

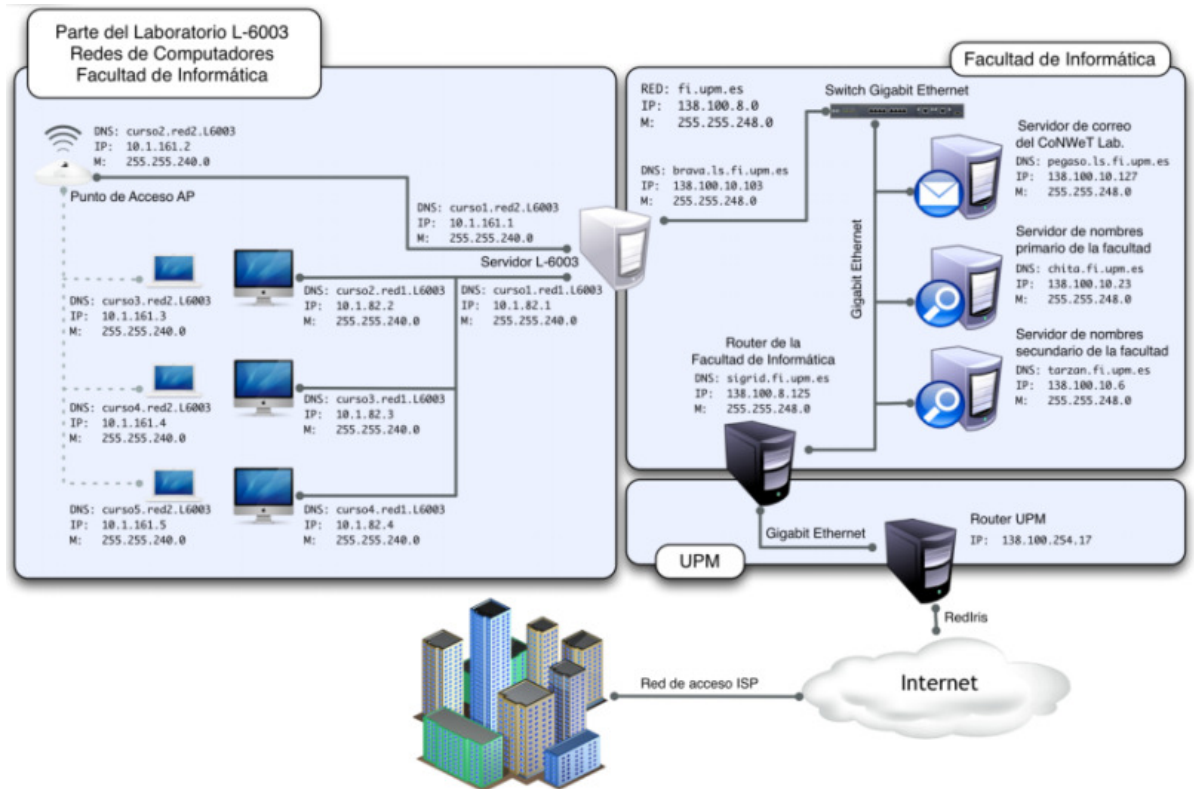
## **Introducción. Conceptos de red.**

- 1. Conceptos básicos de transmisión de datos:** conceptos fundamentales.
  - a. Redes
  - b. Arquitectura
  - c. Datos y señales
  - d. Representación espectral
  - e. Ancho de banda
  - f. Relación entre ancho de banda y velocidad
  - g. Velocidad de transmisión-Velocidad de señalización
  - h. Tipo de transmisión: simplex, semidúplex y dúplex
- 2. Medios de transmisión. Capacidad de un canal:**
  - a. Medios de transmisión
  - b. Perturbaciones
    - i. Atenuación
    - ii. Ruido
  - c. Capacidad de un canal
    - i. Teorema de Nyquist
    - ii. Teorema de Shannon
- 3. Técnicas de transmisión:** cómo se transmite la información a través de una red
  - a. Transmisión analógica y transmisión digital
  - b. Codificaciones digitales
    - i. Unipolar, polar y bipolar
    - ii. Con retorno a cero y sin retorno a cero
    - iii. Manchester y Manchester diferencial
    - iv. Codificación en bloques
    - v. Esquemas multinivel mBnL
  - c. Transmisión digital
    - i. Modulación MIC
    - ii. Digitalización de la voz
  - d. Transmisión analógica. Modulaciones
    - i. Modulaciones digitales
    - ii. Modulaciones multinivel
- 4. Distribución de Ancho de Banda:**
  - a. Multiplexación
    - i. Multiplexación por división en frecuencia (MDF/FDM)
    - ii. Multiplexación por división en el tiempo (MDT/TDM)
    - iii. Multiplexación por división en longitud de onda (MDLO/WDM)
    - iv. Fibra óptica
  - b. Espectro expandido
- 5. Técnicas de comunicación de datos:**
  - a. Control de errores

### **1. Conceptos básicos de transmisión de datos:**

Para mover información (bits/datos) entre máquinas, se utilizarán señales electromagnéticas y medios de transmisión.

## a. Redes:

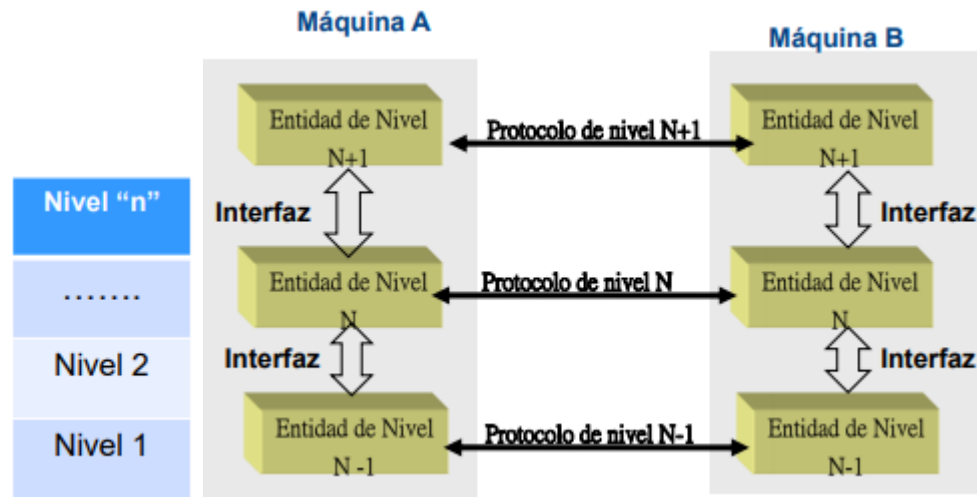


Para que dos sistemas compartan información, deben “hablar el mismo idioma”. Ese “idioma” es el **protocolo**: conjunto de reglas que rigen una comunicación entre sistemas.

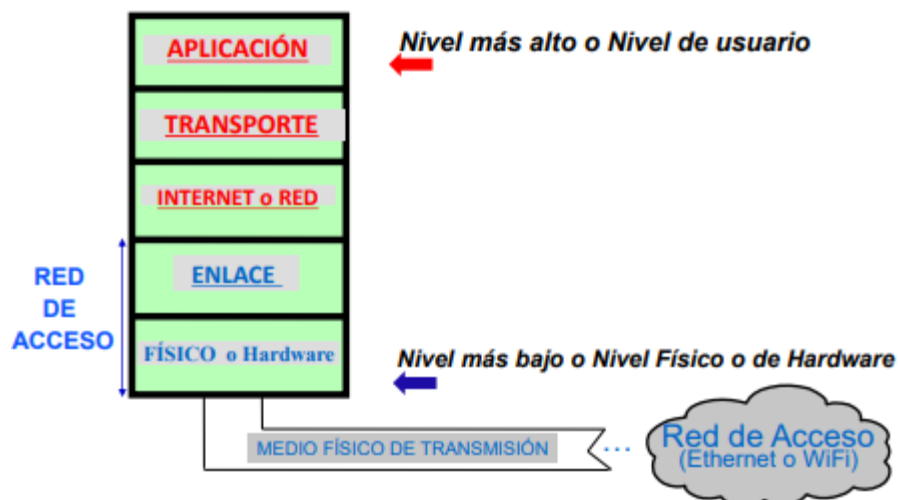
- i. **Sistema o equipo:** cualquier dispositivo conectado a una red direccionable capaz de hablar con el mismo idioma con otros sistemas o equipos conectados a la red, mediante mensajes que pertenecen a un conjunto de protocolos.
  1. **Sistemas finales:** los que transmiten y reciben la información.
    - a. Origen y destino: situados en los extremos de una comunicación.
  2. **Sistemas intermedios:** se ocupan de encaminar la información dentro de una red.
  3. Los sistemas finales e intermedios deben compartir un protocolo y un formato de direccionamiento comunes al comunicarse.
- ii. **Red:** medio físico de comunicación y compartición de recursos de información y computación entre equipos.
  1. **Dirección de red:** identificador de cada dispositivo conectado en red.
  2. **Redes de Comunicaciones (redes físicas):** permiten conectar directamente a los equipos de usuarios. Por ejemplo, red de cable Ethernet o una red inalámbrica WiFi.
  3. **Redes de Computadoras (redes abstractas):** redes lógicas o virtuales, formadas por un número indeterminado de redes de comunicaciones. Es un conjunto de redes físicas unidas por router.
    - a. **Internet:** inmensa red de computadores con tecnología TCP/IP y formato IP de direccionamiento común.

## b. Arquitectura:

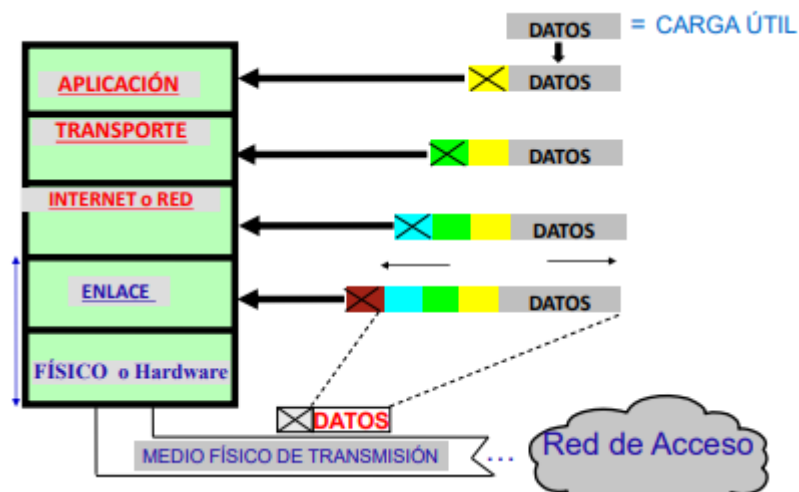
- i. **Arquitectura de Comunicaciones:** conjunto de protocolos de comunicaciones que se ejecutan de forma independiente en diferentes niveles, exceptuando el nivel físico.  
Resuelve el problema de la comunicación entre ordenadores estructurando el software en **niveles (1, 2, ..., n)**:



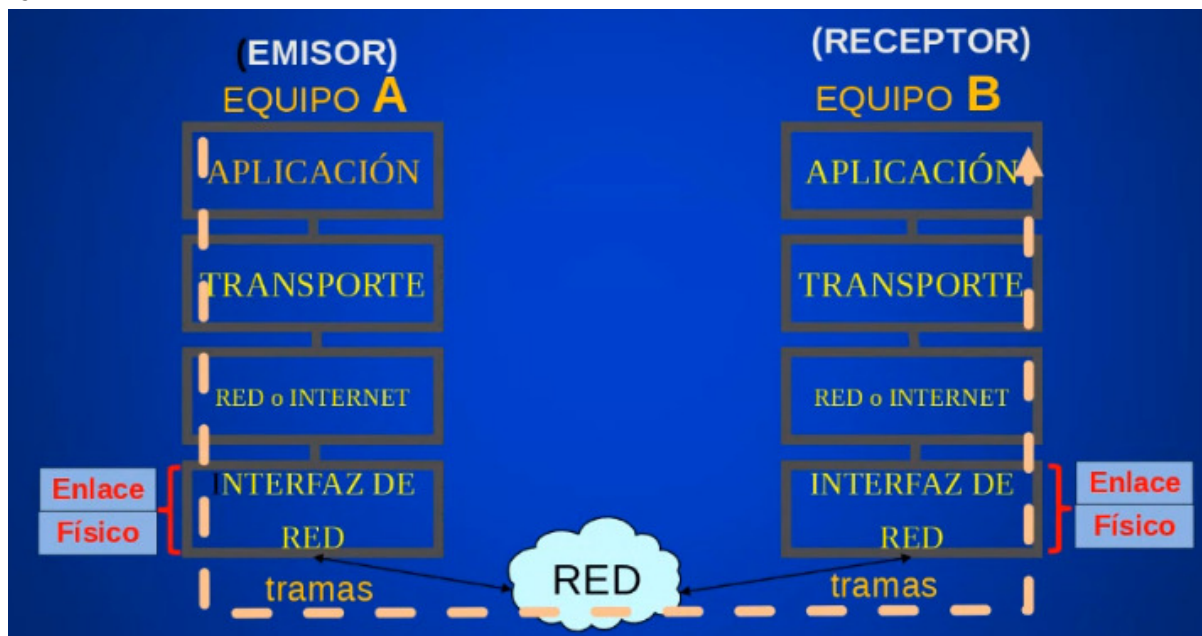
1. Al ser una estructura más comprensible en diferentes niveles de comunicaciones mutuamente independientes, reduce la complejidad del desarrollo y favorece la labor de diseño.
  2. Al ser niveles mutuamente independientes, facilita el cambio tecnológico porque los cambios realizados en un nivel no afectan al resto de niveles.
- ii. **Protocolo de comunicaciones:** conjunto de reglas que definen el **formato y orden de los paquetes de datos** intercambiados entre dos **entidades pares** (dos procesos iguales ejecutándose en equipos diferentes y manejando el mismo protocolo), así como las **acciones** que tienen que llevar a cabo dichas entidades pares para proporcionar un determinado **servicio**.
- iii. **Interfaz:** conjunto de reglas que controlan la interacción entre entidades de niveles contiguos en el mismo sistema.
- iv. **Arquitectura estructurada en 5 niveles de comunicaciones:**



v. **Arquitectura TCP/IP:** niveles y unidades de datos.



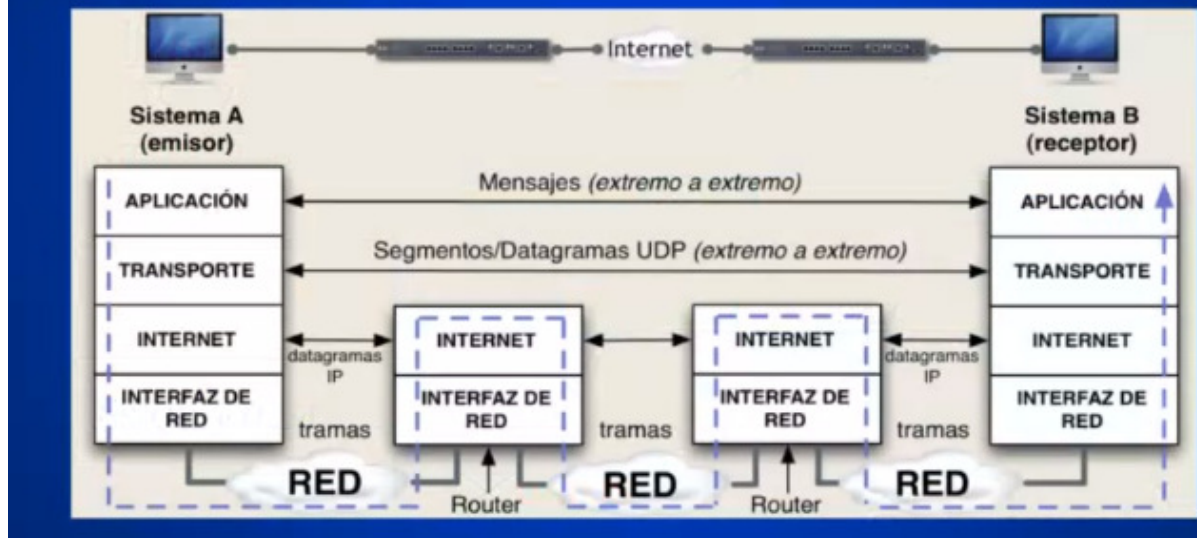
vi. **Ejemplo:** comunicación entre niveles de equipos vecinos



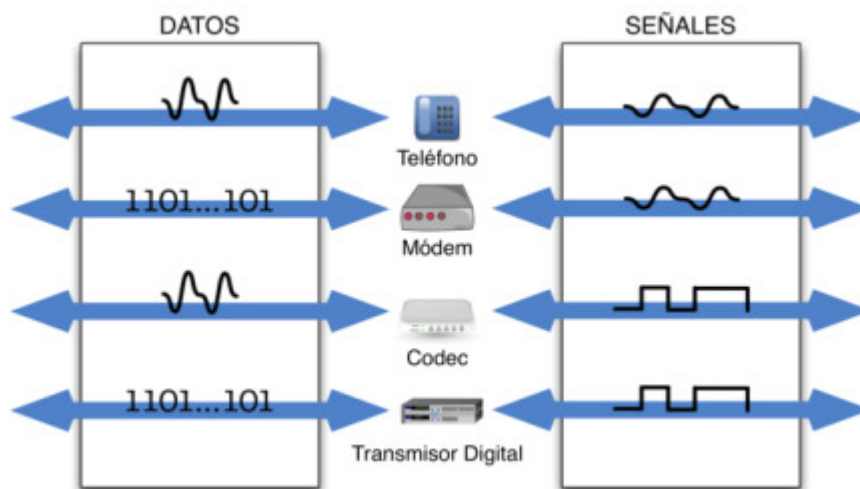
1. El nivel de aplicación le pide un servicio al nivel de transporte, este nivel al de red o internet, este al de interfaz de red, ... y en el equipo B sube de interfaz de red a aplicación para entregar la información.

- vii. **Ejemplo:** comunicación entre sistemas no vecinos (vía *routers*).

- Los *routers* implementan el protocolo IP

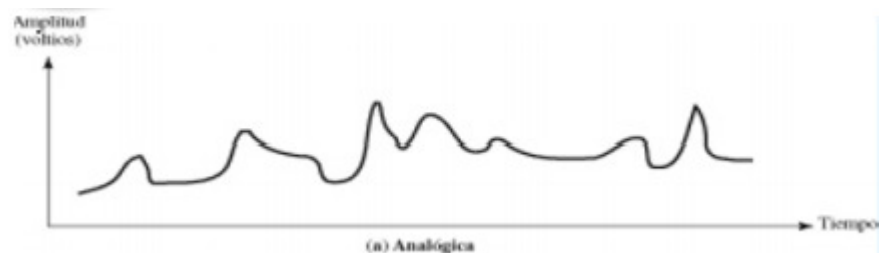


c. Datos y señales:



Siempre se va a necesitar una conversión entre datos y señales, aunque ambos sean analógicos o ambos sean digitales. Por ejemplo, se necesitará complementar un dato digital con información de sincronismo para construir la señal digital.

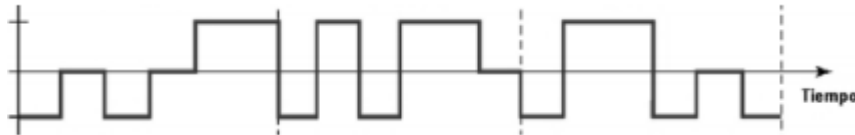
- Datos analógicos:** toman valores dentro de un intervalo continuo.
- Datos digitales:** toman valores discretos (por ejemplo, 0/1).
- Señal analógica:** toma valores dentro de un intervalo continuo.



- iv. **Señal digital (binaria):** toma únicamente dos valores discretos.

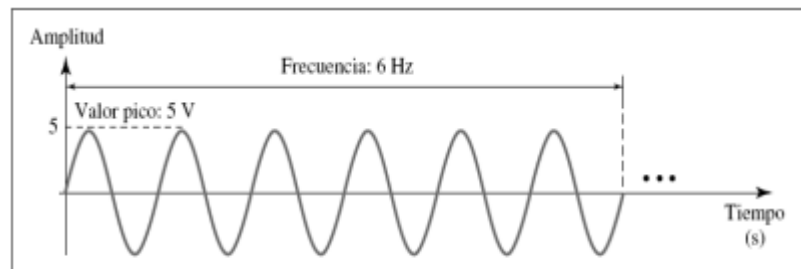


- v. **Señal digital (multinivel):** toma un número finito de valores discretos.



d. **Representación espectral:**

- i. **Dominio del tiempo:**

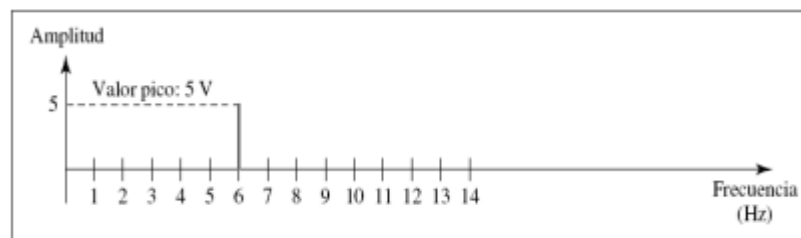


a. Una onda seno en el dominio del tiempo (valor pico: 5 V, frecuencia: 6 Hz)

$$T = 1/f; T = 166,6 \text{ mseg.} \quad \text{Hz} = \text{ciclos/seg}$$

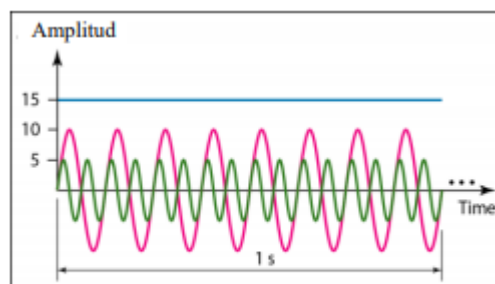
1. **Periodo (T):** tiempo transcurrido entre dos puntos iguales de la onda.
2. **Amplitud:** valor de pico.
3. **Frecuencia:** inversa del periodo ( $T^{-1}$ ).
4. **Fase:** posición de la onda respecto a  $t=0$ .

- ii. **Dominio de la frecuencia:** se representa una señal periódica como suma de múltiples armónicos (señales sinusoidales de diferente amplitud y frecuencia) en función de la frecuencia.

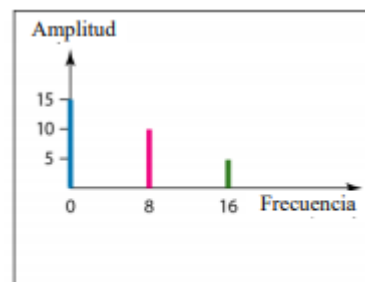


b. La misma onda seno en el dominio de frecuencia (valor pico: 5 V, frecuencia: 6 Hz)

- iii. **Ejemplo:**

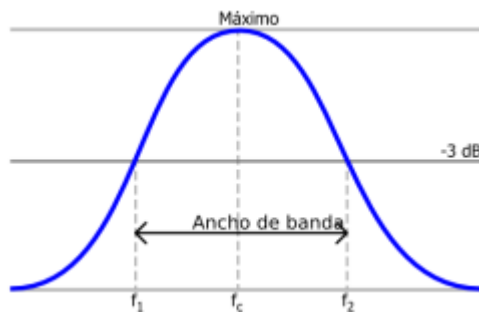


Representación en dominio del tiempo de tres ondas seno con frecuencias 0, 8 y 16



Representación en dominio de frecuencia de las mismas tres señales

- iv. En las señales simples no se transmiten datos. Se necesita la **señal compuesta**: formada por una serie de señales (múltiples ondas seno).
- e. **Ancho de banda**: rango de frecuencias (Hz) en el que se concentra la mayor parte de la energía o potencia de la señal.



- i. **Análisis de Fourier**: aplicando las series de Fourier, podemos saber cuáles son las frecuencias y amplitudes de los armónicos que componen una señal compuesta.

En 1990, Fourier demostró que cualquier onda compuesta era una combinación de ondas simples con distinta frecuencia.

Todos los armónicos son múltiplos del armónico fundamental.

**Fórmulas**: para cualquier señal periódica  $x(t)$ :

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(2\pi n f_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sen(2\pi n f_0 t)$$

$$f_0 = \frac{1}{T}$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

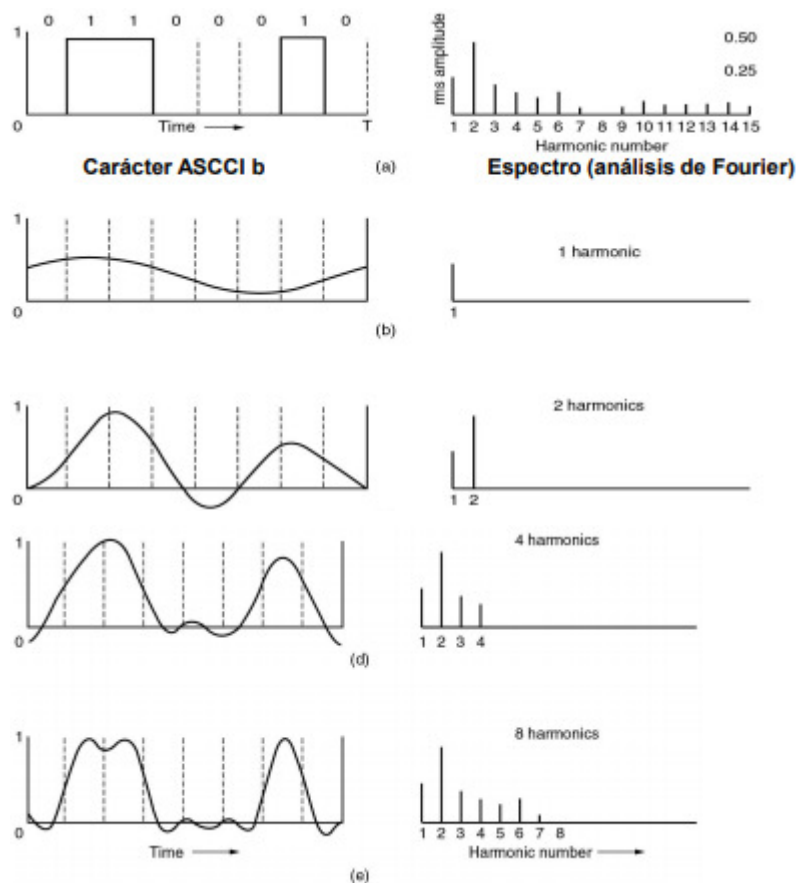
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sen(2\pi n f_0 t) dt$$

- ii. **Representación espectral de señales digitales y reconstrucción**:

El ancho de banda sería 14 Hz (a), 0 Hz (b), 1 Hz (c), 3 Hz (d) y 8 Hz (e).

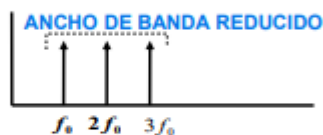




f. Relación entre ancho de banda y velocidad:

$$V = \frac{2}{T} \quad f_0 = \frac{1}{T}$$

➤ **Velocidad baja**  $\Rightarrow T \uparrow \quad f_0 \downarrow$



➤ **Velocidad alta**  $\Rightarrow T \downarrow \quad f_0 \uparrow$

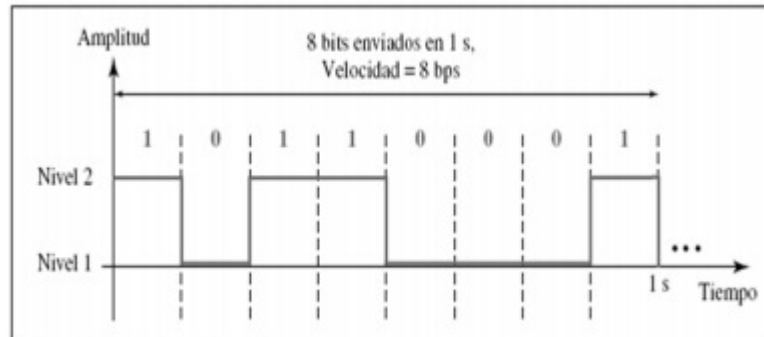


g. Velocidad de transmisión-velocidad de señalización:

- i. **Baudio (cambios de señal por segundo):** velocidad máxima de cambio de señal en línea (número de veces que cambia de estado la señal).
  1.  $V_{\text{baudio}} = 1/t$ , donde  $t$  = intervalo significativo mínimo.
- ii. **Bits por segundo (bps):** velocidad de transmisión de información.
  1.  $V_{\text{bps}} = V_{\text{baudio}} \cdot \log_2 N$ , donde  $N$  = estados posibles en la señal de la línea.
- iii. **Velocidad de transmisión (  $V(\text{bits/s})$  ):** número de bits por segundo.  
Es  $1/T$  ( $T$  = duración de 1 bit).

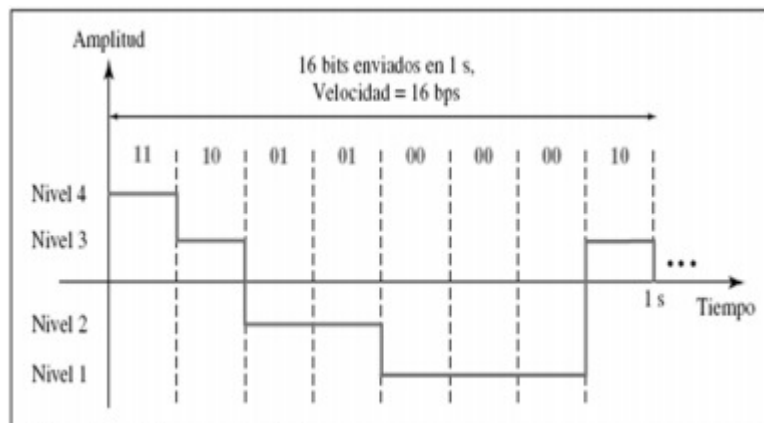


- iv. **Velocidad de señalización ( V(baudios) )**: número de elementos de señalización por segundo.  
Es  $1/T_s$  ( $T_s$  = duración de intervalo de señal o intervalo significativo mínimo).
- v.  $V_{\text{transm.}} \text{ (bps)} = V_{\text{señ.}} \text{ (baudio)} \cdot \text{bits/baudio}$
- vi. **Ejemplo 1**: 8 bps (8 bits transmitidos) y 8 baudios (8 señales).



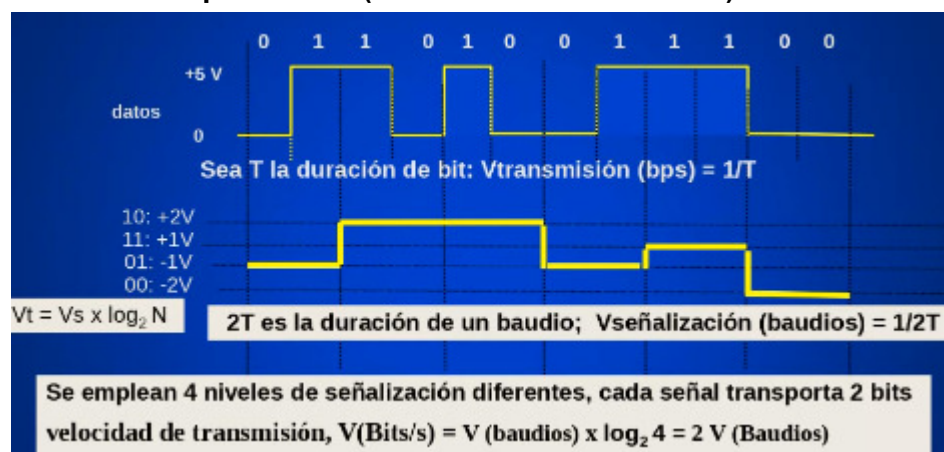
a. Una señal digital con dos niveles

- vii. **Ejemplo 2**: 16 bps (16 bits transmitidos) y 8 baudios (8 señales).

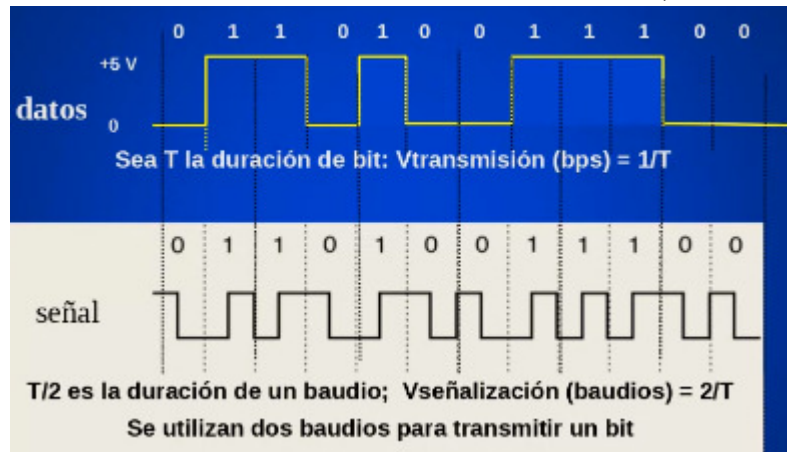


b. Una señal digital con cuatro niveles

- viii. **Más de un bit por baudio (elemento de señalización):**



- ix. **Más de un baudio por bit:** no aplica la fórmula  $V_{bps} = V_{baudio} \cdot \log_2 N$ .

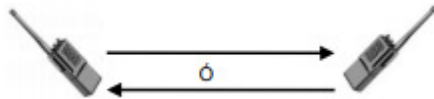


h. **Tipos de transmisión:**

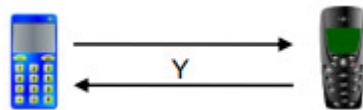
- i. **Simplex:** canal de comunicación unidireccional.



- ii. **Semidúplex:** canal de comunicación bidireccional excluyente. Enviar una respuesta después de recibir una pregunta.



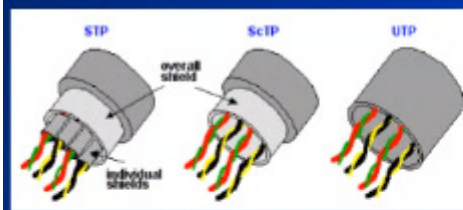
- iii. **Dúplex:** canal de comunicación bidireccional.



2. **Medios de transmisión. Capacidad de un canal.**

- a. **Medios de transmisión:**

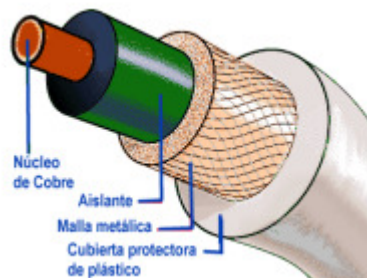
i. **Par trenzado:**



- STP: Shielded Twisted Pair
- ScTP: Screened Twisted Pair
- UTP: Unshielded Twisted Pair

UTP			
Categoría	Ancho de banda	Velocidad	Aplicaciones
Cat 1	400 KHz	1 Mbps	Redes telefónicas (acceso)
Cat 2		4 Mbps	
Cat 3	16 MHz	16 Mbps	Ethernet. 10 Base T
Cat 4		20 Mbps	
Cat 5	100-125 MHz	100 Mbps	Ethernet. 100/1000 Base T
Cat 5e	100-125 MHz	1Gbps	Ethernet. 100/1000 Base T
Cat 6	250 MHz	1 Gbps	! Giga Base T
Cat 7	600 MHz	1Gbps	10 Giga Base T

ii. **Cable coaxial:**

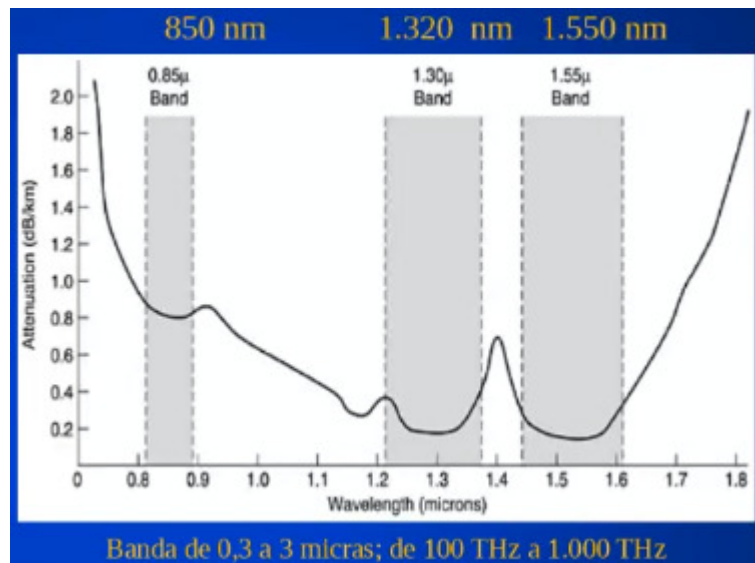


1. **Ancho de banda:** ~500 MHz.
2. **Utilización actual:**
  - a. Distribución de señales de TV.
  - b. Acceso a Internet.

iii. **Fibra óptica:**

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

$\lambda$  : longitud de onda  
 $c$ : velocidad de la luz  
 $f$  : frecuencia



**Tipos de fibra óptica:**

1. **Monomodo:**



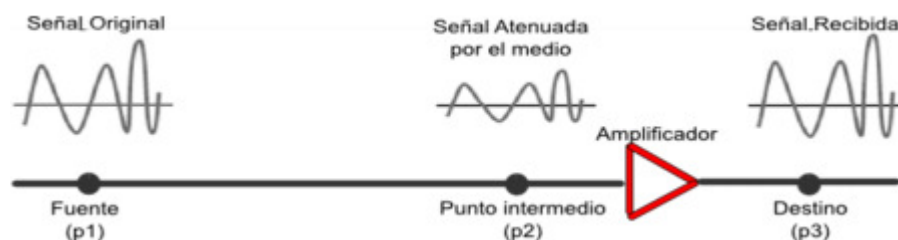
2. **Multimodo:**



iv. **Medios inalámbricos:** transmitidos por el aire.

b. **Perturbaciones:** intervienen en la capacidad de un canal. Hace que la señal que se envía no sea la misma que la que se recibe.

i. **Atenuación:** pérdida de la potencia (amplitud) de la señal entre dos puntos.



1. **Fórmula:** atenuación entre dos puntos del medio de transmisión.

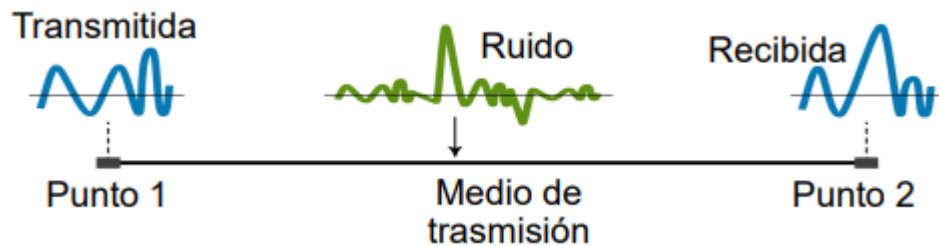
$$dB = 10 \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right)$$

, donde P1 = fuente y P2 = destino

2. **Ejemplo:** si la potencia de la señal se reduce a la mitad,  $P_2 = P_1/2$ .

$$dB = 10 \cdot \log_{10}(1/2) = -3 \text{ dB}.$$

- ii. **Ruido:** señales no deseadas que se combinan con la señal transmitida y resulta en una señal recibida distinta a la enviada.



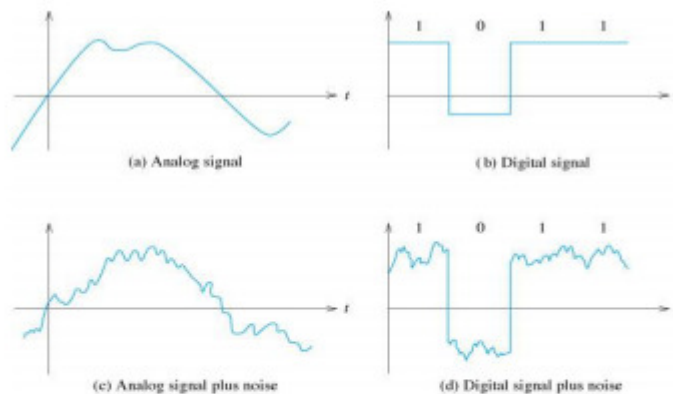
1. **Fórmula:** relación señal/ruido en un punto del medio de transmisión.

$$\left(\frac{S}{R}\right)_{dB} = 10 \log_{10} \frac{Pot\_Señal}{Pot\_Ruido}$$

2. **Ejemplo:** potencia señal = 10 mW ; potencia ruido = 1 μW.

$$(S/R)_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(10 \cdot 10^{-3} / 10^{-6}) = 10 \cdot \log_{10}(10^4) = 40 \text{ dB}.$$

- iii. **Transmisión analógica y transmisión digital:**



- La **atenuación** se corrige mediante **amplificadores**
- La señal analógica no se podrá reconstruir totalmente.
- La transmisión analógica siempre añade ruido

- La **atenuación** se corrige mediante **regeneradores**
- La señal digital si se puede reconstruir.
- La transmisión digital de señales es sin ruido

- c. **Capacidad de un canal:** máxima velocidad de la transmisión de datos por un canal, bajo unas **condiciones** dadas (ancho de banda W y calidad del canal S/R).

- i. **Teorema de Nyquist:** capacidad de un canal ideal (sin ruido).

$$C = 2W$$

, donde C = capacidad de canal y W = ancho de banda.

**Unidad:** baudios (el ancho de banda se rige por señales de transmisión).

¿ En este caso, C = **velocidad máxima de señalización** (baudios) ?

$$C = 2W \log_2 N$$

, donde N = nº niveles/señal.

**Unidad:** bps o bits por segundo (señales de transmisión → bits).

¿ En este caso, C = **velocidad máxima de transmisión** (bps) ?

$$V_{transm.} (bps) = V_{señ.} (baudio) \cdot \text{bits/baudio}$$

- ii. **Teorema de Shannon:** capacidad de un canal con ruido.

$$N = \sqrt{1 + \frac{S}{R}}$$

, donde N = nº niveles/señal y S/R = relación señal/ruido.

(Niveles que puede tomar una señal habiendo ruido).

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{R}\right)$$

, donde  $S/R = \text{pot\_señal/pot\_ruido}$  (no dB).

$$\left(\frac{S}{R}\right)_{dB} = 10 \log \frac{\text{Pot\_Señal}}{\text{Pot\_Ruido}}$$

- iii. **Ejercicio 1:** señales binarias ( $N=2$ ) de  $W = 3,1$  KHz con relación  $S/R = 30$  dB. Como ya conocemos  $N$ , no hace falta aplicar Shannon, sino Nyquist.  
 $C = 2 \cdot 3,1 \text{ KHz} \cdot \log_2 2 = 6.200 \text{ b/s}$ .
- iv. **Ejercicio 2:** señales de  $W = 3,1$  KHz con relación  $S/R = 30$  dB. No conocemos  $N$ , por tanto aplicamos Shannon.  
 $30 \text{ dB} = 10 \cdot \log_{10}(P_S/P_R)$  ;  $10^3 = P_S/P_R$ .  
 $C = 3,1 \text{ KHz} \cdot \log_2(1+1000) = 30.898,4 \text{ b/s}$ .
- v. **Ejercicio 3:** el número de niveles significativos que puede tomar una señal está limitado por...  
la relación señal/ruido (según el teorema de Shannon).
- vi. **Ejercicio 4:** si se transmite una señal binaria, la relación señal/ruido...  
no limita ni la velocidad máxima de señalización ni la de transmisión (porque ya conocemos los bits por señal  $N=2$  y la relación señal/ruido no interviene). Aunque puede impedir la transmisión si hay demasiado ruido.
- vii. **Ejercicio 5:** en el teorema de Shannon...  
la capacidad del canal de comunicaciones depende de la velocidad de señalización y de la relación señal ruido.
- viii. **Ejercicio 6:** un fabricante de dispositivos móviles está diseñando un equipo que emplea un sistema de transmisión inalámbrico para comunicarse. Sabiendo que el medio físico empleado tiene un ruido de  $5 \cdot 10^{-12} \text{ W}$  de potencia, un ancho de banda de **20 MHz** y que la potencia de la señal a transmitir es de **100 mW**.

Responda razonadamente a las siguientes preguntas:

1. **¿Cuál es la velocidad máxima a la que se puede transmitir la información en el medio citado? ¿Cuál sería la velocidad de señalización o modulación? ¿Cuántos bits por cambio de la señal se podrían emplear?**

$$C (\text{ideal}) = 2 \cdot W = 40 \text{ Mbaudios}$$

$$S/R = 0,1 / 5 \cdot 10^{-12} = 0,2 \cdot 10^{11} = 20 \cdot 10^9.$$

$$N = \sqrt{1+20 \cdot 10^9} = 141.421 \text{ (niveles transmisibles por señal)}.$$

$$\log_2 N = \log_2 141.421 = 17,1 \text{ bits/baudio}.$$

$$\text{Velocidad máxima de transmisión} = \text{velocidad de señalización} \cdot n^\circ \text{ de}$$



bits/baudio = 40 Mbaudios · 17,1 b/baudio = 684 Mbps

Como el ancho de banda es  $W = 20\text{MHz}$ , la máxima velocidad de modulación es de  $V_m = 2W = 40\text{Mbaudios}$

Para calcular el nº de bits por cambio de señal, se calcula primero el nº de niveles que puede tomar la señal

$$N = \sqrt[1]{1 + S/N}$$

$$N = \sqrt[1]{(1 + 20 \cdot 10^9)} = 141421$$

El nº de bits por cambio de señal se obtiene calculando el logaritmo en base dos del nº de niveles      nº de bits/baudio =  $\log_2 141421 = 17,1 \text{ bits}$

La velocidad máxima de transmisión es  $V_t = V_m \times \text{nº de bits por cambio de señal}$   
 $V_t = 40\text{Mbaudios} \times 17,1\text{bits} = 684 \text{ Mbps}$

La relación S/R en el medio es de  $100\text{mW}/5 \cdot 10^{-12}\text{W} = 20 \cdot 10^9$  lo que en decibelios es  $\text{dB} = 10 \times \log(S/R) = 10 \times \log(20 \cdot 10^9) = 103\text{dB}$

**2. Suponiendo que la señal reduce su potencia a la mitad cada 6m de distancia ¿Hasta qué distancia se podrían mantener una velocidad de 300 Mbps?**

$C = W \cdot \log_2(S/R) \Rightarrow 300 \text{ Mbps} = 20 \text{ MHz} \cdot \log_2(1 + S/R)$ ;  $2^{15} - 1 = S/R = 32.767$  o 45,15 dB.

La señal de salida tiene una relación señal/ruido de 103 dB. Se pierden 103-45,15=57,85 dB hasta ese punto.

Potencia de la señal a la mitad cada 6m:

$\text{dB} = 10 \cdot \log_{10}(S/2R) = 10 \cdot \log_{10}(S/R) + 10 \cdot \log_{10}(1/2) = \text{dB}_{\text{normal}} - 3,01 \text{ dB}$ .

Por cada 6m, se pierde la mitad de potencia de señal, que supone perder 3,01 dB con respecto a los dB anteriores (sin perder potencia).

Por tanto,  $57,84/3,01 = 19,22$  veces. Se podrá transmitir a un mínimo de 300 Mbps hasta a  $6 \cdot 19,22 = 115,32 \text{ m}$ .

Para obtener una velocidad de 300Mbps sería necesaria una relación señal ruido de:

$300M = 20\text{MHz} \cdot \log_2(1 + \frac{S}{R})$  de donde despejando queda que  $S/R=32.767$  o en **dB=45,15**.

Como originalmente disponemos de 103dB nos sobran  $103 - 45,15 = 57,84\text{dB}$

La reducción a la mitad de la potencia de la señal implica que la nueva relación señal ruido será de  $\text{dB} = 10 \cdot \log(\frac{S}{2 \cdot R}) = 10 \cdot (\log(\frac{S}{R}) + \log(\frac{1}{2})) = \log(\frac{S}{R}) - 3,01$ . Es decir la relación señal ruido se reduce en **3dB**.

Por tanto cada 6m se pierden 3dB y podemos perder 57,84dB lo que quiere decir que se pueden perder  $57,84/3=19$  veces 3dB o lo que es lo mismo se puede transmitir a 300Mbps a  $6 \cdot 19 = 117\text{m}$

- ix. **Ejercicio 7:** un fabricante de equipos informático está diseñando una red de alta velocidad basada en enlaces **dúplex** entre los ordenadores (**nodos**) que la forman. Para ello, ha diseñado las correspondientes tarjetas de red que emplean **enlaces de dos pares** de características de los enlaces son las siguientes: relación señal/ruido (**S/R**) de **63 dB**, ancho de banda (**W**) de **100 MHz** y **2 bits por señal (N)** enviada a la línea.



1. ¿Cuál es la máxima velocidad de transmisión alcanzable?

$C = 2W = 2 \cdot 100 \text{ MHz} = \mathbf{200 \text{ Mbaudios}}$  (velocidad máx. de señalización)  
 $C = 2W \cdot N = 200 \text{ Mbaudios} \cdot 2 \text{ bits/baudio} = \mathbf{400 \text{ Mbps}}$  (velocidad máx. de transmisión).

2. Sin modificar la relación señal/ruido de los enlaces, proponga una codificación que permita alcanzar una velocidad de 2Gbps.

$V_{\text{transm.}} (\text{bps}) = V_{\text{señ.}} (\text{baudio}) \cdot \text{bits/baudio}$

$2 \text{ Gbps} = 200 \text{ Mbaudios} \cdot N$  ;  $N = 10 \text{ bits/baudio}$ .

Para alcanzar 2 Gbps, se necesita una codificación multinivel con 10 bits por cada cambio de señal.

$\log_2 N = 10 \text{ bits/baudio}$ ;  $N = 2^{10} = 1.024$  niveles significativos por baudio.

$63 \text{ dB} = 10 \cdot \log_{10}(S/R)$  ;  $S/R = 10^{6.3}$ .

$N = \sqrt{1 + S/R}$  ;  $N = 1412,54$  niveles significativos posibles (se permiten 1.024 niveles significativos).

$2 \text{ Gbps} = 200 \text{ Mbaudios} \times \text{n}^\circ \text{ de bit/cambio de señal}$

$\text{n}^\circ \text{ de bit/cambio de señal} = 2 \text{ Gbps} / 200 \text{ Mbaudios}$

En este caso, para alcanzar la velocidad pedida se necesita una codificación multinivel que tenga una relación de 10 bits por cada cambio de la señal ya que

$2 \text{ Gbps} = 10 \text{ bits/audios} \times 200 \text{ Mbaudios}$

Una codificación de este tipo requiere  $2^{10} = 1024$  niveles significativos.

La codificación propuesta es posible ya que el número máximo de niveles significativos, con la relación señal ruido indicada es de:

$$N = \sqrt{1 + S/R} = \sqrt{1 + 10^{6.3}} = 1412$$

La relación señal ruido (en escala lineal) la podemos calcular de la definición de decibelio: es decir de lo que se obtiene que

$$63 = 10 \log(S/R)$$

x. Ejercicio 8:

Un grupo de radioaficionados están diseñando una red de datos basada en hardware de diseño propio. Han diseñado, equipos de transmisión de datos basados en una emisora de radio y un modem. Antes de instalarlos y completar su puesta en marcha los han sometido a una serie de pruebas que han dado los siguientes resultados.

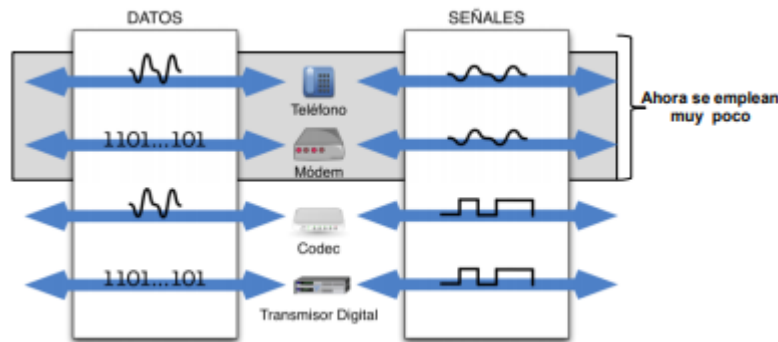
- La señal recibida a una distancia de 1Km es de 100mW
- La señal recibida a una distancia de 11Km es de 1mW
- La atenuación por kilómetro de la señal (expresada en decibelios) es aproximadamente constante
- El ruido de fondo en el canal que piensan emplear es de 0.1mW
- La emisora de radio proporciona un ancho de banda de 100KHz

a) ¿En cuántos decibelios se atenúa la señal por cada kilómetro de distancia?

b) ¿Hasta qué distancia es posible mantener una velocidad de 400Kbps?

### 3. Técnicas de transmisión:

#### a. Transmisión analógica y transmisión digital:



**DATOS DIGITALES / SEÑAL DIGITAL**

- Unipolar, Polar y Bipolar
- NRZ, RZ, Manchester, Manchester Diferencial,
- 2B1Q, 8B6T, 8B10B,....64B66B

**DATOS ANALÓGICOS / SEÑAL DIGITAL**

- MODULACIÓN POR PULSOS CODIFICADOS (MIC/PCM)

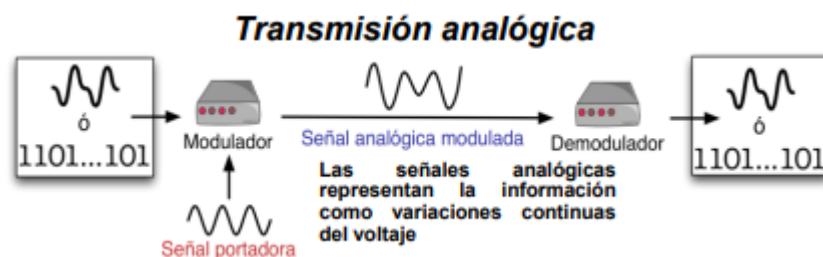
**DATOS ANALÓGICOS / SEÑAL ANALÓGICA**

- MODULACIÓN DE AMPLITUD / (AM)
- MODULACIÓN DE FRECUENCIA (FM)
- MODULACIÓN DE FASE (PM)

**DATOS DIGITALES / SEÑAL ANALÓGICA**

- MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE AMPLITUD (ASK)
- MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA (FSK)
- MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE (PSK)
- MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DIFERENCIAL DE FASE (DPSK)
- MODULACION QAM (Quadrature Amplitude Modulation)
- MODULACION QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying)

- i. **Transmisión analógica:** la señal analógica representa la información como variaciones continuas del voltaje (**módem = modulador + demodulador**).

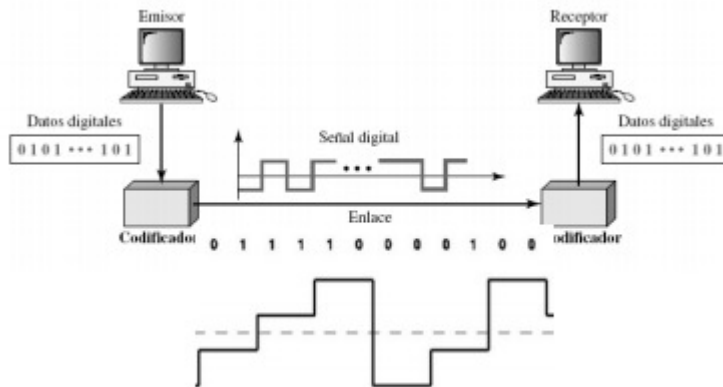


- ii. **Transmisión digital:** la señal digital representa la información como pulsos de voltaje (**códec = codificador + decodificador**).

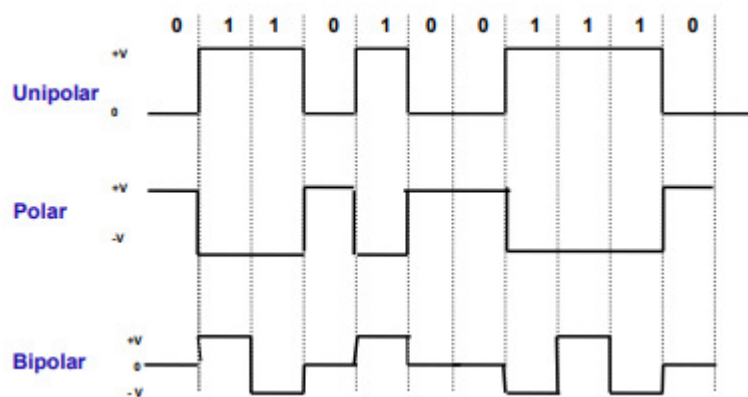


**b. Codificaciones digitales:** datos digitales / señal digital

Las **codificaciones digitales** adaptan la señal al medio de transmisión.

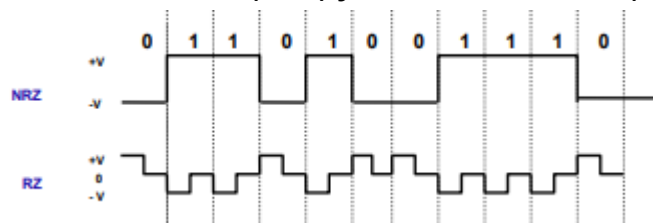


**i. Unipolar [0, +V], polar [-V, +V] y bipolar [-V, 0, +V]:**



Los valores -V, V o 0 transmiten estos valores en esta configuración concreta. El concepto hace referencia a los niveles de la señal.

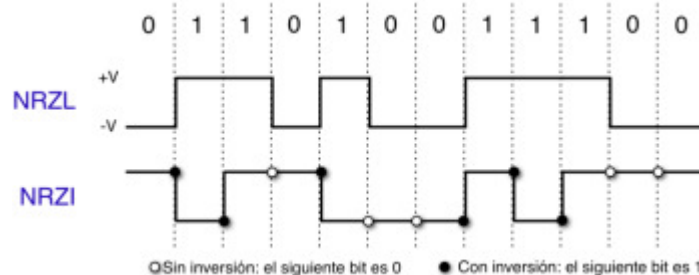
**ii. Sin retorno a cero (NRZ) y con retorno a cero (RZ):**



Los valores -V, V o 0 transmiten estos valores en esta configuración concreta. El concepto hace referencia a los niveles de la señal.

**1. NRZ (sin retorno a cero):** la señal no retorna a cero en la mitad del bit.

- a. Al recibir la señal, no se distinguen dos bits con la misma información (0-0). Para ello, se utilizan otras **dos codificaciones**:



**i. NRZ-L:** el nivel de voltaje determina el valor del bit.

ii. **NRZ-I:** la inversión determina el valor del bit (hay inversión solo cuando el siguiente bit es 1).

2. **RZ (con retorno a cero):** la señal retorna a cero en la mitad del bit.

a. Requieren más ancho de banda que los **códigos NRZ**: no son eficientes porque se necesitan, en este caso 2 baudios para transmitir un bit.

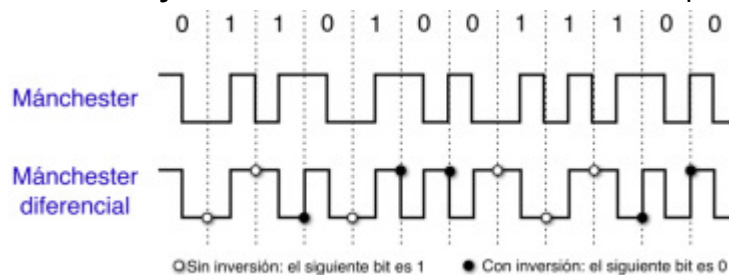
b.  $V_{\text{transm.}} = V_{\text{señ.}} / 2$

$V_{\text{transm.}} = V_{\text{señ.}} \cdot \text{bits/baudio} = V_{\text{señ.}} \cdot 0,5$

c.  $V_{\text{transm.}} = W$  (ancho de banda = máx.  $V_{\text{señ.}}$ )

d.  $V_{\text{transm.}} = V_{\text{señ.}} \cdot \text{bits/baudio} = 2 \cdot W \cdot 0,5 = W$  (ancho de banda)

iii. **Manchester y Manchester diferencial:** dos baudios por bit.



El sincronismo lo marca el flanco de cada bit.

1. **Manchester:** el nivel de voltaje determina el valor del bit.

2. **Manchester diferencial:** la inversión determina el valor del bit (hay inversión solo cuando el siguiente bit es 0).

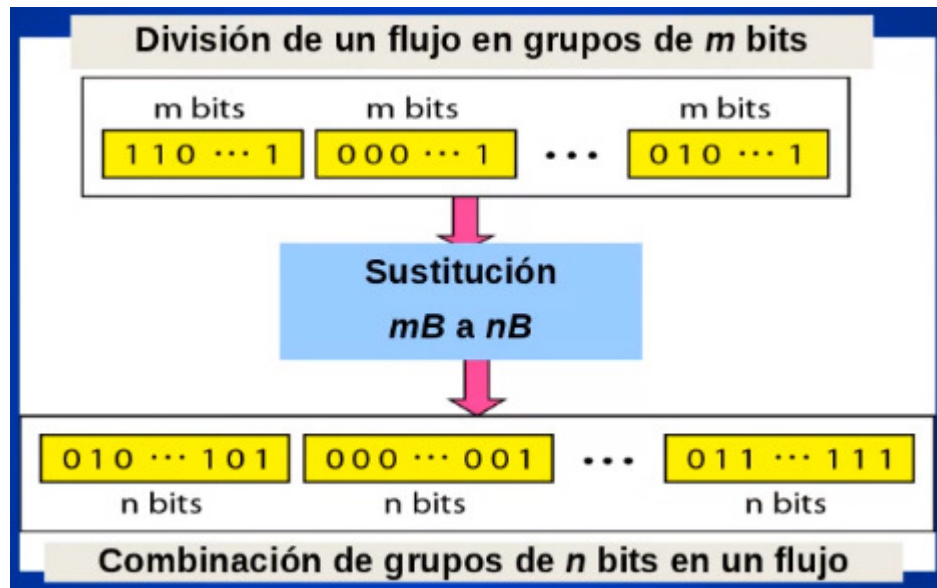
3. **Ejercicio:**

#### La codificación Manchester...

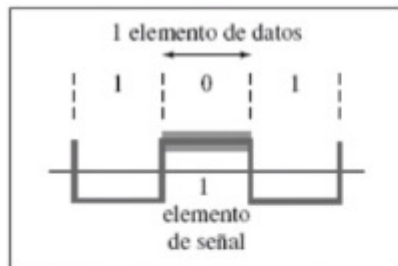
- a) permite transmitir con la misma señal los datos y el sincronismo de trama
- b) se emplea para la transmisión de señales de voz sobre la red telefónica digital y en la red digital de servicios integrados
- c) permite transmitir con la misma señal los datos y el sincronismo de bit.
- d) se emplea en las redes de área local para poder detectar las colisiones



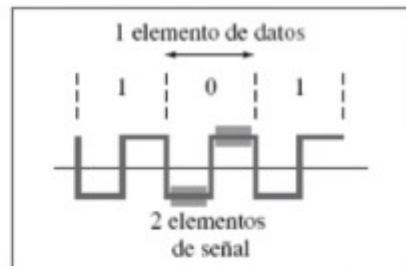
- iv. **Codificación de bloques:** dividir la información en **bloques de m bits** para transmitirlos con **redundancia** en **bloques de n bits** ( $n > m$ ).



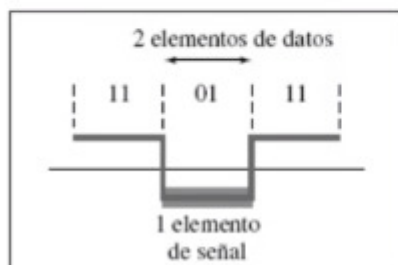
- a. **4B/5B:** se codifica la información en grupos de 4 bits y salen del codificador con grupos de 5 bits (1 bit de redundancia: información de reloj y mantener sincronismo entre transmisor y receptor → aumenta el flujo de información transmitida (**régimen binario**) un 25%).  
Habría 32 valores posibles ( $2^5$ ), pero solo 16 combinaciones de los 32 ( $2^4$ ) contienen información.
- v. **Esquemas multinivel mBnL:** patrón de m elementos de datos que se codifica como un patrón de n elementos de señal donde  $2^m \leq L^n$ .



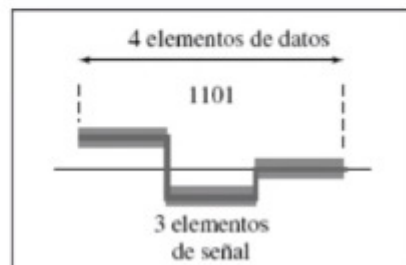
a. Un elemento de datos por un elemento de señal ( $r = 1$ )



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



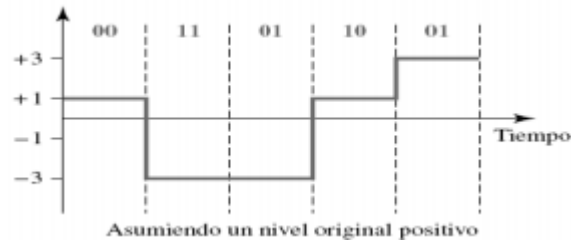
c. Dos elementos de datos por un elemento de señal ( $r = 2$ )



d. Cuatro elementos de datos por tres elementos de señal ( $r = \frac{4}{3}$ )

1. **2B1Q:** 2 bits se codifican en una señal cuaternaria (4 niveles de señal). Para transmitir 2 bits se necesita 1 baudio.

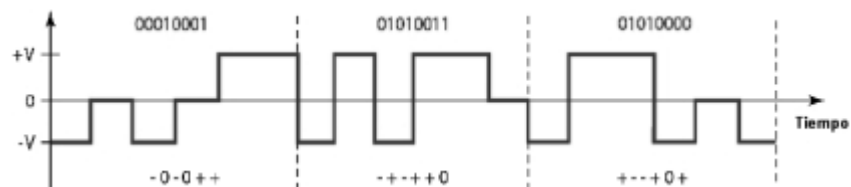
$$V_{\text{transm.}} = V_{\text{señ.}} \cdot \log_2 4 = 2 \cdot V_{\text{señ.}}$$



Bits siguientes	Nivel anterior: positivo	Nivel anterior: negativo
	Siguiente nivel	Siguiente nivel
00	+1	-1
01	+3	-3
10	-1	+1
11	-3	+3

Tabla de transición

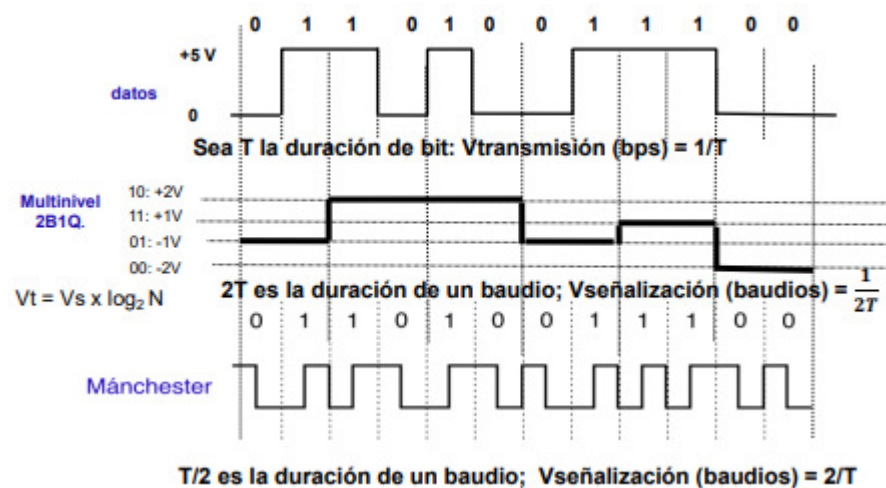
2. **8B6T**: 8 bits se codifican en una señal ternaria (3 niveles de señal). Para transmitir 8 bits se necesitan 6 baudios.



3. **8B10B**: 8 bits se codifican en una señal binaria (2 niveles de señal). Para transmitir 8 bits se necesitan 10 baudios.

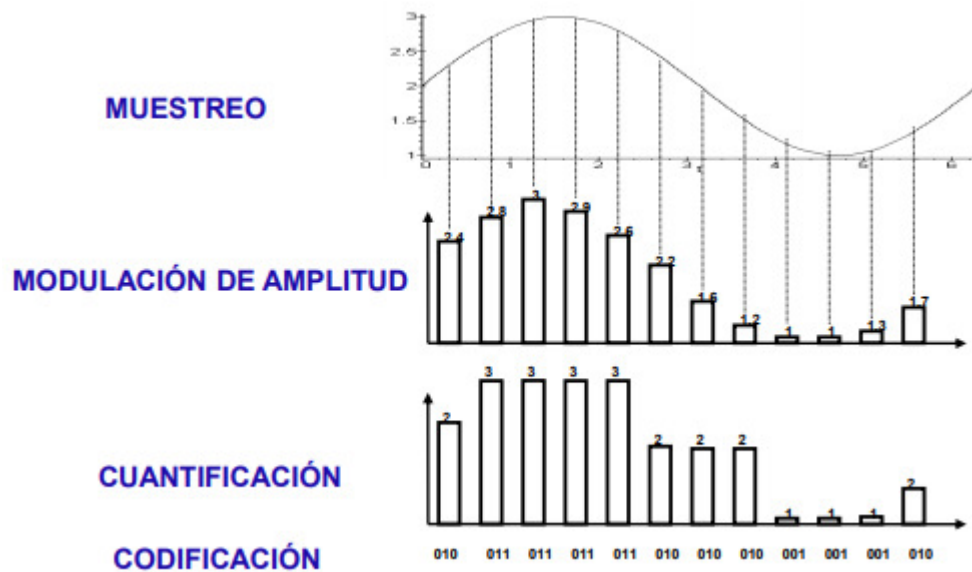
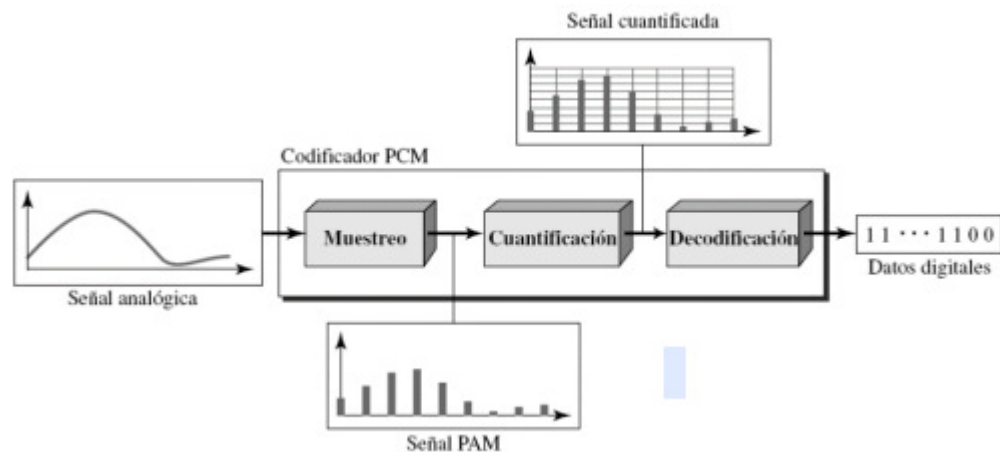
**No confundir con 8B/10B** → añade 2 bits de redundancia por byte.

4. **Ejemplo**: velocidad de señalización-velocidad de transmisión

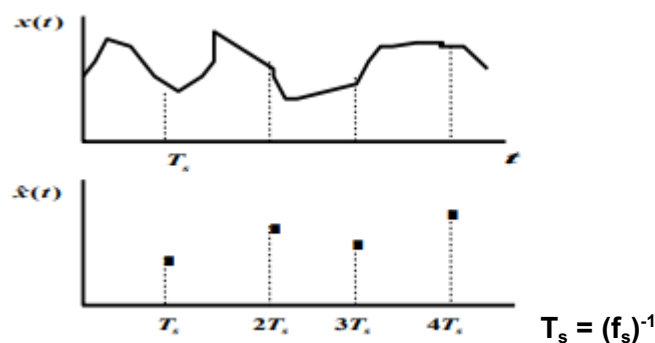


c. **Transmisión digital**: datos analógicos / señal digital

i. **Modulación por Impulsos Codificados (MIC/PCM):**



1. **Teorema de muestreo de señal analógica (Nyquist):** una señal  $x(t)$  de ancho de banda  $W$  puede reconstruirse a partir de sus muestras si se cumple que la frecuencia de muestreo es mayor o igual al doble del ancho de banda o frecuencia máxima de la señal a muestrear ( $f_s \geq 2W$ ). Si  $f_s = 8.000$ , entonces se tomarán 8.000 muestras por segundo. La frecuencia de muestreo suele ser 2x el ancho de banda ( $f_s = 2W$ ).



Se busca obtener un número finito representativo de muestras de un número infinito de valores (señal analógica).

2. **Cuantificación de señal muestreada:** a cada muestra se le asigna el nivel de cuantificación más cercano. Por ejemplo, si tomo 2,8 y el nivel



de cuantificación más cercano es el 3, transmitiré el 3. En esta aproximación se produce un error de cuantificación.

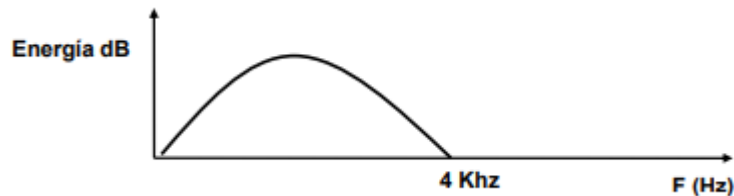
3. **Codificación:** se codifica cada nivel de cuantificación con bits.

**Régimen binario:** bits que son transmitidos por el códec.

$$\text{Régimen binario} = f_s \times n^{\circ} \text{ bits/muestra}$$

4. **Ejemplo:** como un canal telefónico es de 4 kHz, se deberán tomar de sus datos analógicos 8.000 muestras por segundo ( $f_s = 2W = 8.000 \text{ Hz}$ ).

ii. Digitalización de la señal de voz.



$$2W = 2 \cdot 4000 = 8000 \text{ muestras/s} = f_s$$

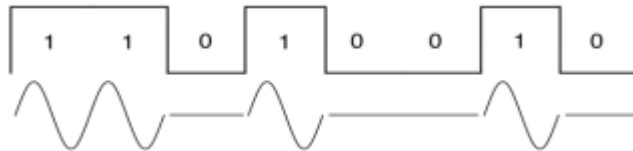
Se puede conseguir buena calidad de reproducción con 256 niveles ( $\log_2 256 = 8 \text{ bits}$ ).

$$R_b = \frac{8 \text{ Bits}}{T_s} = 8 \text{ Bits} \cdot f_s = 8 \text{ Bits} \cdot 8000 \text{ muestras/s} = 64 \text{ Kbps}$$

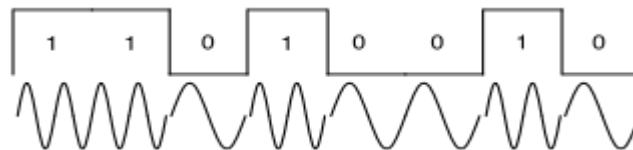
d. **Transmisión analógica. Modulaciones:** datos digitales / señal analógica

**Ejemplos:** datos por red telefónica, información digital por canal analógico, ...

i. **Modulación ASK (Amplitude Shift Keying):** los dos valores binarios se representan mediante dos amplitudes diferentes de la portadora.



ii. **Modulación FSK (Frequency Shift Keying):** los dos valores binarios se representan mediante dos frecuencias diferentes y próximas a la portadora.



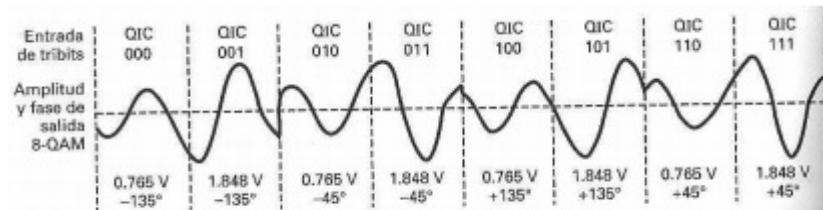
iii. **Modulación PSK (Phase Shift Keying):** la fase de la señal portadora se desplaza para representar con ello datos digitales.



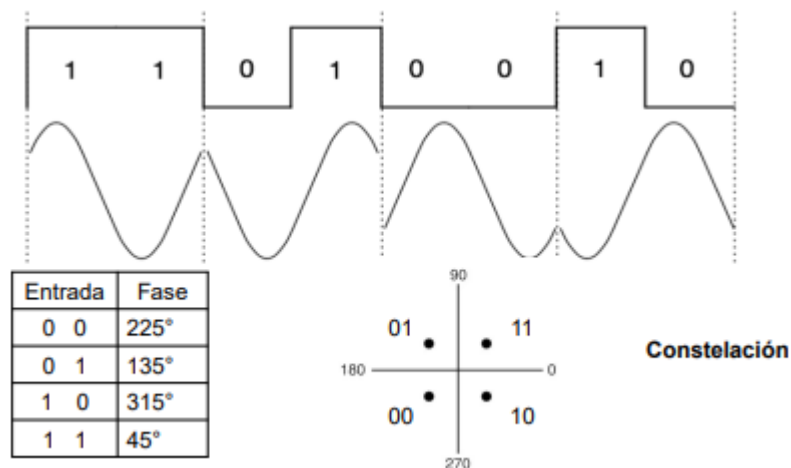
iv. **Modulación DPSK (Differential Phase Shift Keying):** la fase de la señal portadora se desplaza para representar con ello datos digitales.



- v. **Modulación QAM (Quadrature Amplitude Modulation):** se generan dos señales portadoras desfasadas 90° entre sí (moduladas por ASK o en amplitud). Se suman ambas señales portadoras en **una sola portadora** (amplitud + fase).

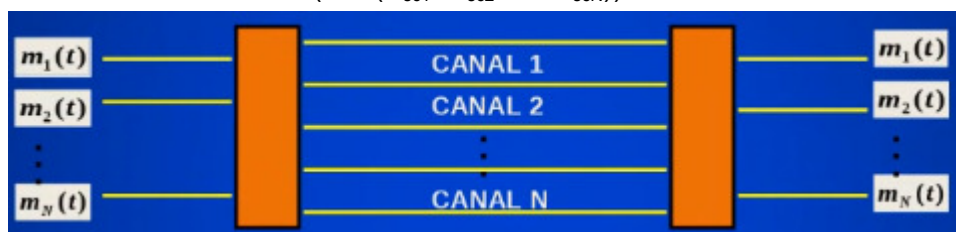


- vi. **Modulación QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying):**

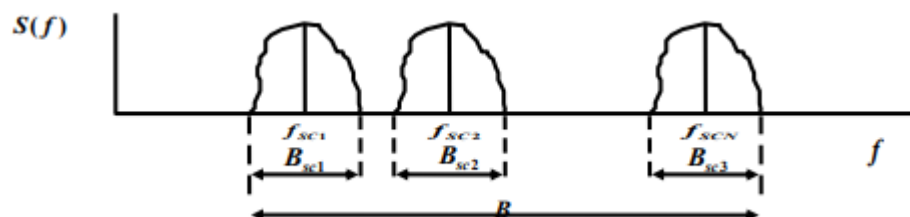


#### 4. Distribución de Ancho de Banda:

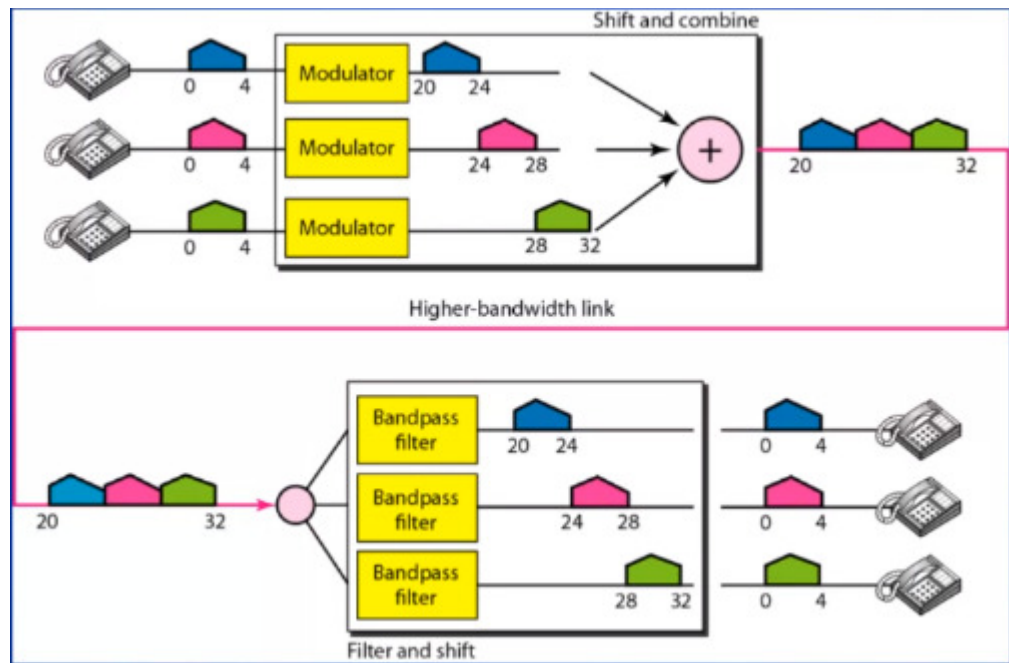
- a. **Multiplexación:** conjunto de técnicas que permiten la transmisión simultánea (compartida) de múltiples señales -tanto analógicas como digitales- a través de un único **enlace de datos** para conseguir un uso **eficiente** del ancho de banda.
- i. **Multiplexación por división en frecuencia (MDF/FDM):** para utilizar MDF, el ancho de banda del enlace debe ser mayor o igual a los anchos de banda de las señales a transmitir ( $B \geq (B_{sc1} + B_{sc2} + \dots + B_{scN})$ ).



Enlace de datos = N canales

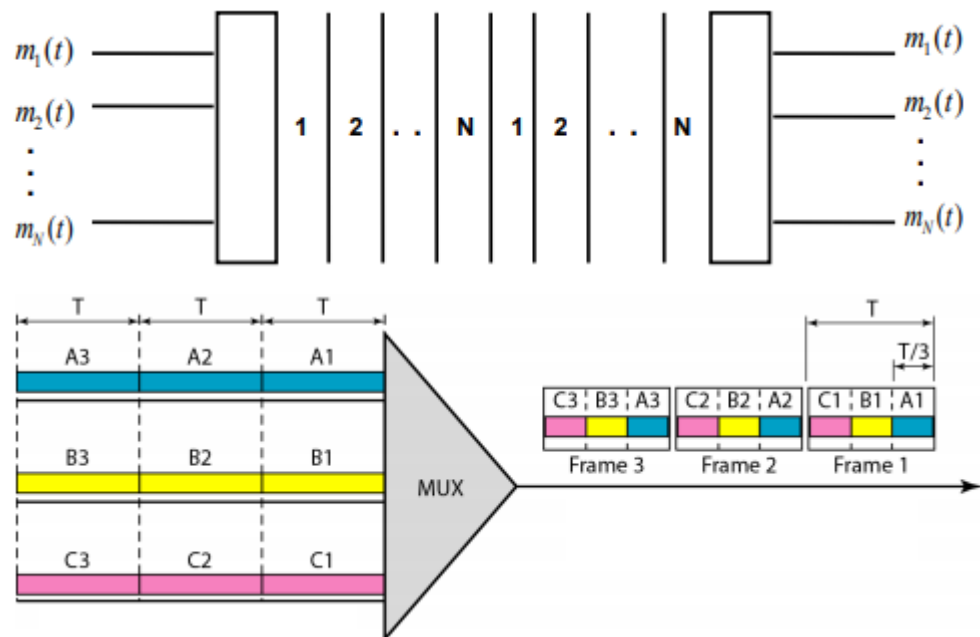


**Banda de guarda:** espacio del ancho de banda del enlace de datos sin frecuencia ocupada por el ancho de banda de una señal.



Las frecuencias de tres señales distintas se concatenan tras la modulación y vuelven a su frecuencia normal tras la demodulación.

- ii. **Multiplexación por división en el tiempo (MDT/TDM):** optimizar el espacio del enlace de datos para introducir muestras de cada señal.



**Traza (T):** espacio entre dos datos de una misma señal (C3-B3-A3).

**Régimen binario:**

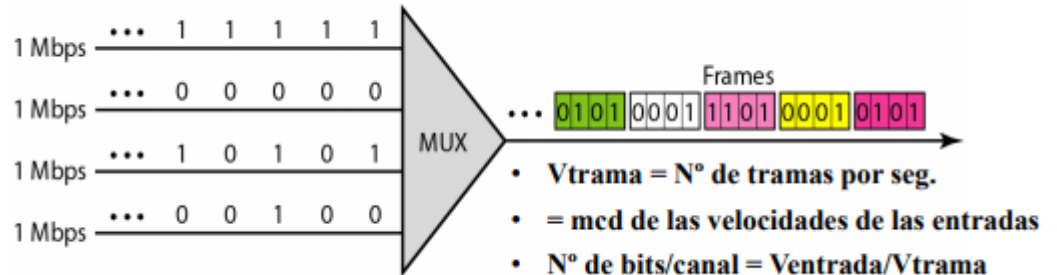
- De una señal (línea):  $R_{b_{l1}} = f_s \times n^\circ \text{ bits/muestra}$  (**teorema de Nyquist**).
- De  $n$  señales (líneas):  $R_{b_{ln}} = f_s \times n^\circ \text{ bits/muestra} \times n^\circ \text{ señales}$ .  
 $n^\circ \text{ bits/muestra (A3)} \times n^\circ \text{ señales} = \text{longitud de trama (A3+B3+C3)}$

- **De medio de transmisión:**  $R_{b\_MT} = f_s \times n^\circ \text{ bits/trama (longitud de trama)}$

$$R_{b\_MT} = \sum_{i=1}^n R_{b\_i}$$

$R_{b\_MT}$  = suma de  $R_b$  de cada señal.

1. **MDT orientado a bit:**



2. **MDT orientado a byte:** se consideran las velocidades en bytes y cada canal de salida tendrá un  $n^\circ$  entero de bytes.

3. **Ejercicio:** fuentes 1, 2, 3 y 4; 4  $n^\circ$  bits/muestra.

Diseñar sistema MDT y trama, e indicar  $R_b$  y longitud de trama.

- Fuente 1: señal vocal de alta calidad de 8 kHz

- Fuente 2: señal telefónica de 4 kHz

- Fuente 3: señal digital de 8 kbps

- Fuente 4: señal digital de 16 kbps

$$R_{b1} = 2 \cdot 8 \text{ kHz} \cdot 4 \text{ n}^\circ \text{ bits/muestra} = 64 \text{ kbps}$$

$$R_{b2} = 2 \cdot 4 \text{ kHz} \cdot 4 \text{ n}^\circ \text{ bits/muestra} = 32 \text{ kbps}$$

$$R_{b3} = 8 \text{ kbps}$$

$$R_{b4} = 16 \text{ kbps}$$

$$R_b = \text{suma de } R_{bn} = 64 + 32 + 16 + 8 = 120 \text{ kbps}$$

Como MDT está orientado a bit, habrá que crear el máximo número de tramas iguales con el mínimo de 1 bit por canal/trama.

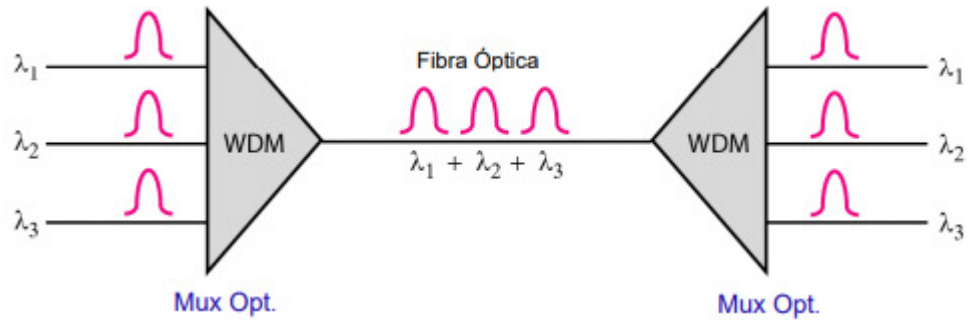
$$\text{mcd}(64k, 32k, 8k, 16k) = 8k \text{ tramas con mínimo n}^\circ \text{ bits/canal.}$$

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
8	4	16	2	0	4	1	2

$$8b \mid 4b \mid 1b \mid 2b = 15b$$

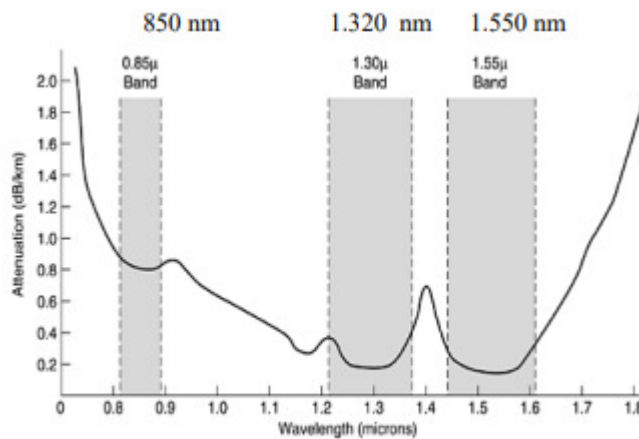
Longitud de trama = **15 bits/trama**

iii. **Multiplexación por división en longitud de onda (MDLO/WDM):** variante de MDF. Permite transmitir varias señales ópticas sobre una misma fibra óptica empleando varias señales portadoras con diferentes frecuencias o longitudes de onda. La diferencia con MDF es que en MDF se transmiten señales **electromagnéticas** en lugar de **ópticas**.



Suele ser utilizado cuando el **enlace de datos** es una **fibra óptica**.

1. **Multiplexación densa de DLO (MDDLO/DWDM)**: las diferencias entre las longitudes de onda de las distintas señales es menor que en MDLO. Esto hace que la transmisión sea más eficiente porque no se pierde tanto conjunto de frecuencias por el cual no se transmite información.
- iv. **Fibra óptica**: se utilizan tres conjuntos concretos de frecuencias o longitudes de onda (**ventanas o bandas**) en los que la atenuación es **constante**.



Banda de 0,3 a 3 micras; de 100 THz a 1.000 THz

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

$\lambda$  : longitud de onda  
 $c$  : velocidad de la luz  
 $f$  : frecuencia

- b. **Espectro expandido**: codificar la señal (redundancia o información adicional) para **aumentar significativamente el ancho de banda (W) de la señal** a transmitir para conseguir una transmisión segura y fiable.

**Objetivos:**

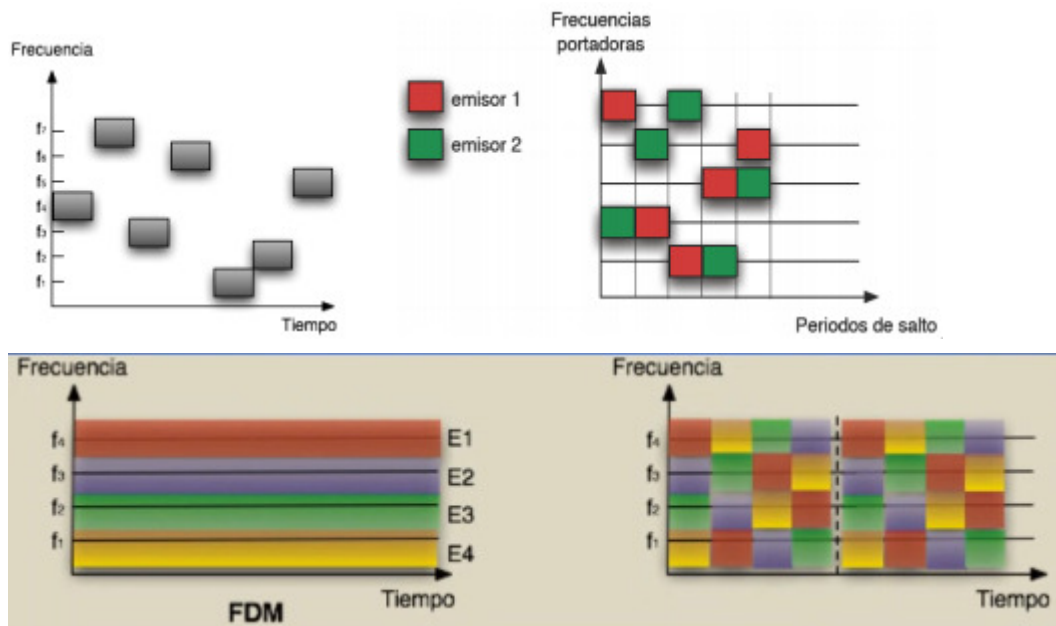
- Minimizar **interferencias** sufridas por el ruido.
- Ocultar señales (evitar que sean **interceptadas**).
- Multiplexación de varias señales (**canalización**), que varios usuarios transmitan por el mismo medio de transmisión.

**Usos:** aplicaciones militares, transmisiones inalámbricas (telefonía, WiFi), ...

- i. **Por salto de frecuencias**: divide una señal analógica en M partes iguales y las distribuye por M frecuencias portadoras pseudoaleatorias (distintas entre sí), saltando de frecuencia en frecuencia en intervalos fijos de tiempo.

El **receptor** captará el mensaje saltando entre frecuencias sincronizado con el emisor.

Los **receptores no autorizados** captarán una señal ininteligible (cachos inconexos y de varias fuentes distintas).



- ii. **Por secuencia directa DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum):** se aplica un **código de expansión** a la señal digital por la que cada bit de esta se representa utilizando varios elementos (**minibits** o **chips**) en la señal portadora, mediante una secuencia pseudoaleatoria. Sirve para minimizar el efecto de las **interferencias** entre equipos de diferentes redes.

El **receptor** utilizará una secuencia de código que replica la del emisor.

**CDMA (Code Division Multiple Access):**

1. **Ejemplo 1:**

Código 1,-1,-1,1,-1,1  
 Datos 1 0 1  
 Transmisión 1,-1,-1,1,-1,1 -1,1,1,-1,1,-1 1,-1,-1,1,-1,1

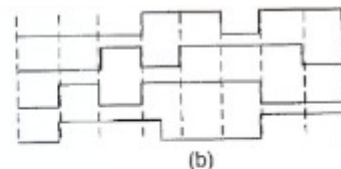
**Decodificación:** multiplicar bit a bit recepción y código, sumar los resultados de un bloque.

Recepción 1,-1,-1,1,-1,1 -1,1,1,-1,1,-1 1,-1,-1,1,-1,1  
 Código 1,-1,-1,1,-1,1 1,-1,-1,1,-1,1 1,-1,-1,1,-1,1  
 Resultado 1+1+1+1+1+1 -1-1-1-1-1-1 1+1+1+1+1+1

- Si resultado de bloque es +6, el valor transmitido es 1.
- Si resultado de bloque es -6, el valor transmitido es 0.

2. **Ejemplo 2:**

A = (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)  
 B = (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)  
 C = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)  
 D = (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)  
 (a)



$S_1 = C = (-1 +1 -1 +1 +1 -1 -1 -1)$   
 $S_2 = B+C = (-2 0 0 0 +2 +2 0 -2)$   
 $S_3 = A+B = (0 0 -2 +2 0 -2 0 +2)$   
 $S_4 = A+B+C = (-1 +1 -3 +3 +1 -1 -1 +1)$   
 $S_5 = A+B+C+D = (-4 0 -2 0 +2 0 +2 -2)$   
 $S_6 = A+B+C+D = (-2 -2 0 -2 0 -2 +4 0)$   
 (c)

$S_1 \cdot C = [1+1-1+1+1-1-1-1]/8 = 1$   
 $S_2 \cdot C = [2+0+0+0+2+2+0-2]/8 = 1$   
 $S_3 \cdot C = [0+0+2+2+0-2+0-2]/8 = 0$   
 $S_4 \cdot C = [1+1+3+3+1-1-1-1]/8 = 1$   
 $S_5 \cdot C = [4+0+2+0+2+0-2+2]/8 = 1$   
 $S_6 \cdot C = [2-2+0-2+0-2-4+0]/8 = -1$   
 (d)



(a) Códigos de expansión de cada dato.

- A y C transmiten un 1 y B transmite un cero  $(-1 +1 -3 +3 +1 -1 -1 +1)$
- El receptor C calcula  $S.C (-1 +1 -3 +3 +1 -1 -1 -1) \times (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 +1) = 8$
- El receptor B calcula  $S.B (-1 +1 -3 +3 +1 -1 -1 -1) \times (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1) = -8$
- El receptor A calcula  $S.A (-1 +1 -3 +3 +1 -1 -1 -1) \times (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1) = 8$

- $8 \Rightarrow 1$
- $-8 \Rightarrow 0$
- Otro valor  $\Rightarrow$  error.

3. **Ejemplo 3:** si la señal A se transmitiera a **100 kHz**, la señal B a **100 kHz** y la señal C a **100 kHz**, se podrían transmitir a la vez a **100 kHz**.

4. **Ejemplo 4:** si la señal A se transmitiera a **100 kHz**, la señal B a **200 kHz** y la señal C a **100 kHz**, se podrían transmitir a la vez a **200 kHz**.

iii. **Ejercicios:**

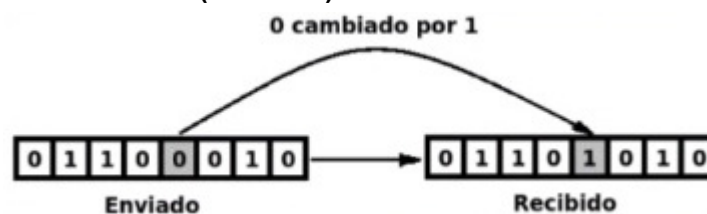
1. La transmisión por espectro expandido de **dos señales distintas** requiere el **mismo ancho de banda (W)** que para transmitir una **señal**, por la **multiplexación**.
2. La **multiplexación por longitud de onda** permite la **multiplexación en frecuencia** de señales que pueden emplear velocidades y/o codificaciones distintas.
3. La **codificación CDMA** permite que múltiples emisores empleen el **mismo** medio de transmisión **sin emplear multiplexación** en frecuencias ni en el tiempo.

5. **Técnicas de comunicación de datos:**

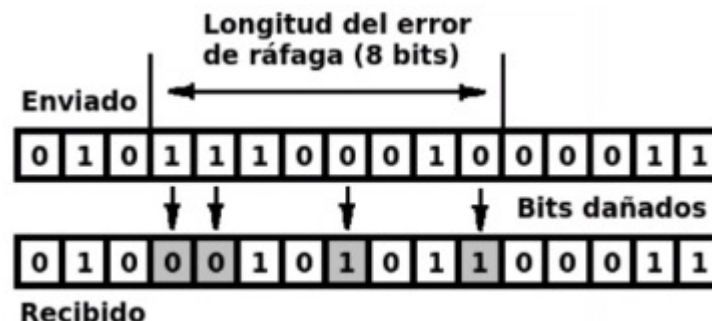
a. **Control de errores:** las redes han de ser capaces de detectar y corregir los errores producidos en la transmisión de información (generalmente, por el ruido). La detección de errores se da en los extremos de la comunicación.

i. **Tipos de error:**

1. **Errores de bit (aislados):**



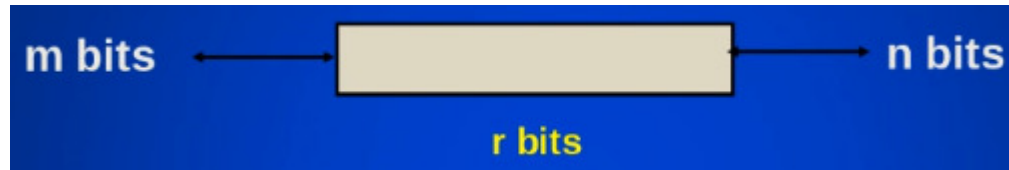
2. **Errores de ráfagas:**



No tienen por qué ser bits erróneos todos los bits de la ráfaga.



- ii. **Transmisión:** se transmiten  $m$  bits con  $r$  bits de **redundancia** y se reciben  $n$  bits  $\Rightarrow m + r = n$



iii. **Mecanismos de control de errores:**

1. **Detección y retransmisión (ARQ o Automatic Repeat Request):** solo detecta errores de transmisión. Si un código es **erróneo**, se desecha y se recupera mediante **retransmisión** (no se corrige el error).
  - a. Requieren menos información adicional o redundancia.
    - i. Comprobación de **paridad**.
    - ii. Comprobación de redundancia cíclica (**CRC**)
  - b. Utilizan protocolos TCP (*Transmission Control Protocol*).
2. **Corrección directa (FEC o Forward Error Correction):** detecta y corrige errores de transmisión. Si un código es **erróneo**, se corrige.
  - a. Requieren mucha información adicional o redundancia.
    - i. Códigos de **dobles paridad**.
    - ii. **Códigos de Hamming**.
  - b. Utilizado en redes móviles (GSM, 3G).

iv. **Técnicas de detección de errores en ARQ:**

1. **Códigos de paridad:** añadir un bit de paridad al final del bloque de datos.
  - a. **Paridad impar:** el valor del bit añadido hará que el número total de 1s sea impar.
  - b. **Paridad par:** el valor del bit añadido hará que el número total de 1s sea par.
  - c. **Errores detectados:** solo un número **impar** de errores.
2. **CRC (Cyclic Redundancy Check):**
  - a. **Sea:**
    - $M(x)$ : mensaje original ( $m$  bits)
    - $G(x)$ : polinomio generador de grado  $r$  ( $r+1$  bits)
    - $T(x)$ : mensaje a transmitir ( $m+r$  bits)
  - b. **En emisión:** se divide  $M(x)$  por  $G(x)$  (polinomio generador). El resto de la división ( $R(x)$ ) será la **redundancia**.

$$R(x) = \text{mod} \left( \frac{M(x) \cdot x^r}{G(x)} \right)$$

$$T(x) = M(x) \cdot x^r + R(x)$$

- i. Se desplaza  $M(x)$  a la izquierda  $r$  posiciones y se suma el resto de la división (**redundancia**).

ii. Polinomios generadores (G(x)) frecuentes:

- CRC-12:  $x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + x + 1$
- CRC-16:  $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$
- CRC-CCITT:  $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$
- CRC-32:  $x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + x + 1$

c. En recepción:

$$R'(x) = \text{mod} \left( \frac{T(x)}{G(x)} \right)$$

- i. Si  $R'(x) = 0$ , no se detectan errores.
- ii. Si  $R'(x) \neq 0$ , hay errores.

d. Ejemplo:

$M(X) = X^6 + X^3 + 1$        $G(X) = X^3 + X + 1$   
 $\begin{array}{r} 1001001000 \\ 1011 \\ \hline 001000 \\ 1011 \\ \hline 001110 \\ 1011 \\ \hline 01010 \\ 1011 \\ \hline 00010 = R(X) \end{array}$

$M(X) = 1001001$   
 $M(X) \cdot X^3 = 1001001000$   
 $T(X) = 1001001010$

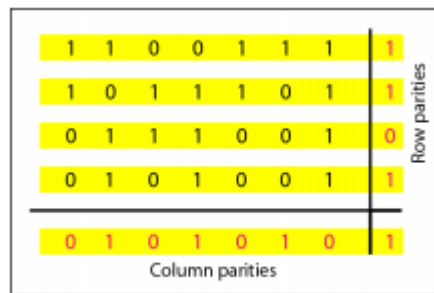
$\begin{array}{r} 1001001010 \\ 1011 \\ \hline 001000 \\ 1011 \\ \hline 001110 \\ 1011 \\ \hline 01011 \\ 1011 \\ \hline 00000 = R'(X) \rightarrow \text{CORRECTO} \end{array}$

e. Errores detectados:

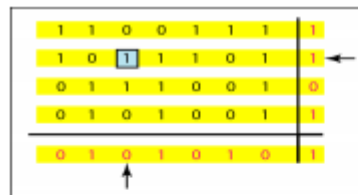
- Errores de un único bit
- Errores dobles, siempre que G(x) tenga al menos tres 1's
- Número impar de errores, siempre que G(x) tenga el factor (x+1)
- Ráfagas de errores de longitud menor que la longitud de G(x)
- La mayoría de las ráfagas de longitud mayor

v. Técnicas de corrección de errores:

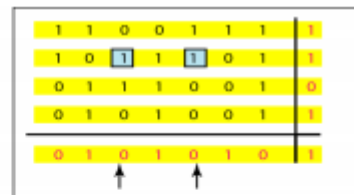
## 1. Códigos de doble paridad:



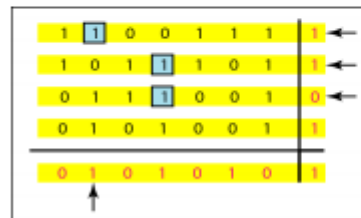
a. Design of row and column parities



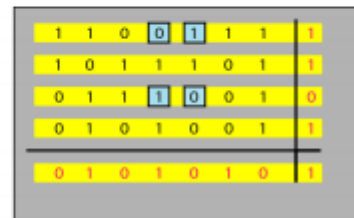
Corrige errores simples



Detecta errores dobles



Detecta errores triples



Ni detecta, ni corrige

a. **Errores corregidos:** solo corrige errores de bit (aislados).

2. **Distancia de Hamming ( $d(v_1, v_2)$ ):** número de bits en los que  $v_1$  y  $v_2$  no coinciden, siendo  $v_1$  y  $v_2$  secuencias binarias de  $r$  bits.

a. **Ejemplo:**  $d(11011, 10100) \rightarrow \text{XOR} \rightarrow 01001 \Rightarrow d = 2$

b. Para cada **código válido** se calcula la distancia de Hamming con el resto de códigos. De todos los cálculos, se extrae la **mínima distancia de Hamming ( $d_{\min}$ )**. En una transmisión errónea,  $d_{\min}$  permite garantizar que se pueden:

i. **Detectar hasta  $t$  errores**, siempre que  $d_{\min} = t + 1$

ii. **Corregir hasta  $t$  errores**, siempre que  $d_{\min} \geq 2t + 1$

c. **Ejemplo:** si la mínima distancia de Hamming es 3, podrán detectarse hasta 2 errores y podrá corregirse hasta 1 error.

Palabra	Código
000	000111
001	001100
010	010001
011	011010
100	100010
101	101001
110	110100
111	111111

i. La mínima distancia de Hamming se calcula entre **códigos (palabra + redundancia)**.

d. **Videos:** [\[1\]](#) [\[2\]](#) [\[3\]](#)

## 3. Códigos de Hamming:

a. **Transmisión:**  $m + r + 1 \leq 2^r$

i. Los bits en posiciones potencia de 2 serán **bits de paridad**.

b. **Ejemplo:** (15,11) Hamming Code

	1	0	1
	1	2	3
0	1	0	0
4	5	6	7
1	1	0	1
8	9	10	11
1	0	1	1
12	13	14	15

i. 15 bits transmitidos = 11 bits de mensaje + 4 bits de paridad

ii. **Bits de paridad (redundancia):**

1. **Posición 1 ( $2^0$ ):** comprueba bits 1,3,5,7,9,11,13,15.

a. Columnas 2 y 4.

2. **Posición 2 ( $2^1$ ):** comprueba bits 2,3,6,7,10,11,12,15.

a. Columnas 3 y 4.

3. **Posición 4 ( $2^2$ ):** comprueba bits 4,5,6,7,12,13,14,15.

a. Filas 2 y 4.

4. **Posición 8 ( $2^3$ ):** comprueba bits 8,9,10,11,12,13,14,15

a. Filas 3 y 4.