

1) Señales electromagnéticas:

Las señales se propagan por los medios de transmisión en forma de ondas electromagnéticas. Esto es válido tanto para la propagación en medios conductores (p.ej. cables de cobre), como para la propagación en medios dieléctricos (aislantes o no conductores), como es el caso del vacío o del aire. (p.ej. señales de radio, de microondas, etc.)

En el tratamiento físico matemático del primer caso, se aplica la llamada *Ecuación de la Difusión*, por cuanto las señales se propagan en los medios conductores de la misma manera que las ondas de calor. En el segundo caso, se aplica la llamada *Ecuación de Onda*.

El campo electromagnético está constituido por la interacción de dos campos: el campo eléctrico $E = E(x,y,z,t)$ y el campo magnético $H = H(x,y,z,t)$, los cuales se propagan en el espacio en planos perpendiculares entre sí, y a la vez normales a la dirección de propagación, transformando la energía de eléctrica a magnética y viceversa, en forma sucesiva a medida que avanza. (Ilustración 1)

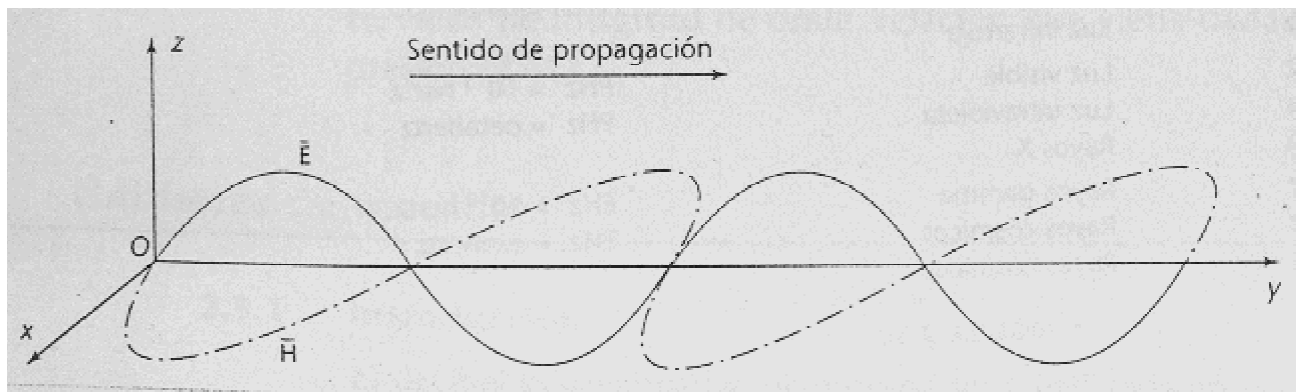


Ilustración 1: Propagación de una onda electromagnética

La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío es:

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

La luz es una onda electromagnética, que en el vacío se propaga a esa velocidad.

Si no hubiera resistencia del medio, la energía permanecería oscilando de uno a otro campo permanentemente; precisamente por no serlo, el medio atenúa la energía transportada al haber disipación de calor (efecto Joule). Las ondas, en general, se propagan a una velocidad menor que c , tanto menos cuanto más denso sea el medio en que avanzan.

James Maxwell, físico escocés genial, investigó y publicó en 1873 éstos y muchos otros resultados de sus estudios sobre el electromagnetismo, sentando las bases actuales de la electricidad y el magnetismo.

En sus estudios, plantea un conjunto de cuatro ecuaciones diferenciales, hoy conocidas como *Ecuaciones de Maxwell*, en las cuales resuelve completamente la relación entre los campos E y H en términos de las magnitudes **espacio** y **tiempo**.

2) Conceptos del dominio de la frecuencia.

En la práctica, una señal electromagnética está compuesta por muchas frecuencias. Si todas las frecuencias son múltiplos de una dada, esa frecuencia se llama *frecuencia fundamental*, y las otras frecuencias serán sus *armónicas*. El periodo de la señal suma de componentes es el periodo de la frecuencia fundamental. Se puede demostrar, según el **Teorema de Fourier** que:

“Cualquier señal periódica está constituida por la sumatoria de infinitas señales periódicas senoidales y cosenoidales, cada una de ellas con frecuencia múltiplo de la fundamental, y con la amplitud de cada componente con un valor decreciente, función de la amplitud original de la señal original”.

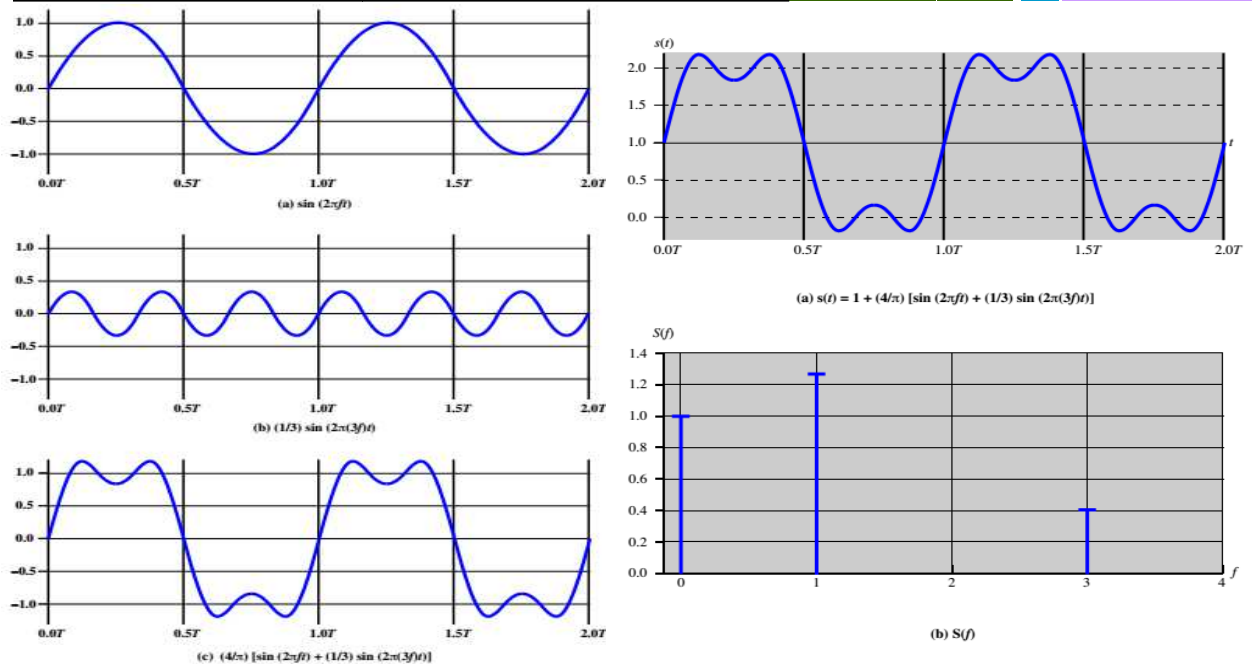


Ilustración 2: a) Adición de componentes de frecuencias ($T=1/f$), en el dominio del tiempo,

para obtener la aproximación a una señal cuadrada b) Misma señal, con componente continua.

Es posible mediante éste teorema, analizar una señal compleja como la sumatoria de muchas (en rigor infinitas) señales seno y coseno. En la Ilustración 2 (a), se ve la aproximación (no se consideran armónicas superiores) para una **señal cuadrada**, a partir de la suma de la fundamental y la tercera armónica.

$$S'(t) = \sin(2\pi f t) + 1/3 \sin(2\pi (3f) t)$$

Si la señal tiene una componente de frecuencia 0, ésta es una componente de continua. (DC="Direct Current"). (Ilustración 2, derecha)

El mismo ejemplo anterior (presentado en el *dominio del tiempo*), puede plantearse en el *dominio de la frecuencia*, obteniendo el gráfico b) de la misma ilustración (Notar componentes presentes en f y en $3f$).

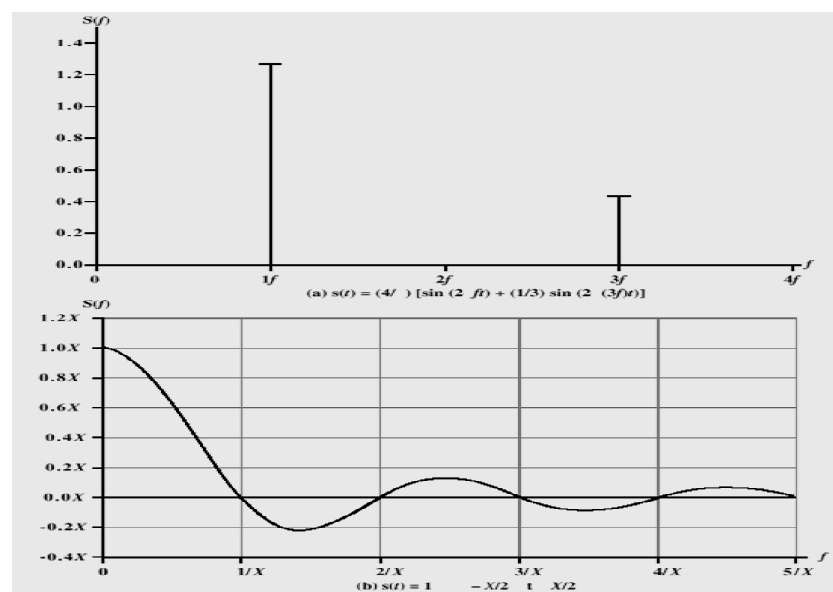


Ilustración 3: Representaciones en el dominio de las frecuencias de un pulso cuadrado

a) señal cuadrada b) pulso cuadrado.

El gráfico b) de la Ilustración 3 corresponde a la representación en el dominio de la frecuencia de un **pulso cuadrado**, con valor 1 entre $-X/2$ y $X/2$.

Es importante notar que en éste segundo caso, $S(f)$ es continuo, y no discreto como en a), con amplitudes decrecientes (despreciables para grandes f)

El espectro de una señal es el conjunto de frecuencias que constituyen la señal.

Surge la definición del **Ancho de Banda (BW-“band width”)**, una de las características más importantes de una señal:

“El ancho de banda de una señal es la anchura del espectro (que podría ser infinito); a los fines prácticos, se considera el intervalo de frecuencias en el cual se concentra la mayor parte de la energía (o sea las frecuencias armónicas que el medio permite transmitir).”

En general es:

$$BW = f_{\max} - f_{\min}$$

Analizando el ejemplo de la Ilustración 2, se puede afirmar que esa señal en particular posee:

$$BW = f_{\max} - f_{\min} = 3f_1 - f_1 = 2f_1 \quad (\text{Hertz})$$

Otra forma equivalente en que se suele interpretar el BW es:

“El ancho de banda de una señal es el intervalo de frecuencias $(f_{\max} - f_{\min})$ para los cuales la distorsión lineal y la atenuación permanecen bajo limites determinados y constantes”

En ésta última interpretación, si bien los límites en las frecuencias pueden ser arbitrarios, se suelen definir para una atenuación de 3 dB o lo que es lo mismo para la caída a la mitad de la amplitud, respecto a la amplitud de la señal a la frecuencia de referencia (f_0 , donde la atenuación es de 0 dB). Se llama en ese caso a f_{\max} como *frecuencia de corte superior* del medio, y a f_{\min} como *frecuencia de corte inferior* del mismo medio. (En la Ilustración 4, se indican como f_1 y f_2 respectivamente)

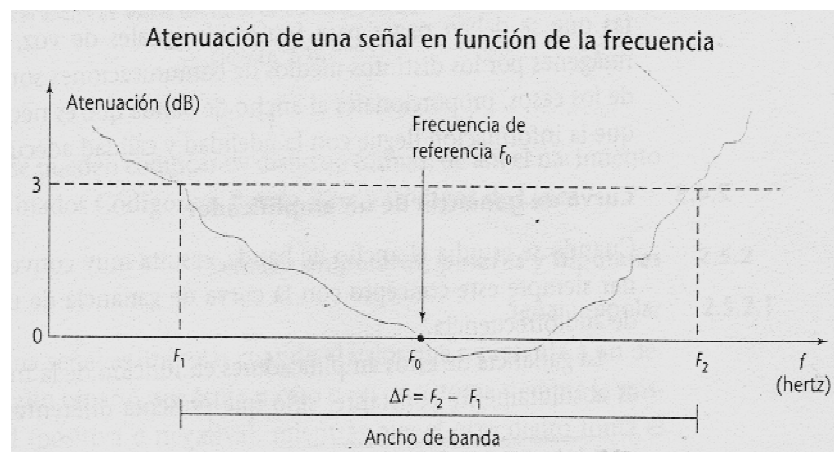


Ilustración 4: Interpretación del ancho de banda de una señal

Muchas señales tienen un ancho de banda infinito, (Ilustración 3.b) pero la mayoría de la energía está concentrada en una pequeña porción del espectro, correspondiente a las frecuencias más bajas.

3) Relación entre la velocidad de transmisión y el ancho de banda.

El medio de transmisión limita las componentes de frecuencia que serán transmitidas por el mismo, ya que el medio sólo permite la transmisión de cierto ancho de banda. El BW de cada medio es una característica de calidad del mismo, y es directamente proporcional a su costo.

En el caso de la onda cuadrada¹, aplicando el análisis de Fourier, esta se puede obtener mediante la sumatoria de múltiples (probablemente *infinitas*) ondas senoidales, que sean múltiplos impares de la frecuencia fundamental, y con la amplitud de cada componente decreciente.

$$S(t) = A \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin(2\pi(kf_k)t)$$

Donde: k natural, impar
 f_1 = frecuencia fundamental o de primera armónica.
 f_k = frecuencia k-ésima armónica.

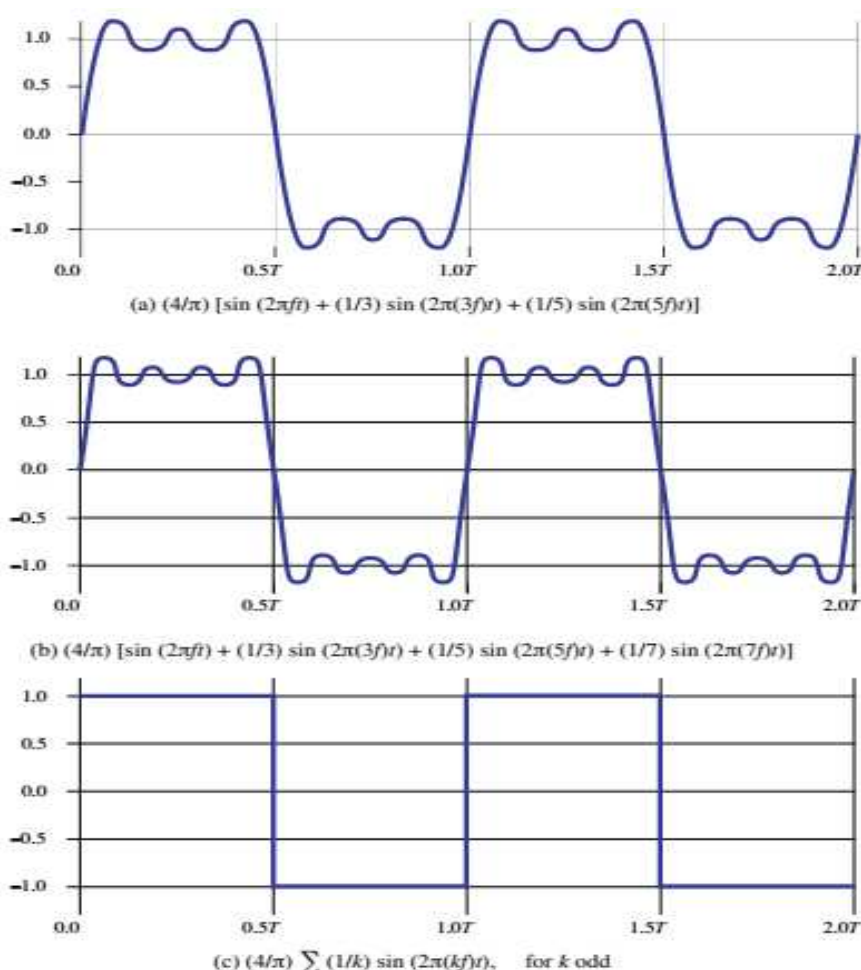


Ilustración 5: Componentes de frecuencia de una onda cuadrada ($T=1/f$)

Cuanto mayor es el ancho de banda, más se asemeja la función compuesta por la sumatoria de las senoides a la onda cuadrada. Si bien el BW de la señal real puede ser infinito, generalmente es suficiente con las tres primeras componentes armónicas para obtener una aceptable aproximación de la señal cuadrada en el receptor (aproximadamente se tiene en ellas el 95% de la energía total de la señal, en ese ancho de banda finito)

¹ Serie de Fourier para la **señal cuadrada**. La expresión es particular para cada tipo de señal que se analiza.



Así en la Ilustración 5.a, si es $f_1 = 1$ MHz será $BW = 4$ MHz, con $T = 1$ μ s, apareciendo un bit cada 0.5 μ s, por lo que la velocidad de transmisión será de $V_T = 2$ Mbps.

En la misma Ilustración, si ahora se tiene $f_1 = 2$ MHz se dispone en este caso de $BW = 8$ MHz, pero ahora $T = 0.5$ μ s, apareciendo un bit cada 0.25 μ s, por lo que la velocidad de transmisión en éste caso es de $V_T = 4$ Mbps.

“Al duplicar el ancho de banda de un medio de transmisión, se duplica la velocidad de transmisión potencial del mismo”

Si el receptor fuera capaz de discriminar entre un 1 y un 0 al recibir la señal compuesta de la Ilustración 2, (señal cuadrada compuesta por fundamental y 3° armónica), tendríamos para una $f_1 = 2$ MHz un $BW = 4$ MHz, con $T = 0.5$ μ s, apareciendo un bit cada 0.25 μ s, teniendo por lo tanto una velocidad de transmisión de $V_T = 4$ Mbps.

“Un ancho de banda dado, puede soportar varias velocidades de transmisión, dependiendo de las necesidades del receptor”

Algunas otras consideraciones que surgen:

“En general, cualquier onda digital tendrá un ancho de banda infinito, pero al intentar transmitirla por cualquier medio físico, la naturaleza del mismo limitará el BW que se puede transmitir. Al ser aproximada la señal digital mediante un BW limitado (por razones prácticas y de costo), la señal resultante posee distorsión, y por lo tanto mayor probabilidad de ser tomada erróneamente en el receptor”

La Ilustración 5 es un buen ejemplo de la generalización de la relación directamente proporcional que vincula el ancho de banda de una señal y la velocidad de transmisión de la misma.

Se cumple efectivamente que:

“Si la velocidad de transmisión de la señal digital es V_T (bps), se puede obtener una muy buena representación con un $BW = 2 V_T$ (Hz), y una buena representación con un BW menor”

La conclusión recíproca también es válida:

“Cuanto mayor es el BW de un sistema de transmisión, mayor es la velocidad a la que se pueden transmitir los datos en dicho medio”

Analizar qué:

“Al considerar que el ancho de banda de una señal está centrado sobre una frecuencia dada, al aumentar ésta frecuencia central de transmisión, aumenta la velocidad potencial de transmisión de la señal “. (Analizar sobre la Ilustración 4)

Debe resultar claro, que cuanto mayor es la cantidad de información que es necesario transmitir, mayor debe ser el ancho de banda del medio de transmisión.

Ejemplos:

Ancho de banda de diferentes aplicaciones	
Formas de información más comunes	Ancho de banda
Canal telefónico de voz (par de abonado)	3.1 KHz
Canal de voz analógico por onda portadora	4 KHz
Música de alta fidelidad (Hi Fi)	16 KHz
Disco compacto (CD)	22 KHz
Canal de radio de FM	200 KHz
Canal de televisión CATV)	6 MHz
Teleconferencia (a través de redes digitales ISDN)	128 Kbps

En la Ilustración 6, se muestra nuevamente un ejemplo de transmisión de una cierta secuencia de unos y ceros, y la mayor aproximación a la secuencia original, (en teoría con BW infinito) en función directa al contenido armónico transmitido (BW finito por limitaciones del medio), concepto fundamental del ancho de banda del medio.

Es por éste motivo, que se suele decir que los medios de transmisión se comportan como un **filtro pasa banda**, ya que permiten el paso sin atenuación apreciable de las componentes de frecuencia entre una frecuencia de corte superior y una frecuencia de corte inferior (atenuación hasta 3 dB); por fuera de esa banda de frecuencias, las componentes son fuertemente atenuadas.

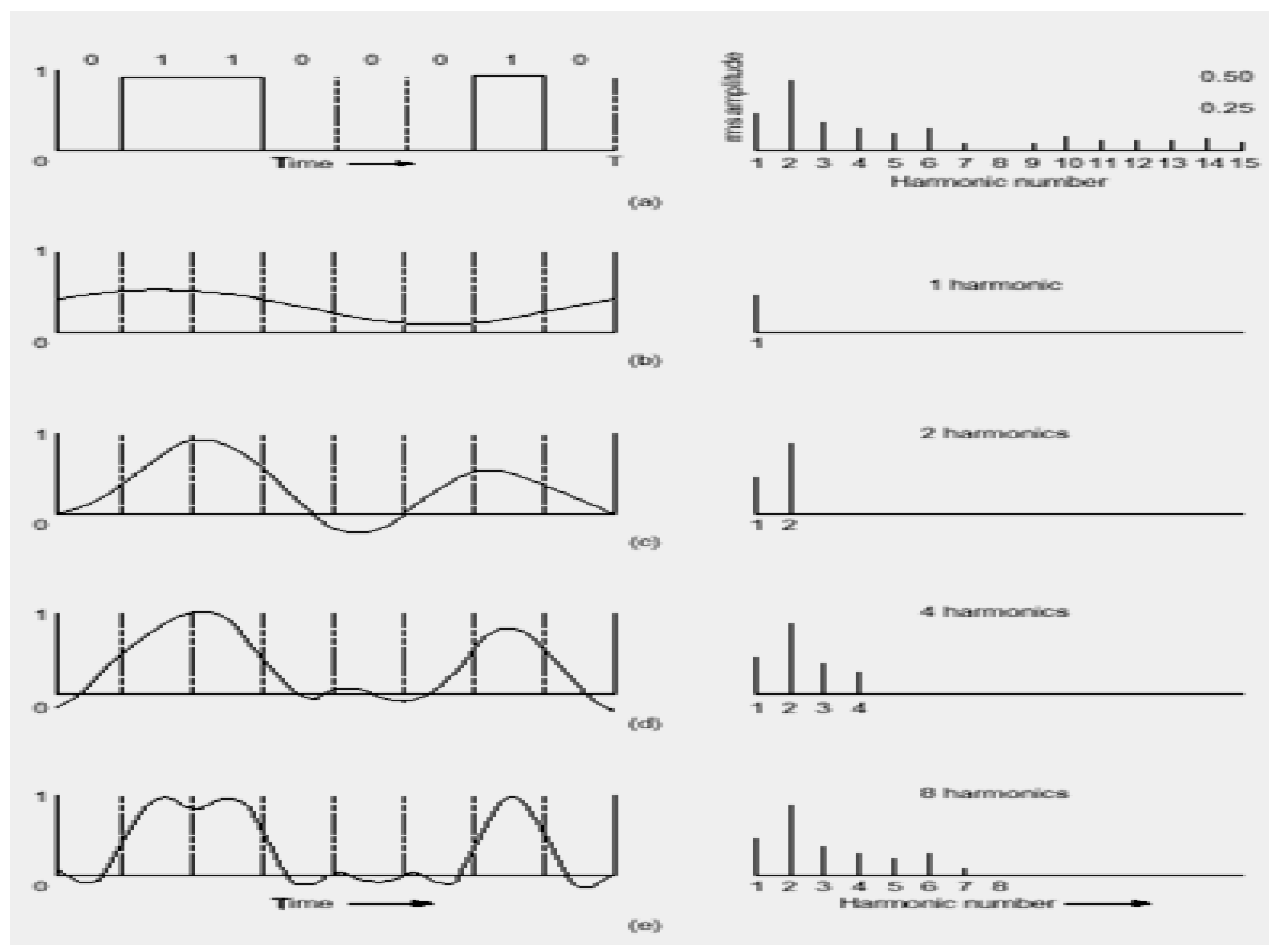


Ilustración 6: Relación entre contenido armónico de una señal y ancho de banda

4) Transmisión de datos analógicos y digitales

En la transmisión de datos desde una fuente a un destino, se debe tener en cuenta la naturaleza de los datos, cómo se propagan físicamente dichos datos, y qué procesamiento o ajustes se necesitarán a lo largo del camino para asegurar que los datos que se reciban sean inteligibles. Para todas estas consideraciones, el punto crucial es si se tratan de entidades digitales o analógicas.

Los términos analógico y digital corresponden, en términos generales a continuo y discreto, respectivamente. Estos dos términos se aplican con frecuencia en las comunicaciones de datos a:

- ❑ Datos
- ❑ Señalización
- ❑ Transmisión

Se define **dato** como cualquier entidad capaz de transportar información.

La **señalización** es el hecho de la propagación física de las *señales* a través de un medio adecuado. Las señales son representaciones eléctricas o electromagnéticas de los datos

Se define **transmisión** como la comunicación de datos mediante la propagación y el procesamiento de señales.

Se intentará clarificar estos conceptos abstractos, considerando las diferencias entre los términos analógico y digital referidos tanto a datos, señales y transmisión.

❑ Datos

Los datos analógicos pueden tomar valores en algún intervalo continuo. Por ejemplo, el video y la voz son valores de intensidad que varían continuamente. La mayoría de los datos que se capturan con sensores, tal como los de temperatura y de presión, son continuos. Los datos digitales toman valores discretos, como, por ejemplo, los textos o los números enteros.

El ejemplo más familiar de datos analógicos es la señal de audio, que en forma de ondas de sonido se puede percibir directamente por los seres humanos.

La mayor parte de la energía de la voz está concentrada en las frecuencias bajas, experimentalmente se ha demostrado que las frecuencias por debajo de 600 o 700 Hz contribuyen muy poco a la inteligibilidad de la voz en el oído humano.

Una señal de voz típica tiene un rango dinámico aproximadamente de 25 dB (para ancho de banda entre 100 - 8.000 Hz), es decir, la potencia máxima es del orden de 300 veces superior a la potencia mínima. El rango dinámico de la música supera los 60 dB (más de 1 millón de veces superior la potencia máxima, respecto a la potencia mínima), para el rango entre 20 Hz y 20 KHz.

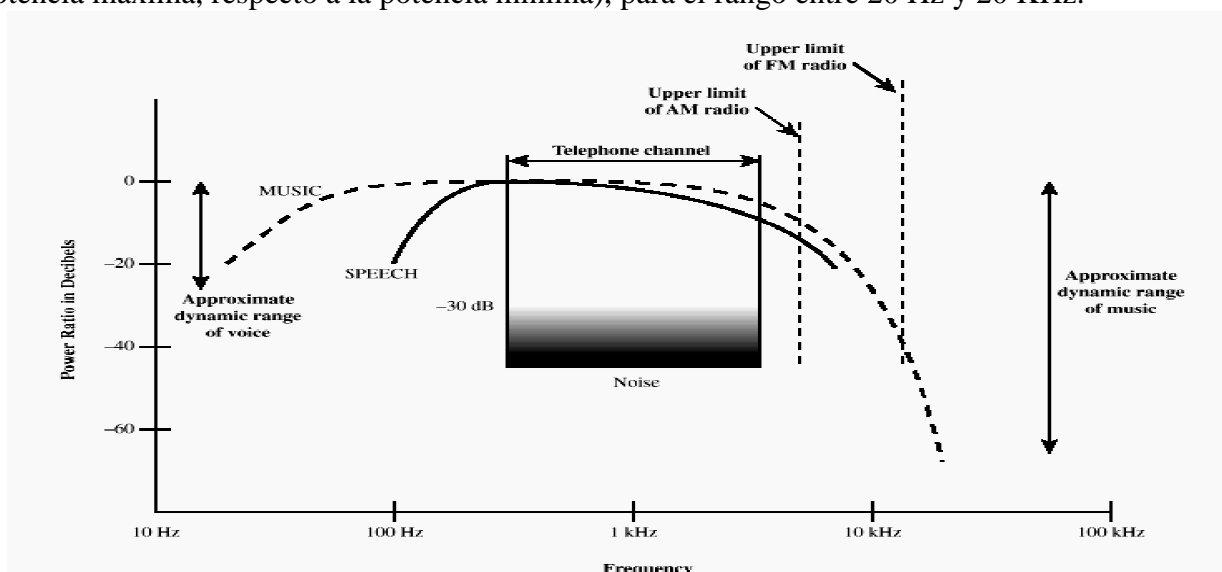


Ilustración 7: Espectro acústico de la voz y música

Las cadenas de caracteres o textos son un ejemplo típico de datos digitales. Mientras que los datos en formato de texto son más adecuados para los seres humanos, en general, no se pueden transmitir o almacenar fácilmente (en forma de caracteres) en los sistemas de procesamiento o comunicación. Tales sistemas están diseñados para tratar datos binarios.

❑ Señales

En un sistema de comunicaciones, los datos se propagan de un punto a otro mediante señales eléctricas. Una señal analógica es una onda electromagnética que varía continuamente y que, según sea su espectro, puede propagarse a través de una serie de medios; por ejemplo, a través de un medio conductor como un par trenzado, un cable coaxial, un cable de fibra óptica, o través de la atmósfera o el espacio.

Una señal digital es una secuencia de pulsos de tensión que se pueden transmitir a través de un medio conductor; por ejemplo, un nivel de tensión positiva constante puede representar un 1 binario y un nivel de tensión negativa constante puede representar un 0.

Datos y señales: hasta ahora se han considerado señales analógicas para representar datos analógicos, y señales digitales para representar datos digitales. Generalmente, los datos analógicos son función del tiempo y ocupan un espectro en frecuencias limitado, estos datos se pueden representar mediante una señal electromagnética que ocupe el mismo espectro. Los datos digitales se pueden representar por señales digitales, con un nivel de tensión diferente para cada uno de los dígitos binarios.

Los datos digitales se pueden también representar mediante señales analógicas usando Modems (modulador / demodulador). El modem convierte la serie de pulsos de tensión binarios en una señal analógica, codificando los datos digitales haciendo variar alguno de los parámetros característicos de una señal denominada portadora.

Los datos analógicos se pueden representar mediante señales digitales. El dispositivo que realiza esta función para la voz se denomina Codec (codificador / decodificador).

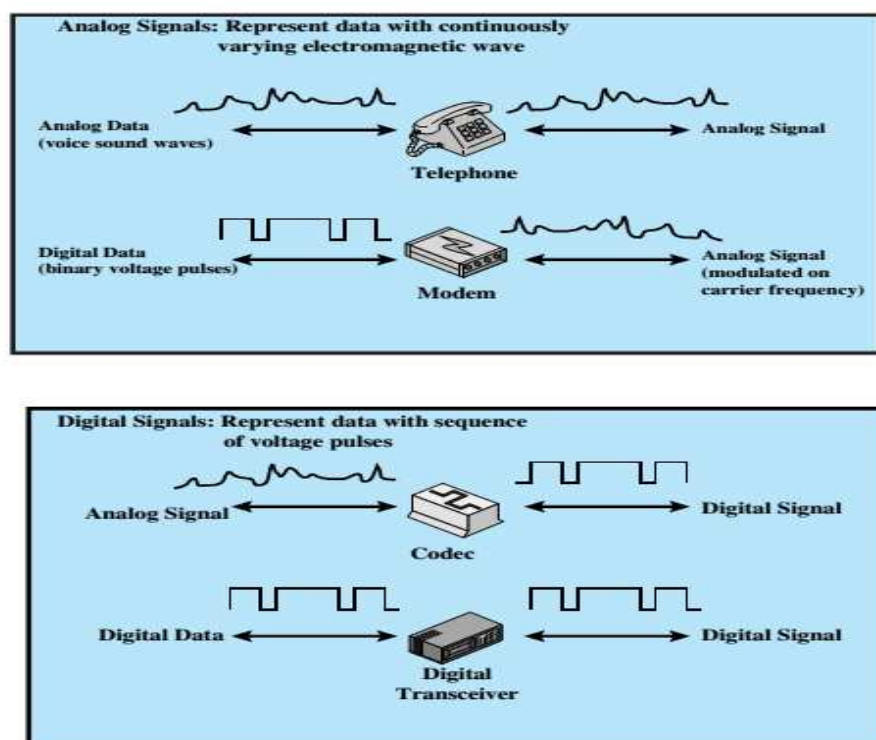


Ilustración 8: Señalización analógica y digital de datos analógicos y digitales



	Señal analógica	Señal digital
Datos analógicos	Hay dos alternativas: (1) la señal ocupa el mismo espectro que los datos analógicos; (2) los datos analógicos se codifican ocupando una porción distinta del espectro.	Los datos analógicos se codifican utilizando un Codec para generar una cadena de bits.
Datos digitales	Los datos digitales se codifican usando un modem para generar señal analógica.	Hay dos alternativas: (1) la señal consiste en dos niveles de tensión que representan dos valores binarios; (2) los datos digitales se codifican para reproducir una señal digital con las propiedades deseadas.

❑ Transmisión

Tanto las señales analógicas como las digitales se pueden transmitir a través del medio de transmisión adecuado. El medio de transmisión en concreto determinará como se tratan estas señales.

La *transmisión analógica* es una forma de transmitir señales analógicas (que pueden contener datos analógicos o datos digitales). El problema de la transmisión analógica es que la señal se debilita con la distancia, por lo que hay que utilizar amplificadores de señal cada cierta distancia, pero éstos también amplifican el ruido.

La *transmisión digital* tiene el problema de que la señal se atenúa y distorsiona también con la distancia, por lo que cada cierta distancia hay que introducir repetidores de la señal.

	Transmisión analógica	Transmisión digital
Señal analógica	Se propaga a través de amplificadores; se trata de igual manera si la señal se usa para representar datos analógicos o digitales.	Se supone que la señal analógica representa datos digitales. La señal se propaga a través de repetidores; en cada repetidor, los datos digitales se obtienen de la señal de entrada y se usan para regenerar una nueva señal analógica de salida.
Señal digital	No se usa.	La señal digital representa una cadena de unos o ceros, los cuales pueden representar datos digitales o pueden ser resultado de la codificación de datos analógicos. La señal se propaga a través de repetidores; en cada repetidor, se recupera la cadena de unos y ceros a partir de la señal de entrada, a partir de los cuales se genera la nueva cadena de salida.

Ventajas de la transmisión digital sobre la transmisión analógica:

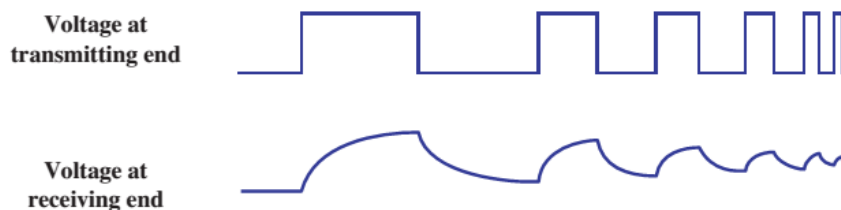
- ❖ La tecnología digital se ha abaratado mucho y reducido el tamaño físico y costo.
- ❖ Al usar repetidores en vez de amplificadores, el ruido y otras distorsiones no es acumulativo.



- ❖ La utilización de banda ancha es más aprovechada por la tecnología digital (Es más fácil multiplexación TDM que FDM).
- ❖ Los datos transportados se pueden encriptar y por tanto hay más seguridad en la información.
- ❖ Al tratar digitalmente todas las señales, se pueden integrar servicios de datos analógicos (voz, vídeo, etc.) con digitales como texto y otros.

5) Perturbaciones 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.



Las perturbaciones más significativas son:

- Atenuación
- Distorsión de atenuación.
- Distorsión de retardo.
- Ruido.

5.1) Atenuación

La energía de la señal decae con la distancia en cualquier medio de transmisión. En medios guiados, esta reducción de la energía es por lo general logarítmica y por lo tanto, se expresa 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 dependiente a su vez de las condiciones atmosféricas. Se pueden establecer tres consideraciones fundamentales respecto a la atenuación:

- La señal recibida debe tener suficiente energía para que los circuitos electrónicos en el receptor puedan detectar e interpretar la señal adecuadamente.
- Para ser recibida sin error, la señal debe tener un nivel suficientemente mayor que el ruido.
- La atenuación es una función creciente de la frecuencia.

Relación entre la potencia de la señal con la potencia del ruido:

La señal tiene que tener una mayor energía que la energía del ruido para poder ser detectados los datos en el receptor. La relación señal ruido indica la relación de potencias entre dos señales (una con datos y la otra espuria), por lo que es un número, sin unidades

$$S / N \quad [\text{señal} / \text{ruido}] \quad [“\text{Signal}” / “\text{Noise}”, \text{ en inglés}]$$

La relación señal a ruido se mide en decibeles:

$$S / N_{[dB]} = 10 \log [\text{Potencia de señal} / \text{Potencia de ruido}] \quad [\text{ watt }] / [\text{ watt }]$$

Cuanto más grande es la relación S / N , mejor es la calidad de la transmisión.

$$1000 / 1 \rightarrow \text{relación aceptable} = 30_{[dB]}$$

$$\text{Potencia de señal} / \text{Potencia de ruido} = 1000 / 1 = 30 \text{ dB}$$

La atenuación no es un valor constante y crece a medida que se propaga en el espacio. Por otro lado es una magnitud dependiente de la frecuencia: a mayor frecuencia, más atenuación. Debido a que la atenuación varía en función de la frecuencia, las distintas componentes armónicas que constituyen las señales transmitidas, llegan distorsionadas, por lo que hay que utilizar sistemas que le devuelvan a la señal sus características iniciales (*Ecualización*, usando bobinas que cambian las características eléctricas del circuito y amplifican más las componentes de frecuencias más altas, que son las más distorsionadas). En la Ilustración 9.a se grafica la atenuación (en dB) relativa a la atenuación a 1000 Hz, que se toma como valor de referencia.

5.2) Distorsión de retardo

La distorsión de retardo es un fenómeno de los medios guiados. Esta distorsión está causada por el hecho de que la velocidad de propagación de la señal en el medio varía con la frecuencia. Para una señal de banda limitada, la velocidad tiende a ser mayor cerca de la frecuencia central y disminuye al acercarse a los extremos de la banda. Por tanto, las distintas componentes en frecuencia de la señal llegarán al receptor en instantes diferentes de tiempo, dando lugar a desplazamientos en fase entre las diferentes frecuencias. La Ilustración 9.b representa el retardo relativo de un canal de voz, medido en microsegundos respecto a la frecuencia central de esa banda de frecuencias.

Este efecto se llama distorsión de retardo, ya que la señal recibida está distorsionada debido al retardo variable que sufren sus componentes. La distorsión de retardo es particularmente crítica en la transmisión de datos digitales.

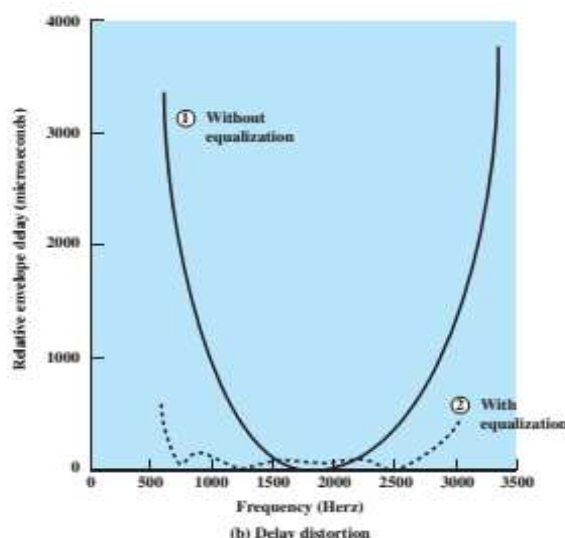
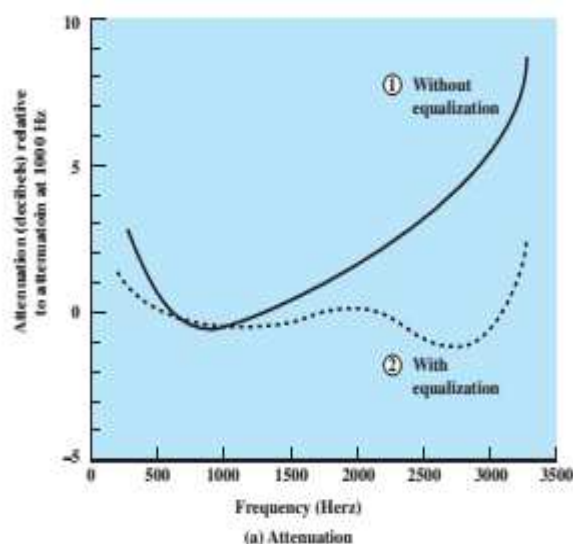


Ilustración 9: Distorsiones de atenuación y distorsión de retardo para un canal de voz.

5.3) Ruido

En cualquier dato transmitido, la señal recibida consistirá en la señal transmitida modificada, debido a las distorsiones introducidas por el sistema de 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 a la hora de limitar las prestaciones de un sistema de comunicación.

La señal de ruido se puede clasificar en cuatro categorías:

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



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 está uniformemente distribuido en el espectro de frecuencias y es por eso por lo que a veces se denomina ruido blanco. El ruido térmico *no se puede eliminar* y, por tanto, impone un límite superior a las prestaciones de los sistemas de comunicación. La cantidad de ruido térmico en un ancho de banda de 1 Hz en cualquier dispositivo o conductor es:

$$N_o = kT \quad [W / Hz]$$

Donde: N_o = densidad de potencia del ruido, en vatios por 1 Hz de ancho de banda.

K = constante de Boltzmann = $1,3803 \times 10^{-23}$ J / °K

T = temperatura, en grados Kelvin.

Ruido de intermodulación

Cuando señales de distintas frecuencias comparten el mismo medio de transmisión puede producirse un ruido de intermodulación. El efecto del ruido de intermodulación es la aparición de señales a frecuencias que sean sumas o diferencias de las dos frecuencias originales, o múltiplos de estas.

Por ejemplo, la mezcla de las señales de frecuencias f_1 y f_2 en un mismo medio de transmisión, puede producir componentes de energía apreciables a las frecuencias:

$$f_1 + f_2 ; f_1 - f_2 ; 2(f_1 + f_2) ; 2(f_1 - f_2) ; 3(f_1 + f_2) ; \text{etc.}$$

Estas componentes podrían interferir con otras señales de datos que se estén transmitiendo a esas frecuencias. (Ejemplo común: emisoras en la radiofonía.)

La causa del ruido de intermodulación, es la alinealidad de los dispositivos electrónicos del sistema de comunicación (en cada bloque, $V_o \neq \text{cte.} \times V_i$)

Diafonía

La diafonía la ha podido experimentar todo aquel que al usar un teléfono, haya oído otra conversación; se trata en realidad de un acoplamiento no deseado entre las líneas que transportan las señales. Esto puede ocurrir por el acoplamiento magnético entre cables de pares cercanos, o en raras ocasiones, en líneas de cable coaxial que transportan varias señales. La diafonía también puede aparecer cuando las señales no deseadas se captan en las antenas de microondas; aunque estas antenas se caracterizan por ser altamente direccionales, la energía de las microondas se dispersa durante la transmisión.

Normalmente, la diafonía es del mismo orden de magnitud (o inferior) que el ruido térmico.

Ruido impulsivo

El ruido impulsivo es no continuo y está constituido por pulsos o picos irregulares, de corta duración, de amplitud relativamente grande y de instante de aparición completamente impredecible. Se generan por una gran diversidad de causas, como, por ejemplo, por perturbaciones electromagnéticas exteriores producidas por tormentas atmosféricas, o fallos y defectos en los sistemas de comunicación.

Es el más grave de los ruidos, si los datos son digitales, tal como refleja la Ilustración 10, ya que puede invertir 0's y 1's entre sí por efecto de la ráfaga de ruido.

La cantidad de bits dañados dependerá de la duración de la ráfaga de ruido impulsivo (medida en segundos), y de la velocidad de transmisión de la señal (medida en bps).

En los datos analógicos, el ruido impulsivo no es relevante (ejemplo: ruidos esporádicos de fondo en una conversación telefónica durante una tormenta eléctrica o ruido en la imagen de TV al encender un motor eléctrico), ya que no es suficiente como para hacer ininteligibles a los datos.

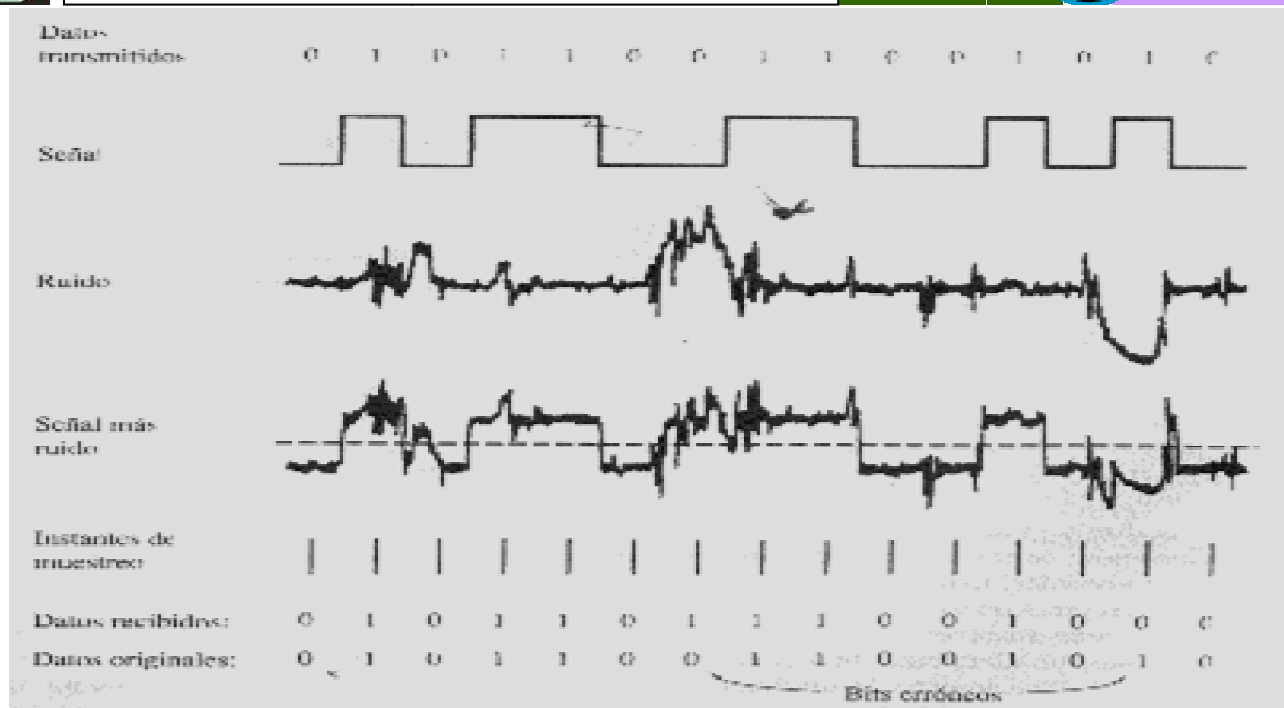


Ilustración 10: Efecto del ruido en una señal digital

6) Capacidad del canal:

Se denomina capacidad del canal a la máxima velocidad a la que se pueden transmitir los datos en un canal o cierto medio en general.

Hay cuatro conceptos relacionados con la *capacidad*, que son:

- **La velocidad de transmisión de los datos :** es la velocidad expresada en bits por segundo (bps), a la que se pueden transmitir los datos,
- **El ancho de banda:** es el ancho de banda de la señal transmitida que estará limitado por el transmisor y por la naturaleza del medio de transmisión; se mide en ciclos por segundo o hertzios.
- **El ruido:** es el nivel medio de potencia de ruido a través del camino de transmisión.
- **La tasa de errores: (BER –“Bit error rate” o “tasa de errores de bits”)** es la tasa a la que ocurren los errores, o sea un número sin magnitudes ya que surge del cociente entre bits erróneos respecto a la totalidad de bits transmitidos.

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. Es uno de los parámetros fundamentales para caracterizar la calidad de una transmisión.

Los servicios de comunicaciones son por lo general caros, y tanto más caros cuanto mayor sea el BW requerido por el servicio, lo que hace que ese servicio deba ser optimizado en su rendimiento.

Pero además, en la realidad, todos los canales de transmisión deben estar limitados en su ancho de banda para evitar interferencias con otros similares que usan ese medio.

De todos modos, las propiedades físicas de los medios de transmisión imponen límites finitos al ancho de banda de los mismos.

Teniendo en cuenta esto, en una transmisión de datos digitales a través de un medio con cierto BW, será deseable conseguir la máxima velocidad de datos disponible, sin superar el BER permitido, a pesar de la presencia de ruido en el canal.



Capacidad de un canal sin ruido (Teorema de Nyquist):

En el caso de un canal sin ruido, la limitación en la velocidad de los datos está impuesta simplemente por el ancho de banda de la señal.

H. Nyquist en 1924 formalizó esta limitación, afirmando que:

Si la velocidad de transmisión de una señal digital binaria es $2BW$ (bps), entonces una señal con frecuencias no superiores a BW (Hz) es suficiente para conseguir esa velocidad de transmisión de la señal.

Recíprocamente:

Dado un medio con un ancho de banda BW (Hz), la máxima velocidad de transmisión de la señal digital binaria que se puede conseguir en ese medio es $2BW$ (bps).

Esa velocidad máxima teórica de transmisión a través de un canal **ideal**, se define como **Capacidad del Canal** (C), siendo para una señal digital *binaria*:

$$C = 2BW \text{ (bps)}$$

Si se usa ahora una señal digital *cuaternaria* (con cuatro niveles de tensión), para transmitir en el mismo ancho de banda anterior (el mismo medio físico anterior), cada elemento de dicha señal podrá representar ahora dos bits, por lo que la formulación de Nyquist para ese caso es:

$$C = 2 * 2BW = 4BW \text{ (bps)}$$

Generalizando la expresión de Nyquist para señalización multinivel:

$$C = 2BW \log_2 M$$

Donde:

C : Capacidad del canal (máxima velocidad de los datos) (bps).

BW : Máxima frecuencia a transmitir por el canal (o sea, el BW del medio) (Hz)

M : Número de señales discretas o niveles de tensión de la señal. (Los anteriores casos ejemplificados son para $M=2$ y $M=4$, respectivamente.)

Ejemplo: Siendo $M = 8$ el valor típico que usan numerosos módems para transmitir señales digitales, indicar cuál será la Capacidad de un canal telefónico que use ese MODEM para transmitir.

(Los canales telefónicos están internacionalmente estandarizados con un $BW = 3100$ Hz., ya que se comprobó experimentalmente que las componentes armónicas entre los 400 Hz. y los 3500 Hz son las frecuencias que mas aportan a la **inteligibilidad** de un mensaje telefónico.)

$$C = 2BW \log_2 M = 2 * 3100 * \log_2 8 = 6200 * \log_2 2^3 = 6200 * 3 = 18600 \text{ bps}$$

Existen también módems que trabajan con $M = 4$, o sea señales cuaternarias, que permiten transmitir en un canal telefónico con una capacidad de 9300 bps.

Conclusiones:

- ❑ La capacidad de un canal, en la formulación de Nyquist, es un valor máximo teórico ya que presupone la inexistencia de ruido en el canal.
- ❑ Para un ancho de banda dado, la velocidad de transmisión de los datos se puede incrementar considerando un mayor número de señales diferentes.



- El límite al incremento de M lo dará el ruido presente en el canal, que hará más difícil al receptor discriminar las diferencias de niveles de la señal recibida.

Capacidad de un canal con ruido (Teorema de Shannon)

La presencia de ruido térmico (o gausseano) puede corromper uno o más bits. Si se aumenta la velocidad de transmisión, el bit se hace más “corto” de manera tal 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 (BER).

Dado un nivel de ruido, sería lógico de esperar que incrementando la energía de la señal se mejorará la recepción de datos en presencia de ruido.

Un parámetro fundamental en el desarrollo de este razonamiento es la *relación señal-ruido* (S/R), que se define:

$$(S/R)_{dB} = 10 \log_{10} (\text{potencia de señal} / \text{potencia de ruido})$$

La relación señal-ruido es especialmente importante en la transmisión de datos digitales, ya que determina la máxima velocidad de transmisión que se puede conseguir.

Una conclusión fundamental de los minuciosos estudios del matemático Claude Shannon, es que la capacidad máxima del canal, en bits por segundo, verifica la ecuación:

$$C = BW \log_2 (1 + S/R) \quad (\text{bps})$$

Donde:

C: capacidad del canal (bps)
BW: ancho de banda del canal (Hz)
S: potencia de la señal (watt)
R: potencia del ruido (watt)

Ejemplo: Sea un MODEM que transmite datos digitales sobre un canal de voz. Determinar la capacidad del canal.

Considerando que en canales telefónicos analógicos, los valores típicos son:

BW= 3.1 KHz y S/N = 30 dB = 1000:1

Resulta:

$$C = 3100 \log_2 (1 + 1000) = 30894 \text{ bps}$$

Conclusiones:

- La capacidad de un canal, en la formulación de Shannon, sigue siendo un límite superior teórico, ya que supone la sola existencia de ruido térmico, sin considerar el ruido impulsivo, atenuación y distorsión. Por ello, las razones de bits reales están muy por debajo de la capacidad teórica.
- La capacidad calculada, fija la tasa máxima de datos a la que se podrá transmitir en un canal ruidoso, independientemente de los niveles M que se usen para la señal o de la frecuencia del muestreo.
- La capacidad tal como se calculó se llama “capacidad libre de errores”, ya que Shannon demostró que:

“Si la tasa de información real en el canal es menor que la capacidad libre de errores, entonces es posible teóricamente usar una codificación de la señal que consiga una transmisión exenta de errores a través de ese canal”

El teorema de Shannon indica que existe algún código, pero no indica cómo obtenerlo, por lo que sirve como marco teórico de referencia en las mediciones de los sistemas reales de comunicación.

- Se podría pensar que, dado un cierto nivel de ruido N , y sabiendo que:

$$C = BW \log_2 (1 + S/N)$$

Para incrementar la capacidad del canal bastaría con aumentar BW y/o S .

Sin embargo:

- Aumentar la energía de la señal, aumenta también las no linealidades del sistema, que originan un aumento en el ruido de intermodulación., por lo que disminuye S/N .
- Aumentar el ancho de banda de la señal, provoca que mayor cantidad de ruido blanco entre en el canal, lo que también disminuye S/N .

7) Unidades de medida:

Un parámetro importante en cualquier sistema de transmisión es la energía de la señal transmitida. Al propagarse la señal en el medio, habrá una pérdida, o atenuación, de energía de la señal.

Habrán pérdidas adicionales en conectores, cables, divisores y en general en cualquier dispositivo atenuador ó **pasivo** (porque no le inyecta energía) por el que pasa la señal.

Para compensar este hecho es necesario introducir amplificadores y otros dispositivos **activos** cada cierta distancia, que restablezcan la energía de la señal a un nivel adecuado para ser interpretados los datos al llegar al receptor.

Los valores de ganancias y pérdidas en circuitos de comunicaciones son medidas relativas, es decir que para cada etapa o bloque del sistema se desea saber cuánto mayor o menor es la salida con respecto a la entrada, mediante el cociente de ambos valores de la magnitud medida.

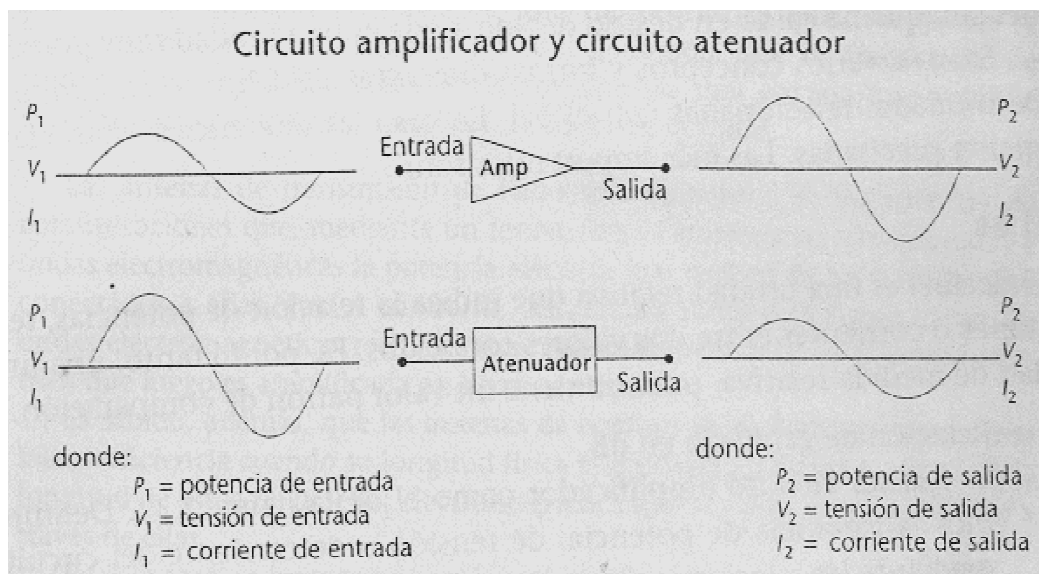


Ilustración 11: Símbolos y señales implicadas en circuitos amplificadores y en atenuadores



Como se indicó, se suelen expresar en decibeles, ya que se tiene de ventaja con ésta unidad:

- La energía de la señal se atenúa en general, siguiendo una variación logarítmica con la distancia y la frecuencia, por lo tanto las pérdidas se pueden expresar en decibeles por ser ésta una unidad logarítmica.
- En un sistema de transmisión, las ganancias y pérdidas en dB de las distintas etapas en cascada, se pueden calcular fácilmente mediante sumas o restas respectivamente.

Ganancia (G) de un circuito amplificador:

La ganancia de potencia, de tensión o de corriente en un circuito amplificador se define por:

Relación de potencias $G(\text{dB}) = 10 \log P_2/P_1$

Relación de tensiones $G(\text{dB}) = 20 \log V_2/V_1$

Relación de corrientes $G(\text{dB}) = 20 \log I_2/I_1$

En las ganancias de tensión y de corriente, la entrada y la salida deben medirse sobre una misma impedancia de carga.

Pérdida (P) de un circuito atenuador:

La pérdida de potencia, de tensión o de corriente en un circuito amplificador se define por:

Relación de potencias $P(\text{dB}) = 10 \log P_1/P_2$

Relación de tensiones $P(\text{dB}) = 20 \log V_1/V_2$

Relación de corrientes $P(\text{dB}) = 20 \log I_1/I_2$

En las pérdidas de tensión y de corriente, la entrada y la salida deben medirse sobre una misma impedancia de carga.

En lugar de invertir las magnitudes en los cocientes, respecto al cálculo de las ganancias, se podrían usar las mismas expresiones, pero asignarles un signo negativo, es decir pensar la pérdida en un circuito atenuador como una “ganancia negativa”.

Para la mayoría de los medios de comunicación (cables de par trenzado, coaxiales, fibra óptica, aire, etc.), el fabricante del mismo da una especificación conocida como **coeficiente de atenuación α** que expresa en dB/km la atenuación característica de ese medio y a una cierta frecuencia de trabajo, que permite calcular la atenuación total a una cierta distancia del transmisor, haciendo uso de la relación:

$$\text{Pérdida total del enlace (dB)} = 0,868 * \alpha \text{ [dB/km]} * \text{longitud del enlace [km]}$$

(Expresión válida a la frecuencia especificada para α)

Ejemplo 1: Calcular la atenuación de un par telefónico del que se conoce que su $\alpha = 2$ dB/km, a una frecuencia de 1 KHz y siendo la longitud de la línea entre el abonado y la central de 20 km.

$$\text{Pérdida en dB} = 0,868 * 2 \text{ dB/km} * 20 \text{ km} = 34,72 \text{ dB}$$

Ejemplo 2: Se tiene un circuito amplificador que posee una ganancia de 20 dB. Si se conoce que la potencia de entrada es de 1 W, calcular la potencia de salida.

$$G(\text{dB}) = 10 \log P_2/P_1$$

$$20(\text{dB}) = 10 \log P_2/1 \text{ W}$$

$$20/10 = \log P_2/1 \text{ W}$$

$$10^2 = P_2/1 \text{ W}$$

$$P_2 = 100 \text{ W}$$

Análogamente, un amplificador que con una potencia de entrada de 0.01 W entrega a la salida 1 W, tiene una ganancia de 20 dB.

Por ejemplo:

Relación de potencias	DB de pérdida o ganancia
$10^{-3} = 0.001$	$10 \log 10^{-3} = 10 * (-3) = -30$
$10^{-2} = 0.01$	$10 \log 10^{-2} = 10 * (-2) = -20$
$10^{-1} = 0.1$	$10 \log 10^{-1} = 10 * (-1) = -10$
0.5	$10 \log 0,5 = 10 * -0,30 = -3$
1	$10 \log 1 = 10 * 0 = 0$
$10^1 = 10$	$10 \log 10^1 = 10 * 1 = 10$
$10^2 = 100$	$10 \log 10^2 = 10 * 2 = 20$
$10^3 = 1000$	$10 \log 10^3 = 10 * 3 = 30$

El dBm:

A diferencia del dB, que es una unidad de medida relativa, el dBm es una unidad de nivel absoluta, que mide la potencia (de entrada o de salida según corresponda para un circuito atenuador o amplificador), respecto de un patrón fijo de referencia de 1 mW.

Si la comparación se efectúa respecto de potencias por debajo de 1 mW, el resultado será negativo.

$$\text{dBm} = 10 \log P_i [\text{mW}] / 1 \text{ mW}$$

En los casos en que se trabajan con potencias elevadas, se toma como valor de referencia 1 W, y en ese caso la unidad se llama dBW.

El dBmV

Es otra unidad de nivel absoluta, que se utiliza para comparar tensiones respecto de un valor fijo de 1 mV.

$$\text{dBmV} = 20 \log V_i [\text{mV}] / 1 \text{ mV}$$

8) Respuesta en frecuencia de amplificadores y filtros:

El comportamiento de los componentes de los sistemas de transmisión, en función de la frecuencia, se suele caracterizar mediante curvas.

8.1) Curva de respuesta de un amplificador:

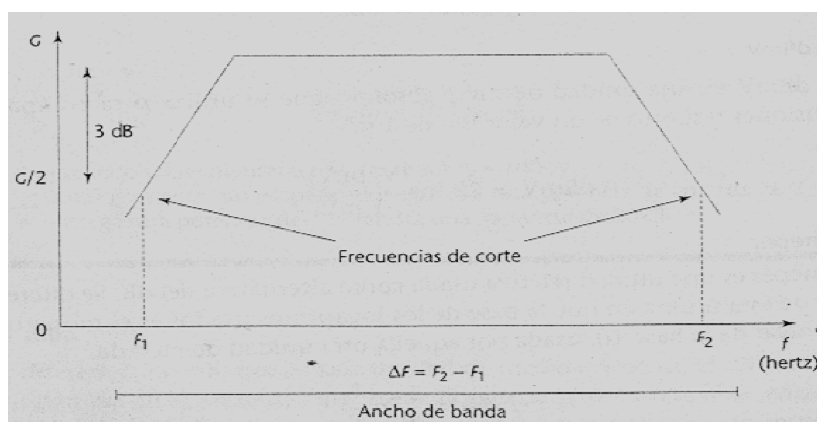


Ilustración 12: Curva de respuesta en frecuencia de un amplificador de audiofrecuencia.

Un amplificador de audiofrecuencia real no presenta una ganancia constante para todas las frecuencias, por lo que cuando se da la G (dB) real de un amplificador, se debe especificar a qué frecuencia corresponde. (Ilustración 12)

Las frecuencias a las cuales la ganancia de potencia cae a la mitad (-3 dB) respecto a la de frecuencia f_0 , se las llama de corte inferior y corte superior respectivamente.

El intervalo: $BW = f_{\max} - f_{\min}$ es el ancho de banda del amplificador.

8.2) Curva de respuesta de los filtros:

Filtros son todos los sistemas pasivos que como partes de redes de comunicación, presentan características selectivas respecto de las frecuencias.

La atenuación en estos sistemas es variable respecto a la frecuencia, de modo que si la señal que se aplica a la entrada de un filtro es rica en contenido armónico, el mismo actúa de manera que solamente algunas componentes de determinadas frecuencias aparecerán en la salida.

- ❑ Filtros pasa bajos: aquellos que permiten el paso de señales de frecuencia cero hasta una frecuencia de corte superior (frecuencia para la que el filtro atenúa 3 dB, o sea que el 50% de la potencia de entrada es eliminada por el filtro).
- ❑ Filtros pasa altos: aquellos que permiten el paso de señales desde una frecuencia de corte inferior hasta teóricamente, frecuencia infinita.
- ❑ Filtros pasa banda: aquellos que permiten el paso de señales entre dos frecuencias de corte, una superior y otra inferior.
- ❑ Filtros suprime banda: aquellos que no permiten el paso de señales comprendidas entre una frecuencia de corte inferior y otra de corte superior.

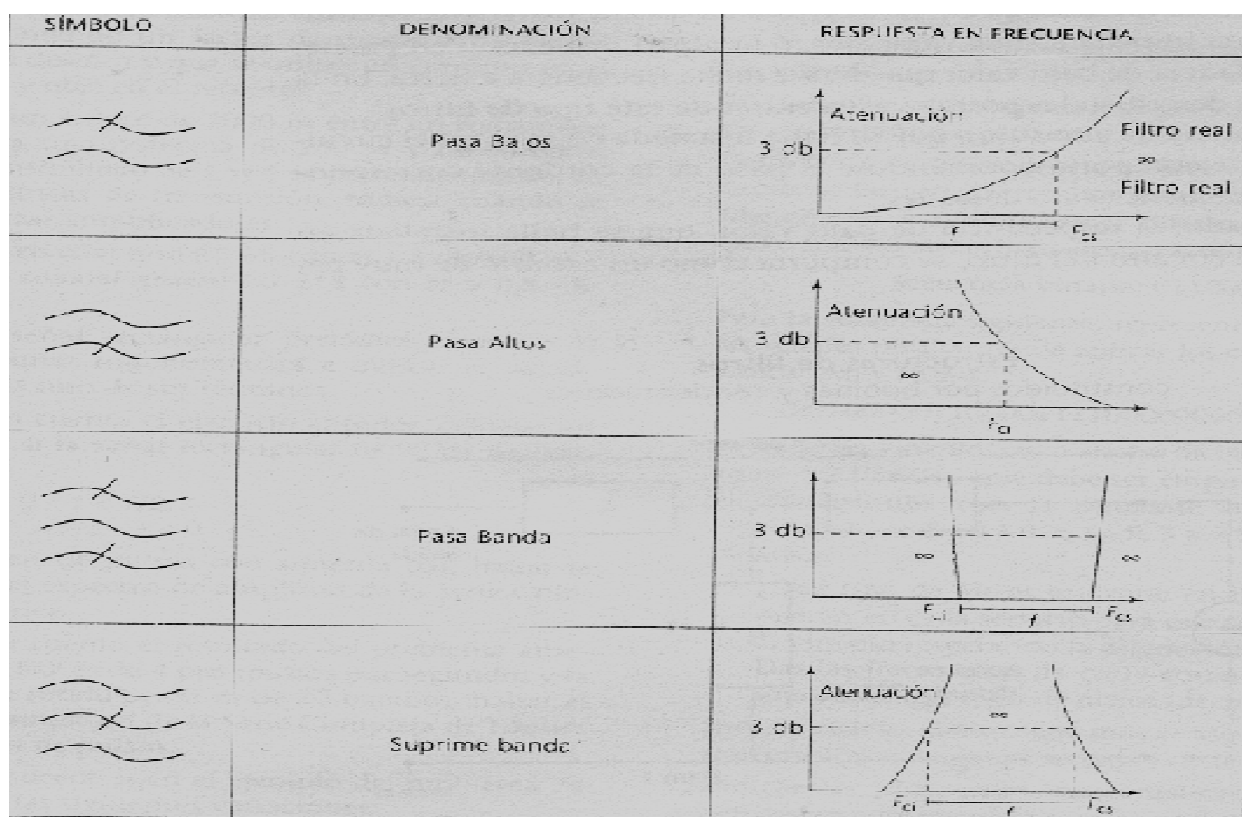


Ilustración 13: Curvas de respuesta en frecuencia de los distintos tipos de filtros.

9) Apéndice sobre análisis de Fourier:

Cualquier señal periódica se puede expresar mediante la Serie de Fourier:

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

Donde los coeficientes se calculan como:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(2\pi f_0 t) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(2\pi f_0 t) dt$$

Algunas series típicas que sirven de ejemplo:

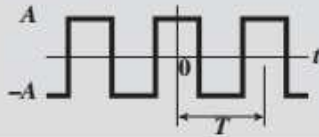

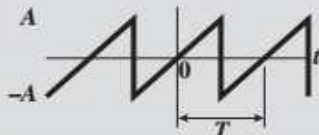
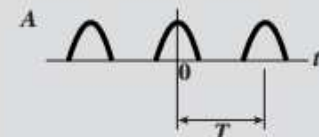
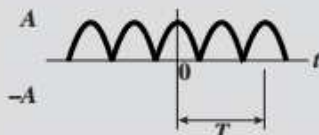
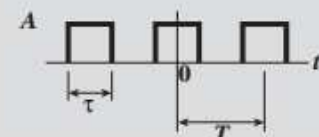
Signal	Fourier Series
Square wave 	$(4A/\pi) \times [\cos(2\pi f_1 t) - (1/3) \cos(2\pi (3f_1) t) + (1/5) \cos(2\pi (5f_1) t) - (1/7) \cos(2\pi (7f_1) t) + \dots]$
Triangular wave 	$(8A/\pi^2) \times [\cos(2\pi f_1 t) + (1/9) \cos(2\pi (3f_1) t) + (1/25) \cos(2\pi (5f_1) t) + \dots]$
Sawtooth wave 	$(2A/\pi) \times [\sin(2\pi f_1 t) - (1/2) \sin(2\pi (2f_1) t) + (1/3) \sin(2\pi (3f_1) t) - (1/4) \sin(2\pi (4f_1) t) + \dots]$
Half-wave rectified cosine 	$C_0 = A/\pi$ $C_n = 0 \text{ for } n \text{ odd}$ $C_n = (A/\pi) \times (-1)^{(1+n/2)} \times (2/(n^2 - 1)) \text{ for } n \text{ even}$
Full-wave rectified cosine 	$C_0 = 2A/\pi$ $C_n = (2A/\pi) \times (-1)^n \times (1/(4n^2 - 1))$
Pulse Train 	$C_n = A \times \left \frac{\sin(n\pi\tau/T)}{n\pi\tau/T} \right $

Ilustración 14: ejemplos de señales periódicas y sus series de Fourier.

Para una señal no periódica, su espectro consiste en un continuo de frecuencias, que se puede obtener mediante la Transformada de Fourier.

Para una señal $S(t)$, con espectro $S(f)$, se verifican las siguientes expresiones para pasar del dominio temporal al espectral (e inversamente):

$$x_{(t)} = \int_{-\infty}^{+\infty} X_{(f)} \cdot e^{j2\pi ft} df$$

$$X_{(f)} = \int_{-\infty}^{+\infty} x_{(t)} \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$



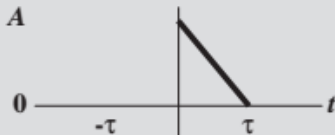

Signal $x(t)$	Fourier Transform $X(f)$
<p>Rectangular Pulse</p> 	$A\tau \frac{\sin(\pi f\tau)}{\pi f}$
<p>Triangular Pulse</p> 	$A\tau \left(\frac{\sin(\pi f\tau)}{\pi f\tau} \right)^2$
<p>Sawtooth Pulse</p> 	$(jA/2\pi f\tau) \times \{ [(\sin(\pi f\tau)/\pi f\tau)] \exp(-j\pi f\tau) - 1 \}$
<p>Cosine Pulse</p> 	$\frac{2A\tau}{\pi} \times \frac{\cos(\pi f\tau)}{1 - (2f\tau)^2}$

Ilustración 15: algunas señales no periódicas y sus transformadas de Fourier.