

# Planificación y Administración de Redes

## T.3 La capa física

# Índice

1. Introducción (4.1, 4.2)
2. Transmisión de datos
3. Medios de transmisión (4.3, 4.4, 4.5, 4.6)
4. Modulación, codificación y señales

# 1 Introducción

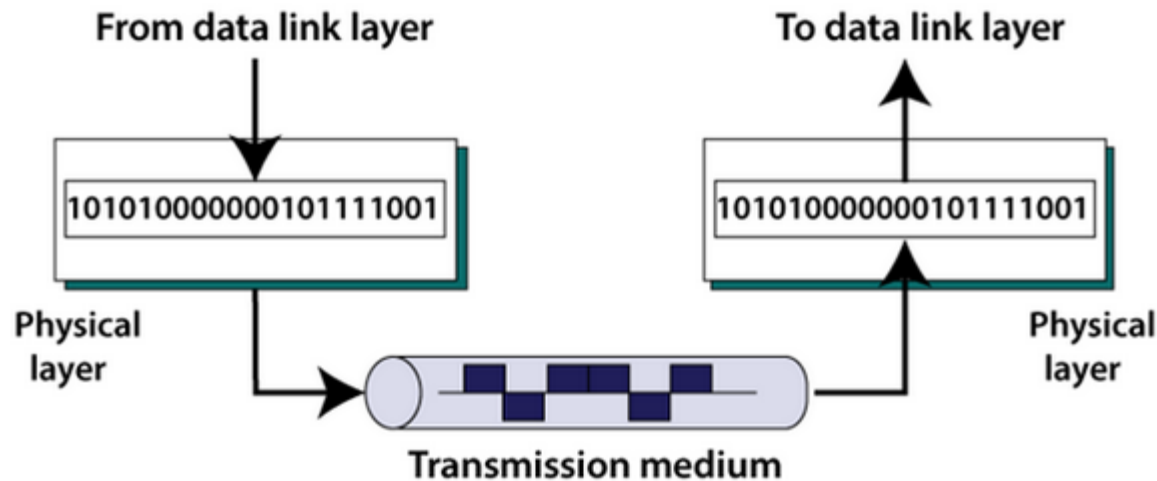
# Introducción

**El propósito de la capa física es llevar un flujo de datos (bits) desde un terminal a otro.**



# Introducción

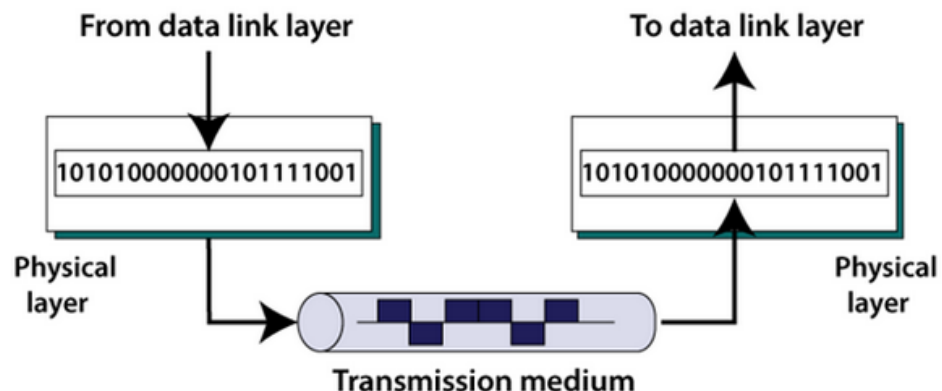
La transmisión de datos entre un emisor y un receptor siempre se realiza a través de un medio de transmisión.



# Introducción

**La capa física codifica las tramas y crea las señales eléctricas, ópticas o de ondas de radio que representan los bits en cada trama.**

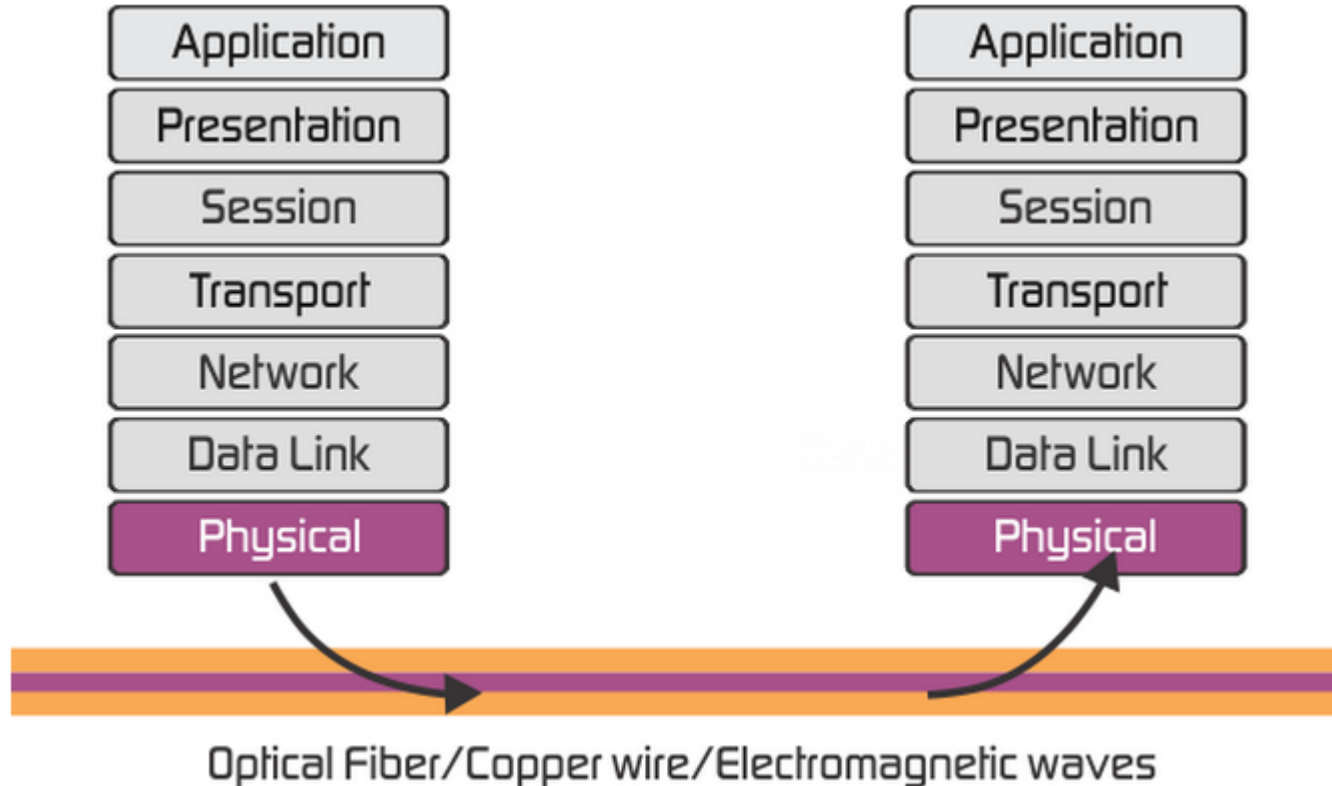
La capa física del nodo de destino recupera estas señales individuales de los medios, las restaura a sus representaciones en bits y pasa los bits a la capa de enlace de datos en forma de trama completa.



# **1.1 Medios de transmisión**

# Medios de transmisión

Los medios de transmisión se pueden clasificar como **guiados** y **no guiados**. En ambos casos, la comunicación se realiza usando ondas electromagnéticas.





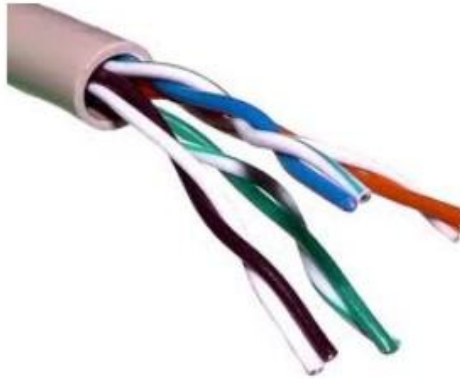
# Medios de transmisión

En los **medios guiados**, por ejemplo en pares trenzados, en cables coaxiales y en fibras ópticas, las ondas se transmiten confinándolas a lo largo de un camino físico.

Cable  
coaxial



Cable Par  
trenzado

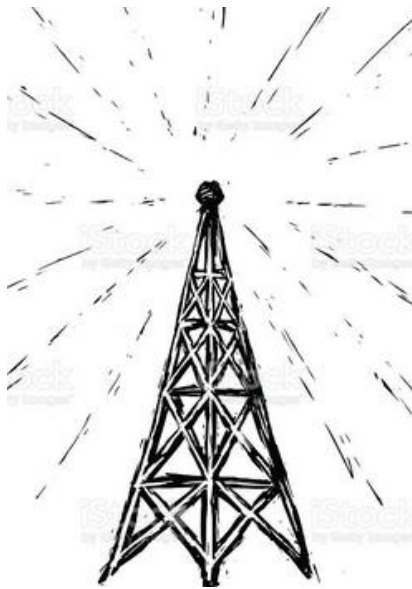


Fibra  
óptica



# Medios de transmisión

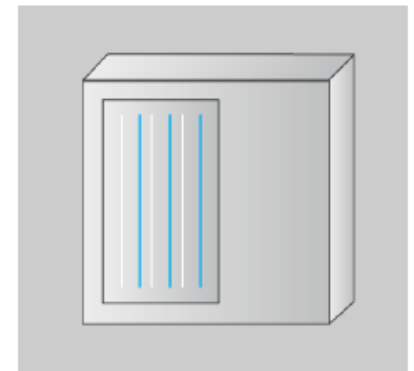
Por el contrario, los medios **no guiados**, también denominados **inalámbricos**, proporcionan un medio para **transmitir las ondas electromagnéticas sin confinarlas**, como por ejemplo en la propagación a través del aire, el mar o el vacío.



# Medios de transmisión

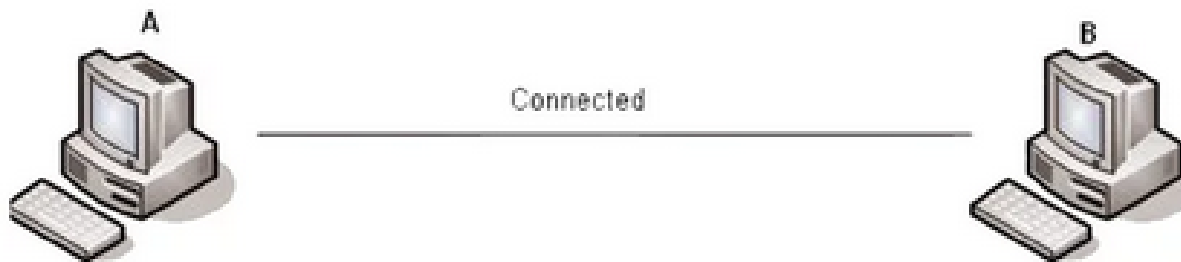
El término **enlace directo** se usa para designar un camino de transmisión entre dos dispositivos en el que la señal se propague directamente del emisor al receptor sin ningún otro dispositivo intermedio que no sea un amplificador o repetidor.

Estos últimos se usan para incrementar la energía de la señal. Este término se puede aplicar tanto a medios guiados como no guiados.



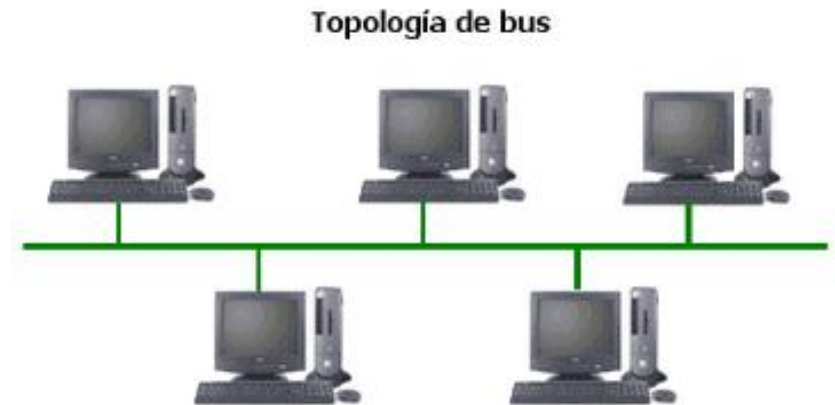
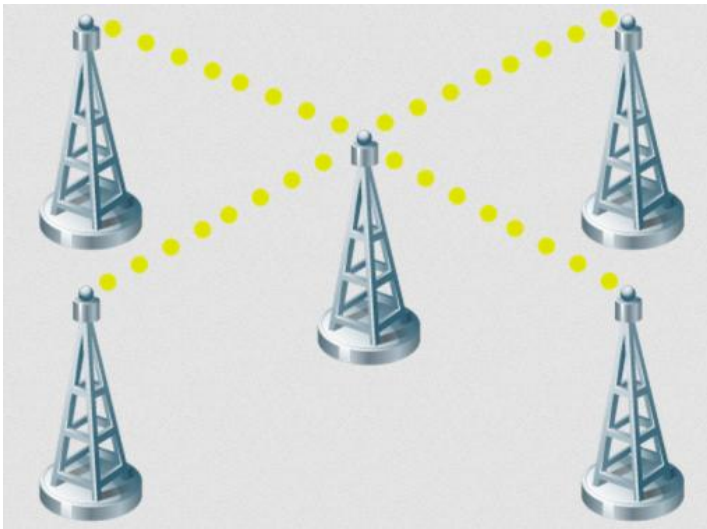
# Medios de transmisión

Un medio de transmisión guiado es **punto a punto** si **proporciona un enlace directo entre dos dispositivos** que comparten el medio, no existiendo ningún otro dispositivo conectado.



# Medios de transmisión

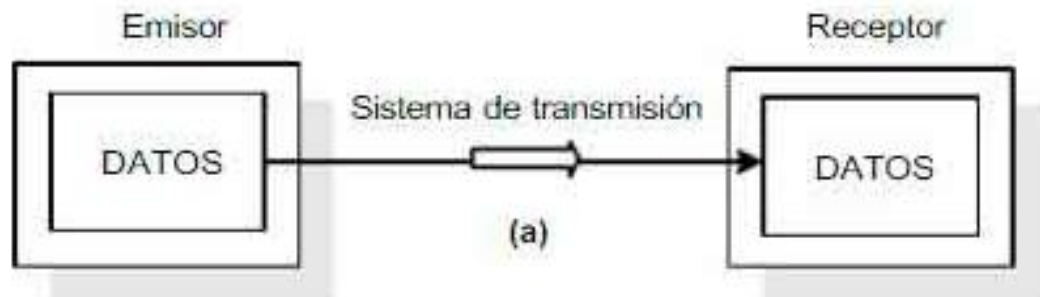
En una configuración guiada **multipunto**, el mismo medio es compartido por más de dos dispositivos.



# Medios de transmisión

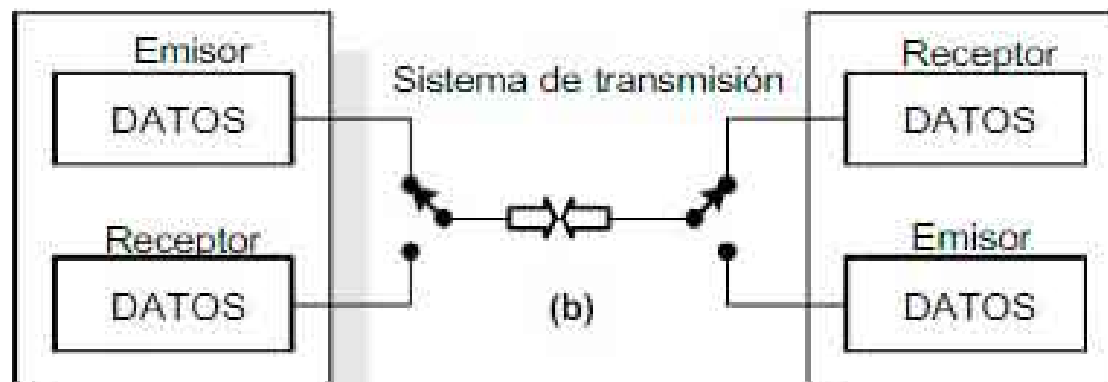
Un medio de transmisión puede ser **simplex**, **half-duplex** o **full-duplex**.

En la transmisión **simplex**, las señales se transmiten sólo en una única dirección; siendo una estación la emisora y otra la receptora.



# Medios de transmisión

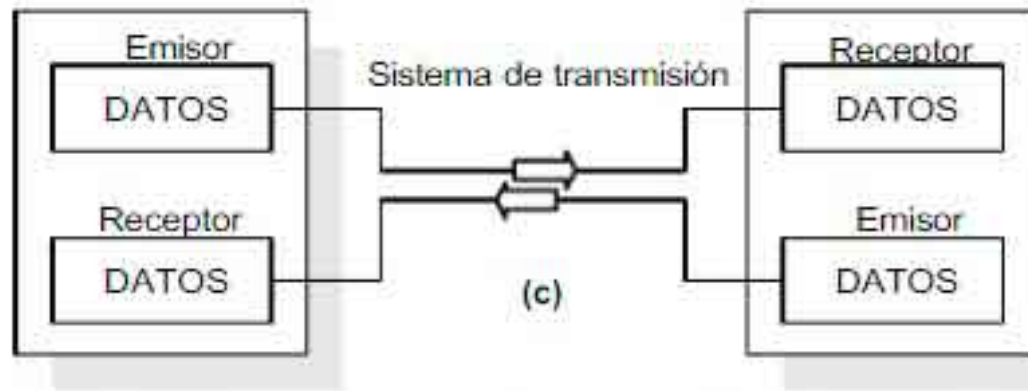
En half-duplex, ambas estaciones pueden transmitir, pero **no simultáneamente**



# Medios de transmisión

En *fullduplex*, ambas estaciones pueden igualmente **transmitir y recibir**, pero ahora **simultáneamente**.

En este último caso, el medio transporta señales en ambos sentidos al mismo tiempo. Posteriormente

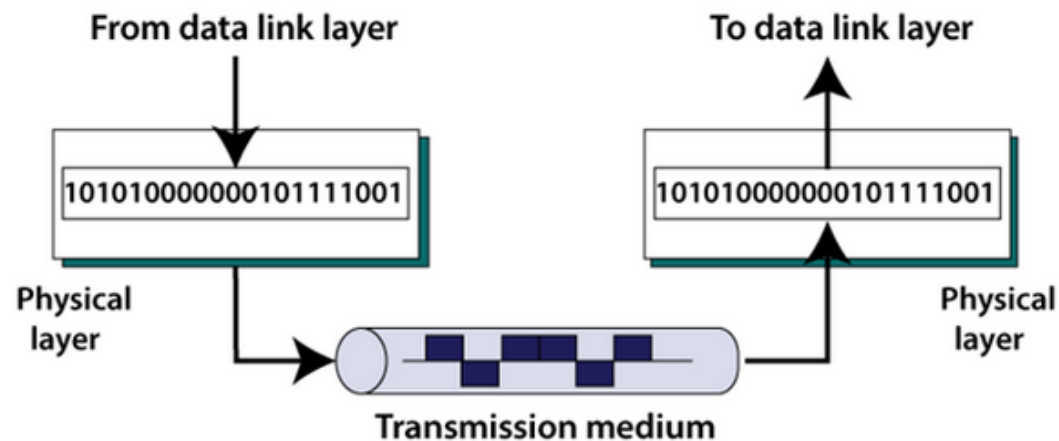




## **1.2 Tipos de señales**

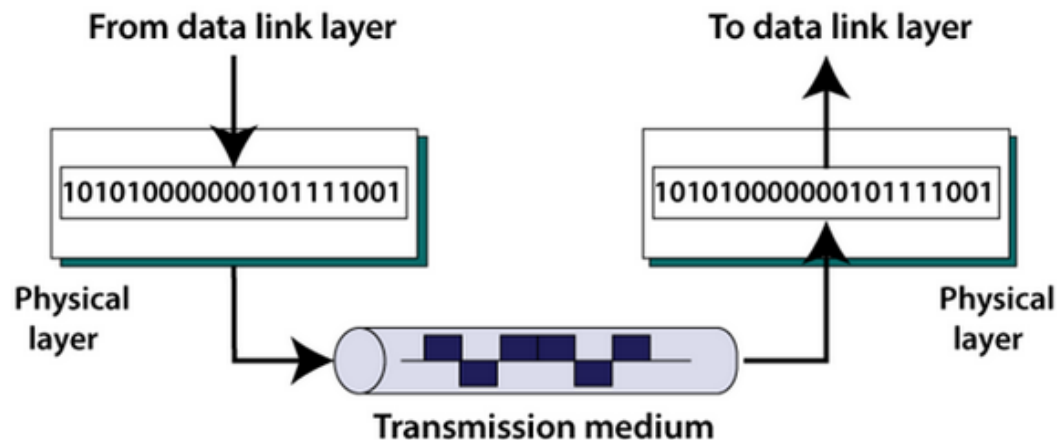
# Tipos de señales

La capa física recibe de la capa de enlace una trama con los **datos a transmitir, codificados en un conjunto de bits**; por tanto, la capa física **debe convertir estos bits para que puedan ser transmitidos por el medio físico**. Por tanto, será responsabilidad de la capa física convertir los bits a la señal de que corresponde al medio físico usado, y debe convertir los bits a una señal óptica, eléctrica o de microondas.



# Tipos de señales

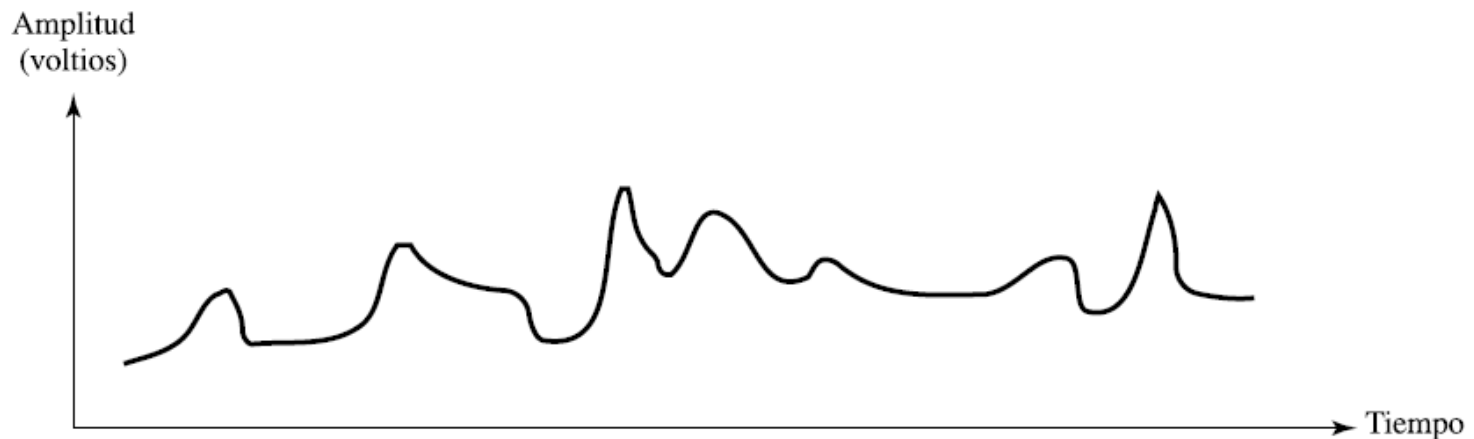
Este procedimiento explicado corresponde al emisor pero también **la capa física es responsable de hacer el procedimiento a la inversa en el caso del receptor, convertir la señal analógica (óptica, eléctrica o de microondas) a digital (bits), ya que debe pasar la trama en formato digital hacia la capa de enlace.**



# Tipos de señales

Toda señal electromagnética, considerada como función del tiempo, puede ser tanto analógica como digital.

Una **señal analógica** es cualquier señal continua en tiempo y amplitud, las variaciones de los valores de la señal son las variaciones de la información del señal.



(a) Analógica

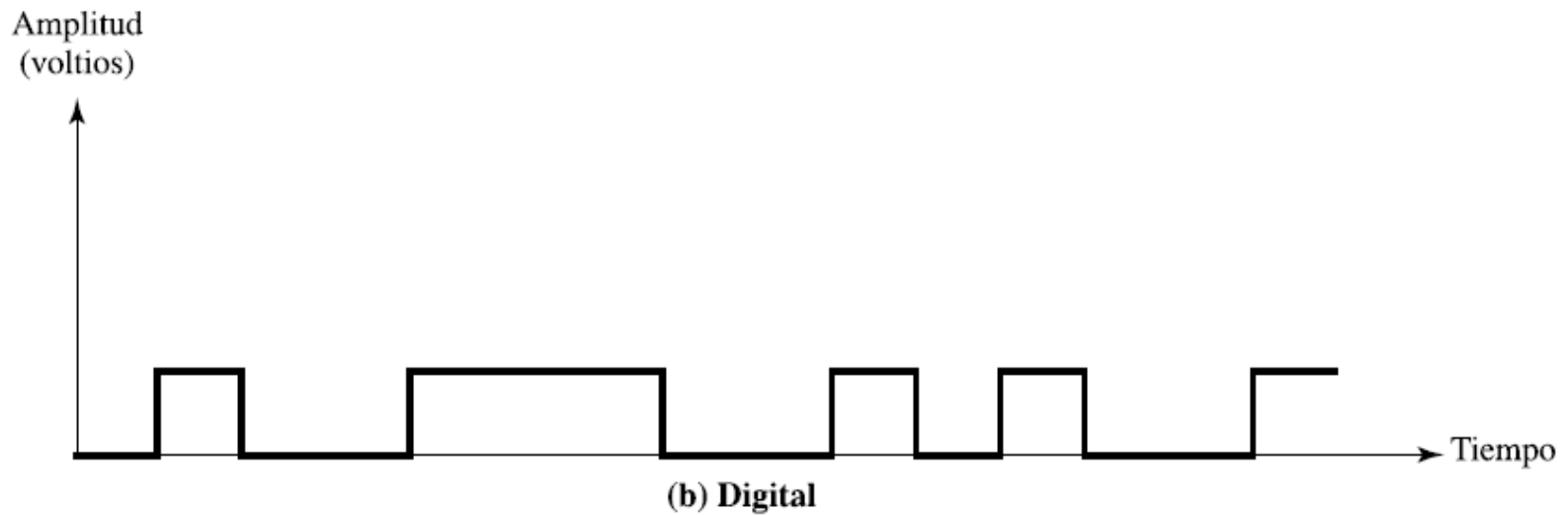
# Tipos de señales

Una **señal digital** es aquella en la que las magnitudes se representan mediante valores discretos en lugar de variables continuas.

Un valor discreto es aquel que se puede representar por un conjunto de valores de dos estados, por ejemplo, el interruptor de la luz sólo puede tomar dos valores o estados: abierto o cerrado, o la misma luz: encendido o apagado.

Un señal digital se transmite habitualmente como un señal por pulsos.

# Tipos de señales



## **2 Transmisión de datos**

# Transmisión de datos

Las **señales periódicas** se caracterizan por contener un patrón que se repite a lo largo del tiempo. Matemáticamente, una señal  $s(t)$  se dice periódica si y solamente si:

$$s(t + T) = s(t) \quad -\infty < t < +\infty$$



# Transmisión de datos

La onda seno es una de las señales periódicas por antonomasia. Una onda seno genérica se representa mediante tres parámetros: la amplitud ( $A$ ), *la frecuencia ( $f$ ) y la fase ( $\phi$ )*. **La *amplitud* de pico es el valor máximo de la señal en el tiempo; normalmente, este valor se mide en voltios.**

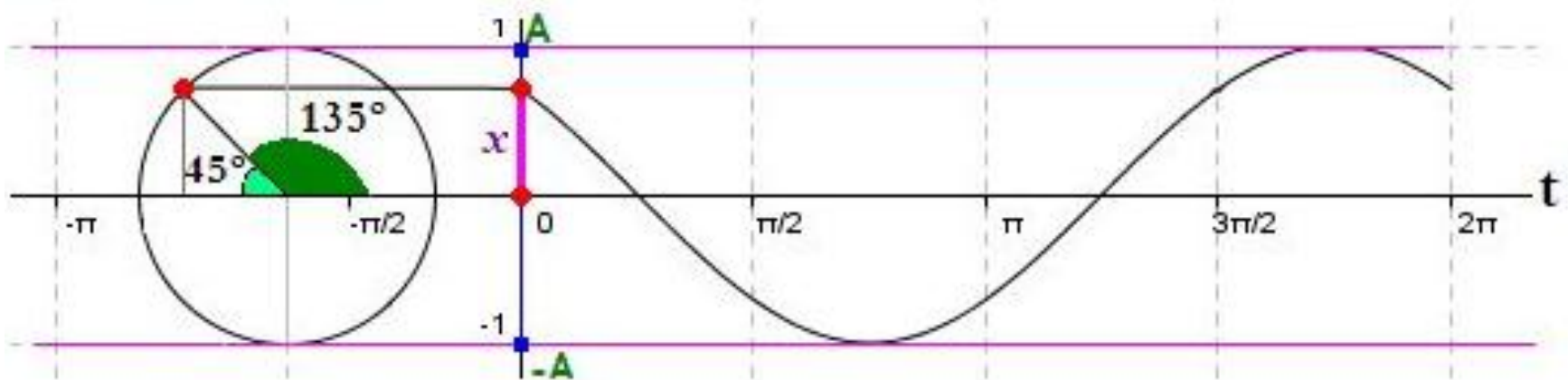
**La frecuencia es la razón (en ciclos por segundo o Hercios (Hz)) a la que la señal se repite. Un parámetro equivalente es el periodo ( $T$ ), *definido como la cantidad de tiempo transcurrido entre* dos repeticiones consecutivas de la señal; por tanto, se verifica que  $T=1/f$ . **La *fase es una medida* de la posición relativa de la señal dentro de un periodo de la misma.****

# Transmisión de datos

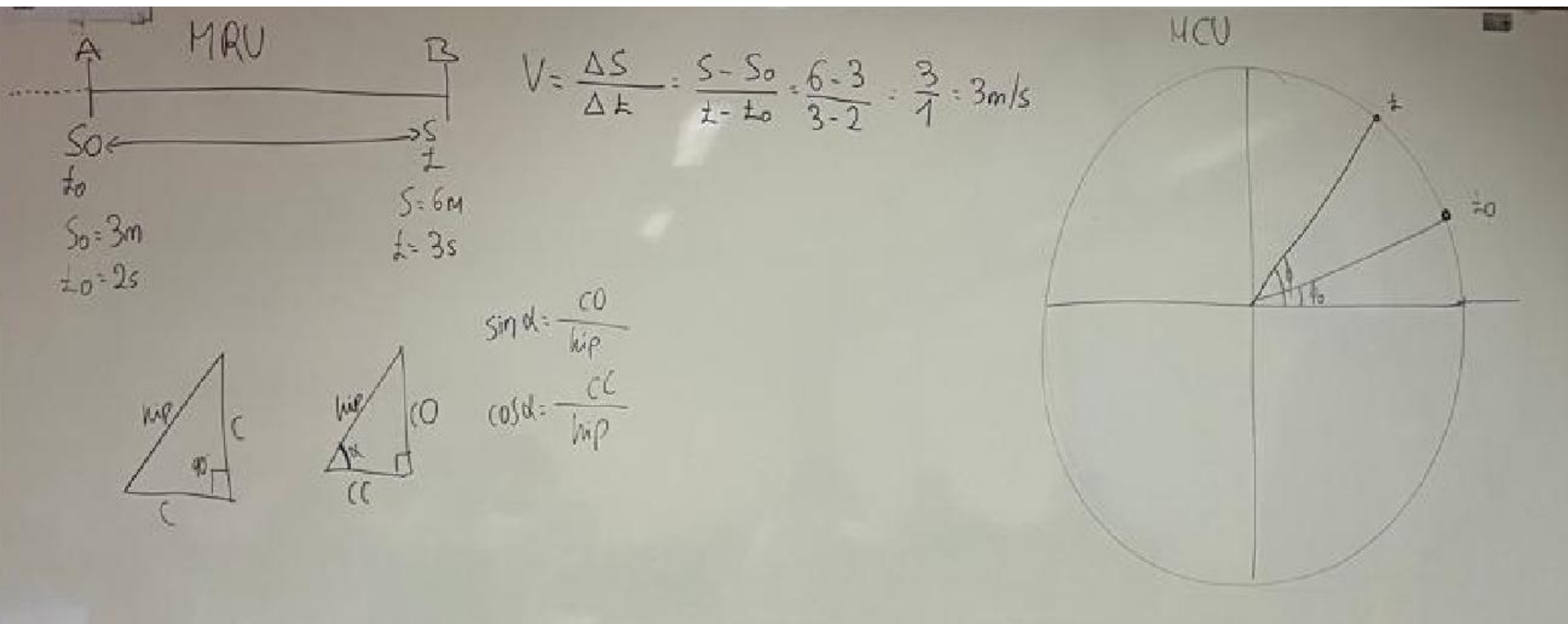
El origen se considera normalmente como el último cruce por cero desde un valor negativo a uno positivo.

La expresión genérica para una onda sinusoidal es:

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



# Transmisión de datos



# Transmisión de datos

MRU  $V = \frac{\Delta S}{\Delta t} \rightarrow$  MCU  $\omega = \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{\phi - \phi_0}{t - t_0} \rightarrow \omega = \frac{\phi - \phi_0}{t}$

$\omega = \frac{2\pi}{T}$  ;  $T = \frac{1}{f}$  ;  $f = \frac{1}{T}$  ;  $R = A$

$s(t) = R \cdot \sin \phi$

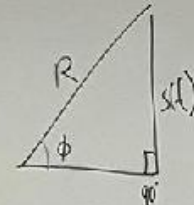
$R = A$

$s(t) = A \cdot \sin \phi$

$s(t) = A \cdot \sin(\omega t + \phi_0) \rightarrow$

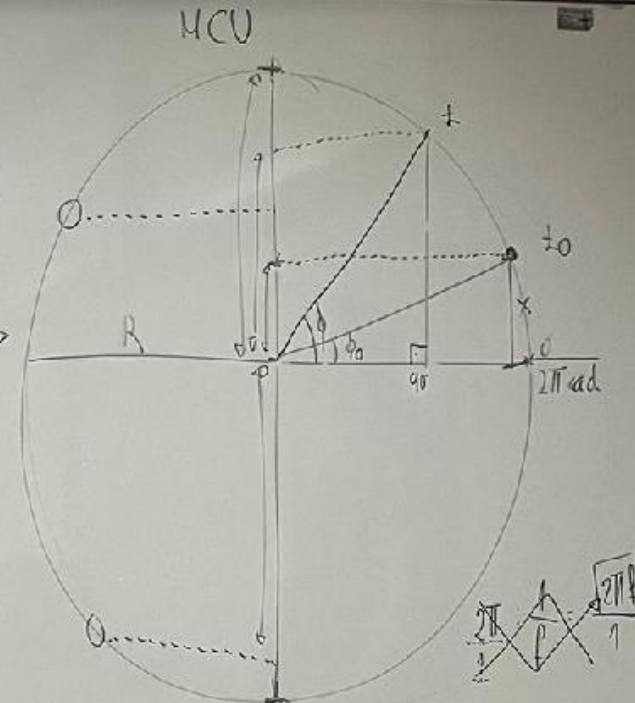
$\omega = \frac{\phi - \phi_0}{t} \rightarrow \omega t = \frac{\phi - \phi_0}{t} \cdot t \rightarrow \phi = \omega t + \phi_0$

$s(t) = A \cdot \sin(\omega t + \phi_0)$   
 $\omega = \frac{2\pi}{T}$   
 $T = \frac{1}{f}$   
 $s(t) = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \phi_0\right)$   
 $s(t) = A \cdot \sin\left(2\pi f t + \phi_0\right)$

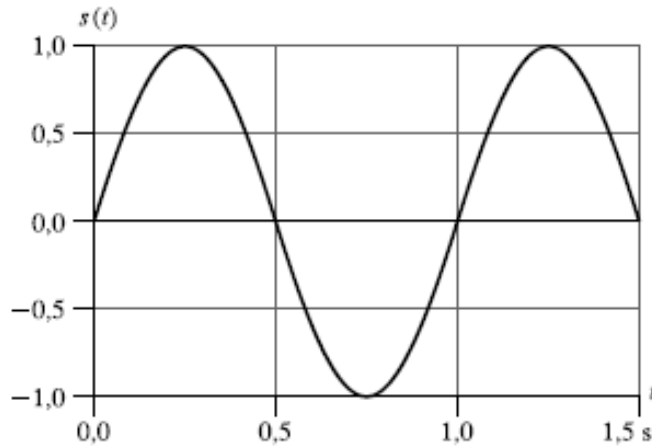


$\sin \phi = \frac{CO}{hip} = \frac{s(t)}{R}$

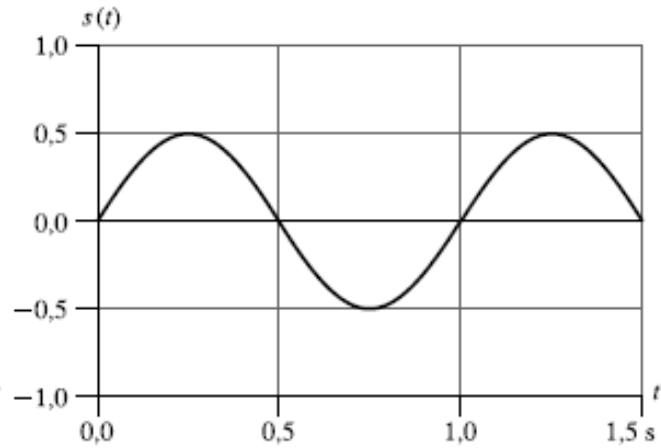
$\sin \phi = \frac{s(t)}{R}$   
 $s(t) = R \cdot \sin \phi$



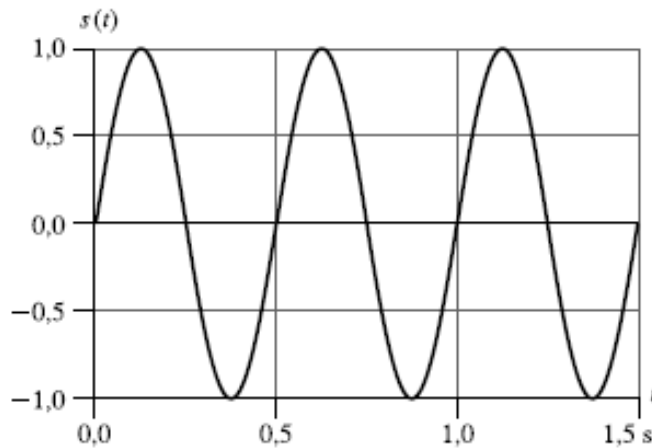
# Transmisión de datos



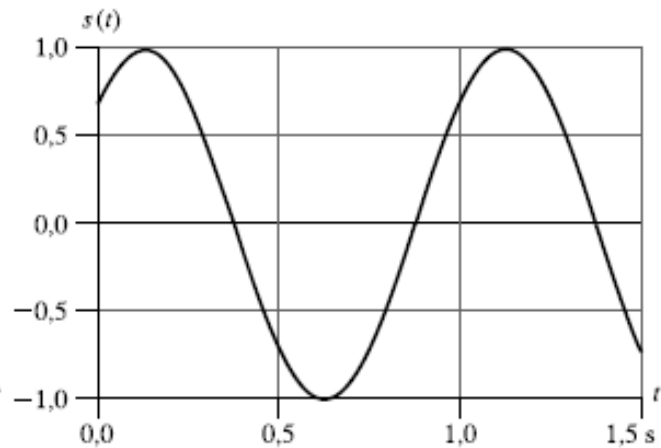
(a)  $A = 1, f = 1, \phi = 0$



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



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

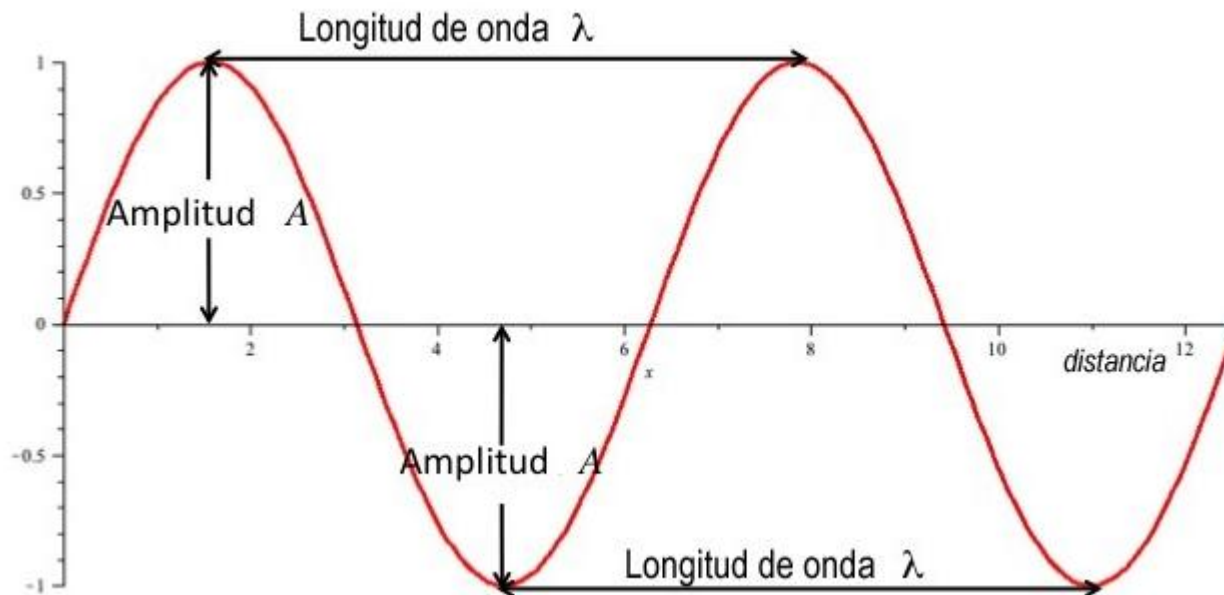


(d)  $A = 1, f = 1, \phi = \pi/4$

# Transmisión de datos

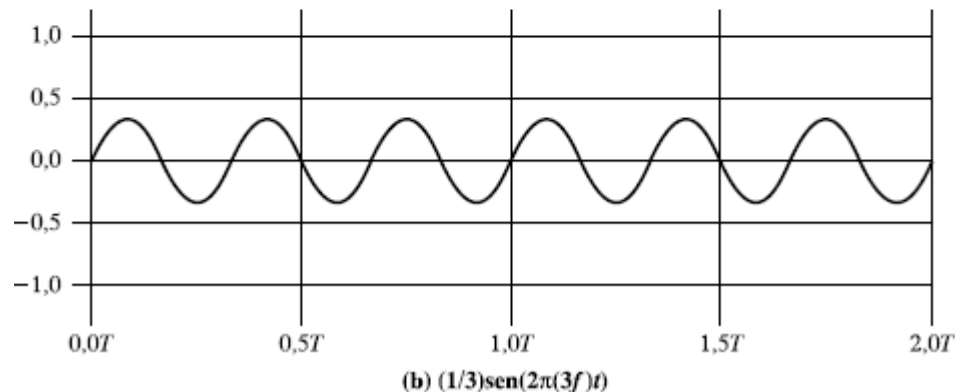
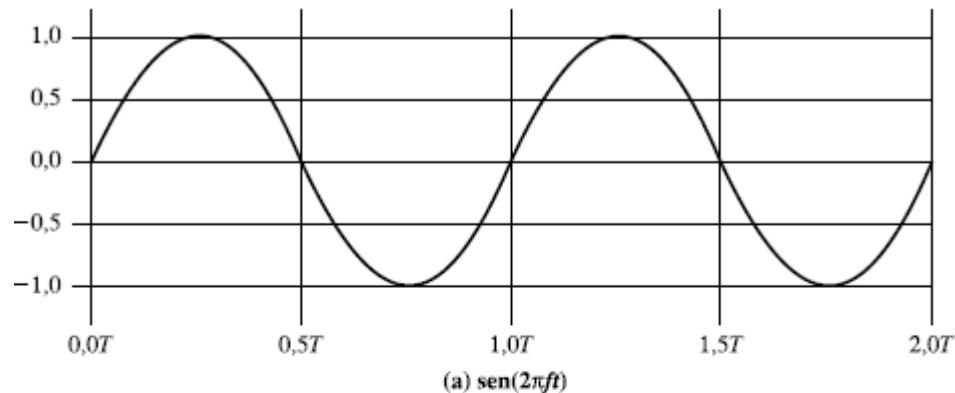
Dada una señal, se define la **longitud de onda**,  $\lambda$ , como la distancia entre dos puntos de igual fase en dos ciclos consecutivos.

$$\lambda f = v ; \lambda = v / f$$



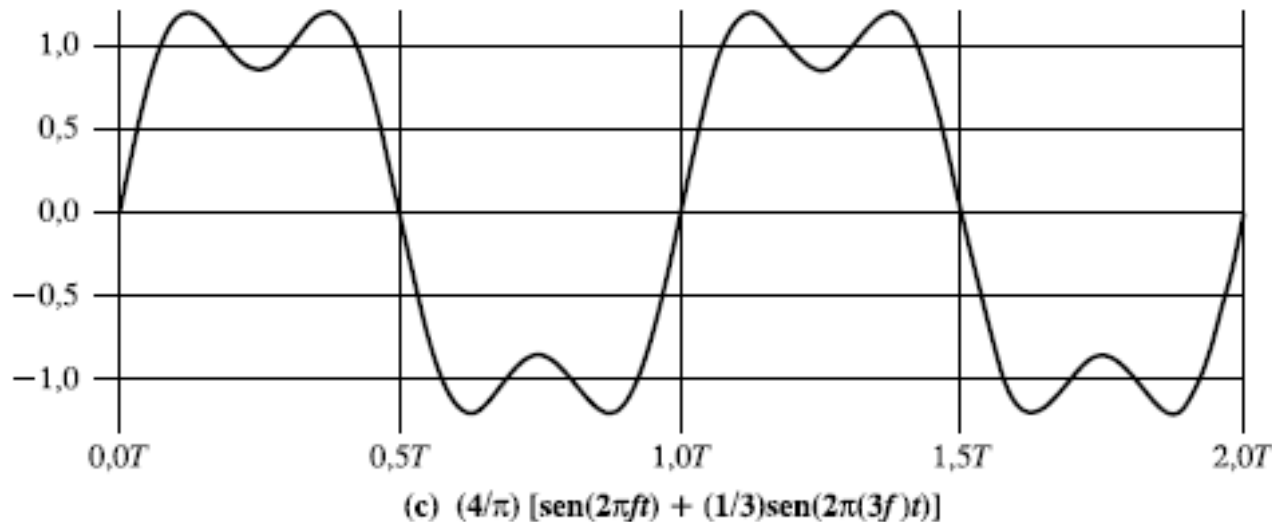
# Transmisión de datos

En la práctica, las señales electromagnéticas pueden estar compuestas de muchas frecuencias.



# Transmisión de datos

En la práctica, las señales electromagnéticas pueden estar compuestas de muchas frecuencias.





# Transmisión de datos

A principios del siglo XIX, el matemático francés Jean-Baptiste Fourier demostró que **cualquier función periódica**,  $g(t)$  con un periodo  $T$ , **se puede construir como la suma de un número (posiblemente infinito) de senos y cosenos:**

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

en donde  $a_n$  y  $b_n$  son las amplitudes de seno y coseno del  $n$ -ésimo término. A dicha descomposición se le denomina **serie de Fourier**. **Podemos reconstruir la función a partir de la serie de Fourier.**

# Transmisión de datos

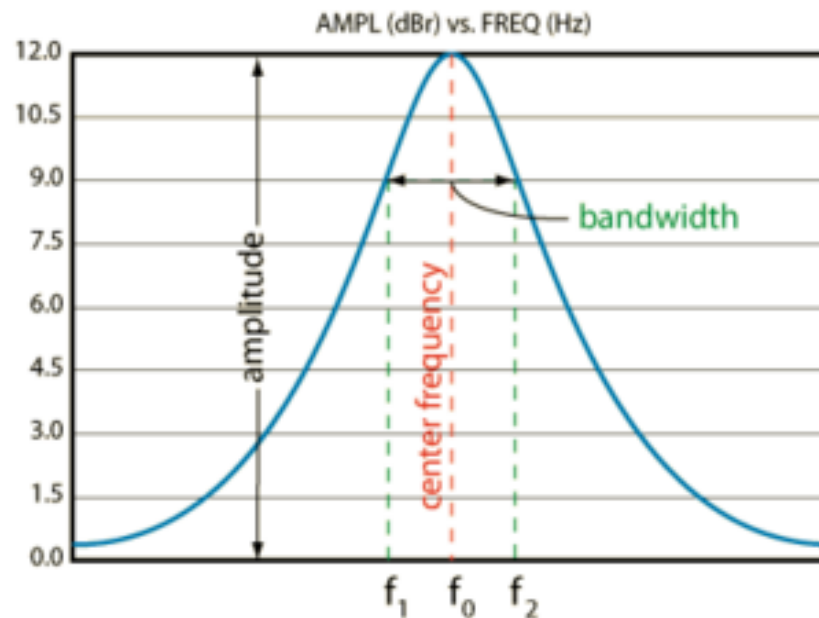
**La relevancia de todo esto para la comunicación de datos es que los canales reales afectan a las distintas señales de frecuencia de manera diferente.**

Ninguna instalación transmisora puede enviar señales **sin perder cierta potencia** en el proceso. Si todos los componentes de Fourier disminuyeran en la misma proporción, la señal resultante se reduciría en amplitud pero no se distorsionaría. Por desgracia, todas las instalaciones transmisoras disminuyen los componentes de Fourier en distinto grado y, en consecuencia, introducen **distorsión**.

# Transmisión de datos

Se define el **espectro de una señal** como el conjunto de **frecuencias que la constituyen**. Se define el **ancho de banda absoluto** de una señal como la anchura del espectro.

El rango de frecuencia que se transmite sin una atenuación considerable se denomina **ancho de banda**.



# Transmisión de datos

El **ancho de banda** es una propiedad física del medio de transmisión que **depende**; por ejemplo, de la construcción, el grosor y la longitud de un cable o fibra óptica.

Las señales que van desde cero hasta una frecuencia máxima se llaman señales de **banda base**.

**Las que se desplazan para ocupar un rango de frecuencias más altas, como es el caso de todas las transmisiones inalámbricas, se llaman señales de pasa-banda.**

# Transmisión de datos

Para los ingenieros eléctricos, el **ancho de banda (analógico)** es una cantidad que **se mide en Hz**.

Para los científicos de computadora, el **ancho de banda (digital)** es la **tasa de datos máxima de un canal**, una cantidad que se mide en bits/segundo.

Esa tasa de datos es el resultado final de usar el ancho de banda analógico de un canal físico para transmisión digital, y **ambos están relacionados**.

## **2.1 Dificultades en la transmisión**

# Dificultades en la transmisión

En cualquier sistema de comunicaciones se debe aceptar que **la señal que se recibe diferirá de la señal transmitida debido a varias adversidades y dificultades sufridas en la transmisión.**

En las **señales analógicas**, estas dificultades pueden **degradar la calidad de la señal.**

En las **señales digitales**, se generarán **bits erróneos.**

# Dificultades en la transmisión

Las **dificultades** más significativas son:

- La atenuación y la distorsión de atenuación.
- La distorsión de retardo.
- El ruido.



# Dificultades en la transmisión

## Atenuación

En cualquier medio de transmisión la energía de la señal decae con la distancia.

En **medios guiados**, esta reducción de la energía es por lo general **exponencial** y, por tanto, se expresa generalmente como un número constante en decibelios por unidad de longitud.

En **medios no guiados**, la atenuación es una función más compleja de la distancia y es dependiente, a su vez, de las condiciones atmosféricas.

# Dificultades en la transmisión

## Atenuación

Se pueden establecer **tres consideraciones** respecto a la atenuación.

Primera, la señal recibida debe tener suficiente energía para que la circuitería electrónica en el receptor pueda detectar la señal adecuadamente.

Segunda, para ser recibida sin error, la señal debe conservar un nivel suficientemente mayor que el ruido.

Tercera, la atenuación es habitualmente una función creciente de la **frecuencia**.

# Dificultades en la transmisión

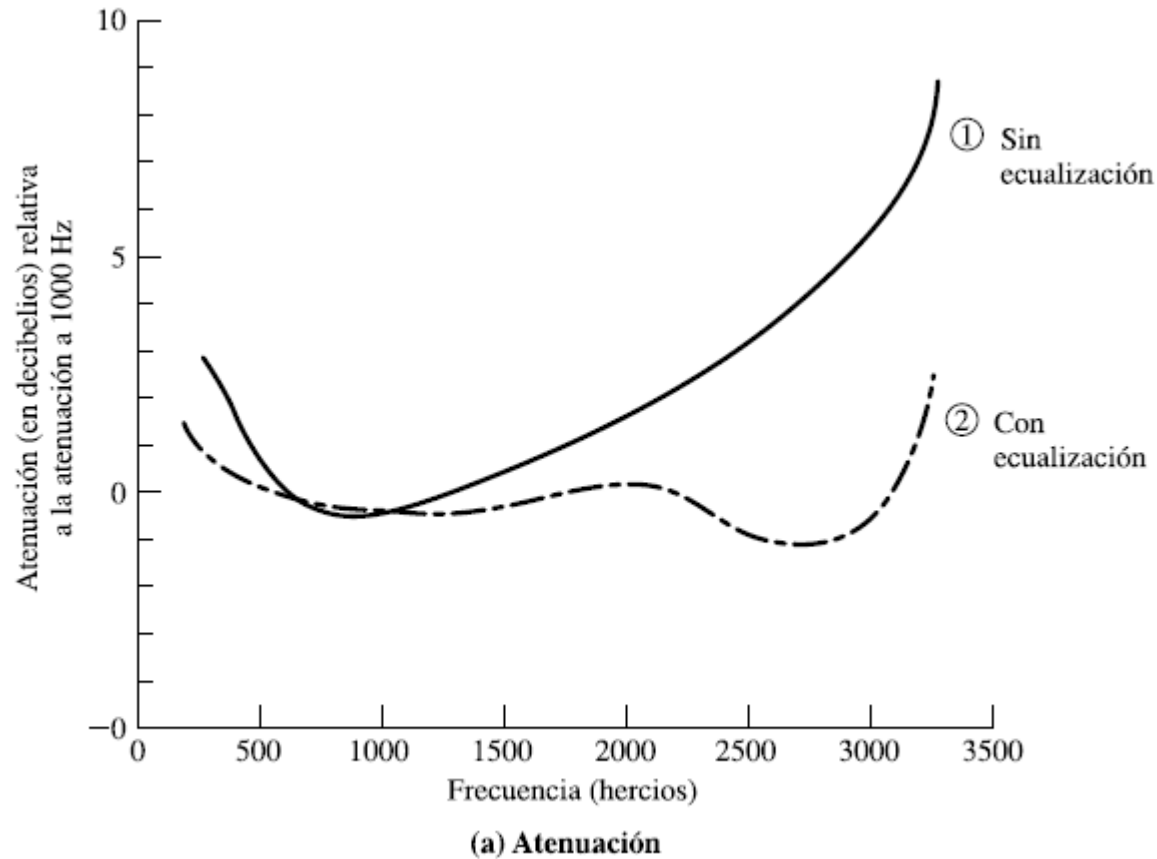
## Atenuación

Los dos primeros problemas se resuelven controlando la energía de la señal, para ello se usan **amplificadores** o repetidores.

El tercer problema es especialmente relevante para el caso de las señales analógicas. Debido a que la atenuación varía en función de la frecuencia, **la señal recibida está distorsionada, reduciendo así la inteligibilidad**. Para soslayar este problema, existen técnicas para **ecualizar la atenuación en una banda de frecuencias dada**.

# Dificultades en la transmisión

## Atenuación



# Dificultades en la transmisión

## Distorsión de retardo

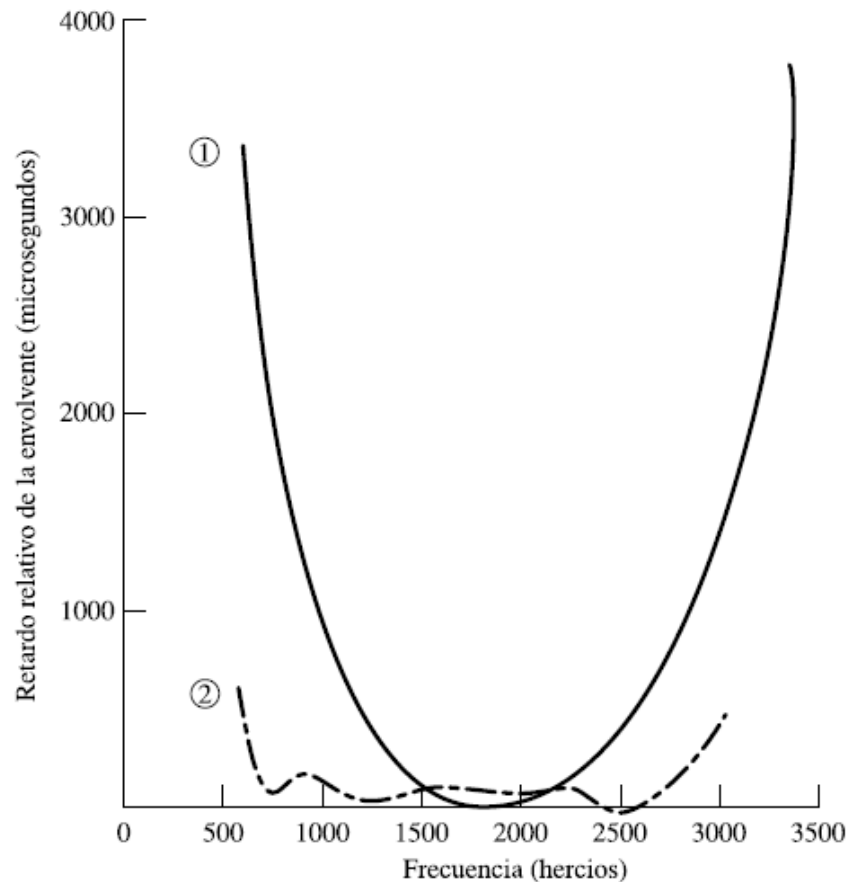
La distorsión de retardo es un fenómeno debido a que **la velocidad de propagación de una señal a través de un medio guiado varía con la frecuencia.**

Por tanto, las distintas componentes en frecuencia de la señal llegarán al receptor en instantes diferentes de tiempo, dando lugar a desplazamientos de fase entre las diferentes frecuencias.

Para compensar la distorsión de retardo también se pueden emplear técnicas de **ecualización**.

# Dificultades en la transmisión

## Distorsión de retardo



(b) Distorsión de retardo

# Dificultades en la transmisión

## Ruido

Para cualquier dato transmitido, la señal recibida consistirá en la señal transmitida modificada por las distorsiones introducidas en la transmisión, además de señales no deseadas que se insertarán en algún punto entre el emisor y el receptor.  
**A estas últimas señales no deseadas se les denomina ruido.**

El ruido es el factor de mayor importancia de entre los que limitan las prestaciones de un sistema de comunicación.

# Dificultades en la transmisión

## Ruido

La señal de ruido se puede clasificar en **cuatro categorías**:

- Ruido térmico.
- Ruido de intermodulación.
- Diafonía.
- Ruido impulsivo.



# Dificultades en la transmisión

## Ruido térmico

**El ruido térmico se debe a la agitación térmica de los electrones. Está presente en todos los dispositivos electrónicos y medios de transmisión; como su nombre indica, es función de la temperatura.**

El ruido térmico **no se puede eliminar** y, por tanto, impone un límite superior en las prestaciones de los sistemas de comunicación. Es **especialmente dañino en las comunicaciones satelitales.**

# Dificultades en la transmisión

## Ruido térmico

El ruido térmico presente en un ancho de banda de  $B$  hercios se puede expresar como:

$$N = kTB$$

$k$  = constante de Boltzmann =  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K.

$T$  = temperatura absoluta, en grados Kelvin.

o, expresado en decibelios-watio,

$$\begin{aligned} N &= 10 \log k + 10 \log T + 10 \log B \\ &= -228,6 \text{ dBW} + 10 \log T + 10 \log B \end{aligned}$$

# Dificultades en la transmisión

## Ruido térmico

Dado un receptor con una temperatura efectiva de ruido de 294 K y un ancho de banda de 10 MHz. Calcula el ruido térmico:

① Ruido térmico  
 $T = 294 \text{ K}$   
 $B = 10 \text{ MHz} = 10 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 10^7 \text{ Hz}$

$$N(\text{dBW}) = -228.6 + 10 \log T + 10 \log B$$
$$N(\text{dBW}) = -228.6 + 10 \log 294 + 10 \log 10^7$$
$$N(\text{dBW}) = -133.9 \text{ dBW}$$

# Dificultades en la transmisión

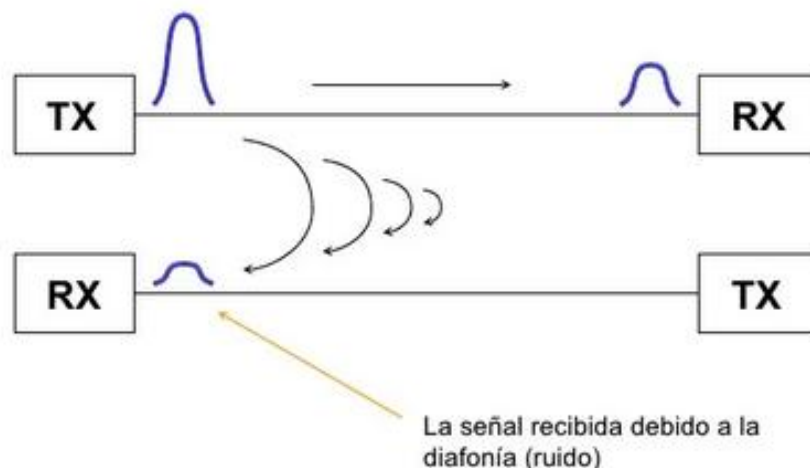
## Ruido de intermodulación

Cuando señales de distintas frecuencias comparten el mismo medio de transmisión puede producirse **ruido de intermodulación**.

# Dificultades en la transmisión

## Diafonía

La **diafonía** se trata de un **acoplamiento no deseado entre las líneas que transportan las señales**. Esto puede ocurrir por el acoplamiento eléctrico entre cables de pares cercanos o, en raras ocasiones, en líneas de cable coaxial que transporten varias señales. La diafonía también puede aparecer cuando las señales no deseadas se captan en las antenas de microondas.



# Dificultades en la transmisión

## Ruido impulsivo

El **ruido impulsivo** no es continuo y está constituido por pulsos o picos irregulares de corta duración y de amplitud relativamente grande.

Se generan por una gran diversidad de causas, por ejemplo, por perturbaciones electromagnéticas exteriores producidas por tormentas atmosféricas o por fallos y defectos en los sistemas de comunicación.

## **2.2 Capacidad del canal**

# Capacidad del canal

Hay una gran variedad de efectos nocivos que distorsionan o corrompen la señal. Para los datos digitales, la cuestión a resolver es en qué medida estos defectos limitan la velocidad con la que se pueden transmitir.

Se denomina capacidad del canal a la velocidad máxima a la que se pueden transmitir los datos en un canal, o ruta de comunicación de datos, bajo unas condiciones dadas.



# Capacidad del canal

Hay cuatro conceptos en juego relacionados entre sí, que son:

- **La velocidad de transmisión de los datos:** velocidad, expresada en bits por segundo (bps), a la que se pueden transmitir los datos.
- **El ancho de banda:** ancho de banda de la señal transmitida; éste estará limitado por el transmisor y por la naturaleza del medio de transmisión; se mide en ciclos por segundo o hercios.
- **El ruido:** nivel medio de ruido a través del camino de transmisión.
- **La tasa de errores:** tasa a la que ocurren los errores. Se considera que ha habido un error cuando se recibe un 1 habiendo transmitido un 0, o se recibe un 0 habiendo transmitido un 1.

# Capacidad del canal

Las limitaciones surgen de las propiedades físicas de los medios de transmisión o por limitaciones que se imponen deliberadamente en el transmisor para prevenir interferencias con otras fuentes.

En el caso de los datos digitales, esto significa que dado un ancho de banda sería deseable conseguir la mayor velocidad de datos posible no superando la tasa de errores permitida. El mayor inconveniente para conseguir este objetivo es la existencia de ruido.

# Capacidad del canal

## ANCHO DE BANDA DE NYQUIST

Considérese el caso de un canal exento de ruido. la velocidad de transmisión de datos que se puede conseguir con  $B$  Hz es:

$$C=2B \log_2 M$$

donde  $M$  es el número de señales discretas o niveles de tensión.

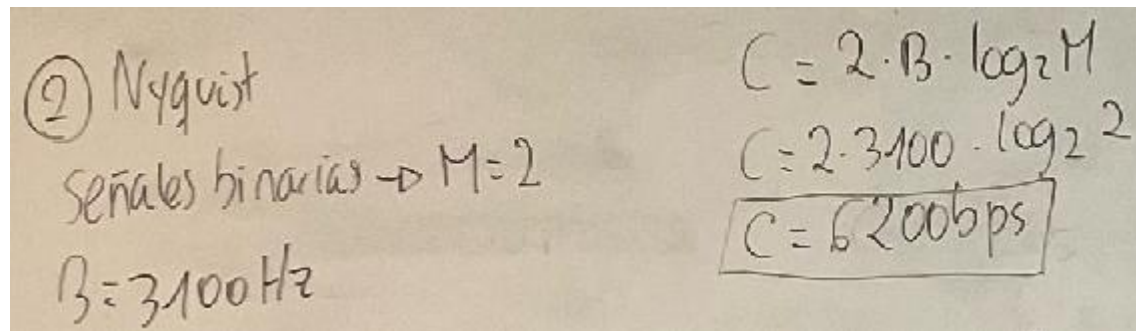
Por tanto, para un ancho de banda dado, la velocidad de transmisión de datos se puede incrementar considerando un número mayor de señales diferentes.

La fórmula de Nyquist implica que al duplicar el ancho de banda se duplica la velocidad de transmisión, si todo lo demás se mantiene inalterado.

# Capacidad del canal

## ANCHO DE BANDA DE NYQUIST

Supongamos un canal de voz que transmite señales binarias. El canal tiene un ancho de banda de 3100Hz. Calcula la capacidad máxima del canal.



Handwritten calculation on a piece of paper:

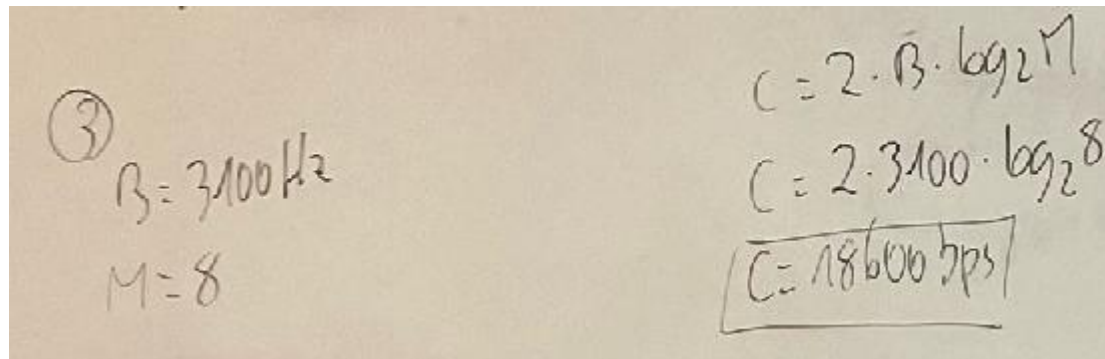
② Nyquist  
Señales binarias  $\rightarrow M=2$   
 $B=3100 \text{ Hz}$

$$C = 2 \cdot B \cdot \log_2 M$$
$$C = 2 \cdot 3100 \cdot \log_2 2$$
$$C = 6200 \text{ bps}$$

# Capacidad del canal

## ANCHO DE BANDA DE NYQUIST

Supongamos un canal de voz que transmite señales de 8 niveles. Calcula la capacidad máxima del canal si el ancho de banda es de 3100Hz.



Handwritten calculation on a piece of paper:

③  $B = 3100 \text{ Hz}$   
 $M = 8$

$C = 2 \cdot B \cdot \log_2 M$   
 $C = 2 \cdot 3100 \cdot \log_2 8$   
 $C = 18600 \text{ bps}$

# Capacidad del canal

## FÓRMULA PARA LA CAPACIDAD DE SHANNON

Ahora establezcamos una relación entre la velocidad de transmisión, el ruido y la tasa de errores. La presencia de ruido puede corromper uno o más bits. Si se aumenta la velocidad de transmisión, el bit se hace más «corto», de tal manera que dado un patrón de ruido, éste afectará a un mayor número de bits.

Así pues, **dado un nivel de ruido, cuanto mayor es la velocidad de transmisión, mayor es la tasa de errores.**

# Capacidad del canal

## FÓRMULA PARA LA CAPACIDAD DE SHANNON

Dado un nivel de ruido, es de esperar que incrementando la energía de la señal se mejoraría la recepción de datos en presencia de ruido. Un parámetro fundamental en el desarrollo de este razonamiento es la **relación señal-ruido (SNR)** que se define como el **cociente de la potencia de la señal entre la potencia del ruido presente en un punto determinado en el medio de transmisión.** Generalmente, este cociente se mide en el receptor, ya que es aquí donde se realiza el procesamiento de la señal y la eliminación del ruido no deseado. Por cuestiones de comodidad, la SNR se expresa en decibelios:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\text{potencia de señal}}{\text{potencia de ruido}}$$

# Capacidad del canal

## FÓRMULA PARA LA CAPACIDAD DE SHANNON

Esta expresión muestra, en decibelios, cuánto excede la señal al nivel de ruido. **Una SNR alta significará una señal de alta calidad** y, por tanto, la necesidad de un número reducido de repetidores.

La relación señal-ruido es importante en la transmisión de datos digitales, ya que ésta determina la máxima velocidad de transmisión que se puede conseguir. Una conclusión de Shannon es que la **capacidad máxima del canal**, en bits por segundo, verifica la ecuación:

$$C = B \log_2 (1 + \text{SNR})$$



# Capacidad del canal

## FÓRMULA PARA LA CAPACIDAD DE SHANNON

donde  $C$  es la capacidad del canal en bits por segundo y  $B$  es el ancho de banda del canal en hercios.

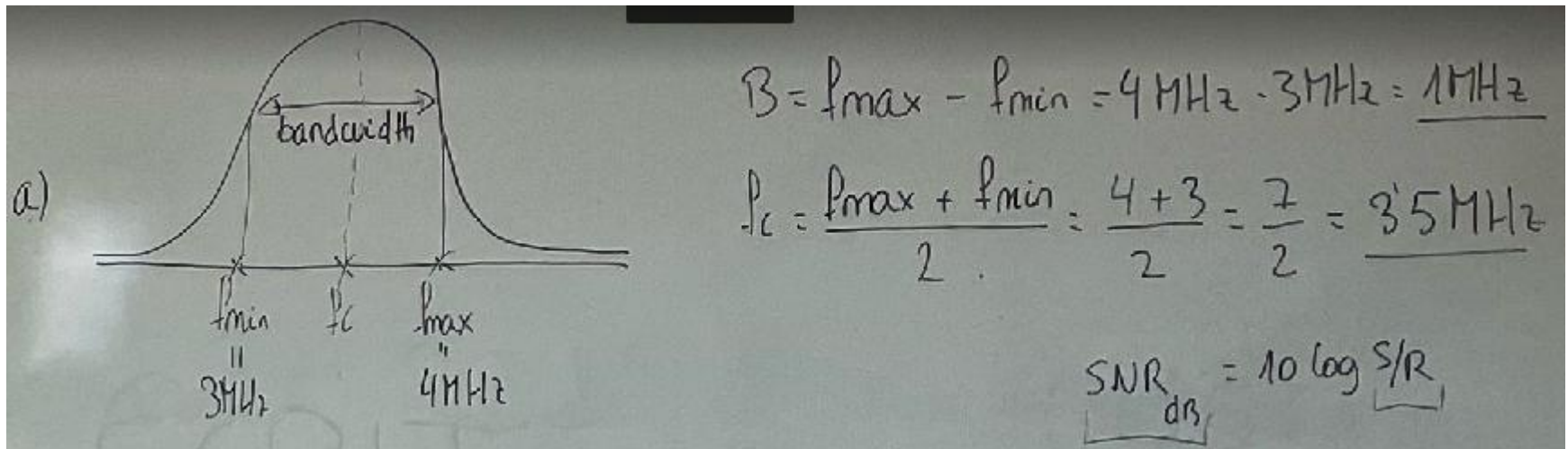
La fórmula de Shannon representa el **máximo límite teórico que se puede conseguir**. Sin embargo, en la práctica, se consiguen velocidades mucho menores. Una razón para esto reside en el hecho de que la fórmula anterior supone ruido blanco (ruido térmico). Además, **no se han tenido en cuenta el ruido impulsivo, la distorsión de atenuación o la distorsión de retardo.**

# Capacidad del canal

## FÓRMULA PARA LA CAPACIDAD DE SHANNON

Supóngase que el espectro de un canal está situado entre 3 MHz y 4 MHz y que la SNR(dB)=24dB. Calcular:

a) Ancho de banda.

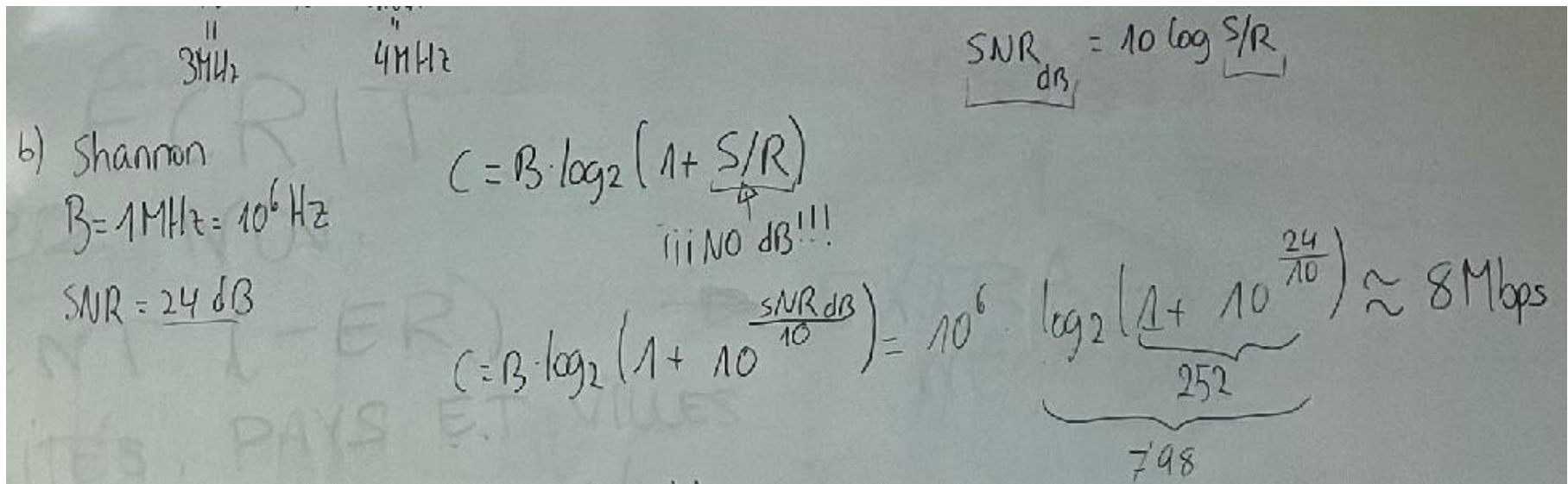


# Capacidad del canal

## FÓRMULA PARA LA CAPACIDAD DE SHANNON

Supóngase que el espectro de un canal está situado entre 3 MHz y 4 MHz y que la SNR(dB)=24dB. Calcular:

b) Capacidad teórica máxima.



The image shows a handwritten calculation on a piece of paper. At the top, the frequency range '3 MHz' and '4 MHz' is written. To the right, the formula  $SNR_{dB} = 10 \log \frac{S}{R}$  is written. Below this, the problem is restated: 'b) Shannon', 'B = 1 MHz =  $10^6$  Hz', and 'SNR = 24 dB'. The main formula for capacity is written as  $C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{R} \right)$ , with a note '!!! NO dB!!!' pointing to the fraction. The calculation then proceeds to  $C = B \cdot \log_2 \left( 1 + 10^{\frac{SNR_{dB}}{10}} \right) = 10^6 \cdot \log_2 \left( 1 + 10^{\frac{24}{10}} \right) \approx 8 \text{ Mbps}$ . The value 252 is written under the term  $1 + 10^{\frac{24}{10}}$ , and 798 is written below it.

3 MHz      4 MHz

$SNR_{dB} = 10 \log \frac{S}{R}$

b) Shannon  
 $B = 1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$   
 $SNR = 24 \text{ dB}$

$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{R} \right)$   
!!! NO dB!!!

$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + 10^{\frac{SNR_{dB}}{10}} \right) = 10^6 \cdot \log_2 \left( 1 + 10^{\frac{24}{10}} \right) \approx 8 \text{ Mbps}$

252  
798

# Capacidad del canal

## FÓRMULA PARA LA CAPACIDAD DE SHANNON

Supóngase que el espectro de un canal está situado entre 3 MHz y 4 MHz y que la SNR(dB)=24dB. Calcular:

- c) Niveles de señalización necesarios para alcanzar la capacidad máxima.

Handwritten calculations on a piece of paper:

- Left side:  $f) \text{ Nyquist}$ ,  $C = 8 \text{ Mbps}$ ,  $B = 10^6 \text{ Hz}$ .
- Top center:  $C = 2 \cdot B \cdot \log_2 M$
- Below that:  $8 \cdot 10^6 = 2 \cdot 10^6 \cdot \log_2 M$
- Bottom left:  $\frac{8 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6} = \log_2 M \rightarrow \log_2 M = 4 \Rightarrow M = 2^4 \rightarrow \boxed{M = 16}$
- Bottom right:  $\log_a b = c \Leftrightarrow b = a^c$

# Capacidad del canal

## EL COCIENTE $E_b / N_0$

Existe un **parámetro** relacionado con la SNR que es **más adecuado para determinar las tasas de error y la velocidad de transmisión**. Además se usa habitualmente para medir la calidad de las prestaciones de los sistemas de comunicación digital. Este parámetro es el cociente de la energía de la señal por bit entre la densidad de potencia del ruido por hercio,  $E_b/N_0$ .

o, expresado en decibelios,

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S/R}{N_0} = \frac{S}{kTR} \quad \left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{dB}} = S_{\text{dBW}} - 10 \log R - 10 \log k - 10 \log T$$
$$= S_{\text{dBW}} - 10 \log R + 228,6 \text{ dBW} - 10 \log T$$

# Capacidad del canal

## EL COCIENTE $E_b / N_0$

El cociente  $E_b / N_0$  es importante ya que para los datos digitales la tasa de error por bit es una función (decreciente) de este cociente. Dado un valor de  $E_b / N_0$  necesario para conseguir una tasa de errores deseada, los parámetros se pueden seleccionar de acuerdo con la fórmula anterior.

Nótese que cuando se aumenta la velocidad de transmisión  $R$ , la potencia de la señal transmitida, relativa al ruido, debe aumentarse para mantener el cociente  $E_b / N_0$  requerido.

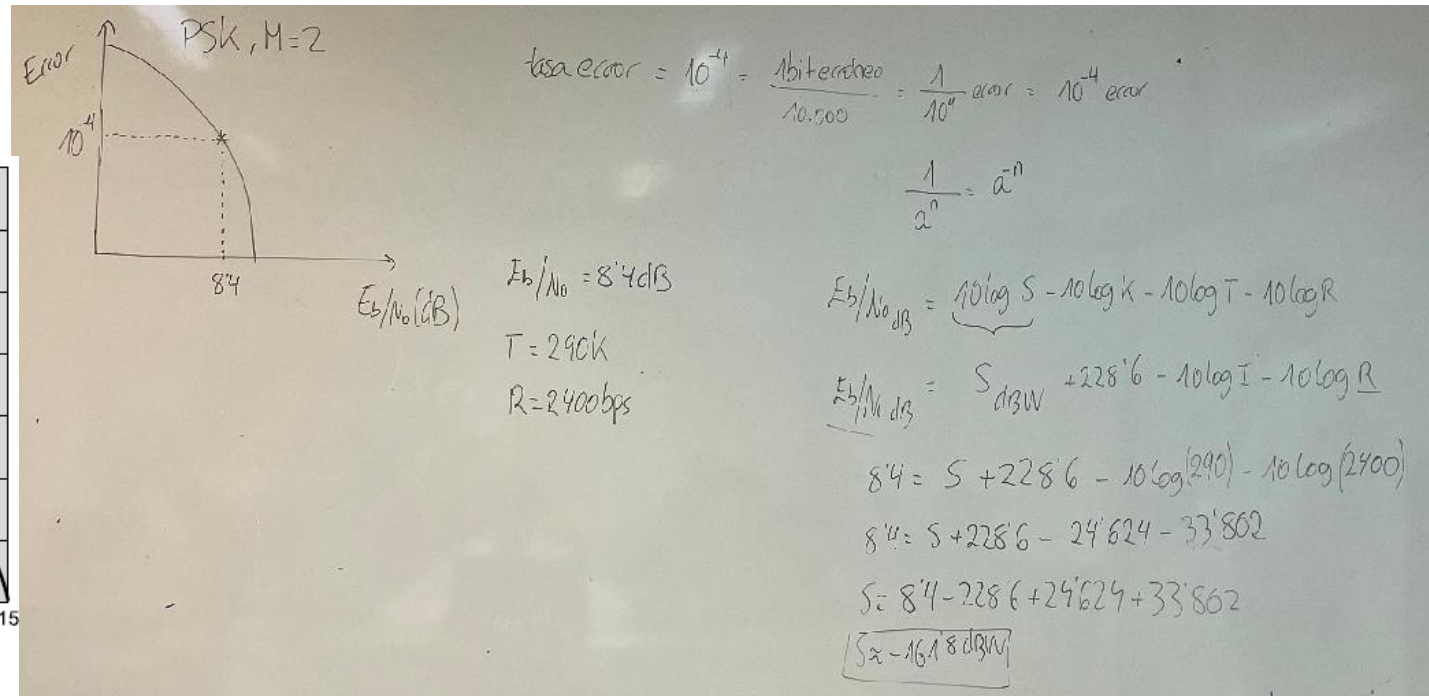
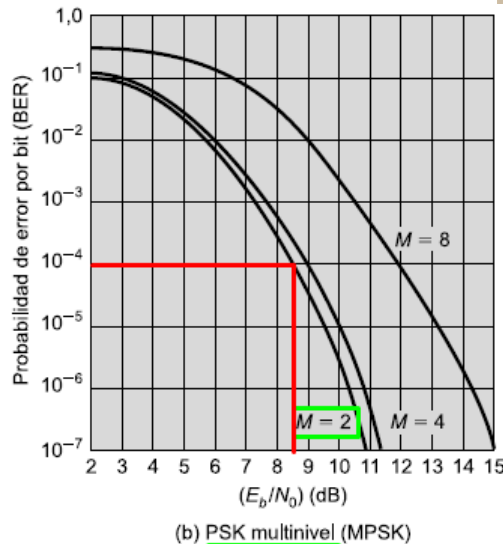
# Capacidad del canal

## EL COCIENTE $E_b/N_0$

En la modulación digital binaria PSK para obtener una tasa de error por bit igual a  $10^{-4}$  (un bit erróneo cada 10.000) se necesita un cociente  $E_b/N_0 = 8,4 \text{ dB}$ . Si la temperatura efectiva es 290 K (temperatura ambiente) y la velocidad de transmisión es 2.400 bps, ¿qué nivel de señal recibida se necesita?

# Capacidad del canal

En la modulación digital **binaria PSK** para obtener una tasa de error por bit igual a  $10^{-4}$  (un bit erróneo cada 10.000) se necesita un cociente  $E_b/N_0 = 8,4 \text{ dB}$ . Si la temperatura efectiva es 290 K (temperatura ambiente) y la velocidad de transmisión es 2.400 bps, ¿qué nivel de señal recibida se necesita?





# **3 Medios de transmisión**

# Medios de transmisión

En los sistemas de transmisión de datos, **el medio de transmisión** es el camino físico entre el transmisor y el receptor.

En los **medios guiados** las ondas electromagnéticas se transmiten a través de un medio sólido, como por ejemplo un par trenzado de cobre, un cable coaxial o una fibra óptica.

En los **medios no guiados**, la transmisión inalámbrica se realiza a través de la atmósfera, el espacio exterior o el agua.

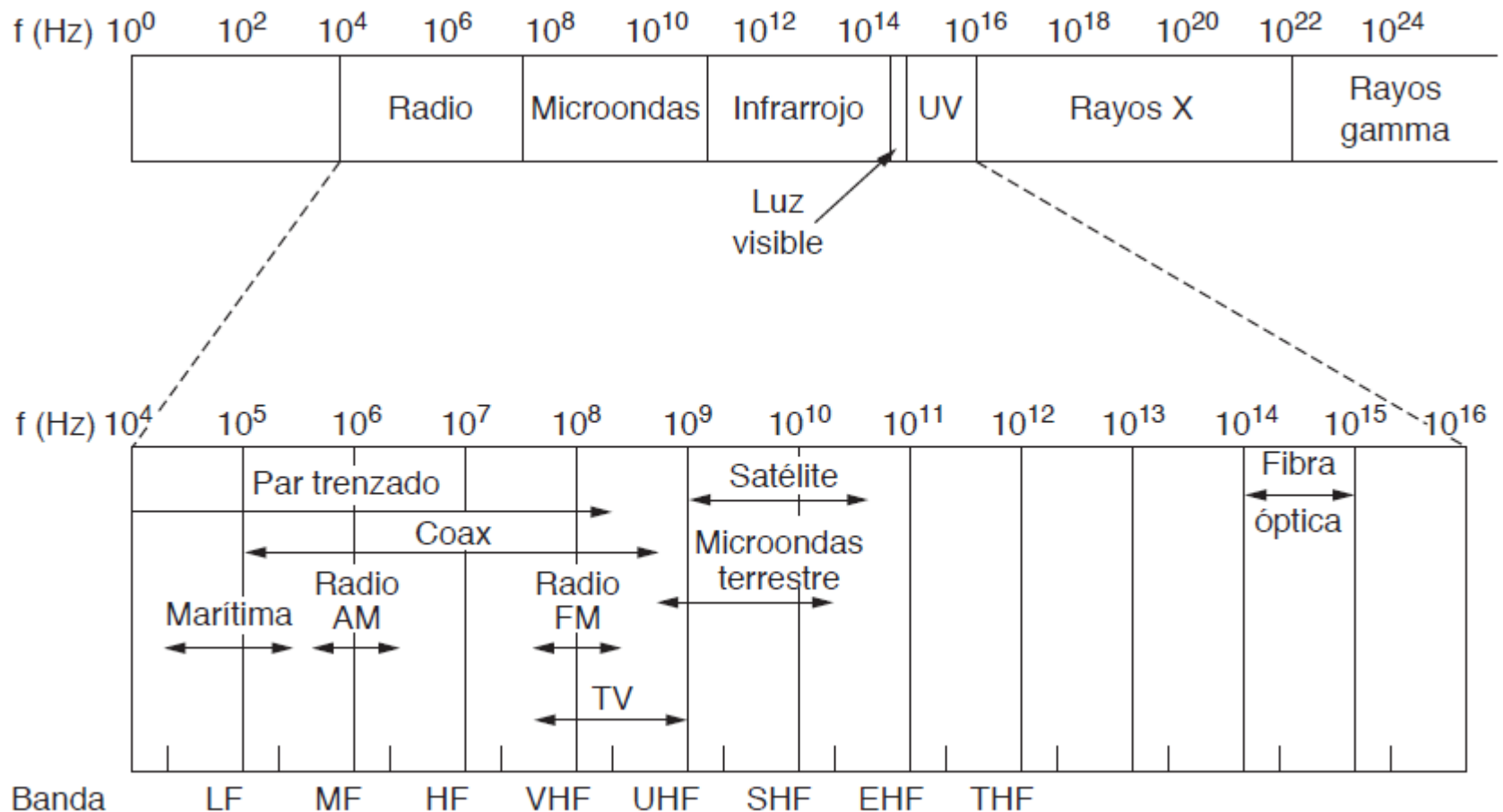
# Medios de transmisión

En el diseño de sistemas de transmisión es deseable que tanto la distancia como la velocidad de transmisión sean lo más grandes posibles. Hay una serie de factores relacionados con el medio de transmisión y con la señal que determinan tanto la distancia como la velocidad de transmisión:

- **Ancho de banda**
- Dificultades en la transmisión: **atenuación.**
- **Interferencias:** interferencias de señales en bandas de frecuencias próximas pueden distorsionar o destruir la señal. Se puede apantallar el cableado para evitarlo.

# Medios de transmisión

Espectro electromagnético y sus usos para comunicaciones:



## **3.1 Medios de transmisión guiados**

# Cableado de cobre

El **cableado de cobre** es el tipo más común de cableado utilizado en las redes hoy en día.

Las redes utilizan medios de cobre porque son económicos y fáciles de instalar, y tienen baja resistencia a la corriente eléctrica. Sin embargo, estos medios están **limitados por la distancia y la interferencia de señal**.

Los datos se transmiten en cables de cobre como impulsos eléctricos. No obstante, cuanto más lejos viaja una señal, más se deteriora. (**Atenuación**)

# Cableado de cobre

Los valores de temporización y voltaje de los pulsos eléctricos también son vulnerables a las interferencias de dos fuentes:

- **Interferencia electromagnética (EMI) o interferencia de radiofrecuencia (RFI):** las señales de EMI y RFI pueden distorsionar y dañar las señales de datos que transportan los medios de cobre. Las posibles fuentes de EMI y RFI incluyen las ondas de radio y dispositivos electromagnéticos, como las luces fluorescentes o los motores eléctricos.
- **Diafonía/Crosstalk:** En los circuitos telefónicos, el crosstalk puede provocar que se escuche parte de otra conversación de voz de un circuito adyacente.

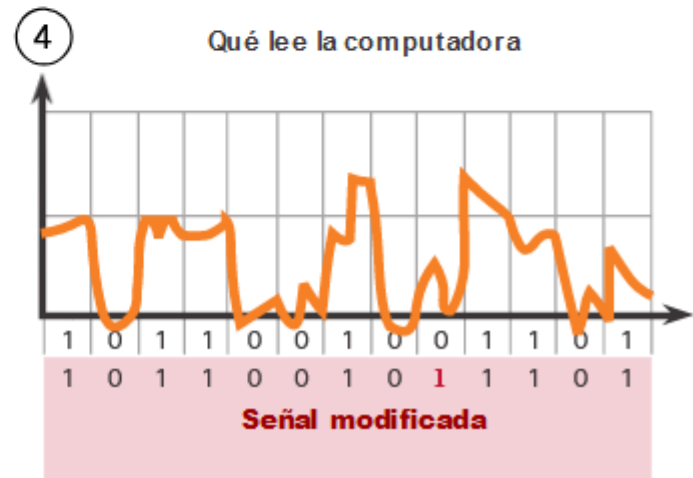
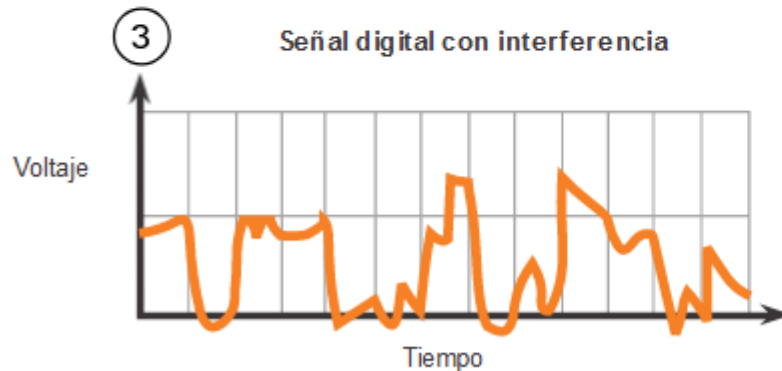
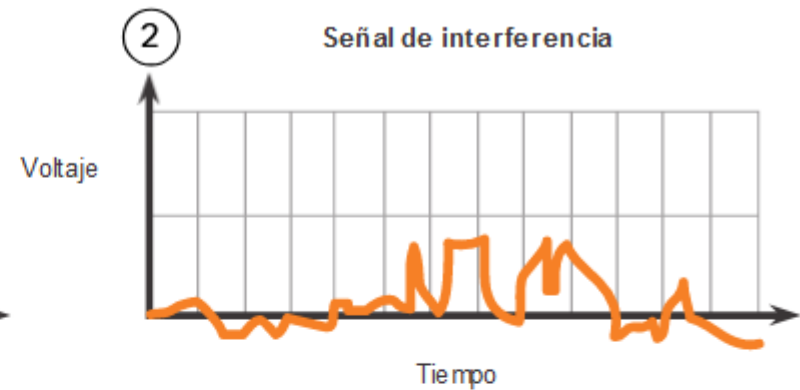
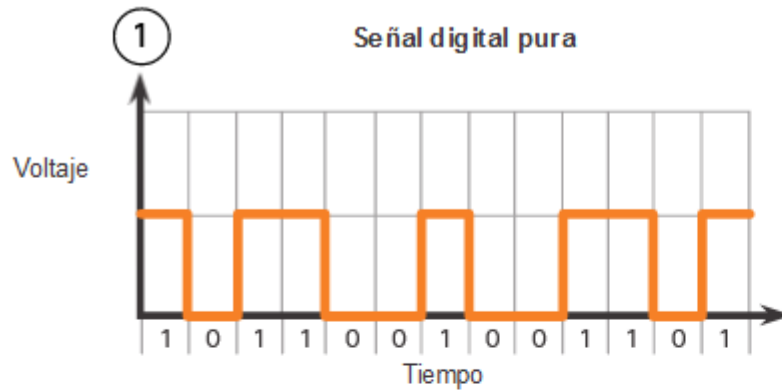
# Cableado de cobre

Para contrarrestar los efectos negativos de la EMI y la RFI, algunos tipos de cables de cobre se empaquetan con un blindaje metálico y requieren una conexión a tierra adecuada.

Para contrarrestar los efectos negativos del crosstalk, algunos tipos de cables de cobre tienen pares de hilos de circuitos opuestos trenzados que cancelan dicho tipo de interferencia en forma eficaz.



# Cableado de cobre



# Cableado de cobre

Tipos de cables de cobre:



Cable de par trenzado no blindado (UTP)



Cable de par trenzado blindado (STP)



Cable coaxial

# Cableado de cobre

## Par trenzado

El **par trenzado** es el medio guiado más económico y, a la vez, es el más usado. Un par trenzado consta de dos cables de cobre aislados que están trenzados en forma helicoidal.

**Cuando se trenzan los cables**, las ondas de distintos trenzados se cancelan y el cable irradia con menos efectividad.

Los pares trenzados se pueden usar para transmitir la información analógica o digital.

El par trenzado es mucho menos costoso que cualquier otro medio de transmisión guiado (cable coaxial o fibra óptica) y, a la vez, es más sencillo de manejar.

# Cableado de cobre

## Par trenzado

Este medio se caracteriza por su **gran susceptibilidad a las interferencias y al ruido**, debido a su fácil acoplamiento con campos electromagnéticos externos.

El ruido impulsivo también afecta a los pares trenzados. Para reducir estos efectos negativos es posible tomar algunas medidas. Por ejemplo, el **apantallamiento del cable con una malla metálica reduce las interferencias externas**. El trenzado en los cables reduce las interferencias de baja frecuencia y el uso de distintos pasos de torsión entre los pares adyacentes reduce la diafonía.

# Cableado de cobre

## Par trenzado

El ancho de banda depende del grosor del cable y de la distancia que recorre, pero en muchos casos se pueden lograr varios megabits/seg durante pocos kilómetros. Debido a su adecuado desempeño y bajo costo, los pares trenzados se utilizan mucho.

Existen diversos tipos de cableado de par trenzado. El que se utiliza con mayor frecuencia en muchos edificios de oficinas se llama cable de **categoría 5**, o “cat 5”.

# Cableado de cobre

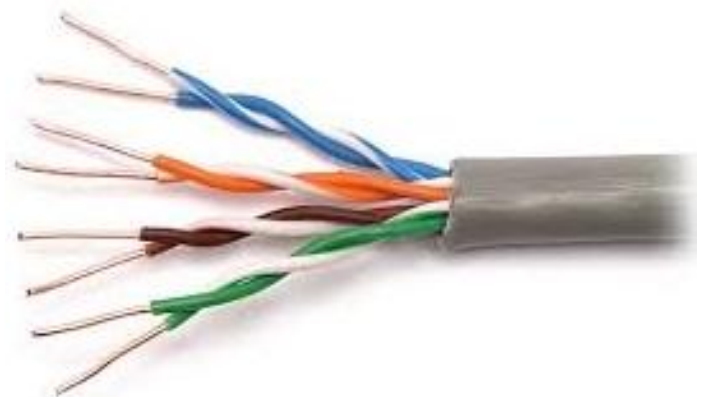
## Par trenzado

Los cables de **categoría 5** reemplazaron a los cables de categoría 3 con un cable similar que utiliza el mismo conector, pero tiene más trenzas por metro. **Entre más trenzas, hay menos diafonía y se logra una señal de mejor calidad a distancias más largas**, lo que hace a los cables más adecuados para la comunicación de computadoras de alta velocidad, en especial para las redes LAN de 100 Mbps y de 1 Gbps.

# Cableado de cobre

## Pares trenzados apantallados y sin apantallar

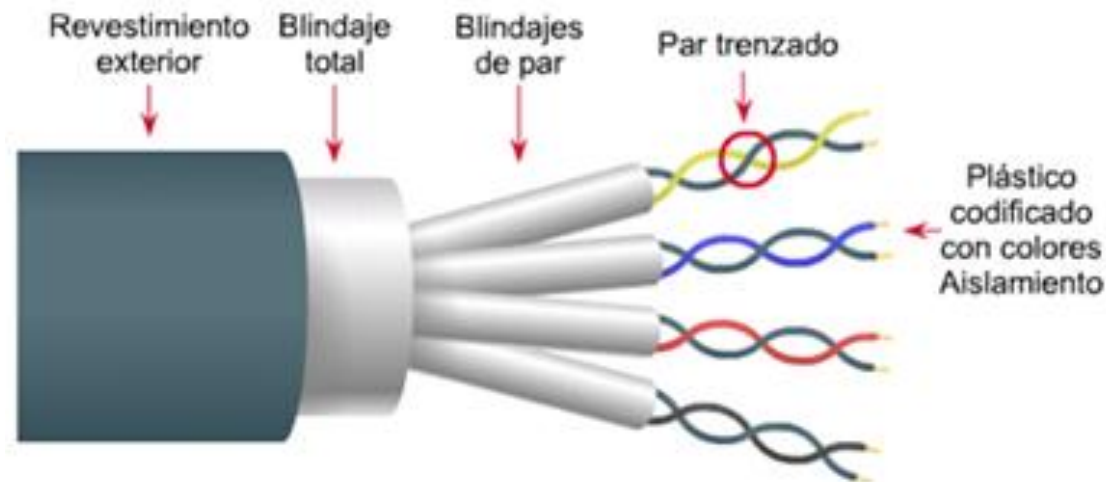
El par trenzado sin apantallar (**UTP**, *Unshielded Twisted Pair*) se puede ver afectado por interferencias electromagnéticas externas, incluyendo interferencias de pares cercanos o fuentes de ruido próximas. Una manera de mejorar las características de transmisión de este medio es embutiéndolo dentro de una malla metálica, reduciéndose así las interferencias.



# Cableado de cobre

## Pares trenzados apantallados y sin apantallar

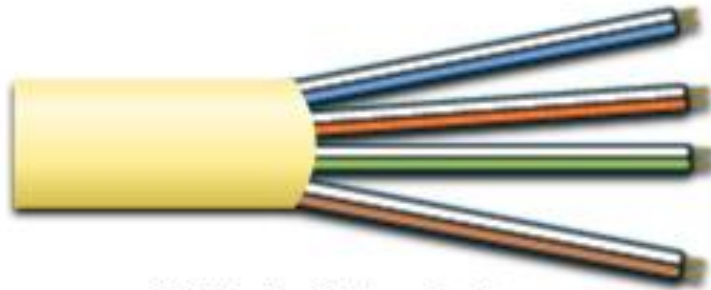
El par trenzado apantallado (**STP**, *Shielded Twisted Pair*) proporciona mejores prestaciones a velocidades de transmisión superiores. Ahora bien, este último es más costoso y difícil de manipular que el anterior.



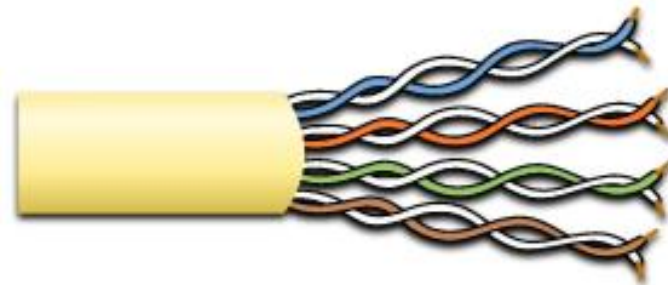


# Cableado de cobre

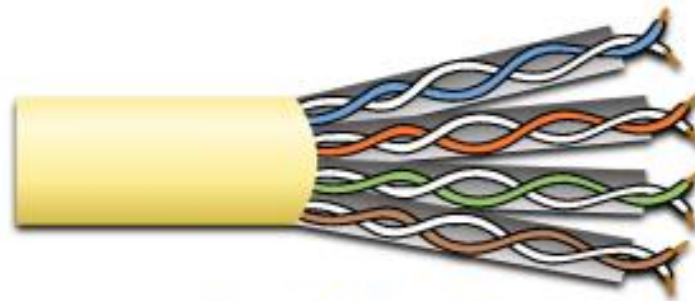
## Pares trenzados apantallados y sin apantallar



Cable de Categoría 3  
(UTP)



Cable de Categoría 5 o 5e  
(UTP)

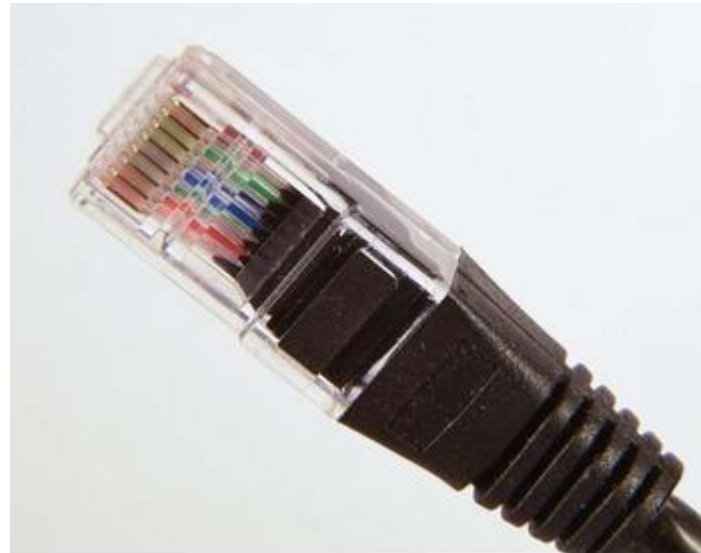


Cable de Categoría 6  
(STP)

# Cableado de cobre

## Pares trenzados apantallados y sin apantallar

Los cables UTP generalmente se terminan con un conector RJ-45.



# Cableado de cobre

## Pares trenzados apantallados y sin apantallar

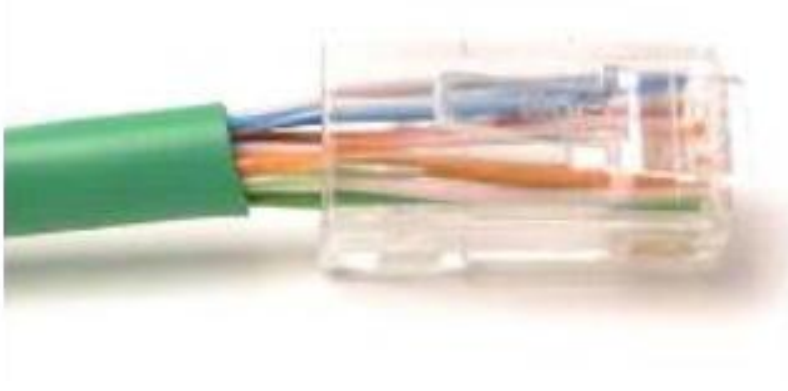
El socket, que se muestra en la figura, es el componente hembra de un dispositivo de red, pared, salida de partición de cubículo o panel de conexiones.



# Cableado de cobre

**Pares trenzados apantallados y sin apantallar**

Cable mal terminado vs bien terminado



# Cableado de cobre

## Pares trenzados apantallados y sin apantallar

Cable Type	Aplicación
Ethernet Straight-through	Conecta un host de red a un dispositivo de red como un switch o concentrador.
Ethernet Crossover	Conecta dos hosts de red Conecta dos dispositivos intermediarios de red (switch a switch o router a router)
Rollover	Conecta el puerto serial de una estación de trabajo al puerto de consola de un router utilizando un adaptador

# Cableado de cobre

## Cable coaxial

El **cable coaxial** es otro medio de transmisión común (conocido simplemente como “**coax**”). Este cable tiene mejor blindaje y mayor ancho de banda que los pares trenzados sin blindaje, por lo que puede abarcar mayores distancias a velocidades más altas.

El cable coaxial, al igual que el par trenzado, tiene dos conductores, pero está construido de forma diferente para que pueda operar sobre un rango de frecuencias mayor. Consiste en un conductor cilíndrico externo que rodea a un cable conductor interior.

# Cableado de cobre

## Cable coaxial

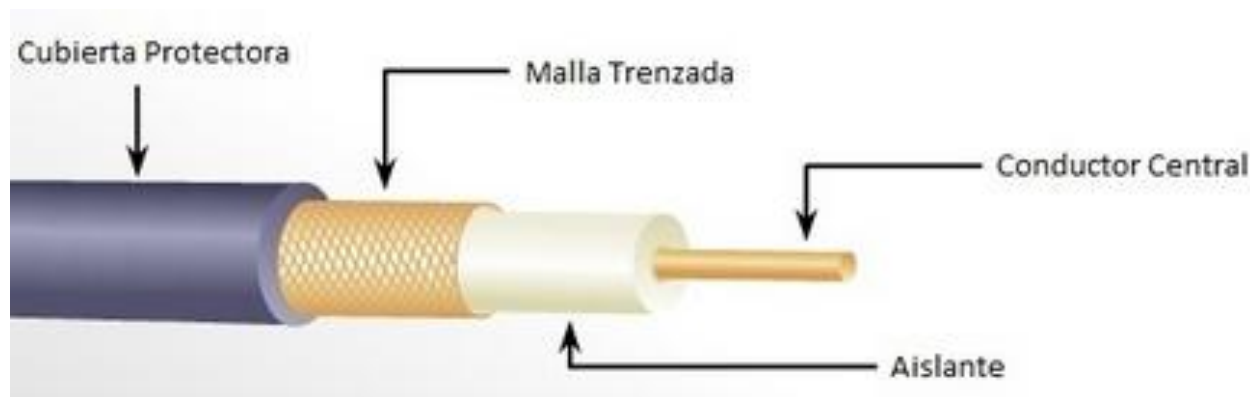
Aunque el cable UTP ha reemplazado esencialmente el cable coaxial en las instalaciones de Ethernet modernas, el diseño del cable coaxial se usa en las siguientes situaciones:

- **Instalaciones inalámbricas** - Los cables coaxiales conectan antenas a los dispositivos inalámbricos. También transportan energía de radiofrecuencia (RF) entre las antenas y el equipo de radio.

# Cableado de cobre

## Cable coaxial

- **Instalaciones de Internet por cable** - Los proveedores de servicios de cable proporcionan conectividad a Internet a sus clientes mediante el reemplazo de porciones del cable coaxial y la admisión de elementos de amplificación con cables de fibra óptica. Sin embargo, el cableado en las instalaciones del cliente sigue siendo cable coaxial.





# Cableado de cobre

## Cable coaxial

Gracias a su construcción y blindaje, el cable coaxial tiene una buena combinación de un alto ancho de banda y una excelente inmunidad al ruido. El ancho de banda posible depende de la calidad y la longitud del cable.



# Fibra óptica

## Fibra óptica

La **fibra óptica** es un hilo flexible, pero extremadamente delgado y transparente de vidrio muy puro. Los bits se codifican en la fibra como impulsos de luz. El cable de fibra óptica actúa como una guía de ondas, o una “tubería de luz”, para transmitir la luz entre los dos extremos con una pérdida mínima de la señal.

Por convención, un pulso de luz indica un bit 1 y la ausencia de luz indica un bit 0.



# Fibra óptica

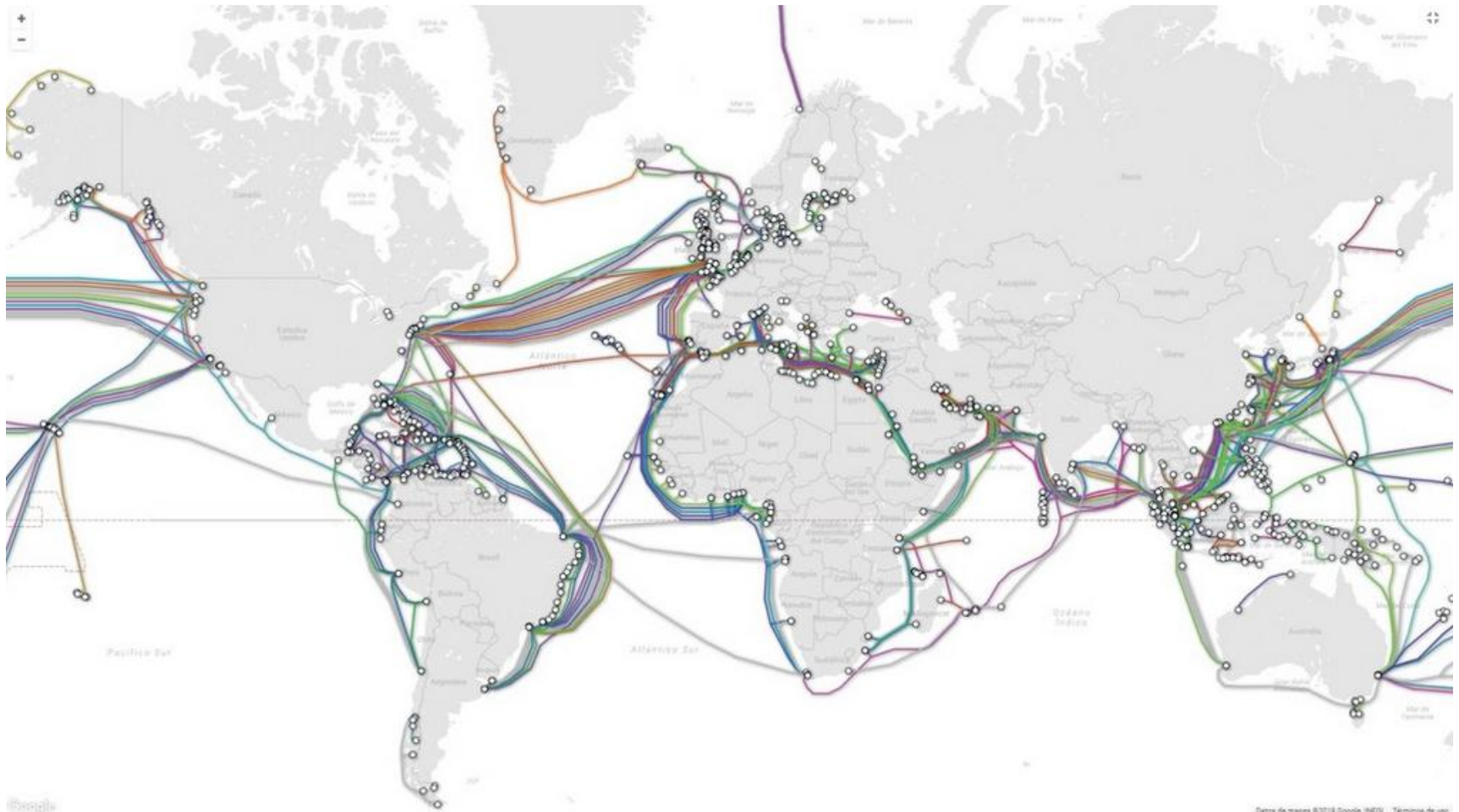
## Fibra óptica

Las aplicaciones básicas en las que la fibra óptica es importante son:

- Transmisiones a larga distancia.
- Transmisiones metropolitanas.
- Acceso a áreas rurales.
- Bucles de abonado.
- Redes de área local.
- Redes de cable submarino

# Fibra óptica

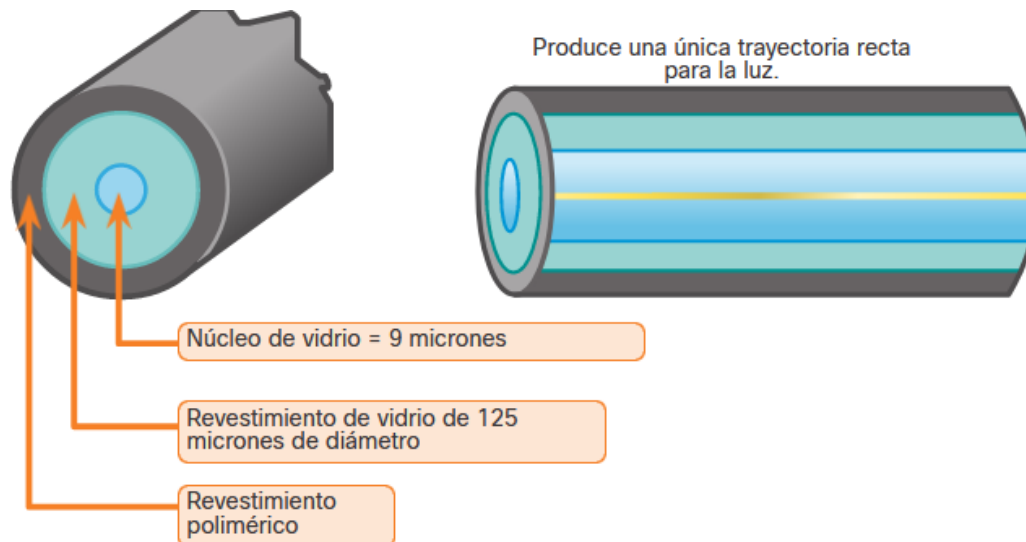
## Fibra óptica (cables submarinos)



# Fibra óptica

## Fibra monomodo

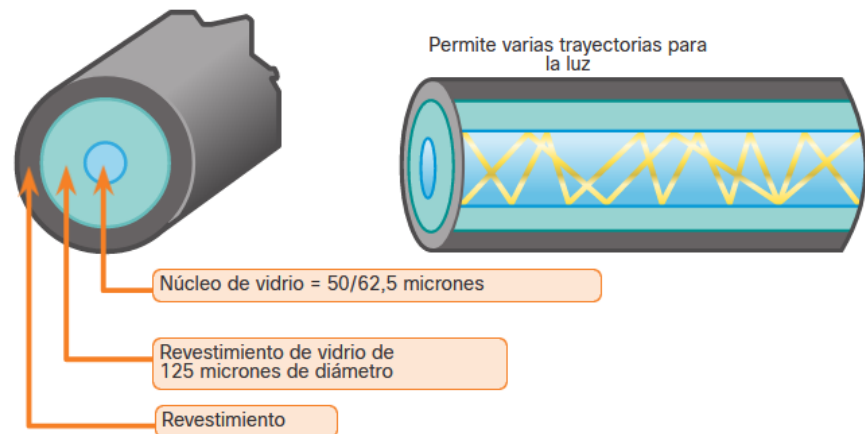
SMF consta de un núcleo muy pequeño y utiliza tecnología láser cara para **enviar un solo rayo de luz**. SMF es popular en situaciones de larga distancia que abarcan cientos de kilómetros, como las requeridas en aplicaciones de telefonía de larga distancia y televisión por cable.



# Fibra óptica

## Fibra multimodo

MMF consta de un núcleo más grande y utiliza emisores LED para enviar pulsos de luz. Específicamente, **la luz de un LED ingresa a la fibra multimodo en diferentes ángulos**. Se usa mucho en las redes LAN, debido a que pueden alimentarse mediante LED de bajo costo. Proporciona un ancho de banda de hasta 10 Gb/s a través de longitudes de enlace de hasta 550 metros.



# Fibra óptica

## Fibra óptica

**La atenuación de la luz que pasa por el vidrio depende de la longitud de onda de la luz** (así como de algunas propiedades físicas del vidrio).

**Las pérdidas son menores cuanto mayores sean las longitudes de onda, permitiendo así mayores velocidades de transmisión sobre distancias superiores.**

# Fibra óptica

## Fibra óptica

En la actualidad se utilizan mucho **tres bandas de longitud de onda para la comunicación óptica**. Estas tres bandas se centran en 0.85, 1.30 y 1.55 micras, respectivamente.

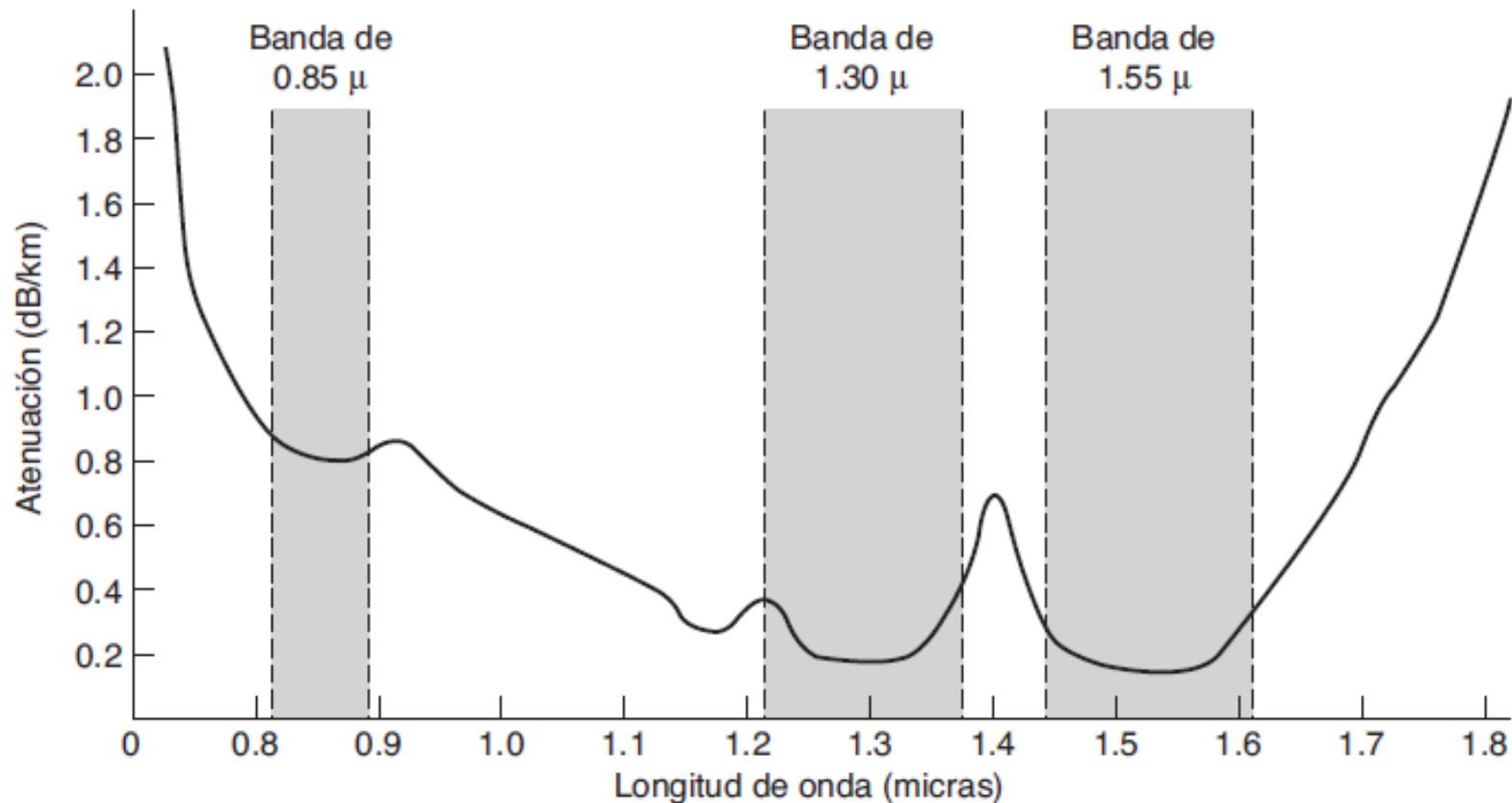
Las últimas dos bandas tienen buenas propiedades de atenuación (una pérdida de menos de 5% por cada kilómetro).



# Fibra óptica

## Fibra óptica

Atenuación de la fibra óptica según la longitud de onda



# Fibra óptica

## Fibra óptica vs cobre

- **Mayor capacidad:** el ancho de banda potencial y, por tanto, la velocidad de transmisión, en las fibras es enorme.
- **Menor tamaño y peso:** las fibras ópticas son apreciablemente más finas que el cable coaxial o que los pares trenzados.
- **Atenuación menor:** la atenuación es significativamente menor en las fibras ópticas que en los cables coaxiales y pares trenzados.
- **Aislamiento electromagnético:** los sistemas de fibra óptica no se ven afectados por los efectos de campos electromagnéticos exteriores.
- **Mayor separación entre repetidores:** cuantos menos repetidores haya el coste será menor, además de haber menos fuentes de error.

# Fibra óptica

## Fibra óptica vs cobre

- **Más difícil de intervenir (espíar) al no tener fugas de luz.**
- **Requiere mayores habilidades.**
- **Se puede dañar con facilidad.**
- **Transmisión unidireccional** -> requiere dos fibras o dos bandas de frecuencias por fibra.
- **Las interfaces de fibras cuestan más que las eléctricas.**

# Fibra óptica

## Fibra óptica vs cobre

Problemas de implementación	Cableado UTP	Cableado de fibra óptica
Ancho de banda soportado	10 Mb/s - 10 Gb/s	10 Mb/s - 100 Gb/s
Distancia	Relativamente corta (de 1 a 100 metros)	Relativamente largo (1 - 100,000 metros)
Inmunidad a EMI y RFI	Baja	Alta (Totalmente inmune)
Inmunidad a peligros eléctricos	Baja	Alta (Totalmente inmune)
Costos de medios y conectores	Más bajo	Más alto
Se necesitan habilidades de instalación	Más bajo	Más alto
Precauciones de seguridad	Más bajo	Más alto

## **3.2 Cableado estructurado**

# Cableado estructurado

## Elementos de instalación

### Armarios (racks)

Es un armario que recoge de modo ordenado las conexiones de toda o parte de la red.



# Cableado estructurado

## Elementos de instalación

### Patch panels y latiguillos

- **Patch panel**: dispositivo de interconexión a través del cual los cables instalados pueden conectarse a otros dispositivos de red.
- Decenas o cientos de **latiguillos** conectarán unos patch panels con otros.
- La **roseta** presenta un conector por un lado y una estructura de fijación de los cables de pares por el otro.

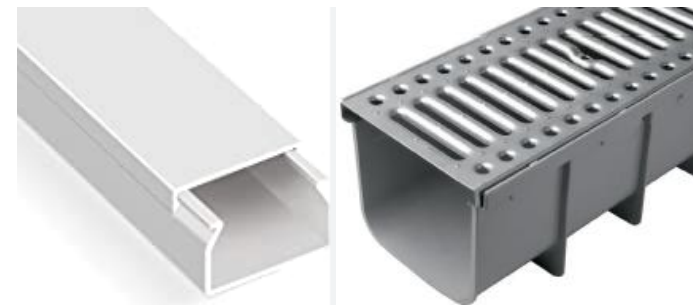


# Cableado estructurado

## Elementos de instalación

### Canaletas

- Conductos por los que se extiende el cableado para que queden recogidos y protegidos.
- **Canaletas** decorativas (ocultar cables) y canaletas canaladas (falsos techos o falsos suelos).
- Las canalizaciones de datos suelen estar separada para evitar interferencias.





# Cableado estructurado

## Elementos de instalación

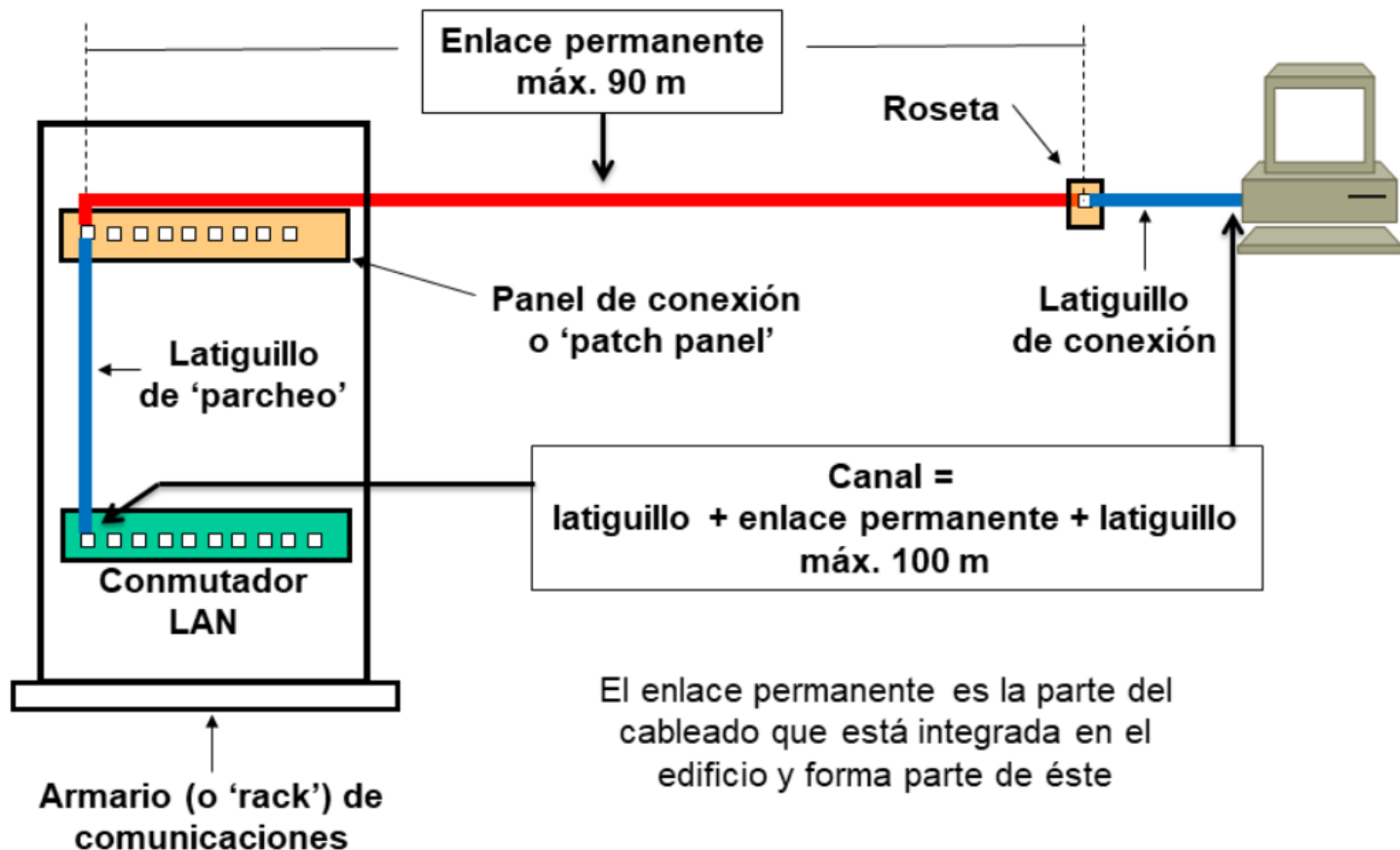
### Placas de conectores y rosetas

Conectores que se insertan en las canaletas, o se adhieren al pared, y que sirven de interfaz entre latiguillo que lleva la señal al no del cable de red.



# Cableado estructurado

## Cableado estructurado: esquema de un enlace de cableado horizontal



# Cableado estructurado

## Límites para Cat. 5 según EIA/TIA 568



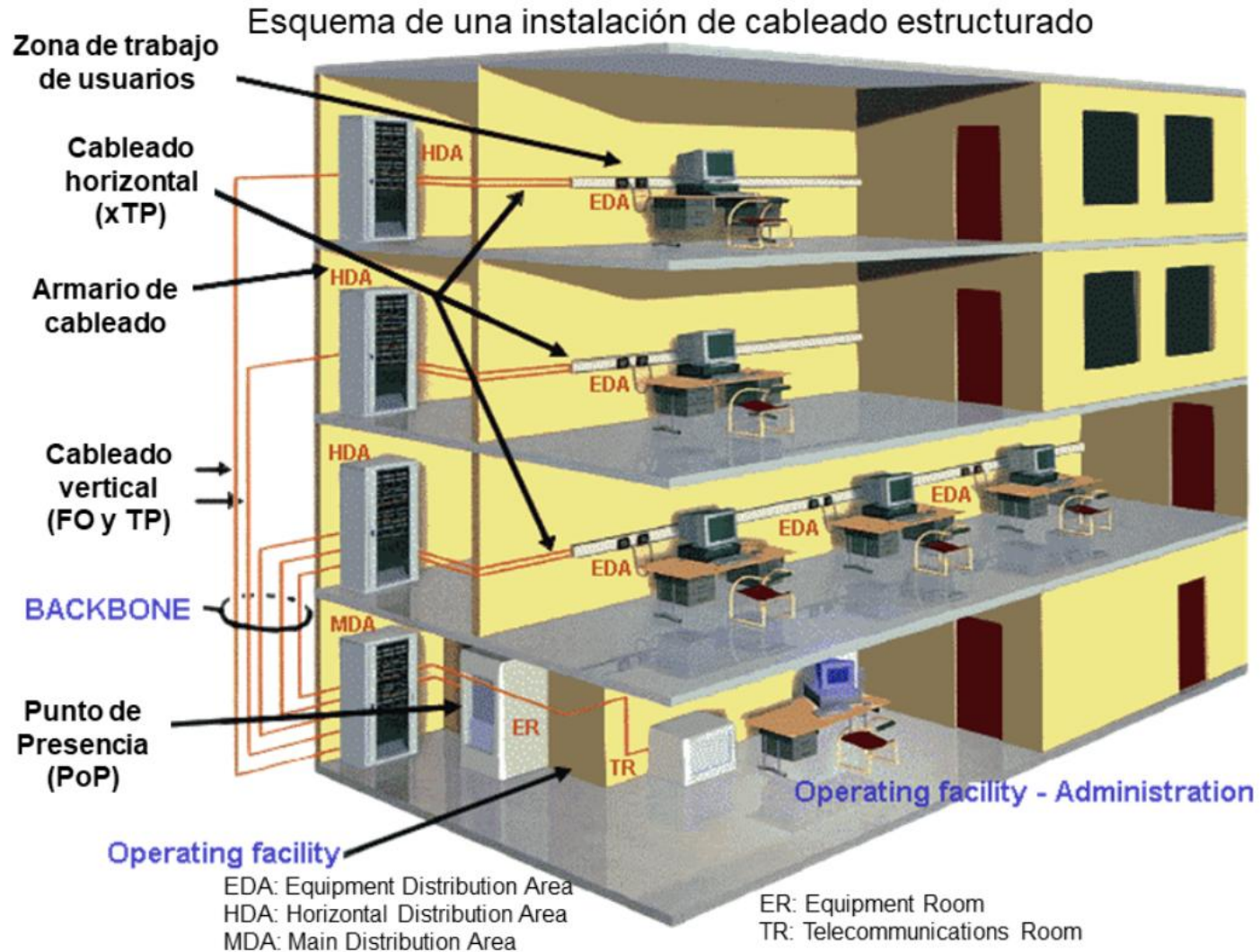
Enlace permanente			
MHz	Aten.	NEXT	ACR
1	2,1	60	57,9
4	4	51,8	47,8
8	5,7	47,1	41,4
10	6,3	45,6	39,3
16	8,2	42,3	34,1
20	9,2	40,7	31,5
25	10,3	39,1	28,8
31,25	11,5	37,6	26,1
62,5	16,7	32,7	16
100	21,6	29,3	7,7



Canal			
MHz	Aten.	NEXT	ACR
1	2,5	60	57,5
4	4,5	50,6	46,1
8	6,3	45,6	39,3
10	7	44	37
16	9,2	40,6	31,4
20	10,3	39	28,7
25	11,4	37,4	26
31,25	12,8	35,7	22,9
62,5	18,5	30,6	12,1
100	24	27,1	3,1

El nivel de exigencia es mayor en el enlace permanente porque se ha de dejar margen para la atenuación y diafonía provocada por los conectores

# Cableado estructurado



## **3.3 Transmisión inalámbrica**

# Transmisión inalámbrica

Cuando los electrones se mueven, crean ondas electromagnéticas que se pueden propagar por el espacio (incluso en el vacío).

En los medios no guiados, la transmisión y la recepción se realiza mediante una **antena**.

Al conectar una antena del tamaño apropiado a un circuito eléctrico, las ondas electromagnéticas se pueden difundir de manera eficiente y un receptor las puede captar a cierta distancia. Toda la comunicación inalámbrica se basa en este principio.

# Transmisión inalámbrica

Una **antena** se puede definir como un conductor eléctrico (o un conjunto de conductores) utilizado para radiar o captar energía electromagnética.

Para transmitir la señal, la energía eléctrica proveniente del transmisor se convierte a energía electromagnética en la antena, radiándose al entorno cercano (la atmósfera, el espacio o el agua).

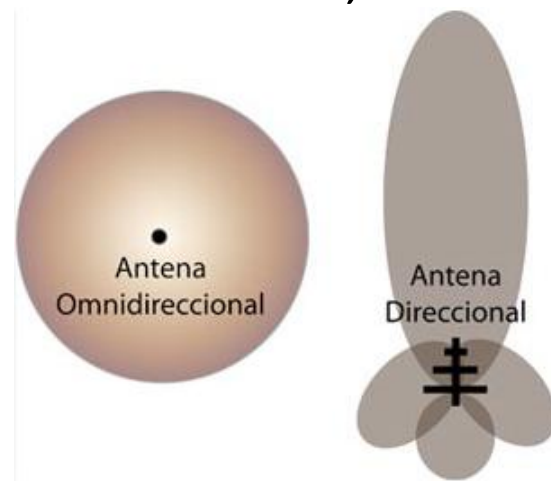
Para recibir una señal, la energía electromagnética capturada por la antena se convierte a energía eléctrica y se pasa al receptor.



# Transmisión inalámbrica

La **ganancia de una antena** es una medida de su direccionalidad. Dada una dirección, se define la ganancia de una antena como la potencia de salida, en esa dirección, comparada con la potencia transmitida en cualquier dirección por una antena omnidireccional ideal (o antena isotrópica).

Una **antena isotrópica** es un punto en el espacio que radia potencia de igual forma en todas las direcciones. En este caso, el diagrama de radiación consistirá en una esfera centrada en la posición de la antena isotrópica.





# Transmisión inalámbrica

## Microondas terrestres

Los sistemas de **microondas terrestres** se usan principalmente en servicios de telecomunicación de larga distancia, como alternativa al cable coaxial o a las fibras ópticas.

Al igual que en cualquier sistema de transmisión, la principal causa de pérdidas en las microondas es la **atenuación**. Para la microondas (y también para la banda de radiofrecuencias), la pérdida se puede expresar como:

$$L = 10 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \text{ dB}$$

donde  $d$  es la distancia y  $\lambda$  es la longitud de onda, expresadas en las mismas unidades.

# Transmisión inalámbrica

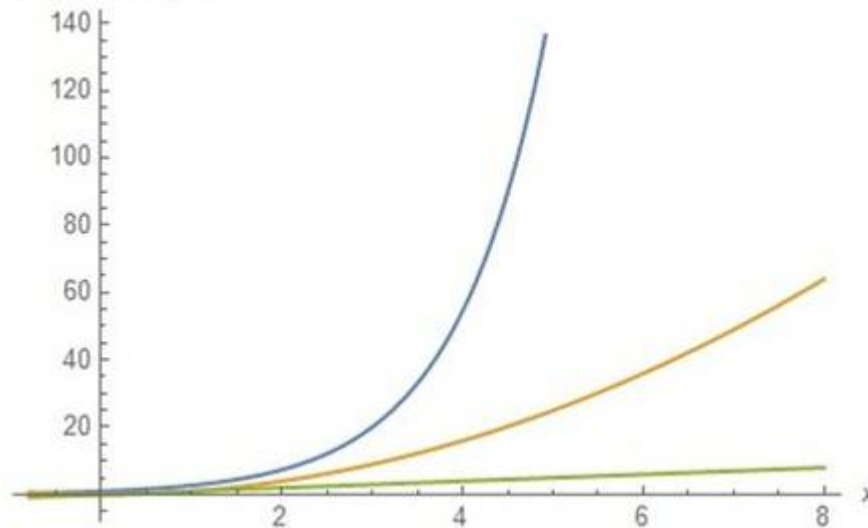
## Microondas terrestres

Es decir, la pérdida varía con el cuadrado de la distancia, a diferencia del cable coaxial y el par trenzado, en los que las pérdidas tienen una dependencia exponencial con la distancia (siendo lineal si se expresa en decibelios). Por tanto, en los sistemas que usan microondas, los amplificadores o repetidores pueden estar más separados entre sí (de 10 km a 100 km generalmente). La atenuación aumenta con la lluvia, siendo este efecto especialmente significativo para frecuencias por encima de 10 GHz. Otra dificultad adicional son las interferencias. Debido a la popularidad creciente de las microondas, las áreas de cobertura se pueden solapar, haciendo que las interferencias sean siempre un peligro potencial.

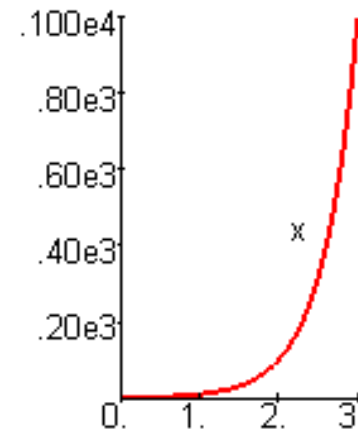
# Transmisión inalámbrica

## Microondas terrestres

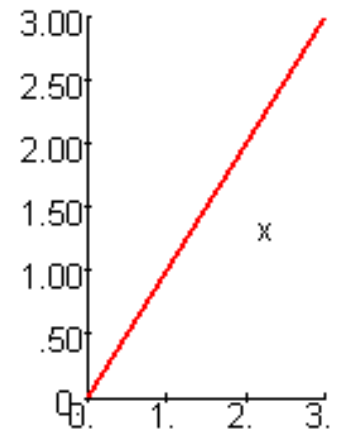
Crecimientos Rápidos



Escla Normal



Escala Logaritmica

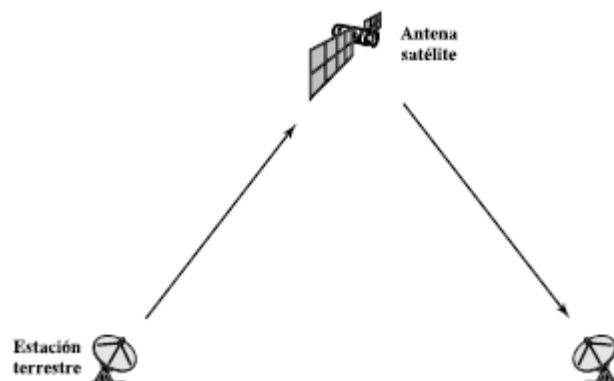


—  $\exp(x)$   
—  $x^2$   
—  $x$

# Transmisión inalámbrica

## Microondas por satélite

Un **satélite de comunicaciones** es esencialmente una estación que retransmite microondas. Se usa como enlace entre dos o más receptores/transmisores terrestres, denominados estaciones base. El satélite recibe la señal en una banda de frecuencia (canal ascendente), la amplifica o repite y, posteriormente, la retransmite en otra banda de frecuencia (canal descendente).

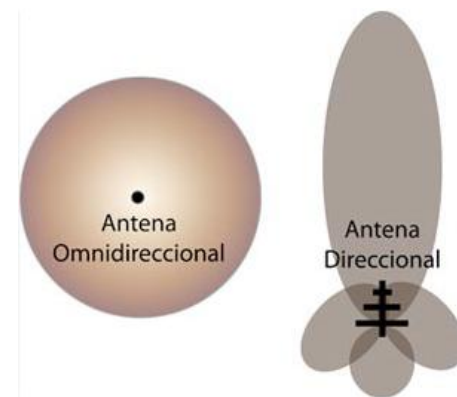


# Transmisión inalámbrica

## Ondas de radio

La diferencia más apreciable entre las microondas y **las ondas de radio** es que estas últimas **son omnidireccionales**, mientras que las primeras tienen un diagrama de radiación mucho más direccional. Este hecho hace que las ondas de radio no necesiten antenas parabólicas ni necesitan que dichas antenas estén instaladas sobre una plataforma rígida para estar alineadas.

El rango de frecuencias comprendido entre 30 MHz y 1GHz es muy adecuado para la difusión simultánea a varios destinos.



# Transmisión inalámbrica

## Ondas de radio

Las ondas de radio son menos sensibles a la atenuación producida por la lluvia.

Debido a que tienen una longitud de onda mayor, las ondas de radio sufren, en términos relativos, una atenuación menor.

$$L = 10 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \text{ dB}$$

# Transmisión inalámbrica

## Infrarrojos

Las **ondas infrarrojas** no guiadas se usan mucho para la comunicación de corto alcance. El control remoto de los televisores, grabadoras de video y estéreos utilizan comunicación infrarroja.

Son relativamente **direccionales**, económicos y fáciles de construir, pero tienen un gran inconveniente: no atraviesan objetos sólidos.

# Transmisión inalámbrica

## Perturbaciones de las comunicaciones inalámbricas

- **Absorción:** las moléculas de oxígeno y agua en la atmósfera absorben parte de la energía de la señal.
- **Propagación multicamino:** debido a la presencia de obstáculos, el receptor recibe la señal original y la rebotada con diversos retardos.
- **Fading:** se produce cuando los obstáculos o la antena receptora se mueven, de tal modo que el usuario percibe una variación temporal del nivel de señal conforme se va moviendo.



# 4 Codificación de señales

# Codificación de señales

Los cables y los canales inalámbricos transportan señales analógicas, como el voltaje, la intensidad de la luz o del sonido que varían de forma continua.

Para enviar información digital debemos idear señales analógicas que representen bits. Al proceso de realizar la conversión entre los bits y las señales que los representan se le conoce como **modulación digital**.

# Codificación de señales

## Formatos para la codificación de señales digitales

### No retorno a nivel cero (NRZ-L)

0=nivel alto

1=nivel bajo

### No retorno a cero invertido (NRZI)

0=no hay transición al comienzo del intervalo (un bit cada vez)

1=transición al comienzo del intervalo

### Bipolar-AMI

0=no hay señal

1=nivel positivo o negativo, alternante

# Codificación de señales

## **Pseudoternaria**

0=nivel positivo a negativo, alternante

1=no hay señal

## **Manchester**

0=transición de alto a bajo en mitad del intervalo

1=transición de bajo a alto en mitad del intervalo

## **Manchester diferencial**

Siempre hay una transición en mitad del intervalo

0=transición al principio del intervalo

1=no hay transición al principio del intervalo

# Codificación de señales

## **B8ZS**

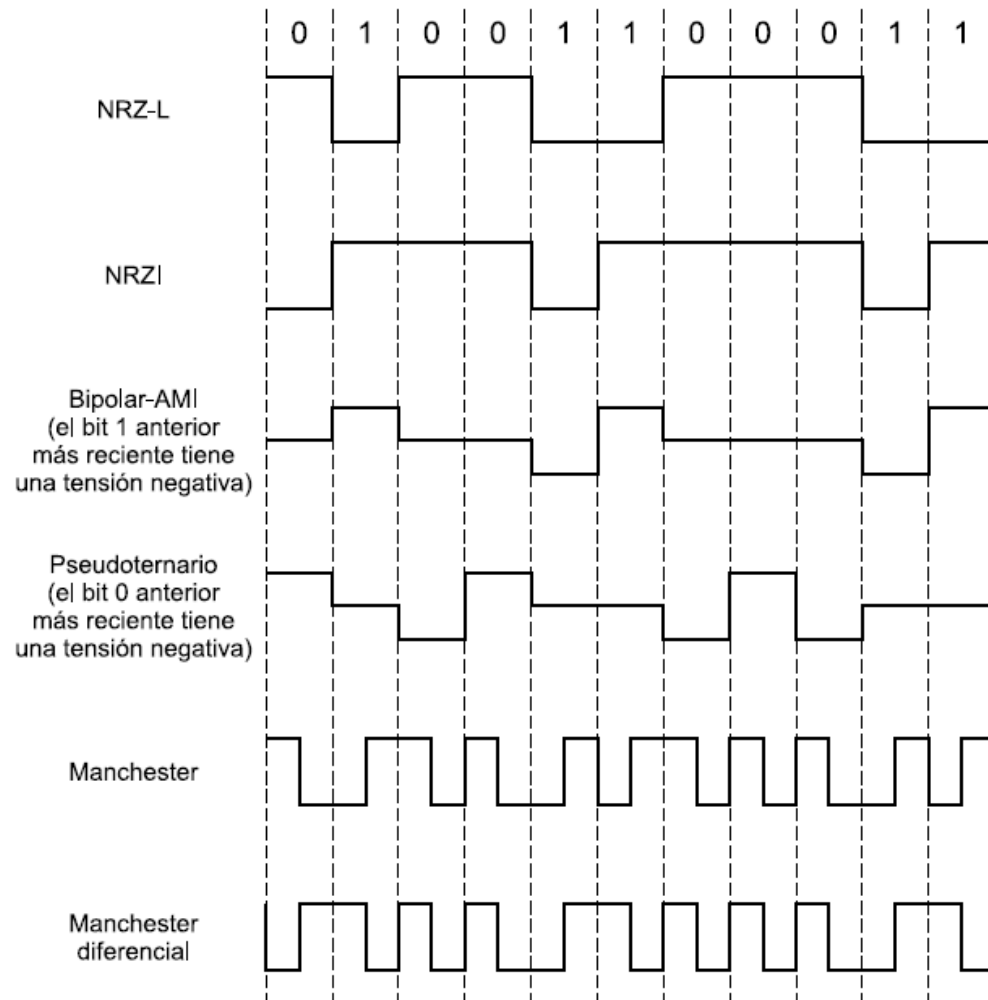
Igual que el bipolar-AMI, excepto que cualquier cadena de ocho ceros se reemplaza por una cadena que tiene dos violaciones de código.

## **HDB3**

Igual que el bipolar-AMI, excepto que cualquier cadena de cuatro ceros se reemplaza por una cadena que contiene una violación de código.

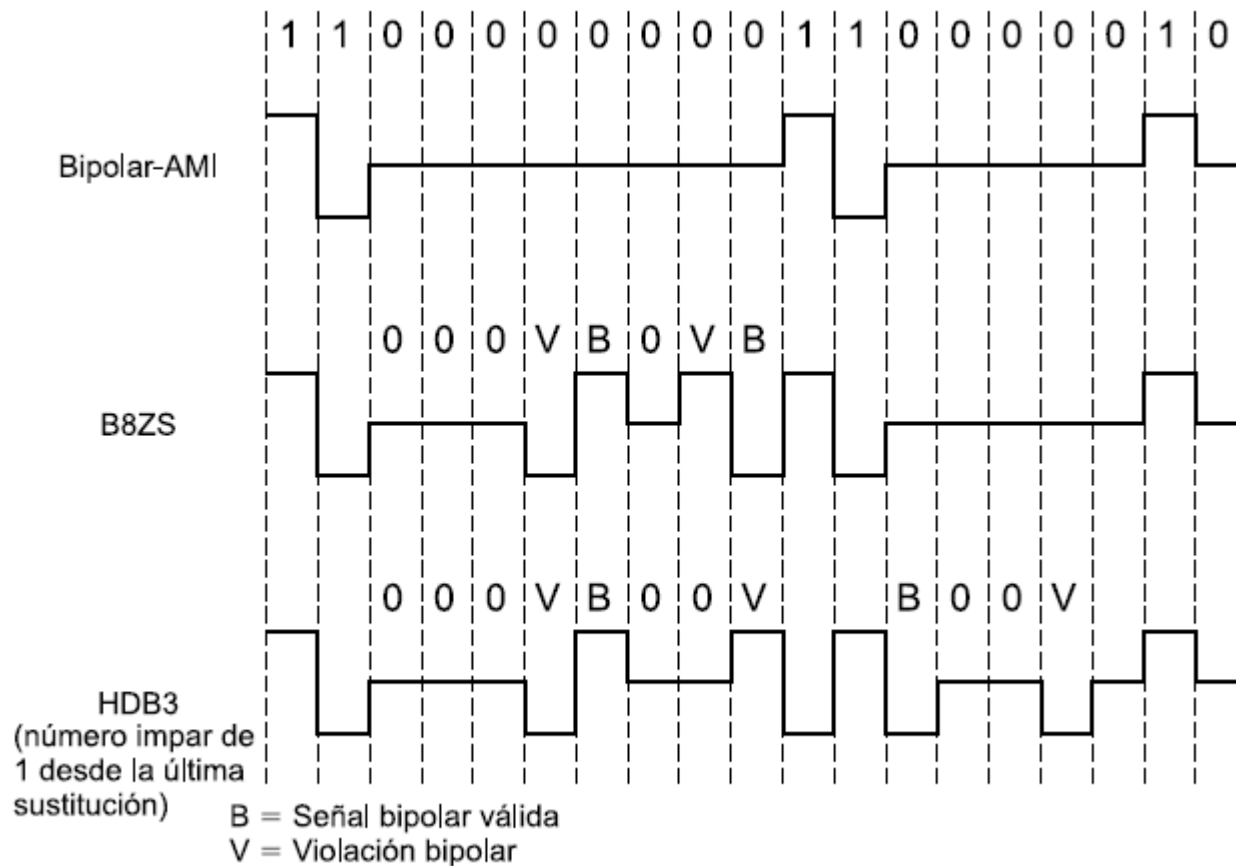
# Codificación de señales

## Formatos de codificación utilizando señales digitales



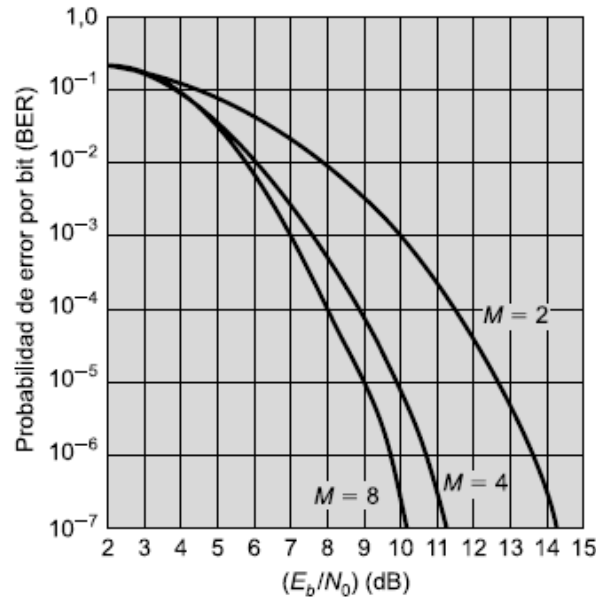
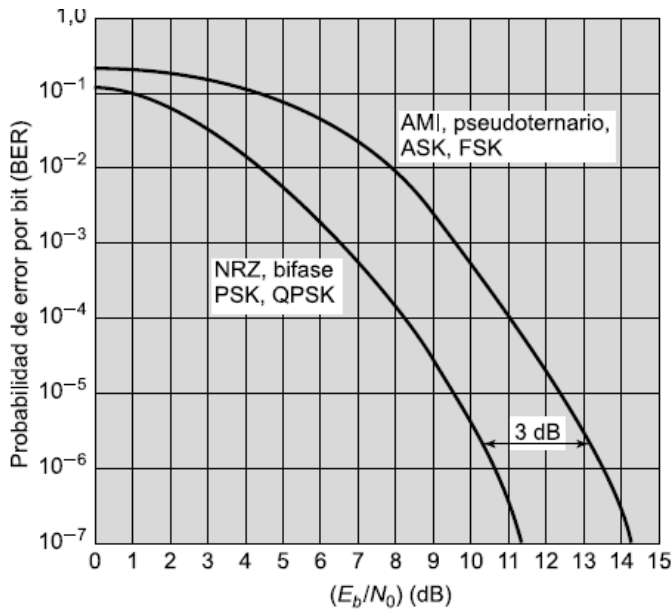
# Codificación de señales

## Formatos de codificación utilizando señales digitales

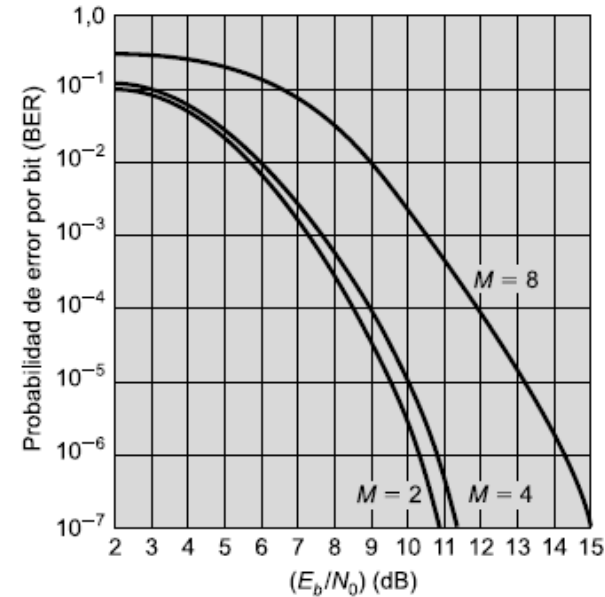


# Codificación de señales

## Formatos de codificación utilizando señales digitales



(a) FSK multinivel (MFSK)



(b) PSK multinivel (MPSK)