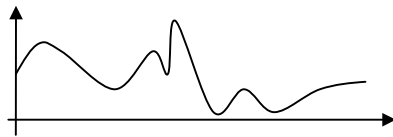

TEMA 5

Transmisión y Digitalización

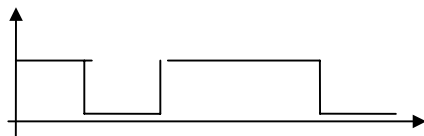
1. Características de las señales y Unidades de Medida

Podemos distinguir dos grandes familias de señales:

- Señales analógicas: Pueden ser representadas mediante funciones que toman un número infinito de valores en cualquier intervalo de tiempo considerado. Para transmitir señales analógicas se emplean sistemas de transmisión analógicos, y la información va contenida en la propia forma de onda



- Señales digitales: Pueden ser representadas mediante funciones que toman un número finito de valores en cualquier intervalo de tiempo. Las señales digitales necesitarán sistemas de transmisión digitales donde la información estará contenida en los pulsos codificados, y no en la forma de onda.



Existen fuentes de información que generan señales típicamente analógicas, como la voz y otras digitales como las computadoras, pero en ambos casos es posible transmitir la señal tanto en analógico como en digital.

Las señales que no sufren ningún proceso de modulación ni desplazamiento en frecuencia, se denominan señales en **banda base**. En el caso de las señales digitales se denominan códigos en banda base o **códigos de línea**, y serán tratados en mayor profundidad en los capítulos correspondientes al nivel físico de las redes. Baste aquí señalar algunos códigos en banda base utilizados:

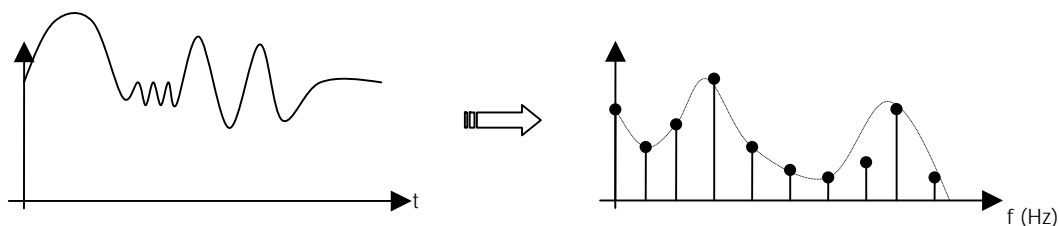
- Unipolar: donde el '1' lógico es representado por un voltaje positivo (+V) y el '0' lógico por ausencia de voltaje.
- Polar: el '1' lógico se representa mediante una señal (+V o -V) mientras que el '0' con la opuesta (-V o +V respectivamente).
- Bipolar: el '0' lógico se representa con ausencia de voltaje, mientras que el '1' lógico se va representando con +V y -V alternativamente.

En los tres casos anteriores la señal de voltaje deberá mantenerse durante un periodo de tiempo denominado tiempo de bit (T_{bit}). El número de bits transmitidos en un segundo se denomina Régimen binario (R_b) y, en ausencia de modulaciones multinivel, corresponde con $1/T_{\text{bit}}$.

Las transmisiones en banda base son frecuentes debido al bajo coste de los equipos de transmisión. En función del código utilizado las señales generadas tendrán distintas características. La que más nos interesa es su ancho de banda o espectro en frecuencia.

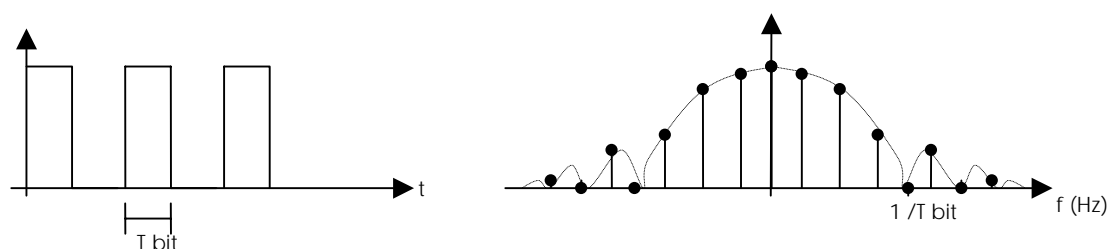
El desarrollo en series de Fourier nos muestra que toda señal en el tiempo (que cumpla ciertas condiciones) puede ser representada como una suma de señales senoidales de distintas frecuencias. La representación en frecuencia de una señal muestra cómo se distribuye la energía de la señal entre las distintas senoides que la componen.

Una señal analógica, en general, estará compuesta por suma de muchas, posiblemente infinitas, señales senoidales de distintas frecuencias, por lo que:



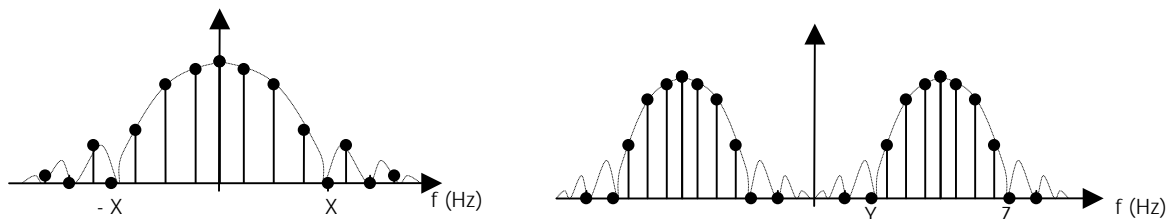
En líneas punteadas destaca el espectro en frecuencia de la señal anterior. La componente de frecuencia 0 corresponde con una señal que no vibra, es decir, constante. A partir de cierta frecuencia las componentes del espectro de una señal irán decayendo, por lo que podrán ser despreciadas.

Para señales digitales el espectro en frecuencia también variará en función del código de línea utilizado. De forma general, las señales digitales se basan en la forma de onda cuadrada, cuya representación en frecuencia se muestra en la siguiente gráfica.



La forma del espectro en frecuencia dependerá del código de línea utilizado pero siempre que se incrementa el Régimen binario, aumenta la anchura del espectro en frecuencia de la señal generada.

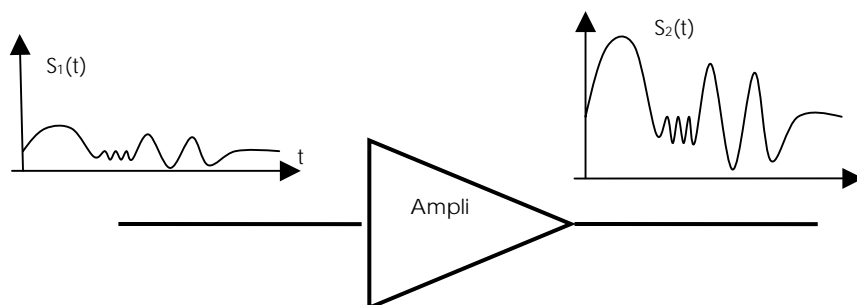
Definimos ancho de banda de una señal como el intervalo de frecuencias en el cual se concentra la mayor parte de la energía de la señal. Para señales reales el espectro en frecuencia es simétrico respecto al eje ordenadas, pero sólo tendremos en cuenta las frecuencias positivas.



El ancho de banda de estas dos señales será X Hz y (Z-Y)Hz respectivamente.

Debido a las características de las señales utilizadas en la transmisión, se suelen emplear las siguientes unidades de medida:

dB (decibelio): Es una unidad de medida relativa, que indica la relación entre dos valores de potencia, tensión o intensidad. Se aplica a la especificación de ganancias o atenuaciones de una señal. Supongamos un amplificador a cuya entrada tenemos una señal S_1 de potencia P_1 y a la salida una señal S_2 de potencia P_2 .



La ganancia expresada en decibelios sería:

- Relación de potencias: $G(dB) = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_2}{P_1}$
- Relación de tensiones: $G(dB) = 20 \cdot \log_{10} \frac{V_2}{V_1}$, debido a que $P=V^2 / R$
- Relación de intensidades: $G(dB) = 20 \cdot \log_{10} \frac{I_2}{I_1}$

Las pérdidas o atenuaciones pueden expresarse como ganancias negativas, o lo que es igual:

- Relación de potencias: $A(\text{dB}) = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_1}{P_2}$
- Relación de tensiones: $A(\text{dB}) = 20 \cdot \log_{10} \frac{V_1}{V_2}$,
- Relación de intensidades: $A(\text{dB}) = 20 \cdot \log_{10} \frac{I_1}{I_2}$

Una ganancia de 5 dB equivale a una atenuación de -5dB. No debemos olvidar que es una unidad de medida relativa, que permite comparar dos magnitudes.

Ejemplo: Tengo un amplificador cuya ganancia es de 20dB. Si la potencia de la señal de entrada es 1W, ¿qué potencia en W tendré a la salida del mismo? Sol.: 100 W ¿Y si el amplificador tuviera 40 dB de ganancia?

dBm : Es una unidad de medida absoluta, que permite medir potencia (al igual que los Watios). Representa la potencia de la señal respecto a un valor fijo de 1 mW.

$$P(\text{dBm}) = 10 \cdot \log \frac{P(\text{W})}{1 \text{ mW}}$$

Ejemplo: Llega una señal de 15 dBm ¿qué potencia en W tendrá la señal? Sol.: $10^{1.5}$ mW, o 0,0316 W

Ejemplo: al transmitir una señal a través de un cable sufre una atenuación de 10dB. Si necesito recibir en un extremo 2W de potencia, ¿ Cuántos dBm deberá tener la señal que se envíe en el otro extremo? Sol.: 43 dBm

dBu : Es una unidad de medida absoluta utilizada para comparar la tensión respecto a un valor fijo de 0,775 V (correspondiente a una señal de 1mW atravesando una resistencia de 600 Ω). Es una unidad muy utilizada en telefonía.

$$P(\text{dBu}) = 20 \cdot \log \frac{V(\text{Voltios})}{0,775 \text{ V}}$$

La utilización de unidades logarítmicas se hace especialmente útil para operar con señales que sufren atenuaciones o ganancias en sucesivas etapas, ya que en estos casos las unidades logarítmicas pueden sumarse directamente. Para demostrarlo, partimos de la fórmula de la atenuación en decibelios:

$A(\text{dB}) = 10 \log (P_1 / P_2)$, por lo que $P_2(W) = P_1(W) \cdot 10^{-A(\text{dB})/10}$, dividiendo por 1mW, y tomando logaritmos en ambas partes, tendremos: $\log (P_2(w)/1\text{mW}) = \log (P_1(w)/1\text{mW}) + A(\text{dB})/10$. Si multiplicamos por 10 en ambos lados,

$$P_2(\text{dBm}) = P_1(\text{dBm}) - A(\text{dB})$$

o lo que es igual, $P_2(\text{dBm}) = P_1(\text{dBm}) + G(\text{dB})$.

Si tenemos varias etapas en serie de amplificación y de atenuaciones, podemos especificar la siguiente fórmula general:

$$P_2(\text{dBm}) = P_1(\text{dBm}) + \sum_i G_i(\text{dB}) - \sum_j A_j(\text{dB})$$

2. Problemas de la Transmisión

Cuando una señal atraviesa un canal de comunicaciones sufre tres tipos de fenómenos que la hacen variar su forma original: atenuación, distorsión y ruido

Atenuación: Es una disminución en la amplitud de la señal a medida que ésta va recorriendo el medio de transmisión. La atenuación sufrida por la señal es proporcional a la distancia recorrida, por lo que se suele especificar, para los medios de transmisión, en dB/m.

Podemos apreciar el principio físico de la atenuación teniendo en cuenta que la resistencia (ligada con la atenuación) de un conductor es directamente proporcional a la longitud del mismo, mientras que resulta inversamente proporcional a su sección. Por tanto, a secciones mayores del conductor, menor atenuación, y a longitudes mayores de conductor, mayor atenuación.

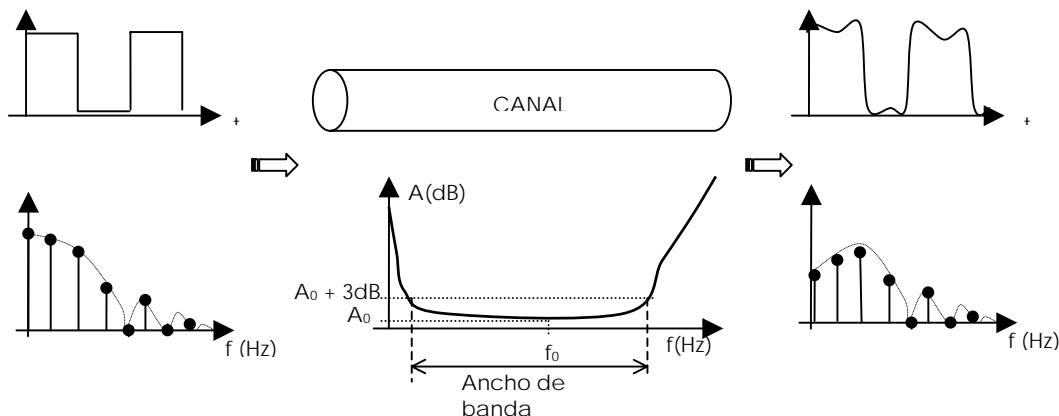
Ejemplo: Una señal de 100 dBm se transmite por un cable conductor de 10 metros de longitud. Si la atenuación del cable es 10 dB/m, ¿qué potencia llegará al otro extremo?. Sol.: La atenuación sufrida por la señal será $10\text{dB/m} \cdot 10\text{m} = 100\text{ dB}$, por tanto llegará $100\text{ dBm} - 100\text{ dB} = 0\text{dBm}$, o lo que es igual 1mW.

En transmisión de señales analógicas se puede compensar la pérdida de amplitud debida a la atenuación mediante el uso de amplificadores, que incrementan la amplitud de la señal de entrada. En transmisiones digitales utilizaremos repetidores regenerativos, que generan una señal nueva a la salida con la misma información que tenía la señal a la entrada. Un requisito para el correcto funcionamiento de los

repetidores regenerativos es que la señal de entrada debe poder ser decodificada, por lo que deberemos situarlos cada cierta distancia. Al necesitar interpretar la información recibida, deben dejar pasar al menos un tiempo de bit, por lo que introducen un pequeño retardo, lo que puede limitar el número de estos en un trayecto.

Ejemplo: Supongamos un ordenador que genera una señal digital de 1W. Dicha señal atraviesa un conductor de 30 Km de longitud cuya atenuación es de 2 dB/Km. Si el equipo receptor señal (modem) necesita como mínimo -10dBm de potencia a la entrada para poderla interpretar correctamente. ¿Necesitaré amplificar?. Supongamos que dispongo de repetidores regenerativos que necesitan a la entrada 0dBm y producen una señal de 10dBm a su salida. ¿Cuántos debería utilizar?, ¿a qué distancia del equipo origen?. Sol.: a) Si, pues llegan -30dBm . b) dos. c) situados a 15 y 20Km

Distorsión: provoca una deformación de la señal original. Debido a las características inductivas y capacitivas de los diferentes medios de transmisión, la atenuación que éste presenta varía con la frecuencia. Este fenómeno trae como consecuencia la distorsión o deformación de la señal al atravesar el medio.



Definimos ancho de banda (BW) de un canal de comunicaciones como el intervalo de frecuencias para las cuales la atenuación del medio de transmisión permanece bajo unos límites determinados y aproximadamente constantes. Consideraremos dichos límites como una diferencia de 3dB respecto al valor en la frecuencia f_0 tomada como referencia.

El ancho de banda está directamente relacionado con la cantidad de información que podemos enviar por un canal de comunicaciones. Cuando el medio de transmisión es metálico, uno de los efectos que contribuyen a la distorsión es el

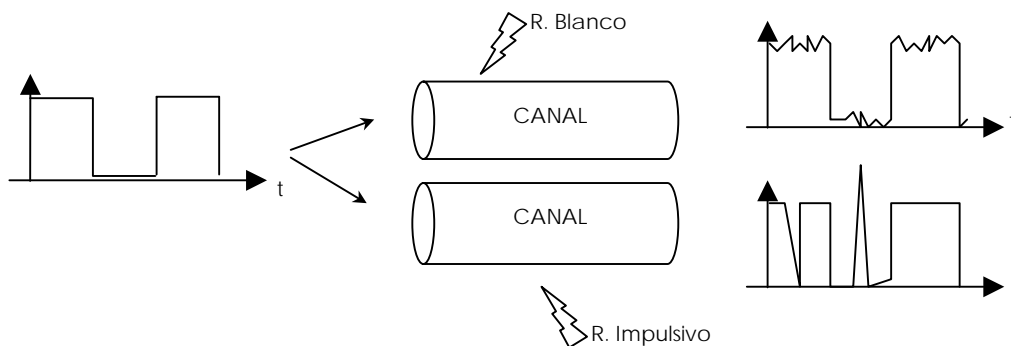
conocido efecto pelicular, que provoca una reducción de la superficie útil por la que circulan los electrones a medida que aumentamos la frecuencia, lo que provoca un incremento en la resistencia del conductor en las frecuencias más altas.

Para compensar la distorsión de un canal se emplean ecualizadores, que intentan conseguir un rango de frecuencias lo más grande posible en el que la atenuación permanezca constante.

Ruido: es toda perturbación o interferencia no deseada que se introduce en el canal de comunicaciones y se suma a la señal útil. Existen múltiples fuentes de ruido, unas externas (motor de un coche, de un ascensor, teléfono móvil, ...) y otras internas al propio sistema de comunicaciones (ruido térmico, ...).

Es imposible predecir la magnitud de la tensión del ruido en un momento determinado, por lo que se suele tratar de forma estadística. Existen diferentes tipos de ruido, de los que destacaremos dos:

- Ruido Blanco: Su densidad de energía se distribuye por igual en todo el rango de frecuencias. Ejemplo: Ruido térmico provocado por el movimiento aleatorio de los electrones de un metal con la temperatura.
- Ruido Impulsivo: Producido a intervalos irregulares con picos muy pronunciados y de corta duración. Suelen tener origen externo (encendido de una luz, relés, ...)



Para evitar el ruido la única forma de proceder es recubrir el medio de transmisión con una pantalla metálica que absorba la mayoría del ruido externo, evitando a la vez la salida de interferencias al exterior.

Al amplificar la señal en la línea debemos tener en cuenta que también estaremos amplificando el ruido que lleve dicha señal, hecho que limita el número de amplificadores dispuestos en serie al transportar una señal analógica.

La relación entre la potencia de la señal útil y la potencia del ruido es un parámetro fundamental para determinar la calidad de la transmisión. Dicha relación, denominada señal ruido o señal a ruido, se expresa de forma logarítmica:

$$S/N = SNR = 10 \cdot \log \frac{S(W)}{N(W)}$$

, donde $S(W)$ y $N(W)$ se corresponden con la potencia en Watios de la señal y del ruido respectivamente.

El **teorema de Shannon** nos ofrece el límite superior de la capacidad de transmisión (en bit/s) para un canal real con un determinado ancho de banda (BW), en presencia de ruido.

$$C_{\max} (\text{bit/s}) = BW \cdot \log_2(1 + S/N)$$

Este límite teórico normalmente no se alcanza con los sistemas de transmisión actuales.

Ejemplo: Si un canal tiene un ancho de banda de 3KHz, y la relación señal a ruido es de 100 dB, ¿Cuál será el límite máximo de la velocidad en la transferencia de información? Sol.: 19.975 bit/s

3. Los medios de transmisión

Son parte de los sistemas de transmisión, y permiten el transporte de una señal (normalmente eléctrica u óptica) a una velocidad denominada velocidad de propagación (para el cobre es 0,6·c). Veamos cuales son los principales medios de transmisión utilizados hoy en día.

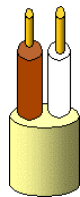
El cable de pares:

Consiste en dos conductores aislados entre si y con el exterior, trenzados de forma que cada uno se encuentre expuesto a la misma cantidad de ruido inductivo externo. Los conductores son de cobre y tienen una sección entre 0,4 y 0,9 mm de diámetro. En algunos casos para evitar interferencias los pares trenzados se acompañan de una pantalla metálica, que aumenta el rendimiento. A dichos cables se les denomina STP (Shielded Twister Pair), frente a los cables sin apantallar denominados UTP (Unshielded Twister Pair). Normalmente este tipo de cables se agrupan en cables de mayor capacidad denominados multipares, que llevan hasta 2400 pares.

Uno de los problemas en los cables multipares es el conocido como diafonía, que consiste en el acoplamiento entre dos señales que circulan por pares adyacentes debido a la inducción electromagnética mutua (crosstalk). La señal acoplada puede recibirse en el extremo más cercano (paradiafonía) o al más alejado (telediafonía).

Como características principales del cable de pares podemos señalar:

- Bajo coste
- Ancho de banda reducido (principalmente por la sección del conductor)
- Presencia de diafonía (en los cables multipares).



Ejemplo: Sabiendo que la atenuación en un cable de pares UTP es constante hasta 1MHz, e igual a 2dB/100m, subiendo a 3,5dB/100m para 6 MHz ¿cuál sería el ancho de banda si dicho cable mide 200m? ¿y la tasa máxima alcanzable para una relación S/N de 100dB? Sol.: $BW=6MHz$, y aplicando Shannon $C=40$ Mbit/s. Rehacer los apartados anteriores para un cable de 500 m de longitud.

Cable coaxial:

Son cables contruidos con dos conductores concéntricos de cobre, uno interno por el que circula la señal útil y otro externo que rodea al anterior actuando a modo de pantalla. El conductor central tiene un diámetro superior al de los cables de pares (entre 1 y 5 mm).

Podemos señalar como características principales del cable coaxial:

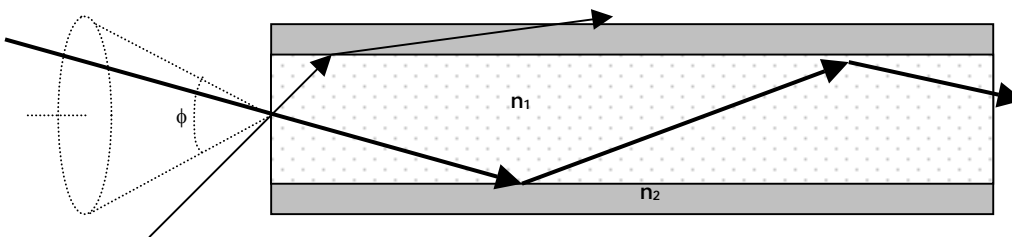
- Menor atenuación por unidad de longitud que el cable de pares
- Mejor respuesta en frecuencia (debido a la mayor sección del conductor)
- Mayor inmunidad frente al ruido (por su apantallamiento)
- Coste mas elevado
- De manejo más difícil

Ejemplo: Suponiendo un cable coaxial con 50 MHz de ancho de banda, ¿cual sería la capacidad máxima de dicho cable (en bit/s) para una relación señal a ruido de 100 dB? Sol.: aplicando Shannon, 332 Mbit/s.



Fibra óptica:

Consta básicamente de un fino hilo de óxido de silicio que permite transportar la luz en la banda de infrarojos. Se utiliza para transmitir señales digitales (caracterizadas por presencia de luz '1' y ausencia de luz '0'). La fibra óptica está compuesta por dos capas de vidrio concéntricas con distinto índice de refracción, lo que provoca que un haz de luz incidente con un cierto ángulo de entrada se propague a lo largo de la fibra. El ángulo de entrada debe pertenecer al cono de aceptación, determinado por: $\text{sen } \phi = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, donde n_1 y n_2 corresponden con el índice de refracción del núcleo y la corteza respectivamente.



El diagrama de atenuación de la fibra óptica en función de la frecuencia nos ofrece tres regiones aproximadamente planas, denominadas ventanas de transmisión, situadas en 850, 1300 y 1500 nm (en lugar de frecuencia se opera con longitudes de onda: $f(\text{Hz}) = c(\text{m/s})/\lambda(\text{m})$). Sumando las tres regiones el ancho de banda total es de aproximadamente 110 THz. No obstante dicho ancho de banda no puede ser aprovechado en su totalidad a menos que se utilicen técnicas de multiplexión para transmitir en las tres ventanas. Además, el ancho de banda real en la fibra óptica no viene limitado por su diagrama de atenuación, como ocurre con los medios metálicos, sino por un fenómeno denominado dispersión de la luz.

La dispersión trae como consecuencia fundamental el ensanchamiento de los pulsos a medida que recorren la fibra, lo que limita la velocidad real de transmisión, pues si el tiempo de bit es muy pequeño se unirían pulsos correspondientes a bits consecutivos, imposibilitando así la correcta interpretación de la señal recibida. La dispersión se debe básicamente a dos efectos:

- Dispersión modal, causada por las diferentes trayectorias que toman los haces de luz que atraviesan la fibra, lo que provoca que recorran distancias diferentes. Por lo que dos haces que iniciaron el camino a la par, llegarán al otro extremo en diferentes

instantes de tiempo. Esta dispersión es la dominante, y para minimizar su efecto debemos disminuir el tamaño del núcleo de la fibra (fibra monomodo).

- **Dispersión cromática:** es debido a que la luz inyectada en la fibra no es monocromática pura (tiene más de una longitud de onda). Teniendo en cuenta que la velocidad de propagación de la luz es inversamente proporcional al índice de refracción, y que éste varía con la frecuencia, las distintas longitudes de onda que componen el haz luminoso viajarán a distinta velocidad. Para minimizar este efecto deben utilizarse emisores de luz altamente monocromáticos, como los láser (normalmente utilizado en fibra monomodo para alcanzar mayores distancias).

Podemos señalar como principales características:

- Baja atenuación por Km (del orden de 0,2 dB/Km), lo que permite separar mucho los repetidores (varios cientos de kilómetros)
- Total inmunidad frente al ruido (es normal una BER < 10⁻¹⁰)
- Gran capacidad de transmisión (BW, varios Gbits/s)
- Son seguros (difíciles de interceptar)
- Coste relativamente elevado, pero decreciente
- Usan señales de potencias muy bajas (mW)
- El manejo de la fibra óptica es complejo, sobre todo en el caso de empalmes (que pueden ser mecánicos o por fusión) y conectorización.

Otros medios de transmisión:

- **Radiocomunicaciones:** permiten el intercambio de información mediante la transmisión y recepción de ondas electromagnéticas a través del espacio libre, que se propagan a la velocidad de la luz ($c=300.000$ Km/s). Las bandas empleadas en comunicaciones son:

Frecuencia	nombre	Long. Onda	Usos comunes
300 K-3 M	MF	1 Km-100 m	Radio AM
3 M-30 M	HF	100m- 10m	Onda corta, radioaficionados
30M-300M	VHF	10m-1m	TV, Radio FM
300M – 3G	UHF	1m-10cm	Microondas, TV, GSM
3G-30G	SHF	10cm-1cm	Satélites

Las antenas permiten tanto la emisión como la recepción de señales, y pueden ser básicamente de dos tipos: omnidireccionales (emiten la misma energía en todas las direcciones) y direccionales (de mayor ganancia en una dirección concreta). Por lo general cuanto mayor es la frecuencia de la señal, las ondas tienden a comportarse como un haz de luz (son más direccionales) y su alcance límite es la visibilidad óptica

entre emisor y receptor (aprox. 50 Km). Las señales transportadas pueden ser analógicas (caso de televisión o radiodifusión) o digitales.

En ocasiones se utilizan uno o más satélites para lograr la reflexión de las ondas electromagnéticas y cubrir así grandes distancias. Podemos distinguir fundamentalmente dos tipos de satélites:

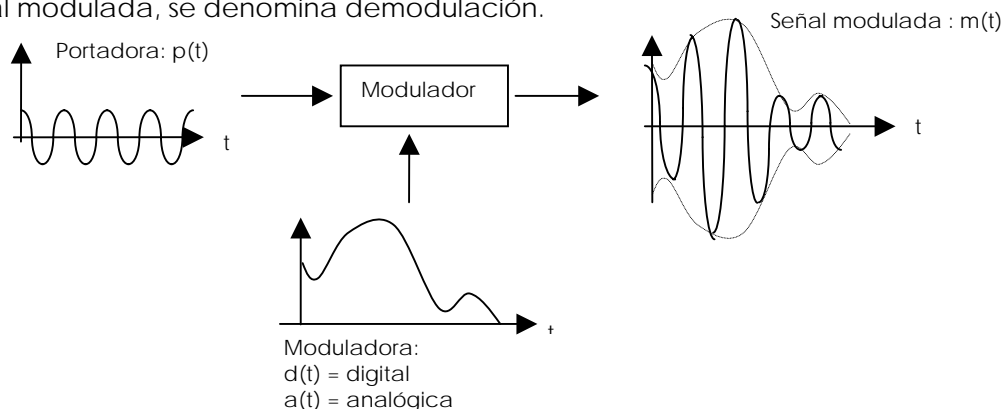
- *de órbita baja* (entre 400 y 2500 Km de altura), cuyo lanzamiento tiene menor coste. Describen órbitas elípticas para dar vueltas a la tierra en 90 min. Su disponibilidad es pequeña, así como el retardo de las comunicaciones (10 ms) y la potencia necesaria en el emisor. Harán falta varios satélites para cubrir una superficie extensa.
- *de órbita geoestacionaria* (situados a 35.000 Km de altura), donde el satélite tardará 24 horas en dar la vuelta a la tierra, describiendo una órbita circular. La disponibilidad será total y con tres satélites es posible cubrir toda la superficie terrestre. La señal sufrirá un retardo considerable (entorno a 240 ms) y la potencia necesaria en el emisor resulta muy elevada (antenas parabólicas de gran diámetro en recepción).

- Guías de onda:

Medio de transmisión adecuado para transportar ondas electromagnéticas de longitudes micrométricas en distancias cortas y frecuencias muy elevadas (GHz). Los medios metálicos a estas frecuencias radian gran parte de la energía de la señal debido al efecto pelicular. Consisten en tubos huecos rectangulares de cobre rojo en cuyo interior existe aire con muy poca humedad. Suelen utilizarse para transportar la señal entre la antena receptora y el equipo de procesamiento de la señal.

4. Modulación

Es la operación mediante la cual ciertas características de una onda, denominada portadora, se modifican en función de otra, denominada moduladora y que contiene la información que se quiere transmitir. A la onda resultante se le denomina señal modulada. El proceso inverso, por el cual recuperamos la información a partir de la señal modulada, se denomina demodulación.



El motivo fundamental para utilizar la modulación es la necesidad de adaptación entre las señales y los medios de transmisión, por lo que se transforma la señal moduladora a una más adecuada al medio utilizado (señal modulada). Los métodos de modulación, en función de la naturaleza de la señal portadora, pueden dividirse en dos grandes grupos: modulación por onda continua y modulación por pulsos.

4.1. Modulación por onda continua

La señal portadora será una onda senoidal y la información se transmitirá modificando alguna de sus características (amplitud, frecuencia o fase).

$$p(t) = A_p \cdot \text{sen}(\omega_p \cdot t + \theta_p)$$

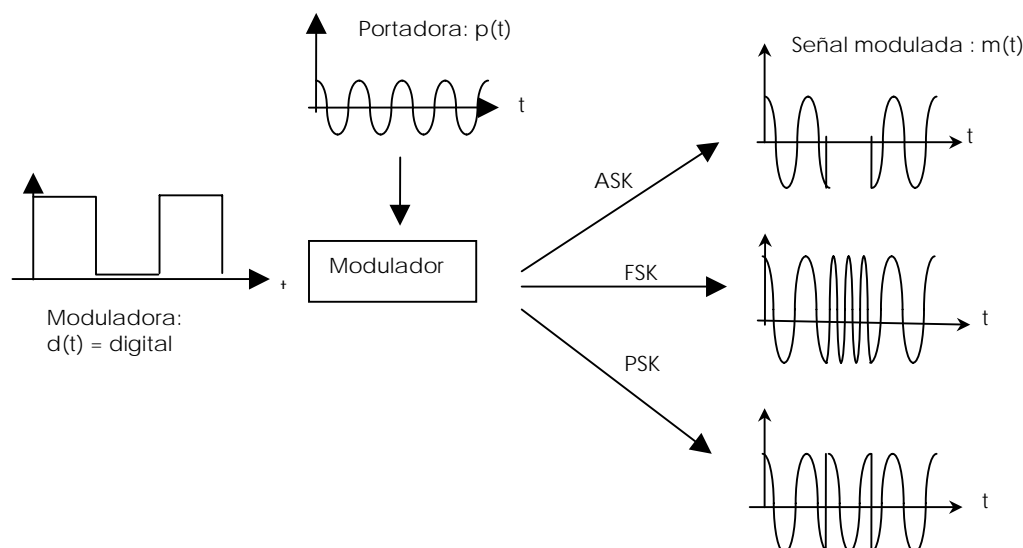
lo que dará lugar a tres tipos diferentes de modulación:

a) Modulación en amplitud: el parámetro de la portadora que varía en función de la señal de información es la amplitud. Si la señal moduladora es analógica se denomina modulación AM, si es digital ASK. Equivale a un desplazamiento de la señal moduladora a la frecuencia de la señal portadora. $A_p(t) = A_0 + k \cdot a(t)$

b) Modulación en frecuencia: el parámetros de la portadora que varía en función de la información a transmitir es la frecuencia. Es el primer tipo de modulación que se utilizó para transmitir datos (FSK). En señales de información analógica se denomina FM, y es utilizada ampliamente en la radiodifusión. $\omega_p(t) = \omega_0 + k \cdot a(t)$

c) Modulación en fase: la fase de la portadora es el parámetro que varía en función de la señal moduladora. Cuando la señal moduladora es digital se denomina PSK. $\theta_p(t) = \theta_0 + k \cdot a(t)$

Ejemplo:



Definimos **símbolo** como cada uno de los posibles niveles o tipos de la señal modulada. Para distinguir los distintos símbolos debemos mantenerlos en la línea durante un periodo de tiempo, denominado tiempo de símbolo o intervalo mínimo significativo (T). La velocidad de modulación se mide en **Baudios** y se define como la inversa del tiempo de símbolo: $v_m = 1/T$. La velocidad de modulación representa la máxima velocidad de cambio de la señal en el tiempo y está ligada con el BW que ocupa la señal,

De esta forma, para transmitir una señal digital necesitaremos como mínimo dos símbolos, para el 1 y para el 0 respectivamente. Pero si disponemos de una modulación con cuatro símbolos podremos hacerlos corresponder a 00,01,10 y 11, transmitiendo así dos bits con cada símbolo. De forma general, el **Régimen Binario** o velocidad de transmisión representa el número de bits que se transmiten por segundo. Cuando empleamos N símbolos al modular una señal binaria tendremos que:

$v_{TX} = R_b = \frac{\log_2 N}{T}$, expresado en bit/s, donde N es el número de símbolos y T el tiempo de símbolo.

Algunos ejemplos de modulaciones multinivel lo constituyen la N -ASK, donde se transmiten pulsos de diferentes amplitudes, o la N -QAM, donde los símbolos difieren unos de otros en la amplitud y la fase (ejemplo: 16-QAM). Hay que tener en cuenta que incrementando el número de símbolos tendremos más probabilidad de confundir unos con otros en recepción cuando la señal se vea afectada por los problemas de la transmisión.

Como regla general los prefijos kilo, Mega, y Giga, ... serán considerados como 10^3 , 10^6 y 10^9 respectivamente cuando se hable de bits o régimen binario. En el contexto de aplicaciones informáticas los bits se suelen agrupar cada 8, utilizando así el byte (u octeto). Un kbyte serán 1024 bytes, así como 1 Mbyte serán 1024 kbytes.

4.2. Modulación por pulsos: Digitalización

En ella la señal portadora no es senoidal sino un tren de pulsos, que varían sus características en función de la señal moduladora. Podemos distinguir dos tipos básicos: la analógica, donde la información transmitida se encuentra en las variaciones de amplitud (PAM), duración (PDM) o posición (PPM) de los pulsos que conforman el tren, y digital, donde la información transmitida se encuentra en la codificación (secuencia de 0 y 1) de la señal modulada. A continuación veremos la

modulación por pulsos digital más utilizada, conocida como Modulación por Impulsos Codificados (MIC o PCM), que permite digitalizar una señal analógica.

¿Qué ventajas ofrece la transmisión digital de señales?

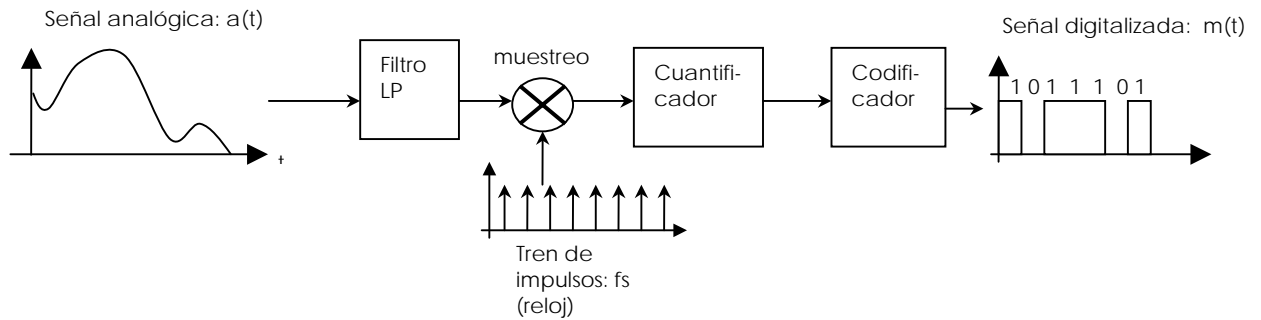
- Permite la multiplexión de diversas señales de forma más económica y sencilla que la multiplexión por división en frecuencia, empleada en señales analógicas y que debe luchar contra fenómenos como la distorsión y el ruido
- La información de control y señalización es inherentemente digital
- La gran evolución de la tecnología de circuitos integrados permite realizar equipos de bajo coste y alta capacidad en comparación con su equivalente analógico
- Evita los principales problemas de la transmisión analógica: la degradación de la señal al atravesar grandes distancias (pues al amplificar, también se incrementa el ruido). En la transmisión digital la señal es regenerada completamente en cada repetidor.
- Permite monitorizar el rendimiento y corregir errores de forma más fácil que las señales analógicas.
- Fácil adaptación de nuevos servicios, pues es posible mezclar diferentes fuentes de tráfico en un medio de transmisión gracias a que los sistemas de transmisión son transparentes a la naturaleza del tráfico que soportan.
- Operativos con bajo nivel S/N, de fácil encriptación y permiten el uso de fibra óptica.

Por el contrario debemos aceptar algunos inconvenientes:

- Incremento en el ancho de banda respecto a la señal analógica, aunque el consumo de ancho de banda está íntimamente ligado con la modulación, por lo que mediante técnicas de modulación multinivel podemos reducirlo al mismo nivel que su equivalente analógico a costa de aumentar la complejidad de los equipos de transmisión.
- Necesidad de sincronismo: Al transferir información digital es necesario transferir también una señal de reloj que indique al receptor cuándo debe muestrear la señal de la línea para su correcta interpretación.
- Coste de digitalización para transferir señales de naturaleza analógica: dinero en equipos de conversión analógico/digital y un pequeño retardo del orden del tiempo de bit.

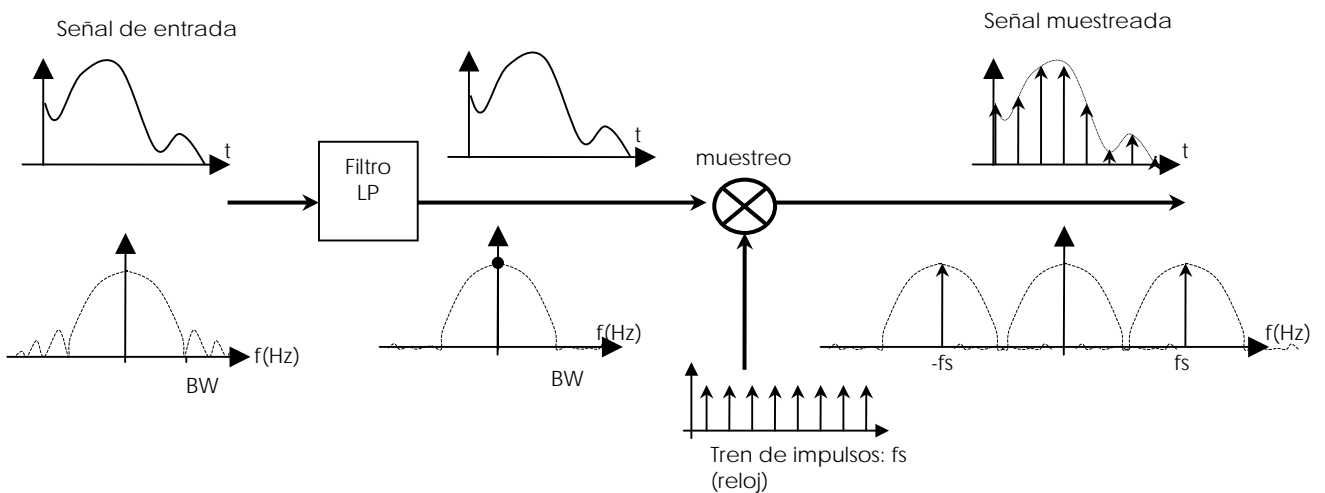
No obstante las ventajas hoy en día superan en la mayoría de los casos a los inconvenientes, por lo que actualmente se tiende a una progresiva digitalización.

El esquema de MIC es el siguiente:

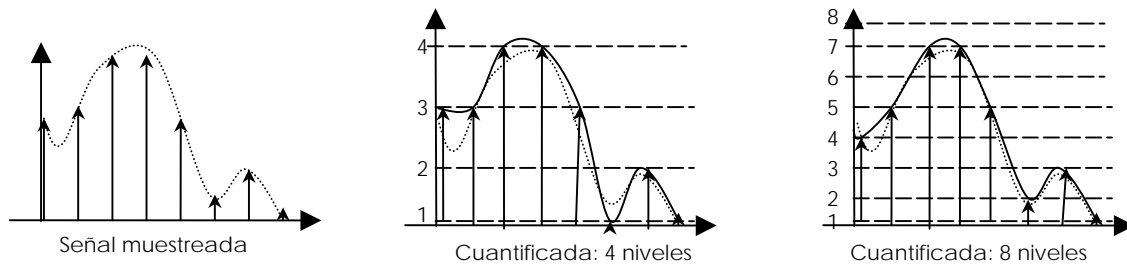


Veamos cada una de las etapas:

a) **Muestreo:** Consiste en multiplicar la señal de entrada por un tren de impulsos de una cierta frecuencia f_s denominada frecuencia de muestreo. Según el teorema de Nyquist la frecuencia de muestreo deberá ser, como mínimo, el doble de la frecuencia máxima de la señal de entrada para poder recuperar posteriormente la señal original; esto es, $f_s \geq 2 \cdot BW_{\text{señal}}$. Por ello, la señal de entrada deberá estar limitada en frecuencia, lo que se consigue con un filtro paso de baja antes del muestreo.



b) **Cuantificación:** las amplitudes de los impulsos en la señal muestreada varían de forma analógica, pudiendo adoptar cualquier valor. En esta etapa debemos fijar un número finito de valores para dichas amplitudes. Cuanto mayor sea el número de valores posibles, menor diferencia habrá entre la señal muestreada antes y después de la cuantificación.



La reconstrucción la forma de onda original se hará en base a la señal cuantificada, por lo que la diferencia entre esta y la señal original puede interpretarse como un ruido (ruido de cuantificación). El ruido de cuantificación disminuye al incrementarse el número de escalones o niveles de cuantificación, bien entendido que para codificar el valor de una muestra será necesario emplear un número de bits tal que permita identificar el escalón en el que se sitúa la muestra. Así, con 4 escalones, para indicar el valor de la muestra sólo necesitaré 2 bits, mientras que con 256 escalones serán necesarios 8 bits. En general:

$N_E = \log_2(E)$, siendo N_E el número de bits por muestra y E el número de escalones en la etapa de cuantificación.

Cuando todos los escalones tienen el mismo tamaño hablamos de cuantificación uniforme, y la potencia del ruido de cuantificación resulta (asumiendo una resistencia de 1Ω) $N_o = q^2/12$, siendo q la altura del escalón o intervalo mínimo de cuantificación.

El régimen binario a la salida del codificador será: $R_b = f_s \cdot N_E$, donde f_s es la frecuencia de muestreo. Para digitalización de señales vocales la ITU-T define en la recomendación G.711 el uso de 8 bits por muestra y f_s de 8000 Hz.

El problema que plantea la cuantificación uniforme es que la relación señal a ruido es mayor para señales más potentes que para señales más débiles, pues el ruido de cuantificación es siempre el mismo. Para solucionar este problema se emplea la cuantificación no uniforme, donde los escalones correspondientes a las señales más débiles son de menor altura, procurando una figura S/N aproximadamente constante para cualquier potencia de la señal de entrada. En este aspecto la ITU-T ha definido en la recomendación G.711 dos tipos de cuantificación no uniforme: la ley A, utilizada en Europa, y la ley μ , usada en Estados Unidos y Japón.

c) **Codificación:** consiste en convertir los pulsos cuantificados en un grupo equivalente de pulsos binarios. En Europa para codificar la voz en telefonía se utilizan 8 bits, donde el primer bit identificará el signo de la muestra y los 7 restantes el número de escalón en binario contado a partir del 0.

Ejemplo: Una señal senoidal de amplitud máxima 1Voltio se quiere digitalizar con una relación S/N de 30 dB. ¿Cuántos bits tendré que utilizar por cada muestra?. Si la frecuencia de dicha señal es de 4 KHz ¿qué régimen binario tendré tras su digitalización?. Sol.: $S=0,5W$, $q=0,078V$, $E=26$, $N_e=5\text{bits/muestra}$. $R_b=40\text{Kbit/s}$. ¿Qué relación S/N se tiene realmente?

Ejemplo: La calidad mínima para la voz digitalizada es una S/N > 26 dB. ¿ Cuántos bits por muestra necesitaré como mínimo? Sol.: $q=0,123\cdot\text{Ampl.Max}$, es decir $E=16$ o 4 bit/muestra.

A partir de la señal digital, podemos recuperar la señal analógica original siguiendo el proceso contrario.

5. Técnicas de transmisión digital

La información a transmitir entre dos equipos suele agruparse en conjuntos de varios bits (normalmente 8, 16 o 32) denominados palabras. Cuando la distancia entre transmisor y receptor es pequeña, el coste en medios de transmisión no resulta elevado, por lo que podemos utilizar distintos medios para cada bit que conformen la palabra. Esto consigue minimizar el retardo de transferencia de información. Ejemplo: Buses en ordenadores, o cables paralelo de la impresora. Si transmisor y receptor se encuentran físicamente separados (varios metros) se suele utilizar sólo dos cables, transmitiendo los bits de uno en uno en un modo de operación denominado en serie, frente al anterior que se llama paralelo.

El intercambio de información entre dos entidades puede realizarse en tres formas:

- Simplex o unidireccional: cuando los datos viajan en un solo sentido.
- Semi-duplex o Half duplex: si los dispositivos se intercambian información alternativamente, pero en distintos intervalos de tiempo, pudiendo cambiar entre emisión y recepción tras cada intercambio.
- Duplex o Full duplex: Cuando los dos dispositivos intercambian información simultáneamente en ambos sentidos.

Un problema básico a resolver cuando dos entidades intercambian datos digitales es lograr que transmisor y receptor tengan una base de tiempos común, que permita

decodificar los bits de forma correcta. Podemos distinguir dos técnicas de transmisión en este sentido:

a) Transmisión Asíncrona: donde transmisor y receptor tienen relojes independientes ajustados a la misma frecuencia nominal. Se transmiten palabras de pocos bits (normalmente 8), y cada una va delimitada por un bit especial denominado de arranque y otro al final denominado de parada. Sólo se envían palabras a la línea cuando hay información para transmitir, y el rendimiento de la transmisión es pobre. Los equipos utilizados son de bajo coste y es adecuada para transmisiones irregulares de bajo régimen binario.

b) Transmisión Síncrona: el receptor extrae la información del reloj a partir de la señal de entrada y con ella ajusta la frecuencia del reloj con el que se interpretan los datos. En el código de línea debe aparecer de forma implícita la señal de reloj. Los equipos utilizados son más caros y complejos, aptos para altas velocidades y flujos de transmisión continuos.

Ambos tipos de sincronismo se verán con mayor detalle en los temas correspondientes al nivel físico. Existen además otros conceptos utilizados en las técnicas de transmisión como el control de errores, control de flujo, compresión de datos, ... que no serán tratados en el presente capítulo.

