



Departamento de Ingeniería de Telecomunicación  
Teoría de la Señal y Comunicaciones  
Universidad de Jaén

## TEMA 1

# INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE LA COMUNICACIÓN

# Contenidos

---

1. Introducción
2. Modelo de un sistema de comunicación
3. Incidencia del medio en la señal transmitida
4. Calidad de un sistema de comunicación
5. Limitaciones y capacidad de un sistema de comunicación
6. Modulación

# Objetivos específicos

---

- Conocimientos del **modelo** de un **sistema de comunicación** y los principales efectos que experimenta la señal al propagarse a través del mismo.
- Conocimientos para operar unidades **logarítmicas** y resolver **balances potencia** sencillos.
- Conocimientos de las magnitudes que permiten evaluar la **calidad** de sistemas de comunicación analógicos y digitales.
- Conocimientos de las limitaciones teóricas que establece la teoría de la información sobre los sistemas de comunicaciones.
- Conocimientos de la ley de Shannon-Hartley para resolver problemas sencillos.
- Conocimientos del concepto de **modulación**, ventajas y aplicaciones.

# Introducción

---

- **Teoría de la Comunicación:**

- Teoría matemática (modelos matemáticos) que utiliza métodos y herramientas de la Teoría de la Señal (análisis de Fourier, estudio de señales y de sistemas, ...)
- Objetivo
  - Proceso de transmisión de información entre dos puntos (fuente y destino) mediante un sistema de telecomunicación.
  - Transmisión de señales sin deformación y relación existente entre la señal (soporte) y la información que ésta contiene

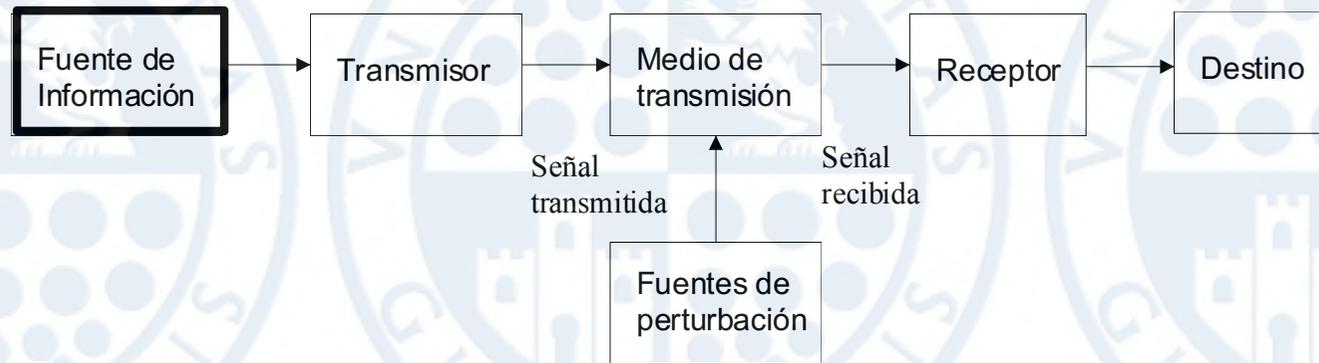
- **Teoría de la información:**

- C. E. Shannon es el padre de la **Teoría de la Información**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> C. E. Shannon, “**A mathematical theory of communication**”, *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379-423 and 623-656, July and October, 1948

- Teoría matemática que se basa en el uso de del concepto de **información** de un mensaje (teoría de probabilidades) en lugar de centrarse en la señal que físicamente soporta dicho mensaje.
- Permite establecer límites acerca de la **capacidad máxima  $C$**  de transferencia de información para un determinado sistema de transmisión.

# Modelo de un Sistema de Comunicación (I)



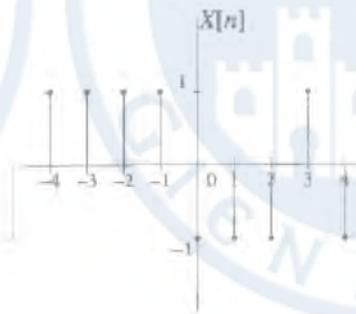
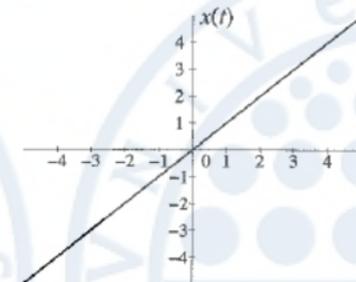
- **Fuente de información:**

- Produce un mensaje o una secuencia de mensajes para ser comunicados al receptor.

- Las fuentes de información pueden ser clasificadas:

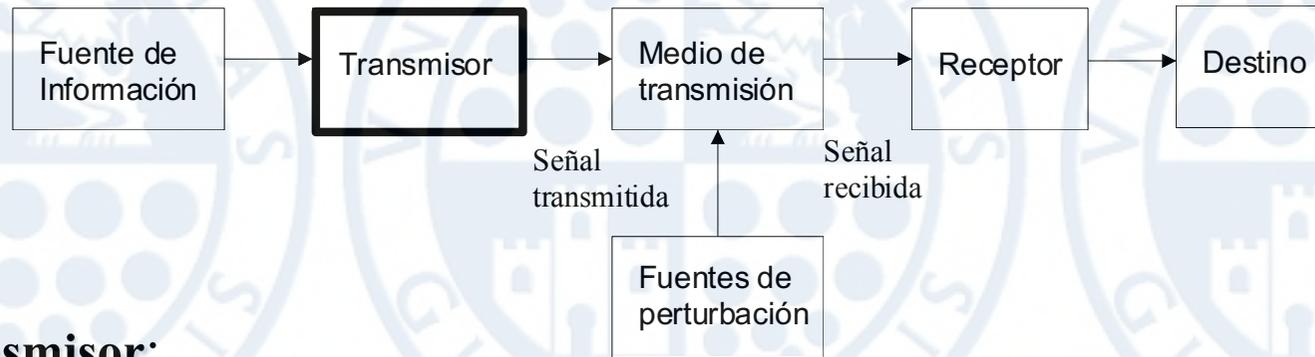
- **Analógicas:** Generan la información sobre un soporte (señal) que puede modelarse como una función continua del tiempo

- **Digitales:** Generan señales digitales (discretas en el tiempo y amplitud). Las señales analógicas pueden convertirse en digital (muestreo, cuantificación y codificación de cada muestra).



# Modelo de un Sistema de Comunicación (II)

---

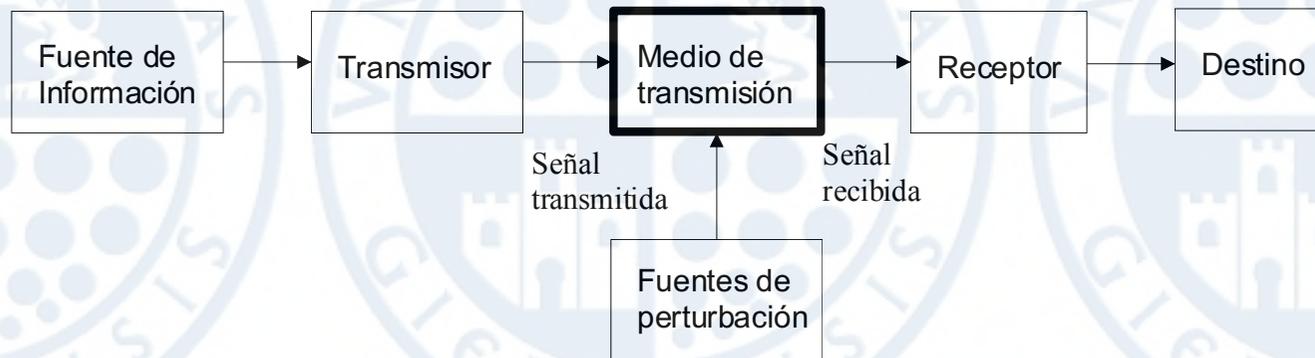


- **Transmisor:**

- El transmisor procesa una señal de mensaje con el fin de producir una señal que tenga la mayor probabilidad de pasar **fiable** y **eficientemente** a través del canal (medio de transmisión).
- Algunas funciones del transmisor son:
  - **Amplificación** de potencia
  - **Filtrado**
  - Adaptación de la señal al medio de comunicación (**modulación**)
  - **Protección** frente a perturbaciones (ruido e interferencias): codificación de canal.
  - **Compartición** del medio de transmisión (multiplexación y acceso al medio)
  - **Simplificación** del proceso de transmisión.

# Modelo de un Sistema de Comunicación (III)

---



- **Medio de transmisión (canal):**

- Es el **medio físico** usado para transmitir la señal desde el transmisor hasta el receptor.

- Los medios de transmisión pueden clasificarse en:

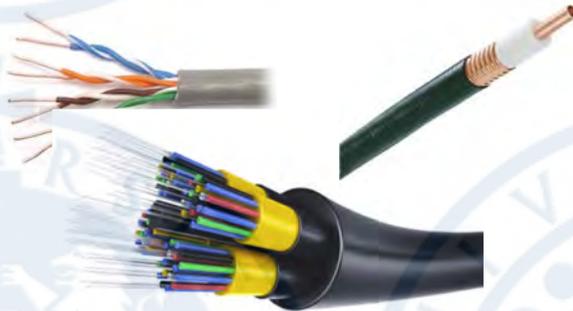
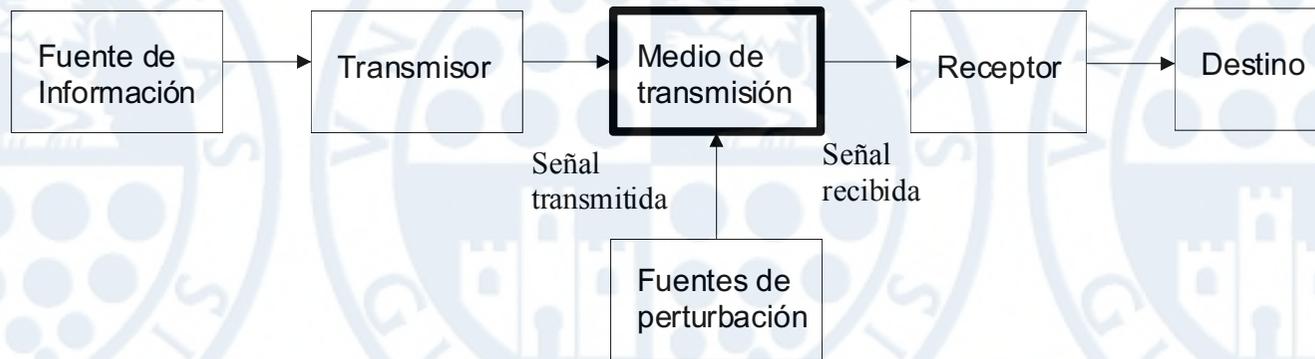
- **Medios de transmisión guiados:**

- Líneas de transmisión y guías de ondas metálicas
- Fibra óptica y guías dieléctricas.

- **Medios de transmisión no guiados:**

- Radiocomunicaciones
- Microondas
- Comunicaciones ópticas no guiadas (haz expandido)

# Modelo de un Sistema de Comunicación (IV)



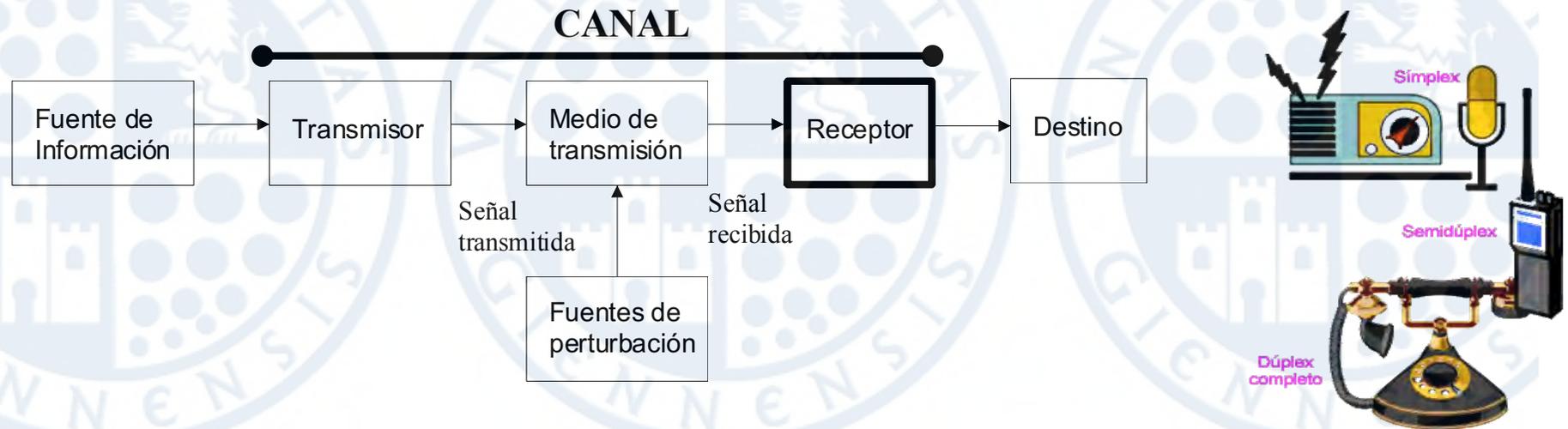
*Medio guiado: par trenzado, coaxial y fibra Óptica*



*Medio no guiado: estación terrestre (diámetro: 35m) de seguimiento de satélites de Cebreros (Ávila, España) perteneciente a la Agencia Europea del Espacio (ESA)*

- El medio de transmisión se modela como un sistema con una determinada **función de transferencia  $H(f)$**  caracterizada por una **banda de paso en frecuencia**, donde la señal sufre **atenuación, distorsión, retardo y perturbaciones**. Para simplificar, en esta asignatura se considerará que el canal es un sistema **LTI** (Linear and Time Invariant).

# Modelo de un Sistema de Comunicación (V)



- **Receptor:**

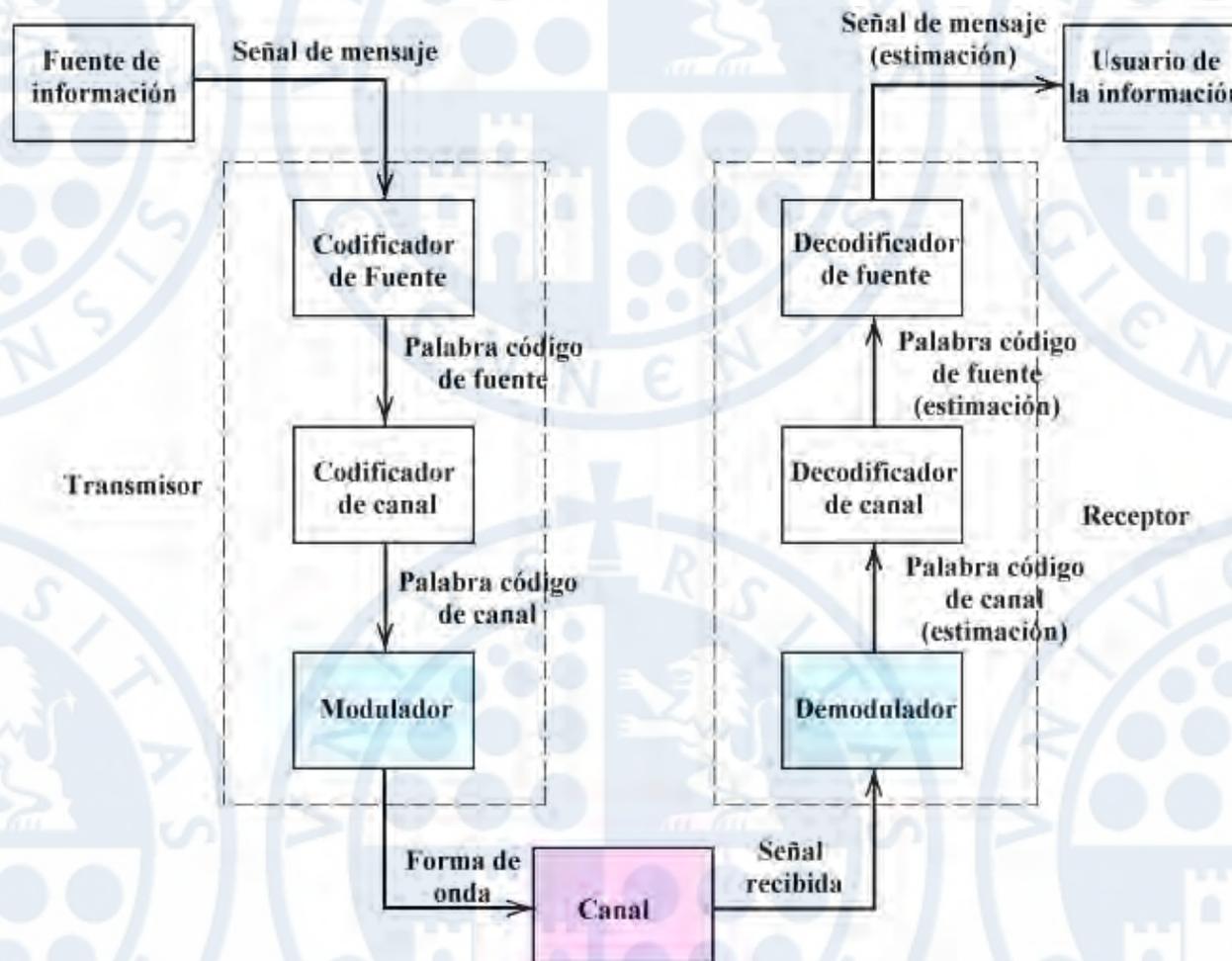
- Subsistema destinado a recuperar la señal transmitida y entregar la información al destino.
- El receptor debe hacer las operaciones **inversas** a la realizadas por el transmisor, con objeto de **recuperar** la información en su forma original.

- **Nomenclatura ITU (International Telecommunication Union):**

- **Canal (unidireccional):** subsistema formado por el conjunto transmisor, medio y receptor.
- **Circuito (bidireccional):** conjunto formado por dos canales.
- **Enlace (bidireccional):** conjunto formado por un circuito y parte de las instalaciones terminales de usuario en los dos extremos.

# Modelo de un Sistema de Comunicación (VI)

## Diagrama de bloques de un sistema de comunicación digital



**Codificación fuente:** conversión A/D (muestreo-cuantificación-codificación) y eliminación de información innecesaria o redundancia (Grado: Técnicas de codificación y transmisión)

**Codificación canal:** añadir redundancia para aumentar la robustez frente a perturbaciones en el canal (Grado: Transmisión digital, Master: Signal processing for communications)

# Incidencia del medio en la señal transmitida (I)

## Atenuación $A$ :

- **Pérdida de potencia** de la señal recibida  $P_o$  respecto de la potencia transmitida  $P_i$  de la señal de entrada  $x(t)$  al atravesar el medio de transmisión  $H(f)$



- Se expresa en unidades logarítmicas como el decibelio (dB) o el neperio (Np). Se suele expresar las potencias referidas a un watio (**dBW**) o a un miliwatio (**dBm**)

$$A(\text{dB}) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_o}{P_i} \right)$$

$$A(\text{Np}) = \frac{1}{2} \cdot \ln \left( \frac{P_o}{P_i} \right)$$

$$1 \text{ Np} = 8.686 \text{ dB}$$

$$P(\text{dBW}) = 10 \cdot \log_{10} (P(\text{W})) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P(\text{W})}{1 \text{ W}} \right); \quad P(\text{dBm}) = 10 \cdot \log_{10} (P(\text{mW})) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P(\text{mW})}{1 \text{ mW}} \right)$$

$$P(\text{W}) = 10^{\frac{P(\text{dBW})}{10}} \quad P(\text{mW}) = 10^{\frac{P(\text{dBm})}{10}}$$

$$A(\text{dB}) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_o}{P_i} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_o^2 / R_o}{V_i^2 / R_i} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_o^2}{V_i^2} \cdot \frac{R_i}{R_o} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_o}{V_i} \right) + 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{R_i}{R_o} \right)$$

$$\Rightarrow \text{si } R_i = R_o \Rightarrow A(\text{dB}) = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_o}{V_i} \right)$$

# Incidencia del medio en la señal transmitida (II)

---

## Atenuación $A$ :

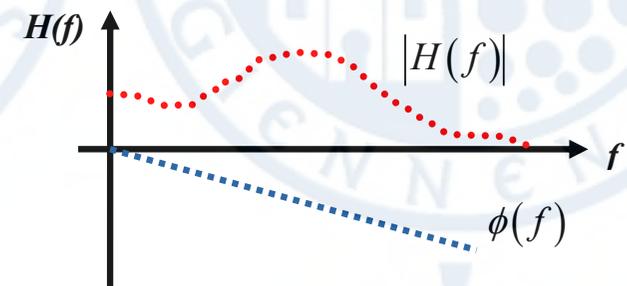
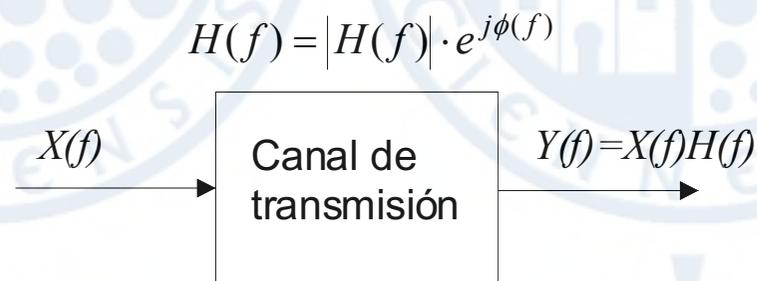
- $> 0$  dB (ganancia);  $< 0$  dB (atenuación);  $\text{dBW} + \text{dB} = \text{dBW}$ ;  $\text{dBm} + \text{dB} = \text{dBm}$
- $\text{dBm} + \text{dBm}$  ???  $\text{dBW} + \text{dBW}$  ??? Pasar a unidades lineales y sumar

$$P(\text{dBW}) = P(\text{dBm}) - 30$$

# Incidencia del medio en la señal transmitida (III)

## • Distorsión lineal:

- Se produce cuando el medio de transmisión se puede modelar como un sistema LTI y con una respuesta en frecuencia  $H(f)$
- **No aparecen nuevas componentes espectrales** que no estaban en la señal de entrada  $x(t)$



- Un canal no tiene distorsión lineal de amplitud si:  $|H(f)| = C = cte$ 
  - Si existe distorsión lineal de amplitud, aparece **distintas amplitudes** para las diferentes frecuencias que componen la señal  $x(t)$
- Un canal no tiene distorsión lineal de fase si la fase es lineal:  $\phi(f) = -\omega \cdot t_0 = -2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_0$ 
  - Si existe distorsión lineal de fase, aparece **distintos retardos** para las diferentes frecuencias que componen la señal  $x(t)$
- Resumiendo, un canal lineal sin distorsión:

$$Y(f) = X(f) \cdot C \cdot e^{-j\omega t_0}$$

$$y(t) = C \cdot x(t - t_0)$$

# Incidencia del medio en la señal transmitida (IV)

---

- **Distorsión lineal:**

- Retardo de fase  $t_p$ : retardo de la componente espectral de frecuencia  $f_0$  de la señal  $x(t)$

$$t_p = - \left. \frac{\phi(f)}{2\pi f} \right|_{f=f_0}$$

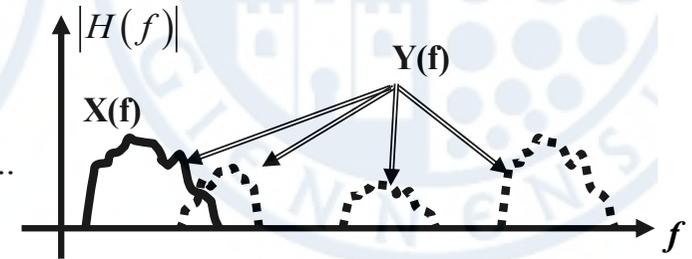
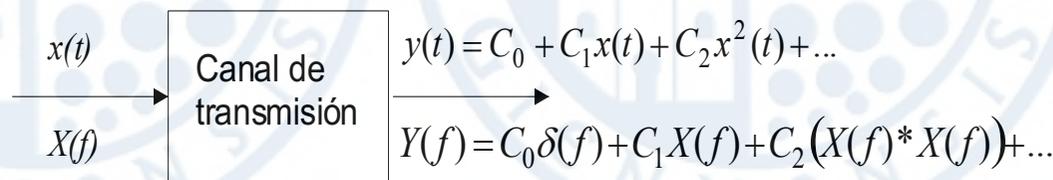
- Retardo de grupo  $t_g$ : retardo medio de las componentes espectrales dentro de una banda centrada en  $f_0$  de la señal  $x(t)$

$$t_g = - \left. \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(f)}{df} \right|_{f=f_0}$$

# Incidencia del medio en la señal transmitida (V)

- **Distorsión no lineal:**

- El canal no puede ser modelado como un sistema LTI (no principio de superposición)
- La señal de salida  $y(t)$  es una función **polinómica** de la señal de entrada  $x(t)$



- En la salida  $y(t)$  de un canal no lineal aparecen **nuevas componentes** espectrales que no estaban en la señal de entrada  $x(t)$
- Una medida del grado de no linealidad es la **distorsión armónica total  $D$**  del sistema.
  - Se suele medir introduciendo un tono puro de frecuencia fundamental  $f_0$
  - Se define la distorsión armónica n-ésimo  $D_n$  al cociente entre la amplitud del armónico n-ésimo y la amplitud del fundamental. Se suele expresar en %

$$x(t) = \cos(\omega_0 \cdot t)$$

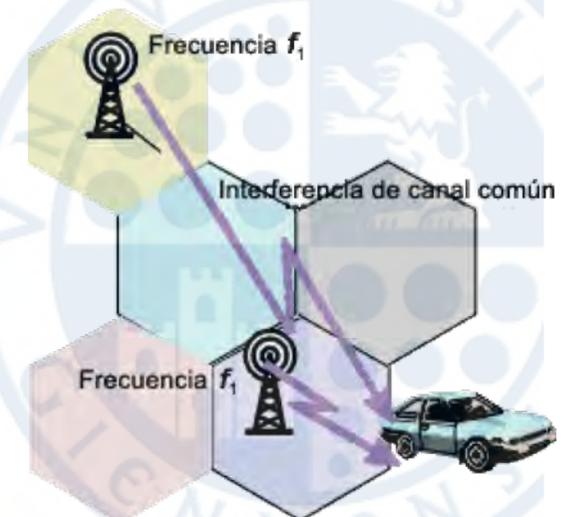
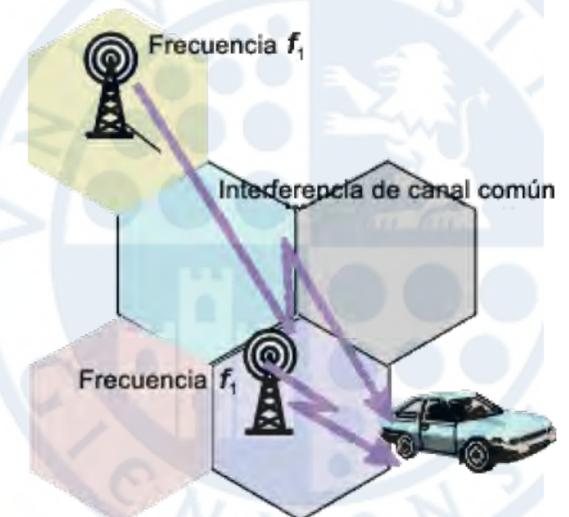
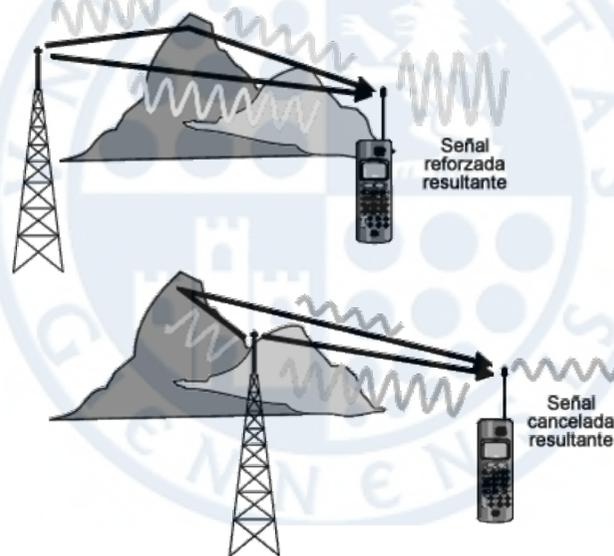
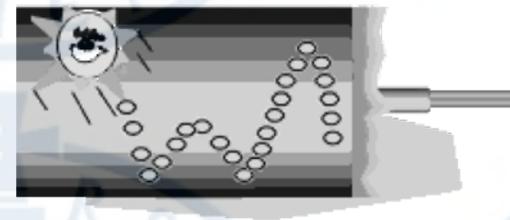
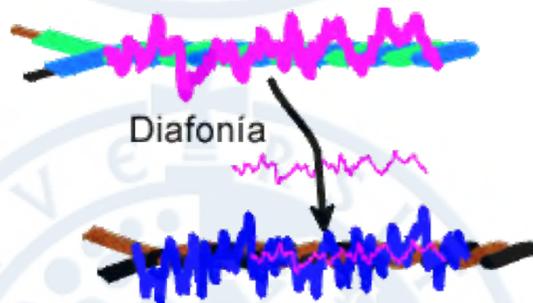
$$y(t) = \left( C_0 + \frac{C_2}{2} + \dots \right) + \left( C_1 + \frac{3}{4}C_3 + \dots \right) \cos(\omega_0 \cdot t) + \left( \frac{1}{2}C_2 + \frac{1}{4}C_4 + \dots \right) \cos(2 \cdot \omega_0 \cdot t) + \dots$$

$$D_2(\%) = 100 \cdot \frac{\frac{1}{2}C_2 + \frac{1}{4}C_4 + \dots}{C_1 + \frac{3}{4}C_3 + \dots} \Rightarrow D = \sqrt{\sum_n D_n^2}$$

# Incidencia del medio en la señal transmitida (VI)

- **Perturbaciones:**

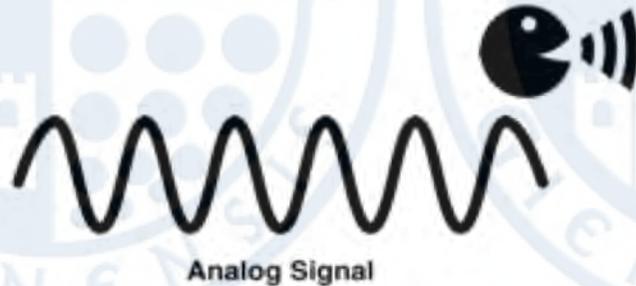
- **Ruido:** señal **no deseada** generada de forma **aleatoria** que aparece sobre todo en el medio de transmisión y se supondrá generalmente **aditivo, blanco y gaussiano** (como ruido térmico)
- **Interferencias:** señales **no deseadas** procedentes de **otros sistemas de comunicaciones** (a veces de otras partes del mismo sistema) que se suman a la señal deseada y contaminan el canal.



# Calidad de un sistema de Comunicación

- **Sistemas analógicos** (transmisión de señales analógicas)

- Relación señal a ruido (SNR o S/N) medida, normalmente a la salida del receptor.



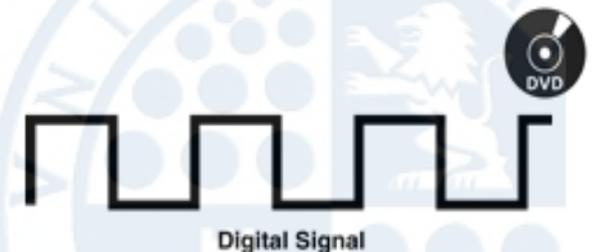
$$\frac{S}{N} = \frac{\text{Potencia de la Señal}}{\text{Potencia de Ruido}}$$

- Error cuadrático medio: potencia de la señal de error  $e(t)$  calculada como la diferencia entre la señal transmitida  $x_t(t)$  y la recibida  $x_r(t)$

$$e(t) = x_r(t) - x_t(t) \quad \overline{e^2} = E[e^2(t)]$$

- **Sistemas digitales** (transmisión de información digital)

- Probabilidad de error por símbolo  $P_e$
- Probabilidad de error por bit o tasa de de bits erróneos (bit error rate, BER)



- **Otras medidas** (tienen en cuenta el efecto en el destinatario final):

- Medidas psicoacústicas (señales sonoras)
- Test subjetivos basados en la percepción de cada sujeto (M.O.S.)

# Limitaciones y capacidad de un sistema de comunicación (I)

---

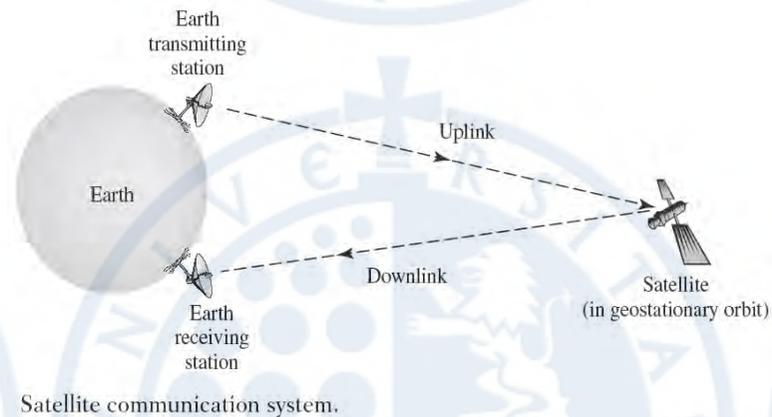
- **Tercer teorema de Shannon** (o ley de Shannon-Hartley): calcula la **capacidad máxima**  $C$  (bits/s, bps) para un canal de ancho de banda  $W$ (Hz) afectado por ruido aditivo, blanco y gaussiano (Additive White Gaussian Noise, AWGN), donde la relación señal a ruido es S/N:

$$C [\text{bit/s}] = W [\text{Hz}] \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)_{\text{lineales}}$$

- si la velocidad de transmisión  $R$  es **menor** que el límite de capacidad de Shannon  $C$  (  $R < C$  ), entonces es posible una transmisión **sin error** eliminando el efecto del ruido del canal.
- si la velocidad de transmisión  $R$  es **mayor** que el límite de capacidad de Shannon  $C$  ( $R > C$ ), **siempre ocurrirá error** en la transmisión independientemente de lo bien diseñado que esté el equipo
- Se utiliza para evaluar la viabilidad de cualquier diseño de sistema de comunicaciones digitales. Proporciona inmediatamente al ingeniero un "límite superior" sobre la capacidad del canal porque supone un enlace de comunicaciones perfectamente plano, sin distorsión ni interferencias y con ruido AWGN.
- Sistemas con codificación de corrección de errores (codificación de canal):  $R \rightarrow C$

# Limitaciones y capacidad de un sistema de comunicación (II)

- **Eficiencia** de un sistema de comunicaciones para transmitir cantidad de **información** en función de los **recursos** utilizados: coste, ancho de banda, potencia del transmisor y retardo a través del sistema.
- Los principales recursos que limitan la capacidad del canal en un sistema de comunicaciones son la **potencia** y el **ancho de banda**
  - **Sistemas limitados en potencia:** limita la potencia de la señal emitida (p.e., sistemas de comunicación por satélite).



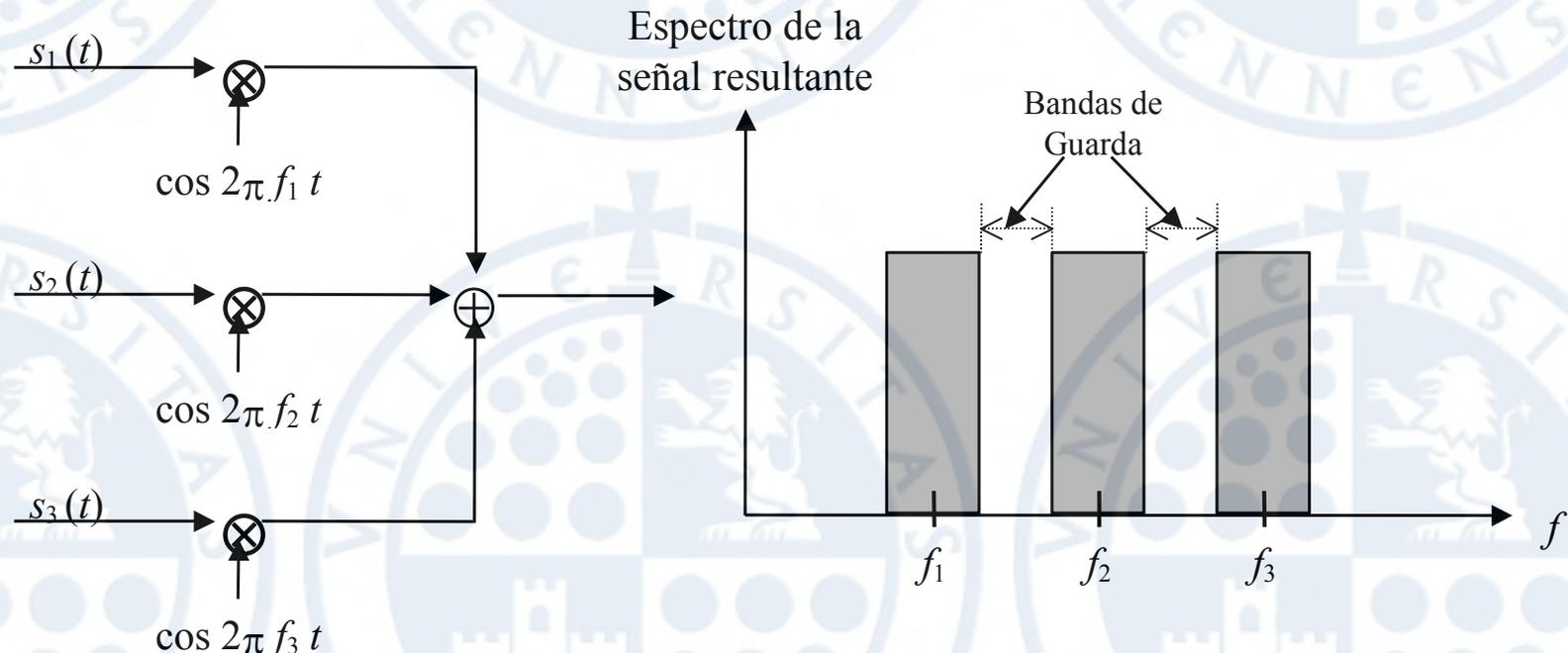
- **Sistemas limitados en banda:** limita el ancho de banda (p.e., sistemas de radiodifusión y comunicación móvil celular).



On air!

# Modulación (I)

- **Modulación:** translación de frecuencias
  - Moduladora (información) y portadora (adapta la información al canal de transmisión)
  - La modulación es una operación **reversible** → Demodulación
  - Las portadoras suelen presentar una frecuencia mucho mayor que la mayor de las frecuencias presentes en la moduladora → **FDM** (multiplexación por división en frecuencia).



- Métodos de modulación de onda continua (continuous wave, CW): modulación de **amplitud** (AM), modulación de **frecuencia** (FM) y modulación de **fase** (PM)
- Seminario II de la asignatura: modulaciones analógicas (lineales y angulares)

# Modulación (II)

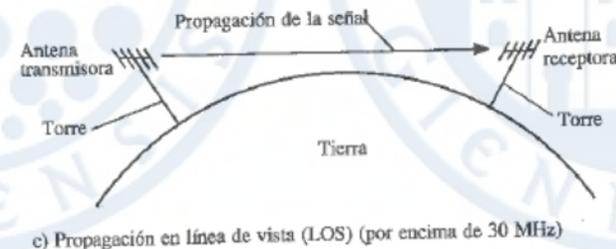
- **Ventajas de la modulación**

- **Transmisión eficiente:** mayor eficiencia mecanismos de propagación.

- Ondas line-of-sight LOS (100Hz) ->  $L=300\text{km}$  (sin modular);

- Ondas line-of-sight LOS (100Hz) ->  $L=0.3\text{m}$  (modulando con  $f_c=100\text{MHz}$ )

$$\text{Antena: } L = \frac{1}{10} \lambda, \quad \lambda = \frac{c}{f}$$



- **Minimizar las limitaciones del HW**, ya que la complejidad y coste se minimizan si el ancho de banda fraccional  $[W/f_c]$  se sitúa en el rango 1%-10%.

- **Reducción del ruido e interferencias**

- Aumentar potencia: elevado coste y perjudicial
- Modulación FM y otras, permiten reducir el ruido a costa de aumentar ancho de banda.

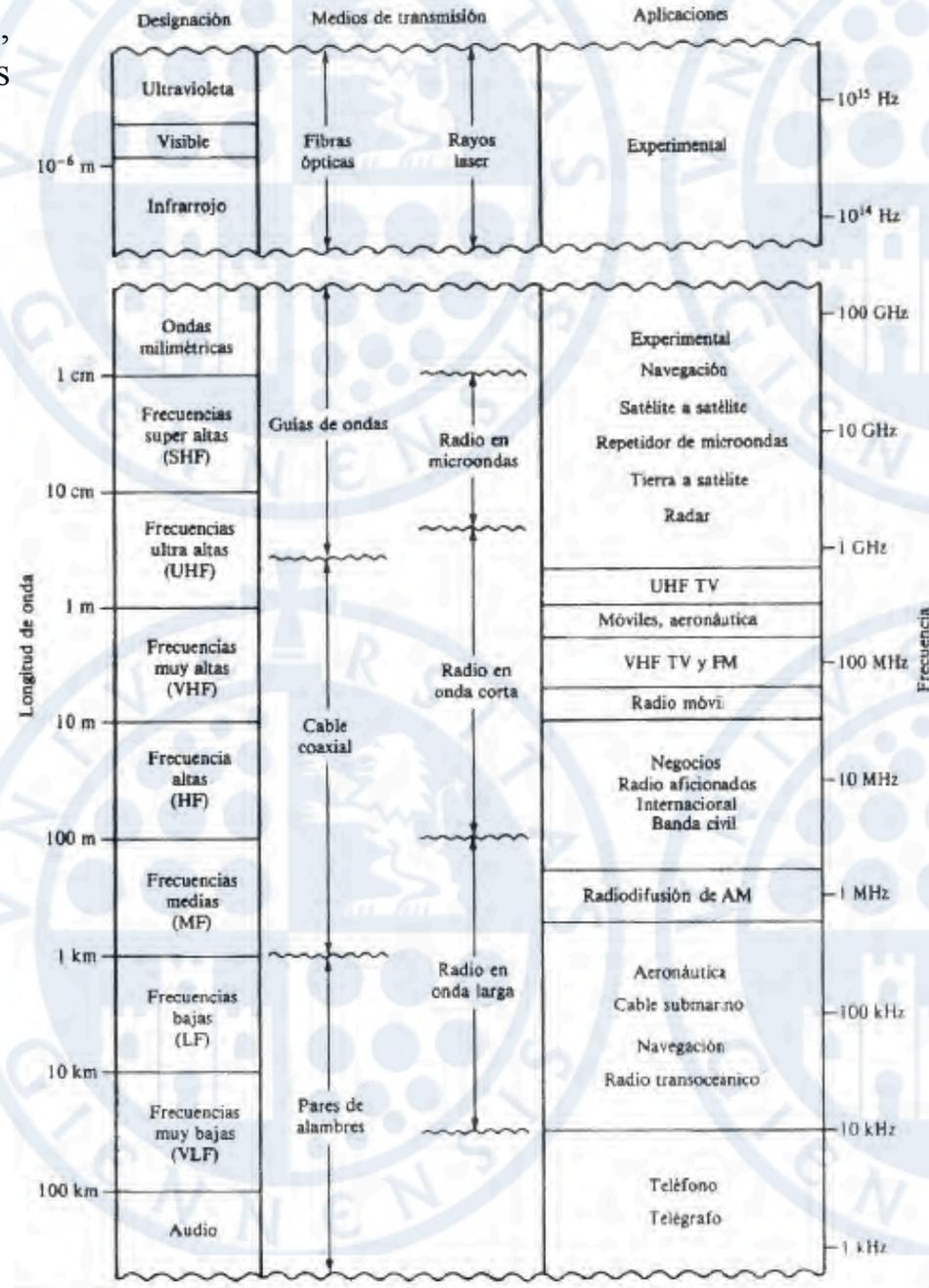
- **Asignación de frecuencias**, de acuerdo al reparto que la autoridad de cada país haga de las mismas (cuadro nacional de asignación de frecuencias, CNAF)

- **Multiplexación por división en frecuencia (FDM)**

- Diferentes portadoras CW y filtrado selectivo
- FDM incrementa la eficiencia de transmisión, >1800 señales voz/cm en coaxial

# Modulación (III)

Relación entre rango de frecuencias, medio de transmisión y aplicaciones de comunicaciones



# Modulación (IV)

Relación entre rango de frecuencias, medio de transmisión y aplicaciones de comunicaciones

TABLA 1-2 BANDAS DE FRECUENCIA

Banda de Frecuencia*	Designación	Características de propagación	Usos típicos
3-30 kHz	Muy baja frecuencia (VLF)	Onda de tierra; baja atenuación de día y de noche; elevado nivel de ruido atmosférico	Navegación de larga distancia; comunicación submarina
30-300 kHz	Baja frecuencia (LF)	Similar a VLF, un poco menos confiable; absorción en el día	Navegación de larga distancia y radiofaros de comunicación marina
300-3000 kHz	Frecuencia media (MF)	Onda de tierra y onda espacial nocturna; baja atenuación de noche y alta de día; ruido atmosférico	Radio marítimo, localización de direcciones y radiodifusión AM
3-30 MHz	Alta frecuencia (HF)	La reflexión ionosférica varía con la hora del día; estación y frecuencia; poco ruido atmosférico a 30 MHz	Radioaficionado; radiodifusión internacional, comunicación militar, comunicación aérea y marítima a larga distancia, telefonía, teléfono, facsímil
30-300 MHz	Muy alta frecuencia (VHF)	Propagación casi en línea de vista (LOS), con dispersión debida a inversiones de temperatura, ruido cósmico	Televisión de VHF, radio FM de dos vías, comunicación aérea AM, ayudas de navegación para aeronaves
0.3-3 GHz	Ultra alta frecuencia (UHF)	Propagación LOS, ruido cósmico	Televisión UHF, telefonía celular, ayudas para la navegación, radar, enlaces de microondas, sistemas de comunicación personal
1.0-2.0	Designación de letra L		
2.0-4.0	S		
3-30 GHz	Superalta frecuencia (SHF)	Propagación LOS; atenuación producida por lluvia por encima de 10 GHz, atenuación atmosférica debida a oxígeno y vapor de agua; elevada absorción de vapor de agua a 22.2 GHz	Comunicación vía satélite, enlaces de radar vía microondas
2.0-4.0	Designación de letra S		
4.0-8.0	C		
8.0-12.0	X		
12.0-18.0	Ku		
18.0-27.0	K		
27.0-40.0	Ka		
26.5-40.0	R		

\* kHz =  $10^3$  Hz; MHz =  $10^6$  Hz; GHz =  $10^9$  Hz.