

## Aspectos físicos de las transmisiones

El objetivo de esta unidad es presentar las técnicas de transmisión de señales. Si bien estas técnicas requieren de un aparato mecánico profundo, nos limitaremos a realizar un vuelo rasante sobre ellas sin dejar que influyan en la fijación de los conceptos que formalizan.

### 1. Conceptos previos

El hecho de comprender a fondo una determinada técnica implica el conocimiento de los factores en los que se basa. En esta primera parte de la unidad de trabajo nos proponemos explicar los conceptos básicos imprescindibles, tanto físicos como matemáticos, para alcanzar con éxito los objetivos previstos.

#### 1.1 Conceptos físicos y matemáticos

##### 1.1.1 Corriente continua y alterna

Cuando se envía una corriente eléctrica a lo largo de un hilo conductor, se disipa energía en forma de calor. La magnitud del calor generado en el conductor supone energía enviada desde la fuente, pero se pierde en el camino y no está disponible para su utilización en el otro extremo; esta energía depende del cuadrado de la intensidad de la corriente que se encuentra circulando ( $E = I^2 \times R$ ). Ello significa, por ejemplo, que si la corriente se incrementa por un factor de 5, la energía perdida por el camino se incrementa por un factor de 25. Hay circunstancias en que pérdidas en esta escala podrían ser inaceptables.

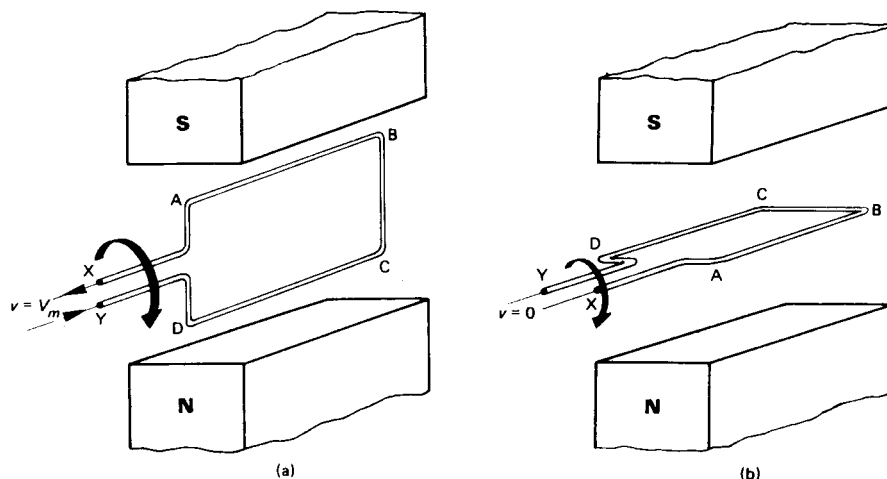
La potencia eléctrica almacenada en baterías produce un voltaje estable que forzará la circulación de una corriente estable en un sentido, llamada corriente continua o c.c., a través de un circuito y de vuelta al otro terminal de la batería.

Para transferir grandes cantidades de energía desde las centrales eléctricas hasta los puntos de distribución, resulta claramente deseable que circule la corriente más débil posible, con objeto de minimizar las pérdidas caloríficas. Por otra parte, es un hecho básico que puede enviarse la misma cantidad total de potencia, si se multiplica el voltaje por un factor, por ejemplo 100, y se divide la corriente (intensidad) por el mismo factor manteniendo la energía producida ( $E = I \times V$ ). La disipación térmica por el camino (proporcional al cuadrado de la intensidad) caería, entonces, a la diezmilésima parte (1/10.000) de lo que era antes, o quizás podría resultar económico utilizar una sección de conductor más fino (lo que implica mayor resistencia al paso de la corriente) y barato y aceptar un ahorro reducido de pérdidas por calor.

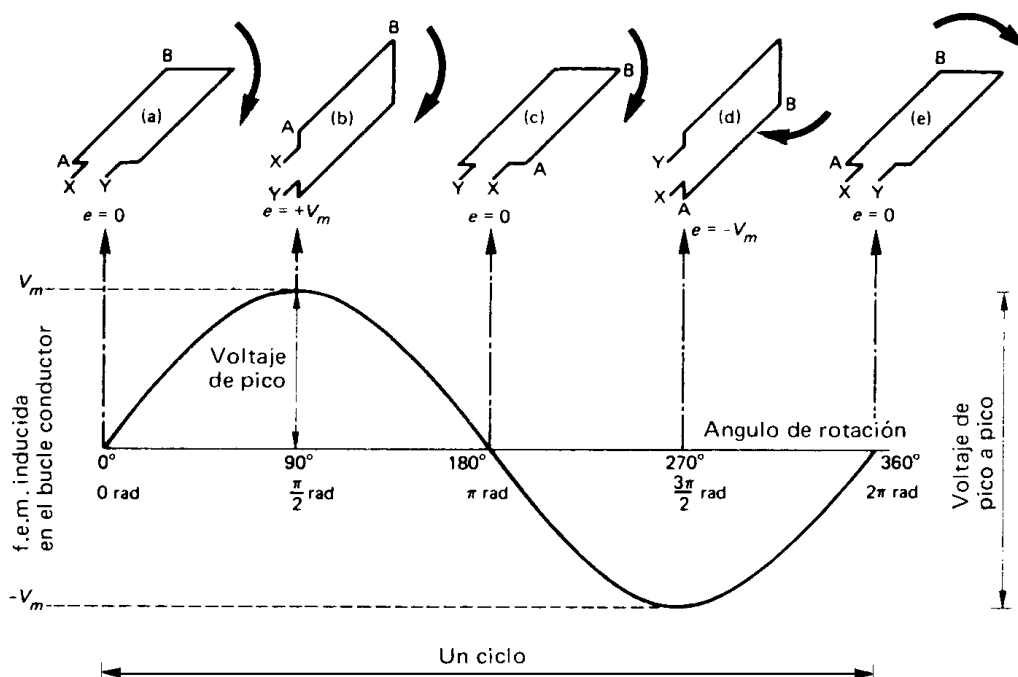
Se llama corriente alterna, c.a., a la que puede forzarse a invertir su sentido a intervalos de tiempo regulares. La corriente alterna puede aplicarse a un *transformador*, que permite alterar los niveles de voltaje, elevándolos o reduciéndolos, con objeto de cumplir condiciones determinadas. La utilización de corrientes alternas con voltajes elevados permite la transmisión de grandes cantidades de potencia a través del territorio de un país, sin grandes pérdidas de energía en forma de calor; estos altos voltajes se reducen luego hasta los niveles que se emplean en nuestros hogares para usos domésticos (y menos peligrosos).

Los voltajes elevados de corriente continua resultan igualmente eficaces, en cuanto a la transmisión de potencia con pérdidas de calor reducidas, empleándose en algunas aplicaciones especializadas. La generación de la c.a. es, sin embargo, más sencilla que la de la c.c., y sólo aquella puede alimentarse por medio de transformadores para reducir la tensión de suministro, desde los voltajes extremadamente altos manejados en la transmisión, hasta los niveles suficientemente seguros como para utilizarse en los hogares.

En la siguiente figura, se muestra una versión simple de un generador de tensión alterna (llamado alternador). Se trata de un bucle de alambre que se hace girar en el seno de un campo magnético. La tensión inducida en un conductor que se mueve en un campo magnético es proporcional a la rapidez con la que el alambre móvil corta el flujo magnético.



En la figura (a), los conductores AB y CD cortan el campo magnético entre las piezas polares magnéticas Norte y Sur, en ángulo recto, con lo que se induce una tensión máxima o de pico en la espira. Cuando el bucle ha girado un cuarto de vuelta, pasando a la posición de la figura (b), ambos conductores se están moviendo paralelamente al campo magnético. Así, no cortan absolutamente nada de flujo y la tensión inducida es nula. La figura siguiente muestra cómo la fuerza electromotriz inducida (tensión o voltaje) varía a lo largo de una revolución completa del bucle, suministrando un ciclo de la tensión alterna.



### 1.1.2 La señal y su representación

Ya hemos visto que la señal no es más que la manifestación de una magnitud física. En el caso de las señales utilizadas en telecomunicaciones, esta señal se caracteriza porque se puede propagar a través de diferentes medios o canales.

Esto nos sugiere la idea de representar matemáticamente la señal como una función variable con el tiempo. Si por experimentación física descubrimos las leyes de comportamiento de estas señales, será posible realizar un modelo matemático de representación que simule las características de los sistemas reales. Por análisis matemático del sistema de simulación (matemático) podremos predecir el comportamiento de los diferentes sistemas de comunicación.

No obstante, no debemos confundir la señal con su representación matemática, bien sea en su expresión analítica (como función matemática) o en su representación gráfica.

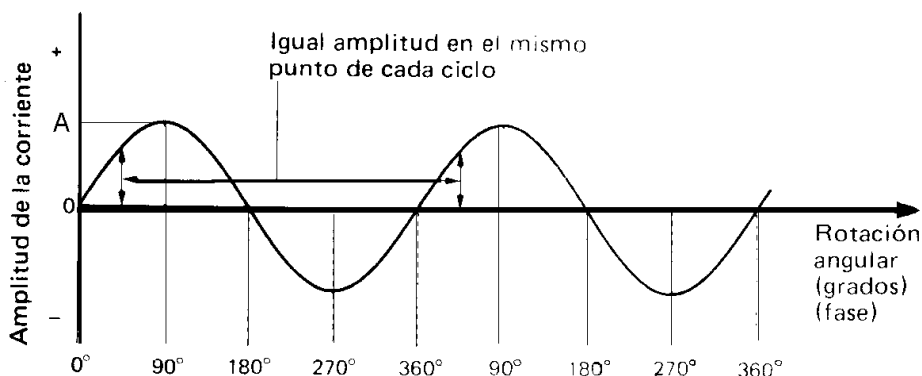
### 1.1.3 Las señales sinusoidales

Las razones trigonométricas (senos y cosenos) tienen gran importancia en la matemática de la teoría de la comunicación. Esta es la razón por la que en este apartado pretendemos estudiar las características de este tipo de funciones. Sea la función:

$$f(t) = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \phi)$$

donde  $t$  es la variable independiente y representa el tiempo,  $A$  es la amplitud máxima de la señal,  $\omega$  es un parámetro llamado frecuencia y  $\phi$  es otro parámetro denominado fase.

Si tomamos, por ejemplo, la amplitud como la unidad, la representación de esta función es la que aparece en la siguiente figura:



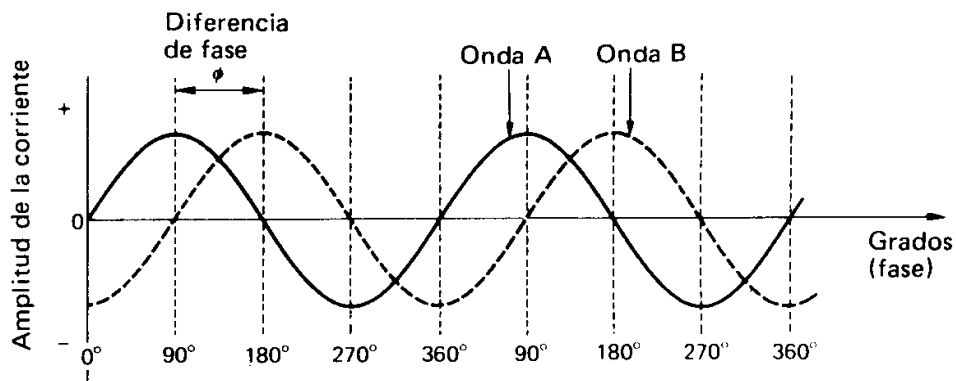
Como se puede observar, es una función periódica con los siguientes parámetros:

**Frecuencia:** Es el número de ciclos completos que tienen lugar en un segundo y se expresa en Hertzios ( $1\text{Hz} = 1$  ciclo / seg.). Se suele representar por la letra griega  $\omega$ .

**Período:** El período informa del *tiempo* necesario para que se vuelva a repetir la estructura periódica de la señal. Se suele representar con la letra “T” y se mide en segundos. La frecuencia y el período guardan entre sí una relación inversa:

$$\text{Frecuencia} = \frac{1}{\text{Período}}$$

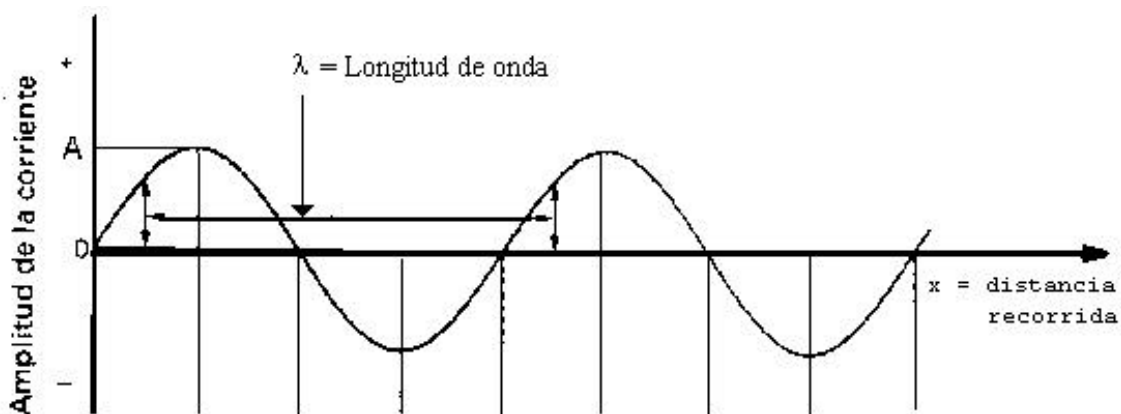
**Fase:** La fase es un desplazamiento de la señal en el tiempo, que puede variar dependiendo del origen de tiempos tomado para representar la función.



*Diferencia de fase entre dos ondas.*

**Amplitud:** El valor máximo alcanzado por la función. Se representa por una  $A$ .

**Longitud de onda:** Es la distancia en metros entre dos puntos en fase de dos ciclos consecutivos. Se representa por la letra griega  $\lambda$ .



Nótese que en esta ocasión se ha representado la onda en función de la distancia recorrida.

**Velocidad de propagación:** Viene dada por la expresión  $v = e/t$  que para el caso de una onda tendrá el siguiente aspecto:

$$v_p = \frac{l}{T} = l \cdot w$$

Por tanto, para cualquier onda, si se conoce dos de estas propiedades, la tercera puede calcularse y, puesto que la frecuencia y el período son inversos, se puede determinar con precisión una función sinusoidal en el tiempo con los siguientes tres parámetros: amplitud, frecuencia y fase.

### 1.1.4 La ganancia: El decibelio

Cualquier señal lleva asociada una energía que se transfiere. Cuando consideramos un sistema de comunicación en su conjunto, siempre hay una proporción entre la energía que produce el sistema a su salida y la que se le introduce en la entrada. Llamamos **ganancia** de un sistema a la proporción entre las potencias de salida y de entrada.

El logaritmo decimal de la relación entre las potencias de salida y entrada se conoce con el nombre de **Bel**, en honor de Graham Bell, el americano de origen escocés inventor del teléfono. El Bel se reveló como una unidad demasiado pequeña para ser utilizada normalmente, por lo que se multiplicó por diez para convertirse en el **decibelio**, o **dB**:

$$dB = 10 \cdot \log_{10} \frac{\text{Potencia\_de\_salida}}{\text{Potencia\_de\_entrada}}$$

Si se pierde la mitad de la potencia de entrada, existe una pérdida de 3dB (3dB; los valores negativos representan pérdidas de la potencia de entrada). Si un amplificador refuerza la potencia en una magnitud de 10.000 veces, existe una ganancia de 40 dB. Si, por ejemplo, un tipo de cable introdujera una pérdida de 1 dB por kilómetro, una longitud de 6 kilómetros introduciría una pérdida total de 6 dB. Si a este cable le siguen dos circuitos, uno de los cuales produce una pérdida de 3 dB, mientras que el otro suministra una ganancia de 15 dB, el efecto total se obtiene por simple adición, es decir, resulta una ganancia total de 6 dB.

El oído humano es capaz de responder a una amplia gama de intensidades de sonido, presentando una sensibilidad que varía, con las variaciones de la amplitud, de una forma logarítmica. Esto hace que el decibelio sea una unidad conveniente para ser utilizada en la medida del sonido y de los equipos de sonido.

El decibelio no es una unidad absoluta, sino únicamente la medida de una relación entre potencias. No tiene sentido decir, por ejemplo, que un amplificador presenta una salida de 60 dB, a menos que se cite un nivel de referencia o que éste se sobreentienda claramente. Por ejemplo, un incremento de 60 dB sobre 1 micro vatio suministra un nivel de potencia de 1 vatio, mientras que sobre un vatio da lugar a 1 megavatio. Por ello, es costumbre, en la ingeniería de las telecomunicaciones, expresar los niveles de potencia como tantos decibelios por encima o por debajo, de un nivel de referencia de potencia claramente entendido. Esta práctica hace que el decibelio constituya una unidad más significativa, permitiendo su utilización en mediciones de valores absolutos. El nivel de referencia utilizado más corrientemente es 1 mili vatio.

### 1.1.5 Las series y las integrales de Fourier.

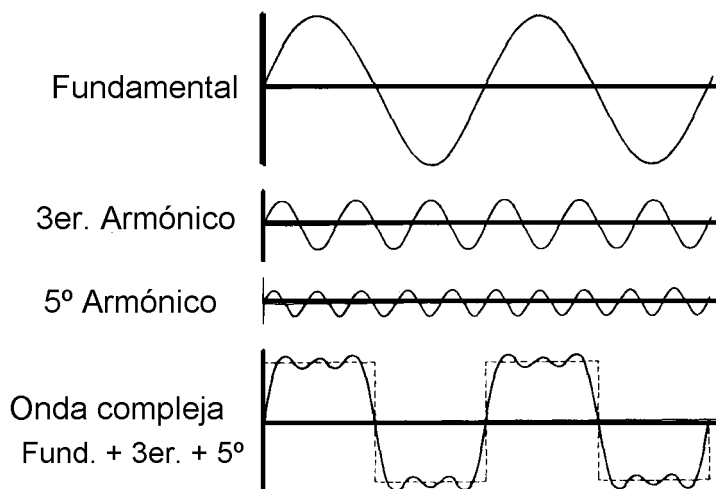
Uno de los mayores progresos científicos que la humanidad ha experimentado ha sido el descubrimiento de la matemática lineal, es decir, del **principio de superposición**. Consiste en que en una amplia variedad de experimentos se cumple que el efecto causado sobre una suma de señales es equivalente a la suma de los efectos producidos sobre cada señal por separado. Esta situación, bajo ciertas condiciones, es muy común en la teoría de comunicación. Este principio de superposición se formula matemáticamente como sigue:

$$f(x + y) = f(x) + f(y)$$

donde  $x$  e  $y$  representan las señales y  $f$  el efecto producido por el experimento sobre las señales.

Por otra parte, se puede demostrar matemáticamente que cualquier función suave (continua y por tanto derivable) se puede descomponer como una suma de términos más simples a través de lo que se llama un desarrollo en serie, en el caso de que la función sea periódica, o de un desarrollo integral, si la función no fuera periódica.

Cada uno de los sumandos de estas series son a su vez funciones de características especiales (vectores). Cuando estas funciones son trigonométricas, el desarrollo en serie se llama «**Serie de Fourier**»; y el desarrollo integral, «**Integral de Fourier**». En esta matemática está basada gran parte de la teoría de comunicación.



*Suma de una onda sinusoidal fundamental con los armónicos tercero y quinto, para dar una aproximación a una onda cuadrada*

### 1.1.6 El espectro de una señal y su ancho de banda

En el caso de una señal periódica en el tiempo de amplitud  $A$ , hemos visto que aparecía un parámetro que llamamos frecuencia, que nos informa de cuál es el índice de variación de la función. Decimos que el espectro de la señal sinusoidal está constituido por un único punto: su frecuencia con un valor asignado que es su amplitud  $A$ . A estas señales monofrecuencia las denominaremos **armónicos**.

Si en lugar de tomar una señal sinusoidal tomamos la suma de  $n$  señales sinusoidales (armónicos), cada una con una frecuencia, su espectro estará formado por una función variable en la frecuencia con  $n$  puntos: cada una de las parejas ( $w_n A_n$ ).

En un caso general de una función no periódica tendríamos infinitos valores para su descomposición en funciones sinusoidales, cada una de una frecuencia. Sería un continuo de frecuencias.

Esta función, que representa el peso que cada armónico tiene en la formación de la señal se llama espectro de la señal. A la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de las frecuencias del espectro del mensaje se le llama **ancho de banda** de la señal.

Por tanto, tenemos que cualquier señal tiene una doble representación:

- Señal en el dominio del tiempo.
- Señal en el dominio de la frecuencia: su espectro.

De modo similar, se puede definir el **ancho de banda de un canal** como la diferencia entre las frecuencias máxima y mínima que es capaz de transmitir. El canal transmitirá todas aquellas señales cuyo espectro esté incluido dentro del ancho de banda del canal. Si una parte del espectro de la señal cae fuera del ancho de banda del canal, la transmisión será imposible o no será de fidelidad. Diremos que la señal ha sido **filtrada** por el canal.

### 1.1.7 Señales limitadas por el ancho de banda. El Baudío

Supongamos pues que se desea transmitir el carácter ASCII “b” codificado en un byte de ocho dígitos. El patrón de bits por transmitir es 0110 0010. El tiempo  $T$  requerido para transmitir el carácter depende tanto del método

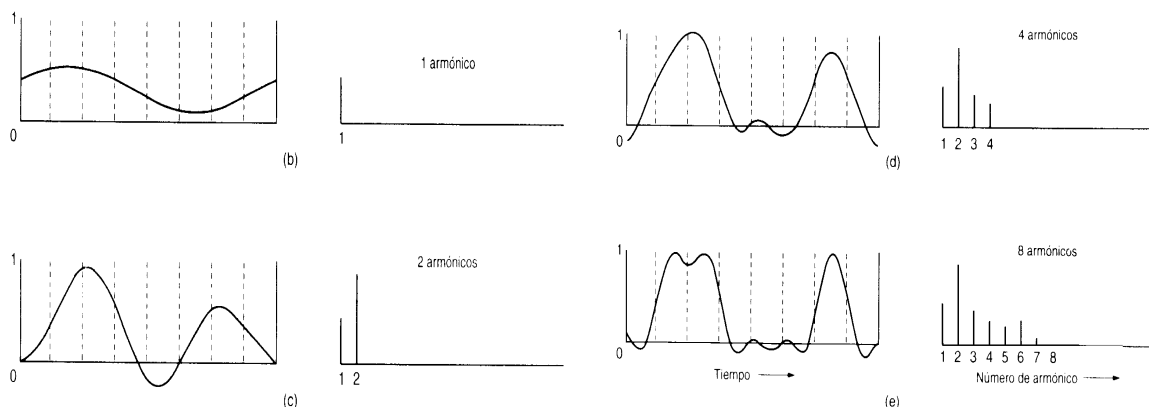
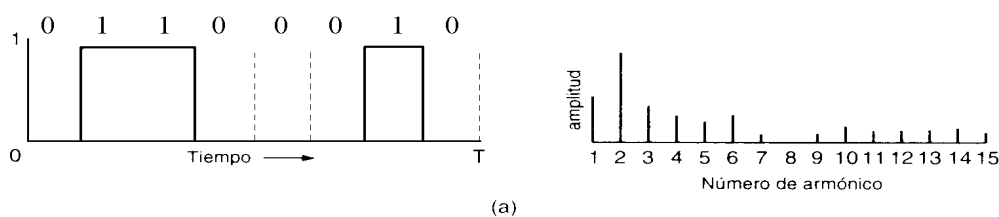
de codificación como de la velocidad de señalización (la cantidad de veces por segundo que la señal cambia su valor). La cantidad de cambios por segundo se mide en **Baudios**. Una línea de  $b$  baudios no necesariamente transmite  $b$  bits/seg, pues cada señal podría transportar varios bits. Si se usaran los voltajes 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7, el valor de cada señal podría servir para transportar tres bits, de modo que la velocidad en bits/seg sería tres veces la velocidad en baudios. En nuestro ejemplo, sólo se usan ceros y unos como niveles de señal, así que la velocidad en bits/seg es igual a la velocidad en baudios.

Si se tiene una velocidad de  $b$  bits/seg, el tiempo que se requiere para enviar 8 bits es de  $8/b$  segundos; por tanto, la frecuencia del primer armónico es  $b/8$  Hz. Una línea telefónica común tiene una frecuencia de corte cercana a los 3000 Hz. Esta restricción significa que el número del armónico más alto que puede pasar es de  $3000/(b/8)$  o  $24.000/b$ .

Para algunas tasas de datos, los números son los que se muestran en la siguiente tabla:

Velocidad en Bps	$T(\text{mseg})=8 / \text{Velocidad}$	Primer armónico (Hz)= $1/T$	Núm. de armónicos enviados = $3000 / \text{primer armónico}$
300	26.67	37.5	80
600	13.33	75	40
1200	6.67	150	20
2400	3.33	300	10
4800	1.67	600	5
9600	0.83	1200	2
19200	0.42	2400	1
38400	0.21	4800	0

De estos números, queda claro que tratar de transmitir a 9600 bps por una línea telefónica de voz transformará la figura (a) donde se transmiten todos los armónicos en algo parecido a la figura (c) dificultando mucho la



recepción exacta de la corriente de bits original. Debe ser obvio que a velocidades de envío de datos mucho mayores que 38.4 kbps no hay la menor esperanza para las señales binarias, aun si la instalación de transmisión se encuentra completamente libre de ruidos. En otras palabras, *limitar el ancho de banda limita la velocidad de envío de datos*, incluso en canales perfectos. Sin embargo, existen esquemas de codificación avanzados que utilizan varios niveles de voltaje y pueden lograr tasas de envío de datos mayores.

### 1.1.8 Las frecuencias de la voz

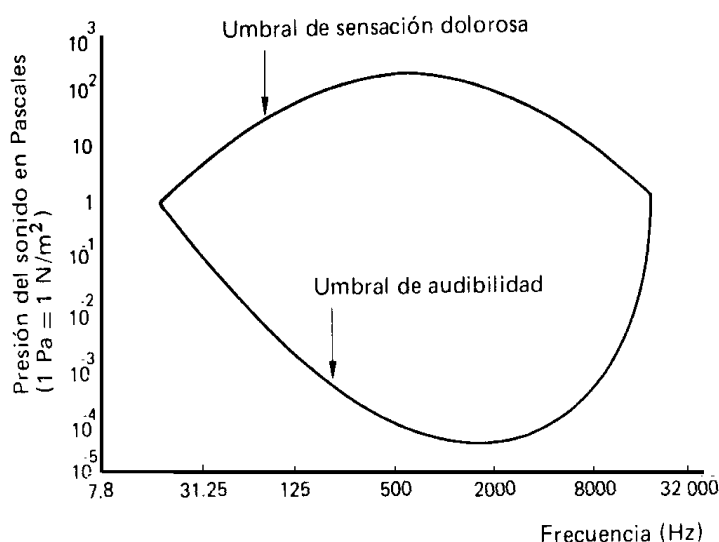
Cuando hablamos, las cuerdas vocales vibran y los sonidos que resultan, ricos en armónicos pero de un tono casi constante, se llevan a las cavidades de la boca, garganta y nariz. Aquí, los sonidos reciben algunas de las características del lenguaje que se desea, por el énfasis de algunos de los armónicos contenidos en las ondas sonoras y la supresión de otros. Las vocales, a, e, i, o, u, constituyen sonidos así generados, conteniendo una cantidad relativamente grande de energía sonora. Las consonantes se generan con los labios, lengua y dientes, conteniendo mucha menos energía, al tiempo que incorporan algunas frecuencias relativamente elevadas.

Los sonidos producidos en la conversación contienen frecuencias que se encuentran dentro de la banda de 100 a 10.000 Hz. El tono de la voz queda definido por la frecuencia fundamental de las cuerdas vocales, siendo de unos 200 a 1.000 Hz, para las mujeres, y de unos 100 a 500 Hz para los hombres.

La potencia contenida en el habla es pequeña: una media aceptable será del orden de 10 a 20 microvatios. Sin embargo, esta potencia no se encuentra distribuida uniformemente por toda la gama de frecuencias de la voz, sino que la mayor parte se concentra en la región de los 500 Hz, para los hombres, y de 800 Hz para las mujeres.

Las notas producidas por los instrumentos musicales ocupan una banda de frecuencias mucho mayor que las anteriores. Algunos instrumentos, como los órganos y los tambores, disponen de una frecuencia fundamental de 50 Hz o menos, mientras que otros, como el violín y el clarinete, pueden generar notas con un contenido de armónicos de más de 15.000 Hz. El contenido de potencia de la música puede ser muy grande. Una orquesta de regular tamaño podría generar una potencia de pico entre los 90 y 100 vatios, mientras que un bombo fuertemente golpeado podría dar lugar a unos 24 vatios.

Cuando las ondas sonoras inciden sobre el oído, provocan la vibración del tímpano. Acoplados al tímpano, se encuentran tres huesecillos que transfieren la vibración a un fluido contenido en una zona del oído interno, conocido como caracol. Dentro del caracol existe cierto número de células en forma de filamento, cuyas fibras nerviosas se activan por la vibración del fluido. Esta activación provoca el envío de señales, en forma de diminutas corrientes eléctricas, hacia el cerebro, donde se interpretan como sonidos.



relación con la frecuencia.

El oído sólo puede percibir sonidos cuya intensidad se encuentre, dentro de ciertos límites; si un sonido es demasiado suave, no se escucha; inversamente, si es demasiado fuerte se siente más que se oye, causando incomodidad o incluso dolor. La mínima intensidad sonora que el oído puede detectar se conoce como "umbral de escucha o audibilidad", mientras que aquella que produce junto una sensación de incomodidad se conoce como "umbral de sensación" sin embargo, el oído no es sensible por igual a todas las frecuencias; como se muestra en el siguiente gráfico. En este diagrama, las curvas se han dispuesto para una persona normal, mostrando las variaciones de los umbrales de escucha y sensación dolorosa, en



Puede apreciarse que el margen de frecuencias al que el oído humano es capaz de responder se extiende, aproximadamente, desde 30 hasta 16.500 Hz, aunque esto puede variar considerablemente de unos individuos a otros. La mayor sensibilidad del oído corresponde a la región entre 1.000 y 2.000 Hz, reduciéndose con rapidez según nos aproximamos a los límites superior e inferior del margen audible. Estos últimos se encuentran definidos claramente, no sólo por la frecuencia del sonido, sino también por su intensidad. En el límite superior e inferior del margen audible, los umbrales de percepción y sensación dolorosa son coincidentes, resultando difícil para un observador la distinción entre oír un sonido y sentirlo.

En un sistema ideal de telecomunicaciones, todas las frecuencias presentes en una onda musical o del habla se convertirían en señales eléctricas, se transmitirían por el sistema de telecomunicaciones y, seguidamente, se reproducirían como sonido en el otro extremo. Esto no ocurre en la práctica, por dos razones: en primer lugar, por condicionamientos económicos, los dispositivos utilizados en los circuitos que llevan señales musicales y orales disponen de un ancho de banda limitado; en segundo lugar, y en especial para los recorridos más largos, un número determinado de señales se transmiten, con frecuencia, a través de un sistema de telecomunicaciones de una sola vía. Esta práctica proporciona una limitación adicional del ancho de banda. Así, es conveniente tener cierta idea del efecto sobre el oído, cuando éste responde a una onda de sonido cuyos componentes de frecuencia tienen relaciones de amplitud que difieren de las del sonido original.

Mediante acuerdos internacionales, la banda de audiofrecuencias, para una conversación "de calidad comercial", a través de un sistema multicanal, se encuentra restringido entre 300 y 3.400 Hz. Esto significa que no se transmiten las máximas y mínimas frecuencias contenidas en la onda típica procedente de una conversación normal. Para el oído, el tono de una onda de sonido compleja y repetitiva es el correspondiente a la diferencia de frecuencias de los armónicos contenidos en la misma, esto es, a la frecuencia fundamental. En consecuencia, aunque la propia frecuencia fundamental pudiera haberse suprimido, el tono del sonido percibido por el oyente es el mismo que el original. Sin embargo, se pierde mucha potencia de la contenida en el sonido original. La eliminación de todas las frecuencias por encima de los 3.400 Hz reduce la calidad del sonido, pero no afecta a su inteligibilidad. Dado que la misión de un sistema telefónico es transmitir una conversación inteligible, la pérdida de calidad es tolerable; permanece una calidad suficiente para autorizar el reconocimiento de la voz de la persona que habla.

Sin embargo, la música queda muy distorsionada cuando se transmite a través de una línea telefónica, ya que se pierden las notas de altas y bajas frecuencias.

Si se necesita un enlace de telecomunicación para transportar una señal de televisión, es preciso disponer de un ancho de banda mayor; con objeto de evitar distorsiones.

Una regla práctica aproximada, en lo referente al ancho de banda necesario para una transmisión aceptable, es:

Voz	4 KHz	Cada medio de transmisión o almacenaje tiene su propio ancho de banda; así, un casete almacena la información acústica con un ancho de banda de 14 KHz., un CD de audio 20 KHz, etc. Por tanto, un CD almacena información de un modo más fiel que un casete.
Música	10 a 15 KHz	
TV en color	8 MHz	

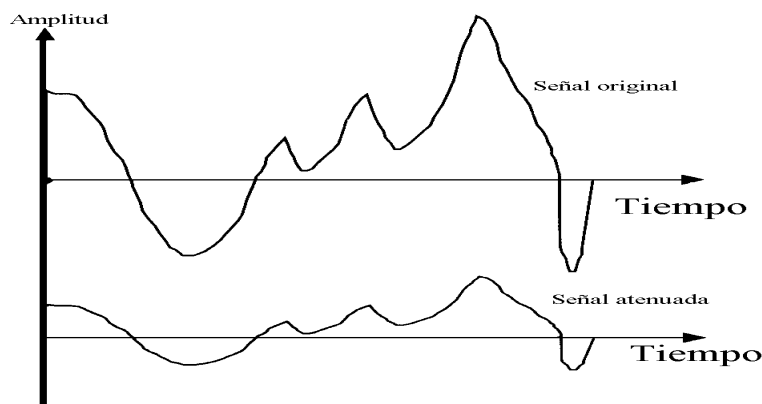
## 1.2 Contaminación y deformación de la señal

Hay una serie de factores que intervienen en el proceso de transmisión de señales y que deforman o alteran las mismas. Estas contaminaciones o deformaciones pueden conducir a pérdidas de información y a que los mensajes no lleguen a sus destinos con integridad.

Algunos de estos factores negativos son fácilmente evitables. En cambio, otros, por su naturaleza, no lo son tanto. Para ello se utilizan distintas técnicas que palian estos efectos perjudiciales. Por ejemplo, en audio, el sistema Dolby es una técnica frecuentemente utilizada para mejorar la proporción señal-ruido. Esta proporción se calcula como el cociente entre la amplitud de la señal y la del ruido. Cuando este cociente se acerca a la unidad, quiere decir que el ruido es del mismo nivel energético que la señal y que el receptor puede tener dificultades en la lectura de la señal original.

Entre los efectos negativos más comunes citaremos los siguientes:

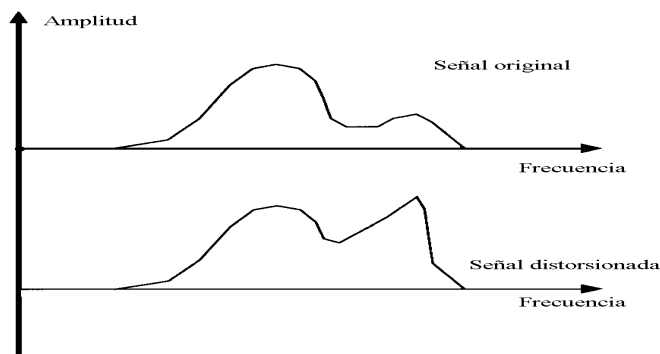
### 1.2.1 Atenuación



La atenuación es un efecto producido por el debilitamiento de la señal, debido a la resistencia eléctrica (en términos generales, impedancia) que presentan tanto el canal como los demás elementos que intervienen en la transmisión. Este debilitamiento se manifiesta en un descenso de la amplitud de la señal transmitida. Puede darse el caso de que la potencia descienda tanto que sea imperceptible, perdiéndose el mensaje. La atenuación está regida, desde el punto de vista físico, por la ley de Ohm.

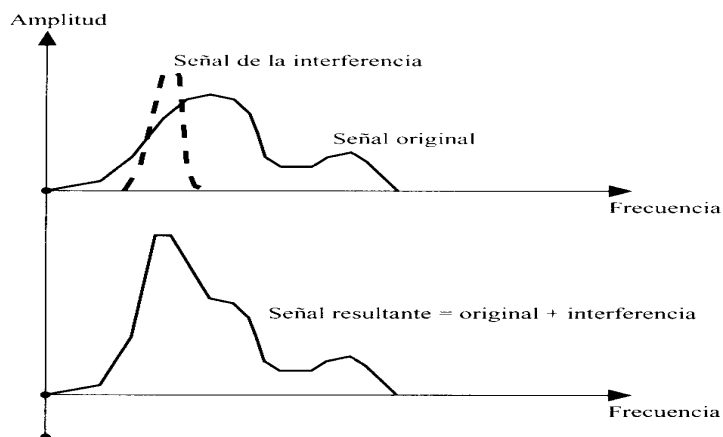
### 1.2.2 Distorsión

La distorsión consiste en la deformación de la señal, producida normalmente porque el canal se comporta de modo distinto en cada frecuencia y es producto de una falta de linealidad. Por ejemplo, un ecualizador corrige los efectos de distorsión de un canal, potenciando la amplitud de la señal en aquella frecuencia que el sistema, por su naturaleza, tiende a atenuar.



### 1.2.3 Interferencia

La interferencia es la adición de una señal conocida y no deseada a la señal que se transmite. Por ejemplo, se produce una interferencia en una emisión radiofónica cuando dos estaciones emisoras emiten en la misma frecuencia, produciendo la superposición de ambos mensajes.



## 1.2.4 Ruido

El ruido es la suma de múltiples interferencias, posiblemente de origen desconocido y de naturaleza aleatoria. Los propios componentes físicos de cualquier canal o dispositivo de transmisión generan ruido eléctrico. En ocasiones, el ruido es selectivo y se puede aislar, en otros casos, el ruido se encuentra muy extendido en toda la gama de frecuencias y su neutralización se hace difícil.

En general, la magnitud de la potencia de ruido asociada a un determinado circuito no nos dice gran cosa acerca de su calidad de transmisión lo que realmente determina dicha calidad es la comparación entre las potencias de señal y ruido, es decir, la relación señal a ruido definida como el cociente entre la potencia de señal y la potencia de ruido superpuesta a ella, normalmente se mide en dB.

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

$S = \text{Potencia de señal}$

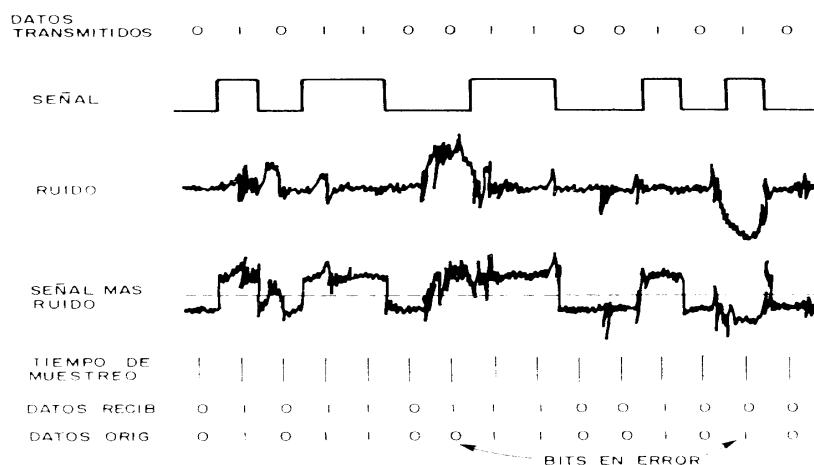
$P = \text{Potencia de ruido}$

La relación señal a ruido es especialmente importante en la transmisión de datos, pues según el Teorema de Shannon es uno de los dos factores, junto con el ancho de banda, que determina la máxima transferencia de información en bits por segundos por un canal de transmisión.

La naturaleza y causas de la energía del ruido son diversas y complejas, pero simplificando podemos dividirlos en:

**Ruido sofométrico o blanco.**-Existe inevitablemente en toda línea de transmisión, puesto que es consustancial con su propia naturaleza. En esta clase de ruido puede estar presente cualquier frecuencia. Se mide con un elemento llamado sofómetro y pueden ser atenuados sus efectos mediante el uso de filtros.

**Ruido impulsivo.**- Su característica principal es estar constituido por impulsos relativamente estrechos de gran amplitud y que se presentan generalmente en ráfagas que raramente superan la duración de un segundo. Se produce por defectos en tomas de tierra de las centrales, acoplamiento tanto en las centrales como en las líneas, montaje defectuoso en las centrales de transmisión y conmutación, etc. Sin embargo, las fuentes del ruido impulsivo son generalmente las acciones realizadas por las personas que actúan sobre las instalaciones como por ejemplo el inicio o fin de una llamada por un abonado en centrales electromecánicas provoca un número de actuaciones y desactivaciones de una serie de relés que provoca la aparición de picos de tensión transitorios por las causas mencionadas, que se inducen en las líneas provocando la aparición en ellas de esta perturbación. Si el medio de transmisión es un cable y no está apantallado, su proximidad a puntos de fuerte corriente (líneas de alta tensión, vías férreas electrificadas) producirá ruidos impulsivos, por inducción electromagnética.



## 1.3 La información y la señal

Ya hemos visto la diferencia entre información y señal. La información añade la interpretación de las señales, de modo que signifiquen algo concreto (contenido semántico) y definido tanto para el emisor como para el receptor.

Para que la información pueda cabalgar en la señal debe codificarse, es decir, debe estructurarse de acuerdo con las reglas impuestas por un código.

### 1.3.1 La codificación

Codificar es expresar una información de acuerdo con una norma o código. Para que haya comunicación debe ser posible la interpretación de los datos recibidos, lo que hace necesario que emisor y receptor se pongan de acuerdo en el código que utilizarán para expresar sus mensajes.

Aunque ésta es su función principal, algunos códigos están diseñados para disminuir la tasa de errores o para facilitar la recuperación de los mismos, otros códigos permiten la compresión de los datos, etc.

El código **ASCII** o **CCITT nº5** es el más utilizado en la actualidad para la representación de información alfanumérica. En un principio utilizó 7 bits para representar cada carácter. En la actualidad se ha extendido a 8 bits con el fin de representar 256 caracteres distintos y dar así cabida a los caracteres propios de cada país.

El código **EBCDIC**, propuesto por IBM, es semejante al código ASCII y representa cada carácter con 8 bits. La transcodificación (cambio de código) entre ASCII y EBCDIC no suele representar ningún problema, puesto que ambos son muy parecidos y representan aproximadamente los mismos caracteres.

El código **Baudot** o **CCITT nº 2** es el elegido para transmisiones por la red telegráfica conmutada o red télex. En Baudot, cada carácter se representa con 5 bits, por tanto, sólo puede representar 32 caracteres. Sin embargo, la red télex puede codificar hasta 60 caracteres distintos. ¿Cómo puede hacer esto?

Baudot es un sistema de codificación basado en dos tablas: la primera tabla codifica los caracteres alfabéticos y la segunda las cifras y los signos de puntuación. Se definen dos caracteres de paso, uno para pasar de la primera a la segunda y el otro de la segunda a la primera.

	LETRAS	CIFRAS	CODIGO		LETRAS	CIFRAS	CODIGO
1	A	-	1 1 0 0 0	23	W	2	1 1 0 0 1
2	B	?	1 0 0 1 1	24	X	/	1 0 1 1 1
3	C	:	0 1 1 1 0	25	Y	6	1 0 1 0 1
4	D		1 0 0 1 0	26	Z	+	1 0 0 0 1
5	E	3	1 0 0 0 0	27	Retorno de carro		0 0 0 1 0
6	F	É	1 0 1 1 0	28	Interlínea		0 1 0 0 0
7	G	%	0 1 0 1 1	29	Letras		1 1 1 1 1
8	H	H	0 0 1 0 1	30	Cifras		1 1 0 1 1
9	I	8	0 1 1 0 0	31	Espaciado		0 0 1 0 0
10	J	Timbre	1 1 0 1 0	32	No utilizado		0 0 0 0 0
11	K	(	1 1 1 1 0				
12	L	)	0 1 0 0 1				
13	M	.	0 0 1 1 1				
14	N	,	0 0 1 1 0				
15	O	9	0 0 0 1 1				
16	P	0	0 1 1 0 1				
17	Q	1	1 1 1 0 1				
18	R	4	0 1 0 1 0				
19	S	'	1 0 1 0 0				
20	T	5	0 0 0 0 1				
21	U	7	1 1 1 0 0				
22	V	=	0 1 1 1 1				

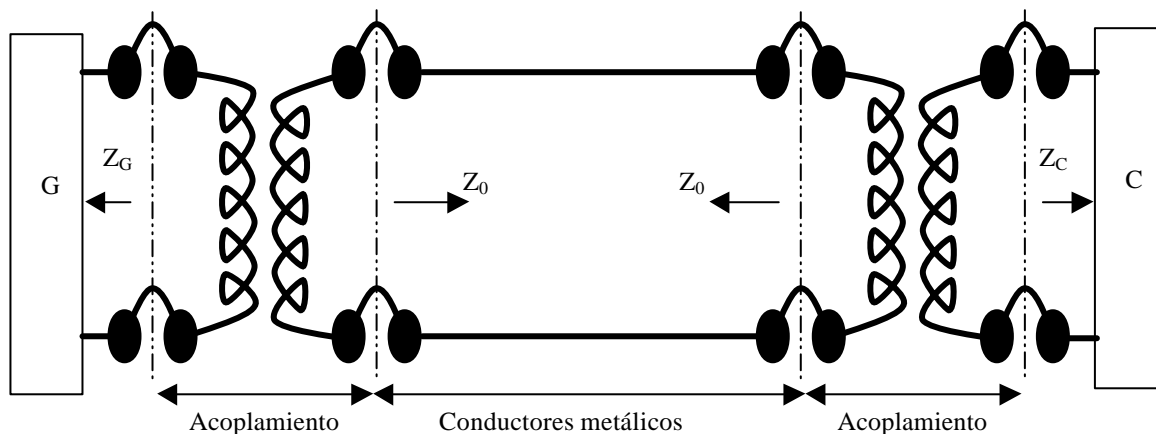
  

Símbolos	Transmisión por		Cinta perforada
	Circuito abierto o cerrado	Doble corriente	
0	Corriente negativa	Corriente negativa	Sin perforación
1	Corriente positiva	Corriente positiva	Con perforación

Cuando un destinatario de una comunicación codificada en Baudot recibe los datos, debe estar atento a los caracteres de paso, pues ellos le darán la información de qué tabla utilizar para interpretar cada carácter.

### 1.3.2 Códigos de Línea

La tarea en cuanto a la utilización de códigos no ha terminado aún si tenemos entre manos una transmisión en banda base. En una transmisión digital, en la que todos los caracteres se representan mediante una combinación de ceros y unos, utilizando alguno de los códigos vistos anteriormente o bien tan sólo ristas de bits, se emplean distintos tipos de codificación –códigos de línea– para conseguir la menor distorsión en la señal en el momento en que la volcamos en el canal de comunicaciones. Cualquier línea de transmisión viene montada de la siguiente forma:



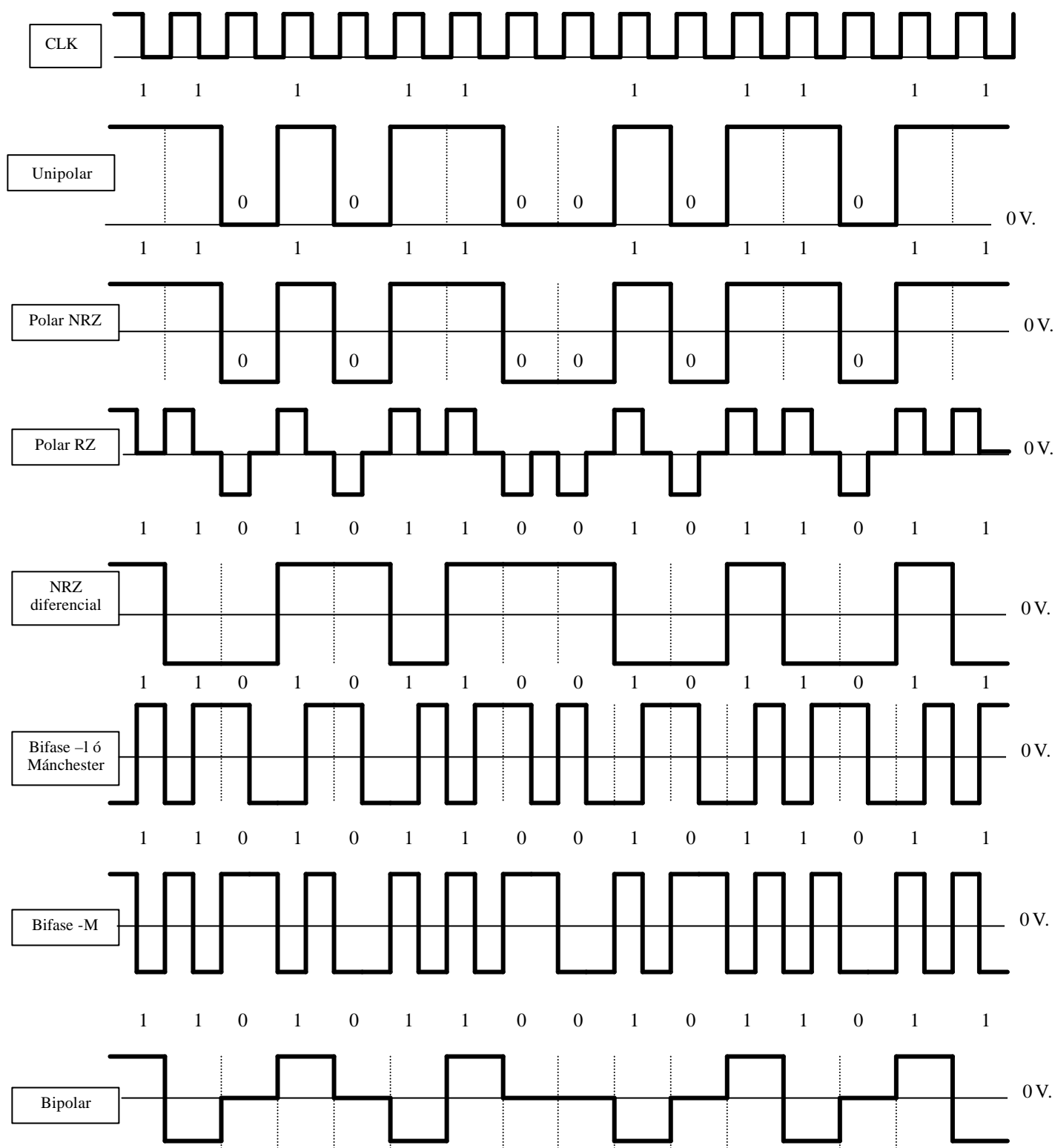
Esta configuración presenta un par de acoplamientos (transformadores) que evitan la pérdida de señal a base de aumentar la tensión de la misma en detrimento de la intensidad que circula por el circuito. Este último efecto reduce la disipación de energía ( $E = I^2 R$ ) que debilitan la señal. Sin embargo la introducción de estas inductancias provocan que las componentes continuas o de baja frecuencia no puedan ser transmitidas. Esto hace indistinguible las secuencias largas de unos o de ceros.

Por otra parte nos encontramos que para una transmisión síncrona, sería interesante encontrarnos regularmente cambios de estado en la señal para realizar el proceso de sincronización. En caso contrario nos veremos obligados a enviar la señal de reloj por separado para realizar esta tarea.

Estos problemas se resuelven con la introducción de sistemas de codificación que garanticen la alternancia de estos valores binarios en la línea. De ellos destacamos los siguientes códigos de línea:

- **Unipolar**, que asigna a cada símbolo, sea un “0” o un “1”, los niveles de 0 y +V voltios, que se corresponden con la señal original antes de codificar. Presenta el inconveniente de dar una componente de energía continua y de presentar pocas transiciones para poder recuperar el reloj de transmisión, no resultando apropiado en muchos equipos.
- **Polar NRZ**, (Non Return to Zero) que elimina el inconveniente del anterior, al asignar los valores  $-V$  y  $+V$ , con lo que toda la energía se concentra alrededor del valor de tensión de cero voltios.
- **Polar RZ** (Return to Zero), que es igual al anterior, pero pasando la señal a cero voltios a la mitad de cada bit, aumentándose de este modo el número de transiciones de 0 a 1 ó de 1 a 0 para operaciones de sincronía.
- **NRZ diferencial**, que produce un cambio de nivel si la señal es un “1” y ninguno si es un “0”.

- **Bifase -1 o Mánchester**, que produce una transición en la mitad de cada bit, siendo de +V a -V si el bit es un "0" y la contraria si es un "1".



- **Bifase -M**, que produce una transición siempre al comienzo de cada bit, que se vuelve a repetir otra vez en medio del mismo si es un "1" y no si es un "0".

- **Bipolar**, en ella, cada bit se codifica en dos niveles, correspondiendo al “0” el nivel de 0 voltios y al “1” el de  $+V$  y  $-V$  de forma alternada.

## 2 La modulación

---

### 2.1 Conceptos básicos

Evidentemente, una señal sólo se puede transmitir por un canal que permita la propagación de ese tipo de señales. Así, una señal eléctrica se propaga por medios conductores, una señal acústica necesita un medio material, etc.

Sin embargo, no basta con esta adecuación en la naturaleza de la señal y del canal. Además, la señal debe tener unos parámetros adecuados. Un canal transmite bien las señales de una determinada frecuencia y mal otras. El canal ideal es aquél que presenta una respuesta lineal para todas las señales, es decir, que transmite por igual todas las frecuencias.

La modulación intenta conseguir esta adecuación entre señal y canal, de modo que en las transmisiones utilicemos aquellas frecuencias en las que el canal proporciona la mejor respuesta.

El modulador es el dispositivo encargado de efectuar la modulación, que, en telecomunicaciones, es la operación por la que se pasa de la señal digital que proporciona el emisor a una equivalente analógica que es enviada al receptor. Por su parte, el receptor debe efectuar la operación inversa –demodulación– con el fin de recuperar de nuevo la señal digital original que el emisor se propuso enviarle.

El dispositivo que modula y demodula la señal digital y analógica respectivamente se llama **módem**.

### 2.2 Necesidad de la modulación

Hemos hecho una breve exposición sobre la necesidad de la modulación como adecuación de señales y canales. Pero, a veces, se modula por otras razones. Precisemos en primer lugar un concepto que ya hemos visto y será utilizado posteriormente: la longitud de onda.

La longitud de onda  $\lambda$ , es un parámetro físico de las señales periódicas que, multiplicado por la frecuencia, proporciona la velocidad de propagación de la señal en el canal. Así, por ejemplo, en el caso de una señal electromagnética que se propaga por el vacío se cumple que:

$$c = \lambda \cdot \omega$$

donde “c” es la velocidad de la luz en el vacío (unos 300.000 km/s), “ $\lambda$ ” es la longitud de onda y “ $\omega$ ” es la frecuencia de la señal que se propaga, es decir, la inversa del período.

El significado que tiene el período T respecto del tiempo lo tiene  $\lambda$  respecto del espacio.

En efecto, las señales electromagnéticas son doblemente periódicas. Imaginemos un punto que soporta una perturbación. Ese mismo punto tendrá el mismo estado de vibración T segundos después: decimos que en cada período repite su estado. Las ondas son funciones periódicas en el tiempo.

Pero, además, los puntos situados a  $\lambda$ , metros alrededor de este punto y transcurridos T segundos también tendrán la misma perturbación: decimos que en cada longitud de onda ( $\lambda$ ) se repite el estado de vibración. La perturbación es una función periódica en el espacio. Esto constituye el núcleo de la propagación de señales: la doble periodicidad de las señales que se propagan, en el espacio y en el tiempo.

### 2.2.1 Facilidad de radiación

Sin precisar demasiado, en ingeniería se suele indicar que la longitud de una antena que tiene que radiar una señal electromagnética de frecuencia  $\omega$  debe tener, al menos, una longitud de  $\lambda/10$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal.

Para hacernos una idea de lo que esto supone vamos a forzar la situación. Imaginemos las señales de audio. La baja frecuencia en audio suele estar en el entorno de los 100 Hz. Un sencillo cálculo nos dice que la  $\lambda$ , para esta señal es:

$$l = c \cdot T = c \cdot \frac{1}{f} = 3 \cdot 10^8 \times \frac{1}{100} = 3.000 \text{ km}.$$

Según la expresión anterior, la antena tendría que medir  $3.000/10 = 300$  km, por lo que es imposible transmitir una señal de audio con señales eléctricas a través del espacio si no la transformamos antes.

Otro ejemplo menos disparatado. Si la transmisión es de radio FM (frecuencia modulada) de 88 a 108 Mhz, el mismo tipo de cálculo nos daría antenas menores que un metro, que es la longitud de las antenas que los fabricantes instalan en sus aparatos de radio comerciales.

Sería muy útil emplear la modulación como un cambio de frecuencia de la señal original a otra frecuencia en la que no haya imposibilidad de construir las antenas receptoras, es decir, se conserva el mensaje original, pero éste «cabalga» sobre señales de frecuencias apropiadas.

### 2.2.2 Reducción del ruido y de las interferencias

A veces, los equipos de comunicación generan ruido o captan interferencias del exterior en determinadas bandas de frecuencia. Un mensaje transmitido en esas bandas tendría problemas de fidelidad. La modulación puede resolverlo pasando el mensaje a una banda de frecuencias en la que el nivel de ruido sea menor o en donde no haya interferencias.

### 2.2.3 Asignaciones de frecuencia

Normalmente las transmisiones son públicas, es decir, no hay forma de evitar que la radiación de la antena de una emisora no afecte a otra. Este hecho provoca que tanto emisores como receptores se pongan de acuerdo en intercambiar sus mensajes en determinadas frecuencias que son previamente asignadas. Las administraciones públicas suelen ser los organismos encargados de estas asignaciones, que, si no se respetan, producirán fenómenos de interferencia. Es el efecto que se produce cuando dos emisoras transmiten sus mensajes en la misma banda: el receptor escucha las dos emisoras simultáneamente.

La modulación servirá para desplazar el espectro de cada mensaje a su banda de frecuencia asignada, en la que tiene seguridad, si todos respetan la ley, que no sufrirá interferencias procedentes de otro emisor.

### 2.2.4 Multicanalización

La mayor parte de las líneas de comunicación no son de utilización exclusiva por un emisor y un receptor. Lo normal es que las mismas líneas sean compartidas por varias transmisiones. Con objeto de que no haya mezclas inseparables en la línea, se sigue el proceso de multicanalización, que consiste en una asignación temporal de la frecuencia de la señal durante su viaje por el canal. De este modo, por una misma línea de transmisión se pueden multicanalizar varias señales, incluso pertenecientes a distintas comunicaciones. Así, el sintonizador de un receptor de radio selecciona la emisora que interesa entre todas las posibilidades que ofrece la banda de radio. Todas las emisoras están multicanalizadas componiendo el dial (escala de referencia para situar las distintas emisoras de radio).



## 2.2.5 Las limitaciones de los equipos

Por último, a veces se modula para salvar deficiencias en los equipamientos. Si se conoce que un equipo tiene una mala respuesta en una determinada banda sería inútil hacerle trabajar en esa banda. Una modulación que traslade la señal a otra banda hará que el equipo opere en mejores condiciones.

## 2.3 Tipos de modulación

Hemos definido la función y las causas de la modulación, pero la forma concreta de realizarla es muy variable. Existen muchos tipos de modulación, y aquí vamos a exponer los más básicos y comunes.

### 2.3.1 Modulación lineal o de onda continua

Ya hemos descubierto la importancia de las señales sinusoidales en telemática, éstas poseen tres parámetros esenciales: amplitud, frecuencia y fase. Cada uno de estos tres parámetros origina una forma concreta de modulación. A estas modulaciones se les llama lineales o de onda continua.

#### 2.3.1.1 Modulación en amplitud

Tenemos una señal sinusoidal que llamaremos **señal portadora**  $S_p$ :

$$S_p(t) = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + f)$$

Sabemos que esta señal se propaga por canales que admiten la frecuencia  $\omega$ . Esta señal no lleva información porque todo su comportamiento es predecible.

Podríamos hacer incluir la información en la amplitud, es decir, podemos convertir  $A$  en una señal informativa variable con el tiempo: la señal que contiene el mensaje que se va a transmitir. Entonces escribimos:

$$A = M(t)$$

donde  $M$  quiere representar el mensaje a transmitir en función del tiempo.

La señal que introducimos en el canal  $S_m$  (señal modulada) quedaría como:

$$S_m(t) = M(t) \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + f)$$

Si tomamos una señal portadora con  $A = 1$ , quedaría:

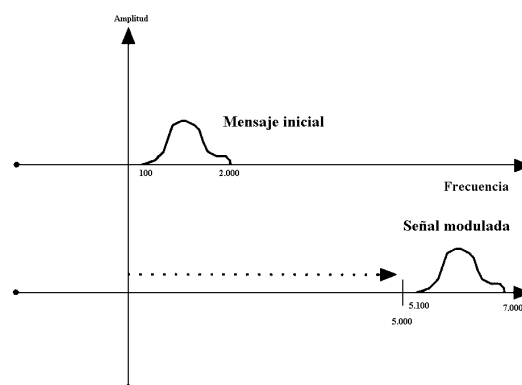
$$S_p(t) = 1 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + f) = \text{sen}(\omega \cdot t + f)$$

De donde se deduce:

$$S_m(t) = M(t) \cdot S_p(t)$$

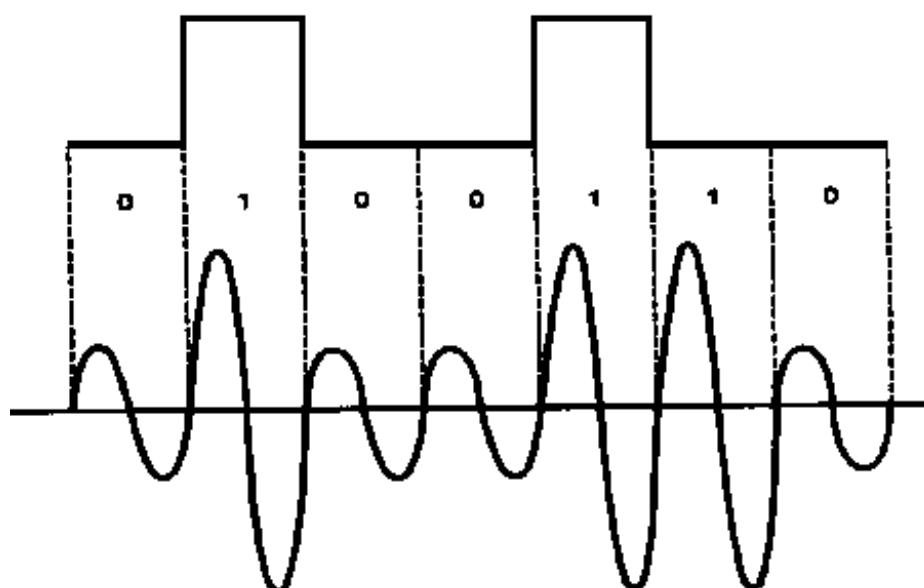
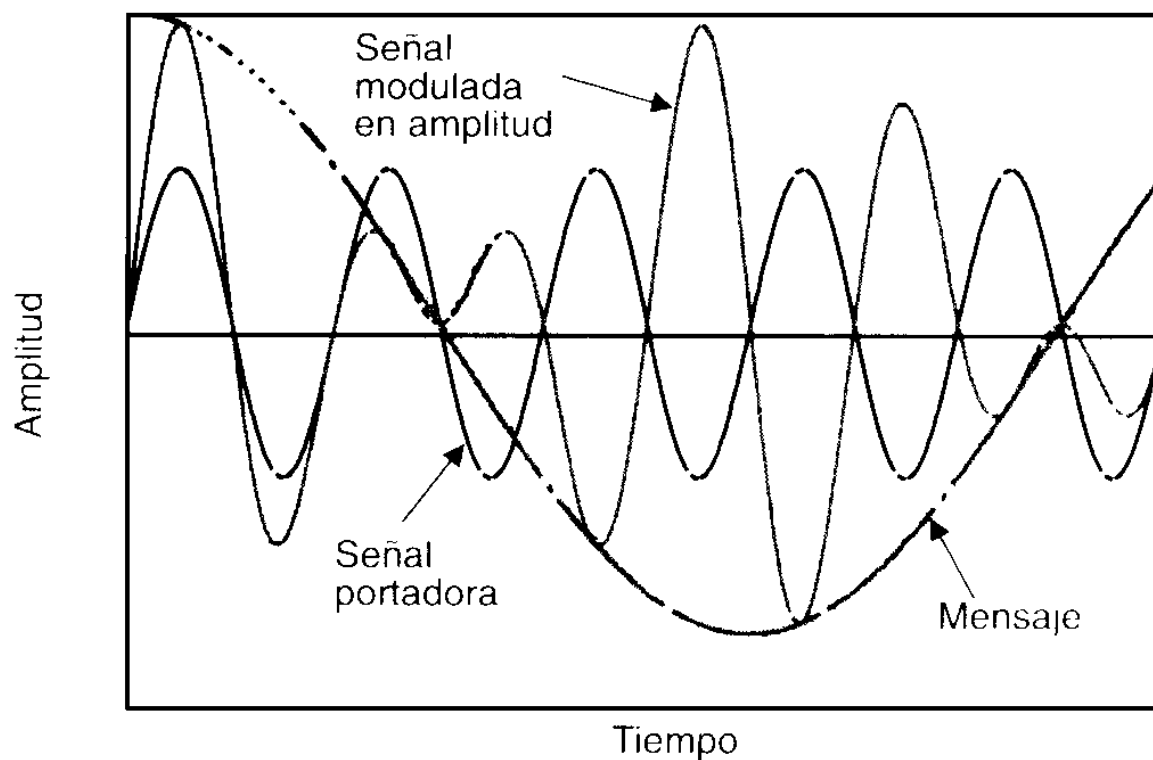
Si el mensaje no es muy exigente en su ancho de banda, la matemática dice que  $S_m(t)$  es una señal que tiene un espectro muy próximo a  $S_p(t)$ , que sabemos de antemano que se propagará correctamente por el canal.

Luego si transmitimos  $S_m(t)$  en lugar de  $M(t)$  que es realmente el mensaje, transmitiremos la misma información que tiene  $M(t)$ , pero con una señal fácilmente transportable como  $S_p(t)$



o su modulación  $S_m(t)$ .

El significado físico de la modulación en amplitud consiste en un desplazamiento del espectro de frecuencias del mensaje. La medida de ese desplazamiento es precisamente el valor de la frecuencia de la señal portadora utilizada en la modulación. Así, si tenemos un mensaje cuya frecuencia más baja es 100 Hz y cuya frecuencia más alta es 2.000 Hz y lo modulamos con una señal portadora sinusoidal de frecuencia 5.000 Hz, la señal  $S_m$  que pondremos en el canal tendrá un espectro tal que su frecuencia más baja será  $5.000 + 100$  Hz y su frecuencia más alta será  $5.000 + 2.000$  Hz.



El receptor tiene que fijarse en la amplitud de la señal porque en ese parámetro viaja la información.

A este tipo de modulación se la llama **modulación en amplitud** o **modulación AM** o **ASK**.

### 2.3.1.2 Modulación en frecuencia

La modulación en frecuencia modifica el parámetro de la frecuencia en la señal sinusoidal portadora, es decir, la información del mensaje reside en la frecuencia.

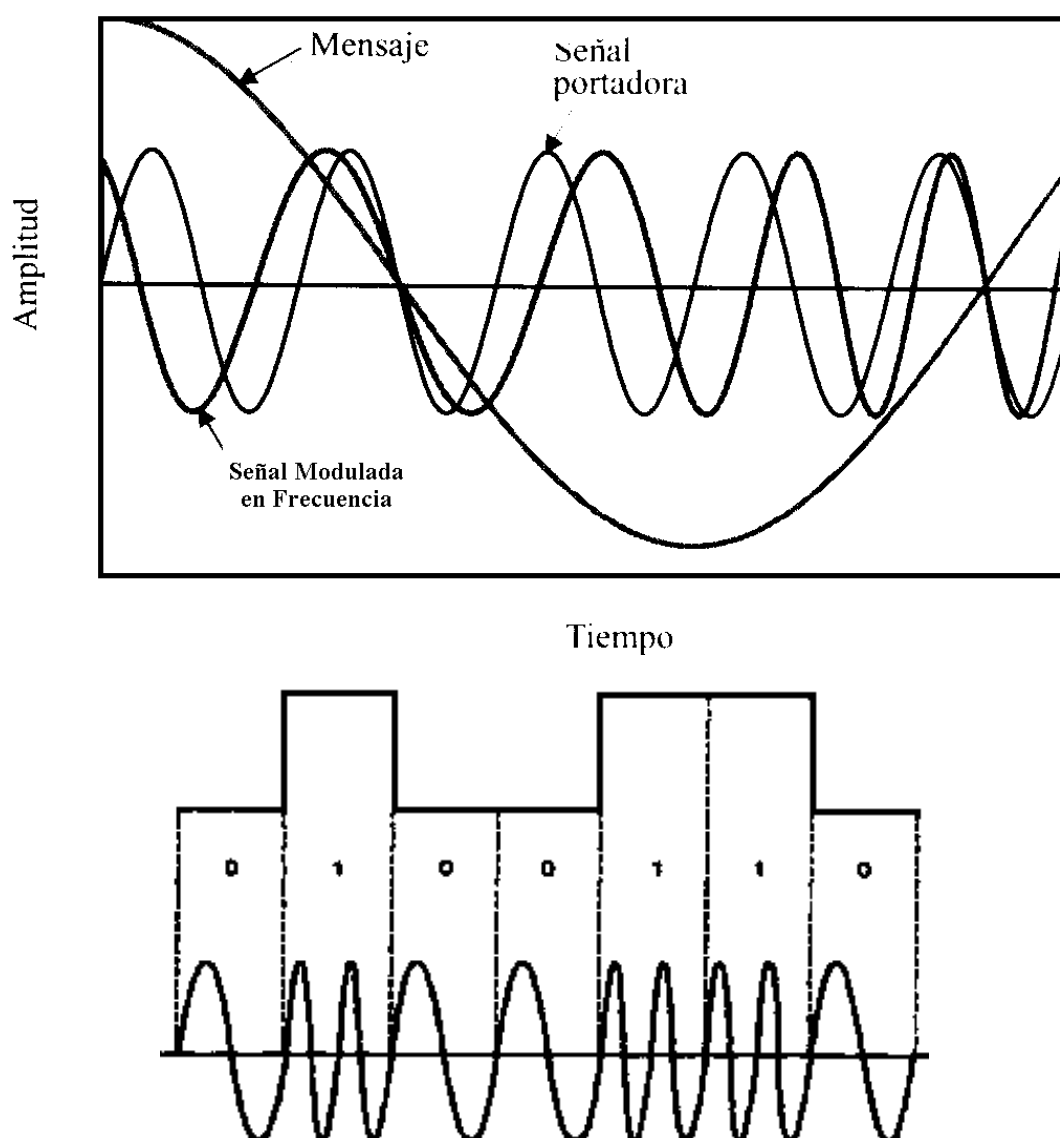
Partiendo de nuestra señal portadora:

$$S_p(t) = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + f)$$

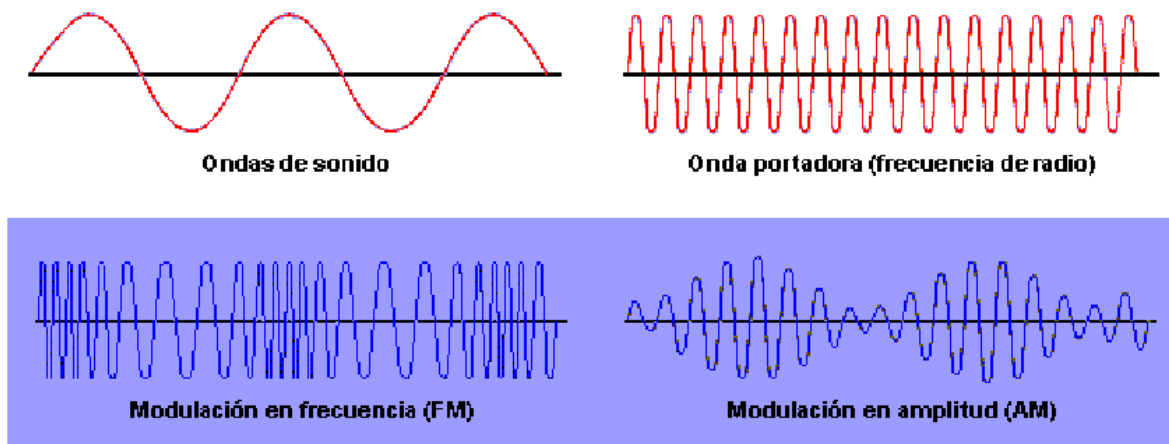
el mensaje  $M(t)$  se expresa como sigue en la señal que introducimos en el canal  $S_c$ :

$$S_m(t) = A \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot M(t) \cdot t + f)$$

Para que el receptor interprete bien el mensaje tendrá que hacer un análisis de la frecuencia que le llega en cada momento en la señal portadora. A esta modulación se le llama **modulación FM** o **FSK**.



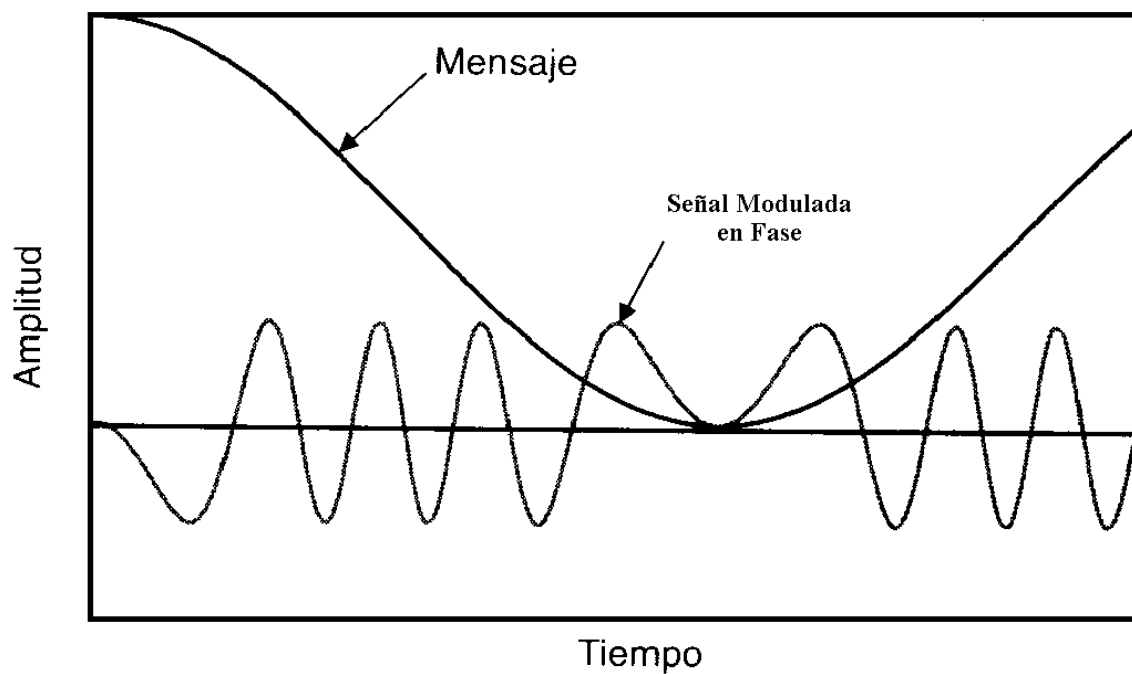
La modulación en frecuencia consume mayor ancho de banda que la modulación AM; sin embargo, es menos sensible al ruido del canal, razón por la que la modulación FM suele utilizarse en las transmisiones radiofónicas de alta fidelidad en estéreo.

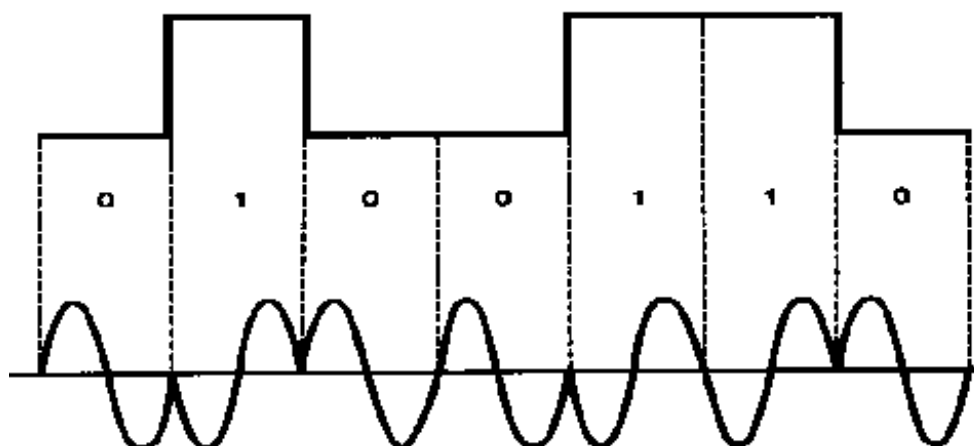


### 2.3.1.3 Modulación en fase

La modulación en fase consiste en codificar la información del mensaje en la fase de la señal portadora, por tanto, la señal que pondríamos en el canal sería:

$$S_m(t) = A \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot w \cdot t + M(t))$$





Cuando la información reside en la fase de la señal portadora se dice que la modulación es **PM** o **PSK**. Este tipo de modulación es muy utilizada en los módems, aunque normalmente se encuentra combinada con otro tipo de modulación.

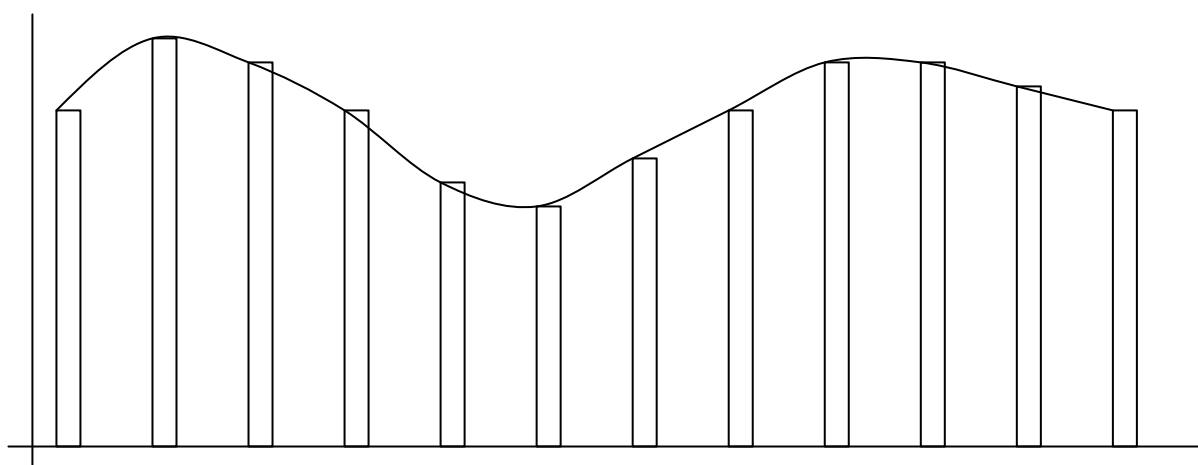
### 2.3.2 Modulación con portadora digital.

La característica distintiva de este grupo es la portadora digital en forma de tren de impulsos. Según se module uno u otro parámetro del impulso aparecen los diversos tipos de modulación que veremos a continuación.

La existencia de la portadora digital hace a este tipo de modulación muy apto para la multiplexación de varios canales en el tiempo.

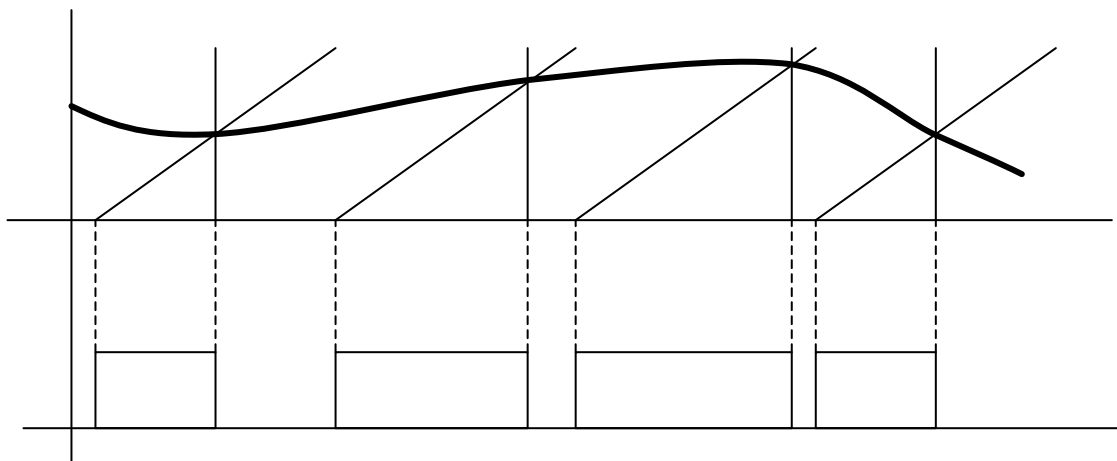
#### 2.3.2.1 Pulsos modulados en amplitud (PAM).

Este tipo de modulación tiene su origen en el concepto de muestreo de una señal. Cada cierto tiempo,  $T$ , se genera un pulso cuya amplitud es igual a la amplitud de la señal moduladora en ese momento.



#### 2.3.2.2 Modulación de duración de impulsos (PDM).

En este tipo de modulación la duración del impulso es proporcional a la amplitud de la muestra de la señal tomada en el instante  $t$ . Para determinar la duración de los impulsos se compara la amplitud de la señal, con la de otra señal de pulso en diente de sierra generados cada  $T$  segundos. En el instante en que las dos amplitudes son iguales, el impulso correspondiente de la señal PDM acaba, con lo cual su duración queda determinada por la amplitud de la señal.

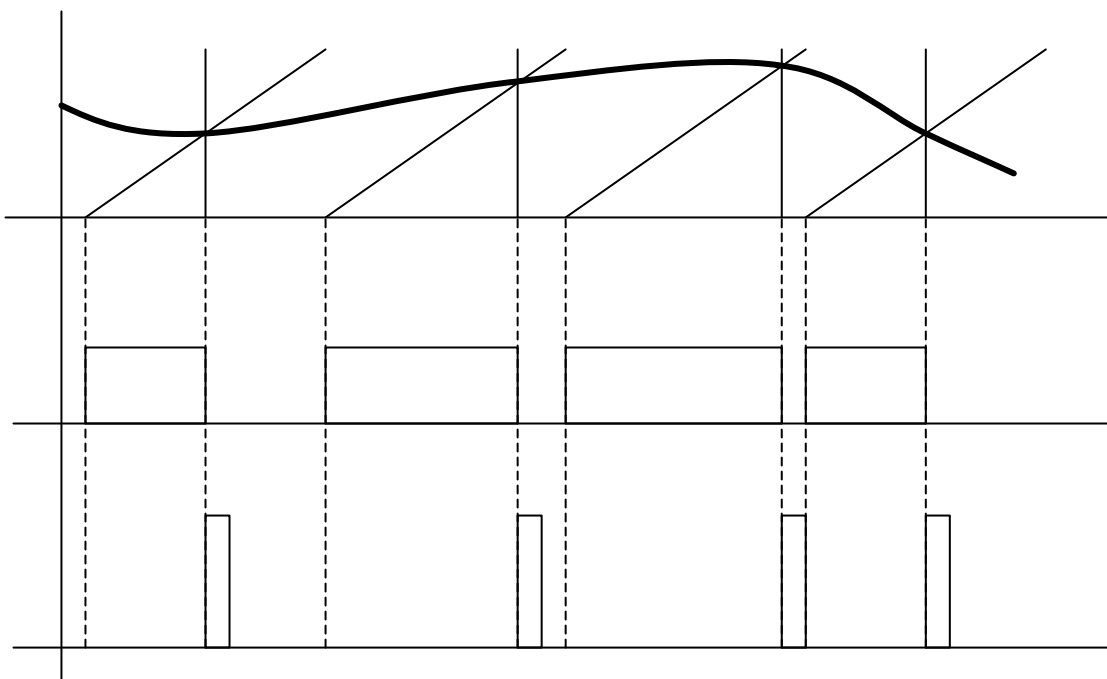


Es de hacer notar que en este tipo de modulación las muestras de la señal no se toman periódicamente, ya que lo que sí es periódico es el comienzo de los impulsos en diente de sierra pero no su final.

La principal ventaja de la PDM es su alta inmunidad al ruido, ya que en el canal la información se transmite en tiempo y no en amplitud.

### 2.3.2.3 Modulación por posición de impulsos (PPM)

En la modulación PDM se ha visto que una gran parte de la potencia de la señal modulada no llevaba información, ya que ésta sólo se encuentra en los instantes de comienzo y fin de cada impulso y no en los impulsos mismos, de manera que impulsos cortos, con poca potencia, incluyen la misma densidad de información que los impulsos más largos. Para evitar este desperdicio de potencia aparece la PPM, que consiste en una sucesión de impulsos iguales que se originan cuando la señal PDM cae a cero. Precisamente la forma más sencilla de generar PPM es a partir de una modulación previa PDM de la señal. Debido a esto la PPM es la clase de modulación por impulsos de mayor relación información /potencia en la transmisión.



Dado que la PPM deriva de la PDM tiene, al igual que ésta, una alta inmunidad al ruido en el canal de transmisión.

### 2.3.3 Modulación por código (MIC)

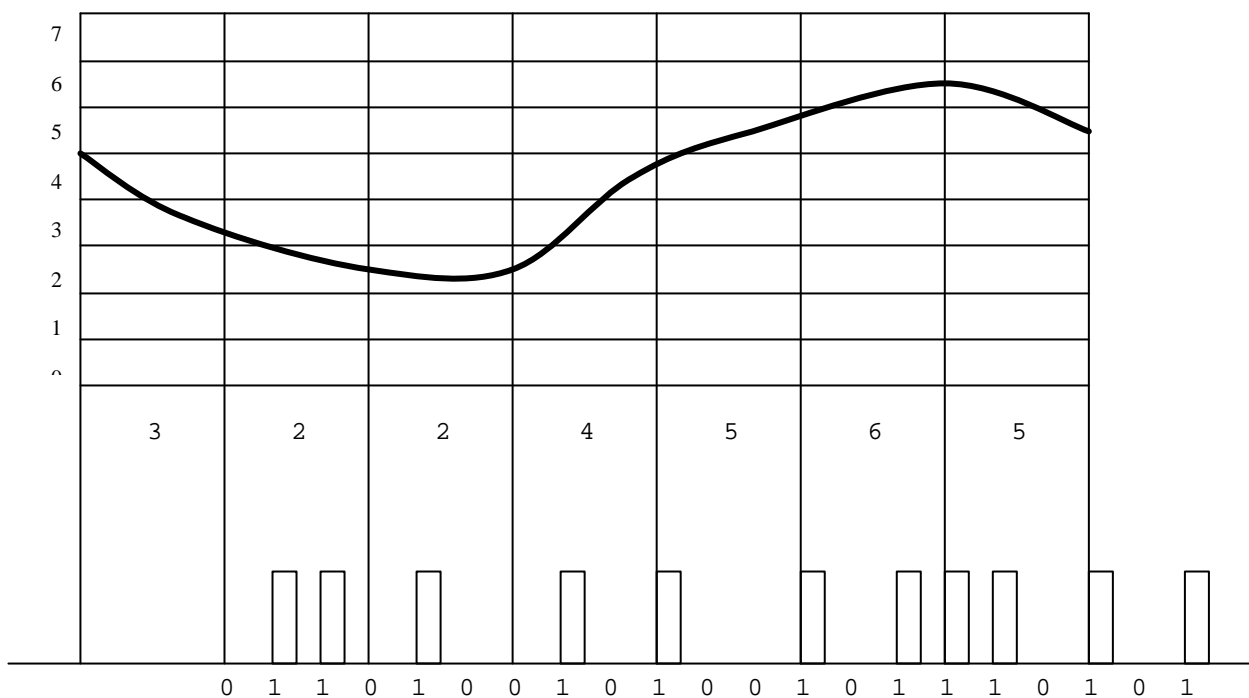
Hasta ahora hemos visto modulaciones en las cuales la variación continua de la amplitud de la modulación se refleja en una variación, lineal con la anterior, de algún parámetro de la señal modulada. En MIC esta modulación lineal no existe, sino que la presencia o ausencia de impulsos en ciertos instantes depende, de alguna manera, del valor de la señal en los instantes de muestreo. La señal MIC se compone de grupos de pulsos de igual amplitud, duración y posición en el tiempo, llamándose cuantificación y codificación a la relación existente entre la señal y los grupos de pulsos.

Supongamos una señal moduladora cualquiera. En cada instante de muestreo, la señal tendrá un valor determinado el cual es comparado con los niveles de cuantificación adjudicándose a cada muestra el nivel más cercano a su valor real. Como cada nivel tienen ya su código binario correspondiente, cada muestra cuantificada se sustituye por su código apareciendo entonces la señal MIC equivalente.

Como vemos una señal MIC tiene determinadas su duración y su frecuencia, así como sus posibles niveles, aunque el nivel en cada momento sea aleatorio.

De esta manera el problema de la existencia de ruido en la línea se ve muy disminuido, así como es posible colocar el número de repetidores que se desee en una línea larga ya que en cada uno de ellos se regenera la señal PCM original, dependiendo la ausencia de error sólo del repetidor anterior. En cambio en las otras modulaciones, el ruido era amplificado al igual que la señal, y, como cada repetidor introducía además su propio ruido, el número de éstos queda limitado por la relación señal/ruido en recepción, limitando por tanto, la longitud de la línea.

Esta ausencia de ruido en MIC no es total a que el cuantificar las muestras se introduce un error llamado por este motivo, ruido de cuantificación. El valor de este ruido disminuye al aumentar el número de niveles de cuantificación ya que la diferencia entre el valor real de la muestra y el nivel más cercano es menor.

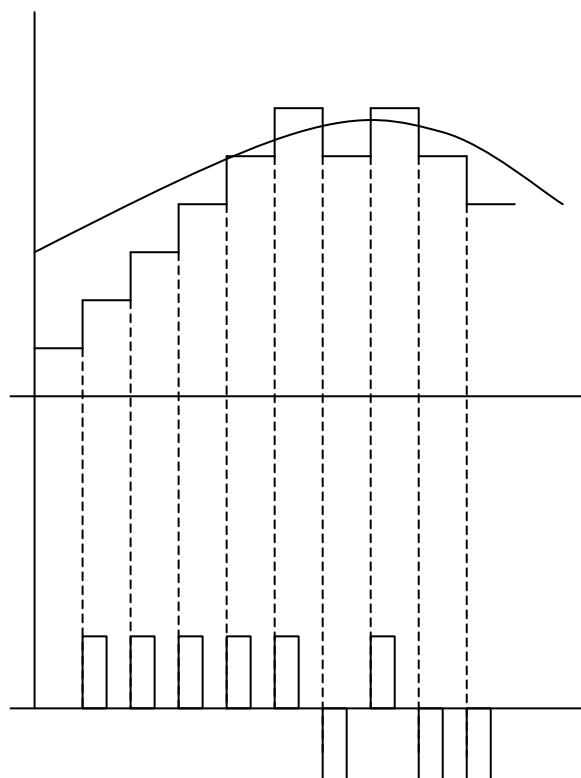


Un sistema MIC diseñado para transmitir una señal de voz de 4 KHz de ancho de banda necesitará 8.000 muestras de la señal por segundo, usándose 8 bits para codificar cada muestra. Por la línea de comunicación deberán viajar 8.000 muestras por segundo, con un solo canal telefónico. Los sistemas MIC están teniendo un

gran auge por la aplicación de los ordenadores a la comunicación, y con ellos se logra que la transmisión, tanto de datos como de voz, se realice mediante señales digitales del mismo tipo. Por otro lado tienen la gran ventaja de que la calidad del sistema es prácticamente independiente del modo de transmisión, modulación de portadora o banda base, de la potencia transmitida y del ruido en la línea debido a la baja probabilidad de error.

### 2.3.4 Modulación delta (DM)

La modulación delta es de características parecidas a la MIC, y será preferible una u otra según que la relación entre el ancho de banda del canal disponible y el de la señal a transmitir sea pequeña o grande, respectivamente.



## 2.4 Características de la transmisión digital.

Los sistemas de transmisión digital presentan indudables ventajas sobre los analógicos, entre las que se pueden destacar las siguientes:

- Calidad de transmisión uniforme, mediante el uso de repetidores que regeneran la señal, con independencia de la distancia y de la calidad del canal.
- La transmisión de datos puede realizarse directamente, sin la utilización de convertidores de señal.
- Independencia de la naturaleza de la información, facilitando la integración de voz, datos e imagen.
- Facilidad de codificación, lo que permite optimizar los sistemas de seguridad y control de errores.
- Mayores posibilidades en los sistemas de señalización y gestión de red.
- La circuitería electrónica digital es de bajo coste, tamaño reducido y fácil mantenimiento.



## 3 Física de la comunicación

A continuación vamos a exponer algunas cuestiones necesarias para comprender cómo son los procesos de comunicación en su nivel físico desde un punto de vista conceptual. Para facilitar la comprensión nos ceñiremos, cuando sea necesario, al caso de modulación en amplitud.

### 3.1 Limitaciones del ancho de banda

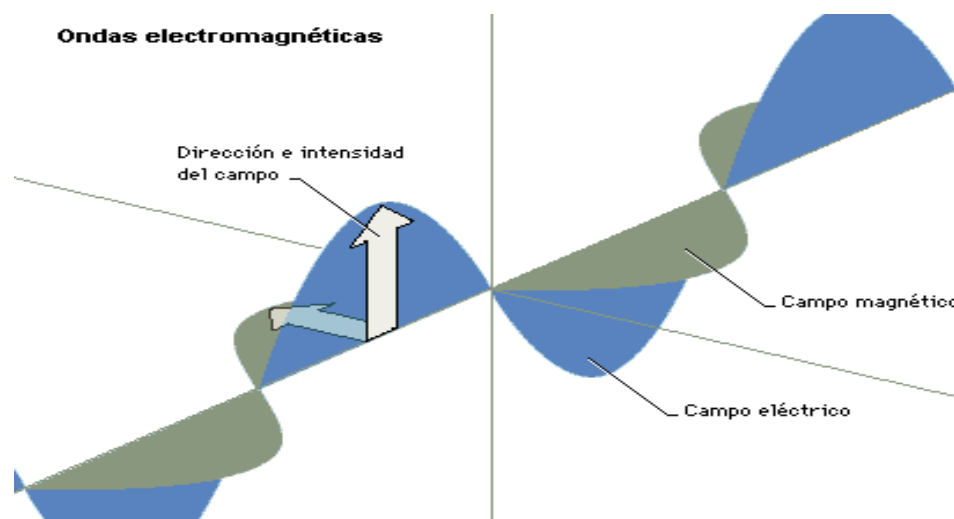
Puesto que la modulación significa un desplazamiento del espectro del mensaje, cuanto mayor sea el ancho de banda de la señal, mayor debe ser la frecuencia portadora de la señal que utilicemos en su modulación. Así, para enviar un mensaje masivamente informativo -de gran ancho de banda- necesitaremos frecuencias portadoras altas.

Por ejemplo, la transmisión de señal de televisión requiere frecuencias portadoras superiores a las transmisiones de radio. Efectivamente, el ancho de banda televisivo es mayor que el de radio, en el que sólo hay que transmitir voz, frente al televisivo, en donde se transmite voz e imagen.

Pongamos otro ejemplo. Una señal de microondas de 5 GHz puede contener 10.000 veces más información que un enlace de radiofrecuencia de 500 kHz. Un láser de  $5 \cdot 10^{14}$  Hz tiene una capacidad equivalente a 100.000 enlaces de microondas. Estas medidas están exageradas a su límite teórico. Obviamente, la tecnología actual no permite estas proporciones, pero nos sirven para hacernos una idea del comportamiento del espectro electromagnético.

### 3.2 El espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el mapa de posibles frecuencias de que disponemos para señales electromagnéticas. En principio, es un continuo de frecuencias aunque la tecnología impide la utilización de algunas de ellas. Se trata de ondas producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica. Las ondas electromagnéticas tienen componentes eléctricos y magnéticos.



En la tabla siguiente se expone de forma esquemática el conjunto de señales del espectro electromagnético. El objetivo del estudio del espectro electromagnético es entender que no todas las señales se transmiten por todos medios de transmisión, porque las tecnologías que utilizan son distintas. Algunas señales son apropiadas para las redes de área local, otras lo son para las redes de área extendida o para otras aplicaciones, no necesariamente relacionadas con la comunicación. Las cifras, medios de transmisión y aplicaciones son orientativas.

Longitud de onda (m)	Nombre de la señal	Medios de transmisión	Aplicaciones	Frecuencia (Hz)
	Ultravioleta	Fibras ópticas Rayos láser	Experimental	$10^{15}$ Hz
$10^{-6}$	Visible			
	Infrarrojo	Fibras ópticas		$10^{14}$ Hz
	Ondas milimétricas	Guías de ondas	Experimental Navegación	100 GHz
$10^{-2}$	SHF (frecuencias super altas)	Guías de ondas Radio en microondas	Intersatélite Repetidor de microondas	1 GHz
0,1	UHF (frecuencias ultra altas)	Coaxial Radio onda corta	Tierra a satélite Radar TV UHF	
1	VHF (frecuencias muy altas)	Coaxial Radio onda corta	FM y TV VHF Radio móvil	100 MHz
10	HF (frecuencias altas)	Coaxial Radio onda corta	Radioaficionados Banda civil	10 MHz
100	MF (frecuencias medias)	Coaxial Radio onda larga	Radio AM Aeronáutica	1 MHz
1.000	LF (frecuencias bajas)	Cables de pares Radio onda larga	Cable submarino Navegación	100 KHz
10 Km	VLf (frecuencias muy bajas)	Cables de pares Radio de onda larga	Radio transoceánica Teléfono	10 KHz
100 Km	Audio	Cables de pares	Teléfono y Telégrafo	1 KHz

Las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse. Así, estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad  $c = 299.792 \text{ km/s}$ . Todas las radiaciones del espectro electromagnético presentan las propiedades típicas del movimiento ondulatorio, como la difracción y la interferencia. Las longitudes de onda van desde billonésimas de metro hasta muchos kilómetros. La longitud de onda ( $\lambda$ ) y la frecuencia ( $\omega$ ) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión  $\lambda \cdot \omega = c$ , son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características.

El físico británico James Clerk Maxwell estableció la teoría de las ondas electromagnéticas en una serie de artículos publicados en la década de 1860. Maxwell analizó matemáticamente la teoría de los campos electromagnéticos y afirmó que la luz visible era una onda electromagnética.

Los físicos sabían desde principios del siglo XIX que la luz se propaga como una onda transversal (una onda en la que las vibraciones son perpendiculares a la dirección de avance del frente de ondas). Sin embargo, suponían que las ondas de luz requerían algún medio material para transmitirse, por lo que postulaban la existencia de una sustancia difusa, llamada éter, que constituía el medio no observable. La teoría de Maxwell hacía innecesaria esa suposición, pero el concepto de éter no se abandonó inmediatamente, porque encajaba con el concepto newtoniano de un marco absoluto de referencia espaciotemporal. Un famoso experimento realizado por el físico estadounidense Albert Abraham Michelson y el químico de la misma nacionalidad Edward Williams Morley a finales del siglo XIX socavó el concepto del éter, y fue muy importante en el desarrollo de la teoría de la relatividad. De este trabajo concluyó que la velocidad de la radiación electromagnética en el vacío es una cantidad invariante, que no depende de la velocidad de la fuente de radiación o del observador.

No obstante, a principios del siglo XX los físicos se dieron cuenta de que la teoría ondulatoria no explicaba todas las propiedades de la radiación. En 1900, el físico alemán Max Planck demostró que la emisión y absorción de radiación se produce en unidades finitas de energía denominadas 'cuantos'. En 1904, Albert Einstein consiguió explicar algunos resultados experimentales sorprendentes en relación con el efecto fotoeléctrico externo postulando que la radiación electromagnética puede comportarse como un chorro de partículas o fotones.

Hay otros fenómenos de la interacción entre radiación y materia que sólo la teoría cuántica explica. Así, los físicos modernos se vieron obligados a reconocer que la radiación electromagnética se comporta unas veces como partículas y otras como ondas. El concepto paralelo que implica que la materia también puede presentar características ondulatorias además de corpusculares fue desarrollado en 1925 por el físico francés Louis de Broglie.

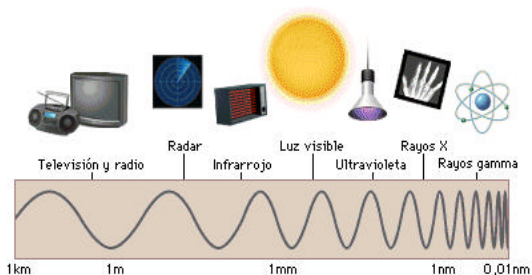
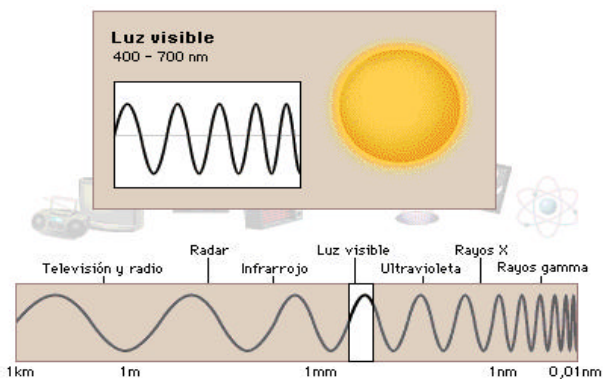
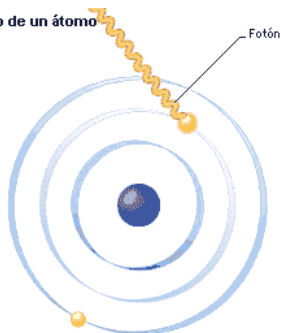
**El carácter de la ley física** por Richard P. Feynman

Cuando se descubrieron los electrones, se comportaban exactamente como partículas o proyectiles, de forma muy sencilla. Las investigaciones posteriores -por ejemplo, experimentos de difracción de electrones- indicaron que se comportaban como ondas. A medida que transcurría el tiempo crecía la confusión sobre la forma en que se comportaban realmente esos objetos: ¿ondas o partículas, partículas u ondas? Todo parecía indicar que las dos cosas a la vez.

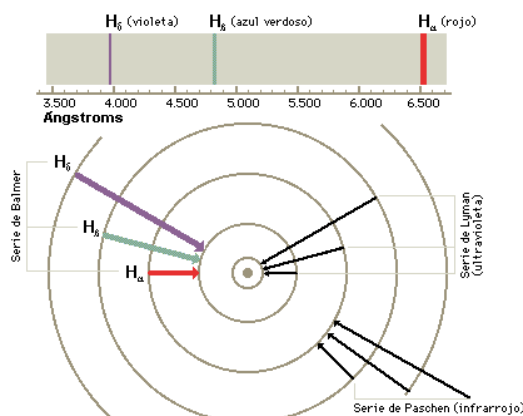
Esta creciente confusión se resolvió en 1.925 o 1.926 con la obtención de las ecuaciones correctas para la mecánica cuántica. Ahora sabemos cómo se comportan los electrones y la luz. Pero, ¿cómo puedo describirlo?. Si digo que se comportan como partículas doy una impresión equivocada; lo mismo ocurre si digo que se comportan como ondas. Se comportan en una forma particular e inimitable, que técnicamente podría denominarse mecanocuántica. Se comportan en una forma que no se parece a nada de lo que hayan visto ustedes antes. Su experiencia con las cosas que han visto hasta ahora es incompleta. El comportamiento de los objetos a escala minúscula es, sencillamente, distinto. Un átomo no se comporta como un peso que oscila colgado de un resorte. Tampoco se comporta como una representación en miniatura del Sistema Solar, con planetas microscópicos que giran en sus órbitas. Tampoco se parece a una especie de nube o niebla que rodea el núcleo. No se comporta como nada que hayan visto antes.

Pero si puede hacerse una simplificación. En ese sentido, los electrones se comportan exactamente igual que los fotones: los dos son disparatados, pero exactamente del mismo modo...

La verdadera dificultad es psicológica y se debe al constante sufrimiento que se produce cuando ustedes se preguntan "Pero ¿cómo puede ser así?", pregunta que refleja un deseo incontrolado, pero totalmente vano, de ver el asunto según algo conocido. No lo describiré por analogía con algo conocido; sencillamente, lo describiré. Hubo una época en la que los periódicos decían que sólo 12 personas entendían la teoría de la relatividad. No creo que nunca fuera así. Puede que hubiera una época en la que sólo una persona la entendía, porque era la única que se dio cuenta, antes de escribir su artículo. Pero después de que la gente leyera el artículo, un montón de personas entendieron la teoría de la relatividad de un modo u otro; desde luego, más de 12. Por otra parte, creo que puedo decir sin temor a equivocarme que nadie entiende la mecánica cuántica. Así que no se tomen esta clase demasiado en serio, no tengan la sensación de que tienen que entender lo que voy a describir de acuerdo con algún modelo. Sencillamente, relájense y disfruten. voy a contarles cómo se comporta la naturaleza. Si, simplemente, admiten que a lo mejor se comporta así, encontrarán que es maravillosamente fascinante. Si pueden evitarlo, no se pregunten constantemente "Pero ¿cómo puede ser así?", porque es perder el tiempo y entrar en un callejón sin salida del que nadie ha escapado todavía. Nadie sabe cómo puede ser así.

**Espectro electromagnético****Espectro electromagnético****Modelo sencillo de un átomo****Espectro visible**

El estudio del espectro electromagnético se ha producido a medida que la tecnología ha ido avanzando.



### Líneas espectrales del hidrógeno

Cuando un electrón pasa de un nivel de energía a otro, emite un fotón con una energía determinada. Estos fotones dan lugar a líneas de emisión en un espectroscopio. Las líneas de la serie de Lyman corresponden a transiciones al nivel de energía más bajo o fundamental. La serie de Balmer implica transiciones al segundo nivel. Esta serie incluye transiciones situadas en el espectro visible y asociadas cada una con un color diferente.

## 3.3 Necesidad del dominio de la frecuencia en comunicaciones

El hombre está acostumbrado a pensar en términos temporales debido a que su experiencia vital se desarrolla en el tiempo. Entonces, ¿por qué insistimos tanto en utilizar las frecuencias como un parámetro decisivo en comunicaciones? La respuesta es matemática. Sin embargo, como el objeto de esta unidad de trabajo se centra más en lo conceptual que en la formalidad matemática, nos limitaremos a exponer las ideas básicas para justificar la utilización del dominio de la frecuencia.

Imaginemos un proceso de comunicación como una realidad física que se desarrolla en la Naturaleza. En este proceso intervienen varios elementos que pasan de un estado inicial a otro final. En una comunicación, podemos afirmar que el efecto que el canal produce sobre la señal de entrada es la señal de salida.

Al principio de esta unidad de trabajo estudiábamos que las funciones matemáticas forman un modo de representación de las señales físicas. Por tanto, podemos suponer dos funciones matemáticas dependientes del tiempo que describen en un nivel matemático lo que ocurre en la realidad: el proceso físico. Así tendremos una señal de entrada  $S_i$  y una señal de salida  $S_o$ . La matemática proporciona dos funciones temporales que las representan. Llamaremos a estas funciones  $x_i(t)$  y  $x_o(t)$ . No hay que confundir  $x_i(t)$  con  $S_i$ , ni  $x_o(t)$  con  $S_o$ . Las «x» son funciones matemáticas, por tanto, abstractas, carentes de realidad. Las «S» son señales físicas, constatables en la Naturaleza.

Del mismo modo que hemos imaginado un nivel matemático «x» en función del tiempo, podríamos imaginar otro nivel matemático «X» que dependiera del dominio de la frecuencia y que represente de modo semejante lo que realmente existe en la naturaleza: las señales  $S_i$  y  $S_o$ .

Los dos niveles matemáticos servirían para describir el mismo fenómeno físico. El técnico en comunicación no tendría que tener dificultad alguna en emplear uno u otro, pues ambos representan lo mismo. ¿Qué matemáticas debemos emplear? La que conlleve una mayor sencillez de cálculo. Pues bien, aunque el hombre tiene su intuición orientada en el tiempo, los cálculos matemáticos se simplifican enormemente si utilizamos representaciones de los fenómenos de comunicación en el dominio de la frecuencia.

En muchas ocasiones, la matemática en el dominio del tiempo es irresoluble si no se hace por métodos de cálculo numérico, mientras que en el dominio de la frecuencia, la mayor parte de las operaciones de cálculo se reducen a sumas y productos. Esta es la razón por la que conviene estudiar estos procesos desde el punto de vista de la frecuencia.

En el nivel físico, la señal de entrada se convierte en señal de salida debido al efecto que el canal produce ella. En el primer nivel matemático, el que tiene como variable el tiempo, la señal de entrada  $x_i(t)$  se convierte en la de salida  $x_o(t)$  al aplicarle la función  $h(t)$ , que representa el efecto -en el tiempo- del canal. El segundo nivel matemático -el de la frecuencia-, a la función de entrada  $X_i(\omega)$  se le aplica el efecto del canal  $H(\omega)$  para obtener la función de salida  $X_o(\omega)$ . A la función  $H(\omega)$  se le llama «**función de transferencia del canal**» porque representa el efecto del canal sobre las señales de entrada.

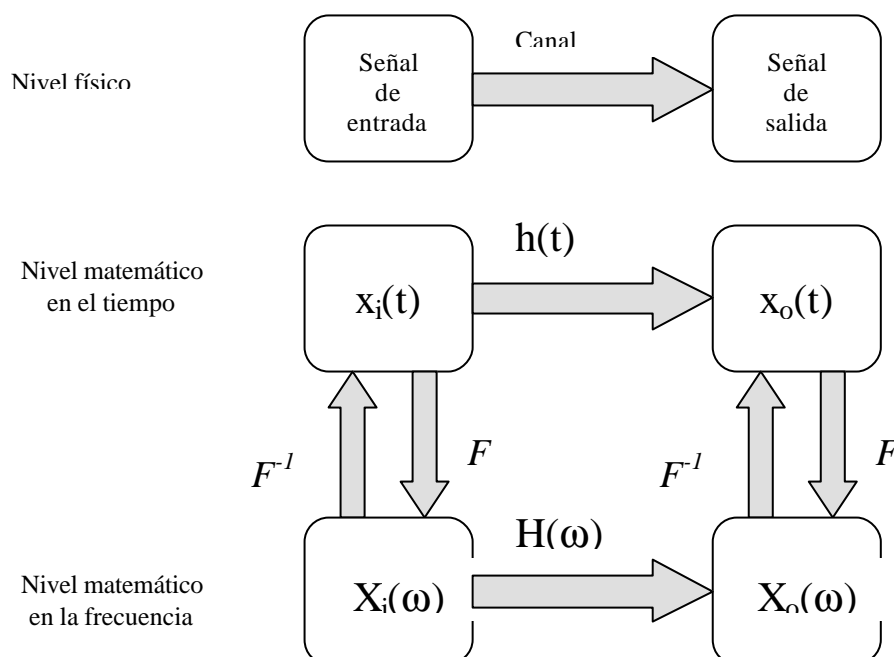
Aparentemente, todo es igual en ambos niveles matemáticos, sin más que cambiar “t” por “ $\omega$ ” y, en cada función, las minúsculas por mayúsculas, pero realmente no es así. Las funciones  $H(\omega)$  son mucho más simples que las  $h(t)$ . Más que de las funciones tendríamos que hablar de las «aplicaciones» de éstas sobre las señales de entrada. En efecto, la aplicación de  $h(t)$  sobre  $x_i(t)$  consiste en efectuar un producto de convolución, operación matemática de difícil resolución por medios analíticos, mientras que la aplicación de  $H(\omega)$  sobre  $X_i(\omega)$  es un simple producto aritmético de funciones.

Pero la inteligencia humana está habituada al dominio temporal, no al de la frecuencia, ¿cómo podremos resolver este problema? La respuesta se halla en las transformaciones  $F$  y  $F^{-1}$ , llamadas respectivamente «Transformada de Fourier» y «Transformada inversa de Fourier».

Por tanto, el paso desde la señal de entrada en el tiempo hasta la señal de salida en el tiempo se hace del siguiente modo:

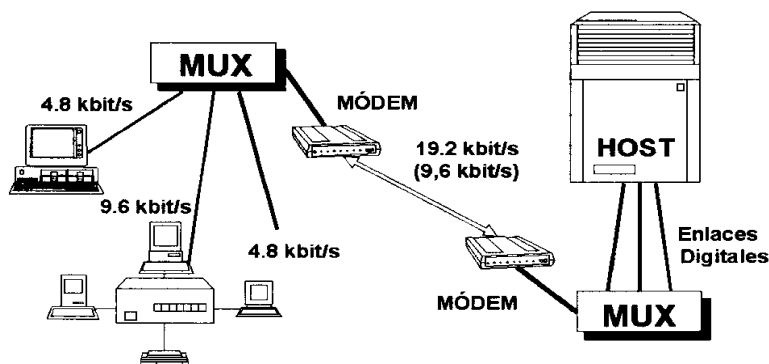
- Se toma la señal de entrada en el tiempo, recogida directamente por experimentación.
- Se calcula su equivalente en el dominio de la frecuencia (nivel matemático segundo) aplicándole la transformada de Fourier.
- A esta señal en la frecuencia se le multiplica el efecto del canal  $H(\omega)$  (función de transferencia nivel matemático segundo) para obtener la señal de salida en el espacio de la frecuencia.
- Por último, se aplica la transformada inversa Fourier a esta última señal, de este modo obtenemos la señal de salida en el tiempo.

Como se puede observar, el dominio de la frecuencia no es más que un camino virtual que facilita la resolución matemática del problema. En algunos casos el espacio de la frecuencia es más intuitivo, como, por ejemplo, en un ecualizador. Este dispositivo aumenta la ganancia en un rango de frecuencias y la disminuye en otras, según las condiciones acústicas del auditorio.



## 4 La Multiplexación

La multiplexación es una técnica utilizada en comunicaciones, por la que se hace convivir en un canal señales procedentes de emisores distintos y con destino en un conjunto de receptores también distintos. En suma, se trata de hacer compartir un canal físico estableciendo sobre él varios canales lógicos.



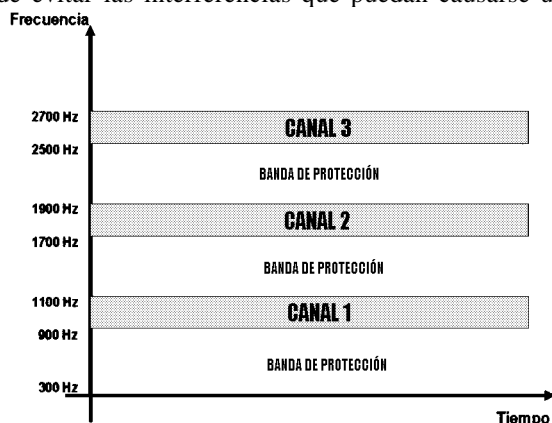
### 4.1 Concentración y multiplexación

Es fácil confundir la concentración con la multiplexación, porque tienen bastantes similitudes. De hecho, la definición anterior es válida, tanto para la multiplexación como para la concentración. Sin embargo, hay una diferencia de matiz que las distingue.

- En el caso de la **multiplexación**, la capacidad de transmisión del canal común debe ser *mayor o igual* que la suma de las capacidades de transmisión de cada uno de los emisores.
- En la **concentración**, este requisito no es indispensable: si todos los emisores quisieran transmitir simultáneamente habría que organizar un sistema de espera que arbitrara las comunicaciones. El equipo que controla esta contienda, el concentrador, cuenta con memoria propia para gestionar el tráfico de la línea de alta velocidad y cierta inteligencia para poder tratar las congestiones que pudieran surgir.

### 4.2 Multiplexación en la frecuencia

En este tipo de multiplexación, llamada también **FDM** (Frequency Division Multiplexation) los canales lógicos que comparten el único canal físico se establecen por multicanalización en la frecuencia, es decir, a cada canal lógico se le asigna una banda de frecuencia centrada en una señal portadora sobre la que modulará el mensaje que utilice ese canal. Entre dos bandas de frecuencia consecutivas se establece una banda de seguridad con el fin de evitar las interferencias que puedan causarse unos mensajes a otros. Es más eficaz para el tratamiento de



señales analógicas que digitales. Por ello este sistema sólo se utiliza en canales telegráficos (6 canales de 200 baudios ó 24 de 50 baudios a través de un canal telefónico), transmisiones modo dúplex por un circuito de dos hilos (separando las bandas de frecuencia de cada sentido de transmisión), etc.

Evidentemente, cada canal lógico tendrá menor ancho de banda que el canal físico, puesto que la multiplexación es una técnica de reparto.

Presenta la desventaja de tener un número limitado de canales y una velocidad limitada por canal; son poco flexibles.

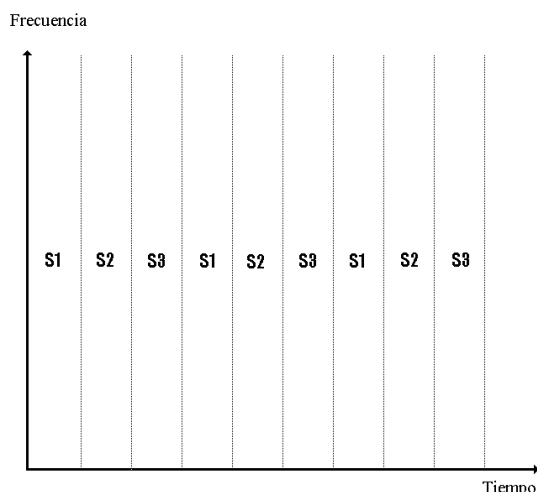
El proceso de modulación/demodulación necesario para la multiplexación por división en frecuencia se encuentra incluido en el propio equipo multiplexor aunque las señales de baja velocidad deben haber sido previamente moduladas (FSK en sistemas telegráficos) para luego ser desplazadas dentro del ancho de banda del canal de alta velocidad por el multiplexor.

### 4.3 Multiplexación en el tiempo

En el caso de la multiplexación en el tiempo, también llamada **TDM** (Time Division Multiplexation), los canales lógicos se asignan repartiendo la totalidad del ancho de banda disponible durante un cierto período de tiempo. Se caracteriza por emplear técnicas digitales por lo que son más adecuados para su uso en transmisión de datos. De forma análoga a la técnica FDM, establece tiempos de guarda para evitar interferencias. Precisan finalmente de un módem para su conexión con la línea de alta velocidad.

Atendiendo al tipo de protocolo utilizado en la transmisión podemos hacer la distinción entre **síncronos** y **asíncronos**.

- **La multiplexación en el tiempo síncrono.-**  
Asigna a cada señal de baja velocidad de entrada intervalos de tiempo constantes en el canal de alta velocidad.
- **La multiplexación en el tiempo asíncrono.-**  
Asigna a cada canal de baja velocidad de entrada el canal de alta velocidad durante intervalos de tiempo de longitud variable, para lo cual, los datos se agrupan en paquetes que contienen las indicaciones necesarias relativas a dirección, orden y número del terminal de entrada al que pertenecen para que puedan ser reconstruidos correctamente en el extremo receptor.



Un caso particular de la multiplexación por división en el tiempo asíncrono es el “Estadístico” o **STDM** (*Statistic Time División Multiplexation*), consistente en no asignar intervalos de tiempos fijos a cada canal, sino en hacerlo en función del tráfico existente en cada momento en cada uno ellos.

La principal ventaja derivada del uso de multiplexores estadísticos radica en el hecho de poder realizar una óptima utilización del enlace, ya que la asignación de tiempos a cada línea no es fija, sino que se hace en función de su actividad, pudiéndose así asignar los recursos disponibles, es decir, la capacidad en bit/s de la línea de enlace, de la mejor forma posible. Esta técnica permite eliminar los tiempos inactivos en el canal de alta velocidad.