

Tema 0: CONCEPTOS FÍSICOS Y MATEMÁTICOS DE LAS TRANSMISIONES

Conceptos matemáticos. -

Una señal no es más que la manifestación de una magnitud física. En el caso particular de las señales utilizadas en telecomunicaciones, la señal se caracteriza por propagarse (esto es, trasladarse con el transcurso del tiempo) a través de diferentes medios o **canales**.

Esto sugiere la idea de representar matemáticamente la señal como una función variable del tiempo. Conociendo el comportamiento de dichas señales, puede realizarse un modelo matemático de representación que simule las características de los sistemas reales. Mediante dicho análisis matemático, puede **simularse** el comportamiento de los diferentes sistemas de comunicación.

No obstante, no debe confundirse la señal con su representación matemática, tanto en su expresión analítica como en su expresión gráfica.

❖ Principio de superposición

El **Principio de superposición** establece que el efecto causado sobre una suma de señales es equivalente a la suma de los efectos producidos por cada señal por separado. Esta situación es común, bajo ciertas condiciones, en la teoría de la comunicación. El 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 fenómeno sobre las mismas.

❖ Series e integrales de Fourier

Se dice que una función es **periódica**, cuando para cada intervalo de valores X (o **periodo**) del intervalo de definición, el valor de la función se repite:

$$f(x + X) = f(x)$$

Puede demostrarse matemáticamente que si $s(t)$ es una función periódica de periodo T puede descomponerse en una suma de términos más simples mediante un desarrollo en serie de senos y cosenos:

$$S(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N a_n \text{sen}(2\pi\mu n t) + \sum_{n=1}^N b_n \text{cos}(2\pi\mu n t)$$

Que recibe el nombre de **Serie de Fourier**; $\mu = 1/T$ es la **frecuencia fundamental** y los términos a_n y b_n las amplitudes de los n -ésimos **armónicos**. La componente $n = 1$ es la **componente fundamental**. Obsérvese que el valor a_0 representa la componente continua de la señal.

El número de términos (N) del desarrollo en serie de la función puede ser finito o no; en el caso de que el número de términos sea infinito, se dice que el desarrollo en serie de Fourier es **integral de Fourier**.

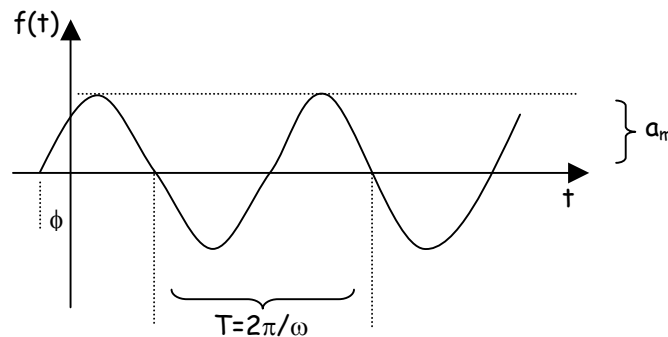
Cada uno de los términos (sumandos) del desarrollo es a su vez una función.

❖ Señales sinusoidales. -

Se dice que una señal, al propagarse por un medio a través del tiempo es sinusoidal, cuando su representación matemática adopta la forma:

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

donde t es la variable independiente y representa el tiempo, a_m es la **amplitud** máxima de la señal, ω es un parámetro denominado **frecuencia angular** y ϕ otro parámetro denominado **desfase**



Una función periódica tiene los siguientes parámetros:

- ◆ **Frecuencia:** $\mu = \omega/2\pi$ Donde ω representa la frecuencia angular. Representa el número de cortes de la función con el eje horizontal por unidad de tiempo. Se mide en Hz (hercios)
- ◆ **Período:** $T = 2\pi/\omega \equiv \mu^{-1}$ Representa el tiempo necesario para que se vuelva a repetir la estructura periódica de la señal. Se mide en segundos (s).
- ◆ **Fase:** $(\omega t + \phi)$ Es el ángulo recorrido por la señal en cada instante. Como valor angular que es se mide en radianes (rad).
- ◆ **Desfase:** ϕ Es el desplazamiento angular que sufre la función por falta de sincronismo con la medición de tiempos, es decir el ángulo recorrido por la función hasta el instante inicial de tiempo $t = 0$.
- ◆ **Amplitud máxima:** a_m Es el valor máximo alcanzado por la función. No debe confundirse con la **amplitud instantánea** que es el valor de la función en un instante determinado..

Puesto que la frecuencia y el periodo son inversos, una función sinusoidal en el tiempo queda, en definitiva, caracterizada por tres parámetros: **amplitud, frecuencia y fase**.

❖ Las señales periódicas

Puede demostrarse matemáticamente que cualquier señal periódica puede expresarse como una suma (combinación lineal) de funciones trigonométricas de senos y cosenos. Por tanto, si se conoce la respuesta de un sistema de comunicaciones para este tipo de funciones, se conocerá su respuesta para cualquier señal periódica, siempre que el canal se comporte de forma lineal.

Cuando las señales no son periódicas, su descomposición es algo más compleja; ya no es una simple suma sino una integral de Fourier; no obstante, el tratamiento matemático es el mismo: cualquier señal de la naturaleza se puede descomponer como una suma (en este caso de infinitos sumandos), de funciones senos y cosenos.

Debe considerarse, además, que la función senoidal y la función cosenoidal equivalente son conceptualmente iguales. La diferencia entre una y otra se centra en el *desfase* $\phi = \pi/2$ existente entre las dos funciones.

Conceptos físicos. -

❖ Ley de Ohm

Toda señal eléctrica sufre una disminución de su nivel energético cuando se traslada por cualquier medio de transmisión. Esta atenuación energética se rige por la *Ley de Ohm* que relaciona la tensión eléctrica entre los extremos del material (V) y la intensidad de corriente (I) eléctrica que lo atraviesa. El cociente entre esta tensión y la intensidad de denomina **Resistencia eléctrica**. Si esta resistencia no es constante sino que depende de la frecuencia de la señal eléctrica a transportar en vez de resistencia suele hablarse de **Impedancia**, generalización del concepto de resistencia eléctrica:

$$R(\Omega) = \frac{V(\text{voltios})}{I(\text{Amperios})}$$

Donde R Representa la **resistencia** (o **impedancia**) y se mide en ohmios (Ω), V la caída de tensión entre los extremos del medio de transmisión, medida en Voltios e I la Intensidad de la corriente eléctrica, medida en Amperios, que circula por dicho medio de transmisión.

❖ Amplificación y atenuación

Cualquier señal lleva asociada una energía que se transfiere. Si se considera un sistema de comunicación en su conjunto, siempre hay una proporción entre la energía que el sistema produce en su salida del emisor y la energía que se le introdujo en la entrada del receptor. Esta situación es absolutamente equivalente para las potencias de salida y de entrada.

Se llama **ganancia de un sistema** a la relación existente entre las potencias de salida y de entrada. Normalmente se mide en *decibelios* (dB) según la siguiente relación:

$$\text{Ganancia}(dB) = 10 * \log_{10} \left(\frac{P_{\text{entrada}}}{P_{\text{salida}}} \right)$$

Si la potencia de salida es igual a la de entrada la ganancia es nula. Si la potencia de entrada es mayor que la potencia de salida el sistema se comporta como un **amplificador** y la ganancia es positiva. Por el contrario, si la potencia de salida es inferior a la de entrada el sistema se comporta como un **atenuador** y la ganancia es negativa, es decir, el sistema tiene pérdidas.

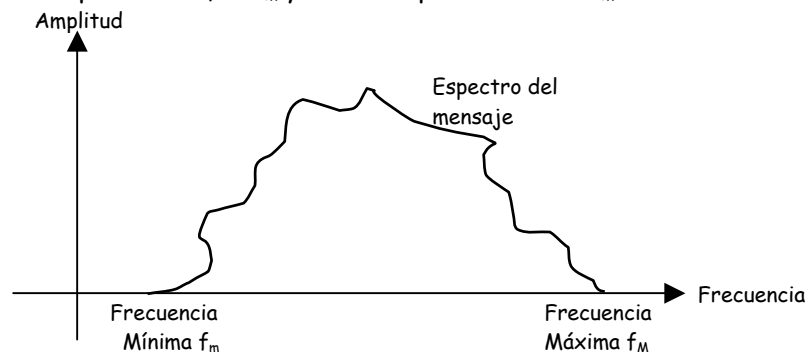
❖ El espectro de una señal y su ancho de banda

En el caso de una señal periódica en el tiempo y de amplitud máxima a_m , la *frecuencia* determina el índice de variación de la función, esto es, el **número de veces que la función corta al eje de tiempos por segundo**. En estas condiciones se dice que el espectro de la señal sinusoidal está constituido por un único punto: su frecuencia, con un valor asignado que es su amplitud a_m . (μ, a_m).

Si en vez de considerar una señal sinusoidal se considera la suma de muchas (n) señales sinusoidales, cada una frecuencia característica: μ_i , el espectro de esta señal múltiple estará formado por una función discreta (una nube de puntos) variable en la frecuencia, con n puntos formados por cada una de las parejas (μ_i, a_{mi}).

En el caso general de una función no periódica habrá infinitos valores para su descomposición en funciones sinusoidales, cada una con una frecuencia característica. El espectro estará formado por un continuo de frecuencias.

El análisis realizado, referido a parejas *frecuencia - amplitud*, puede hacerse igualmente para parejas *amplitud - tiempo*. El espectro de una señal es pues una doble función: la correspondencia $\mu - a_m$ y la correspondencia $t - a_m$.



Esta función, que representa el peso que tiene cada frecuencia en la formación de la señal, tanto en amplitud como en fase, se llama **espectro de frecuencias de la señal**.

A la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de las frecuencias del espectro del mensaje, se llama **ancho de banda de la señal**.

$$\text{Ancho de banda} = \text{Frecuencia}_{\text{Máxima}} - \text{Frecuencia}_{\text{mínima}}$$

Puede decirse, por tanto, que cualquier señal tiene una doble representación:

- ◆ Señal en el dominio del tiempo (*espectro temporal*)
- ◆ Señal en el dominio de la Frecuencia (*Espectro de frecuencias*)

Análogamente, puede definirse 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.

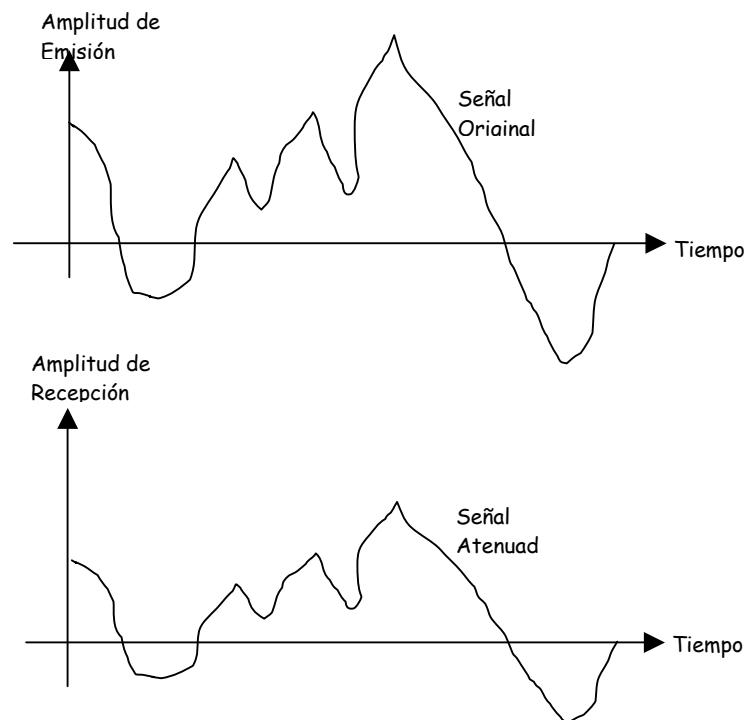
Si una parte del espectro de la señal cae fuera del ancho de banda del canal, la transmisión será imposible o no será de fidelidad. En este caso se dice que la señal ha sido *filtrada* por el canal.

❖ Contaminaciones y deformación de señal

Hay una serie de factores que intervienen en el proceso de transmisión de señales y que deforman o alteran las mismas. Estas contaminaciones y deformaciones pueden conducir a pérdidas de información y a que los mensajes no lleguen a su destino con integridad. Entre estos factores negativos, son los mas comunes:

◆ **Atenuación**

Es el 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.

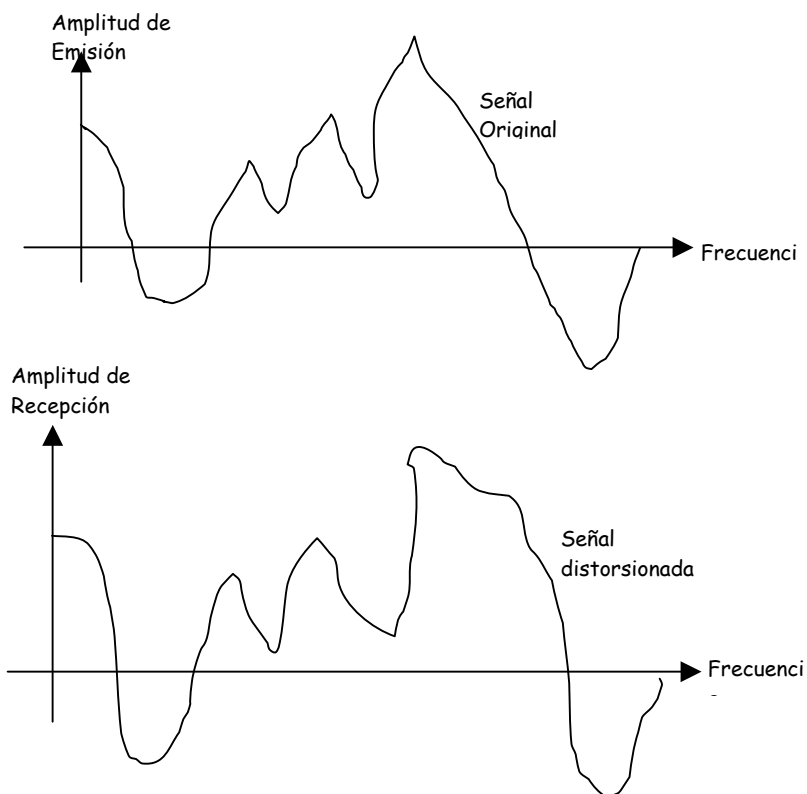


Este debilitamiento se manifiesta en un descenso de la amplitud de la señal transmitida. Puede darse el caso de que la amplitud descienda tanto que se haga imperceptible, perdiéndose el mensaje.

Desde el punto de vista físico, la atenuación está regida por la ley de Ohm.

◆ **Distorsión**

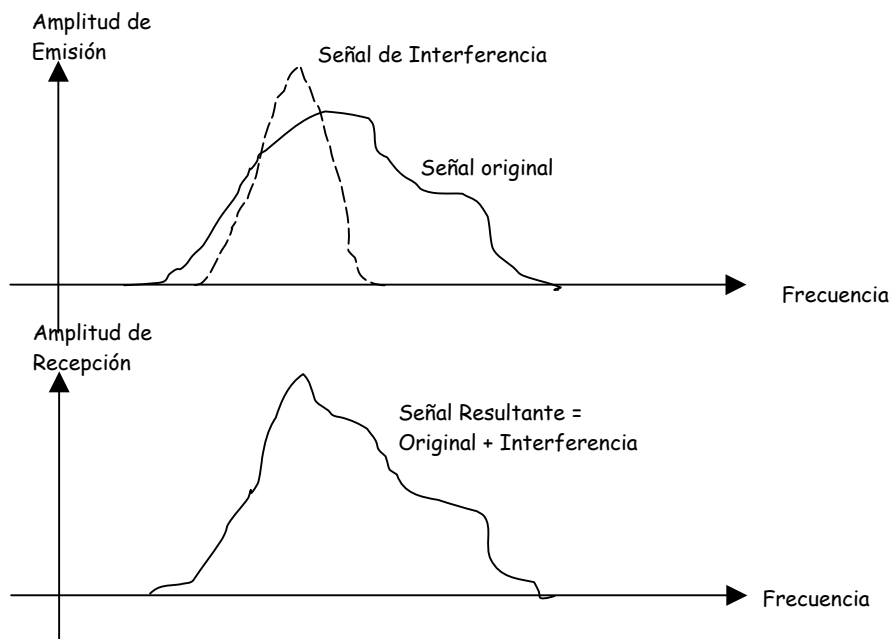
Es el efecto consistente en la deformación de la señal *producida normalmente* porque el canal se comporta de modo distinto en cada frecuencia



Es producto de una falta de linealidad .

♦ **Interferencia**

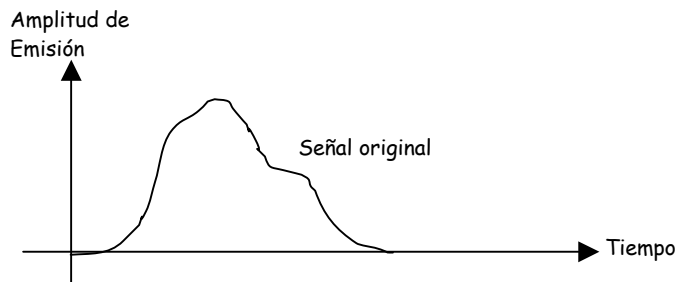
La interferencia es la *adición de una señal conocida y no deseada a la señal que se transmite.*



La interferencia se produce, por ejemplo, en una emisión radiofónica, cuando dos estaciones emisoras emiten a la misma frecuencia, produciéndose la superposición de ambos mensajes.

♦ **Ruido**

Es la suma de múltiples interferencias, posiblemente de origen desconocido y de naturaleza aleatoria.



Los propios componentes físicos de cualquier canal o dispositivo 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.

❖ **Longitud de onda.-**

La longitud de onda, λ , es un parámetro físico de las señales periódicas tal que multiplicado por la frecuencia proporciona la velocidad de propagación de la señal en el canal. Así, en una señal electromagnética propagándose en el vacío se cumple que:

$$c = \lambda \cdot \mu$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, medida en m/s ($3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$), λ es la longitud de onda en metros y μ la frecuencia en Hz de la señal que se propaga, es decir, la inversa del periodo (T)

Así, por ejemplo, si la frecuencia de una señal de radio en la banda FM fuera de 100 MHz, su longitud de onda sería:

$$\lambda = \frac{300000000}{100000000} = 3 \text{ metros}$$

El significado físico de la longitud de onda λ respecto del espacio, es el mismo que tiene el Periodo T respecto del tiempo.

Esto implica que las señales electromagnéticas son **doblemente periódicas**, en el espacio y en el tiempo

En efecto, sea un punto que en un determinado instante soporta una perturbación. Ese mismo punto tendrá el mismo estado de vibración al cabo de T segundos, por lo que se dice que en cada periodo repite su estado.

Pero además, los puntos situados a λ metros alrededor de ese punto, transcurridos T segundos también tendrán el mismo valor, es decir, que cada longitud de onda λ se repite el estado de vibración. Es decir, La **amplitud de una señal** es función periódica en el espacio.

Consecuentemente, al existir una relación entre la frecuencia y la longitud de onda, existirá una relación entre el **ancho de banda temporal $\Delta\mu$** y el **ancho de banda espacial $\Delta\lambda$** :

$$\lambda * \mu = c \Rightarrow \mu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \Delta\mu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda$$

Velocidad de transferencia de datos y capacidad de un canal

Ancho de banda

En los servicios de comunicación en los que la señal es analógica el ancho de banda se mide en *ciclos por segundo* o **Hercios (Hz)**, sin embargo, en aquellos servicios en los que la comunicación es digital el ancho de banda no se mide en Hz sino en bits/segundo o **bps**.

La **velocidad de transmisión** que se puede alcanzar sobre un determinado circuito se define como *el número máximo de bits que se transmiten en un segundo* y su límite viene dado por el ancho de banda del mismo y por la relación señal / ruido presente en el circuito según:

Para una señal ideal sin ruido:

$$C = 2W \cdot \log_2 N$$

donde:

C representa la *capacidad máxima del canal*

W representa *el ancho de banda en Hz*

N representa *el número de estados posibles de señalización en la línea.*

El número de bits (**n**) enviados a la línea para estos **N** estados viene dado por:

$$N = 2^n \rightarrow n = \log_2 N$$

Para una señal no ideal con ruido:

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{R} \right)$$

donde:

C representa la *capacidad máxima del canal*

W representa *el ancho de banda en Hz*

S/R representa *la relación señal ruido medida en Baudios*

Velocidad de transmisión

La velocidad de transmisión (V_T) mide el flujo máximo de bits que pueden transmitirse entre dos equipos de datos en un segundo. Por consiguiente, la velocidad de transmisión viene dada en bps.

Este parámetro no debe confundirse con el ancho de banda, ya que se refiere exclusivamente a *la velocidad con que los datos fluyen en la entrada/salida del terminal* (antes de llegar al módem en el caso de que lo hubiese). Su valor viene dado por:

$$V_T = \frac{1}{t} \log_2 N$$

Donde N es el número de estados distintos de la línea y t la duración en segundos del intervalo significativo mínimo de medición. Obsérvese que, en el caso de que el número de estados sea 2 se tiene:

$$V_T = \frac{1}{t} \log_2 2 = \frac{1}{t} \cdot 1 \Rightarrow V_T = \frac{1}{t}$$

Velocidad de modulación

Por una línea de transmisión pueden transmitirse señales que cambien de estado, esto es, que al transmitir un bit de un determinado valor (por ejemplo un "1") el siguiente bit transmitido sea un bit del valor complementario (en este caso un "0"). En estas condiciones se define la **velocidad de modulación** (V_M) como el *número máximo de veces por segundo que puede cambiar el estado de la señal en la línea de transmisión*.

$$V_M = \frac{1}{t} \text{Baudios}$$

Donde t es la duración en segundos del intervalo significativo mínimo de medición.

Tal y como se refleja en la definición, este parámetro es específico en el contexto de la línea de transmisión, es decir, *sólo se hace referencia a la velocidad de modulación cuando se quiere indicar la velocidad a la que se están transmitiendo los datos por la línea de transmisión*.

Existe una relación entre la velocidad de transmisión y la velocidad de modulación, que viene dada por:

$$V_T = V_M \log_2 N$$

Lo que indica que, si la señal sólo tiene dos estados (0 y 1 $\Rightarrow N = 2$), se cumple:

$$V_T = V_M$$

Esto es, el número de bps emitidos coincide con el número de Baudios.

Modulación. -

Con todo lo indicado anteriormente, es evidente que una señal sólo se puede transmitir por un canal que permita la propagación del tipo de señales a él asociados: una señal eléctrica sólo se puede propagar por un medio conductor de electricidad, una señal acústica por un medio material, etc.

Sin embargo no basta que la adecuación de la naturaleza de la señal y el canal, además la señal debe tener los parámetros adecuados, es decir, un canal puede transmitir bien las señales de una determinada frecuencia y mal las de otras. El *canal ideal es aquel que presenta una respuesta lineal para todas las señales*, esto es, transmite por igual todas las frecuencias.

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

En una primera aproximación, el **modulador** es el dispositivo encargado de efectuar la modulación. En comunicaciones, la modulación es la operación por la cual *se pasa de una señal digital, que proporciona el emisor, a una equivalente analógica, que es enviada al receptor. Por su parte, el receptor, que es analógico, 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**.

Además de la adecuación entre señales y canales, la modulación puede ser necesaria por otras razones.

♦ **Necesidad de la modulación**

Facilidad de radiación. - En general, la longitud de una antena que tiene que radiar una señal electromagnética de frecuencia f , debe tener, al menos, una longitud de $\lambda/10$ metros, donde λ es la longitud de onda de la señal.

Si se considera una señal de audio de baja frecuencia (en el entorno de los 100 Hz, la longitud de onda de esta señal es:

$$\lambda = c.T = c \cdot \frac{1}{\mu} = 3 \cdot 10^8 \cdot \frac{1}{100} = 3000 \text{ km}$$

por lo que la antena deberá medir 3000/10 km = 300 km. Esto indica que es imposible transmitir señales de audio con señales electromagnéticas si no se transforma previamente.

Si, por el contrario, se considera una transmisión de radio en FM de 88 a 108 MHz, el mismo cálculo indicará que la longitud de la antena apropiada es inferior a 1 metro.

Sería pues muy útil emplear la modulación para cambiar la frecuencia de la señal original a otra frecuencia en la que no exista una imposibilidad física de construir antenas receptoras.

Reducción de ruido e interferencias.- La modulación puede resolver este problema pasando el mensaje a una banda de frecuencias en la que el nivel de ruido sea menor o donde no existan interferencias.

Asignaciones de frecuencia.- la modulación sirve para desplazar el espectro de cada mensaje a la banda de frecuencia asignada, de esta forma se tiene la garantía de que no se producirán interferencias procedentes de otro emisor.

Multicanalización.- este procedimiento 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 o multiplexar varias señales, incluso aquellas pertenecientes a distintas canalizaciones.

Tipos de modulación

Como ya se ha indicado, una onda sinusoidal está caracterizada por tres parámetros: Amplitud, Fase y Frecuencia. Cada uno de estos tres parámetros origina una forma concreta de modulación. A estas modulaciones se las conoce como **lineales** o de **onda continua**.

❖ *Modulación lineal o de onda continua*

- **Modulación en amplitud.**

Sea una señal (**señal portadora**) S_p definida según:

$$S_p(t) = a_m \text{sen}(2\pi\mu t + \phi)$$

Señal que se transmite por canales que admitan la frecuencia μ . En principio, esta señal no lleva información, porque la información se detecta con cambios significativos en la señal, no predecibles

Una posibilidad de introducir información es mediante la amplitud; puede convertirse en una señal informativa variable en el tiempo: la señal tiene entonces un mensaje a transmitir:

$$a_m = m(t)$$

donde m representa el mensaje a transmitir en función del tiempo. La señal que se introduce en el canal S quedará entonces:

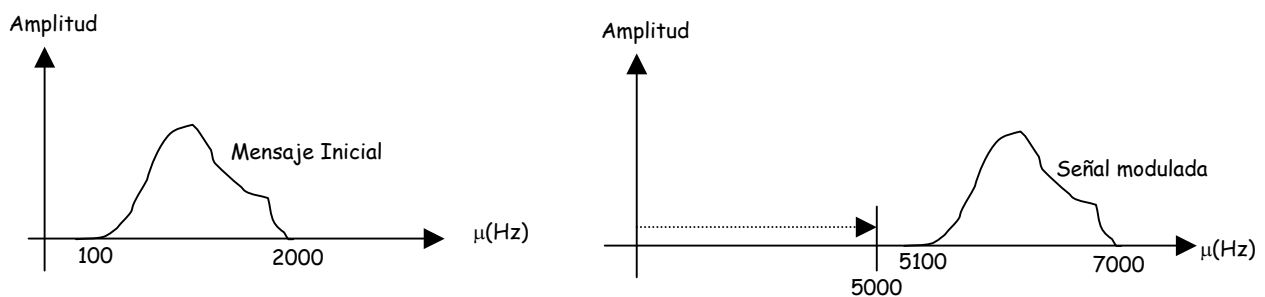
$$S_c(t) = m(t) \cdot \text{sen}(2\pi\mu t + \phi)$$

Si en la señal portadora la amplitud es constante y tal que $a_m = 1$ se cumplirá entonces que

$$S_p(t) = \text{sen}(2\pi\mu t + \phi)$$

por lo que, en definitiva, puede escribirse para cualquier valor lineal de a_m :

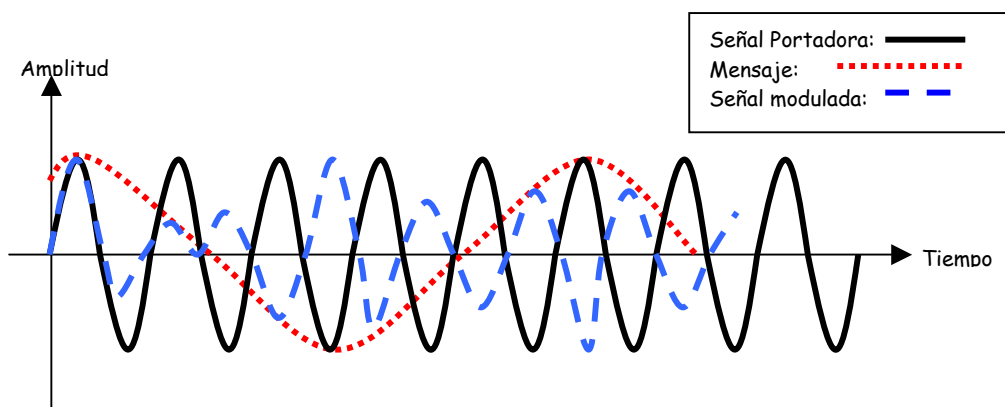
$$S_c(t) = m(t) \cdot S_p(t)$$



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

El receptor analiza la amplitud de la señal, porque en este parámetro viaja la información. A este tipo de modulación se le llama **Modulación AM** o **ASK** (Amplitude Shift Keying).

En general:



- **Modulación en frecuencia.**

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

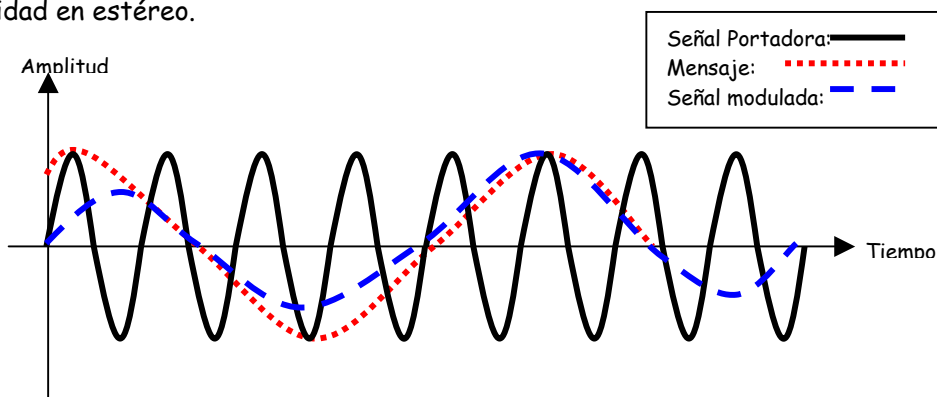
Partiendo de la señal portadora:

$$S_p(t) = a_m \text{sen}(2\pi\mu t + \phi)$$

el mensaje $m(t)$ se expresa como sigue a continuación en la señal que se introduce en el canal S_c :

$$S_c(t) = a_m \text{sen}(2\pi.m(t).t + \phi)$$

Para que el receptor interprete bien el mensaje, tendrá que hacer un análisis de la frecuencia que le llega a cada momento en la señal portadora. A esta modulación se le denomina **modulación FM** o **FSK** (Frequency Shift Keying). 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 cual suele utilizarse en las transmisiones radiofónicas de alta fidelidad en estéreo.

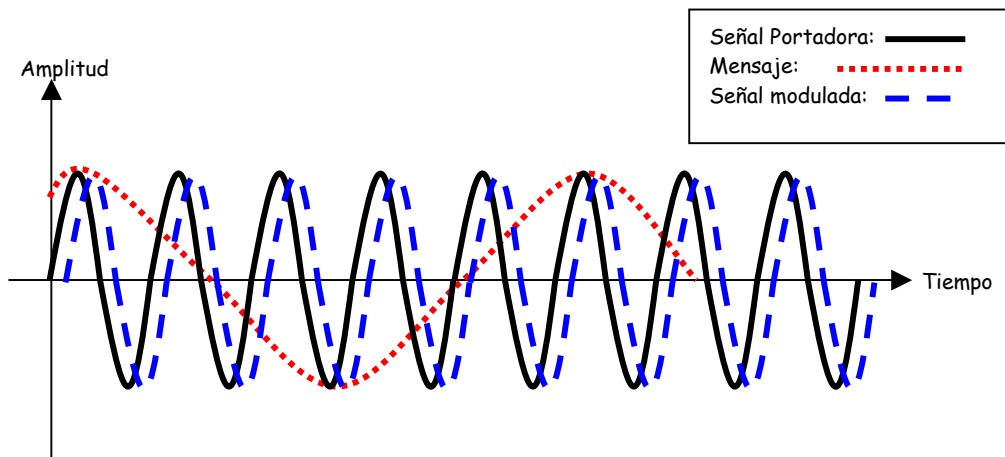


- **Modulación en fase.**

La modulación en fase consiste en codificar la información del mensaje en la fase de la señal portadora, por tanto, la señal puesta en el canal tendrá la forma:

$$S_c(t) = a_m \text{sen}(2\pi t + m(t))$$

Cuando la información reside en la fase de la señal portadora, se dice que la modulación es **modulación PK** o **PSK** (Phase Shift Keying). Esta modulación es muy utilizada en módems, aunque normalmente se encuentra combinada con otro tipo de modulación.



❖ *Modulación por pulsos*

Esta modulación es semejante a la onda continua sustituyendo la señal portadora sinusoidal por un tren de ondas (tren de pulsos). Es una modulación más apropiada para técnicas de transmisión digitales, aunque puede consumir mayor ancho de banda.

❖ *Modulación codificada*

Es una mezcla de modulación continua y modulación por pulsos; se trata de transmitir por el canal en onda continua una señal previamente modulada por pulsos.

Multiplexación

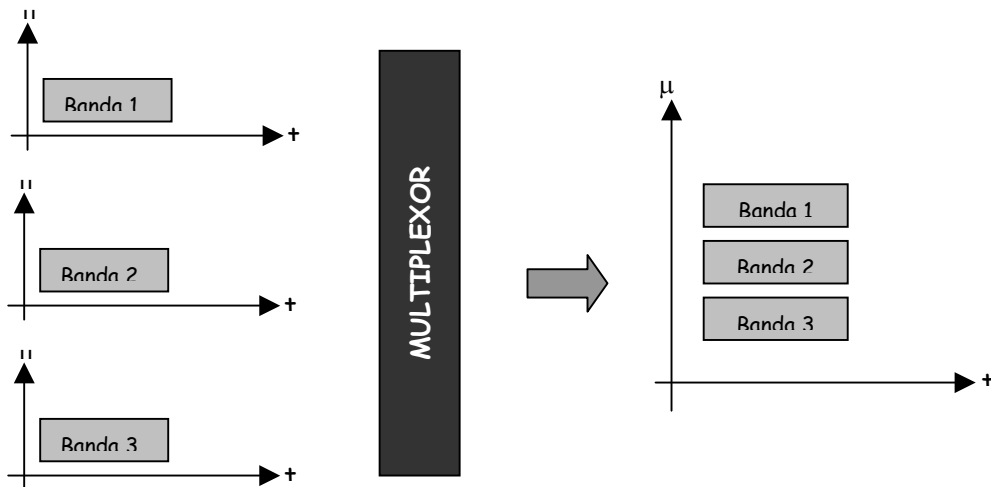
La **multiplexación** es una técnica utilizada en comunicaciones *por la que se hace convivir en un canal señales procedentes de emisores distintos y con destino en un conjunto de receptores también diferentes*. En definitiva, se trata de hacer compartir un canal físico, estableciendo sobre él varios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

Concentración y multiplexación

Es fácil confundir la concentración con la multiplexación dado que tienen bastantes puntos en común. De hecho, la definición anterior es válida tanto para la multiplexación como para la concentración, pero existen diferencias de matiz que las distinguen.

En el caso de la multiplexación, la capacidad de transmisión del canal común debe ser igual o mayor 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.

Multiplexación en frecuencia.-

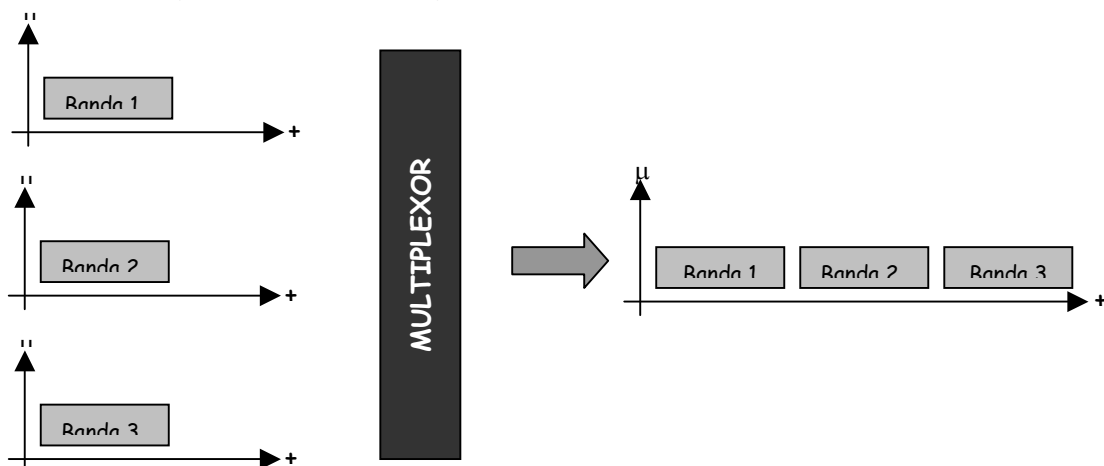


En este tipo de multiplexación, llamada también **FDM** los canales lógicos que comparten el único canal físico, se establecen por multicanalización en la frecuencia, esto es, a cada canal lógico se le asigna una banda de frecuencia centrada en una señal portadora sobre la que se modulará el mensaje que utilice este canal.

Entre dos bandas de frecuencias consecutivas se establece una banda de seguridad con el fin de evitar las interferencias que puedan causarse unos mensajes con otros.

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

❖ Multiplexación en el tiempo.-



En el caso de la multiplexación en el tiempo, también llamada **TDM** los canales lógicos se asignan repartiendo el tiempo de uso del canal físico entre los distintos emisores, estableciendo *slots* o ranuras temporales. Así cada uno utiliza el tiempo que tiene asignado, teniendo que esperar a su siguiente ranura para volver a transmitir, si tiene necesidad de ello.

Estas ranuras se repiten periódicamente a lo largo del tiempo. En cada ranura de tiempo una comunicación ocupa todo el ancho de banda del canal.

❖ **Técnicas combinadas**

En muchas ocasiones, los procesos de comunicación emplean técnicas de multiplexación que son combinaciones de frecuencia y de tiempo. Así, un sistema que utilice esta técnica puede utilizar el canal durante ciertos intervalos, pero además dentro de una determinada banda de frecuencia.
