

TRANSMISIÓN DE DATOS

Redes de Datos I



FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

TRANSMISIÓN DE DATOS

- Transmisión analógica y digital
- Dominio del tiempo
- Dominio de la frecuencia
- Decibel
- Perturbaciones
- Capacidad del canal

Transmisión analógica y digital



La transmisión de datos ocurre entre un transmisor y un receptor, a través de un medio:

Medios guiados

Medios no guiados

La información se puede representar por señales electromagnéticas, a través de señales analógicas o digitales.

Reglas:

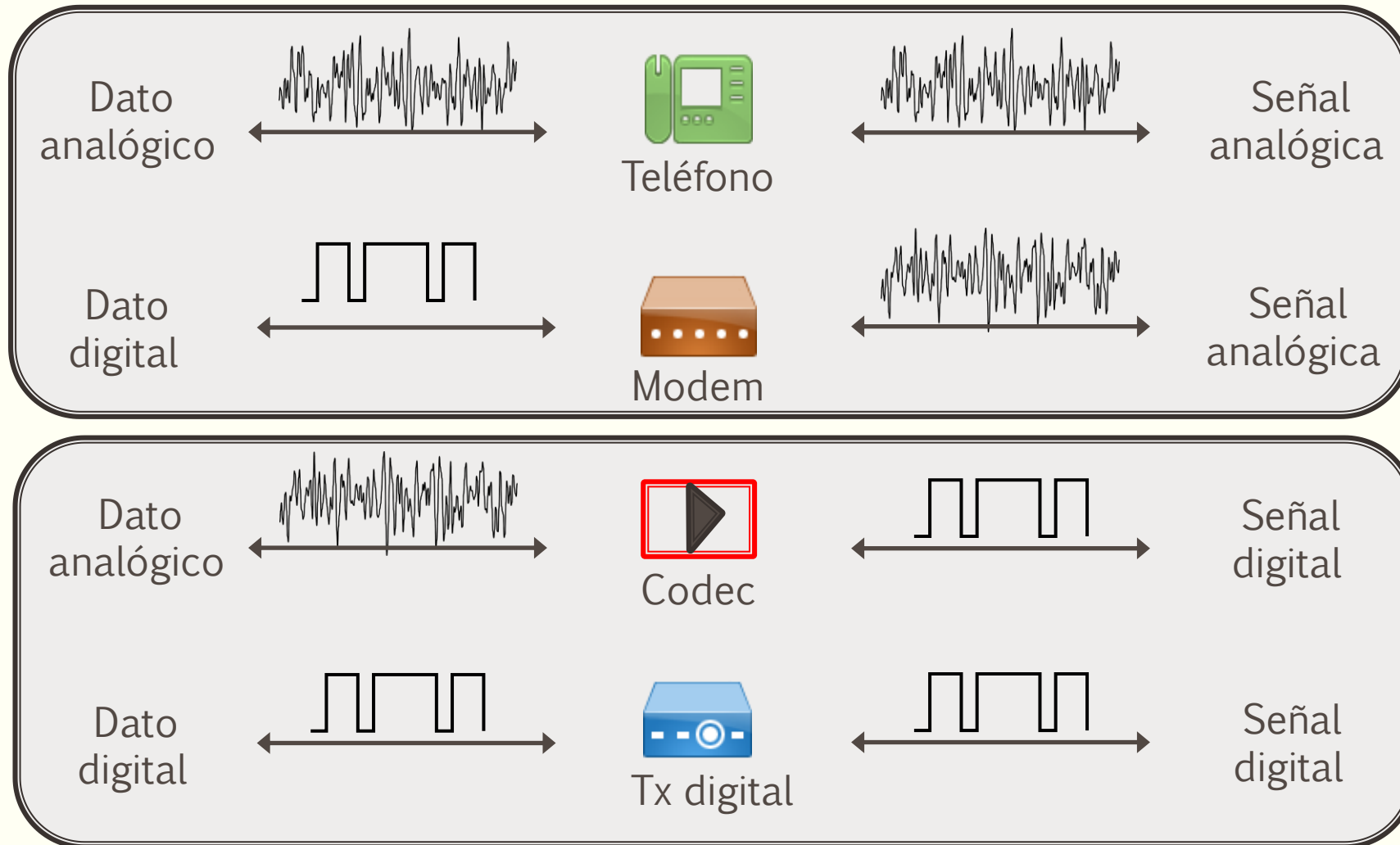
- 1) Regla 1
- 2) Regla 2
- 3) Regla 3

, , ,

Transmisión de datos analógicos y digitales



Transmisión de datos analógicos y digitales

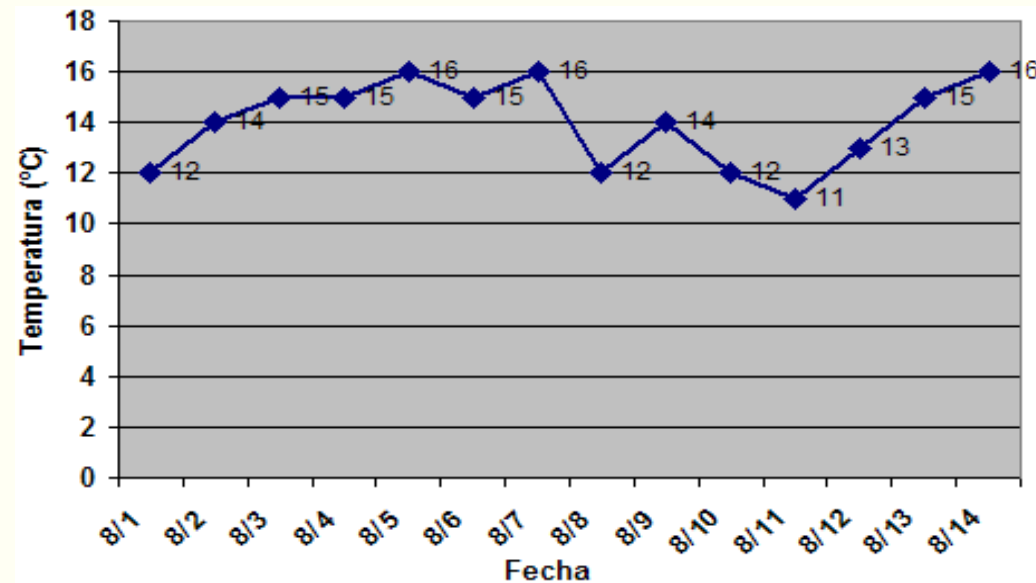


TRANSMISIÓN DE DATOS

- Transmisión analógica y digital
- **Dominio del tiempo**
- Dominio de la frecuencia
- Decibel
- Perturbaciones
- Capacidad del canal

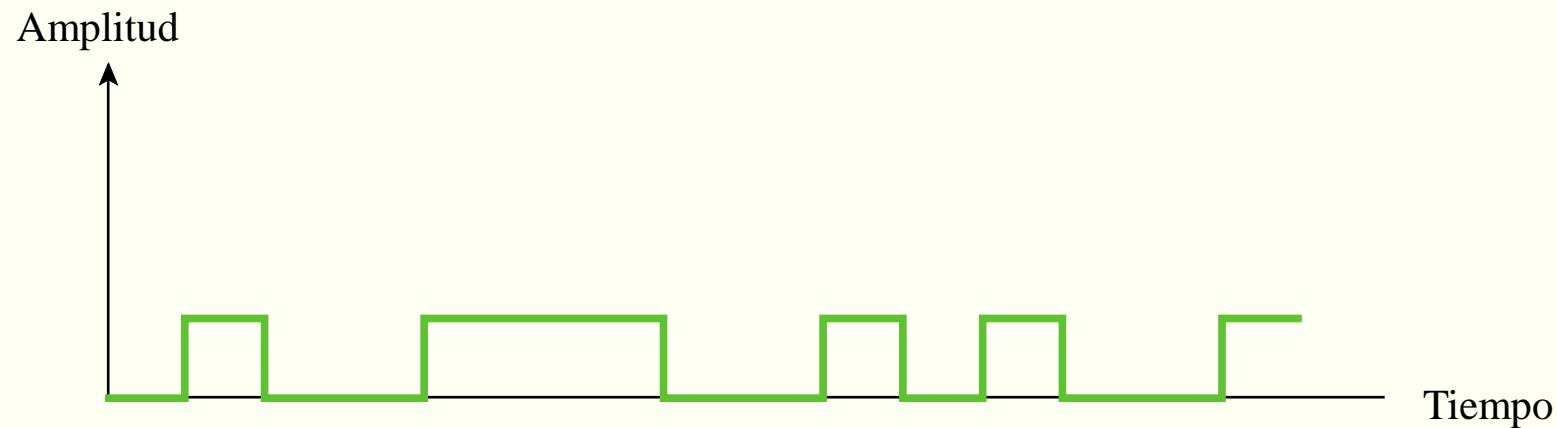
Dominio del tiempo

- **Señal analógica:** es aquella que toma valores continuos, es decir, que las cantidades varían sobre un intervalo continuo de valores
- No presenta saltos o discontinuidades
- Por ej.: la temperatura



Dominio del tiempo

Señal digital: es aquella que toma un conjunto (finito) de valores discretos. Por ej.: valores binarios.



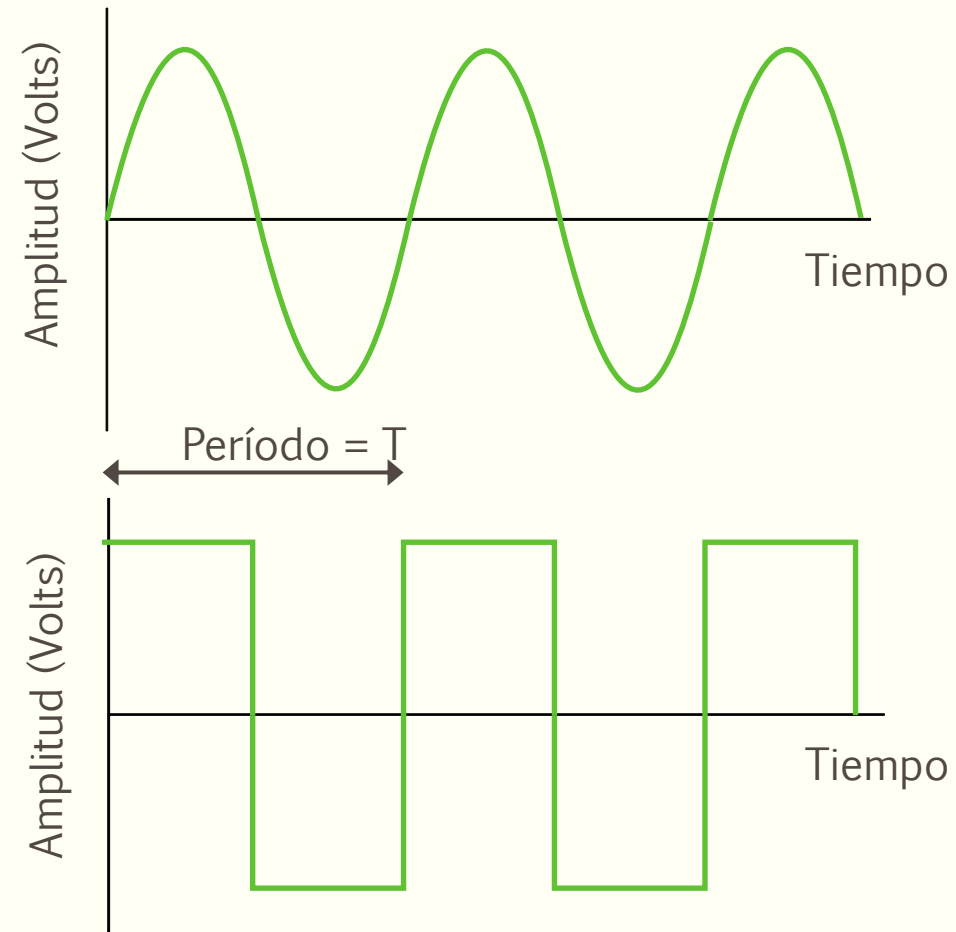
Dominio del tiempo

Señales periódicas

- El mismo patrón de señal se repite en el tiempo
- Por ej.: señal continua periódica (onda sinusoidal) y señal discreta periódica (onda cuadrada)

- $s(t) = s(t + T)$

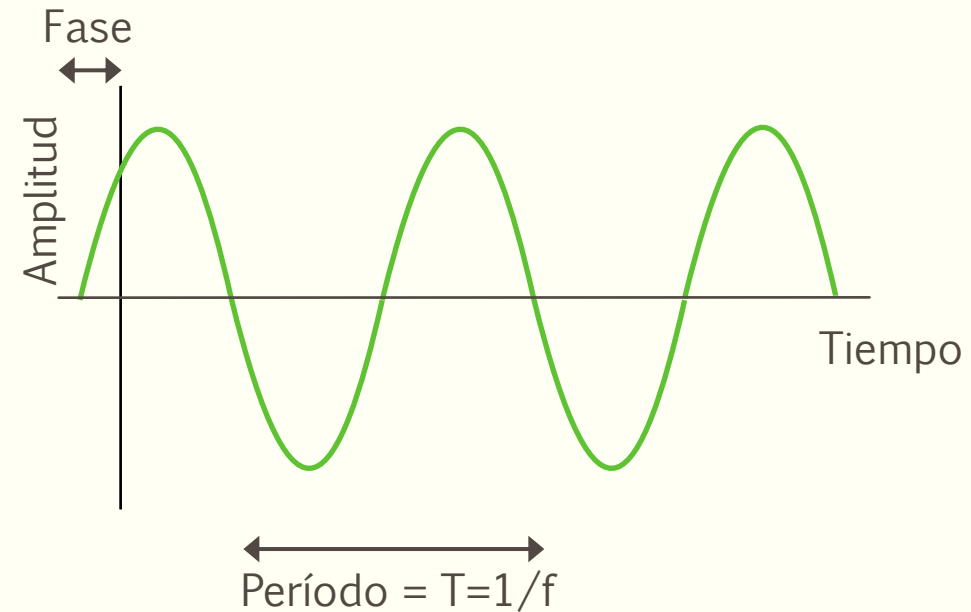
para $-\infty < t < +\infty$



Dominio del tiempo

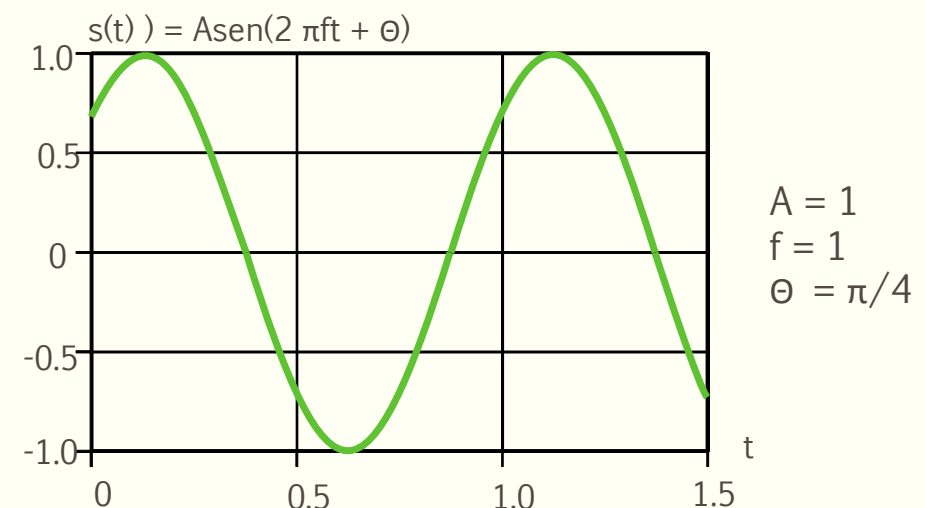
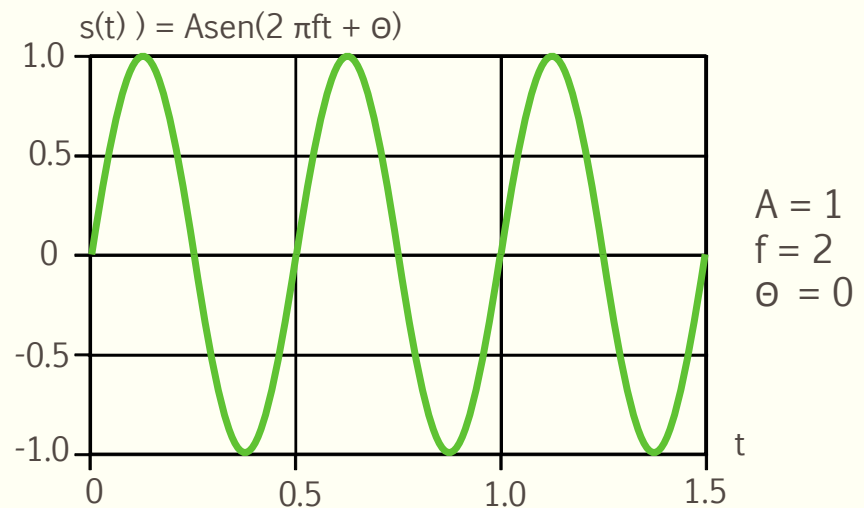
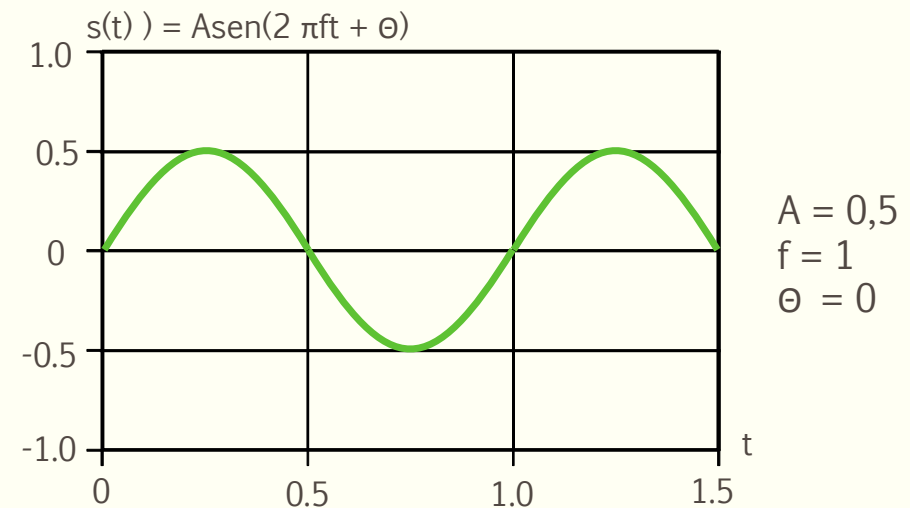
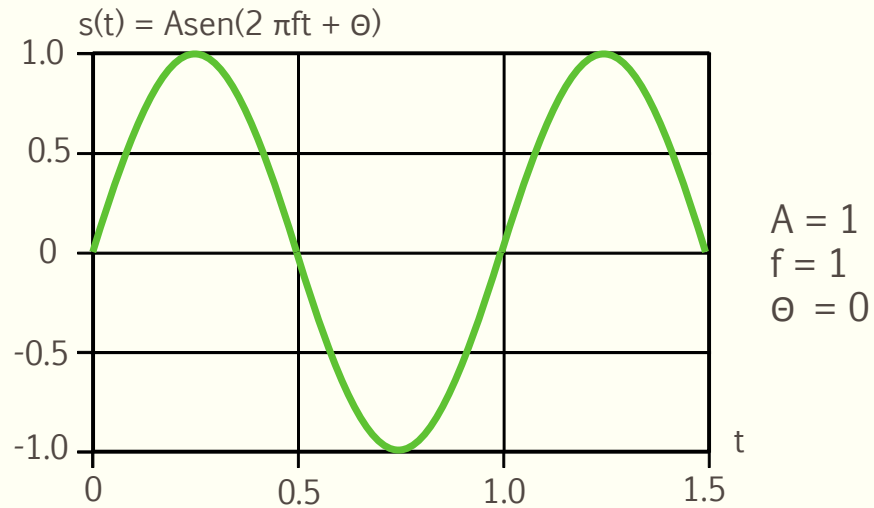
Onda senoidal

- Amplitud: valor máximo de la señal en el tiempo
- Período: cantidad de tiempo entre dos repeticiones del patrón
- Frecuencia: es la razón a la que la señal se repite
- Fase: posición relativa de la señal dentro de un período



- $s(t) = A \sin(2\pi ft + \theta)$

Dominio del tiempo

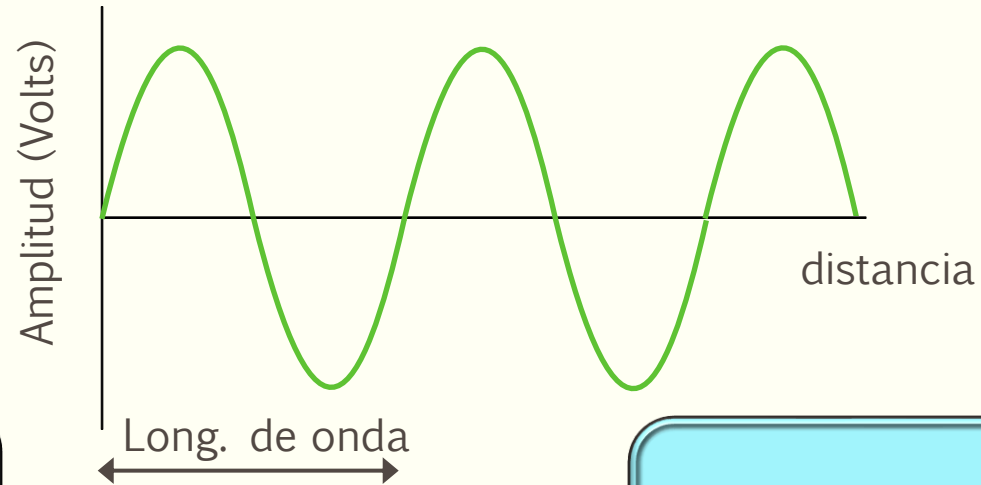


Dominio del tiempo

La **longitud de onda** de una señal es la distancia ocupada por un ciclo

También se puede expresar como la distancia entre dos puntos de fase correspondiente de dos ciclos consecutivos

Si la velocidad de la señal es v , entonces la longitud de onda está relacionada con el periodo como $\lambda = vT$



O equivalentemente
 $\lambda f = v$

Un caso frecuente es cuando $v=c$, donde $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

TRANSMISIÓN DE DATOS

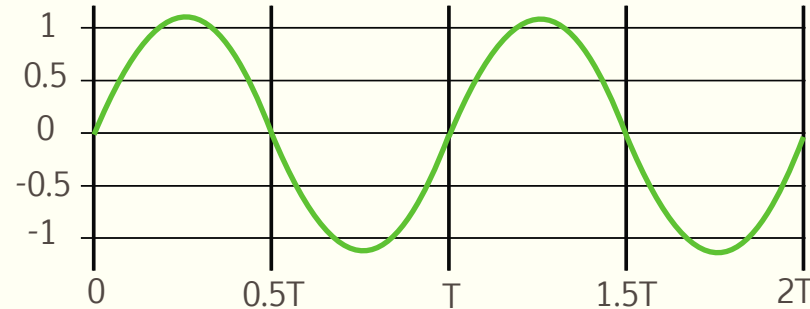
- Transmisión analógica y digital
- Dominio del tiempo
- **Dominio de la frecuencia**
- Decibel
- Perturbaciones
- Capacidad del canal

Dominio de frecuencia

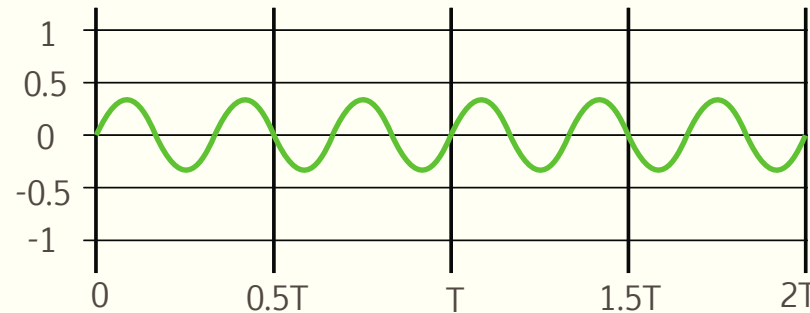
Suma de componentes de frecuencia

Si las componentes de una señal tienen frecuencias múltiplos de una frecuencia dada, ésta se denomina **frecuencia fundamental**

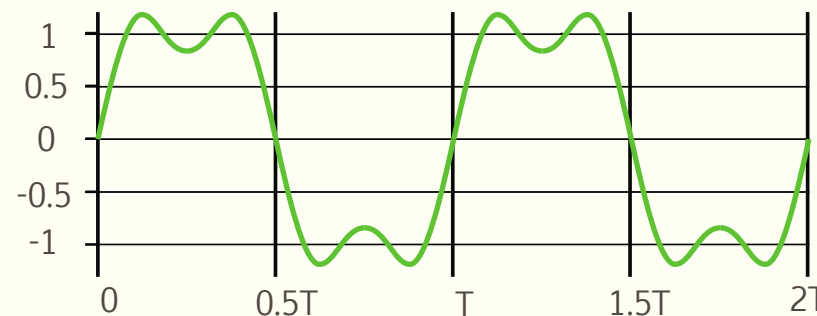
El período de la señal resultante es el período de la frecuencia fundamental



$$a(t) = \left(\frac{4}{\eta}\right) \text{sen}(2\eta f t)$$



$$b(t) = \left(\frac{1}{3}\right) \text{sen}(2\eta(3f)t)$$



$$c(t) = a(t) + b(t)$$

Dominio de frecuencia



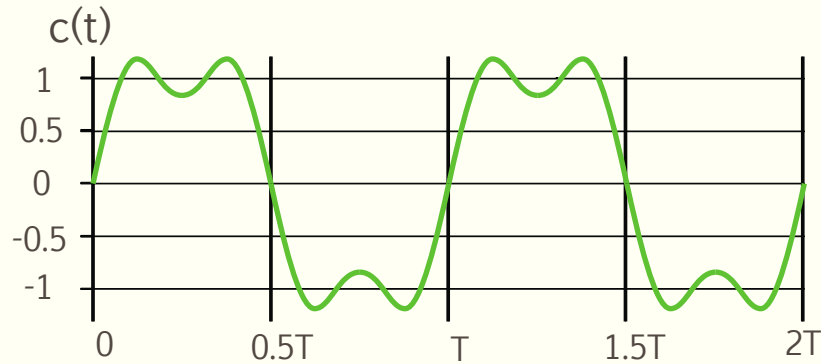
Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830)
Matemático, Físico e Historiador
École Polytechnique
Director de Tesis: Joseph Lagrange
Compañero de Simeon Poisson

Serie de Fourier: las funciones periódicas pueden ser representadas por una suma infinita ponderada de senos y cosenos

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2n\pi}{T} t\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T} t\right) \right]$$

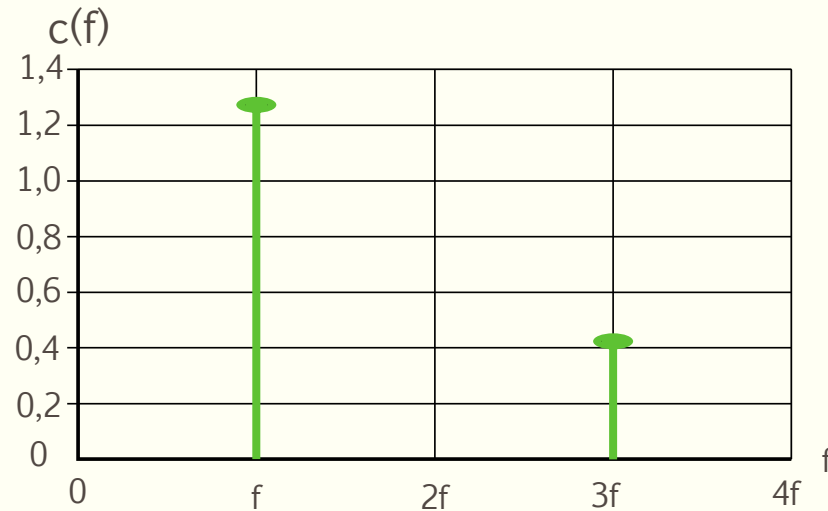
Dominio de frecuencia

Dominio del tiempo



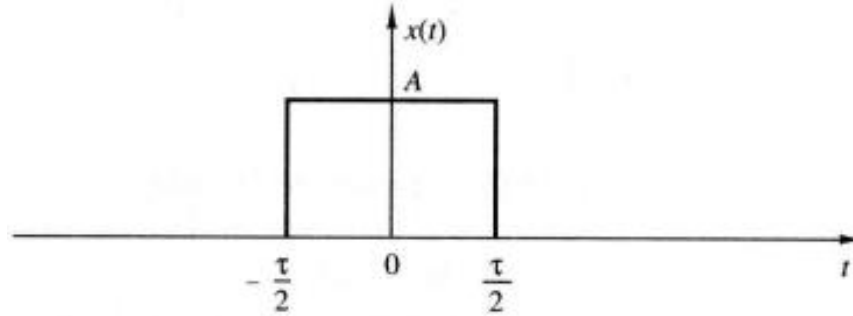
$$c(t) = \left(\frac{4}{\eta}\right) \text{sen}(2\eta f t) + \left(\frac{1}{3}\right) \text{sen}(2\eta(3f)t)$$

Dominio de la frecuencia

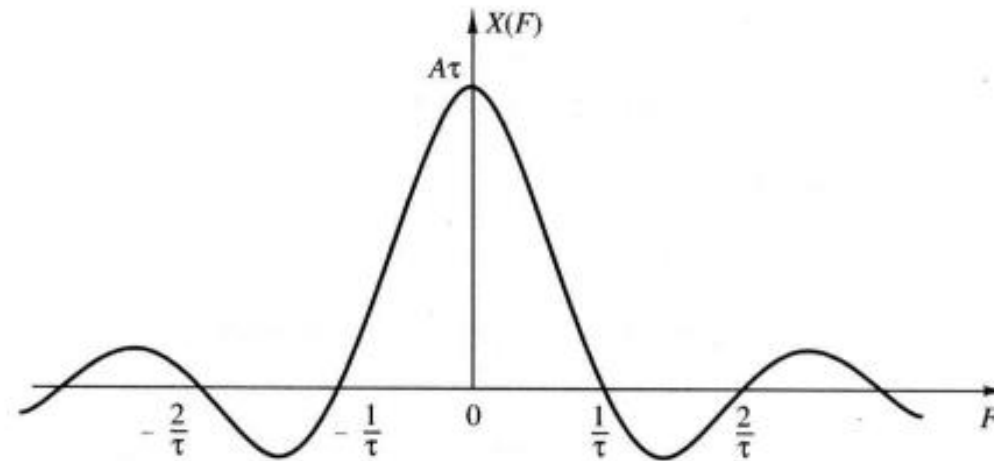


Dominio de frecuencia

Transformada de Fourier de un pulso rectangular



¿Qué ocurre si τ tiende a infinito?



¿Qué ocurre si τ tiende a cero?

Dominio de frecuencia

Espectro

Conjunto de frecuencias que componen la señal

Ancho de banda absoluto

Ancho del espectro

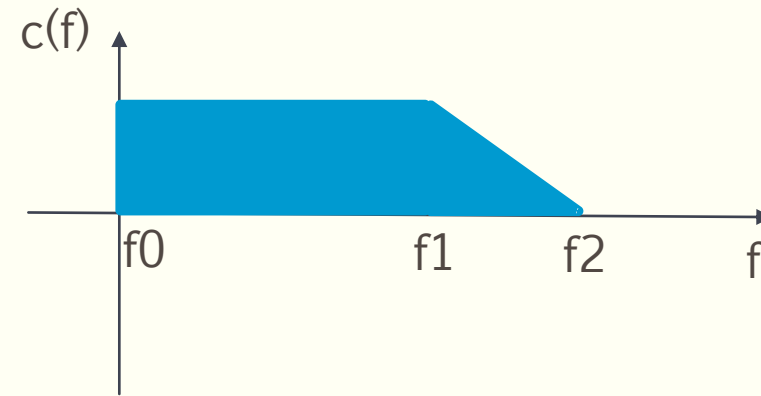
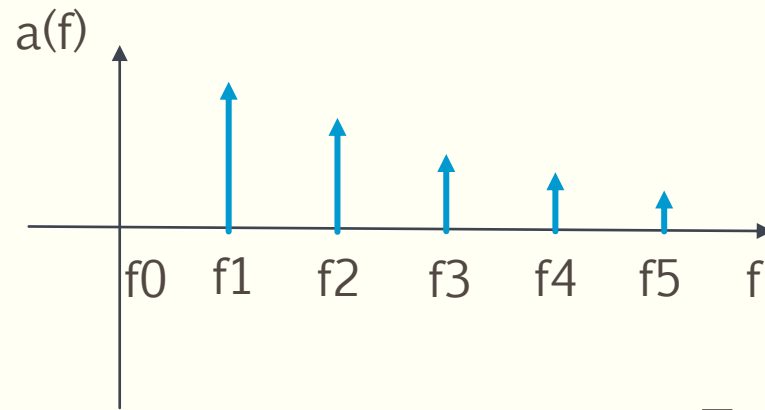
Ancho de banda efectivo

Banda limitada de frecuencias que contiene la mayor parte de la energía

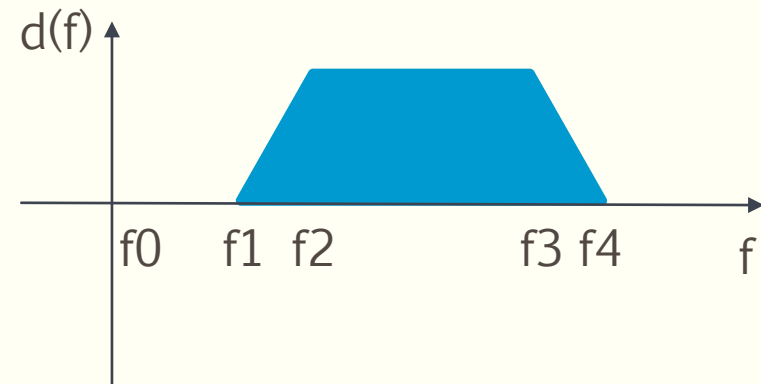
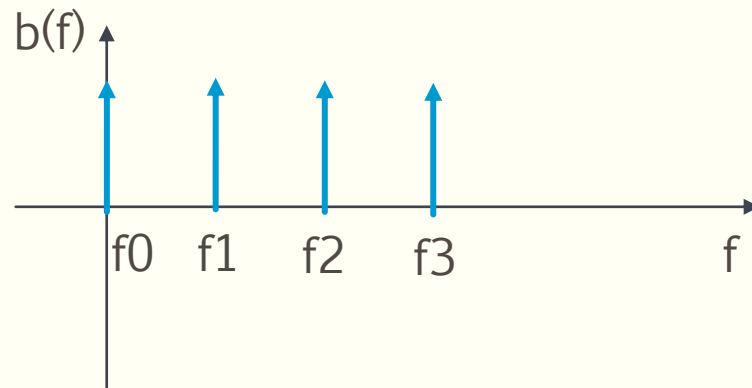
Componente de continua

Componente de frecuencia cero

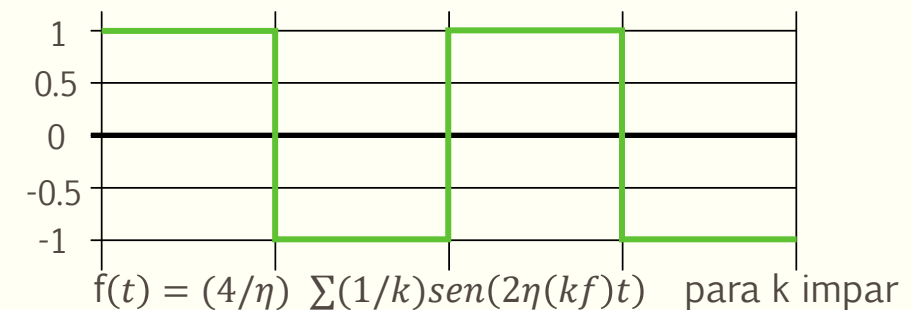
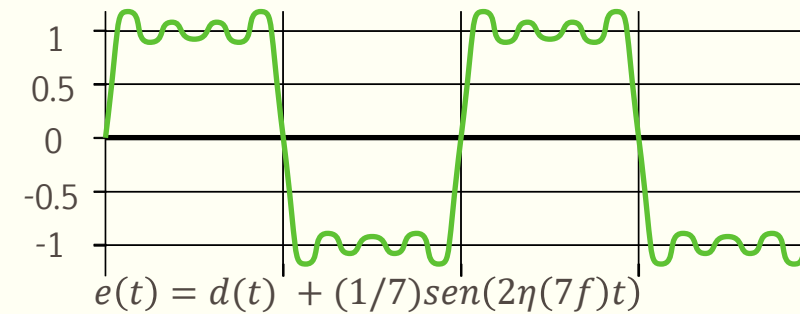
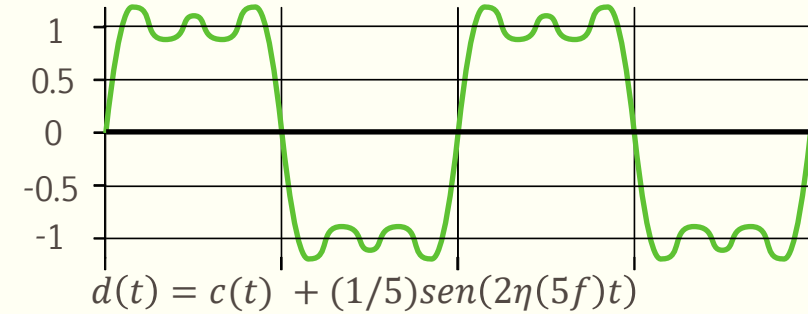
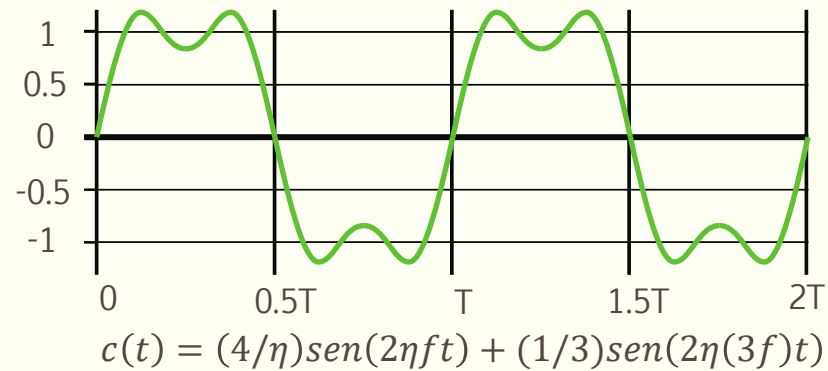
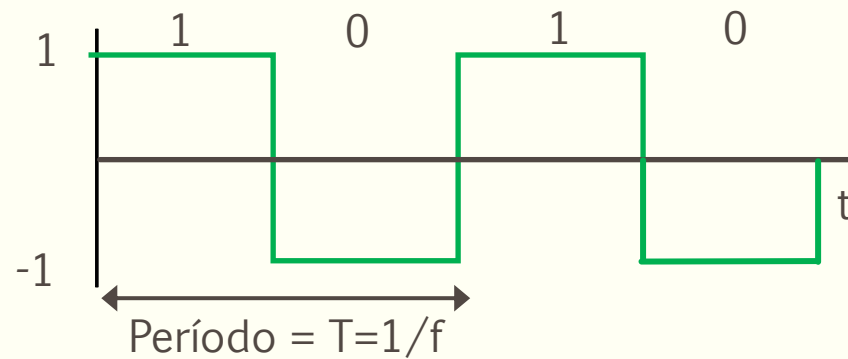
Dominio de frecuencia



Ejemplos



Velocidad de transmisión y ancho de banda



Velocidad de transmisión y ancho de banda

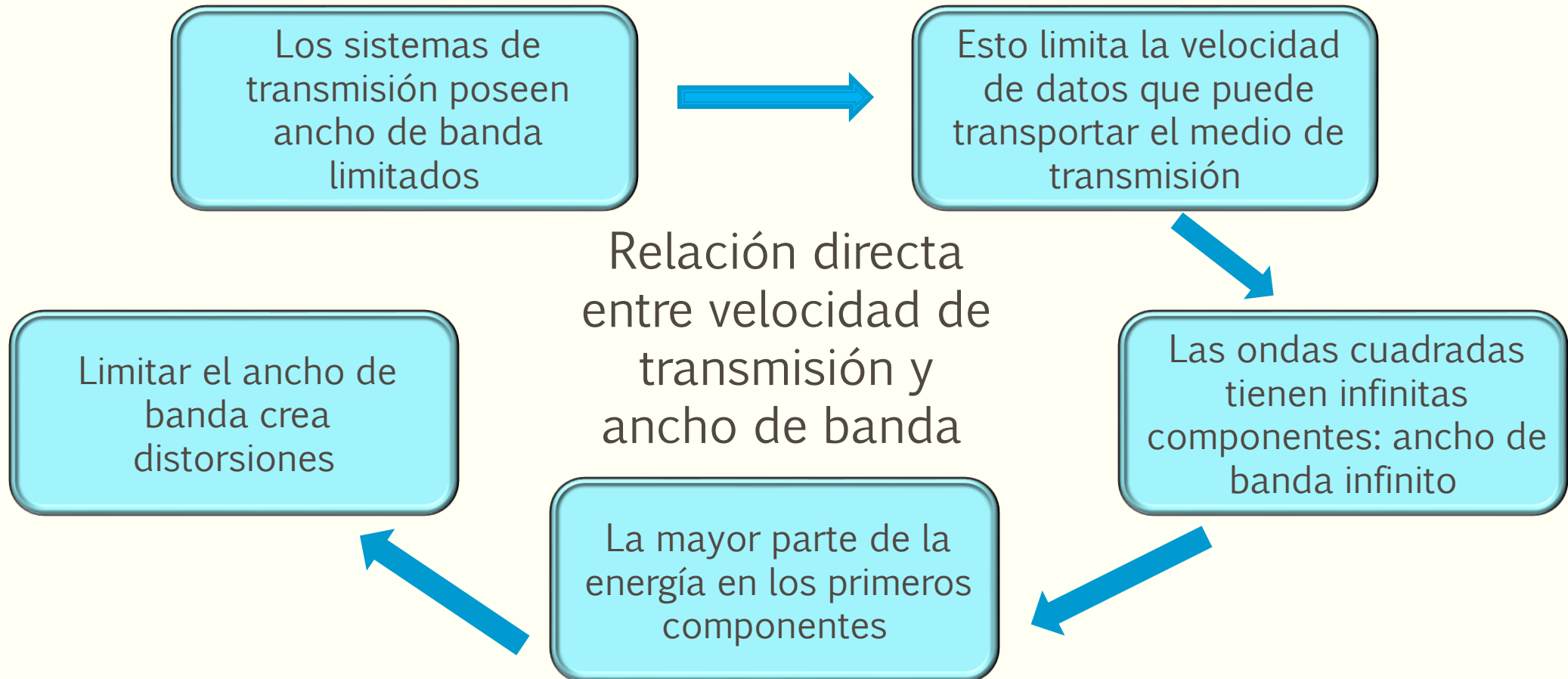
Se puede demostrar que una onda cuadrada de amplitud entre A y -A, puede representarse como:

$$c(t) = A\left(\frac{4}{\pi}\right) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\text{sen}(2\pi(kf)t)}{k} \quad \text{para } k \text{ impar}$$

El ancho de banda absoluto es infinito

Sin embargo, la k-ésima componente tiene una amplitud igual a 1/k de la fundamental. Por lo tanto, el ancho de banda efectivo se reduce a las primeras componentes

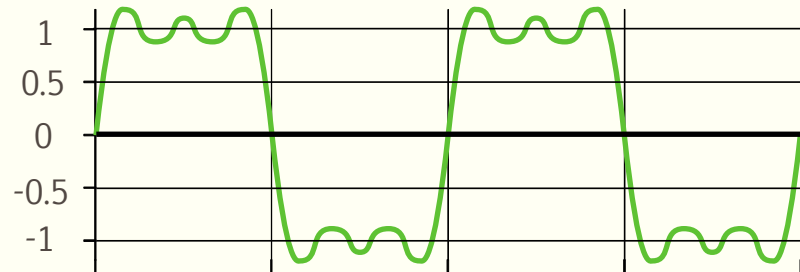
Velocidad de transmisión y ancho de banda



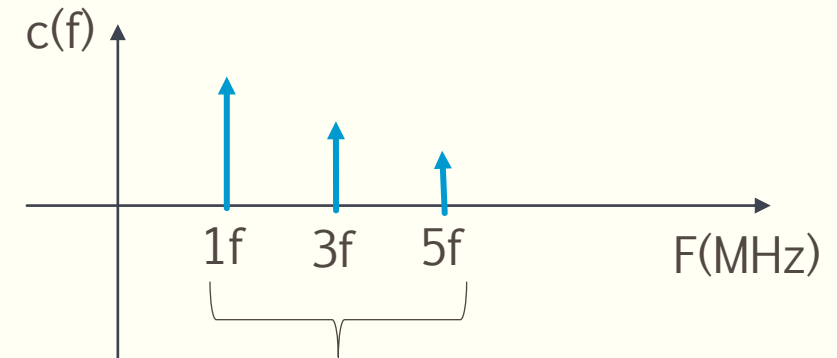
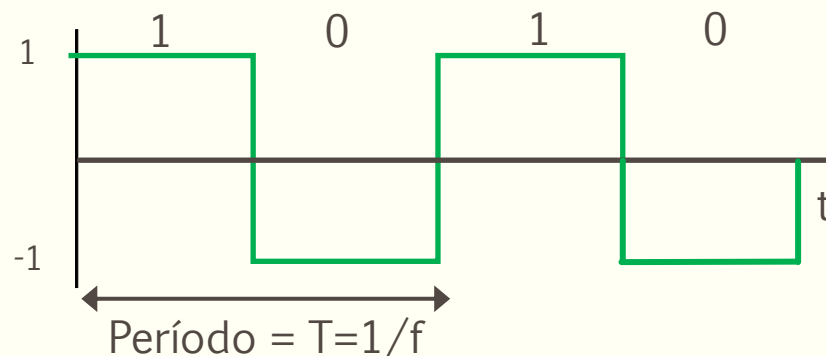
Velocidad de transmisión y ancho de banda

- Ejemplo: supongamos un sistema de transmisión con un ancho de banda de 4MHz. ¿Qué velocidad se puede conseguir para una transmisión alternada de 0 y 1?

(utilizamos esta aproximación)



$$c(t) = (4/\eta)\text{sen}(2\eta ft) + (1/3)\text{sen}(2\eta(3f)t) + (1/5)\text{sen}(2\eta(5f)t)$$



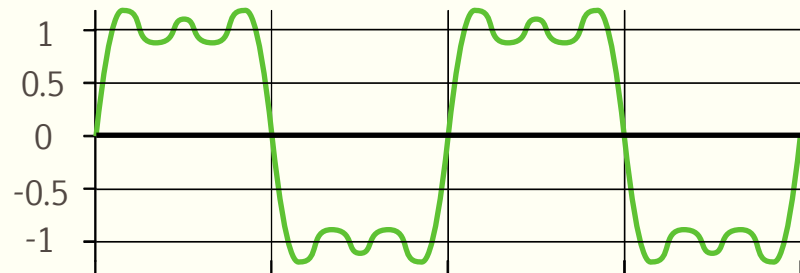
$$BW=4\text{MHz}=5f-1f=4f$$
$$\rightarrow f=1\text{MHz}$$

$$T=1/f=1/1\text{MHz}=1\mu\text{s}$$
$$2 \text{ bits en } 1\mu\text{s} \rightarrow 2\text{Mbps}$$

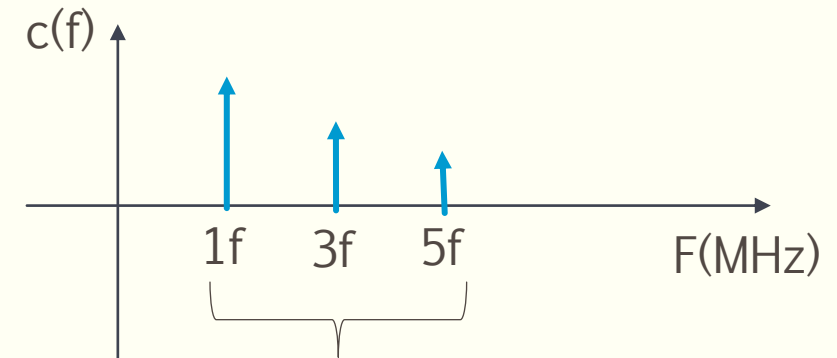
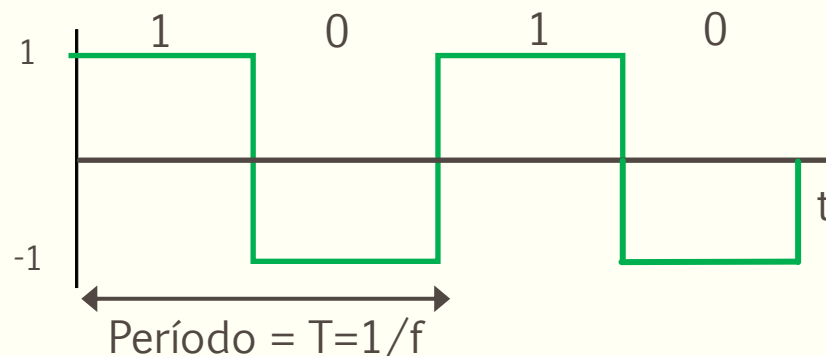
Velocidad de transmisión y ancho de banda

- Ejemplo: si quiero duplicar la velocidad de transmisión del ejercicio anterior, ¿qué ancho de banda necesitare?

(utilizamos esta aproximación)



$$c(t) = (4/\eta)\text{sen}(2\eta ft) + (1/3)\text{sen}(2\eta(3f)t) + (1/5)\text{sen}(2\eta(5f)t)$$



$$\text{BW} = 5f - 1f = 4f \\ \rightarrow = 8\text{MHz}$$

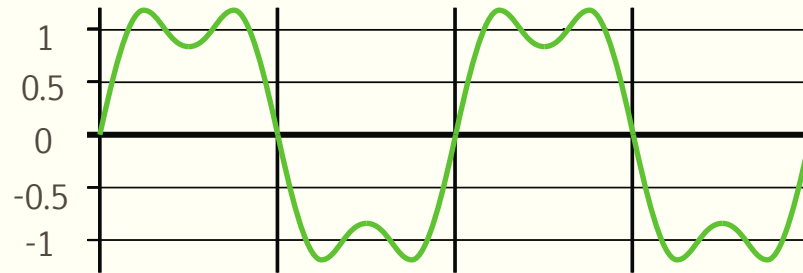
$$4\text{Mbps} \rightarrow 4 \text{ bits en } 1\mu\text{s} \\ T = 1/f = 0,5\mu\text{s} \rightarrow f = 2\text{MHz}$$

Si se duplica el BW, se duplica la velocidad

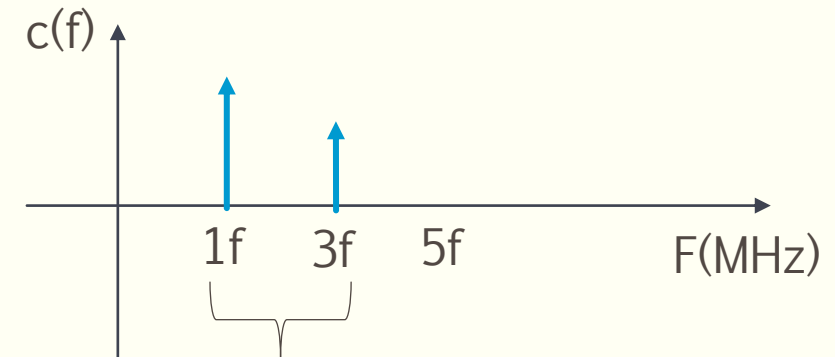
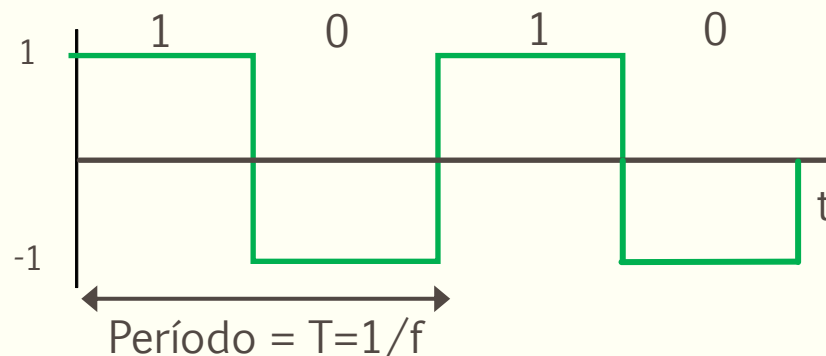
Velocidad de transmisión y ancho de banda

- Ejemplo: si mantenemos la velocidad de transmisión del ejercicio anterior, pero utilizamos una aproximación con una componente menos ¿qué ancho de banda necesitare?

(utilizamos esta aproximación)



$$c(t) = (4/\eta)\text{sen}(2\eta ft) + (1/3)\text{sen}(2\eta(3f)t) + (1/5)\text{sen}(2\eta(5f)t)$$

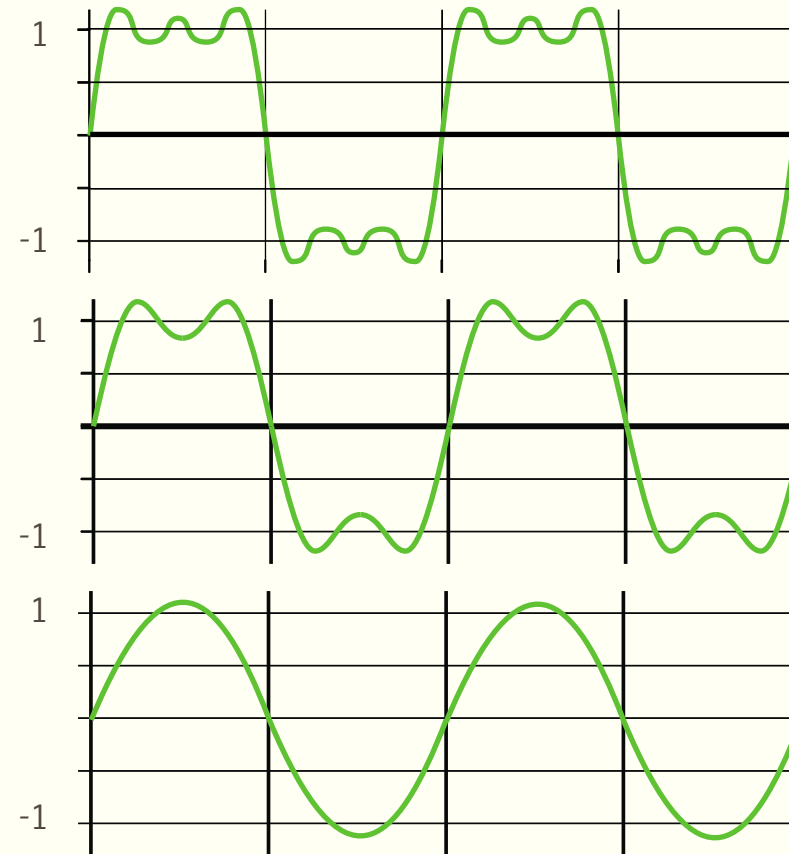
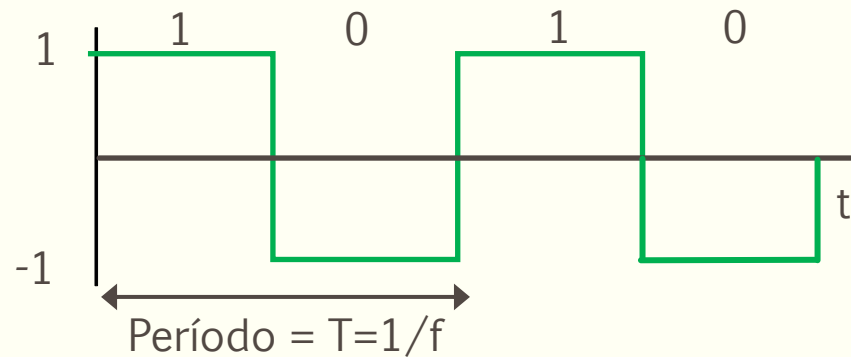


$$\text{BW} = 3f - 1f = 2f \\ \rightarrow = 4\text{MHz}$$

$$4\text{Mbps} \rightarrow 4 \text{ bits en } 1\mu\text{s} \\ T = 1/f = 0,5\mu\text{s} \rightarrow f = 2\text{MHz}$$

Velocidad de transmisión y ancho de banda

Por lo tanto, para una señal alternada de 0 y 1s:



5° armónico
 $V_T = 2f$
 $BW = 4f$

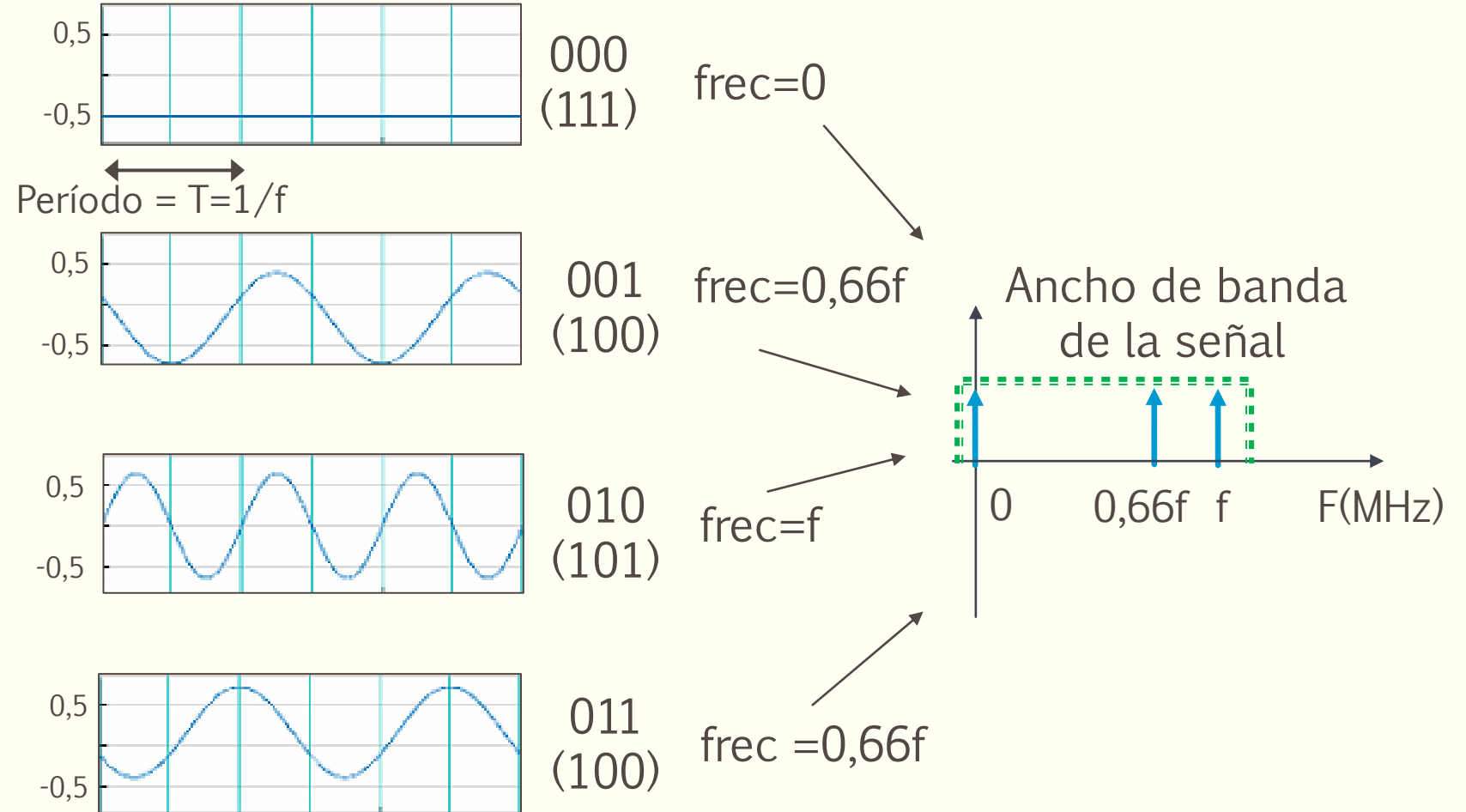
3° armónico
 $V_T = 2f$
 $BW = 2f$

Fundamental
 $V_T = 2f$

Velocidad de transmisión y ancho de banda

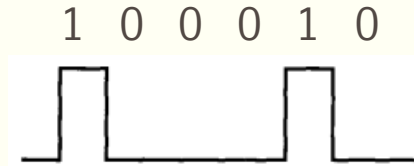
¿Qué pasa si la señal no es alternada?

Supongamos secuencias de 3 bits

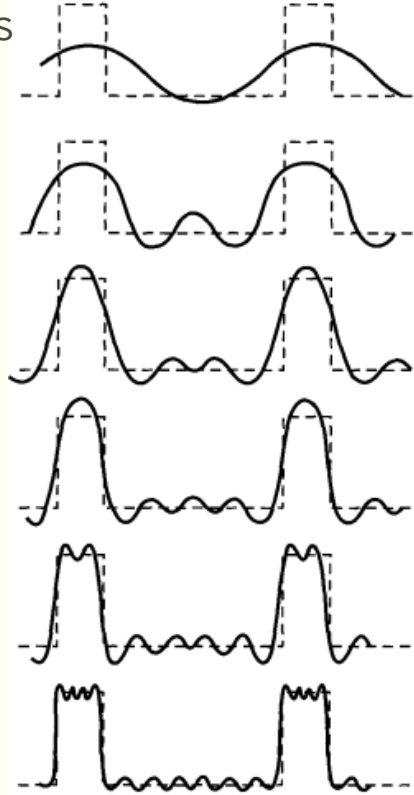


Velocidad de transmisión y ancho de banda

Pulsos antes de ser transmitidos



Pulsos después de ser transmitidos



Velocidad de transmisión
2.000 bits/s

Ancho de banda = 500 Hz

Ancho de banda = 900 Hz

Ancho de banda = 1.300 Hz

Ancho de banda = 1.700 Hz

Ancho de banda = 2.500 Hz

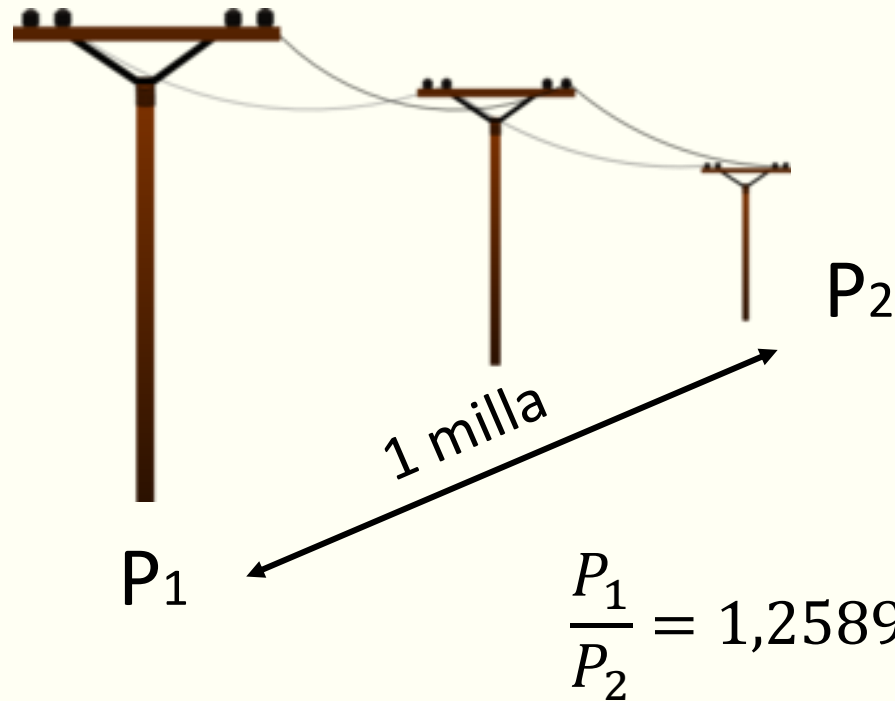
Ancho de banda = 4.000 Hz

TRANSMISIÓN DE DATOS

- Transmisión analógica y digital
- Dominio del tiempo
- Dominio de la frecuencia
- **Decibel**
- Perturbaciones
- Capacidad del canal

Decibel

- Un poco de historia....

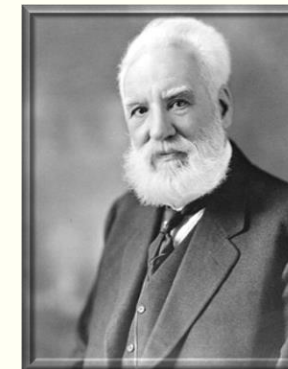
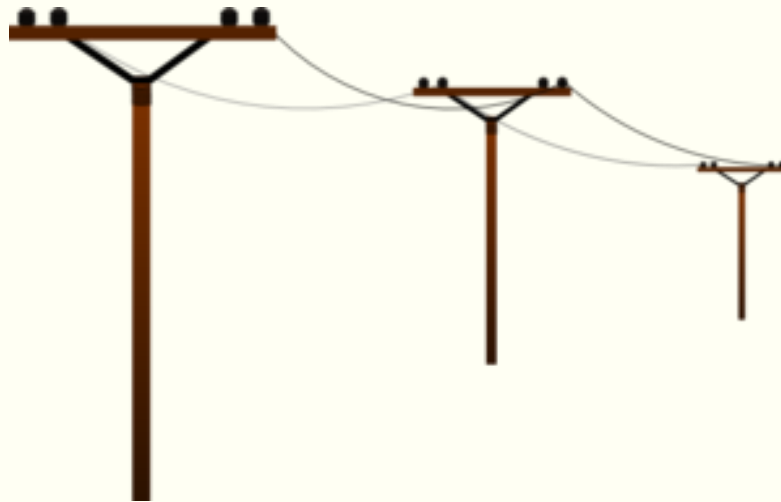


$$\frac{P_1}{P_2} = 1,2589254 = 10^{\frac{1}{10}}$$

$$1 \text{ Bell} \longrightarrow \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \log(10^{\frac{1}{10}}) = 0,1$$

Decibel

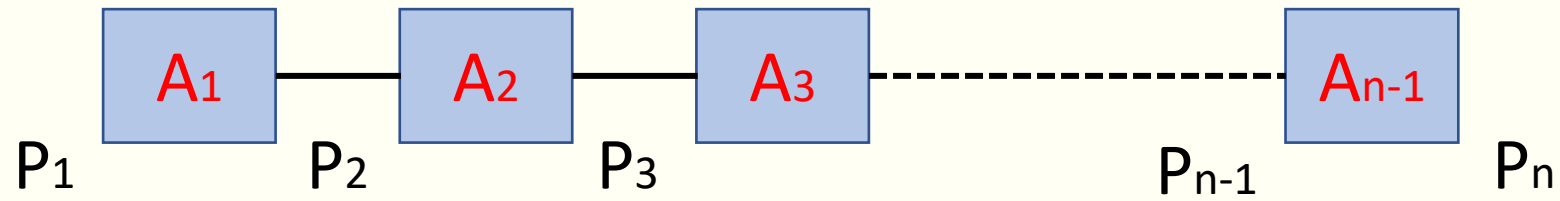
- Definición



$$\text{Decibel} \quad 10 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

Décima parte de un Bel, en honor a Alexander Graham Bell

Decibel



$$P_2 = P_1 A_1$$

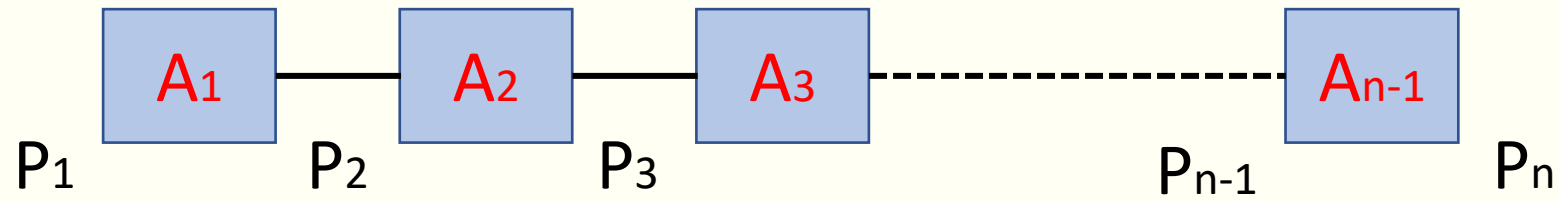
$$P_3 = P_2 A_2 = P_1 A_1 A_2$$

$$P_n = P_{n-1} A_{n-1} = P_1 A_1 A_2 \dots A_{n-1}$$

Por ejemplo: $A_1 = 100$ $A_2 = 0,1$ $A_3 = 1.000$ $A_{n-1} = 100$

$$\frac{P_n}{P_1} = 1.000.000$$

Decibel



$$\frac{P_n}{P_1} = A_1 A_2 \dots A_{n-1}$$

$$\log\left(\frac{P_n}{P_1}\right) = \log(A_1 A_2 \dots A_{n-1})$$

$$\log\left(\frac{P_n}{P_1}\right) = \log(A_1) + \log(A_2) + \dots + \log(A_{n-1})$$

Por ejemplo: $A_1 = 100$ $A_2 = 0,1$ $A_3 = 1.000$ $A_{n-1} = 100$

$$\log\left(\frac{P_n}{P_1}\right) = \log(100) + \log(0,1) + \log(1.000) + \log(100)$$

$$\log\left(\frac{P_n}{P_1}\right) = 2 + (-1) + 3 + 2 = 6$$

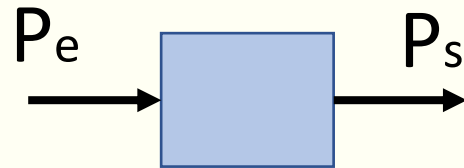
Decibel

- Completar

Decibeles	1	3	10	30
Pérdida	0.79	0.5	0.1	0.001
Ganancia	1.25	2	10	1000

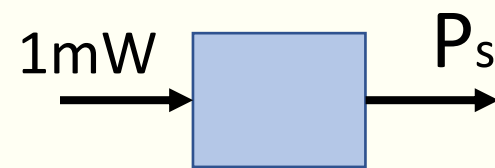
Decibel

Magnitud de
comparación



$$\text{dB} = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_e} \right)$$

Magnitud de
medida

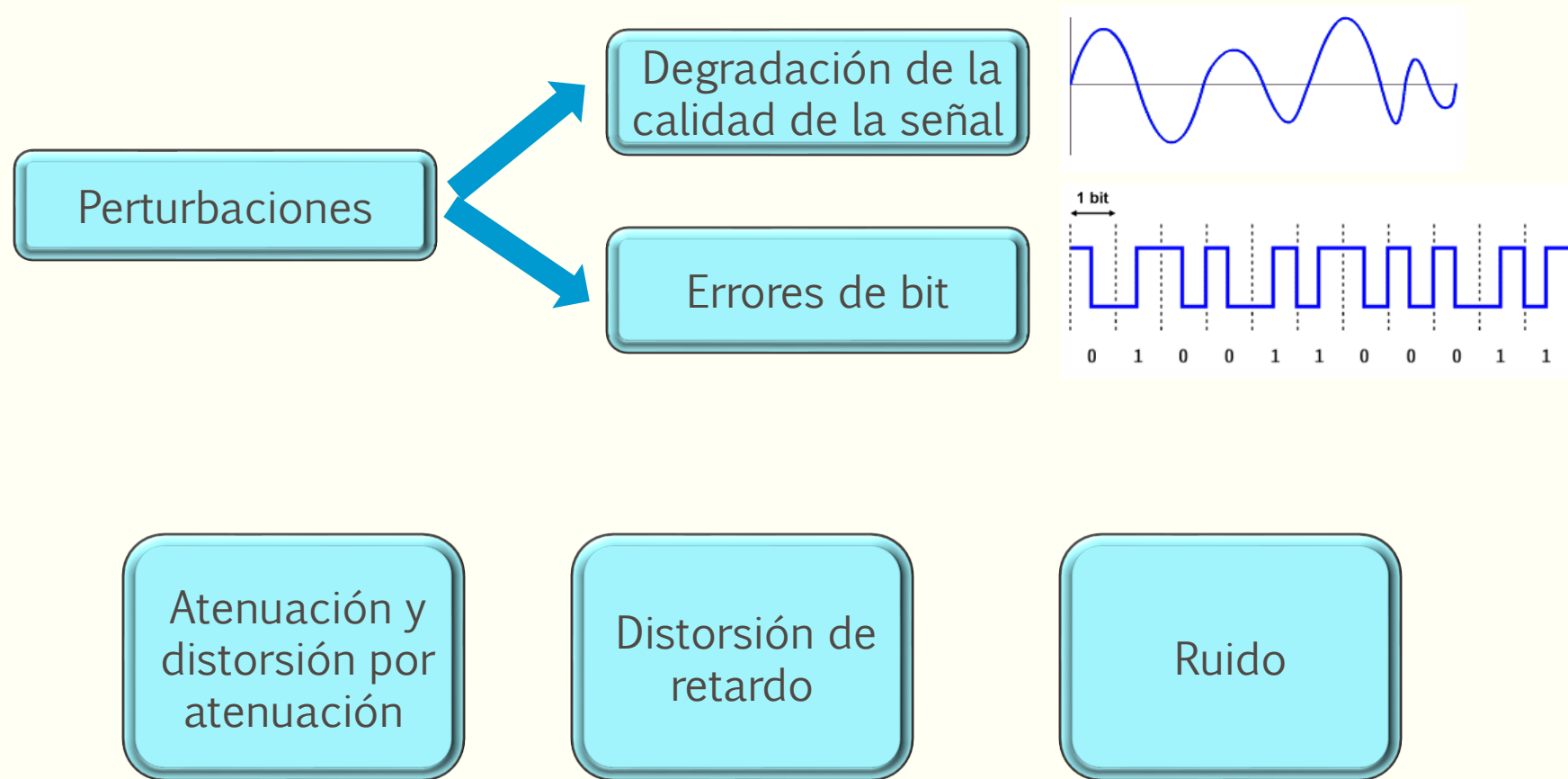


$$\text{dBm} = 10 \log \left(\frac{P_s(\text{mW})}{1\text{mW}} \right)$$

TRANSMISIÓN DE DATOS

- Transmisión analógica y digital
- Dominio del tiempo
- Dominio de la frecuencia
- Decibel
- **Perturbaciones**
- Capacidad del canal

Perturbaciones en la transmisión

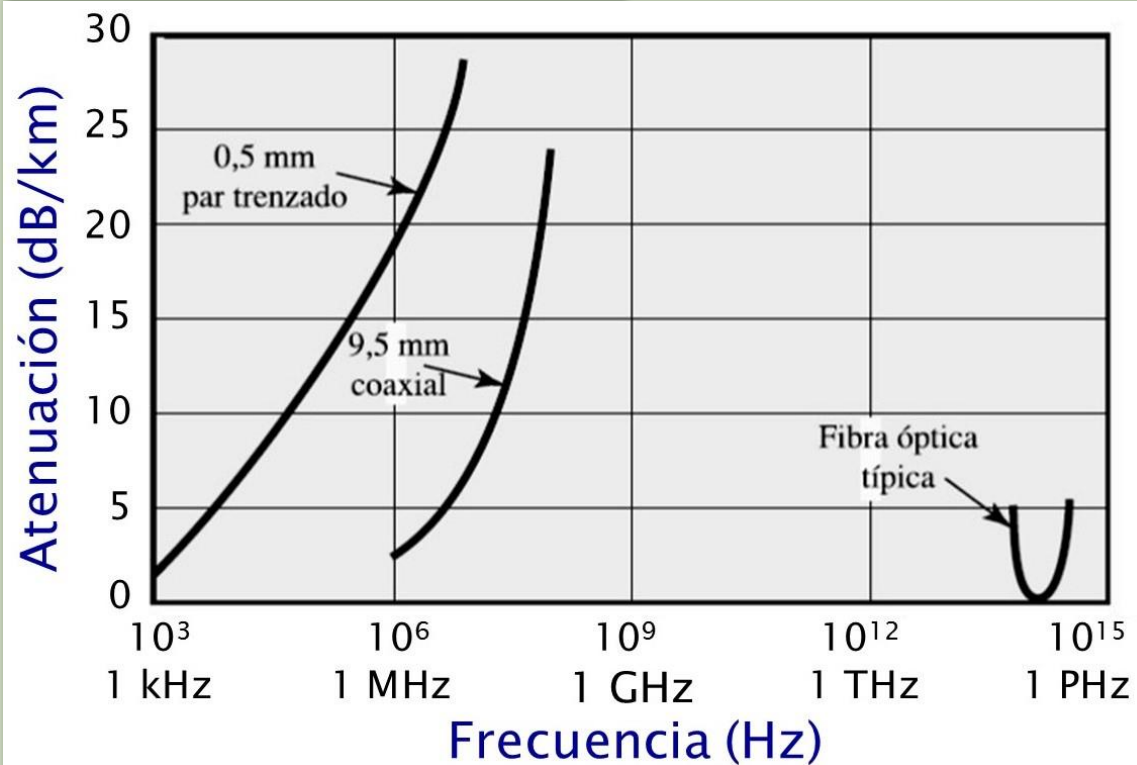


Atenuación

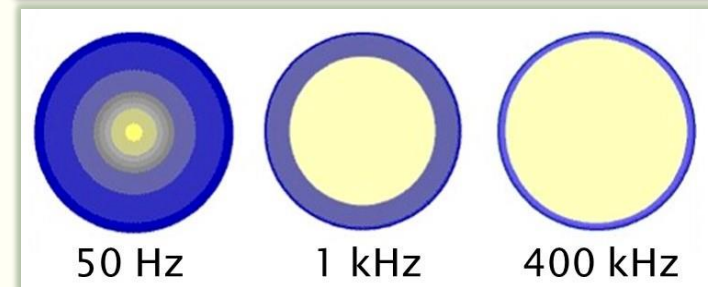
- En medios confinados la atenuación es generalmente exponencial con la distancia.
- En el vacío, la atenuación se produce por dispersión, con lo que se reduce la densidad de potencia.
- En la atmosfera, además de la dispersión, existen partículas que absorben energía (pérdidas por absorción), y desvanecimiento.
- La atenuación varía con la frecuencia: distorsión

Atenuación

Atenuación vs. Frecuencia

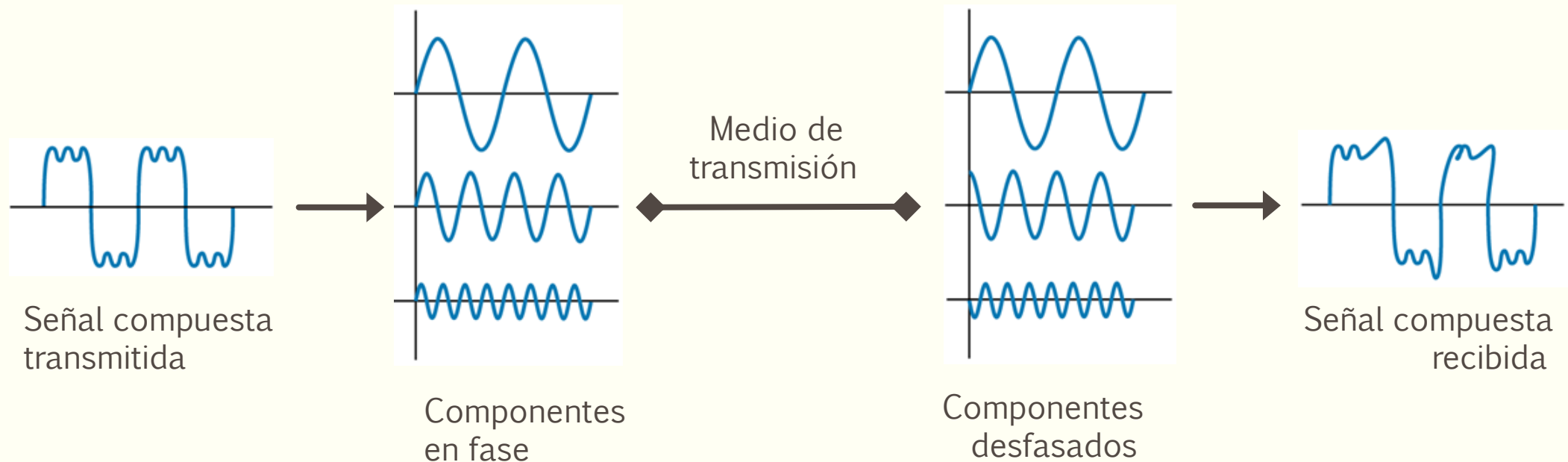


Efecto Skin – Acumulación de la corriente en la capa superficial



Distorsión de retardo

- En medios confinados, la velocidad de propagación varía con la frecuencia, siendo mayor en la frecuencia central y disminuyendo hacia sus extremos. Da lugar a diferencia de fase entre las distintas frecuencias.



Ruido

Térmico	Intermodulación	Diafonía	Impulsivo
<p>Agitación térmica de los electrones.</p> <p>Es función de la temperatura.</p> <p>Distribución uniforme: ruido blanco,</p> <p>No se puede eliminar.</p>	<p>Suma o resta de frecuencias de otra señal compartiendo el mismo medio.</p> <p>No linealidades de transmisor, receptor o medio.</p>	<p>Acoplamiento no deseado entre los caminos de dos o más señales</p>	<p>Pulsos o picos de gran amplitud, y corta duración</p>

Ruido

■ Ruido térmico

$$N_o = kT(W/Hz) \left\{ \begin{array}{l} N_o : \text{densidad de potencia de ruido} \\ K: \text{constante de Boltzmann} = 1,38 \times 10^{-23} \text{ (J/°K)} \\ T: \text{temperatura expresada en grados Kelvin} \end{array} \right.$$

En un sistema con ancho de banda B, el ruido térmico se puede expresar como:

$$N = kTB$$

$$N = 10 \log(k) + 10 \log(T) + 10 \log(B)$$

$$N = -228,6 \text{dBW} + 10 \log(T) + 10 \log(B)$$

Relación Señal-Ruido

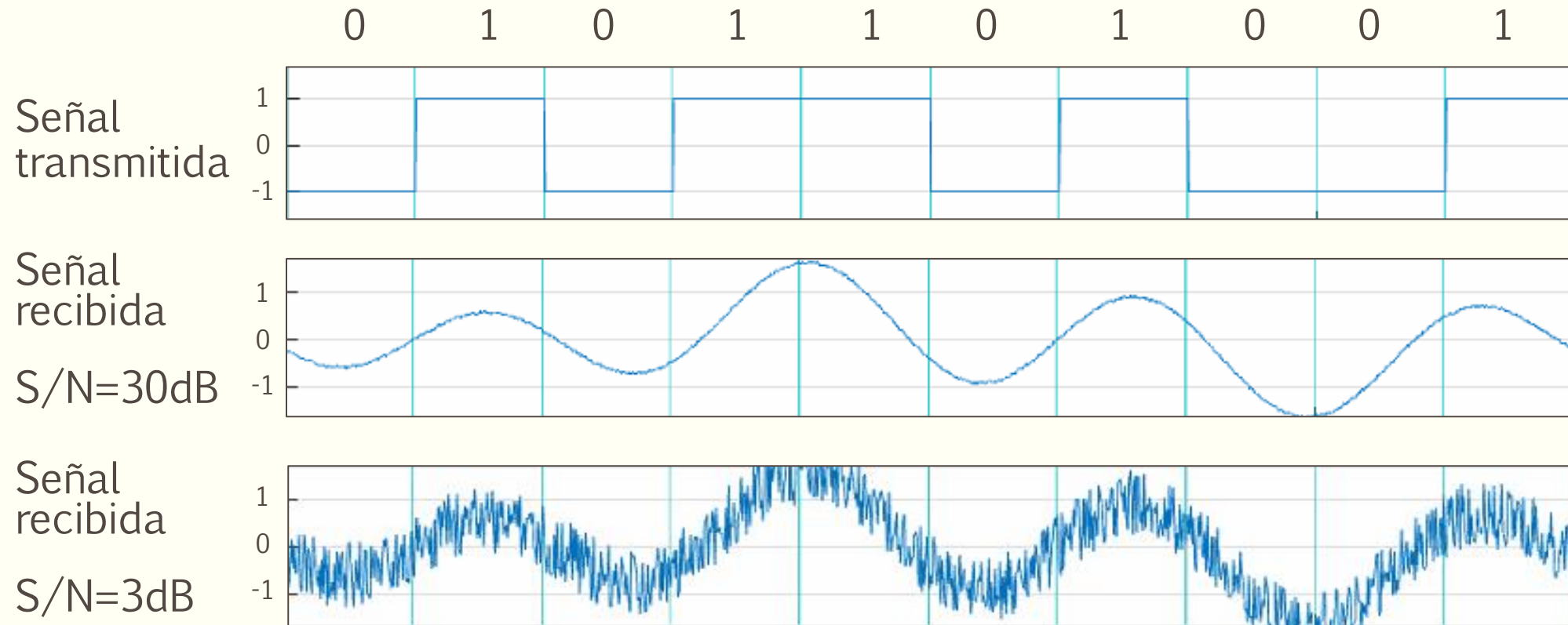
- Para medir la calidad de un sistema se suele utilizar la relación señal-ruido (SNR o S/N).
- Es la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido en el sistema

$$SNR = \left(\frac{\text{Potencia media de la señal}}{\text{Potencia media del ruido}} \right)$$

Como es una relación de potencias, se lo suele expresar en decibeleles:

$$SNR_{dB} = 10 \log \left(\frac{\text{Potencia media de la señal}}{\text{Potencia media del ruido}} \right)$$

Relación Señal-Ruido



TRANSMISIÓN DE DATOS

- Transmisión analógica y digital
- Dominio del tiempo
- Dominio de la frecuencia
- Decibel
- Perturbaciones
- Capacidad del canal

Capacidad del canal

Capacidad del canal: velocidad máxima a la que se pueden transmitir los datos en un canal bajo unas condiciones dadas

Velocidad de transmisión

Velocidad, en bits por segundo (bps), a la que se pueden transmitir los datos

Ancho de banda

El BW, limitado por el transmisor y la naturaleza del medio de transmisión, expresado en ciclos por segundo, o hercios

Ruido

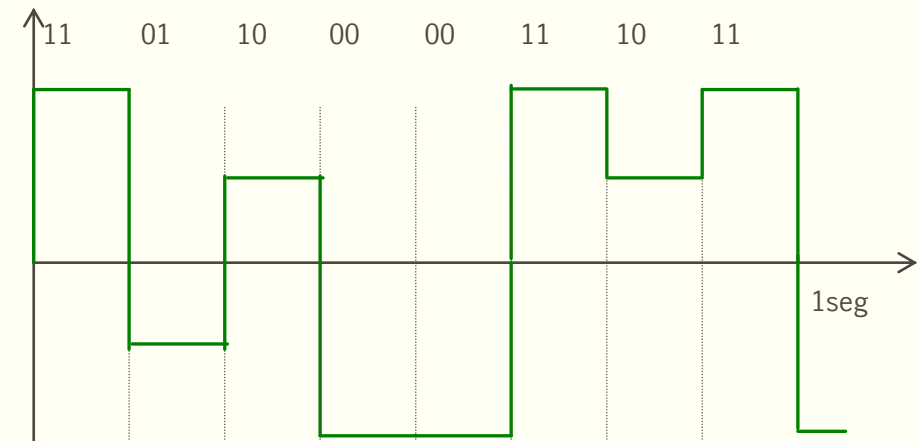
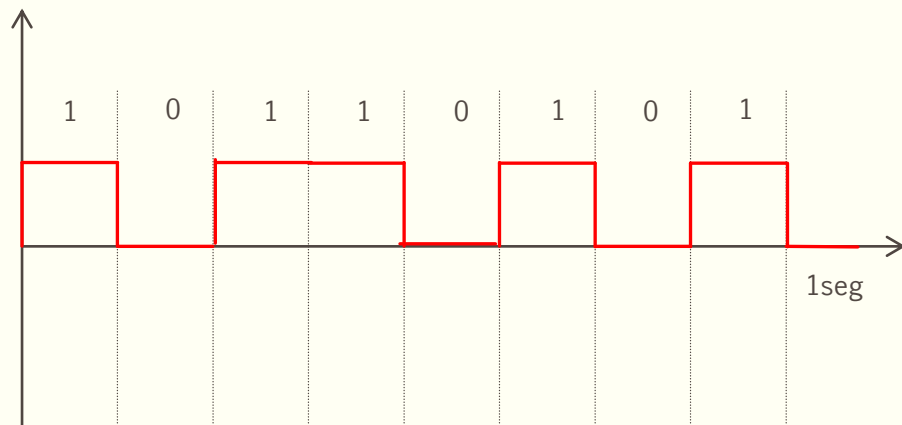
Nivel medio de ruido en el sistema de comunicación

Tasa de errores

Tasa a la que ocurren los errores.

Capacidad del canal

- Bits por segundo (bps): número de bits que se transmiten en un segundo.
- Baudios: cantidad de veces por segundo que la señal cambia su valor



Teorema de Nyquist

Para un canal libre de ruido, Nyquist demostró que la velocidad máxima de transmisión está limitada por:

$$C = 2 B \log_2(M)$$

donde:

C : velocidad de transmisión (bits por segundo)

B: ancho de banda del canal (Herzt)

M: cantidad de niveles utilizados en la señal



Harry Nyquist
Ing. sueco-norteamericano
1889-1976

Teorema de Nyquist

- Ejemplo 1: ¿Cuál es la velocidad máxima en un canal libre de ruido, con un ancho de banda de 4.800 Hz y que utiliza dos niveles de señal?

$$C = 2 \cdot 4.800 \log_2(2) = 9.600 \text{ bps}$$

- Ejemplo 2: ¿Y si utilizo ocho niveles de señal?

$$C = 2 \cdot 4.800 \log_2(8) = 28.800 \text{ bps}$$

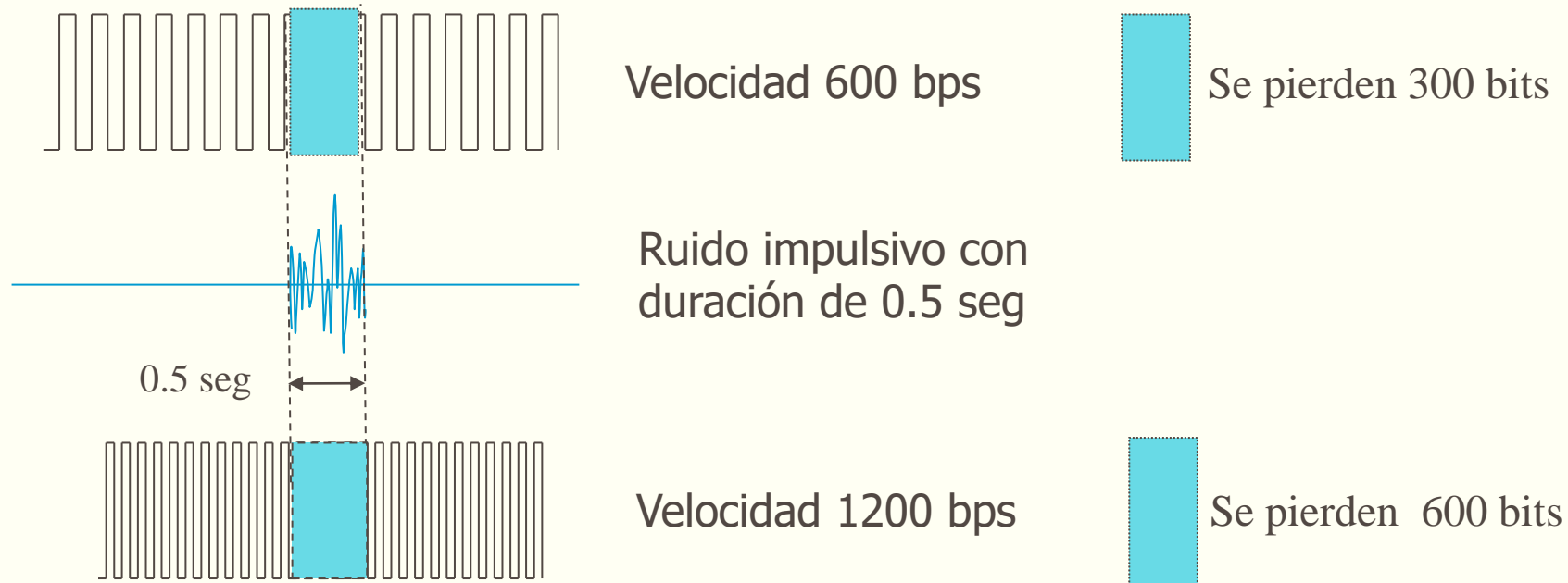
- Ejemplo 3: ¿Cuántos niveles de señal necesitaría para conseguir 64 kbps?

$$64.000 \text{ kbps} = 2 \cdot 4.800 \log_2(M)$$

$$M = 101,59 \begin{cases} \rightarrow M = 64 & C = 57,6 \text{ kbps} \\ \rightarrow M = 128 & C = 67,2 \text{ kbps} \end{cases}$$

Teorema de Shannon - Hartley

Dado un nivel de ruido, cuanto mayor es la velocidad de transmisión mayor es la tasa de errores



Teorema de Shannon - Hartley

En un canal con ruido blanco, Shannon demostró que la velocidad máxima está determinada por:

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

donde:

C : velocidad de transmisión (bits por segundo)

B: ancho de banda del canal (Herzt)

S/N: relación señal ruido, expresada en veces



Claude Sannon
1916-2001

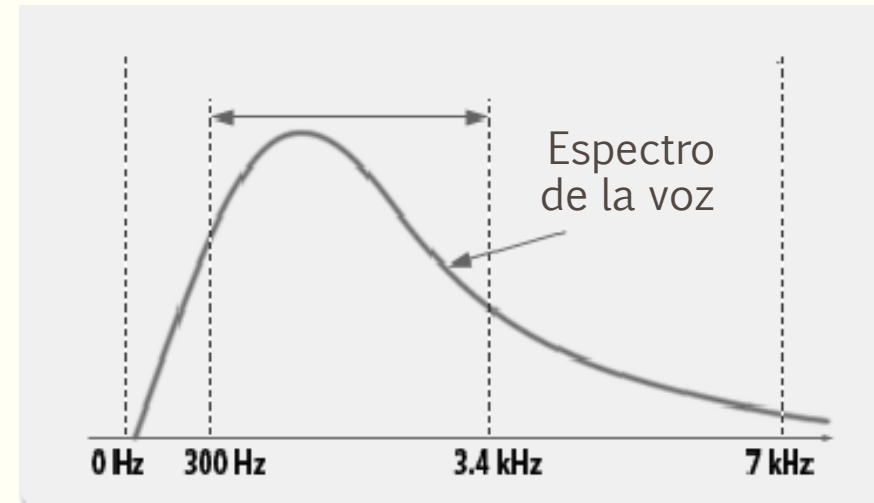
Teoría de la información

Teorema de Shannon - Hartley

- Ejemplo: una línea telefónica tiene un canal asignado entre 300 y 3.400 Hz, y típicamente posee en máximo de $S/N=35\text{dB}$. ¿Cual es la velocidad máxima que se puede transmitir por el canal?

$$S/N = 35\text{dB} \rightarrow S/N = 3.162$$

$$C = 3.100 \log_2(1 + 3.162) = 36.043 \text{ bps}$$



- ¿Cuántos niveles de señal necesito para conseguir esa velocidad?

¡ Necesito el teorema de Nyquist ! $36.043 \text{ kbps} = 2 \cdot 3.100 \log_2(M)$

$$M = 56,24 \begin{cases} \rightarrow M = 32 & C = 31 \text{ kbps} \\ \rightarrow M = 64 & C = 37 \text{ kbps} \end{cases}$$

Otros conceptos

- Ancho de banda analógico es la longitud, medida en Hz, del rango de frecuencias en el que se concentra la mayor parte de la potencia de la señal (Hertz)
- Ancho de banda digital es la cantidad de datos que se pueden transmitir en una unidad de tiempo (bits por segundo).
- Throughput: cantidad de bits/paquetes que llegan a destino con éxito.
- Latencia (retardo): es el tiempo que tarda un paquete de datos en ser transferido desde su origen hasta el destino. Está compuesto por:
 - Tiempo de propagación (distancia/velocidad de propagación)
 - Tiempo de transmisión (tamaño del paquete/ancho de banda)
 - Tiempo de espera
 - Tiempo de procesamiento
- Round Trip Time (RTT): es la suma de la latencia de ida y vuelta.
- Producto Ancho de banda-Latencia: cantidad máxima de datos en el circuito de red en un momento dado
- Jitter: variación de la latencia entre los paquetes.

TRANSMISIÓN DE DATOS

- Transmisión analógica y digital
- Dominio del tiempo
- Dominio de la frecuencia
- Decibel
- Perturbaciones
- Capacidad del canal