t$ ,  $P_r$ ,  $S_r$  en dBm, dBW ...;  $L$ ,  $M$  en dB

## 2.7 Cálculo de un enlace (II)



Un enlace LoRa<sup>1</sup> tiene los siguientes parámetros:

- $P_t = 17 \text{ dBm}$
- $S_r = -137 \text{ dBm}$
- $f = 868.1 \text{ MHz}$  (frecuencia portadora)

a) Calcula la atenuación máxima del enlace ( $L_{max}$ )

b) La atenuación  $L$  en el espacio libre viene dada por:

$$L(dB) = 32.4 + 20 \cdot \log_{10} f(\text{MHz}) + 20 \cdot \log_{10} d(\text{km})$$

siendo  $f$  la frecuencia de la portadora en MHz y  $d$  la distancia del enlace en kilómetros. Calcula el alcance máximo del enlace ( $d_{max}$ ).

<sup>1</sup><https://lora-alliance.org/>

## 3. Medios de transmisión

- 3.1. Par trenzado
- 3.2. Cable coaxial
- 3.3. Fibra óptica
- 3.4. Cableado estructurado
- 3.5. Radiofrecuencia
- 3.6. Velocidad de propagación

### 3 Medios de transmisión



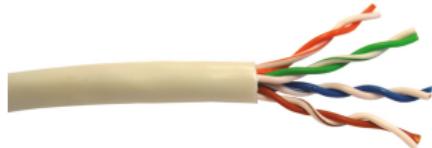
Soporte a través del cual se propaga la señal transmitida

- Guiado o línea de transmisión:
  - Par trenzado
  - Cable coaxial
  - Fibra óptica
- No guiado (inalámbrico):
  - Radiofrecuencia
  - Infrarrojos (IrDA): obsoleto
  - Láser: óptica de espacio libre (FSO), enlaces punto a punto de alta velocidad

### 3.1 Par trenzado



- Dos conductores: señal + referencia
- Cada cable está compuesto por una serie de pares trenzados (*twisted pairs*, TP): 4, 25, 50, 100, 200 y 300
- El trenzado reduce las interferencias externas y entre pares adyacentes
- Transmiten señales moduladas y con codificación de pulsos en banda base
- El ancho de banda depende de la sección y longitud
- Bajo coste y facilidad de instalación



### 3.1 Par trenzado: tipos

- Tipos de aislamiento:
  - U (*Unshielded*): no apantallado
  - F (*Foiled*): lámina de aluminio
  - S (*Shielded*): cable completo apantallado con malla
- Designación ISO/IEC 11801 según el aislamiento global (X) y de cada par (Y): X/YTP
  - U/UTP: no apantallado
  - U/FTP: pares apantallados con lámina de aluminio
  - SF/UTP, S/FTP ...

### 3.1 Par trenzado: tipos (II)

U/UTP  
sin apantallamiento



U/FTP  
*foil* en cada par



S/UTP  
malla global



S/FTP  
malla + foil



### 3.1 Par trenzado: tipos (III)

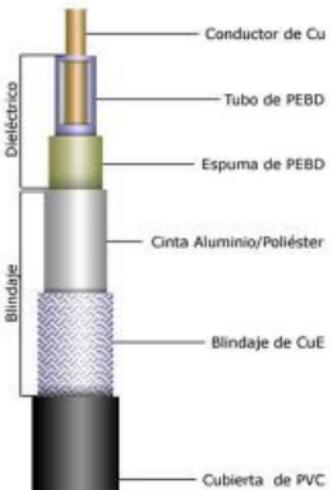
- Clasificación según prestaciones  
(ancho de banda, interferencias, pérdidas de propagación):

Categoría	Frecuencia	Velocidad	Alcance
Cat 5e	100 MHz	1 Gbps	100 m
Cat 6	250 MHz	1 Gbps / 10 Gbps	100 m / 55 m
Cat 6a	500 MHz	10 Gbps	100 m
Cat 7	600 MHz	10 Gbps	100 m
Cat 8.1	2000 MHz	25 / 40 Gbps	30 m
Cat 8.2	2000 MHz	25 / 40 Gbps	30 m

## 3.2 Cable coaxial

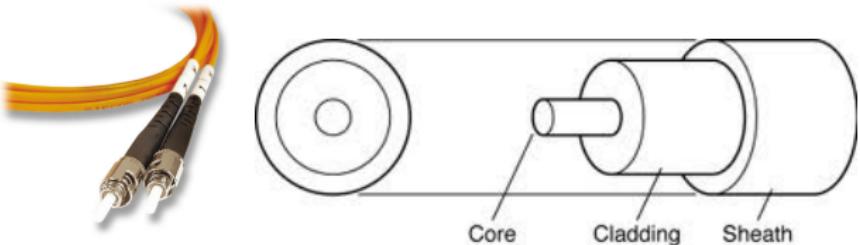


- Hilo conductor central de cobre rodeado por malla de hilos de cobre
- Conductores separados por aislante (plástico)
- Puede estar apantallado
- Buen ancho de banda (1 GHz) y excelente inmunidad al ruido
- Coste elevado
- Está siendo sustituido por la fibra óptica
- Uso más común: TV y cableado final en accesos domésticos de fibra óptica



### 3.3 Fibra óptica

- Hilo fino de vidrio o plástico por el que se envían pulsos de luz
- El haz de luz queda confinado y se propaga por el interior de la fibra con cierto ángulo de reflexión



### 3.3 Fibra óptica (II)

- En cada extremo hay un transceptor (transmisor-receptor, *transceiver*)
  - La fuente de luz puede ser LD (Laser Diode) o LED (Light Emision Diode)
  - En recepción se utilizan fotodiodos (PD) o fototransistores (PT)



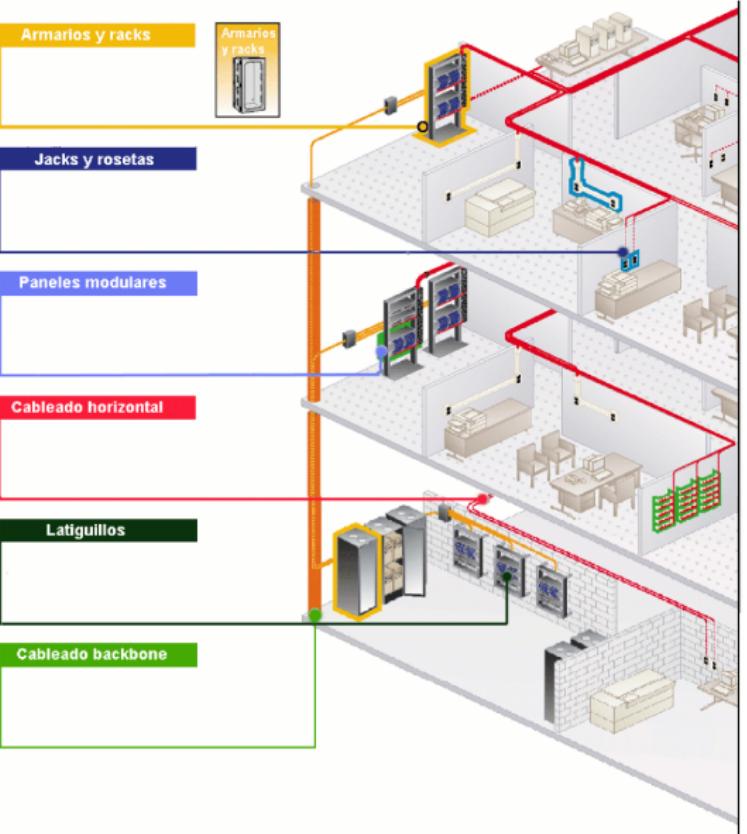
### 3.3 Fibra óptica (III)



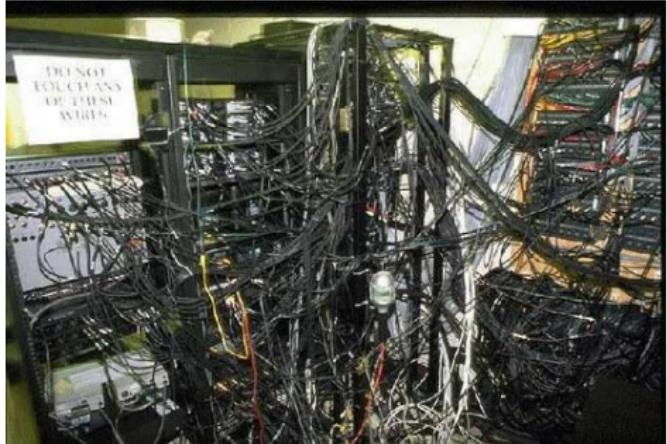
- Ventajas
  - Ancho de banda elevado (Gb/s)
  - Baja atenuación → largas distancias
  - Pequeñas dimensiones, flexibilidad, ligereza
  - Inmunidad total a perturbaciones electromagnéticas
  - Seguridad: no emite radiaciones y es difícil de «pinchar»
  - Resistencia mecánica, calor, corrosión
- Inconvenientes
  - Fragilidad de las fibras
  - Emisores y receptores caros
  - Velocidad condicionada por la electrónica de emisión y recepción
  - No pueden transmitir electricidad para alimentar receptores o repetidores (*Power over Ethernet, PoE*)
  - Empalmes difíciles de realizar en campo

## 3.4 Cableado estructurado

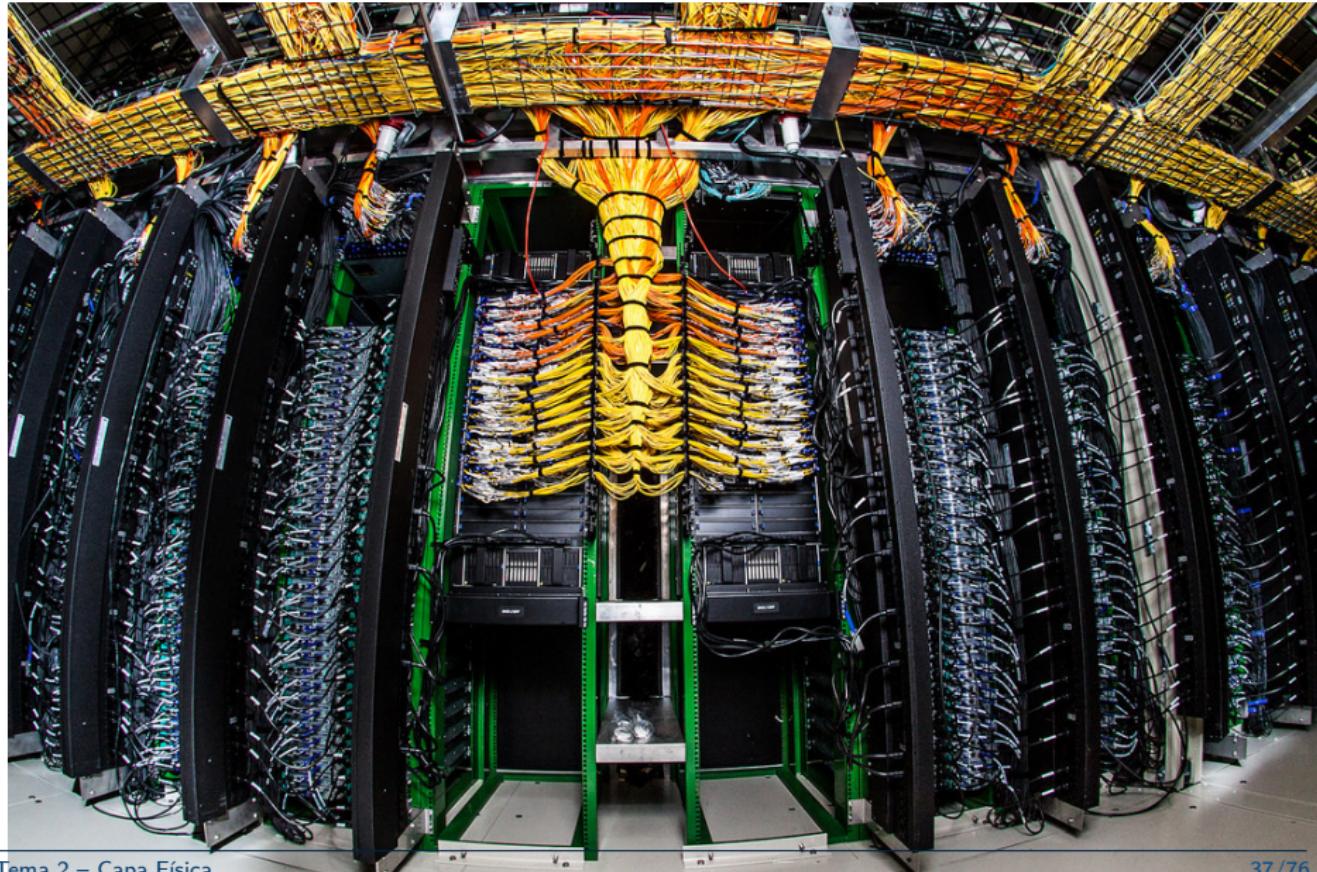
- Objetivo: optimizar gestión y mantenimiento
- División en tramos estructurados: cabl. horizontal + vertical



## 3.4 Cableado estructurado (II)



## 3.4 Cableado estructurado (III)



### 3.5 Radiofrecuencia (RF)



- Rango de frecuencias usado en radiocomunicaciones:
  - Ondas de radio: 30 MHz – 1 GHz
    - No usado en redes de computadores
  - Microondas terrestre: 2 – 40 GHz
    - Telefonía móvil: 4G, 5G
    - WiFi
    - WiMAX: acceso inalámbrico de banda ancha
  - Microondas satélite: 2 – 40 GHz

Órbita	Altitud (km)	Latencia (RTT, ms)	Cobertura	Uso
LEO	160 – 2000	20 – 50	Local, regional	Meteorológicos, Starlink, OneWeb
MEO	2000 – 36000	100 – 200	Amplia	GPS, Galileo, Glonass
GEO	36000	500 – 700	Muy amplia	Internet, TV, telefonía

### 3.6 Velocidad de propagación



- $V_p$ : velocidad a la que una onda electromagnética viaja a través de un medio
- Factor de velocidad,  $VF$ : relación entre las velocidades de una onda EM en un medio y en el vacío

Medio	$V_p$ (m/s)	VF (%)
Espacio libre	$c = 3 \cdot 10^8$	100
Cable de cobre S/FTP (cat.7a)	$2.4 \cdot 10^8$	80
Fibra óptica	$\approx 2 \cdot 10^8$	67
Cable de cobre UTP (cat.5e)	$1.9 \cdot 10^8$	63

☞ La distancia de la Tierra a Marte (cuando están lo más cerca posible) es aproximadamente de  $55 \times 10^9$  m y los datos viajan en el enlace a la velocidad de la luz. ¿Cuánto tarda la señal en viajar de la Tierra a Marte?

## 4. Transmisión digital

4.1. Símbolos y bits

4.2. Tasa de símbolos

4.3. Tasa de bits

4.4. Modulación por pulsos

    Interferencia intersímbolos

    Eficiencia espectral

4.5. Modulación por portadora

    ASK (Amplitude shift keying)

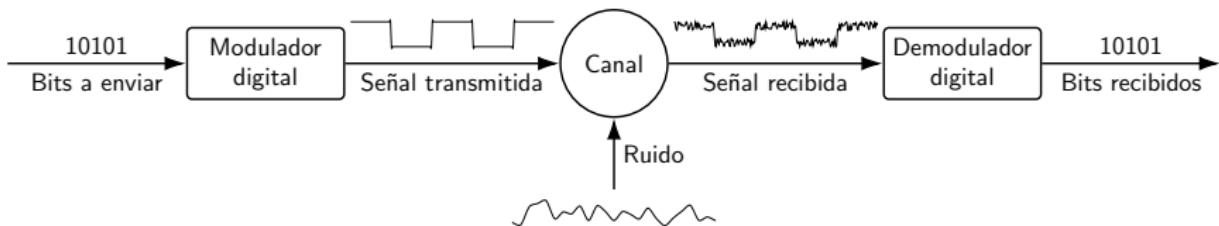
    FSK (Frequency shift keying)

    PSK (Phase shift keying)

    QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

## 4 Transmisión digital

- Bloques básicos de un sistema de comunicaciones digitales:

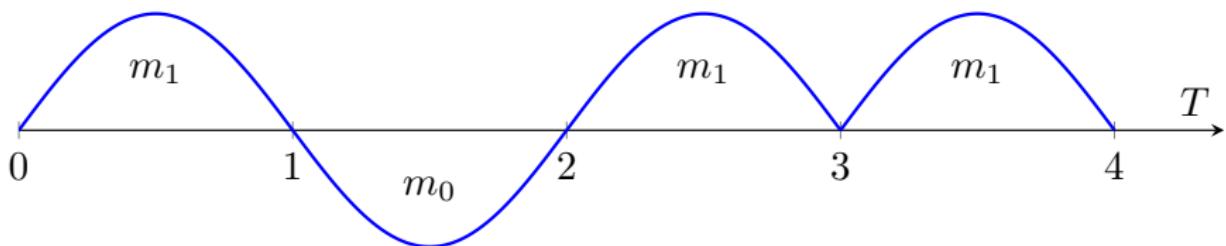


- Dada una secuencia binaria a transmitir, hay que convertir los bits en ondas compatibles con el canal:
  - Transmisión en banda base: **modulación por pulsos o modulación en banda base**. Por ej.: tarjeta red Ethernet sobre pares trenzados de cobre
  - Transmisión en canal paso banda: **modulación por portadora** (señal sinusoidal). Por ej.: tarjeta red WiFi por el aire.

## 4.1 Símbolos y bits



- **Símbolo:** forma de onda de la señal modulada, se transmite durante un tiempo  $T_s$
- **Alfabeto:** conjunto de símbolos



- **Sistema M-ario:** usa un conjunto de  $M = 2^k$  símbolos. Cada símbolo codifica  $k = \log_2(M)$  bits
  - $k = 1$  bit/símb →  $M = 2$  símbolos: sistema 2-ario (binario)
  - $k = 2$  bits/símbolo →  $M = 4$  símbolos: sistema 4-ario

## 4.2 Tasa de símbolos



- Tiempo de símbolo ( $T_s$ ): tiempo entre transiciones de símbolos
- Tasa de símbolos ( $R_s$ ): número de símbolos en la señal modulada por unidad de tiempo.  
Se mide en **baudios** (Bd, símbolos/s)

$$R_s = \frac{\text{símbolos}}{\text{tiempo}} = \frac{1}{T_s} \quad (\text{Bd})$$

- Algunos valores
  - Red Ethernet 1 Gb/s (1000BASE-T): 125 MBd
  - FFTH (*Fiber To The Home*): 300 MBd – 1 GBd
  - Wi-Fi 6: ~ 156.25 MBd

## 4.3 Tasa de bits

- **Tasa de bits ( $R_b$ )**: número de bits en la señal modulada por unidad de tiempo. Se mide en **bits/segundo** (b/s, bps)

$$R_b = \frac{\text{bits}}{\text{tiempo}}$$
 (b/s)

- Algunos valores
  - Red Ethernet L1.02: 1 Gb/s
  - FFTH (*Fiber To The Home*): 300 Mb/s - 1 Gb/s
  - Wi-Fi 5: 300–600 Mb/s, Wi-Fi 6: ~2 Gb/s

## 4.3 Tasa de bits (II)

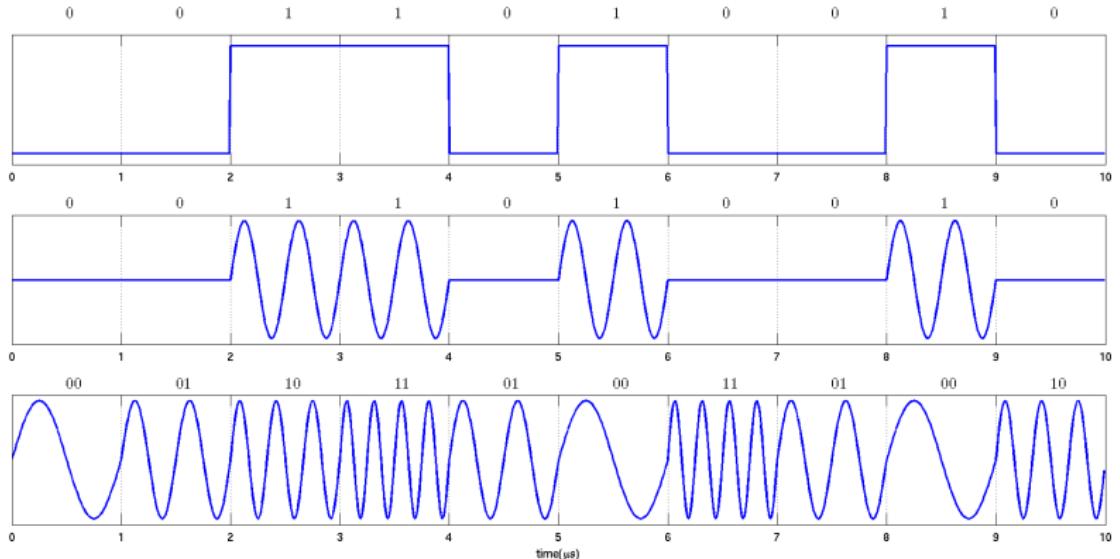
- Relación entre  $R_b$  y  $R_s$

$$R_b = \frac{\text{bits}}{\text{tiempo}} = \frac{k \cdot \text{símbolos}}{\text{tiempo}} = R_s \cdot k = R_s \cdot \log_2(M)$$

- $k = 1$  bit/símbolo  $\rightarrow R_b = R_s$
- $k = 2$  bits/símbolo  $\rightarrow R_b = 2 \cdot R_s$

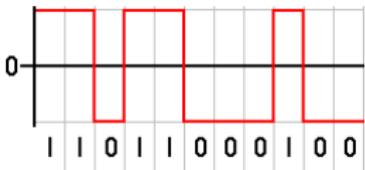
## 4.3 Tasa de bits (III)

☞ Asumiendo que el tiempo de símbolo es  $1 \mu\text{s}$ , calcula la tasa de símbolos y la tasa de bits de las siguientes señales moduladas. Indica asimismo el número de símbolos  $M$ .

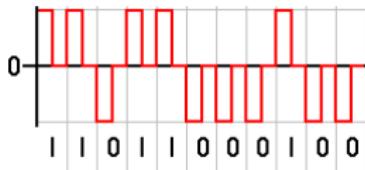


## 4.4 Modulación por pulsos

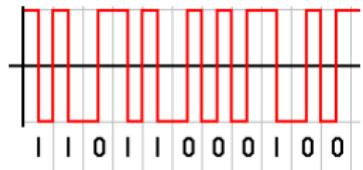
- Pulse Code Modulation (PCM)
- Los bits se transforman en formas de onda pulsadas que se transmiten por un canal banda base
- Características de las formas de onda o códigos de línea:
  - Nonreturn-to-zero (NRZ) / Return-to-zero (RZ)
  - Unipolar / Bipolar
  - Phase encoded
  - Multilevel binary



NRZ



RZ

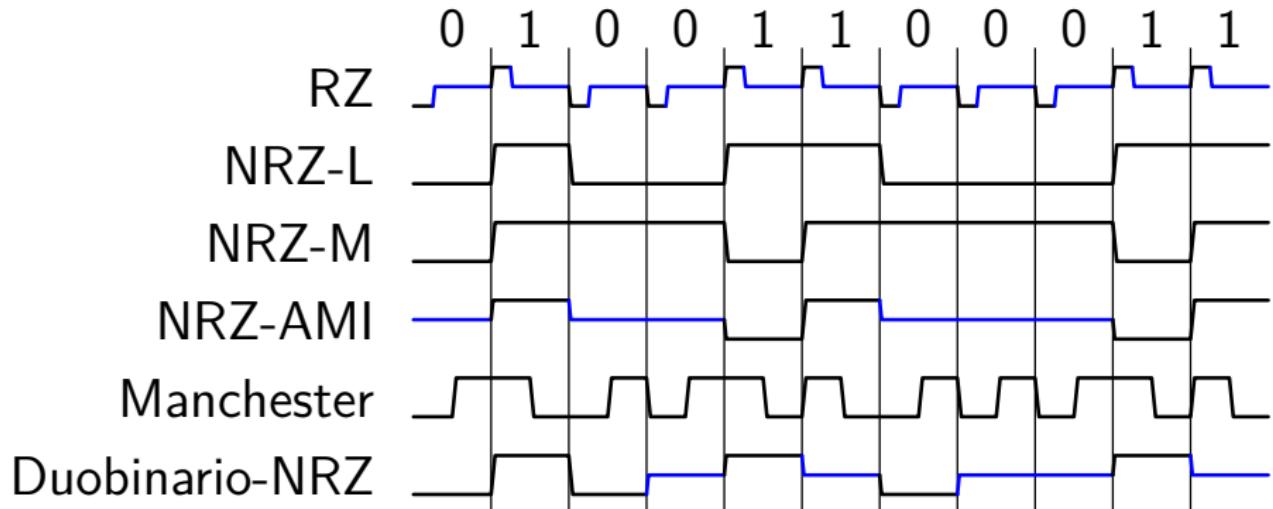


Phase encoded

Fuente: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2045807>

## 4.4 Modulación por pulsos (II)

- Ejemplos:



## 4.4 Modulación por pulsos (III)



- RZ: transición a  $0V$  durante el pulso
- NRZ-L, por nivel:  $0 \equiv V^-$ ,  $1 \equiv V^+$
- NRZ-M, diferencial:  $0$  mantiene  $V$ ,  $1$  cambia  $V$
- NRZ-AMI, inversión alterna:  $0 \equiv 0V$ ,  $1$  alterna  $V^{+/-}$
- Manchester:  $0 \equiv V^- \rightarrow V^+$ ,  $1 \equiv V^+ \rightarrow V^-$   
(señal de reloj integrada en la codificación)
- Duobinario-NRZ: mismo valor en bit  $\equiv 0V$ ,  
distinto valor  $\equiv$  alterna  $V^{+/-}$

## 4.4 Modulación por pulsos (IV)

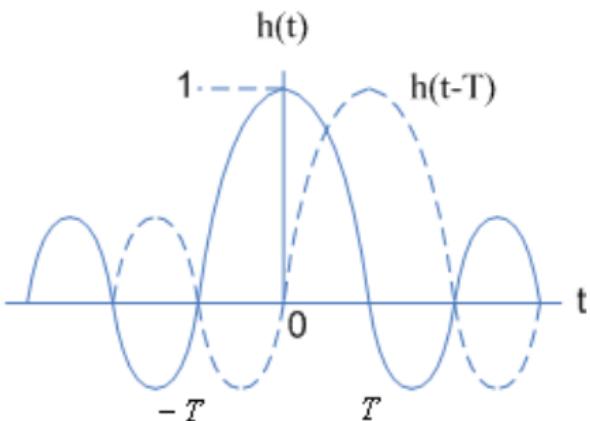
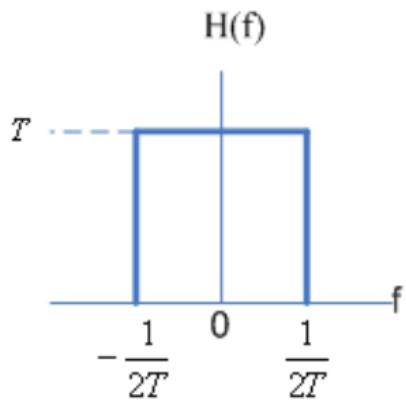


- ¿Por qué hay tantos códigos de línea PCM?
- Por la variedad de requisitos que tienen las distintas aplicaciones
  - Velocidad de transmisión
  - Coste
  - Prestaciones
  - Tecnología de implementación
- La elección de un código de línea determina
  - Uso del ancho de banda
  - Componente continua (DC)
  - Sincronización
  - Capacidad de detectar errores
  - Inmunidad al ruido

## 4.4.1 Interferencia intersímbolos (ISI)



- Los pulsos recibidos se solapan por la distorsión del canal
- Nyquist<sup>1</sup>: el ancho de banda mínimo teórico para detectar  $R_s$  Bd sin ISI es  $R_s/2$  Hz  $\rightarrow B \geq R_s/2$



- Un sistema con ancho de banda  $B$  soporta un máximo de  $R_s = 2 \cdot B$  Bd, es decir,  $R_s/B \leq 2$  Bd/Hz

## 4.4.2 Eficiencia espectral

- Tasa de bits por ancho de banda,  $E = R_b/B$  b/s/Hz  
$$E = R_b/B = R_s \cdot k/B = R_s \cdot \log_2(M)/B$$

Como  $R_s/B \leq 2$ , entonces  $E \leq 2 \cdot \log_2(M)$  b/s/Hz
- Ejemplo: cable Marea, 2019.

### Real-time 16QAM Transatlantic Record Spectral Efficiency of 6.21 b/s/Hz Enabling 26.2 Tbps Capacity

Stephen Grubb<sup>1</sup>, Pierre Mertz<sup>2</sup>, Ales Kumpera<sup>3</sup>, Lee Dardis<sup>4</sup>, Jeffrey Rahn<sup>4</sup>, James O'Connor<sup>4</sup>, Matthew Mitchell<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facebook, 1 Hacker Way, Menlo Park, CA 94025

<sup>2</sup>Infinera Maryland, 9005 Junction Dr., Savage, MD 20763

<sup>3</sup>Infinera Canada, 555 Legget Dr, Ottawa, ON K2K 2X3, Canada

<sup>4</sup>Infinera Corporation, 140 Caspian Ct., Sunnyvale, CA 94089

E-mail address: pmertz@infinera.com

**Abstract:** Real-time, error-free 16QAM transmission at a record spectral efficiency of 6.21 b/s/Hz enables transatlantic (6,644 km) fiber capacity of 26.2 Tbps, using precision, multi-carrier common wavelocking; digitally synthesized subcarriers; near-Nyquist pulse shaping; and large-area, positive dispersion fiber.

☞ ¿Cuál es el valor máximo de  $E$  para una modulación 16QAM?  
Calcula el cociente  $R_s/B$  del cable Marea.

## 4.5 Modulación por portadora



- Variación de la amplitud, frecuencia o fase de una portadora según los símbolos a transmitir

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

- Uso más eficiente del canal: las ondas cuadradas son espectralmente ineficientes
- Hardware más sencillo: antenas, filtros, amplificadores ...
- Módem:
  - Modulador: modifica alguna característica de la portadora
  - Demodulador: elimina la señal portadora

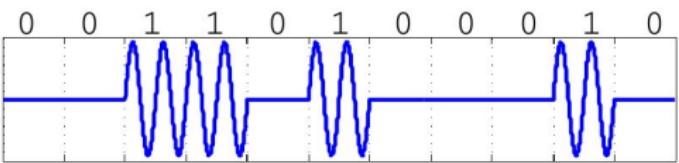
## 4.5.1 ASK (amplitude Shift Keying)

- Los símbolos se representan mediante diferentes amplitudes ( $A_i$ ) de la portadora:

$$s(t) = A_i \cdot \cos(2\pi ft + \phi), \quad i = 1, \dots, M$$

- Por ejemplo, ASK binario (*on-off keying, OOK*):

$$s(t) = \begin{cases} A \cdot \cos(2\pi ft) & 1 \\ 0 & 0 \end{cases}$$



- Sensible a cambios repentinos de la ganancia (ruido impulsivo)
- Se usa en fibras ópticas

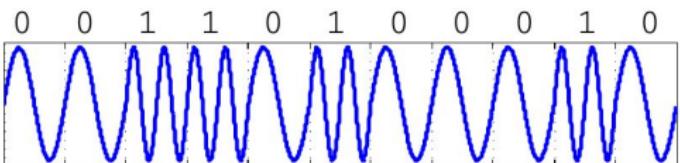
## 4.5.2 FSK (frequency Shift Keying)

- Los símbolos se representan mediante diferentes frecuencias ( $f_i$ ) de la portadora

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi f_i t + \phi), \quad i = 1, \dots, M$$

- Por ejemplo, FSK binario (BFSK):

$$s(t) = \begin{cases} A \cdot \cos(2\pi f_1 t) & 1 \\ A \cdot \cos(2\pi f_2 t) & 0 \end{cases}$$



- Se utilizaba en telefonía móvil 2G (GSM)

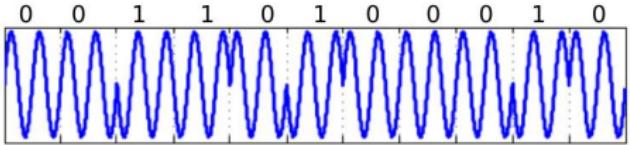
## 4.5.3 PSK (Phase Shift Keying)

- Los valores de los símbolos se representan mediante diferentes fases ( $\phi_i$ ) de la portadora:

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi ft + \phi_i), \quad i = 1, \dots, M$$

- Por ejemplo, PSK binario (BPSK):

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



- PSK diferencial (DPSK): fase depende del símbolo anterior
- Amplio uso: 802.11b, Bluetooth, Zigbee, sonda espacial New Horizons ...

## 4.5.4 QAM (Quadrature Amplitude Mod.)



- Combinación de ASK y PSK
- Usa distintas amplitudes ( $A$ ) y fases ( $\phi$ ) para codificar varios bits por símbolo
- Ejemplo: 8-QAM circular: dos amplitudes ( $A$  y  $B$ ) y cuatro fases por amplitud

$$000 \rightarrow s(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + 0^\circ)$$

$$001 \rightarrow s(t) = B \cdot \sin(2\pi ft + 45^\circ)$$

$$010 \rightarrow s(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + 90^\circ)$$

$$011 \rightarrow s(t) = B \cdot \sin(2\pi ft + 135^\circ)$$

$$100 \rightarrow s(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + 180^\circ)$$

$$101 \rightarrow s(t) = B \cdot \sin(2\pi ft + 225^\circ)$$

$$110 \rightarrow s(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + 270^\circ)$$

$$111 \rightarrow s(t) = B \cdot \sin(2\pi ft + 315^\circ)$$

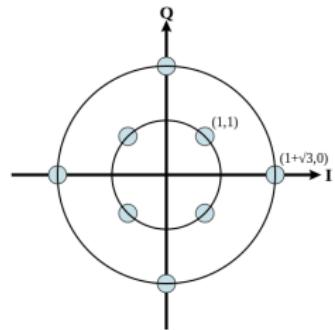


Diagrama de constelación  
Fuente: Life of Riley

- Uso: WiFi (802.11ax: 16-, 64-, 256- y 1024-QAM)

## 4.5.4 Ejercicio

Un modem transmite a 1200 Bd y 2400 bps utilizando una modulación M-QAM. Si el valor máximo de  $R_s$  para una banda  $B$  en la modulación QAM es aproximadamente igual a la banda de paso, calcula:

- ¿Cuántos bits de información transporta cada símbolo?
- ¿Cuántos símbolos distintos ( $M$ ) genera el módem?
- ¿Qué banda necesita?
- Si la portadora es  $f_p = 1800$  Hz, ¿cuál es la frecuencia inferior de corte? ¿Y la superior?

## 5. Capacidad de un canal con ruido

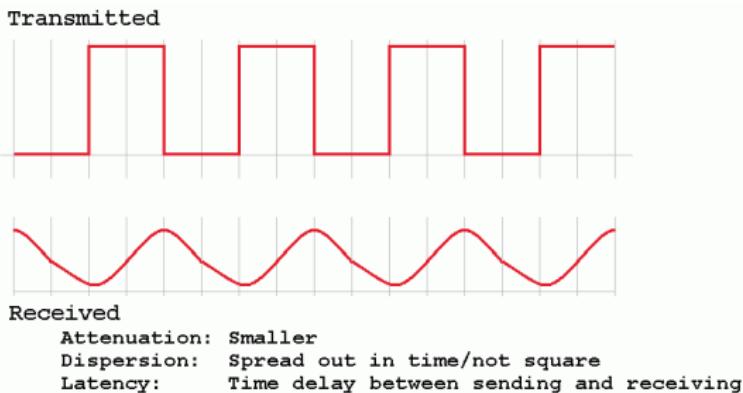
- 5.1. Perturbaciones en la transmisión
- 5.2. Teorema de Shannon-Hartley
- 5.3. BER: probabilidad de error de bit

## 5.1 Perturbaciones en la transmisión



Cualquier canal tiene perturbaciones:

- Atenuación: pérdida de energía de la señal al propagarse
- Distorsión de retardo: distintas frecuencias viajan a distintas velocidades (medios dispersivos)



## 5.1 Perturbaciones en la transmisión (II)



- **Ruido:** señales insertadas entre emisor y receptor
  - Ruido térmico: agitación de los electrones
  - Intermodulación: varias frecuencias en el mismo medio
  - Diafonía: acoplamiento entre líneas
  - Ruido impulsivo: pulsos cortos e irregulares

Las perturbaciones pueden hacer que el receptor confunda los símbolos de la señal

- El tipo de modulación, el número de símbolos  $M$  y la tasa  $R_s$  vendrán limitados por la capacidad para distinguirlos

## 5.2 Teorema de Shannon-Hartley



- **Shannon**: la capacidad máxima  $C$  de un canal perturbado por ruido es función de la potencia media de la señal recibida  $S$ , la potencia media del ruido  $N$ , y el ancho de banda  $B$ .

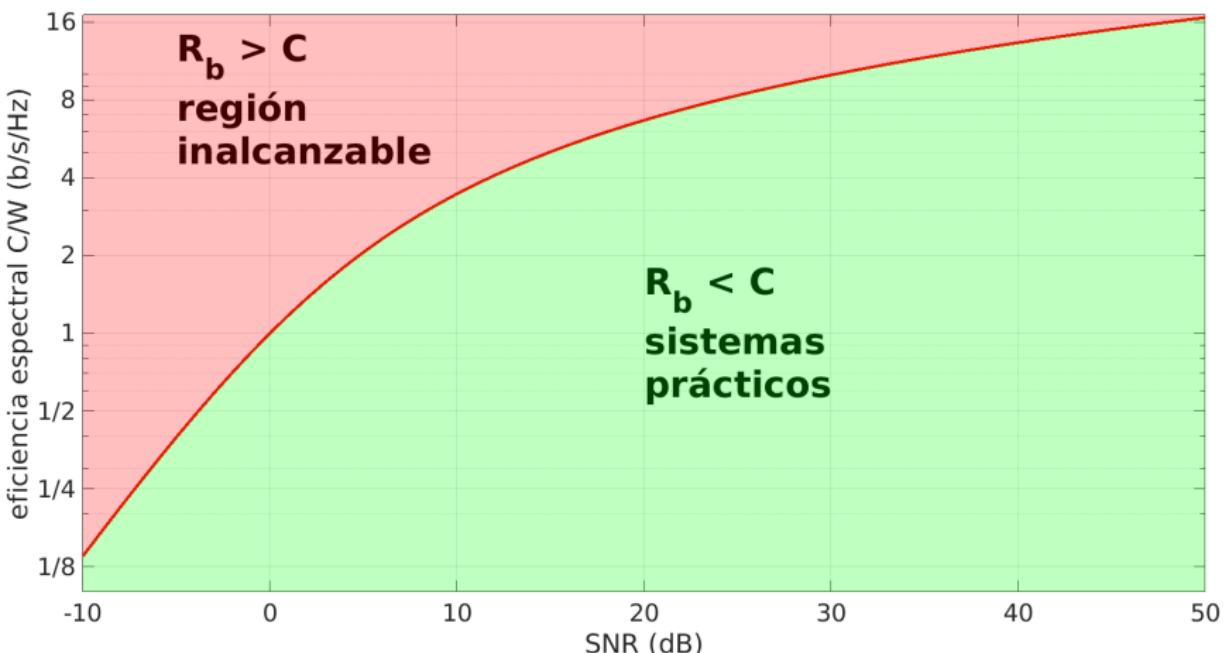
$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

con  $C$  en bits por segundo (bps) y  $B$  en Hercios (Hz).

- Es posible transmitir información a una tasa  $R_b \leq C$  con una probabilidad de error arbitrariamente baja
- Recordar:  $\log_2(x) = \frac{\ln(x)}{\ln(2)} = \frac{\log_{10}(x)}{\log_{10}(2)}$

## 5.2 Teorema de Shannon-Hartley (II)

- Límite de prestaciones



Fuente: elaboración propia.

## 5.2 Teorema de Shannon-Hartley (III)

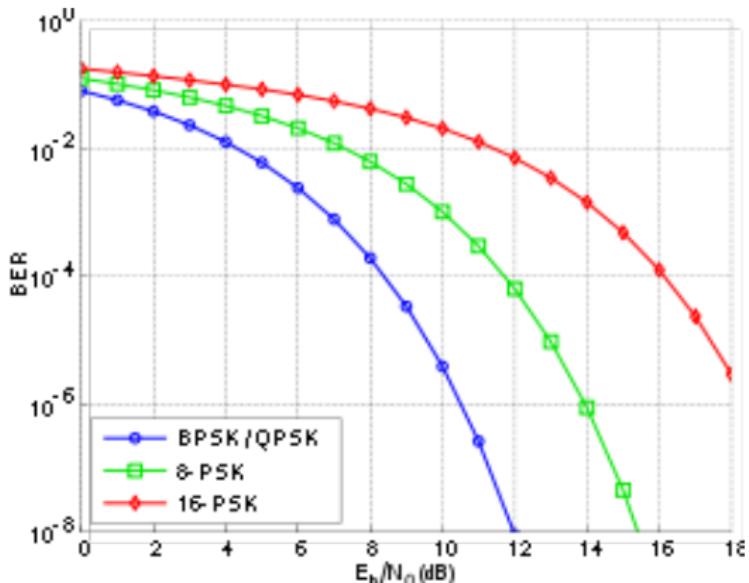


1474

- ☞ Considera un canal telefónico con ancho de banda de 3 kHz.
- a) ¿Cuál es la capacidad del canal si SNR es 30 dB?
  - b) ¿Cuál es el mínimo valor de SNR requerido para transmitir a 4800 bps?
  - c) Repetir el apartado anterior para 19200 bps.

## 5.3 BER: probabilidad de error de bit

Bit Error Ratio (BER): fracción de bits erróneos (adimensional)



- 💡 Considera un canal con  $B = 3$  kHz,  $\text{SNR} = 12$  dB por el que se transmite una señal BPSK a 3000 bps. Calcula la probabilidad de error de bit (BER). Nota:  $E_b/N_0 = (S/N) \cdot (B/R_b)$ .

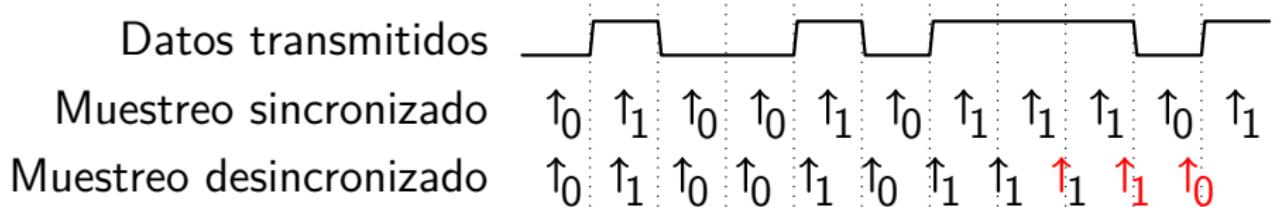
## 6. Sincronismo

- 6.1. Transmisión asíncrona
- 6.2. Transmisión síncrona

# 6 Sincronismo



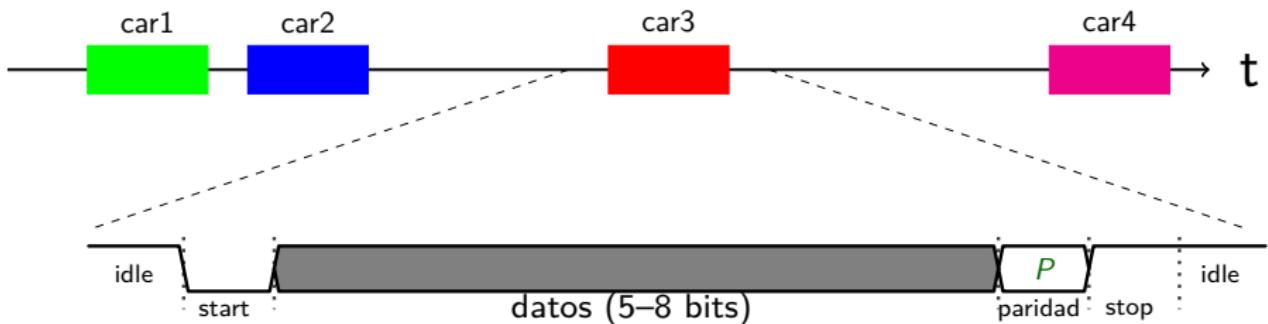
- El receptor debe saber en qué momento:
  - Empieza/acaba cada bloque de datos (trama)
  - Muestrear cada bit (símbolo)
- Alta velocidad → relojes con precisión de  $\mu\text{s}/\text{ns}$
- Todos los relojes se atrasan/adelantan → la precisión requerida no se puede garantizar durante mucho tiempo
- Dos estrategias para sincronizar emisor y receptor:  
transmisión asíncrona y síncrona



## 6.1 Transmisión asíncrona



- Envío de caracteres entre 5 y 8 bits + pausa
- Sincronización de relojes al inicio de cada carácter
- Sencilla y barata
- Velocidad de transmisión baja, sobrecarga alta



## 6.1 Transmisión asíncrona (II)



Se especifica:

- No transmisión (*idle*): tensión correspondiente a 1 binario
- Velocidad de transmisión, es decir, el tiempo de bit
- Número de bits de cada carácter
- Bit de paridad
- Tiempo de parada

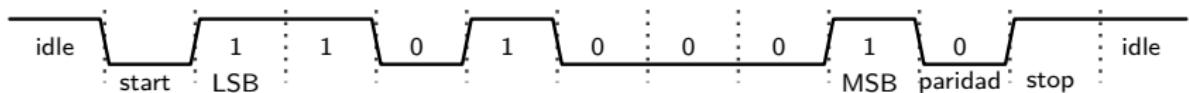
Velocidad	Bits de datos	Paridad	Tiempo de parada
4800	5	N: <i>none</i> (sin)	1
9600	6	E: <i>even</i> (par)	1.5
19200	7	O: <i>odd</i> (impar)	2
...	8		

- Por ejemplo: 9600/8N1, 9600/7E2, 4800/7O1

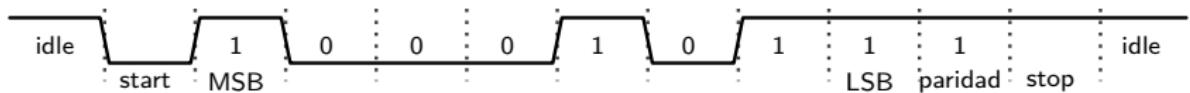
## 6.1 Transmisión asíncrona (III)



- Configuración: 8 bits de datos, paridad par, 1 bit de stop, primero se envía el bit menos significativo (*least significant bit, LSB*)
- Byte a enviar: 10001011



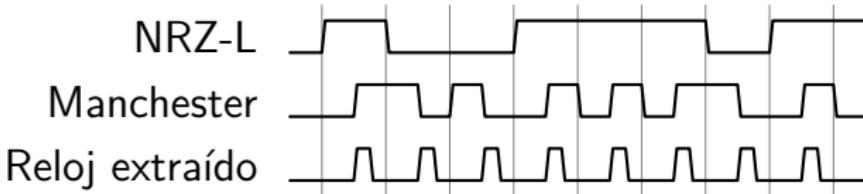
- Configuración: 8 bits de datos, paridad impar, 1 bit de stop, primero se envía el bit más significativo (*most significant bit, MSB*)
- Byte a enviar: 10001011



## 6.2 Transmisión síncrona



- Contexto: flujo constante de grandes bloques de bits o altas velocidades de transmisión
- Solución 1: línea adicional que transmite la señal de reloj
  - Funciona bien en distancias cortas
- Solución 2: la información del reloj se integra en la señal de datos
  - Por ej., Manchester codifica una transición a mitad de bit



## 6.2 Transmisión síncrona (II)

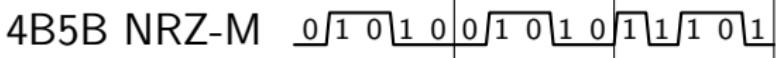
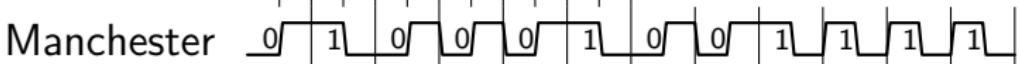


- Códigos de sustitución garantizan transiciones, e.g. 4B5B

Datos	4B5B	Datos	4B5B	Datos	4B5B	Datos	4B5B
0000	11110	0100	01010	1000	10010	1100	11010
0001	01001	0101	01011	1001	10011	1101	11011
0010	10100	0110	01110	1010	10110	1110	11100
0011	10101	0111	01111	1011	10111	1111	11101

4B5B: nunca más de tres 0s consecutivos

- Ejemplos: NRZ-L (no sincronizable), Manchester, 4B5B sobre NRZ-M (Ethernet 100 Mb/s), todos con misma tasa de símbolos



- Velocidad de transmisión [Tema 3]:  $V_t(\text{NRZ-L}) = R_b(\text{NRZ-L})$   
 $V_t(\text{Manchester}) = \frac{1}{2}R_b(\text{NRZ-L})$        $V_t(4\text{B5B-NRZ-M}) = \frac{4}{5}R_b(\text{NRZ-L})$

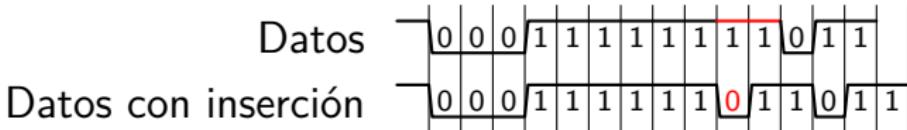
## 6.2 Transmisión síncrona (III)



- **Inserción de bits (*bit stuffing*):** dos aplicaciones
  - El número de bits consecutivos con el mismo valor se limita insertando un bit del valor opuesto
  - Evitar que una trama contenga la secuencia de datos delimitadora de la misma

Ejemplo:

Emisor	111111 → 1111110
Receptor	1111110 → 111111



## 7. Modos de transmisión

# 7 Modos de transmisión

Simplex: comunicación en un único sentido



Half-duplex: en ambos sentidos pero no a la vez



Full-duplex: en ambos sentidos simultáneamente



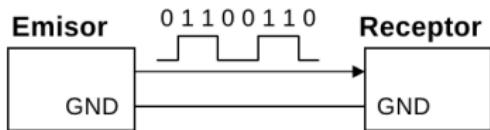
# 7 Modos de transmisión (II)

Serie: las señales de múltiples bits se transmiten secuencialmente por un mismo canal

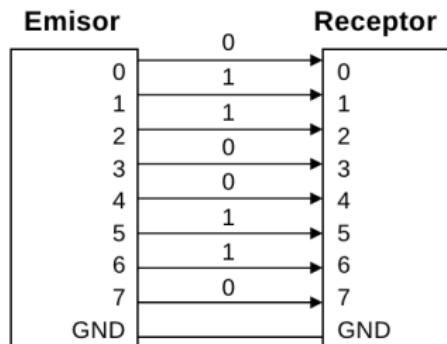
- Mínimo dos cables: señal y referencia

Paralelo: las señales de múltiples bits se transmiten por diferentes canales simultáneamente

- Más caro ya que requiere más cables
- Menor distancia (diafonía, sincronización entre canales)



Transmisión serie



Transmisión paralelo