

# **Redes de Computadores**

## **Tema 2 – Capa Física**

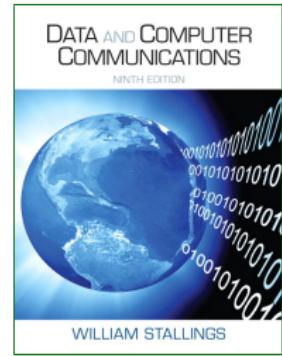
**Natalia Ayuso, Juan Segarra y Jesús Alastruey**



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
8. Conclusiones



Cap. 3, 4, 5 y 6

# 1 Introducción

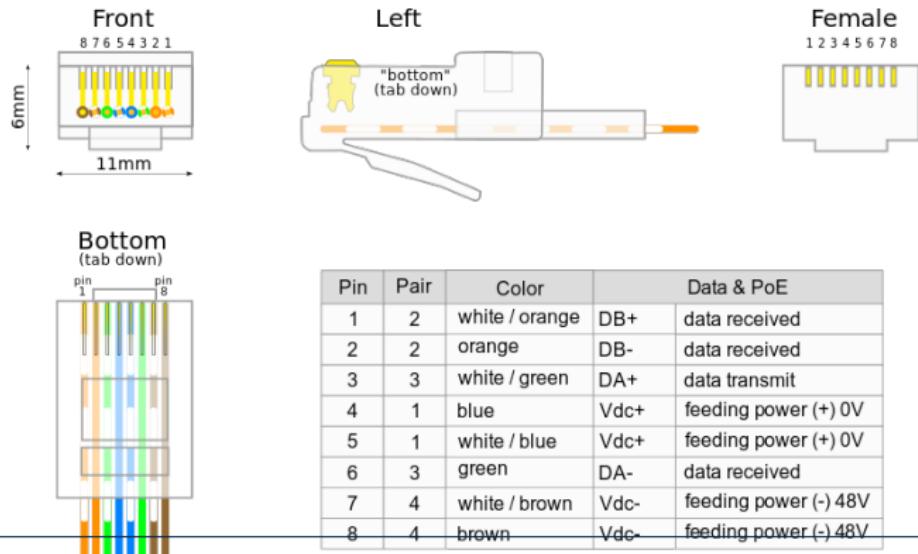
---

*According to the European Telecommunications Standards Institute (ETSI), a standard is a “document, established by consensus and approved by a recognized body, that provides, for common and repeated use, rules, guidelines or characteristics for activities or their results, aimed at achievement of the optimum degree of order in a given context”*

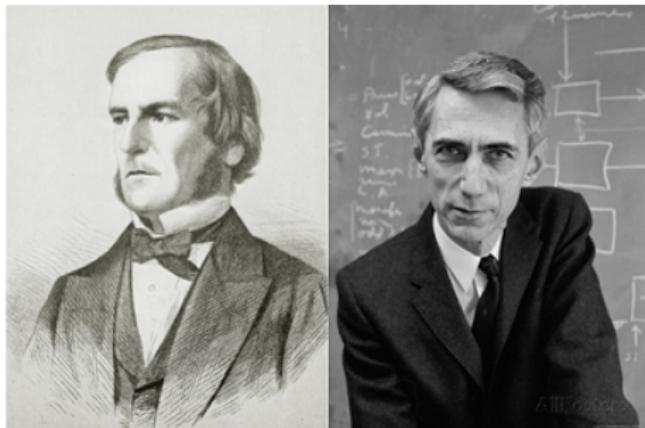
# 1 Introducción (II)

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



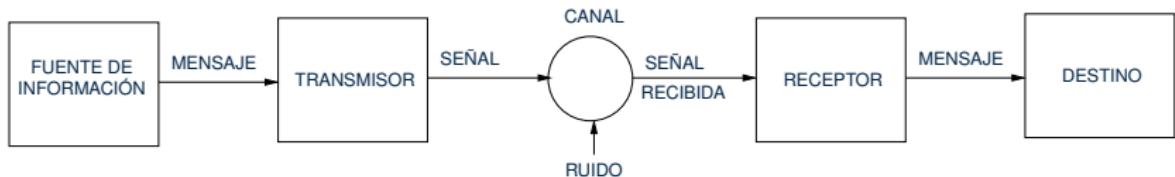
## 2 Conceptos y terminología



George Boole & Claude Shannon

## 2 Conceptos y terminología (II)

- Diagrama general de un sistema de comunicaciones:



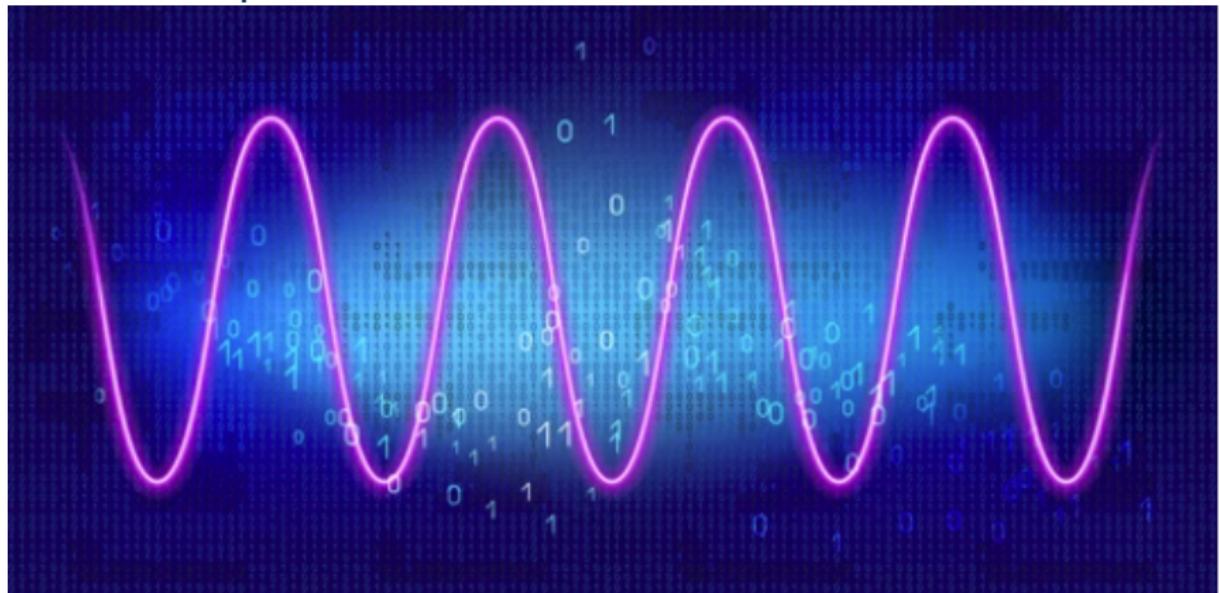
 C. E. Shannon (1948), 'A mathematical theory of communication', *The Bell System Technical Journal* (27), pp. 379–423, 623–656.

- Elementos básicos de un sistema de comunicación:

- Fuente de información: produce el mensaje
- Transmisor: transforma el mensaje para generar una señal que pueda ser enviada a través del canal
- Canal: medio por el que se envía la señal
- Receptor: transforma la señal de nuevo en el mensaje
- Destino: receptor del mensaje

## 2 Conceptos y terminología (III)

¿Cómo se transmiten los datos tanto si utilizas una conexión cableada o por el aire?



## 2 Conceptos y terminología (IV)

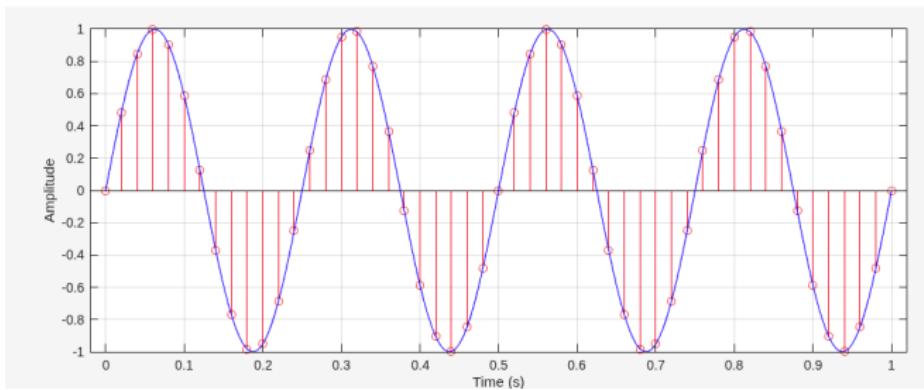


Los datos se transmiten como una *onda electromagnética* que se comporta de acuerdo a las ecuaciones de Maxwell. Las ondas electromagnéticas se componen de campos eléctricos y magnéticos que se caracterizan por:

- Frecuencia de portadora ( $f_c$ )
- Longitud de onda ( $\lambda$ )
- Velocidad de la luz.  $c = 3 \times 10^8$  m/s en el vacío
- Fase  $\theta$  en radianes
- Amplitud en voltios
- Potencia en watos (J/s)
- Energía (J) que es la potencia acumulada a lo largo del tiempo
- Ancho de banda (Hz) que es la porción del espectro que utiliza la información o datos que modula la onda

## 2 Conceptos y terminología (V)

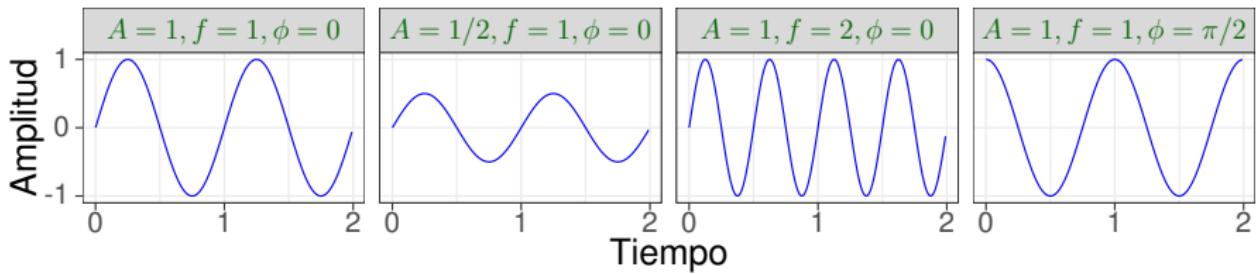
- Señal: función que transmite información
  - Continua:  $x(t)$  vs. discreta:  $x(kT)$
  - Periódica: se repite un patrón a lo largo del tiempo



## 2.1 Señales periódicas

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

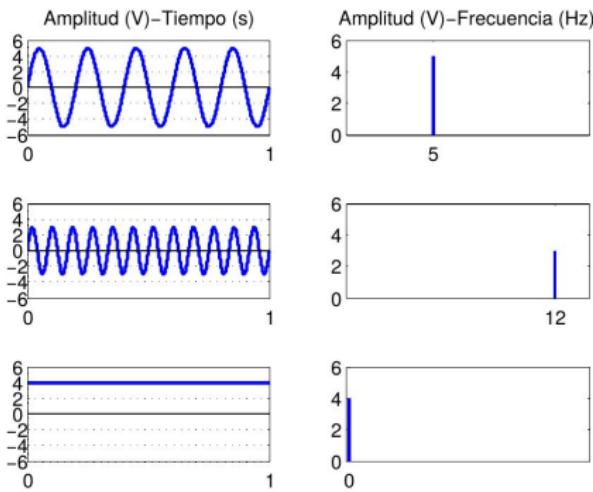
- *Amplitud de pico (A)*: valor máximo de la señal
- *Frecuencia (f)*: razón a la que se repite la señal, en Hercios (Hz) o ciclos por segundo (cps)
- *Periodo (1/f)*: tiempo transcurrido entre dos repeticiones consecutivas de la señal, en segundos (s)
- *Fase ( $\phi$ )*: posición relativa de la señal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



## 2.2 Análisis de Fourier

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

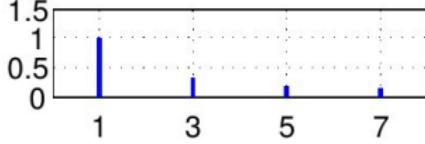
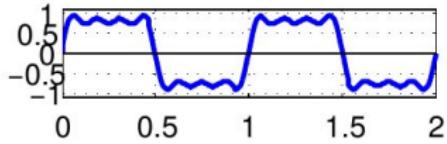
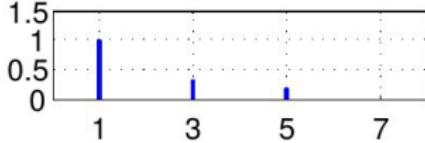
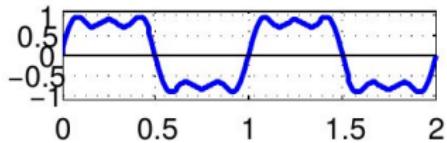
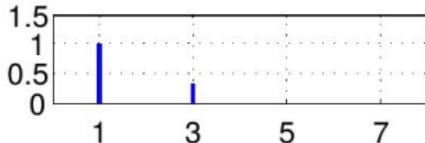
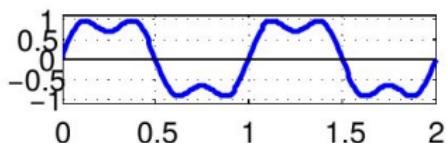
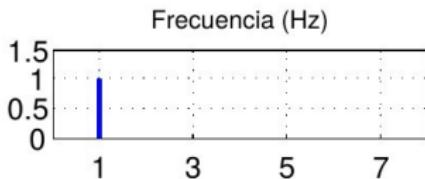
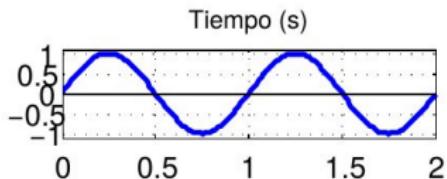
$$s(t) = \frac{1}{2}A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ A_n \cos(2\pi n f_0 t) + B_n \sin(2\pi n f_0 t) \right]$$



- Componente continua (DC): aquella con frecuencia cero

## 2.2 Análisis de Fourier (II)

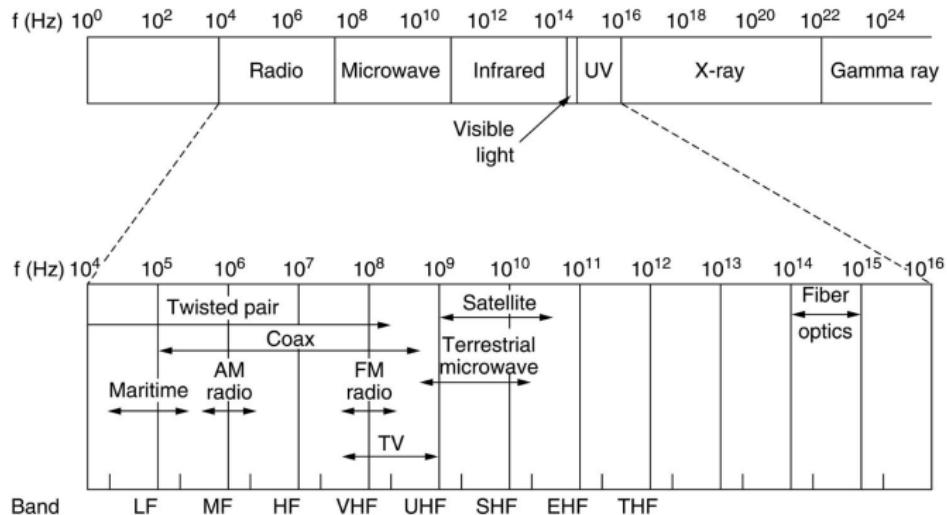
► Ejemplo: onda cuadrada



## 2.3 Espectro electromagnético



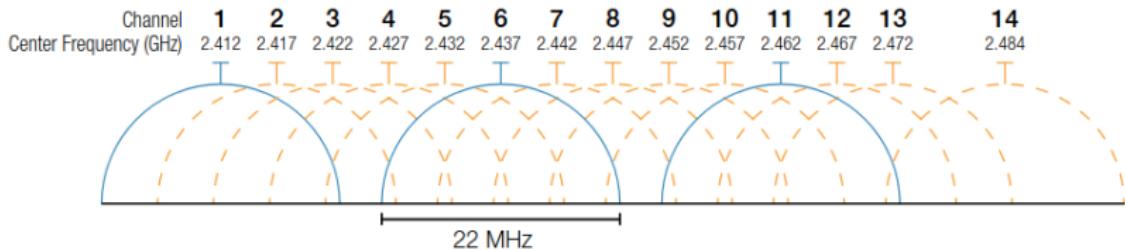
- El *espectro electromagnético* es la distribución energética del conjunto de ondas electromagnéticas



©Tanenbaum, Prentice Hall International

## 2.3 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 tradicional: 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.

- Cualquier sistema de transmisión sólo puede transmitir por una banda limitada de frecuencias
  - por limitaciones físicas/tecnológicas
  - por legislación vigente

## 2.4 Decibelio (dB)

---



- Los *decibelios* (dB) se usan para expresar la *relación* (logarítmica) entre dos valores  $P_1$  y  $P_2$ :

$$\frac{P_2}{P_1} \text{dB} = 10 \times \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right)$$

- Usos:
  - Ganancia/atenuación de un sistema
  - Relación entre potencia de señal y ruido
  - Expresión de potencias relativas
  - Cálculo de enlaces

## 2.4.1 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:

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

## 2.4.1 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

## 2.4.2 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 mínimo = 4 dB
- Ejemplo: calcula la SNR de un sistema con potencia de señal de 1000 mW y potencia de ruido de 1 mW:

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

## 2.4.3 Valores potencia relativos

- Medida de valores de potencia relativos a un valor dado:

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

- Ejemplo: la potencia típica de transmisión de WiFi en portátiles es 32 mW.

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

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

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

## 2.4.3 Valores potencia relativos (II)



- Comparación de valores de potencia en vatios y dBm

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

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

	EXCELENTE	BUENA	ACEPTABLE	MALA	SIN COBERTURA
3G	-70 dBm o más	De -71 a -85 dBm	De -86 a -100 dBm	De -101 a -109 dBm	-110 dBm o menos
4G / LTE	-90 dBm o más	De -91 a -105 dBm	De -106 a -110 dBm	De -111 a -119 dBm	-120 dBm o menos

## 2.4.3 Valores potencia relativos (III)



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  $P_s$ ?

## 2.4.3 Valores potencia relativos (IV)



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.

## 2.4.3 Valores potencia relativos (V)



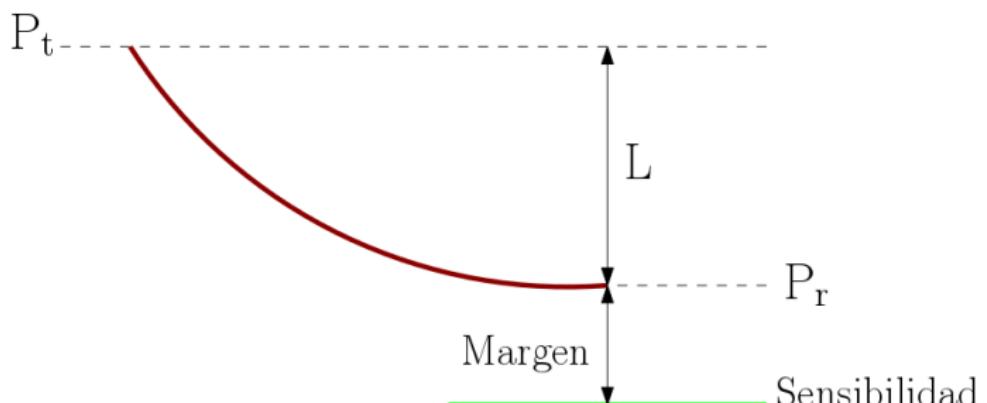
1474

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

✍ 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?

## 2.5 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

## 2.5 Cálculo de un enlace (II)

Un enlace LoRa tiene los siguientes parámetros:

- $P_t = 17 \text{ dBm}$
  - $S_r = -137 \text{ dBm}$
  - $f = 868.1 \text{ MHz}$  (frecuencia portadora)
- Calcula la atenuación máxima del enlace ( $L_{max}$ )
  - La atenuación  $L$  en el espacio libre viene dada por:

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

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

## 2.5 Cálculo de un enlace (III)

---



- *Link Budget*: cálculo de la potencia recibida en base a la potencia transmitida y todas las ganancias y pérdidas estimadas
- Atenuación en transmisión inalámbrica
  - Atenuación en el espacio libre
  - Atenuación debida a la aborcion de la atmósfera. Eg. a 3 GHz, la niebla atenúa 0.06 dB/km y la lluvia intensa 28 dB
  - Atenuación debida a obstáculos. Eg. pared de hormigón 22.792 dB a 2.4 Ghz y 44.769 dB a 5 GHz.
- Atenuación en el cable. Eg. LMR-400 21.7 - 22.2 dB/100m
  - Frecuencia
  - Longitud del cable
  - Diámetro
  - Calidad del material

## 2.5 Cálculo de un enlace (IV)

La hoja de características del módulo de Bluetooth Low Energy (BLE) de Texas Instruments CC2650MODA  indica los siguientes datos:

- $P_{TX} = 5\text{dBm}$
- $S_{RX} = -97\text{dBm}$  a 2 Mbps para una tasa de error en bit (BER de sus siglas en inglés: Bit Error Rate)  $1 \times 10^{-3}$
- $G_{TX} = G_{RX} = 1.26\text{dBi}$  ganancia de la antena integrada 1.26 dBi (i: isotropic)
- $L_{TXcable} = L_{RXcable} = 0\text{dB}$

Calcula el margen del enlace

### 3 Medios de transmisión

---



1474

Soporte a través del cual se propaga la señal transmitida

- Guiados o líneas de transmisión:

- Par trenzado
- Cable coaxial
- Fibra óptica

- No guiados (inalámbrico):

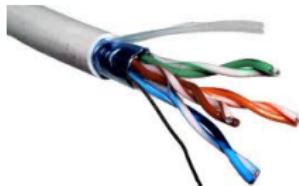
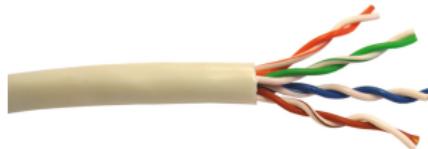
- Radiofrecuencia
- Infrarrojos (IrDA)
- Láser in Free-Space Optical

### 3.1 Par trenzado



1474

- Dos conductores: señal + referencia
- Cada cable está compuesto por una serie de pares trenzados (4, 25, 50, 100, 200 y 300)
- Se trenzan para reducir 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 ...
- Clasificación según prestaciones (ancho de banda, interferencias, pérdidas de propagación):
  - Cat. 5, cat. 6, cat. 6a, cat. 7, cat. 8.1, cat. 8.2

# 3.1 Par trenzado: tipos

The following are the types of cable recognised in the ISO/IEC 11801 standard.

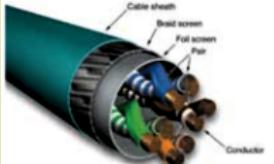
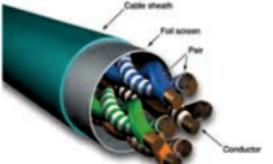
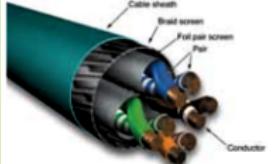
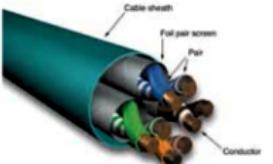
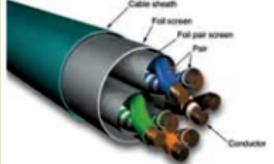
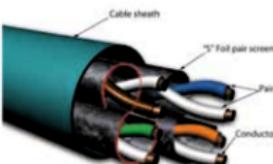
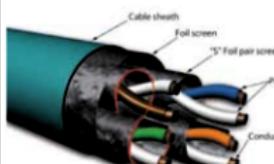
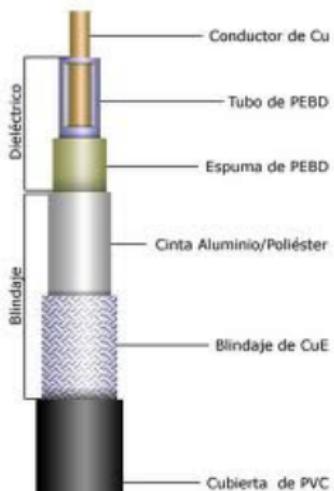
<b>U/UTP</b> Unscreened outer with unscreened twisted pairs		<b>SF/UTP</b> Screened braid and foil outer with unscreened twisted pairs	
<b>F/UTP</b> Screened foil outer with unscreened twisted pairs		<b>S/FTP</b> Screened braid outer with individual screened foil twisted pairs	
<b>U/FTP</b> Unscreened outer with individual screened foil twisted pairs		<b>F/FTP</b> Screened foil outer with individual screened foil twisted pairs	
<b>U/FTP</b> Unscreened outer with two sets of two pairs foil screened in "S" configuration		<b>F/FTP</b> Screened foil outer with two sets of two pairs foil screened in "S" configuration	

Figura: <https://electronics.stackexchange.com/questions/120737/>

## 3.2 Cable coaxial



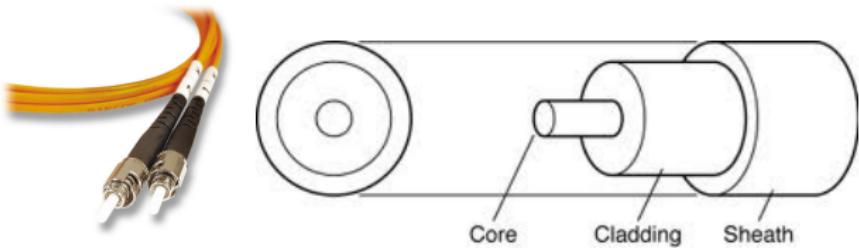
- Hilo conductor central de cobre rodeado por malla de hilos de cobre
- Conductores separados por plástico
- Puede estar apantallado
- Buen ancho de banda (1 GHz) y excelente inmunidad al ruido
- Coste elevado
- Está siendo sustituido por la fibra óptica
- Uso más común: TV y cableado final en accesos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



### 3.3 Fibra óptica



- Hilo muy 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
- La fuente de luz puede ser IDL (Injection Laser Diode) o LED (Light Emission Diode)
- En recepción se utilizan fotodiodos o fototransistores



### 3.3 Fibra óptica (II)

---



#### ► Ventajas

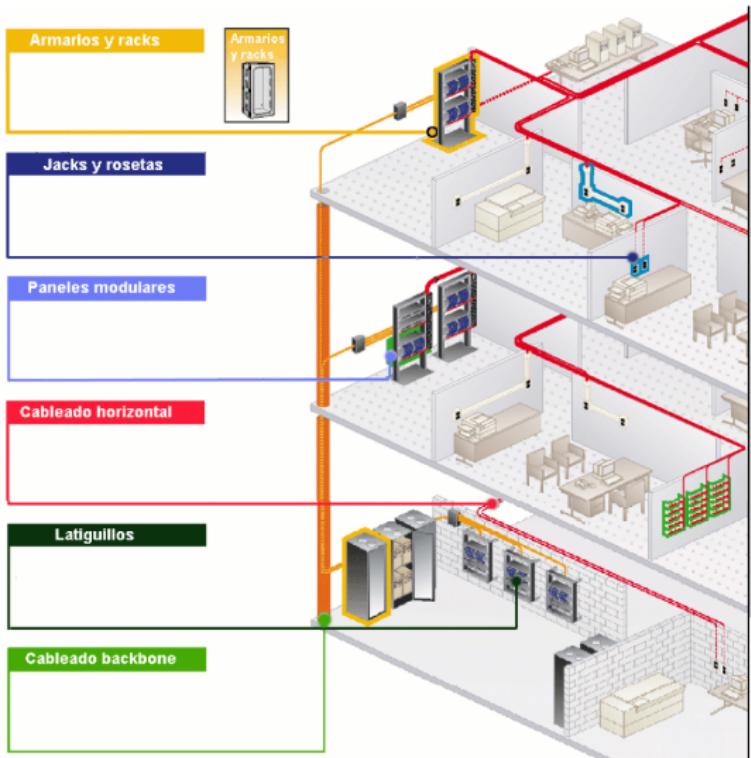
- Ancho de banda elevado (Gb/s)
- Baja atenuación → largas distancias
- Pequeñas dimensiones, flexibilidad, ligereza
- Inmunidad total a perturbaciones electromagnéticas
- Seguridad: no emite radiaciones y es difícil de "pinchar"
- Resistencia mecánica, calor, corrosión

#### ► Desventajas

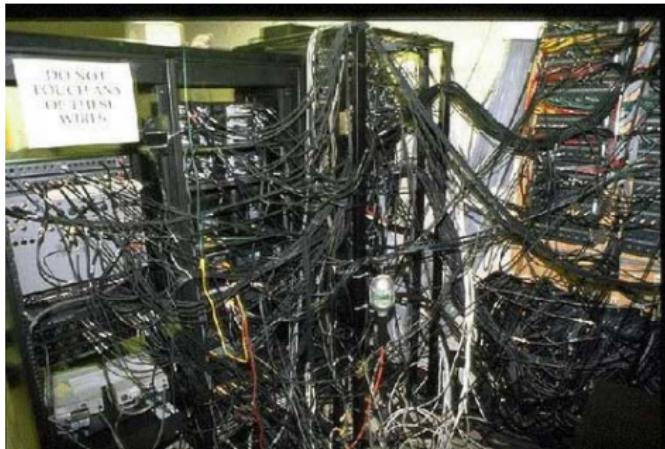
- Fragilidad de las fibras
- Emisores y receptores caros
- Velocidad condicionada por la electrónica de emisión y recepción (10 Gb/s)
- No pueden transmitir electricidad para alimentar receptores o repetidores
- Empalmes difíciles de realizar en campo

# 3.4 Cableado estructurado

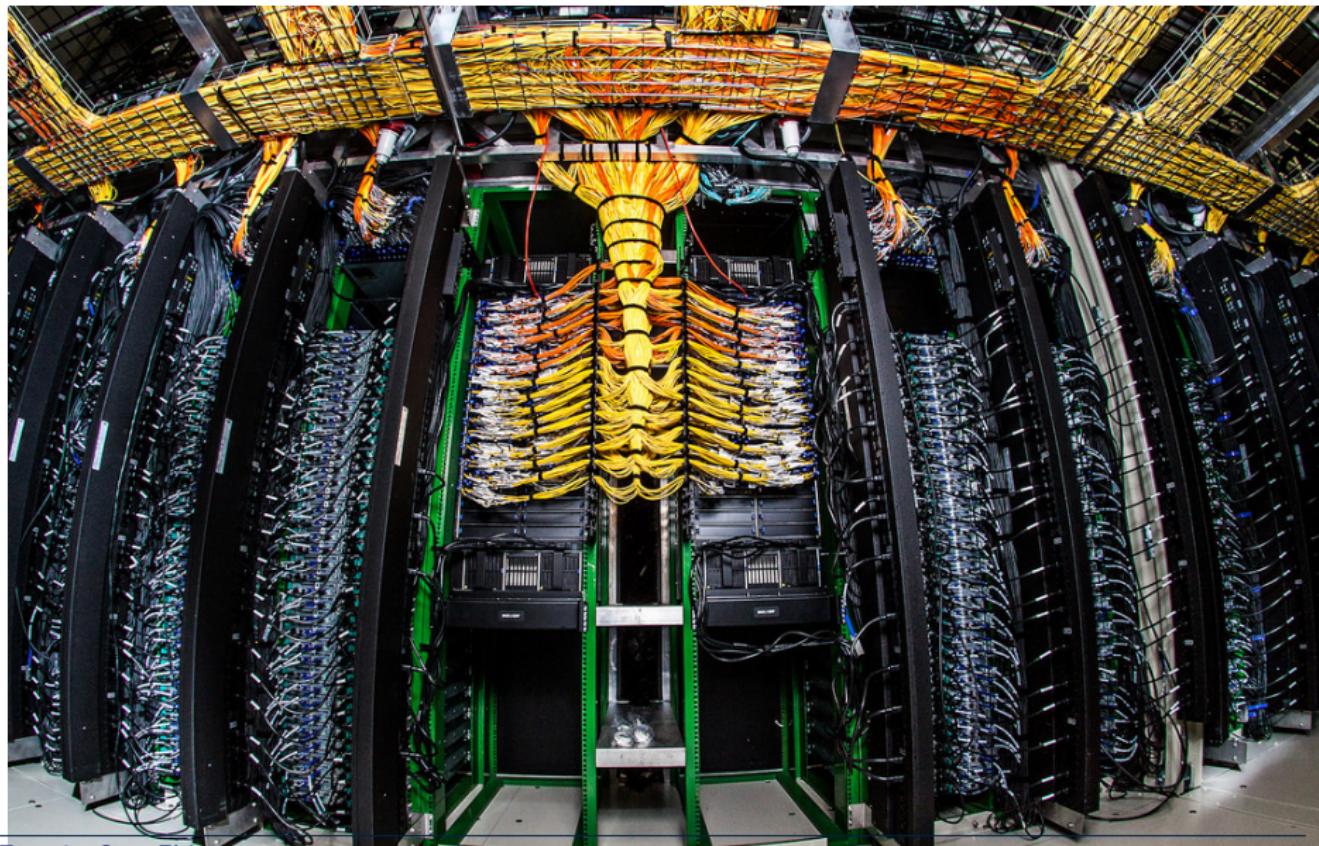
- Objetivo: optimizar gestión y mantenimiento
- División en tramos estructurados: cabl. horizontal + vertical



## 3.4 Cableado estructurado (II)



## 3.4 Cableado estructurado (III)



### 3.5 Comunicaciones inalámbricas

---

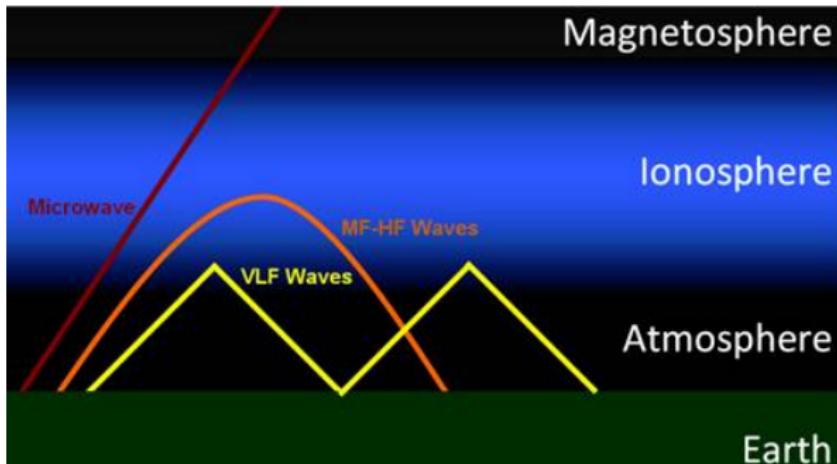


- International Telecommunication Union (ITU) y organismos de regulación locales establecen:
  - Banda de frecuencias
  - La división en canales de la banda
  - Las frecuencias dentro de cada canal
  - $P_{dB_{TX}}$
  - La potencia fuera del canal
  - El procedimiento para obtener la regulación
- ISM (Industrial, Scientific and Medical)-Unlisenced Band .  
E.g. (2.4-2.5 GHz)

### 3.5 Comunicaciones inalámbricas (II)



- Rango de frecuencias usado en radiocomunicaciones (20 kHz - 300 GHz):
  - Ondas de radio (30 MHz - 1 GHz)
    - Low-Power Wide-Area Networks (LPWANs)
  - Microondas terrestre (2 - 40 GHz)
    - Wi-Fi y LTE/3G/4G/5G
  - Microondas satélite (2 - 40 GHz)



# 3.5 Comunicaciones inalámbricas (III)

- FSO (Free Space Optics) para conectividad en la “Last mile” en la banda del infrarrojo (300 GHz, 400 THz)

## CENTAURI - REPLACING FIBER UNDERGROUND



10Gbps

Full Duplex Consistent  
Data Rate



Impossible to Hack  
or Jam

3 km

Reliably under Equatorial  
Region P rain conditions



Zero Spectrum  
costs (plug-n-play)



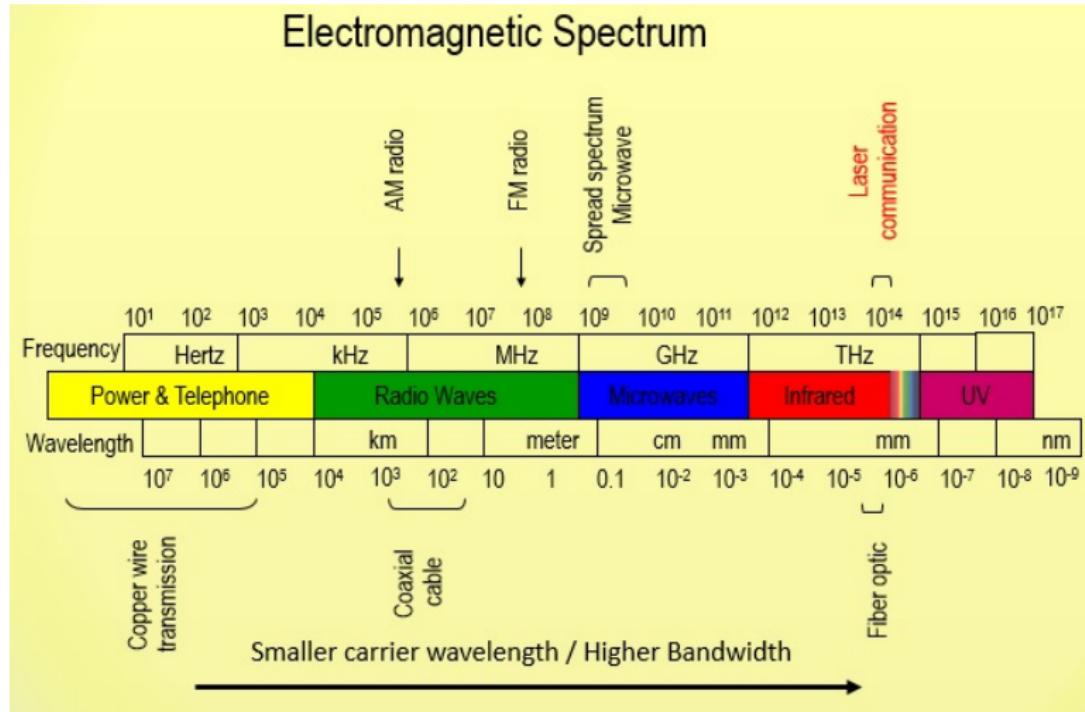
Fast installation  
in 1-4 hours



1-Person  
installation



# 3.6 Resumen



### 3.7 Velocidad de propagación



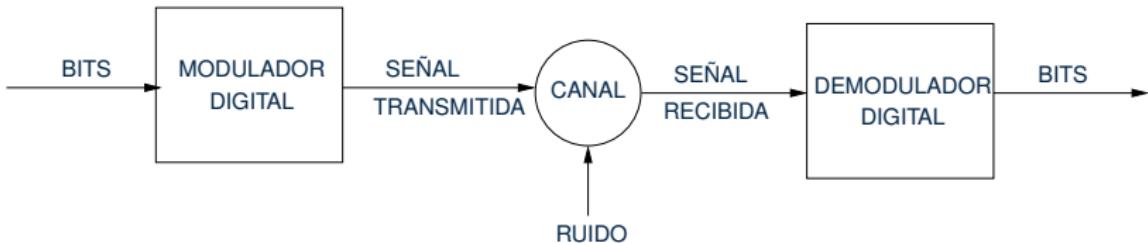
- $V_p$ : velocidad a la que una onda electromagnética viaja a través de un medio
- Factor de velocidad,  $VF$ : relación entre las velocidades de una onda EM en un medio y en el vacío

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

☞ 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

- Bloques básicos de un sistema de comunicaciones digitales:



- Señal transmitida/recibida:

- *Señal analógica*: continua que varía suavemente en el tiempo para representar la información
- *Señal digital*: representa los datos utilizando una secuencia discreta de valores

## 4 Transmisión digital (II)

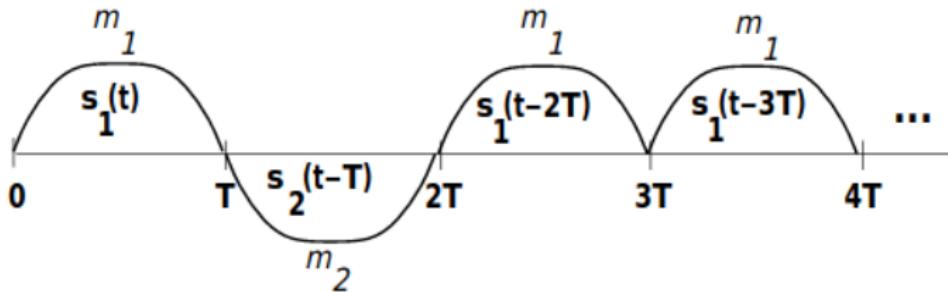
---



- 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 Wi-Fi por el aire.

## 4.1 Símbolos y bits

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



Fuente: A. Goldsmith. Wireless communications. Stanford University, 2004.

- *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)

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

## 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)

- Relación entre  $R_b$  y  $R_s$

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

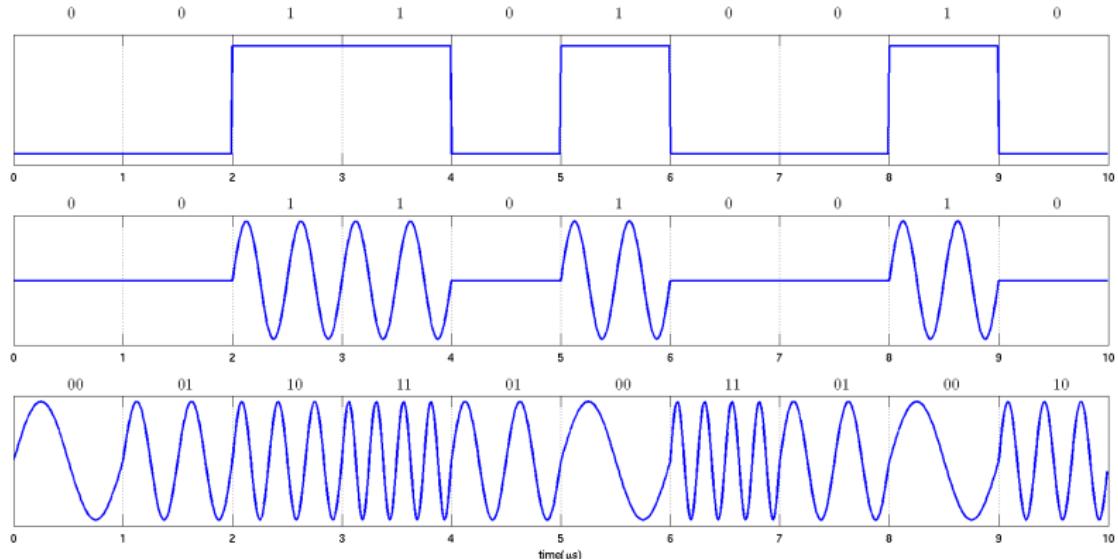
- $k = 1$  bit/símbolo  $\rightarrow R_b = R_s$
- $k = 2$  bits/símbolo  $\rightarrow R_b = 2 \cdot R_s$

- Algunos valores

- Red L1.02: 1 Gbps
- FFTH (fiber to the home): 100 Mbps - 1 Gbps
- Wi-Fi 802.11b/g/n: hasta 300 Mbps

## 4.3 Tasa de bits (II)

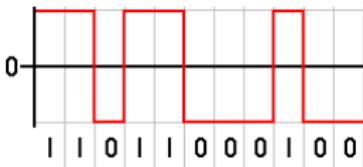
✍ Asumiendo que el tiempo de símbolo es  $1 \mu\text{s}$ , calcula la tasa de símbolos y la tasa de bits de las siguientes señales moduladas (PCM-ASK-FSK). Indica asimismo el número de símbolos  $M$ .



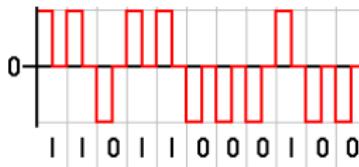
## 4.4 Modulación por pulsos



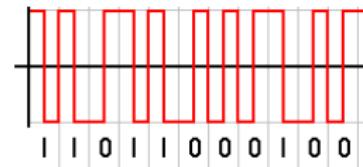
- Pulse Code Modulation (PCM)
- Los bits se transforman en formas de onda pulsadas que se transmiten por un canal banda base
- Características de las formas de onda o códigos de línea:
  - Nonreturn-to-zero (NRZ) / Return-to-zero (RZ)
  - Unipolar / Bipolar
  - Phase encoded
  - Multilevel binary



NRZ



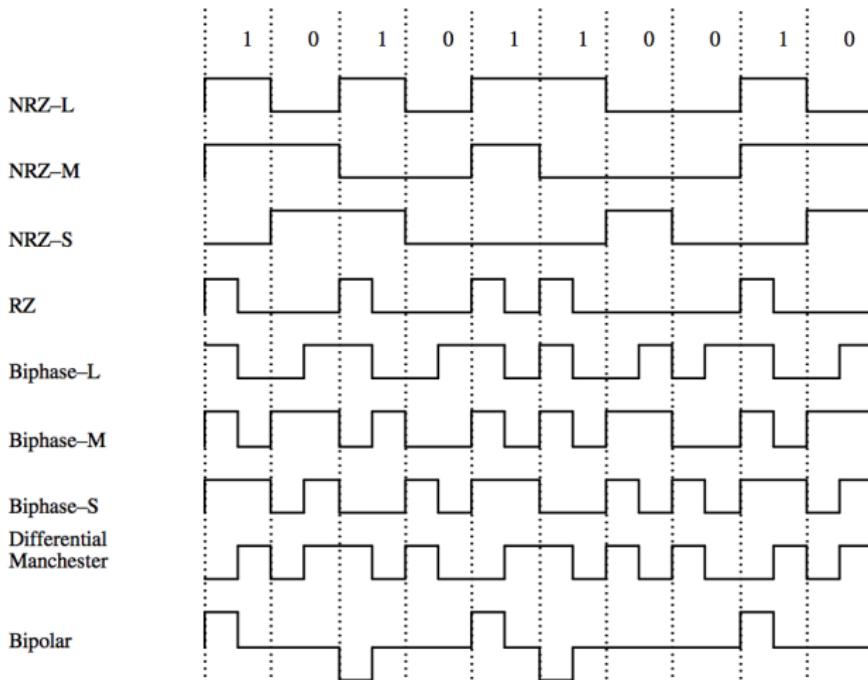
RZ



Phase encoded

## 4.4 Modulación por pulsos (II)

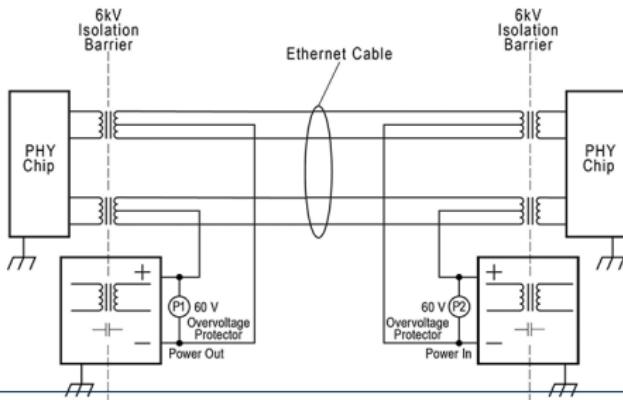
### ► Codificaciones más usadas:



Fuente: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=47007673>

## 4.4 Modulación por pulsos (III)

- NRZ-L, por nivel:  $0 \equiv V^-$ ,  $1 \equiv V^+$
- NRZ-M, diferencial:  $0$  mantiene  $V$ ,  $1$  cambia  $V$
- RZ: transición a  $0V$  durante el pulso
- 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  $V^{+/-}$



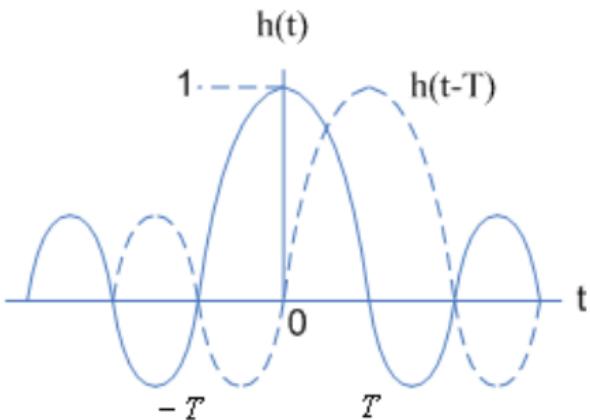
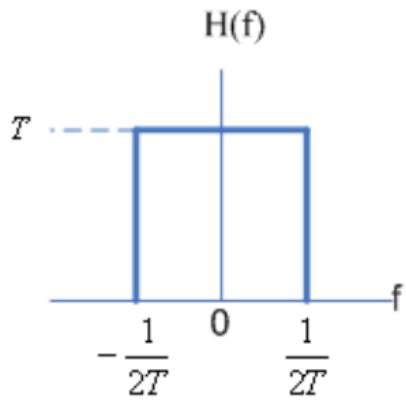
## 4.4 Modulación por pulsos (IV)



- ¿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
  - Inversión de polaridad del cable

## 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  $Rs/2$  Hz  $\rightarrow B \geq Rs/2$



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



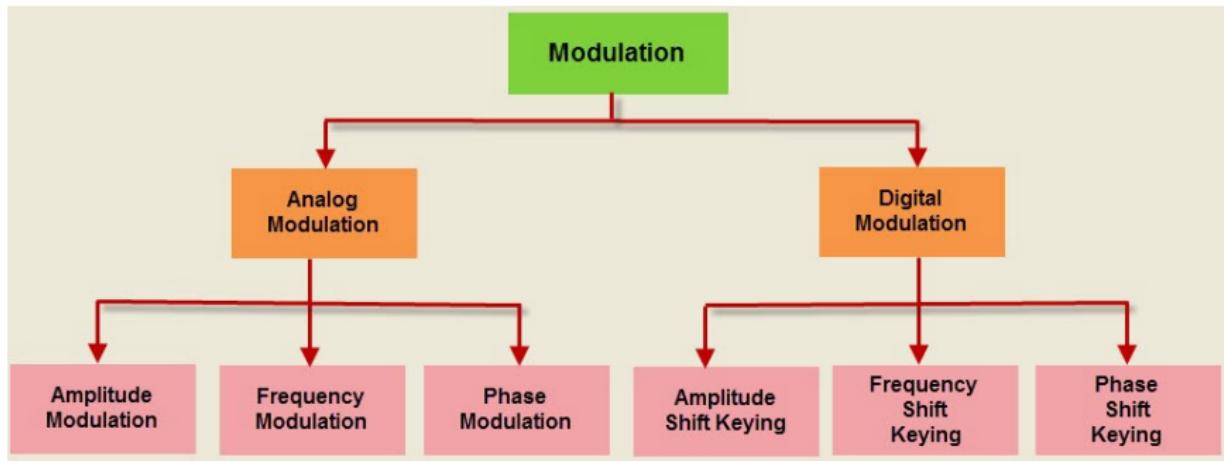
- Proceso por el que la amplitud, frecuencia o fase de una portadora varía según la información a transmitir

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

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



## 4.5.1 Modulación analógica vs. digital



## 4.5.2 ASK (amplitude shift keying)

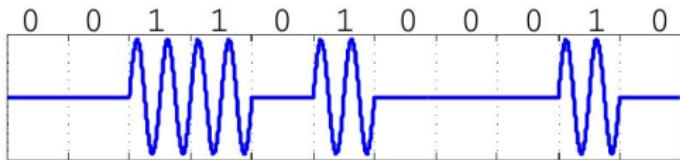


- Los símbolos se representan mediante diferentes amplitudes ( $A_i$ ) de la portadora:

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

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

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



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

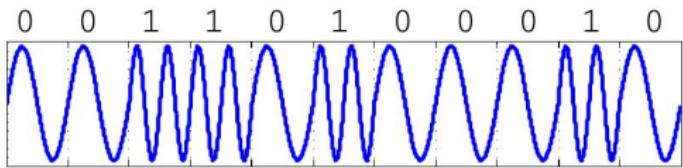
## 4.5.3 FSK (frequency shift keying)

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

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

- ▶ 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 utiliza en telefonía digital para identificación de llamada

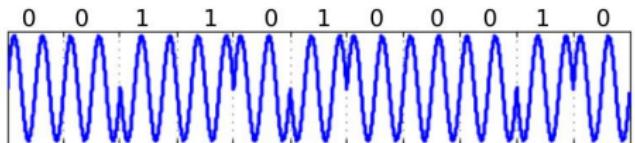
## 4.5.4 PSK (phase shift keying)

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

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

- ▶ 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): la fase depende del anterior símbolo transmitido
- ▶ Amplio uso: 802.11b, Bluetooth, Zigbee, sonda espacial New Horizons ...

## 4.5.5 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

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

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

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

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

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

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

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

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

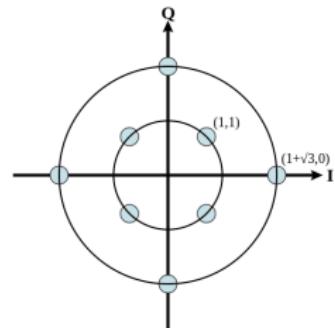
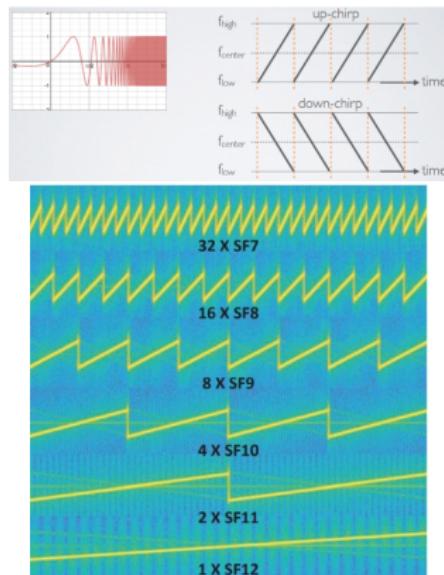


Diagrama de constelación  
Fuente: Life of Riley

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

## 4.5.6 CSS (chirp spread spectrum)

- Propietaria de LoRa (IoT)
- La frecuencia de la portadora crece (1) o decrece (0) en un determinado tiempo
- Inmunidad frente al ruido, largo alcance



## 4.5.6 Ejercicio



Un módem 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:

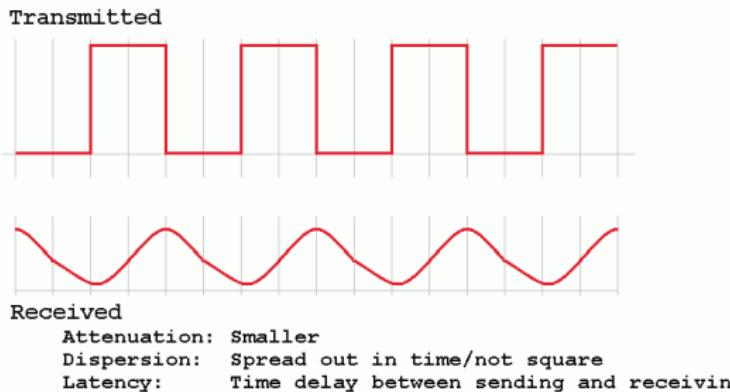
- ¿Cuántos bits de información transporta cada símbolo?
- ¿Cuántos símbolos distintos ( $M$ ) genera el módem?
- ¿Qué ancho banda necesita?
- Si la portadora es  $f_p = 1800$  Hz, ¿cuál es la frecuencia inferior de corte? ¿Y la superior?

# 5.1 Perturbaciones en la transmisión



Cualquier canal tiene perturbaciones:

- **Atenuación:** pérdida de energía de la señal al propagarse
  - Espacio libre
  - Absorción en la atmósfera: agua, niebla ...
  - Absorción debida a obstáculos: puertas, paredes ...
- **Distorsión de retardo:** distintas frecuencias viajan a distintas velocidades (medios dispersivos)



## 5.1 Perturbaciones en la transmisión (II)



1474

- *Ruido*: señales insertadas entre emisor y receptor
  - Ruido térmico: agitación de los electrones
  - Intermodulación: varias frecuencias en el mismo medio
  - Diafonía (cable): acoplamiento entre líneas
  - Ruido impulsivo: pulsos cortos e irregulares
  - Multipath (inalámbrico): reflexiones retardadas de la señal

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

- El tipo de modulación, el número de símbolos  $M$  y su 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  $B$ .

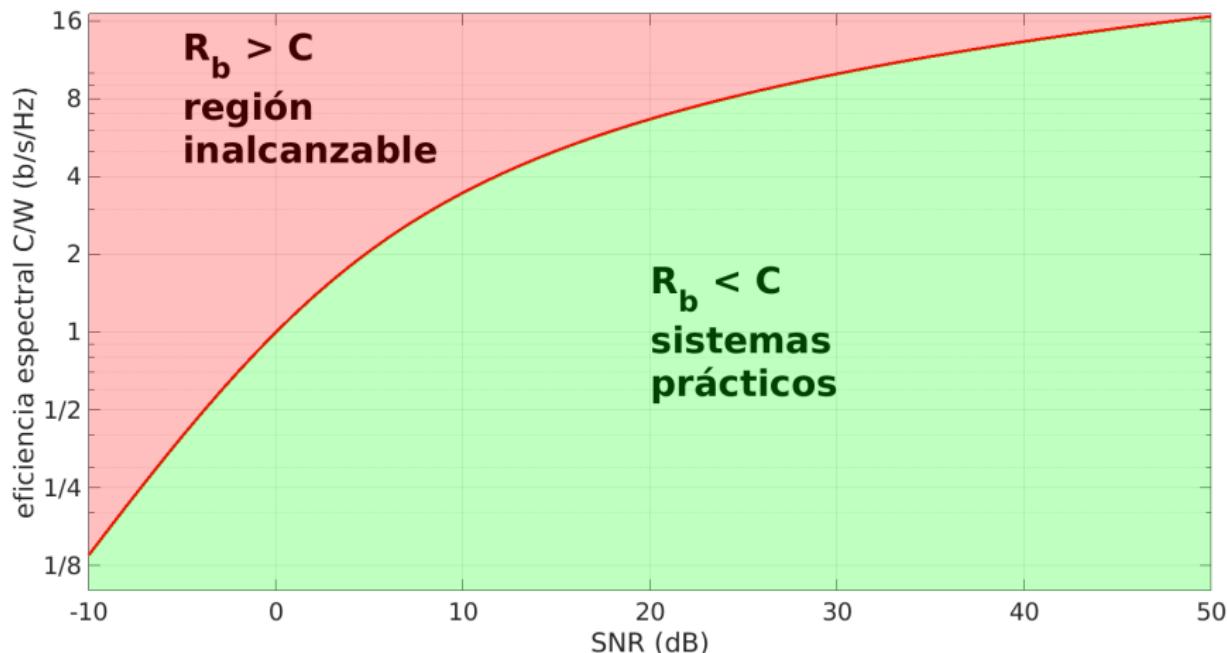
$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

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)

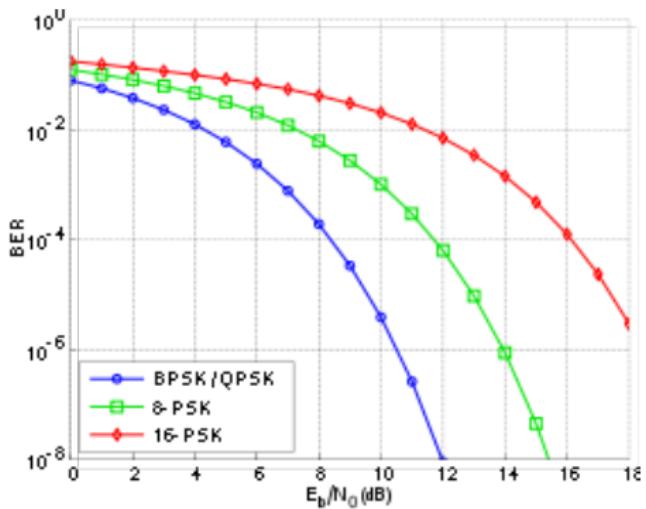


1474

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

## 5.3 BER: probabilidad de error de bit

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



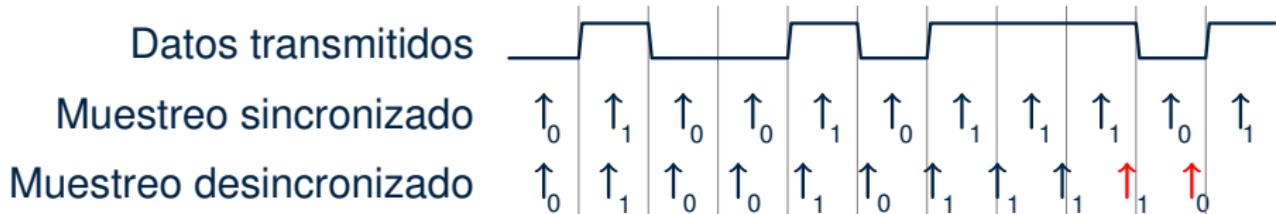
💡 Considera un canal con  $B = 3$  kHz,  $\text{SNR} = 12$  dB por el que se transmite una señal BPSK a 3000 bps. Calcula la probabilidad de error de bit (BER).

Nota:  $E_b/N_0 = (S/N) \cdot (B/R_b)$ .

# 6 Sincronismo

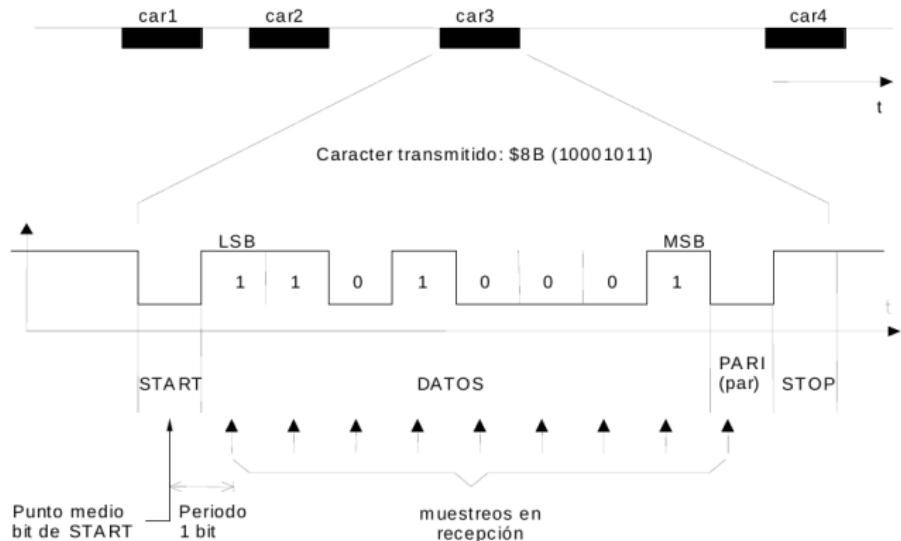


- El receptor debe saber en qué momento:
  - empieza/acaba cada bloque de datos (trama)
  - muestrear cada bit (símbolo)
- Alta velocidad → relojes con precisión de  $\mu\text{s}/\text{ns}$
- Todos los relojes se atrasan/adelantan → la precisión requerida no se puede garantizar durante mucho tiempo
- 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)

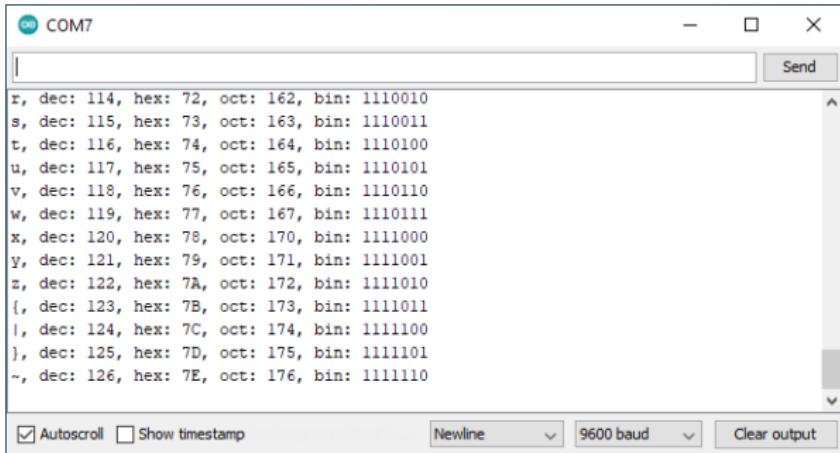
Se especifica:

- 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		

# 6.1 Transmisión asíncrona (III)

- Eg. Arduino: UART+USB-to-serial chip+Virtual COM port+serial monitor. 9600/8N1



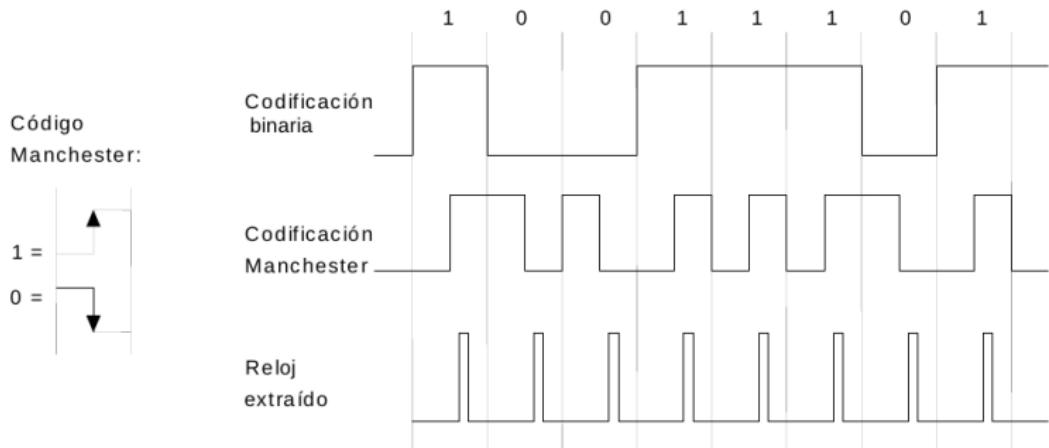
The screenshot shows a serial monitor window titled "COM7". The main area displays a list of characters with their corresponding numerical values in decimal, hex, octal, and binary formats. The characters listed are r, s, t, u, v, w, x, y, z, {, }, ], and ~. The window includes standard controls like minimize, maximize, and close buttons, and a "Send" button. At the bottom, there are checkboxes for "Autoscroll" and "Show timestamp", a "Newline" dropdown set to "Newline", a "9600 baud" dropdown, and a "Clear output" button.

Character	dec:	hex:	oct:	bin:
r	114	72	162	1110010
s	115	73	163	1110011
t	116	74	164	1110100
u	117	75	165	1110101
v	118	76	166	1110110
w	119	77	167	1110111
x	120	78	170	1111000
y	121	79	171	1111001
z	122	7A	172	1111010
{	123	7B	173	1111011
}	124	7C	174	1111100
]	125	7D	175	1111101
~	126	7E	176	1111110

## 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 empotra en la señal de datos
  - Por ej., Manchester codifica una transición a mitad de bit



## 6.2 Transmisión síncrona (II)

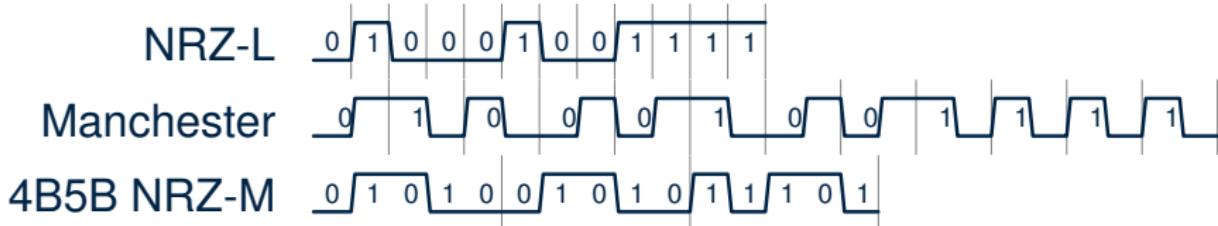


- Codificaciones sin información de reloj: códigos de sustitución garantizan transiciones: 4B5B, B8ZS, HDB3

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

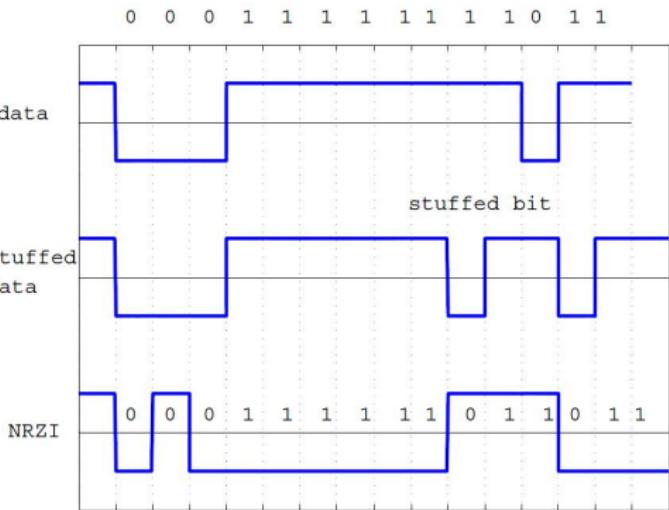
- Ejemplo NRZ-L (no sincronizable), Manchester, 4B5B sobre NRZ-M (Ethernet 100 Mb/s), todos con misma tasa de símbolos



## 6.2 Transmisión síncrona (III)

- *Inserción de bits (bit stuffing):* dos aplicaciones
  - El número consecutivo de bits del mismo valor se limita insertando un bit del valor opuesto
  - Para que los datos de una trama no contengan la secuencia delimitadora de la misma

Se utiliza en USB (Universal Serial Bus) o HDLC (High-Level Data Link Control):  
Emisor 111111 → 1111110  
Receptor 1111110 → 1111111  
(NRZI: NRZ-M invertido)



# 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)

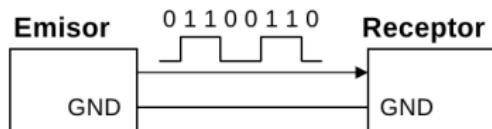


**Serie:** las señales de múltiples bits se transmiten en el mismo canal *secuencialmente*

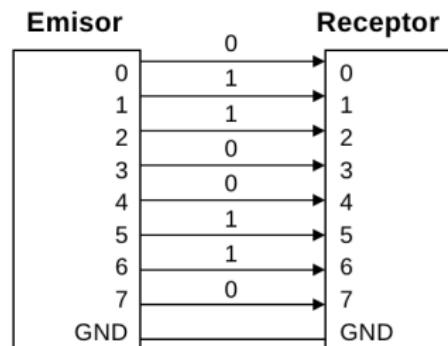
- Mínimo dos cables: señal y referencia

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

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



Transmisión serie



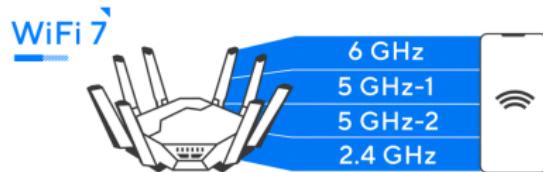
Transmisión paralelo

# 7 Modos de transmisión (III)



**Transmisión:** tanto la transmisión *serie* como la *paralela* pueden realizarse de forma *síncrona* o *asíncrona*

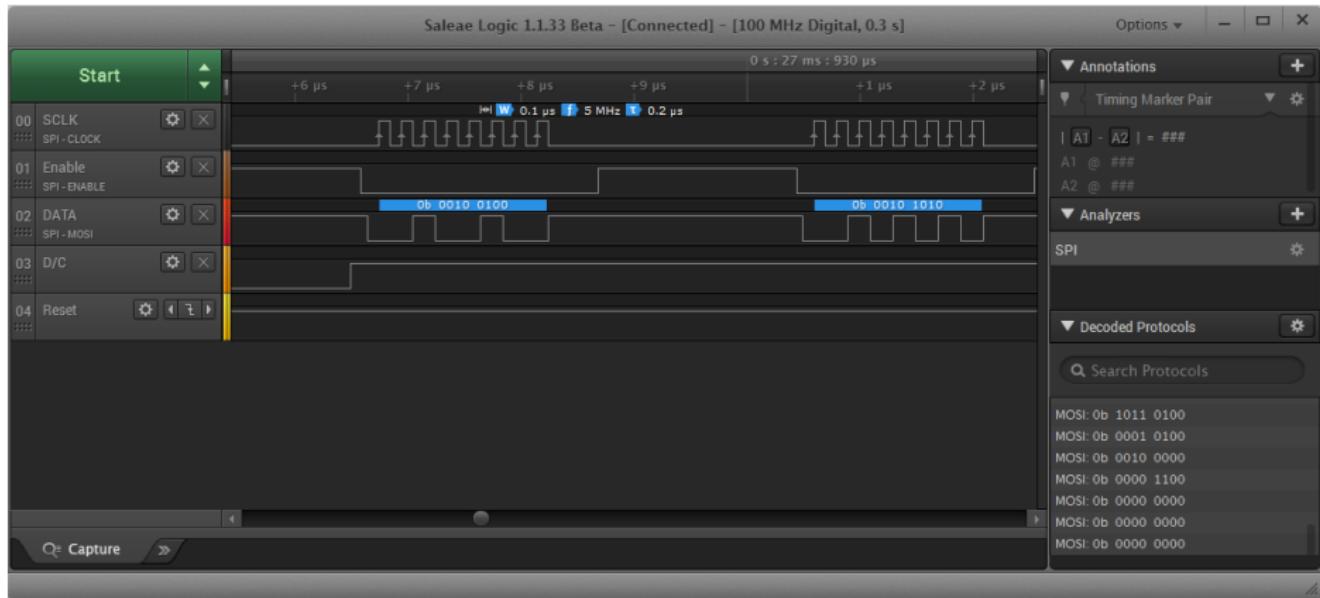
- Serie:
  - Síncrono: Ethernet, CAN, I2C, JTAG, USB, SPI
  - Asíncrono: UART, RS-232, SCI, Virtual COM port (USB-to-serial adapter)
- Paralelo síncrono: PCI, PCIe, PATA (Parallel ATA)



# 7 Modos de transmisión (IV)



- Logic Analyzer: hardware + virtual COM port+serial monitor + logic analyzer software



# 8 Conclusiones

