

MODULACIÓN DIGITAL

Existe una clara tendencia hacia los sistemas digitales de comunicación. Los servicios de telefonía celular, analógicos hasta hace un par de años, hoy son todos de naturaleza digital. Lo mismo sucede con muchos otros sistemas de comunicación, entre los que podemos mencionar otros servicios de telefonía, servicios de transmisión de datos, de radio digital, de distribución de contenido vía satélite y, desde luego, de televisión.

En el ámbito de la televisión, aun cuando la mayor parte de las transmisiones radiodifundidas son de carácter analógico, comienzan a aparecer las transmisiones digitales, las mismas que ya se han hecho presentes en las redes de cable y en otros sistemas de televisión paga.

Hoy en día nos parece muy familiar encontrarnos con cajas decodificadoras o "set-top boxes" que, entre otras cosas, permiten transformar las señales digitales de televisión recibidas, en una señal analógica que alimente los televisores convencionales.

Recordemos rápidamente que en una señal analógica la información es presentada como una forma de onda electromagnética continua, mientras que en una señal digital, la información se representa en forma discreta con precisión finita.

En una señal digital, una combinación única de bits ("unos" y "ceros") cuenta con un significado especial para un sistema de comunicación en particular.

Para que una señal, ya sea analógica o digital, pueda transmitirse eficientemente a través de un medio o canal de comunicación, es necesario contar con algún método de modulación.

La modulación consiste en variar una o varias características (ya sea amplitud, frecuencia o fase) de una señal (portadora), en función de las variaciones de la señal que contiene la información a transmitir.

La popularidad de los sistemas digitales de comunicación no es producto de un capricho o de la casualidad. Un sistema digital ofrece múltiples ventajas respecto a uno analógico, como por ejemplo mayor inmunidad al ruido, menor consumo de energía eléctrica y menor costo.

Debido a esta clara transición hacia los sistemas digitales de comunicación, es necesario pensar en técnicas de modulación digital, que ofrecen una mayor capacidad para acarrear grandes cantidades de información. Adicionalmente, en comparación con lo analógico, las técnicas de modulación digital proveen transmisiones de mejor calidad, compatibilidad con servicios digitales de datos y mayor seguridad en la transmisión de información.

Las técnicas de modulación digital pueden agruparse en tres grupos, dependiendo de la característica que se varíe en la señal portadora. Cuando se varía la amplitud, la técnica de modulación digital que se utiliza se conoce como Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK, por sus siglas en inglés). Si se varía la frecuencia o la fase, las técnicas empleadas serían la Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK) o la Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK), respectivamente.

Cualquiera que sea la técnica de modulación digital empleada, la amplitud, la frecuencia o la fase de la señal portadora podrá tomar únicamente un número finito de valores discretos.

PSK - Desplazamiento de fase

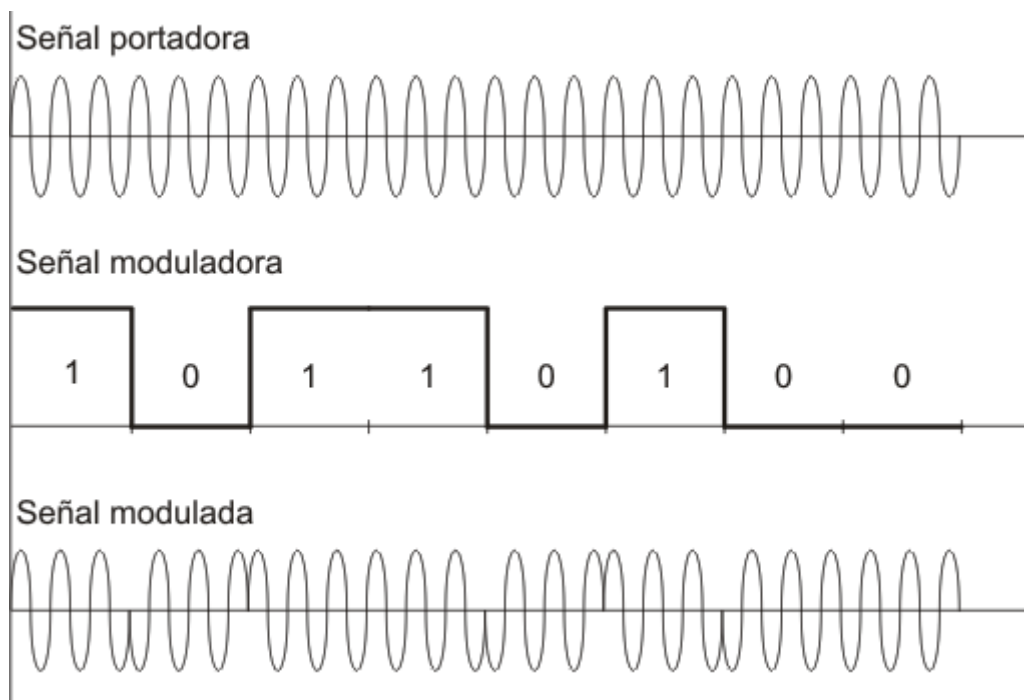
PSK (Phase-shift keying), es una modulación de fase donde la señal moduladora (datos) es digital.

Existen dos alternativas de modulación PSK:

PSK convencional, donde se tienen en cuenta los desplazamientos de fase y

PSK diferencial, en la cual se consideran las transiciones.

Las consideraciones que siguen a continuación son válidas para ambos casos.



En PSK el valor de la señal moduladora está dado por

$$v_m(t) = v_m(t) = \begin{cases} 1 & \text{para un "1" binario} \\ -1 & \text{para un "0" binario} \end{cases}$$

mientras que la señal portadora vale:

$$v_p(t) = V_p \cos(2\pi f_p t)$$

En donde V_p es el valor pico de la señal portadora y f_p es la frecuencia de la señal portadora.

La modulación PSK está caracterizada por

$$v(t) = v_p(t) \cdot v_m(t)$$

o sea

$$v(t) = V_p \cdot V_m \cos(2\pi f_p t)$$

Luego para $V_m = 1$

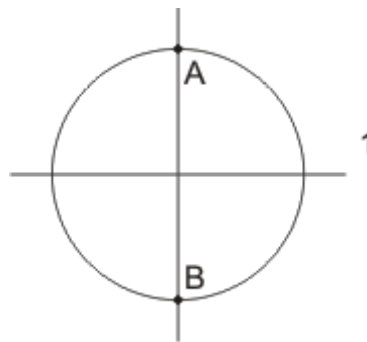
$$v(t) = V_p \cos(2\pi f_p t)$$

y para $V_m = -1$

$$v(t) = -V_p \cos(2\pi f_p t) = V_p \cos(2\pi f_p t + \pi)$$

Entre las dos últimas expresiones de $v(t)$, existe una diferencia de fase de 180° , y la señal varía entre dos fases, es por ello que se denomina 2PSK.

Al sistema modulador de **2PSK** se lo suele comparar con una llave electrónica controlada por la señal moduladora, la cual conmuta entre la señal portadora y su versión desfasada 180° .

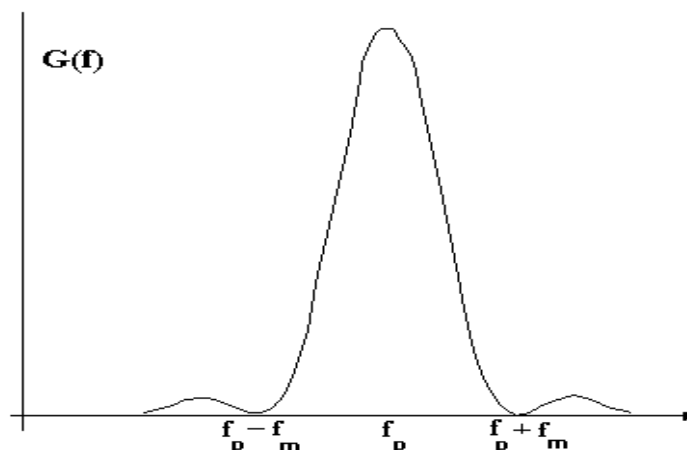


Esquema para 2 PSK

El radio de la circunferencia es igual a 1 y representa la amplitud normalizada de la portadora.

En el sistema PSK convencional es necesario tener una portadora en el receptor para sincronización, o usar un código autosincronizante, por esta razón surge la necesidad de un sistema PSK diferencial. Es diferencial puesto que la información no está contenida en la fase absoluta, sino en las transiciones. La referencia de fase se toma del intervalo inmediato anterior, con lo que el detector decodifica la información digital basándose en diferencias relativas de fase.

El ancho de banda resulta igual al de ASK o sea $2f_b$



Modulación m-PSK (Multi-PSK)

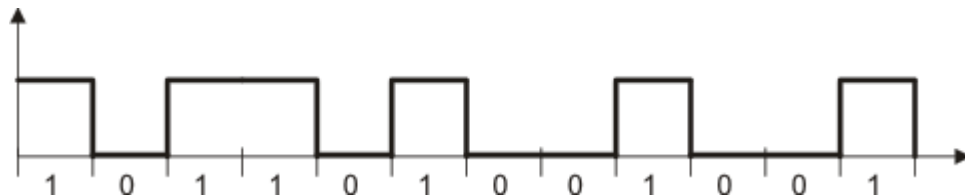
En este sistema la fase de la señal portadora puede tomar secuencialmente N valores posibles separados entre sí por un ángulo definido por

$$\theta = \frac{2\pi}{N}$$

Este es un caso de transmisión multinivel, donde la portadora tomará los N valores posibles de acuerdo a los niveles de amplitud de la señal moduladora.

Dado que la cadencia de una transmisión de datos binarios está dada por la cantidad de veces que una señal cambia de nivel, observaremos como podemos enviar dos unidades de información (dos bits), mediante un solo cambio de nivel.

Tengamos la siguiente secuencia de bits



Si a los bits de la cadena de información los tomamos de a dos, tendremos

10 | 11 | 01 | 00 | 10 | 01

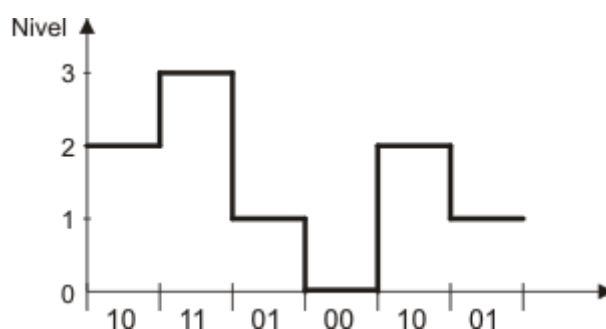
O sea que al tomar los bits de a dos de una señal binaria unipolar, hay solo cuatro combinaciones a la cuales se las denomina dibits.

00
01
10
11

Si a cada par de bits, le asignamos diferentes niveles o amplitudes de señal, se obtiene la siguiente tabla.

Dibit	Nivel Asignado
00	0
01	1
10	2
11	3

Los cuales se pueden representar de la siguiente manera

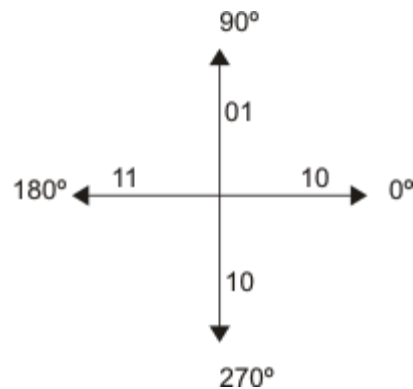


A los pulsos de las señales multinivel se los denomina dibits, puesto que en cada uno de ellos se envían dos bits. En forma similar se pueden obtener tribits, cuatribits, etc.

Este tipo de señales son las que se emplean en MPSK. Para el caso particular de $N = 4$, se tiene 4PSK o QPSK.

4PSK o QPSK

Como la señal portadora toma 4 valores posibles, se deberán producir 4 desplazamientos de fase que nos proveerán 4 fases distintas, correspondiendo cada uno de ellos a un dibit



diferente. Para este caso, gráficamente tendremos los siguientes desplazamientos de fase:

Si recordamos que la velocidad de transmisión V_t está dada por

$$V_t = \frac{1}{T} \log_2 N$$

Al aumentar N estamos incrementando la velocidad de transmisión para el mismo ancho de banda, puesto que no hemos aumentado la velocidad de modulación.

Por otra parte el periodo de un dibit será el doble del periodo de un bit, o sea

$$T_{\text{dibit}} = 2 T_{\text{bit}}$$

De donde se deduce que el ancho de banda para cada caso será

$$BW_{\text{dibit}} = \frac{1}{T_{\text{dibit}}} = \frac{1}{2 T_{\text{bit}}} = \frac{BW_{\text{bit}}}{2}$$

En consecuencia para la misma velocidad de transmisión V_t cuando se transmiten dibits, se requerirá la mitad del ancho de banda que para la transmisión de los bits individuales.

En el sistema 4PSK las señales son más sensibles a los efectos de interferencias y ello provoca un aumento en la tasa de error. Si se desea transmitir 4PSK con la misma tasa de error que en 2PSK, se debe aumentar en 3dB la relación señal ruido.

ASK - Desplazamiento de amplitud

ASK (Amplitude-shift keying), es una modulación de amplitud donde la señal moduladora (datos) es digital. Los dos valores binarios se representan con dos amplitudes diferentes y es usual que una de las dos amplitudes sea cero; es decir uno de los dígitos binarios se representa mediante la presencia de la portadora a amplitud constante, y el otro dígito se representa mediante la ausencia de la señal portadora. En este caso la señal moduladora vale

$$v_m(t) = v_m(t) = \begin{cases} 1 & \text{para un "1" binario} \\ 0 & \text{para un "0" binario} \end{cases}$$

Mientras que el valor de la señal de transmisión (señal portadora) es dado por

$$v_p(t) = V_p \sin(2\pi f_p t)$$

Donde V_p es el valor pico de la señal portadora y f_p es la frecuencia de la señal portadora.

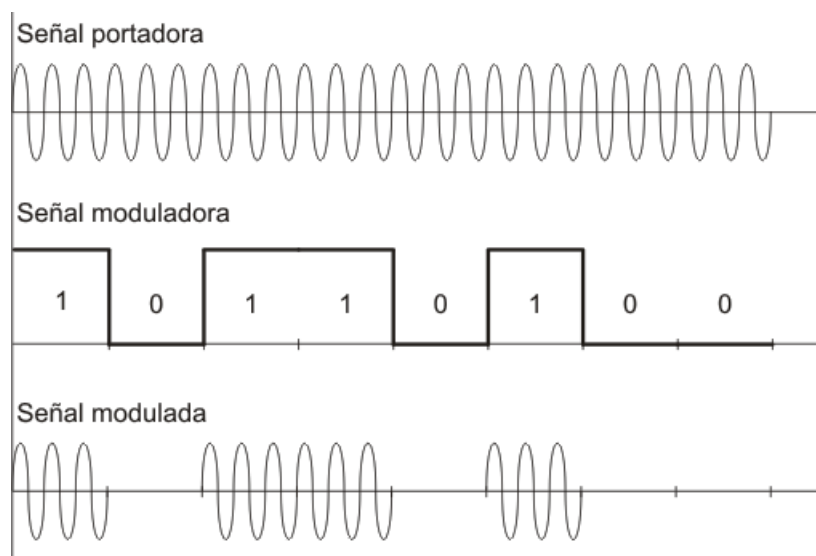
Como es una modulación de amplitud, la señal modulada tiene la siguiente expresión

$$v(t) = v_m(t) V_p \sin(2\pi f_p t)$$

como ya vimos la en señal moduladora $v_m(t)$ al ser una señal digital toma únicamente los valores 0 y 1, con lo cual la señal modulada resulta

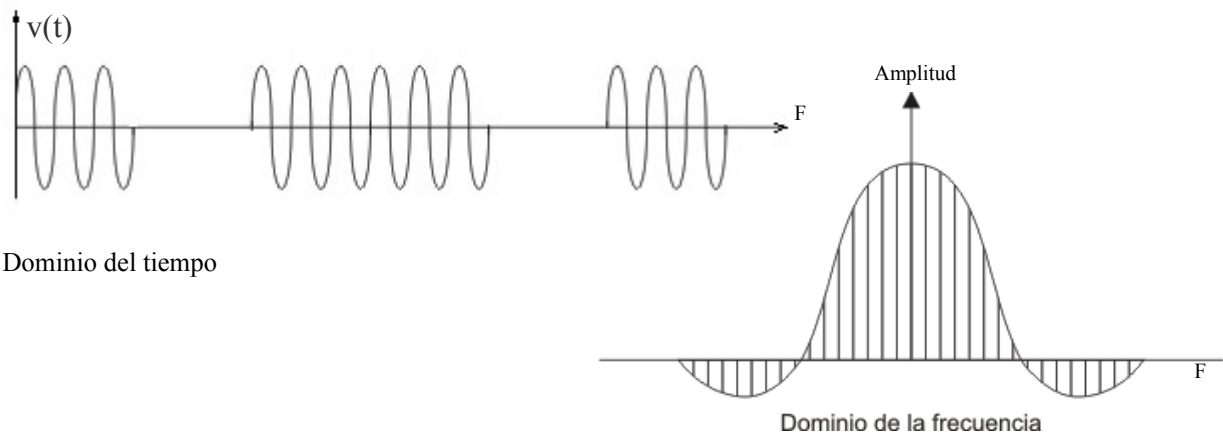
$$\begin{aligned} \text{para } v_m &= 0 & v_p(t) &= 0 \\ \text{para } v_m &= 1 & v_p(t) &= V_p \sin(2\pi f_p t) \end{aligned}$$

La señal modulada puede representarse gráficamente de la siguiente manera

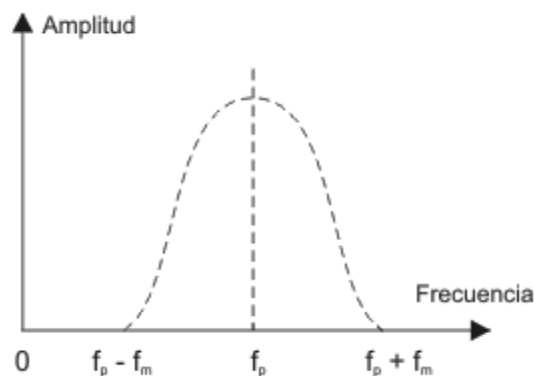


Debido a que la señal moduladora es una secuencia periódica de pulsos, su espectro de frecuencias obtenido por medio del desarrollo en serie compleja de Fourier tiene la característica de la función sinc .

Amplitud



Este caso es similar a la modulación de amplitud para señales analógicas, o sea que se produce un desplazamiento de frecuencias, que en este caso traslada todo el espectro de frecuencias representativo de la secuencia de pulsos periódicos.



Por lo tanto concluimos que el ancho de banda necesario para esta transmisión es mayor que el requerido para modulación de amplitud, debido a que la cantidad de señales de frecuencias significativas (las del primer tramo) que contiene el espectro, dependiendo dicha cantidad de la relación entre el período y el tiempo de duración de los pulsos.

La modulación ASK tiene el inconveniente de que es muy sensible al ruido que se acumula a lo largo del canal, por lo que la relación señal-ruido (S/N) a la entrada del receptor puede ser tan baja, que la probabilidad de error no sea tolerable. Esta es la causa por la que no se utiliza la modulación ASK para transmitir datos a alta velocidad a menos que el medio de transmisión garantice una adecuada señal-ruido (S/N), como en el caso de la fibra óptica.

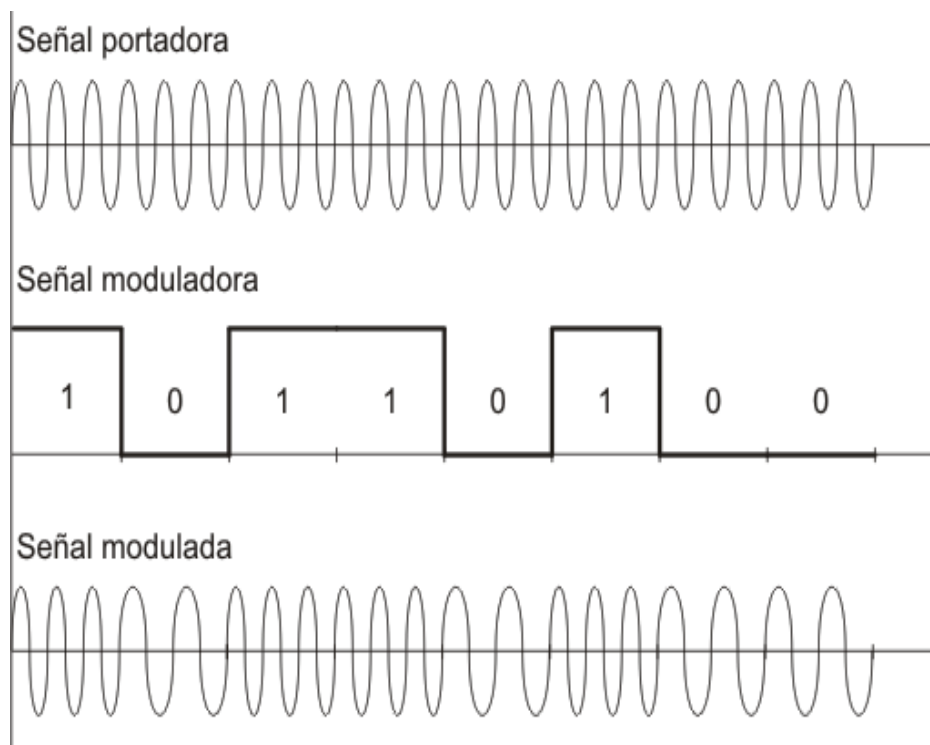
En los transmisores con LED, la expresión de la señal modulada sigue siendo válida. Es decir, un elemento de señal se representa mediante un pulso de luz, mientras que el otro se representa mediante la ausencia de luz. Los transmisores láser tienen normalmente un valor de desplazamiento, "bias", que hace que el dispositivo emita una señal de alta intensidad para representar un elemento y una señal de menor amplitud para representar al otro.

FSK - Desplazamiento de frecuencia

FSK (Frequency-shift keying), es una modulación de frecuencia donde la señal moduladora (datos) es digital. Los dos valores binarios se representan con dos frecuencias diferentes (f_1 y f_2) próximas a la frecuencia de la señal portadora f_p .

$$v(t) = \begin{cases} V_p \sin(2\pi f_1 t) & \text{para un "1" binario} \\ V_p \sin(2\pi f_2 t) & \text{para un "0" binario} \end{cases}$$

Generalmente f_1 y f_2 corresponden a desplazamientos de igual magnitud pero en sentidos opuestos de la frecuencia de la señal portadora.



El índice de modulación tiene gran incidencia en la señal modulada y determina los dos tipos fundamentales de FSK.

FSK de banda reducida o banda angosta

$$I_m = Df / f_m$$

donde I_m = índice de modulación (sin unidades)

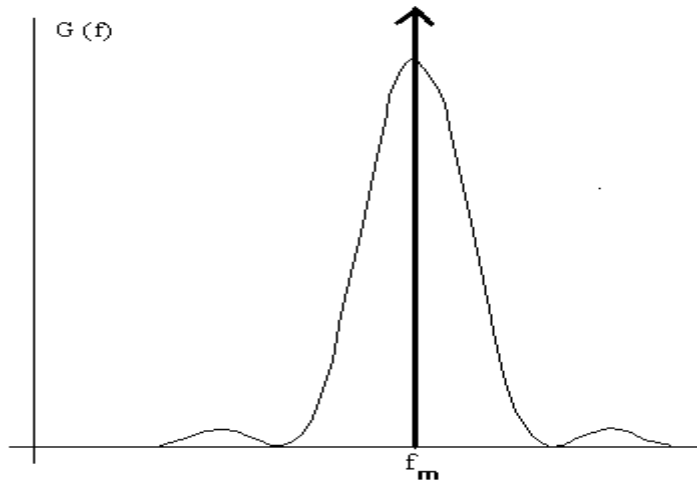
Df = desviación de frecuencia (Hz)

f_m = frecuencia modulante (Hz)

En un FSK binario el índice de modulación, por lo general, se mantiene por debajo de 1, produciendo así un espectro de salida de FM de banda relativamente angosta. Debido a que el FSK

binario es una forma de modulación en frecuencia de banda angosta, el mínimo ancho de banda depende del índice de modulación. Para un índice de modulación entre 0.5 y 1, se generan dos o tres conjuntos de frecuencias laterales significativas.

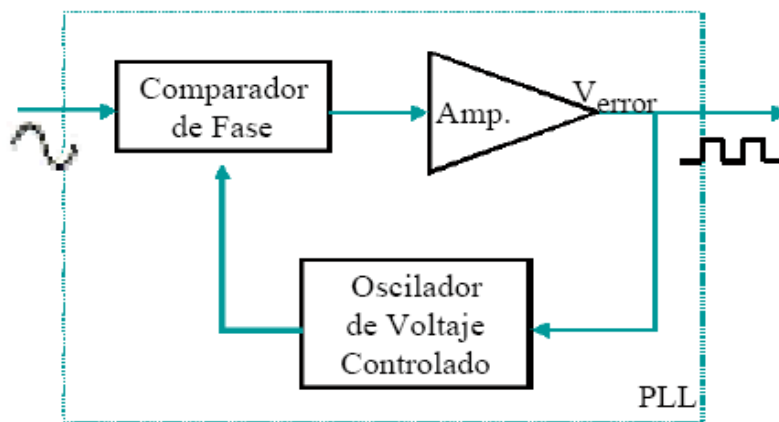
Su espectro de frecuencias es similar al de ASK. La única diferencia es que en este caso, la amplitud de las armónicas se ve afectada por la frecuencia o sea, se tiene una pequeña modulación de amplitud, superpuesta a la FSK.



El ancho de banda necesario para FSK de banda angosta es igual al necesario para ASK.



Modulador FSK



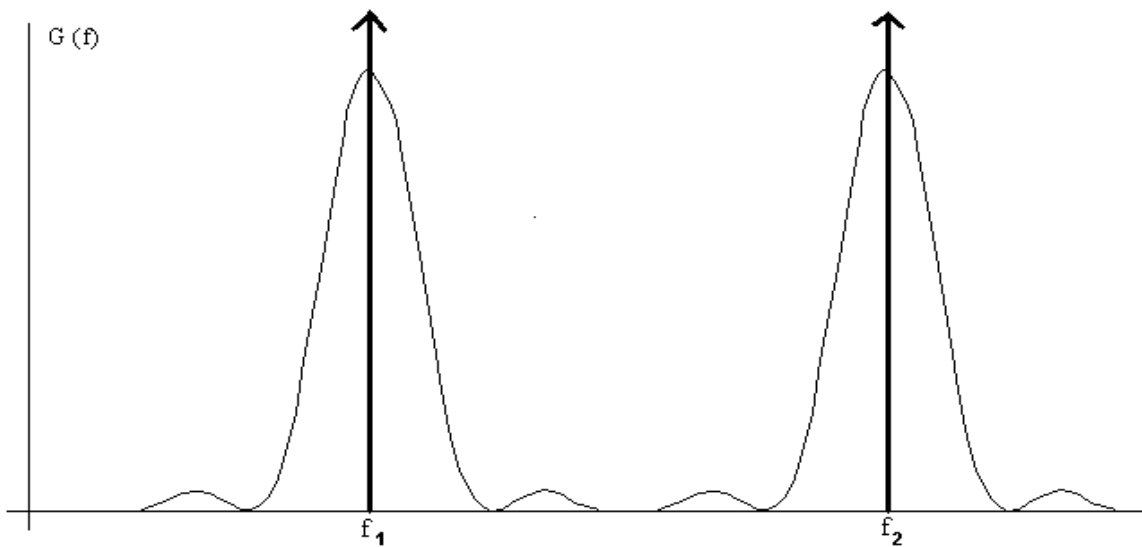
De modulador FSK

FSK de banda ancha.

Las ventajas de FSK sobre ASK se hacen notables cuando el índice de modulación es grande es decir $m > 1$.

Con esta condición se aumenta la protección contra el ruido y las interferencias, obteniendo un comportamiento más eficiente respecto a ASK, puesto que en este caso la pequeña modulación de amplitud mencionada en el caso de FSK de banda angosta, se hace despreciable.

La desventaja es que es necesario un mayor ancho de banda, debido a la mayor cantidad de bandas laterales (un par por cada armónica).



MODULACIÓN QAM

La modulación de amplitud en cuadratura, en inglés *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)*, es una modulación digital avanzada que transporta datos cambiando la amplitud de dos ondas portadoras. Estas portadoras tienen igual frecuencia pero están desfasadas $\pi/2$ rad (90°) entre sí. Por lo que una señal modulada en QAM está compuesta por la suma lineal de dos señales previamente moduladas en DBL-PS (Doble Banda Lateral - con Portadora Suprimida).

Se utiliza para la transmisión de datos a alta velocidad por canales con ancho de banda restringido. Ya que el ancho de banda de la señal modulada en QAM es igual al mayor de los anchos de banda de las señales que la componen.

La amplitud y la fase de una señal pueden modularse simultáneamente o por separado, aunque esto resulta difícil de generar y principalmente de detectar. En vez de ello, es muy práctico separar la señal en dos componentes independientes conocidos como I (componente "en fase") y Q (componente "en cuadratura"), ambos ortogonales entre sí.

Cuando nos referimos a comunicaciones digitales, es común expresar la modulación en términos de estas dos componentes, razón por la cual, la representación de una constelación bidimensional I-Q es particularmente útil y puede asociarse a la mayor parte de los métodos de modulación digital.

En una "constelación I-Q", la componente "en fase" se proyecta en el eje de las abscisas (eje x) y la componente "en cuadratura" se proyecta en el eje de las ordenadas (eje y) de un plano cartesiano. Se dice que una señal estará "en fase" cuando su ángulo de fase sea de cero grados (situada en el eje I) y que una señal estará "en cuadratura" cuando se encuentre desfasada 90° respecto a la señal en fase (situada en el eje Q). Véase la Figura 1.

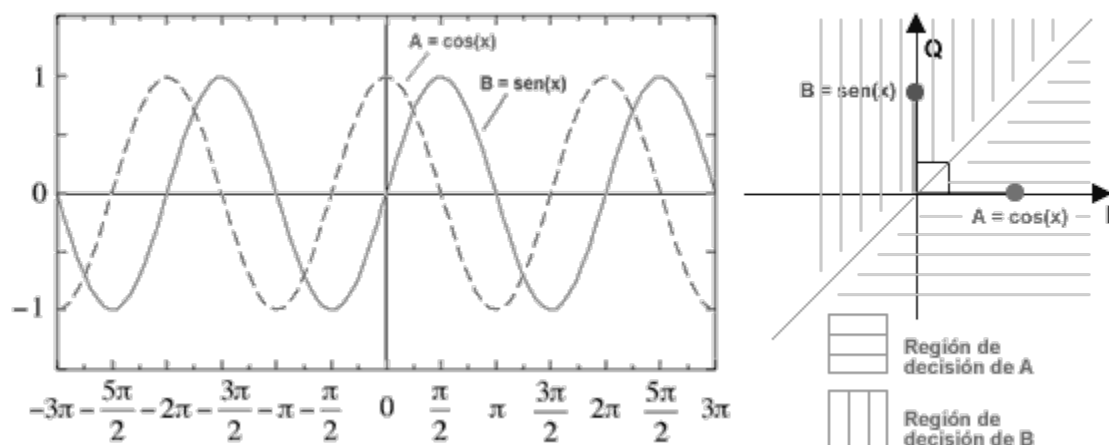


Figura 1. Proyección de una señal "en fase" (coseno) y una señal "en cuadratura" (seno) en la "constelación I-Q". Nótese que entre ellas existe un desfase de 90° .

En esta representación I-Q, cada señal que se mapea en una constelación tendrá asociada una posición precisa. (Esto es, un punto de coordenadas (I,Q), y permite una visualización muy clara del ambiente de modulación digital que se utilice, resulta muy práctico representar una fuente discreta de señales a partir de su "espacio de señal" o "constelación".

Una "constelación" es una representación geométrica de señales en un espacio de n dimensiones, en donde se visualizan todos los símbolos de salida posibles que puede generar un modulador. Gracias a que en una constelación cada símbolo tiene asociado un valor de magnitud y uno de fase (como sucede en una representación polar), salvo en el caso de la modulación FSK, todos los demás esquemas de modulación digital pueden representarse en un plano de dos dimensiones.

Es en base a esta posición es que los equipos receptores pueden determinar qué señal se transmitió. Para ello, cada señal mapeada en la constelación tiene asociada una "región de decisión". Ver Figura 1.

Sin embargo, conforme una señal se propaga a través del canal de comunicación, ésta se verá afectada por ruido, provocando una modificación en la posición de los símbolos mapeados en la constelación.

Cuando uno de estos símbolos se ubica más allá de la "región de decisión" que le corresponde, éste se confundirá con alguno de los símbolos adyacentes y, en consecuencia, provocará un error de bits.

En la modulación digital QAM (pronunciado "cuam") es un esquema de modulación multinivel en donde se envía una de n señales, con distintas combinaciones de amplitud y fase.

Utilizando múltiples niveles, tanto en la modulación en amplitud como en la modulación en fase, es posible la transmisión de grupos de bits, de manera que cada uno de estos grupos será representativo de un conjunto nivel-fase característico de la portadora de la señal, mismo que dará cabida a un símbolo.

Una de las características principales de la modulación m-QAM es que modula la mitad de los símbolos con una frecuencia y la otra mitad con la misma frecuencia, pero desfasada 90° .

El resultado de las componentes después se suma, dando lugar a la señal m-QAM. De esta forma, QAM permite llevar dos canales en una misma frecuencia mediante la transmisión ortogonal de uno de ellos con relación al otro. Como ya se ha dicho, la componente "en cuadratura" de esta señal corresponderá a los símbolos modulados con una frecuencia desfasada 90° , y la componente "en fase" corresponde a los símbolos modulados sobre una portadora sin fase.

Obsérvese en la Figura 2 las constelaciones para los esquemas de modulación 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM. Note que para cada uno de ellos se varían los niveles de amplitud y de fase de la señal.

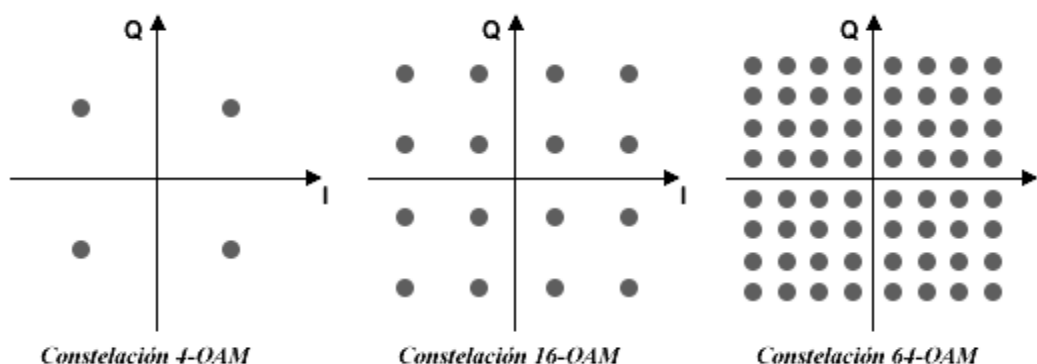


Figura 2. Ejemplos de constelaciones QAM.

Utilizaremos el caso concreto de la modulación 16-QAM para explicar sus características principales y la forma en que se produce ésta.

16-QAM

Permite contar con 16 estados diferentes, los mismos que estarán determinados por el número de símbolos mapeados en su constelación correspondiente. Debido a que $16 = 4^2$, cada uno de estos símbolos puede representarse mediante cuatro bits, dos de ellos correspondientes a la componente "en cuadratura" (portadora desfasada), y los dos restantes, correspondientes a la componente "en fase" (portadora con fase cero) de la señal. Puesto que existen estas dos componentes, cada una representada por dos bits en 16-QAM, es posible transmitir 4 posibles niveles de amplitud para cada componente, lo que supone que, por el efecto de la cuadratura, pueden transmitirse 16 estados. Para comprender mejor lo anterior examine, en la Figura 3, el diagrama de bloques que define la operación de un modulador 16-QAM. Nótese que, para el caso de la modulación 16-QAM, cada símbolo estará formado por cuatro bits: un bit de polaridad y un bit de nivel para la componente Q y un bit de polaridad y otro más de nivel para la componente I. Añadiendo más bits de nivel a las

componentes I y Q del modulador se obtendrán formatos QAM más eficientes como 64-QAM (2 bits de nivel y un bit de polaridad por componente) y 256-QAM (3 bits de nivel y un bit de polaridad por componente).

La serie de bits (información digital) que ingresa al modulador deberá pasar primero por un divisor de bits. El divisor de bits, que en este caso es de cuatro bits por tratarse de una modulación 16-QAM, toma los primeros bits de la serie y los enruta, de manera simultánea y en paralelo, hacia el conversor digital-analógico correspondiente.

Supóngase que al divisor ingresan los cuatro primeros bits de la secuencia binaria 0010110, por lo que los dos primeros bits (0,0) son enrutados como bits en cuadratura y los dos siguientes (1,0) como bits en fase. En cada caso, el primero de este par de bits corresponderá al bit de polaridad, y el segundo, al de nivel.

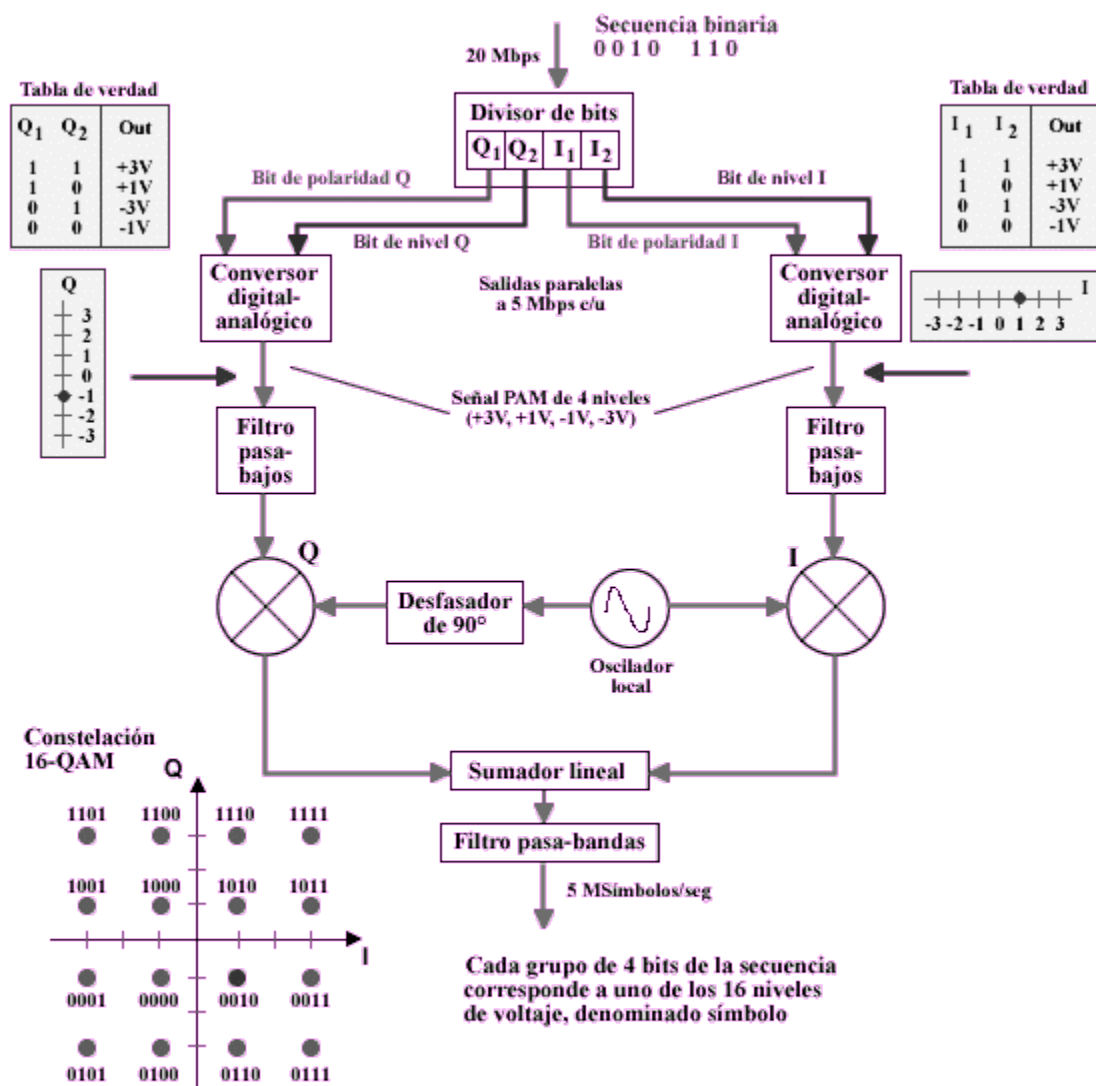


Figura 3. Diagrama de bloques de un modulador 16-QAM (ejemplo de operación).

Dirijamos primero nuestra atención hacia los bloques de modulación "en cuadratura" del diagrama. El primero de los bits del par que ingresa es un cero, de acuerdo a nuestra secuencia ejemplo. Un cero en el primer bit indicará polaridad negativa, mientras que un uno representará polaridad positiva. En el caso del bit de nivel, la amplitud estará determinada por el conversor digital-analógico. Para determinar el valor que representa un par de bits, es necesario observar la tabla de verdad que define las reglas "lógicas" que corresponden a la operación del conversor (ver

Figura 3).

Continuando con nuestro ejemplo, un cero indicará un nivel de "1", mientras que un uno representará un nivel de "3". De esta forma, el primer par de bits que ingresa por el bloque en cuadratura representará un nivel de $-1V$, uno de los cuatro posibles niveles que puede tomar la señal a la salida del conversor digital-analógico. La señal que se obtiene es filtrada a través de un dispositivo pasa-bajos y posteriormente enviada a un mezclador, cuya función es modular la señal en amplitud sobre una portadora desfasada 90° respecto a la portadora utilizada en el modulador de la componente "en fase".

Enfoquémonos ahora en los bloques del modulador "en fase" del diagrama. Una vez que el divisor enruta el segundo par de bits (1,0) de la secuencia ejemplo al conversor digital-analógico, si la tabla de verdad que define la operación de este último es igual a la del conversor del bloque "en cuadratura", el par de bits representaría una señal con nivel de $+1V$ a la salida del conversor. Similarmente, esta señal es filtrada y modulada en amplitud con una portadora que conserva su fase original.

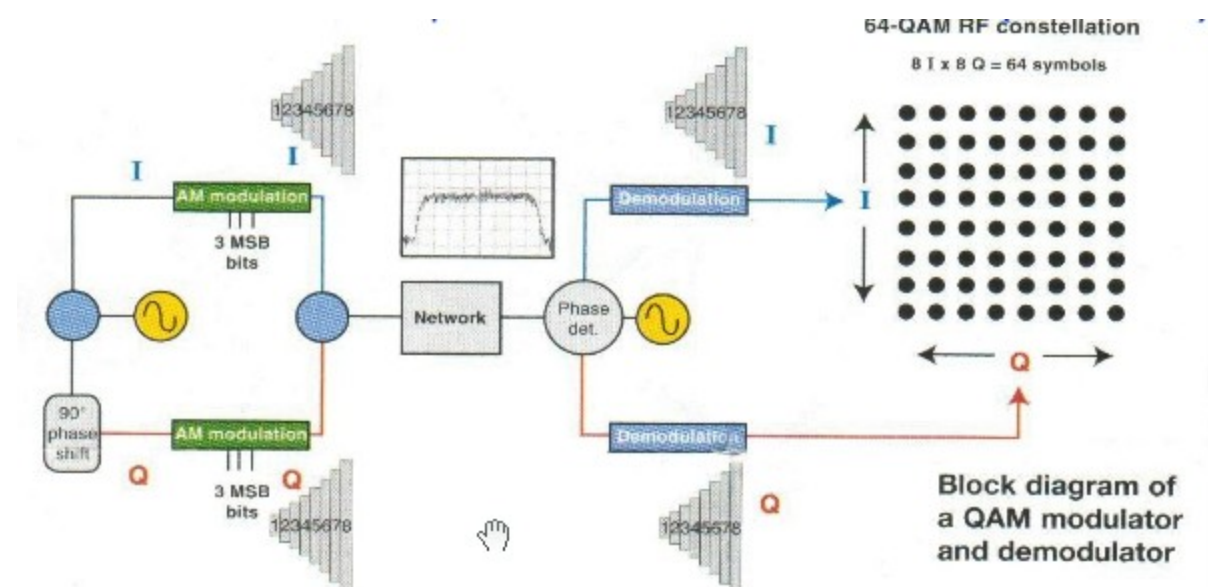
Las señales que representan las componentes "en fase" y "en cuadratura" son entonces llevadas a un sumador lineal, donde los cuatro bits (0,0,1,0) se combinan para dar lugar al símbolo correspondiente (recuérdese que, en el caso de la modulación 16-QAM, cada símbolo mapeado en la constelación estará formado por 4 bits). Sin embargo, ¿a qué símbolo de la constelación 16-QAM corresponderán los primeros cuatro bits del ejemplo? Los niveles a la salida del convertidor digital-analógico responden a esta incógnita.

Partiendo del origen de la constelación, ubique una marca en la dirección negativa del eje Q (componente "en cuadratura") y una marca en la dirección positiva del eje I (componente "en fase"). Estas marcas corresponden a los niveles de salida del conversor "en cuadratura" ($-1V$) y del conversor "en fase" ($+1V$), respectivamente.

Para los bits que siguen en la secuencia de nuestro ejemplo se deberá repetir el procedimiento anterior.

Como puede notarse, el mecanismo de operación de un modulador QAM es sencillo y su entendimiento nos permite determinar la ubicación de un símbolo en su constelación. A partir de este punto podemos también comprender por qué la posición de un símbolo en su constelación varía respecto a su ubicación teórica en presencia de ruido.

Extender estas ideas hacia un formato de modulación QAM más eficiente como, por ejemplo, 64-QAM o 256-QAM, resulta trivial.



Para entender y comparar la eficiencia de los diferentes métodos de modulación digital es importante primero conocer la diferencia entre tasa de bits y tasa de símbolos.

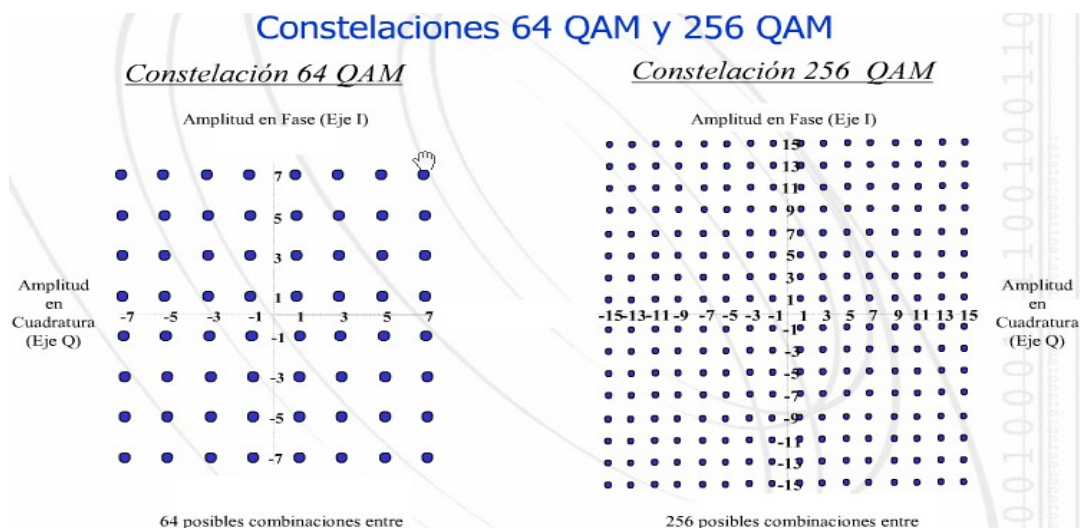
El ancho de banda de una señal que viaja a través de un determinado canal de comunicaciones depende de su tasa de símbolos, no de su tasa de bits. Aunque estos dos términos suelen confundirse, es muy sencillo diferenciarlos. Como su nombre lo indica, la tasa de bits se refiere única y exclusivamente a bits.

La tasa de símbolos parte del hecho que un conjunto de bits forma un símbolo, por lo que esta medida de eficiencia no es más que el cociente de la tasa de bits entre el número de bits que conforma un símbolo.

Así, suponiendo que la tasa de bits de un sistema de comunicación es de 20 Mbps, la modulación 16-QAM ofrecería una tasa de 5 Msímbolos/seg, pues sabemos que, bajo este esquema, un símbolo se conforma por 4 bits. Mientras mayor sea el número de bits que pueda transmitirse por cada símbolo, podrá alojarse la misma cantidad de información en un ancho de banda menor.

El término "baud" es comúnmente utilizado para referirnos a una tasa de símbolos.

Cuando la modulación es binaria, es decir, que cada símbolo puede ser representado por un bit, la tasa de símbolos es igual a la tasa de bits.



Si se comparan diferentes formatos de modulación QAM con cualquier otro esquema de modulación binaria, nos damos cuenta que 16-QAM es cuatro veces más eficiente en el uso del ancho de banda, en tanto que 64-QAM y 256-QAM son, respectivamente, 6 y 8 veces más eficientes. No deberá olvidarse que existe un compromiso importante entre eficiencia en el uso del ancho de banda y la susceptibilidad al ruido de las señales transmitidas a través del canal de comunicación.

Las "curvas de cascada" permiten visualizar gráficamente el desempeño de un método de modulación digital. Estas gráficas no se refieren más a la eficiencia en el uso del ancho de banda, sino a la probabilidad de que un símbolo sea recibido con error, de acuerdo con la relación señal a ruido correspondiente a un determinado sistema de comunicación.

Las "curvas de cascada" se obtienen al graficar la probabilidad de error de un símbolo, P_e versus E_b/N_0 .

E_b/N_0 se refiere al cociente de la energía de un bit y la densidad de potencia promedio del ruido y equivale a la relación señal a ruido que se utiliza en los sistemas analógicos.

En la determinación de estas gráficas se deberá asumir que los sistemas se encuentran en presencia de Ruido Blanco Aditivo Gaussiano.

La Figura 6 muestra las "curvas de cascada" para modulación QAM de 4, 16 y 64 estados, además de un comparativo de eficiencia entre estos formatos de modulación y su equivalente en M-PSK. Nótese que conforme aumenta el número de estados en ambas alternativas de modulación, su

probabilidad de error también aumenta (para un mismo valor de E_b/N_0).

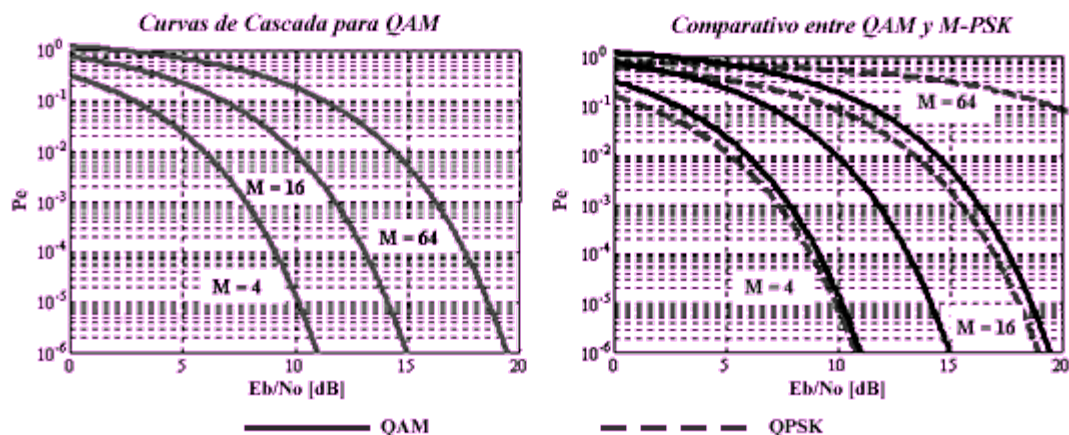


Figura 6. "curvas de cascada" para modulación QAM y M-PSK

Obsérvese también que el desempeño de la modulación QAM es superior al de la modulación MPSK, aunque esto sólo sucede cuando se trata de un canal de comunicación lineal.

Cada formato de modulación digital conlleva ventajas y desventajas, además de que algunos de estos son más adecuados que otros para ofrecer determinados servicios. En el caso particular de las redes de cable, es una práctica común emplear moduladores 64-QAM para los servicios digitales de video y de datos ofrecidos en dirección al usuario y modulación 16-QAM para el retorno.

Conforme comiencen a ofrecerse nuevos servicios digitales como telefonía, video por demanda y otras aplicaciones interactivas, será necesario hacer un uso más eficiente del espectro, lo que nos invita a pensar en formatos de modulación como 256-QAM. Aun cuando algunos de los equipos terminales del suscriptor, como cajas decodificadoras y cablemodems, ya están habilitados para recibir información en 256-QAM, la migración hacia una red que permita transmisiones más eficientes es aún considerada un reto.

Distintos operadores ya han comenzado a utilizar, de manera exitosa, modulación 256-QAM. Otros pretenden llegar más lejos y se atreven a descubrir los pormenores de la modulación 1024-QAM.

Tasa de Error de Modulación

MER(Modulation Error Rate/Tasa de Error de Modulación)

La Tasa de Error de Modulación o, por sus siglas inglesas, MER define un factor que nos informa de la exactitud de una constelación digital. Esta es una herramienta cuantitativa que permite valorar cómo es de buena una señal modulada digital. Es el equivalente a la información que aporta SNR (Relación señal/ruido), para las modulaciones analógicas. Al igual que esta puede ser expresado en dB o en tanto por cien. El cálculo de este factor en transmisión, lleva implícita la demodulación de la señal para la evaluación. En recepción, este parámetro se determina tras la demodulación propia de la recepción de los datos. En ambos casos, será necesario el uso de la constelación de transmisión normalizada como referencia.

Definición

La MER puede definirse, gráficamente, como el "desparrame" de puntos respecto al valor esperado. La diferencia entre esos valores se aprecia observando la separación entre dos vectores: uno señalando a un punto ideal de la constelación (vector ideal), y el otro señalando desde un punto medido hacia el punto ideal (vector de error). Si usamos este resultado en el denominador en un cociente, con la magnitud de la señal promedio en el numerador, el resultado será la MER.

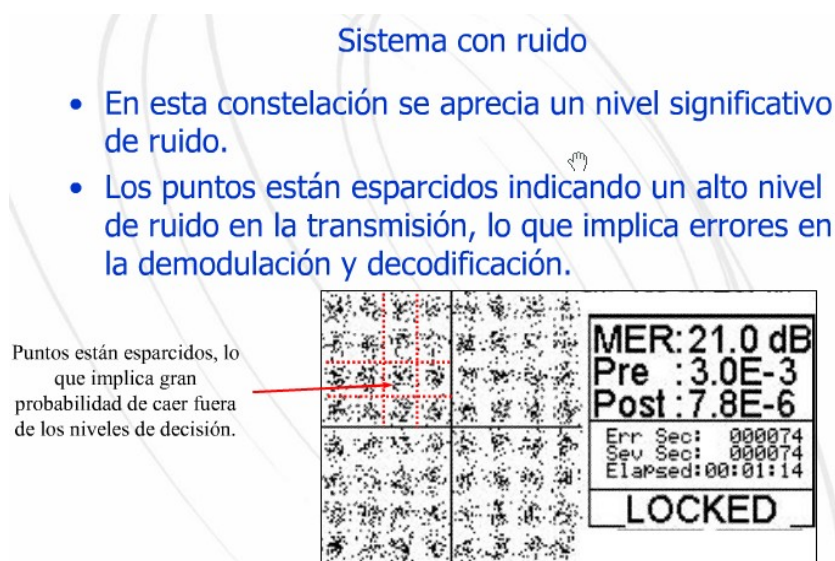
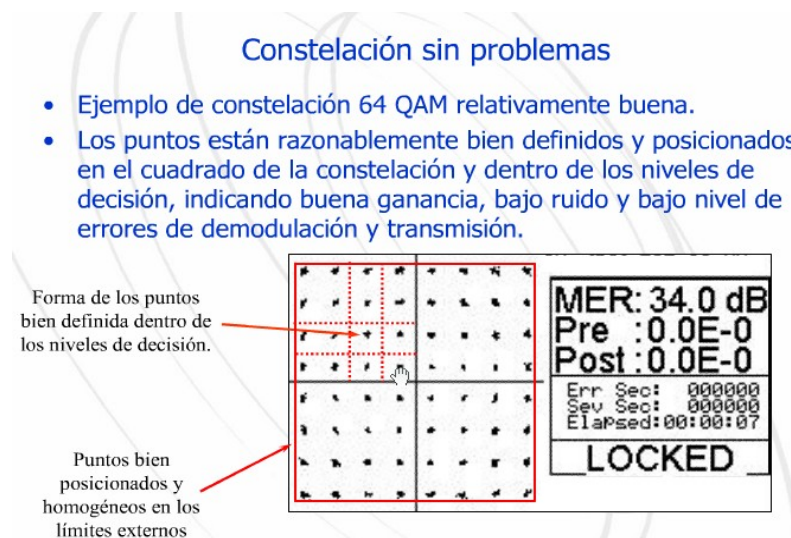
Analíticamente, para el caso de los decibelios se puede hallar como:

$$MER(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{error}} \right)$$

donde P_{error} es error cuadrático medio y P_{signal} es el valor cuadrático medio de la señal transmitida.

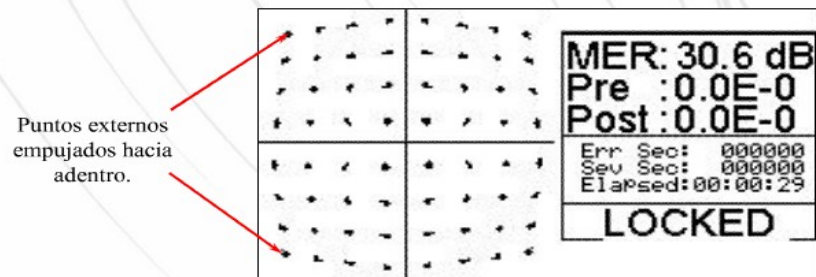
De forma análoga a lo expresando antes, para obtener el valor de la MER en porcentaje:

$$MER(\%) = \sqrt{\left(\frac{P_{error}}{P_{signal}} \right)} * 100\%$$



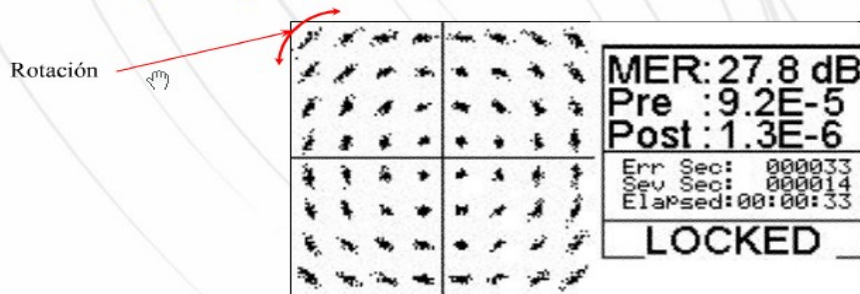
Compresión de Ganancia

- Si los puntos en los extremos están empujados hacia adentro, mientras que los intermedios no son afectados, indica que la señal tiene una compresión de ganancia (se está operando en el inicio de la zona de saturación de algún componente).
- La compresión de ganancia puede ser causada por los amplificadores de RF o FI, Convertidores Up/Down o ecualizadores de FI.



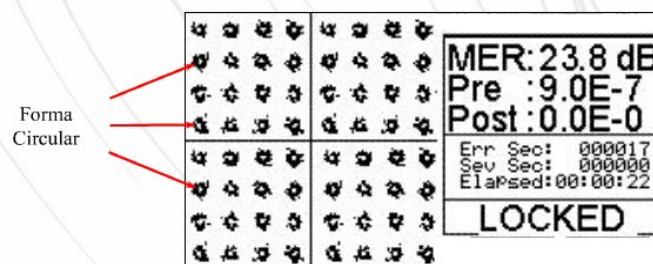
Ruido de fase

- Si aparece una rotación en los extremos de la constelación, significa que hay un excesivo ruido de fase.
- El ruido de fase puede ser causado por los headend de los Down/Up converters.
- Al haber ruido en la fase, significa que la cuadratura (Desfase en 90° no será perfecto).



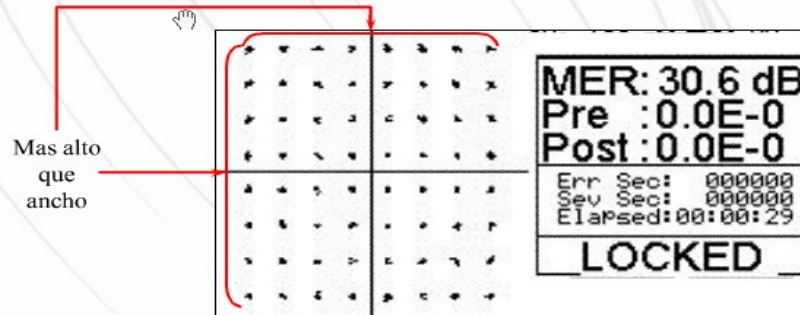
Interferencia Coherente

- Si la forma de los puntos aparece como un círculo, el problema corresponde a Interferencia Coherente (un tono está interfiriendo la señal).
- Ejemplos de interferencia coherente son CTB, CSO, espúreas e ingress.



Desbalance I Q

- El desbalance I Q es causado por diferencias en las ganancias de los canales I y Q..
- La constelación es mas ancha que alta (o vicerersa).
- Esto indica que hay problemas con los amplificadores headend de banda base o los filtros.



Modulación de Pulsos

Introducción

Las modulaciones de amplitud, frecuencia y fase tratadas en las unidades anteriores se designan genéricamente como *modulaciones de onda continua*, en que se varían los parámetros de una portadora senoidal continua de acuerdo a una señal moduladora de información.

En la modulación de pulsos, lo que se varía es alguno de los parámetros de un tren de pulsos uniformes, bien sea su amplitud, duración o posición. En este tipo de modulación se distinguen dos clases:

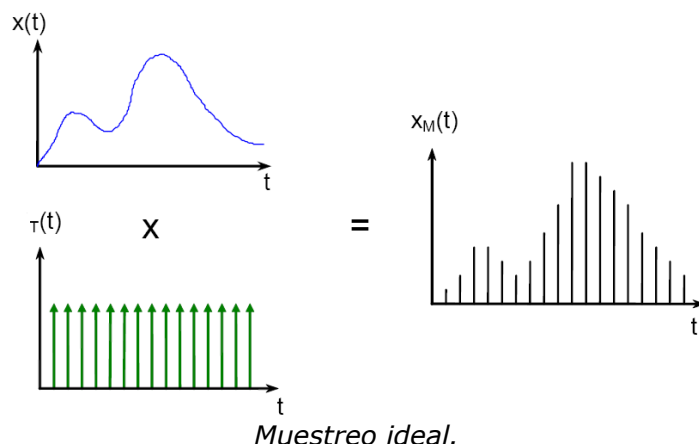
Modulación analógica de pulsos, en que la información se transmite básicamente en forma analógica, pero la transmisión tiene lugar a intervalos discretos de tiempo y

Modulación digital de pulsos, en que la señal de información es discreta, tanto en amplitud como en tiempo, permitiendo la transmisión digital como una secuencia de pulsos codificados, todos de la misma amplitud. Este tipo de transmisión no tiene contraparte en los sistemas de onda continua. En la modulación digital, la señal de información es un flujo binario compuesto por señales *binarias*, es decir cuyos niveles de voltaje sólo son dos y corresponden a ceros y unos. En la modulación analógica de pulsos, la señal no necesariamente es de dos niveles, sino que el nivel de la señal puede tener cualquier valor real, si bien la señal es *discreta*, en el sentido de que se presenta a intervalos definidos de tiempo, con amplitudes, frecuencias, o anchos de pulso variables. Los esquemas de modulación de pulsos son varios, los más importantes:

- Modulación por amplitud de pulsos (PAM).
- Modulación por duración o anchura de pulsos (PWM o PDM).
- Modulación por posición de pulsos (PPM).
- Modulación por codificación de pulsos (PCM)

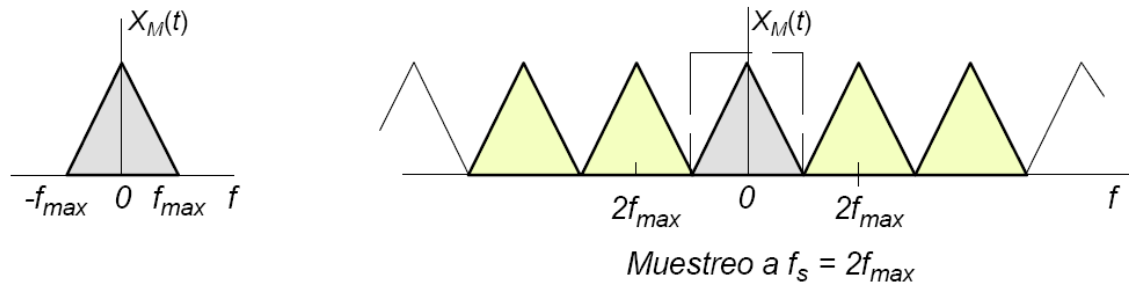
Muestreo

El proceso de *muestreo* es común a todos los sistemas de modulación de pulsos y por lo general, su descripción se hace en el dominio del tiempo. Mediante el muestreo, una señal analógica continua en el tiempo, se convierte en una secuencia de muestras discretas de la señal, a intervalos regulares. El teorema de muestreo establece que: *Una señal continua, de energía finita y limitada en banda, sin componentes espectrales por encima de una frecuencia f_{max} , queda descrita completamente, especificando los valores de la señal a intervalos de $1/2f_{max}$ segundos.* La señal así muestreada puede recuperarse mediante un filtro pasa bajos. La frecuencia $2f_{max}$ se designa como frecuencia de Nyquist.



Una señal discreta como se muestra en la figura y cuya amplitud corresponde a la de la señal original en los puntos de muestreo, se dice también que la señal resultante está modulada por amplitud de pulsos (PAM).

Por otra parte sabemos que la transformada de Fourier del tren de impulsos en el dominio del tiempo es otro tren de impulsos en el dominio de frecuencia. Por lo tanto el espectro de la señal original se reproduce periódicamente en la forma mostrada en la figura.

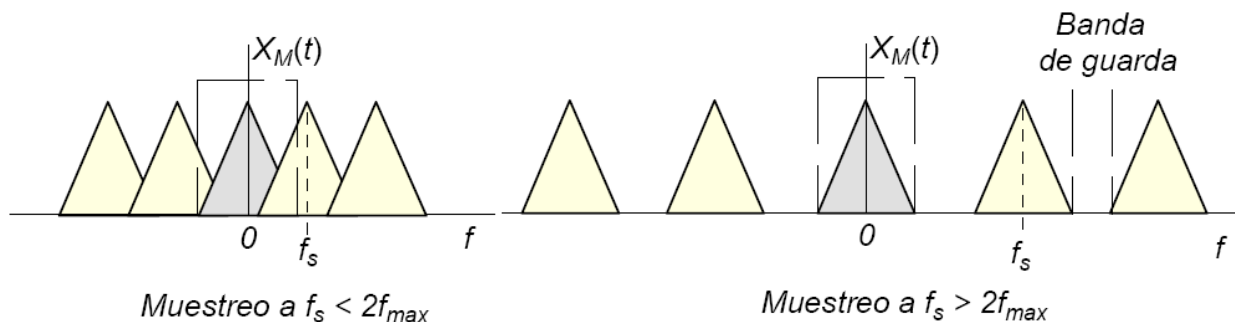


Espectro de la señal muestreada.

Si el período de los impulsos es $T = 1/2 f_{max}$, los espectros no se solapan.

Cuando la frecuencia de muestreo f_0 es menor que el doble de la máxima frecuencia de la señal, el intervalo de muestreo T aumenta y los espectros se solapan.

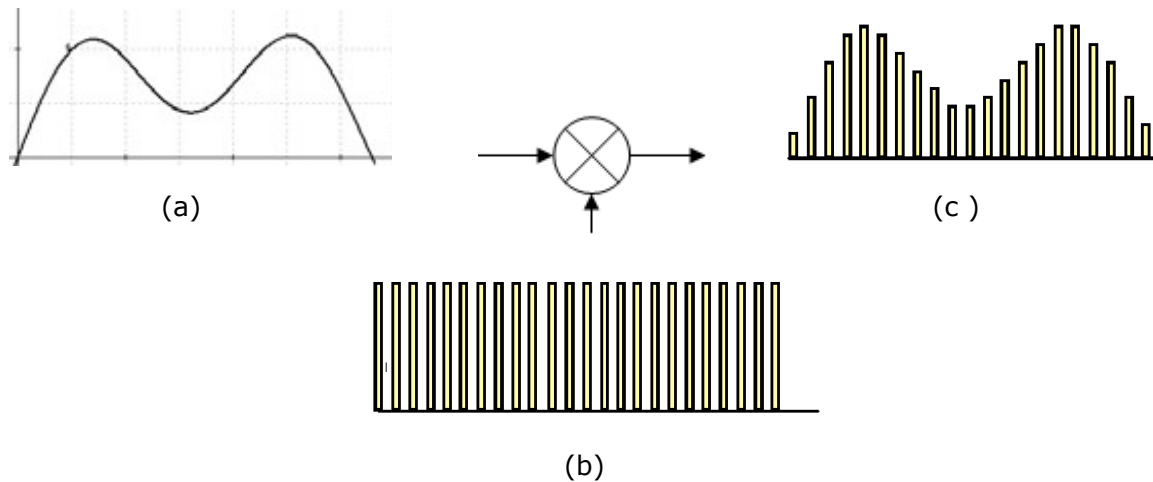
Al recuperar la señal en banda base mediante un filtro pasa bajos, se produce, con señales analógicas, distorsión en altas frecuencias y, con señales digitales, interferencia entre símbolos. Si por otra parte, la frecuencia de muestreo es mayor que $2f_{max}$, los espectros quedan separados por una *banda de guarda* que será mayor cuanto mayor sea la frecuencia de muestreo y que garantiza la posibilidad de recuperar el espectro de la señal original sin distorsión apreciable como se ilustra en la figura.



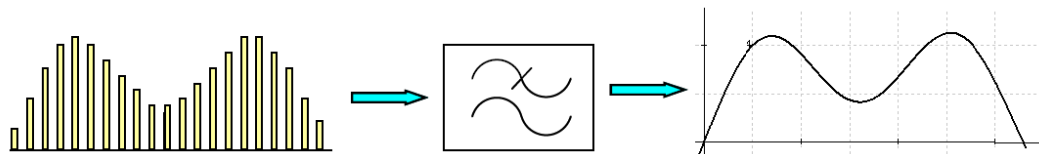
Si la frecuencia de muestreo es inferior a la frecuencia de Nyquist ($2f_{max}$) se produce solapamiento de las bandas adyacentes, lo que produce un tipo de distorsión designado como *aliasing*. Para evitarlo, antes del muestreo se inserta un filtro pasa bajos (filtro antialiasing) con atenuación grande a frecuencias superiores a f_{max} y el muestreo se realiza a una frecuencia ligeramente mayor que la de Nyquist, lo que produce una *banda de guarda* entre los espectros vecinos, facilitando el filtrado en la recuperación de la señal original.

Modulación por amplitud de pulsos

Este tipo de modulación es la consecuencia inmediata del muestreo de una señal analógica. Si una señal analógica, por ejemplo de voz, se muestrea a intervalos regulares, en lugar de tener una serie de valores continuos, se tendrán valores discretos a intervalos específicos, determinados por la, que debe ser como mínimo del doble de la frecuencia máxima de la señal muestreada. Esto se ilustra esquemáticamente en la figura.



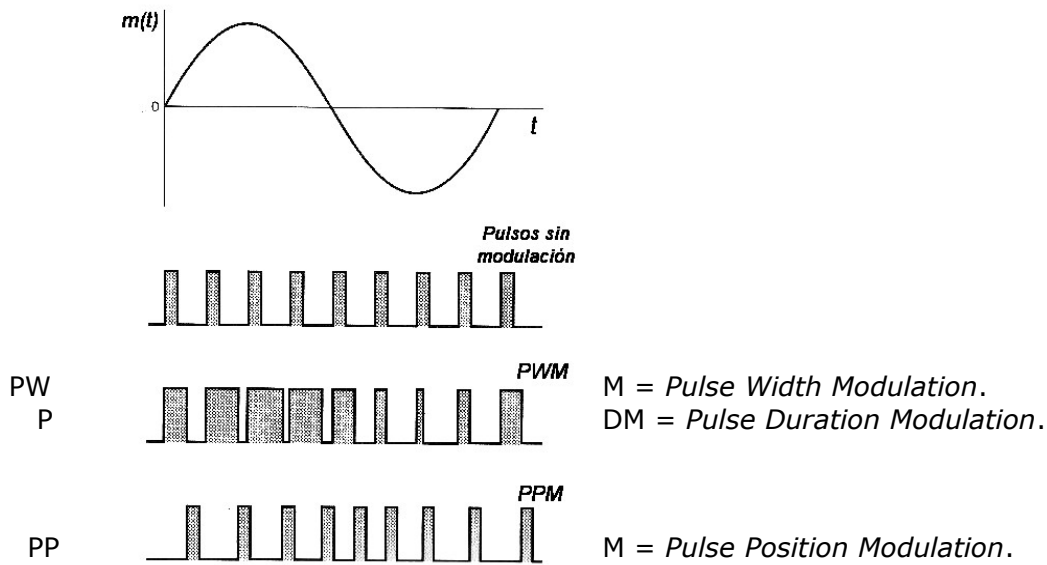
En la figura anterior, una señal analógica (a), se multiplica, por ejemplo mediante un mezclador, por un tren de pulsos (b), de amplitud constante y se tiene como resultado un tren de pulsos (c) modulado en amplitud. La envolvente de este tren de pulsos modulado se corresponde con la señal analógica. Para recuperar ésta, basta con filtrar con un pasa bajos el tren de pulsos (c), como se ilustra en la figura.



La transmisión de las señales moduladas por amplitud de pulsos impone condiciones severas respecto a las respuestas en magnitud y fase del sistema, a causa de la corta duración de los pulsos. Por otra parte, el comportamiento de un sistema PAM respecto al ruido nunca puede ser superior al de transmisión en banda base. Sin embargo, la modulación por amplitud de pulsos es el primer paso indispensable en la conversión de señales analógicas a digitales, entendiéndose aquí por señal digital aquella que solamente tiene dos niveles. La señal PAM es una señal *discreta*, no necesariamente digital.

Tipos de modulaciones analógicas de pulsos

Además de la modulación por amplitud de pulsos, pueden variarse otros parámetros del tren de pulsos sin modulación: la duración de los pulsos y su posición relativa, como se ilustra en la figura.



Modulaciones por duración y posición de pulsos.

Modulación por duración o anchura de pulsos (PWM o PDM).

En este caso, las muestras de la señal se emplean para variar la anchura o duración de los pulsos. Aunque no es muy utilizado, en la actualidad se emplea en transmisores modulados en amplitud, en que la modulación se realiza primero en esta forma. Esta técnica permite aumentar la eficiencia del transmisor.

Este tipo de modulación se utiliza genéricamente en las fuentes de alimentación conmutadas de la mayoría de los equipos electrónicos.

Modulación por posición de pulsos. (PPM)

En este caso, la señal moduladora produce un desplazamiento de los pulsos respecto a la posición de éstos en ausencia de modulación.

Modulación por codificación de pulsos (PCM)

Este tipo de modulación, sin duda la más utilizada de todas las modulaciones de pulsos es, básicamente, el método de conversión de señales analógicas a digitales (CAD). PCM siempre conlleva modulación previa de amplitud de pulsos. Una señal analógica se caracteriza por el hecho de que su amplitud puede tomar cualquier valor entre un mínimo y un máximo, de forma continua. Una señal PAM también puede tener cualquier valor, pero en intervalos discretos. Esto significa que el posible número de valores de amplitud es infinito. Por otra parte, la amplitud de una señal digital sólo puede tener un número finito de valores, por lo general dos (cero y uno).

Una señal analógica puede convertirse a digital mediante un proceso de *muestreo y cuantificación*. El muestreo la convierte en una señal PAM, la cuantificación redondea el valor de la amplitud al número permisible más cercano, generalmente en el intervalo $(0, 2^n)$ y lo codifica en un cierto número de bits. En realidad, no es estrictamente necesario transmitir con toda exactitud las amplitudes de las muestras. En el caso de señales de voz o de imagen, el receptor último es el oído o el ojo, que detectan sólo diferencias finitas, de modo que la señal original, continua, puede aproximarse por una señal formada por un conjunto de amplitudes discretas seleccionadas de forma tal que el error sea mínimo. Si las muestras de amplitudes distintas están muy cercanas entre sí, la señal aproximada prácticamente no se distinguirá de la señal continua original.

Desde un punto de vista práctico, es deseable una señal binaria, que puede tomar sólo dos valores, por su simplicidad. Para ello, la señal cuantificada a niveles discretos entre 0 y 2^n valores, puede

codificarse mediante un símbolo de n bits, por lo que generalmente la cuantificación va seguida de un proceso de *codificación*.

Cuantificación y codificación

Este proceso se resume en el diagrama de bloques de la figura.

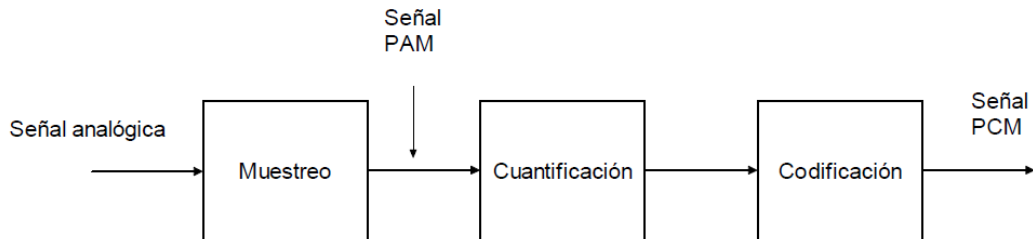
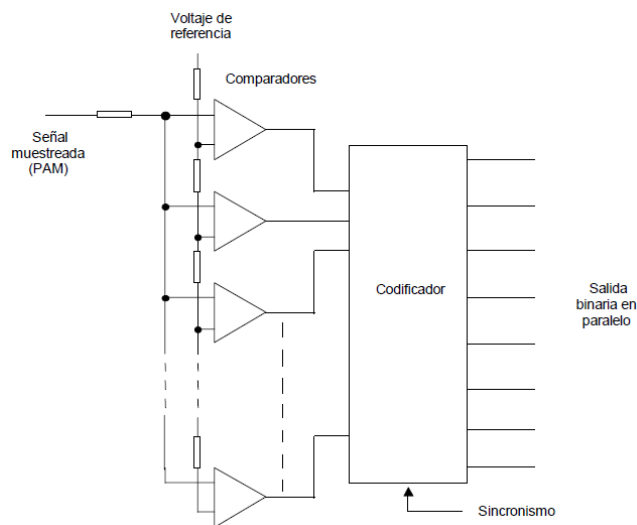


Diagrama de bloques del sistema PCM.

Para efectuar esta conversión, la señal muestreada (PAM) se aplica, a través de una cadena de divisores de voltaje, a una serie de comparadores, cuyo número es igual al de niveles de cuantificación, como se ilustra en la figura.



La otra entrada a los comparadores procede de un voltaje de referencia preciso, aplicado a un divisor de voltaje similar al anterior, con tantas resistencias como niveles de cuantificación haya. Así por ejemplo, para codificación a 8 bits se requieren $2^8 = 256$ niveles de cuantificación y, por tanto 256 comparadores. Debido a la acción de los divisores de voltaje, tanto para la señal como para el voltaje de referencia, los voltajes serán coincidentes a la entrada de uno solo de los comparadores de la cadena, el cual producirá una salida "1", en tanto que todos los restantes tendrán salida "0". Es decir, en cada punto de muestreo, solamente uno de los comparadores entregará una señal diferente a los demás, que corresponderá al nivel de cuantificación de la señal de entrada.

Cuantificación y codificación.

Las salidas de los comparadores se aplican a un conversor de código con 256 entradas y 8 salidas, de modo que a la salida del codificador se tendrá una palabra o símbolo de 8 bits *en paralelo*, correspondiente al nivel de cuantificación en el punto de muestreo de la señal de entrada. Mediante un registro de desplazamiento de entrada en paralelo y salida en serie, es posible convertir la salida en paralelo del codificador en una secuencia de bits en serie.

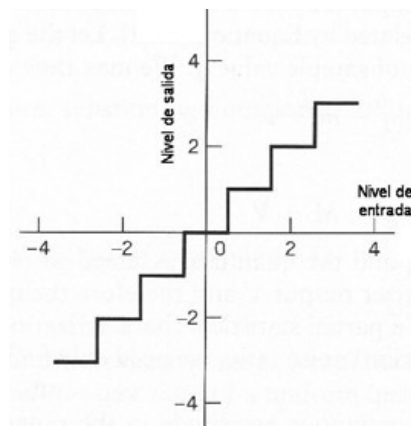
Todo el proceso anterior requiere de sincronismo preciso que debe ser proporcionado por un oscilador o reloj maestro, de modo que la señal de salida del codificador sea perfectamente identificable en el tiempo.

La señal de salida del conversor analógico-digital es una señal binaria, ya sea en serie o en paralelo y, en tales condiciones, ha perdido completamente las características de la señal analógica y ya no puede identificarse como tal, excepto por la relación que guarda cada símbolo con la amplitud de aquella. Sin embargo, la correspondencia entre la amplitud de las muestras de la señal analógica y

su representación binaria no es exacta, ya que en el proceso de cuantificación sólo se identifican niveles discretos y las amplitudes de las muestras no corresponden con exactitud a los valores de amplitud asignados a los niveles de cuantificación. Así, a cada muestra se le asignará el nivel más cercano, introduciendo con ello un error en el proceso de cuantificación, al que se designa como *ruido de cuantificación*, que puede ser más o menos apreciable en la reproducción de la señal. Si la señal analógica tiene, por ejemplo, una amplitud de 1 V, cada nivel de cuantificación representará aproximadamente 4 mV y el error de cuantificación que se introduce será, como máximo, de ± 2 mV. Este nivel es sumamente pequeño y en general, no apreciable en la recuperación de la señal. Sin embargo si se realizan varios procesos de codificación y decodificación en cascada, el ruido de cuantificación se acumula y se producen degradaciones importantes en la señal recuperada.

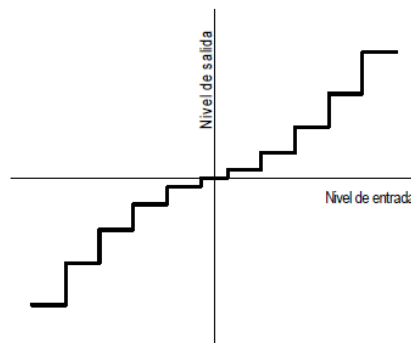
Cuantificación uniforme y no uniforme

La cuantificación es uniforme cuando los niveles de cuantificación están espaciados uniformemente, o dicho de otra manera, cuando los escalones tienen la misma altura.



Cuantificación uniforme

En algunas aplicaciones de telefonía y procesamiento de imágenes, es conveniente cuantificar los valores pequeños de señal con niveles menores, es decir de manera más fina que los valores altos. Esto se ilustra en la figura.



Cuantificación no uniforme.

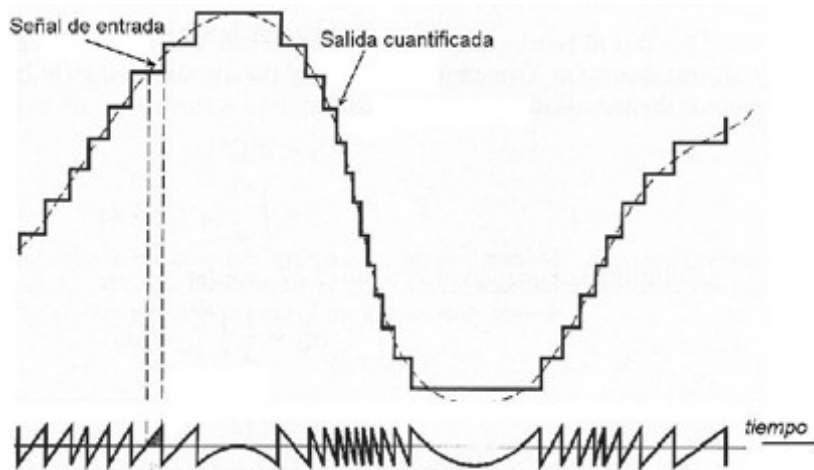
El empleo de un cuantificador no uniforme equivale a pasar la señal en banda base por un *compresor* y luego aplicar la señal comprimida a un cuantificador uniforme.

Con el empleo de compresión no uniforme se consigue mejorar la relación señal a ruido a niveles bajos de señal, a expensas de la relación señal a ruido para señales grandes.

Ruido de cuantificación

La cuantificación de una señal introduce un *error de cuantificación*, definido como la diferencia entre el valor real de la señal y el valor de la señal cuantificada, es decir, la diferencia entre la magnitud de la señal de entrada y la de salida. Supóngase que los niveles de cuantificación corresponden a valores de 0, 1, 2,... volts y que la señal de entrada es de 1.2 V. La señal cuantificada de salida es, por ejemplo 1 V, con lo que el error de cuantificación es de 0.2 V. Si la entrada es de 1.7 V y la salida se cuantifica a 2 V, el error es de 0.3 V. El cuantificador redondea el valor de la señal de entrada al valor más cercano de los posibles niveles de cuantificación. El nivel de decisión para el redondeo hacia arriba o hacia abajo, suele tomarse a la mitad del intervalo de cuantificación. El tipo de redondeo para un nivel de entrada igual al nivel de decisión se define en el diseño. En la figura se ilustra la forma de una señal cuantificada y, en la parte inferior, el error de cuantificación. El error de cuantificación representa, de hecho, ruido adicional que depende del número de niveles de cuantificación. Cuanto menor sea éste, mayor será el ruido. En la siguiente tabla se ilustra la relación señal a ruido para diferentes niveles de cuantificación.

Número de niveles	Bits/muestra	S/N dB
32	5	31.8
64	6	37.8
128	7	43.8
256	8	49.8



Señal cuantificada y error de cuantificación.

Cualidades e inconvenientes de PCM

La modulación por codificación de pulsos está presente, bien sea en la forma tratada antes, o en alguna de sus variantes, en la mayoría de las aplicaciones para transmitir o procesar información analógica en forma digital. Sus ventajas se resumen en el hecho de emplear codificación de pulsos para la representación digital de señales analógicas, característica que lo distingue de todos los demás métodos de modulación analógica. Algunas de sus ventajas más importantes son:

- Robustez ante el ruido e interferencia en el canal de comunicaciones.
- Regeneración eficiente de la señal codificada a lo largo de la trayectoria de transmisión.

- Formato uniforme de transmisión para diferentes clases de señales en banda base, lo que permite integrarlas con otras formas de datos digitales en un canal común mediante el multiplexado en tiempo.
- Facilidad de encriptar la información para su transmisión segura.

El precio a pagar por las ventajas anteriores es el mayor costo y complejidad del sistema, así como el mayor ancho de banda necesario. Respecto a la complejidad, la tecnología actual de circuitos integrados en gran escala (VLSI) ha permitido la implementación de sistemas a, relativamente bajo costo y facilitado el crecimiento de este método o de sus variantes.

Ancho de banda en PCM

El efecto del empleo de PCM sobre el ancho de banda de una señal así modulada se puede inferir intuitivamente mediante el siguiente ejemplo. Supóngase una señal de audio con un ancho de banda de 5 KHz, muestreada a una frecuencia de 10 KHz, igual a la frecuencia de Nyquist y cuantificada a 8 bits/muestra (256 niveles), de modo que por cada muestra de la señal de entrada se producen ocho pulsos. Si pensamos en transmisión de estos pulsos en serie, la frecuencia de muestreo se ha multiplicado por 8 y, por consecuencia, también el ancho de banda. Así, una señal analógica que ocuparía un ancho de banda de 10 KHz, modulada en AM completa o 5 KHz en banda lateral única, requiere de un ancho de banda de 80 KHz modulada en PCM. Las cifras anteriores son únicamente ilustrativas, pero dan una idea bastante aproximada de la situación. Este hecho que, en el pasado fue motivo de preocupación, y casi no lo es en la actualidad. Primero, por la disponibilidad de canales de comunicación de banda ancha tanto de satélite como de fibra óptica y, segundo, por la evolución de los métodos de *compresión* de información que hacen posible la eliminación de información redundante. Estos métodos se emplean extensamente en telefonía y televisión digital y permiten reducir considerablemente el caudal de información sin deterioro apreciable de la calidad de la señal.

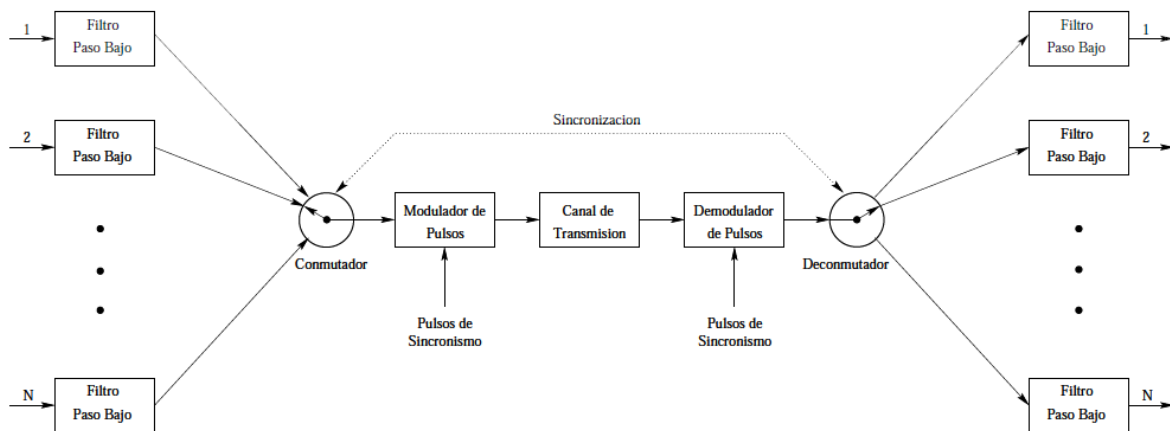
Multiplexación por División de Tiempo (TDM - *Time division multiplexing*).

El teorema de muestreo nos permite transmitir toda la información contenida en una señal limitada en banda $g(t)$ utilizando muestras tomadas uniformemente a una tasa ligeramente superior a la de Nyquist.

Una característica importante en el proceso de muestreo es la conservación del tiempo. Esto quiere decir que la transmisión de una señal muestreada utiliza el canal de comunicación solamente durante una fracción muy pequeña del tiempo de muestreo de forma periódica y, de este modo, el resto del tiempo entre muestras adyacentes no se utiliza. Este tiempo que no se utiliza se puede usar precisamente para transmitir muestras procedentes de otras fuentes de información independientes en un sistema en tiempo compartido. Así obtenemos lo que se denomina señal TDM o multiplexación por división de tiempo que permite la utilización conjunta de un canal de comunicaciones común por un conjunto de fuentes independientes sin interferencia mutua. En la figura se puede ver esquemáticamente un sistema TDM (Multiplexación por División de Tiempo) de extremo a extremo. El sistema tiene como entrada N señales analógicas procedentes de N fuentes independientes. Cada una de estas señales de entrada se limita en banda al ancho de banda adecuado mediante un filtro paso bajo antialiasing para eliminar las componentes en frecuencia no esenciales para la representación de la señal. Las N salidas de los filtros paso bajo se aplican a un conmutador que se implementa en la práctica mediante circuitería electrónica de conmutación. El propósito de este conmutador es:

-Tomar una muestra estrecha de cada una de las N entradas a una tasa f_s ligeramente superior a la tasa de Nyquist $2W$, siendo W la frecuencia de corte de los filtros paso bajo antialiasing.

-Colocar cada una de las N muestras procedentes de las N señales de forma ordenada dentro de cada periodo T_s .



Esquema de un sistema TDM extremo a extremo.

La segunda operación del conmutador es de hecho lo esencial de la multiplexación por división en el tiempo.

Tras el conmutador, la señal ya multiplexada se aplica a un modulador de pulsos, cuyo propósito es modificar la señal multiplexada de la forma apropiada para su transmisión por el canal de comunicaciones.

Se puede ver que el proceso de multiplexación introduce una expansión en el ancho de banda de un factor de N , puesto que el esquema TDM (Multiplexación por División de Tiempo) coloca N muestras procedentes de fuentes independientes en un intervalo temporal igual al periodo de muestreo. Es decir, la tasa real de muestras por segundo es de $N f_s$.

En el extremo receptor, la señal recibida se aplica a un demodulador de pulsos que realiza la operación inversa al modulador de pulsos. Las muestras ordenadas en la señal TDM (Multiplexación por División de Tiempo) a la salida del demodulador de pulsos se distribuyen en los N canales utilizando un conmutador, como se puede ver en la figura anterior, que debe estar en perfecto sincronismo con el conmutador del transmisor. La sincronización entre el conmutador y de conmutador es esencial para el correcto funcionamiento el sistema TDM (Multiplexación por División de Tiempo). El modo en el que se implementa esta sincronización, va a depender del método de modulación de pulsos empleado para transmitir por el canal de comunicaciones la secuencia multiplexada. Finalmente, como se puede ver en la figura, cada una de las N señales se pasa por el filtro paso bajos de reconstrucción correspondiente para obtener las N señales analógicas.

El sistema TDM (Multiplexación por División de Tiempo) es muy sensible a la dispersión del canal de comunicaciones, esto es, es muy sensible a variaciones de la amplitud con la frecuencia o a pérdidas de proporcionalidad de la fase con la frecuencia.

En general, va a ser necesario realizar una ecualización de la señal para asegurar el correcto funcionamiento del sistema.

El sistema TDM (Multiplexación por División de Tiempo) es inmune a las no linealidades en la amplitud del canal de comunicaciones como fuente de diafonía (proceso por el cual se mezclan o interfieren señales procedentes de fuentes o canales diferentes), debido a que las diferentes señales no están presentes en el canal de forma simultánea.

TDM (Multiplexación por División de Tiempo) y FDM (Multiplexación por División de frecuencias) constituyen los dos estándares básicos de multiplexación mas utilizados en telefonía. Con la coexistencia de los sistemas analógicos y digitales en la red telefónica, es necesario disponer de interfaces entre las secciones analógicas y las secciones digitales de la red. El elemento denominado transmultiplexor es el interfaz diseñado con este propósito: convierte una señal TDM (Multiplexación por División de Tiempo) en FDM (Multiplexación por División de frecuencias) y viceversa.