

TEMA 5: MODULACIÓN.

TÁBOA DE CONTIDOS

5.1 ESPECTRO DE FRECUENCIA	2
5.1.1 TIPOS DE ESPECTROS.....	5
5.2 MODULACIÓN	6
5.3 MODULACIÓN ANALÓXICAS.....	7
5.3.1 MODULACIÓN DE AMPLITUDE (AM).....	7
5.3.2 MODULACIÓN ANGULARES (FM E PM).....	13
5.4 MODULACIÓN DIXITAIS	16
5.4.1 AMPLITUDE SHIFT KEYING (ASK).....	21
5.4.2 FREQUENCY SHIFT KEYING (FSK).....	23
5.4.3 PHASE SHIFT KEYING (PSK).....	24
5.4.4 QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION (QAM).....	27
5.4.5 DEMODULACIÓN DE SINAIS DIXITAIS.....	29
5.5 MULTIPLEXACIÓN	30

5.1 ESPECTRO DE FRECUENCIA

Todos os sinais admiten unha representación temporal que permite avaliar a evolución do sinal co tempo. Así, estamos acostumados a observar a representación da tensión na pantalla do osciloscopio, por exemplo.

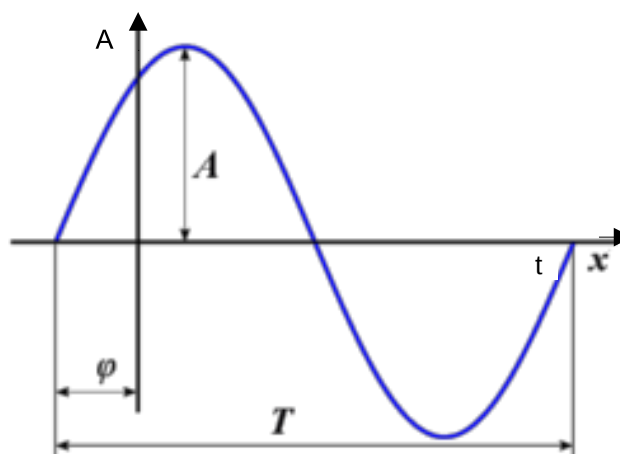
A representación temporal dun sinal sinusoidal, que é periódica, caracterízase fundamentalmente polos parámetros seguintes:

- **Amplitude** (A), que indica o valor instantáneo da magnitude medida. O valor instantáneo dun sinal sinusoidal sempre está comprendido entre un valor mínimo ($-A_p$) e un valor máximo (A_p). A unidade de medida da amplitude depende da magnitude representada. Por exemplo, cando se representa a tensión, a unidade utilizada é o voltio (V),
- **Período** (T), que determina a duración dun ciclo do sinal. O período (T) e a frecuencia (f) dun sinal están relacionados da forma $f=1/T$. O período dun sinal mídese en segundos (s) e a frecuencia dun sinal mídese en Hercios (Hz).
- **Fase** (φ), que determina o punto de inicio dun ciclo do sinal respecto a un punto orixe de referencia.

Exemplo:

Un sinal de período 1 ms (T_1), ten unha frecuencia (f_1) asociada de 1.000 Hz: $f_1 = 1/T_1 = 1/0,001 \text{ s} = 1.000 \text{ Hz}$

Un sinal de frecuencia 500 Hz (f_2), ten un período (T_2) asociado de 2 ms: $T_2 = 1/f_2 = 1/500 \text{ Hz} = 0,002 \text{ s} = 2 \text{ ms}$



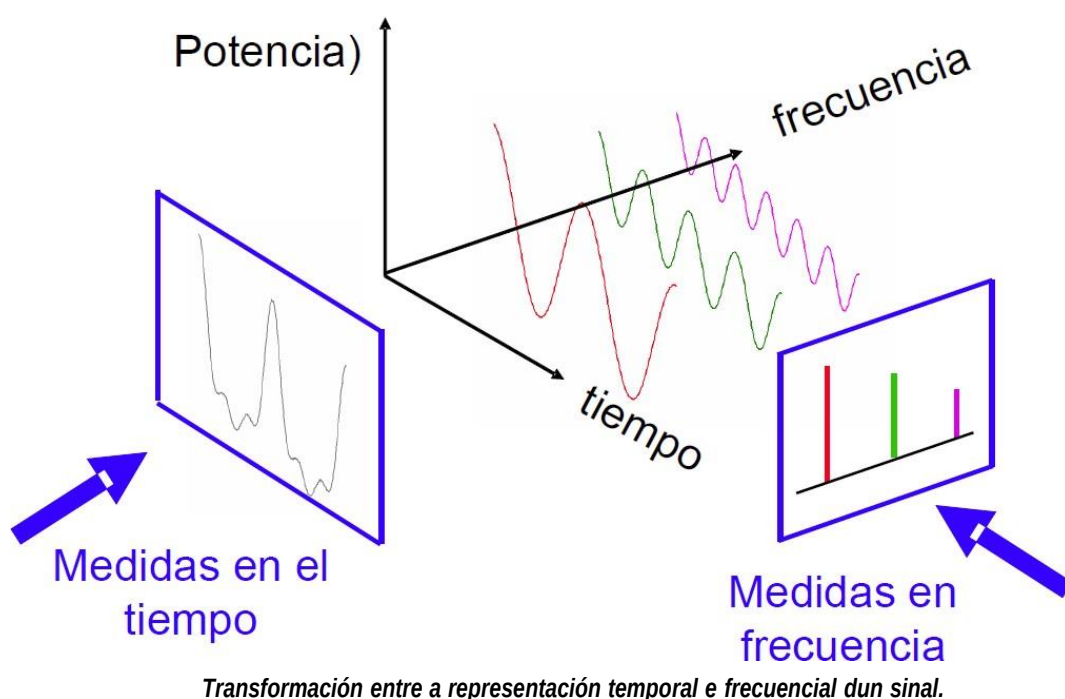
Representación temporal dun sinal sinusoidal.

Matemáticamente correspóndese con: $V = A \sin(2\pi ft + \varphi)$

Esta representación temporal pódese transformar matemáticamente (mediante o que se denominan transformadas integrais, como as de Fourier ou Laplace) dando lugar a outra representación que admite un sinal que é a **representación en frecuencia**, que permite avaliar o espectro do sinal. Desta maneira pódese analizar un sinal, ou ben mediante a súa representación temporal (que se fai no que se denomina dominio do tempo) ou ben mediante a súa representación frecuencial (que se fai no dominio da frecuencia) e denomínase **espectro do sinal**.

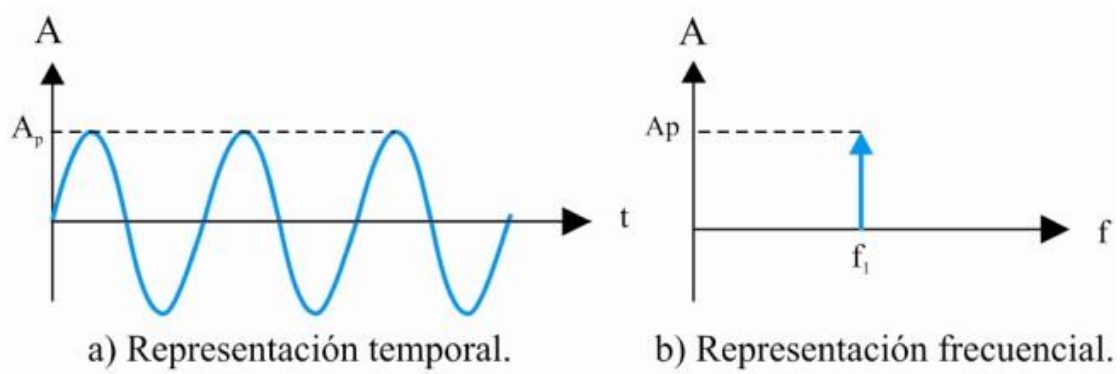
Analísis Espectral

Dominio del tiempo y de la frecuencia



Estes dous tipos de representación son totalmente convertibles un no outro e representan a totalidade do sinal, de tal modo que as manipulacións ou sucesos que sufra o sinal nun dos dominios terán o seu reflexo no outro dominio.

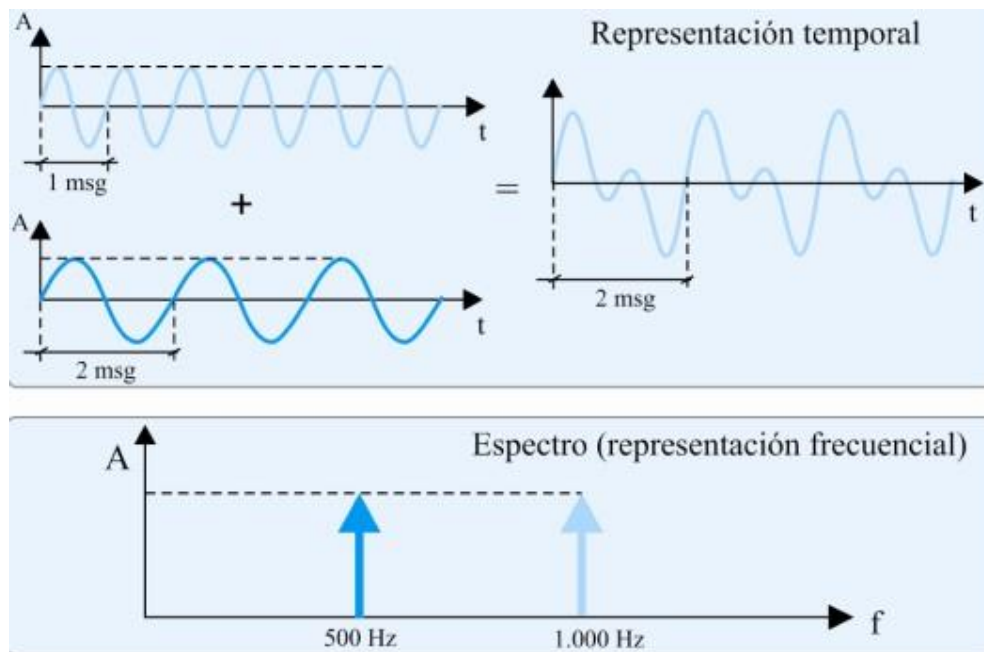
O espectro é a representación de cada unha das compoñentes frecuenciais que forman un sinal. Así, como se obsérva na figura seguinte, un sinal sinusoidal (ton puro) soamente ten unha compoñente frecuencial de amplitude A_p , e por iso no dominio da frecuencia aparece como un único punto de amplitude A_p e frecuencia f_1 . Para representar este punto con máis claridade recórrese a facelo mediante una frecha que parte no valor da frecuencia f_1 e ten de altura o valor de A_p , polo que apunta a este punto.



Espectro dun ton puro.

Exemplo:

En xeral, calquera sinal complexa pódese modelar como a combinación de tons de diferente frecuencia e amplitude. O sinal da figura é a suma de dous tons de frecuencia: 500 Hz e 1,000 Hz



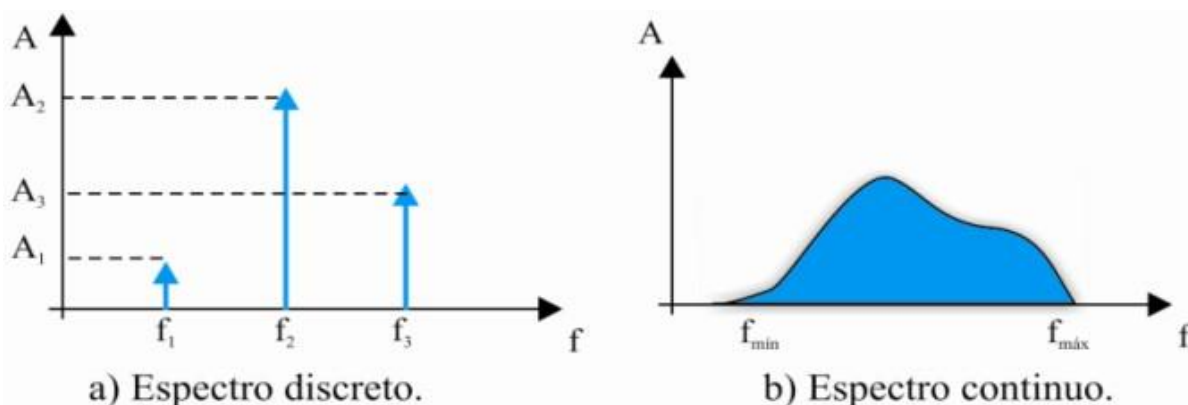
Sinal que mestura máis dun tono. No espectro aparece unha compoñente en frecuencia correspondente a cada tono.

Un sinal temporal pódese entender como a suma de diferentes tons que posúen diferentes amplitudes, de tal modo que cada ton terá a súa representación como unha frecha no dominio da frecuencia, dando o conxunto a representación do espectro do sinal.

5.1.1 TIPOS DE ESPECTROS

En función das características do sinal representado pódense diferenciar dous tipos de espectros:

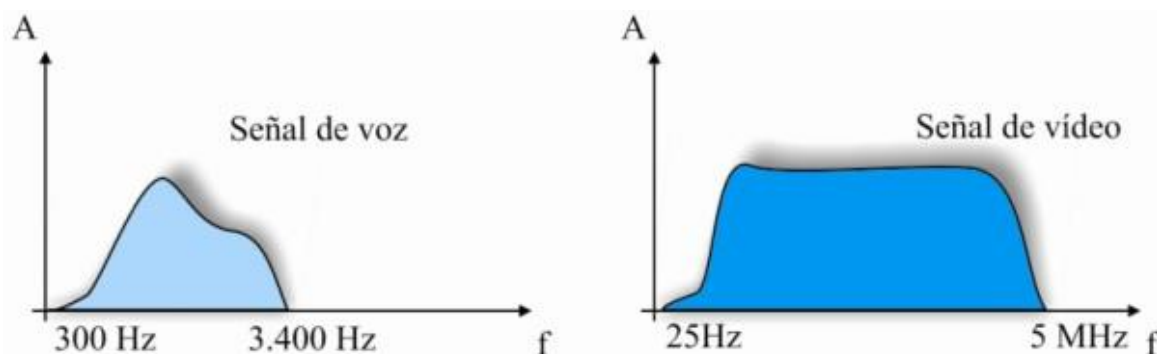
- **Espectro discreto.** O sinal pódese dividir nun conxunto de tons puros.
- **Espectro continuo.** O sinal está formado por infinitos tons puros comprendidos entre dous valores límite.



Representación dos espectros discreto (a) e continuo (b).

Normalmente os sinais non son periódicos e ademais conteñen moitas frecuencias, o que non permite unha representación discreta do espectro. Aínda así, os sinais admiten unha representación estatística, de forma continua, que determina a probabilidade de que o sinal conteña unha das frecuencias. Por exemplo, o espectro da voz humana varía nun marxe aproximado de 300 Hz a 3.400 Hz: é dicir, durante unha conversa xeramos sinais acústicas comprendidas na marxe anterior.

Da mesma forma, o sinal de vídeo capturada por unha cámara de TV pode variar entre 25 Hz e 5 MHz, dependendo da imaxe explorada.



Espectros típicos dos sinais de voz e de vídeo.

5.2 MODULACIÓN.

A **modulación** é a alteración sistemática dun **senal portador** de acordo cun sinal que se desexa transmitir (**senal modulador**). O sinal portador presenta unhas características que o fan adecuado para atravesar o medio de propagación, e permite situar a nosa mensaxe na marxe de frecuencias asignado, o que xustifica a súa utilización. Denomínase portador porque é o elemento de transporte que utilizaremos para trasladar a nosa mensaxe, que chamamos sinal modulador, a través do medio polo cal será transmitido.

Existen moitas formas de comunicación non eléctricas que tamén encerran un proceso de modulación; a voz é un bo exemplo. Cando unha persoa fala, os movementos da boca ocorren dunha maneira máis ben lenta, da orde dos 10 Hz, que realmente non poden producir ondas acústicas que se propaguen. As cordas vocais xeran tonos de alta frecuencia (portadores), que son modulados polos músculos e órganos da cavidade oral segundo a mensaxe (moduladora). O que o oído capta como voz, é unha suma de tons portadores xerados polas cordas vocais modulados en amplitude na boca.

É posible identificar catro tipos de modulación segundo a natureza analóxica ou dixital do sinal modulador e o portador. As únicas que serán de interese en radiocomunicacións serán aquelas nas que a portadora é analóxica (onda de radio) polo que falaremos de modulación analóxica ou dixital atendendo só ao carácter do sinal modulador, considerando que o portador é sempre analóxico.

Nas modulacións analóxicas a información pode tomar calquera valor e modula directamente algunha das propiedades da portadora. Nas dixitais trátase de enviar un fluxo de bits. Este fluxo de bits agrúpase en grupos de k bits chamados **símbolos**. A función dunha modulación dixital é asignar a cada posible símbolo (conxunto diferente de bits) un sinal (variación da onda portadora) adecuado para a súa transmisión.

Independentemente do tipo, analóxica ou dixital, a modulación debe ser un proceso reversible, de tal maneira que a mensaxe poida ser recuperada no receptor por medio da operación complementaria de **demodulación**.

Unha pregunta inevitable chegados a este punto é, Por que se modula? Estes son os dous motivos máis importantes:

Para facilitar a radiación: Unha radiación eficiente de enerxía electromagnética require de elementos radiadores (antenas) cuxas dimensións físicas sexan dun tamaño comparable á súa lonxitude de onda. Pero moitos sinais, por exemplo o audio, teñen compoñentes de frecuencia da orde dos 100 Hz ou menores, para o que necesitan antenas duns 300 Km de lonxitude se se radian directamente. Mediante a modulación, estes sinais pódense imprimir sobre unha portadora de alta frecuencia, co que se logra unha redución substancial do tamaño da antena. Por exemplo, na banda de radio de FM, onde as portadoras están no rango de 88 a 108 Mhz, as antenas son menores dun metro.

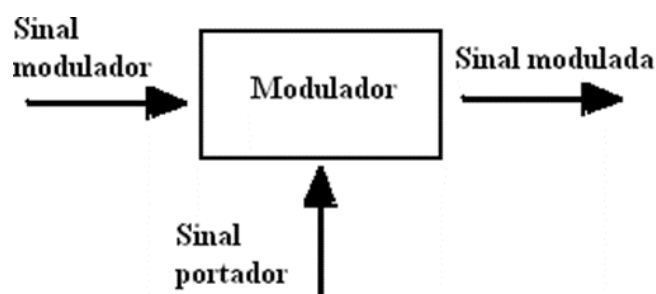
Asignación de frecuencias, aproveitamento do espectro radioeléctrico: O propietario dun aparello de radio ou televisión pode seleccionar unha de varias estacións, aínda cando todas as estacións estean a transmitir a súa programación no mesmo medio de transmisión. É posible seleccionar e separar calquera das estacións, dado que cada unha ten asignada unha frecuencia portadora diferente. Se non fora pola modulación, só operaría unha estación nunha área determinada. Dous ou máis estacións que transmiten directamente no mesmo medio, sen modulación, producirían unha mestura inútil de sinais interferentes.

5.3 MODULACIÓNS ANALÓXICAS

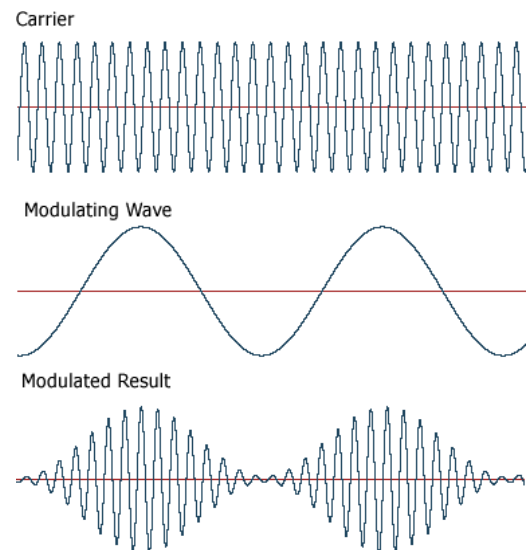
O sinal portador é analóxico e o sinal modulador tamén o é. En función do parámetro que se altere no sinal portador cos cambios do sinal modulador, pódense establecer tres tipos de modulación: Modulación de amplitude (AM), Modulación de frecuencia (FM) e modulación de fase (PM).

5.3.1 MODULACIÓN DE AMPLITUDE (AM).

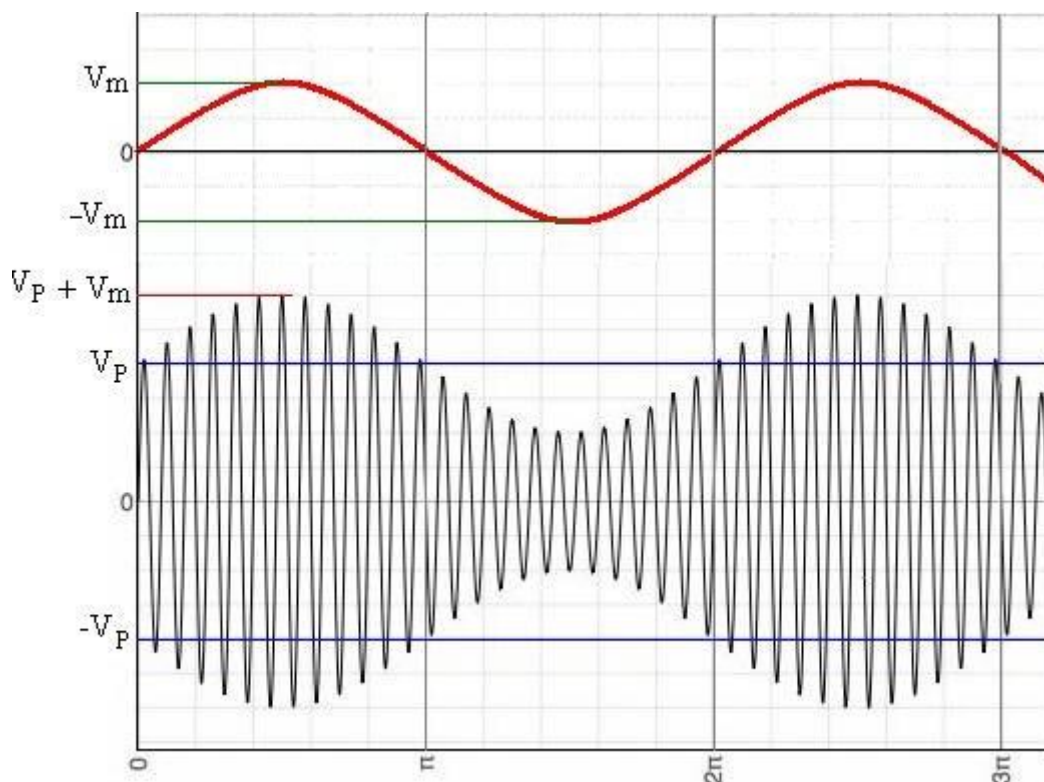
Chámase Modulación de Amplitude (AM) a un tipo de modulación no que a amplitude do sinal modulado depende directamente da amplitude do sinal modulador. Un modulador AM é un dispositivo que ten dous sinais de entrada; un sinal portador de amplitude e frecuencia constante, e o sinal de información ou modulador. O parámetro modificado do sinal portador polo sinal modulador é a amplitude.



A figura da dereita mostra como o sinal sinusoidal portador é modulado polo sinal de información (neste exemplo un ton puro). O sinal que sae do modulador é o produto dos sinais modulador e portador (última figura). O sinal modulado ten a mesma frecuencia que o sinal portador. A información está contida na amplitude do sinal modulado, xa que a envolvente deste sinal coincide co sinal modulador.



Cando o sinal modulador ten valor cero, a amplitude do sinal modulado coincide coa voltaxe orixinal da portadora V_p , dado que non se aplica modificación algunha. Sen embargo, cando o sinal modulador crece (desde 0 a $\pi/2$), provoca un aumento da amplitude do sinal modulado, de forma que o momento no que se producen os puntos de máxima amplitude ($\pi/2$) coinciden e o valor do sinal modulador é a suma das dúas tensións de pico dos sinais ($V_p + V_m$). O sinal modulado segue a tendencia do modulador tamén cando este descende ata 0 (de $\pi/2$ ata π), e, incluso, cando se inverte a súa polaridade durante o segundo semiciclo do sinal modulador, tal e como mostra a seguinte figura:



O sinal modulado (en negro) segue as variacións da amplitude do sinal modulador (en vermello).

Na **modulación de amplitude** (AM) a amplitude do sinal portador varía de acordo co nivel instantáneo do sinal de información. Os niveis instantáneos de portadora e moduladora por separado defínense como:

$$\text{Sinal portador: } V_p(t) = A \sin(2\pi f_p t)$$

$$\text{Sinal modulador: } V_m(t) = B \sin(2\pi f_m t)$$

onde A é a amplitude e f_m a frecuencia, do sinal modulador; e B é a amplitude e f_p a frecuencia, do sinal portador.

A relación existente entre as tensións máximas dos sinais modulador e portador B/A defínese como **índice ou factor de modulación** dun sinal modulado en AM:

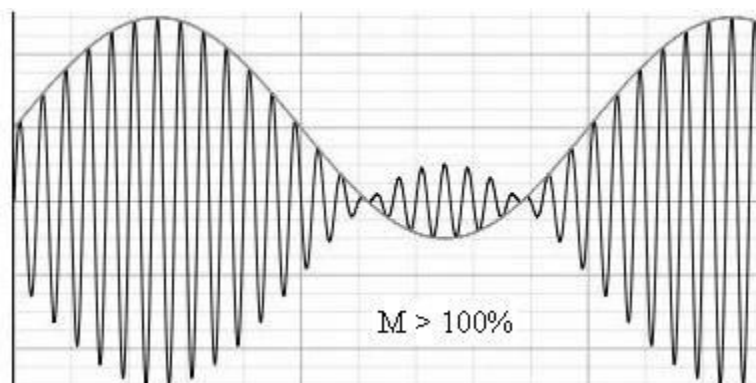
$$m = \frac{B}{A}$$

$$m = \frac{\text{Valor de pico do sinal modulador}}{\text{Valor de pico da portadora non modulada}}$$

Multiplicando por 100 o factor de modulación (m) obtemos a porcentaxe de modulación (M):

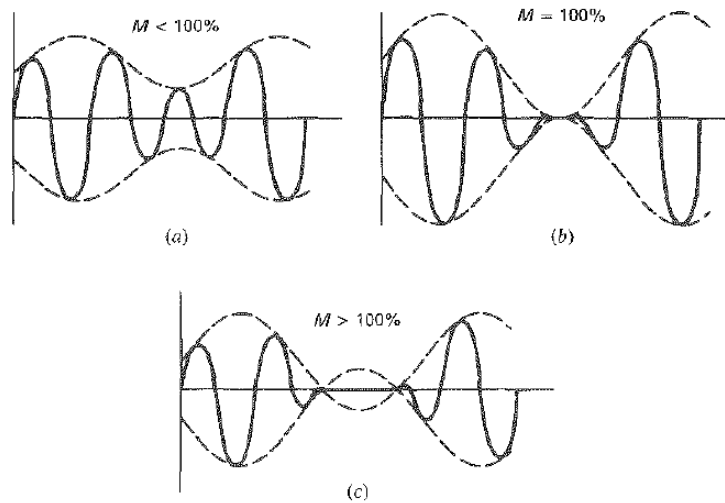
$$\text{Porcentaxe de modulación} \Rightarrow M = \frac{B}{A} \cdot 100$$

A porcentaxe de modulación pode variar entre 0% e 100% SEN DISTORSIÓN. Se “m” superase o valor de 1 ($M > 100\%$) perderíase información. Este fenómeno denomínase **sobremodulación**, e se presenta cando o sinal modulado varía tanto que nos semiciclos negativos do sinal chega a anularse por completo. Nesta situación aparecerá unha forte distorsión sobre o sinal, que haberá que evitar a toda costa.



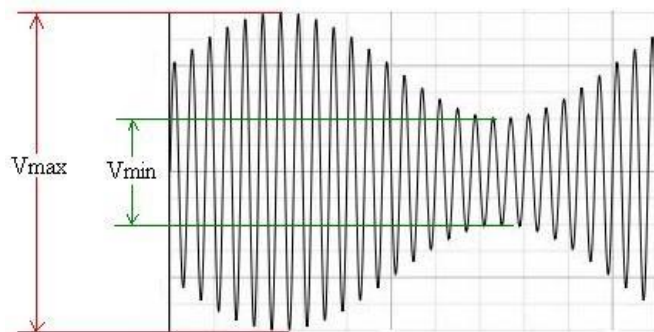
A seguinte figura ilustra tres grados de modulaci3n:

(a) Submodulaci3n ($M < 100\%$), (b) 100% de modulaci3n e (c) sobremodulaci3n ($M > 100\%$).

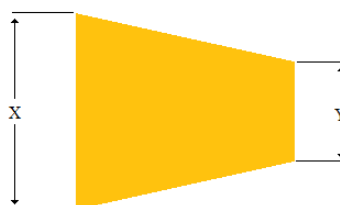


Para calculala no osciloscopio, empregamos a seguinte expresi3n:

$$M(\%) = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}} \cdot 100$$

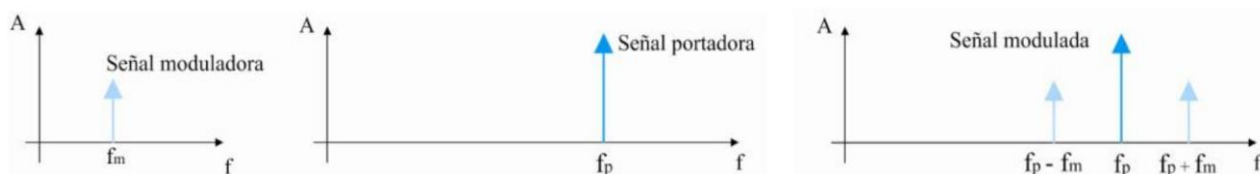


Outra t3cnica consiste en aplicar o **sinall modulado** 3 **entrada vertical** do osciloscopio e o **sinall modulador** de audiofrecuencia 3 **entrada horizontal**. Isto da por resultado un patr3n trapezoidal tal e como:



$$M = \frac{X - Y}{X + Y} \cdot 100$$

A figura embaixo mostra o espectro de cada un dos sinais que interveñen nunha modulación AM. O sinal portador é un ton puro de radiofrecuencia que permite trasladar a información á banda de frecuencias desexada. Neste exemplo, o sinal modulador é un ton puro de baixa frecuencia. Ao realizar a modulación en amplitude, o sinal portador despraza a información a banda de radiofrecuencia, situando a información modulada a ambos lados do sinal portador.

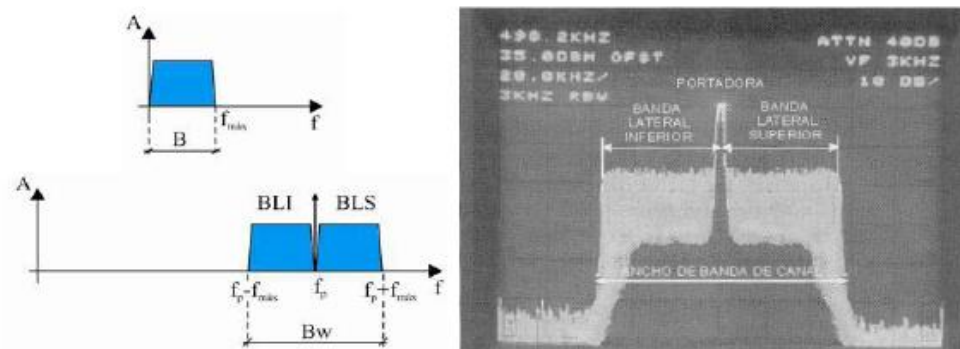


Na realidade os sinais moduladores non son tons puros senón sinais complexos cunha certa anchura de banda (B). Se modulamos en amplitude un sinal con espectro continuo, por exemplo a voz, o espectro resultante ten dous bandas ao redor da frecuencia portadora (f_p): a banda lateral superior (BLS) e a banda lateral inferior (BLI). Estas bandas correspóndense co espectro da mensaxe que modula a portadora, desprazado. E conteñen, cada unha delas, a información completa do sinal modulador.

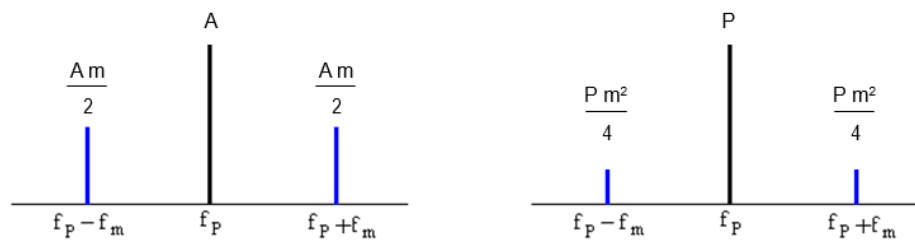
O ancho de banda do espectro de radiofrecuencia (B_w) resultante dunha modulación AM é o dobre do ancho de banda do sinal orixinal (B).

$$B_w = 2B = 2f_{m\acute{a}x}$$

Na seguinte figura móstrase o espectro dun sinal modulado en AM.



Tamén se pode observar que o ton correspondente á portadora ten unha amplitude de ____ valor A, mentres que os outros tons teñen unha amplitude inferior que depende do índice de modulación e teñen valor $A \cdot m / 2$. En termos de potencia isto vai ter como consecuencia que se a potencia da portadora vale P, a potencia dos outros tons valerá $P \cdot m^2 / 4$, sendo netamente inferior.



A potencia total dunha transmisión AM é:

$$P_T = m^2 \frac{P_C}{4} + m^2 \frac{P_C}{4} + P_C = P_C \cdot \left(1 + \frac{m^2}{2}\right)$$

Cando se realiza un análise numérico da distribución do contido de potencia, obsérvase que en condicións óptimas (100% de modulación) a maior parte da potencia transmitida se atopa na frecuencia portadora. A frecuencia portadora non contén información; toda a información está contida nas bandas laterales superior e inferior. De feito as dúas bandas laterales conteñen información idéntica.

Algunhas das características máis salientables da modulación en amplitude son:

- ❖ **Fácil demodulación.** Pola súa natureza, o sinal de AM é moi sinxelo de demodular. Ademais os receptores son sinxelos e, polo tanto, económicos.
- ❖ **Sensibilidade ante ruídos.** Un dos maiores inconvenientes é a gran vulnerabilidade da modulación de amplitude aos ruídos do medio de propagación.
- ❖ **Baixo rendemento da transmisión.** Da potencia xerada por un modulador de amplitude, ao redor dun 50% invértese en emitir o sinal portador, que non contén información. O resto divídese, a partes iguais, entre as bandas laterais, polo que o receptor percibirá unha potencia útil equivalente ao 25% da potencia total emitida.
- ❖ **Ancho de banda moderado.** Unha canle de radio modulado en amplitude terá, como máximo, un ancho de banda igual ao dobre da banda de paso do sinal de son (información) que está transmitindo.

Existen algunhas variantes do sistema de modulación en amplitude que melloran algunha destas características. As máis importantes son:

MODULACIÓN EN DOBRE BANDA LATERAL CON PORTADORA

SUPRIMIDA (DBL OU DBL-PS).

Debido a que a compoñente portadora non contén Información, esta pode suprimirse durante o proceso de Modulación. Deste xeito o rendemento na transmisión Aumenta, aínda que a costa de complicar o emisor e o receptor.

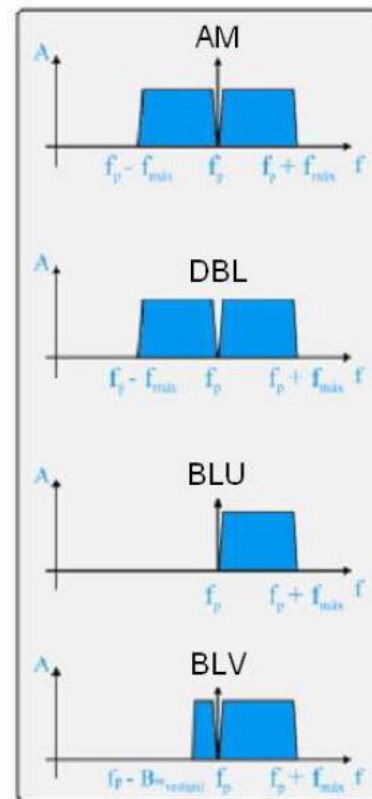
MODULACIÓN EN BANDA LATERAL ÚNICA (BLU).

Co fin de aproveitar mellor a banda de frecuencias e Aumentar a eficiencia no proceso de modulación, pódese

Eliminar unha das bandas laterais. Con esta modulación o ancho de banda da transmisión é idéntico ao ancho de banda do sinal de información e, ademais, aproveítase mellor a enerxía radiada, ao enviarse so unha das bandas laterais.

MODULACIÓN DE BANDA LATERAL VESTIXIAL (BLV).

A obtención dun sinal en banda lateral única é moi dificultoso xa que son necesarios filtros moi selectivos que permitan eliminar unha das bandas sen afectar á outra. Na práctica emprégase a modulación de banda lateral vestixial (AM - VSB), tamén denominada residual, onde se elimina completamente unha das bandas, transmitíndose unha pequena parte dela.

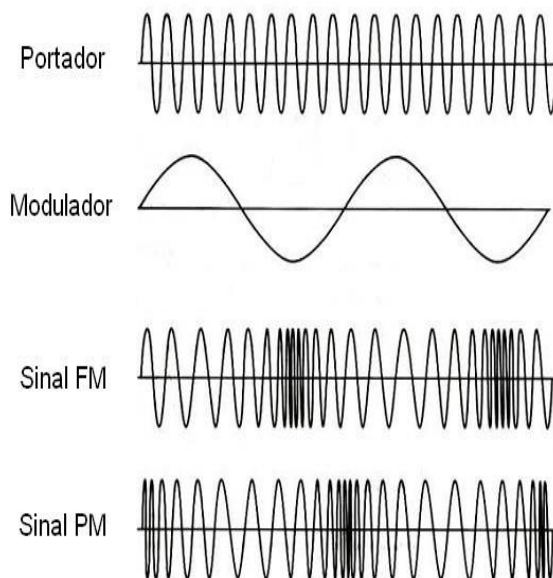


5.3.2 MODULACIÓNS ANGULARES (FM E PM).

Ademais da amplitude poden variarse outros dous parámetros nunha portadora analóxica; a frecuencia (Modulación en frecuencia ou FM) e a fase (Modulación en fase ou PM). A simple vista resulta imposible distinguir as formas de onda resultantes da modulación en frecuencia e en fase. Os dous tipos de modulacións angulares son moi similares entre si aínda que existe unha diferenza entre elas:

X Na modulación de frecuencia (FM) a frecuencia instantánea dun sinal portador de amplitude constante modifícase de xeito proporcional á amplitude instantánea do sinal modulador (información).

X Na modulación de fase (PM) a fase instantánea dun sinal portador de amplitude constante modifícase de xeito proporcional á amplitude instantánea do sinal modulador (información).



A principal vantaxe que presentan os sistemas de modulación angular é que son inmunes ás variacións de amplitude e, polo tanto en certa medida ao ruído. A diferenza do que sucede na modulación AM, a información non está contida na amplitude do sinal senón na súa frecuencia ou fase da mesma.

Modulación en frecuencia (FM)

A FM é máis familiar na vida cotiá xa que é o sistema que se emprega máis habitualmente para a radiodifusión sonora. Ademais emprégase usualmente en sistemas de radio bidireccionais fixos e móbiles, comunicacións por satélite e tamén era o estándar empregado para o sinal de son na televisión analóxica.

O ancho de banda resultante dunha modulación en FM (B_w) pódese aproximar pola *regra de Carson* como:

$$BW_{FM} = 2 \cdot (BW_m + \Delta f)$$

Onde Δf é a **desviación de frecuencia** e BW_m o ancho de banda do sinal modulador orixinal.

A desviación en frecuencia é un dos parámetros característicos da modulación en FM e determina a variación máxima de frecuencia que sofre o sinal portador. Este é un dos parámetros que caracterizarán o sistema de modulación empregado.

A frecuencia da portadora coincide coa frecuencia de repouso (f_p) ou frecuencia central, logo a desviación de frecuencia pódese obter como:

$$\Delta f = f_{m\acute{a}x} - f_p$$

A variación total de frecuencia, desde a máis baixa ata a máis alta, coñécese como **oscilación de portadora (c.s)**:

$$C.S = 2 \cdot \Delta f = f_{\text{máx}} - f_{\text{mín}}$$

Desta forma, un sinal modulador que ten niveis positivos e negativos, como un sinal senoidal puro, provocará unha oscilación de portadora igual a 2 veces a desviación de frecuencia.

O índice de modulación dun sinal modulado en FM é:

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m}$$

onde Δf é a desviación en frecuencia e f_m é a frecuencia do sinal modulador.

O índice de modulación extremo, no cal emprégase a máxima desviación de frecuencia permitida e a máxima frecuencia de audio permitida coñécese como razón de desviación:

$$\text{Razón de desviación} = \frac{\Delta f_{\text{máx}}}{f_{m_{\text{máx}}}}$$

La comisión federal de comunicaciones establece una desviación máxima de frecuencia de 75 KHz para las estaciones de FM en la banda de 88 a 108 MHz y una desviación de frecuencia máxima de 25 KHz para la parte de sonido de las transmisiones de TV. Ademais, establece tamén un límite máximo de 15 KHz para a frecuencia do sinal modulador.

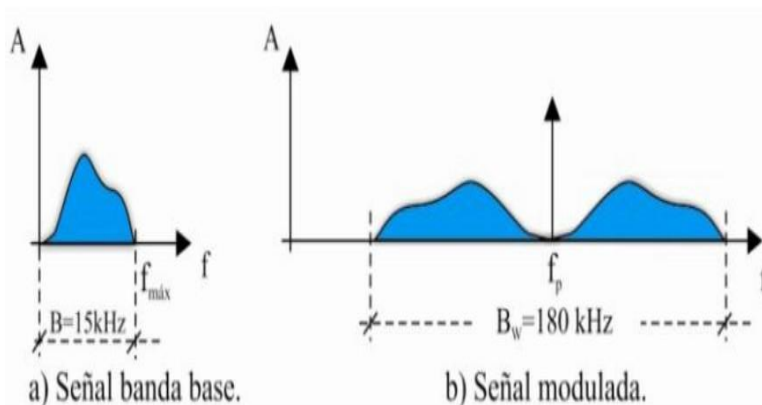
Así, a razón de desviación para estacións na banda de difusión de FM comercial é:

$$\text{Razón de desviación } 88\text{--}108\text{MHz} = 75\text{kHz} / 15\text{kHz} = 5$$

E para a porción de sonido da televisión comercial é:

$$\text{Razón de desviación TV} = 25\text{kHz} / 15\text{kHz} = 1,67$$

A seguinte figura mostra o espectro dun sinal de audio e do mesmo sinal modulado en FM. Como mostra a figura, o ancho de banda do sinal modulado é máis do dobre que o do sinal en banda base orixinal, indicando unha peor eficiencia espectral que a AM.

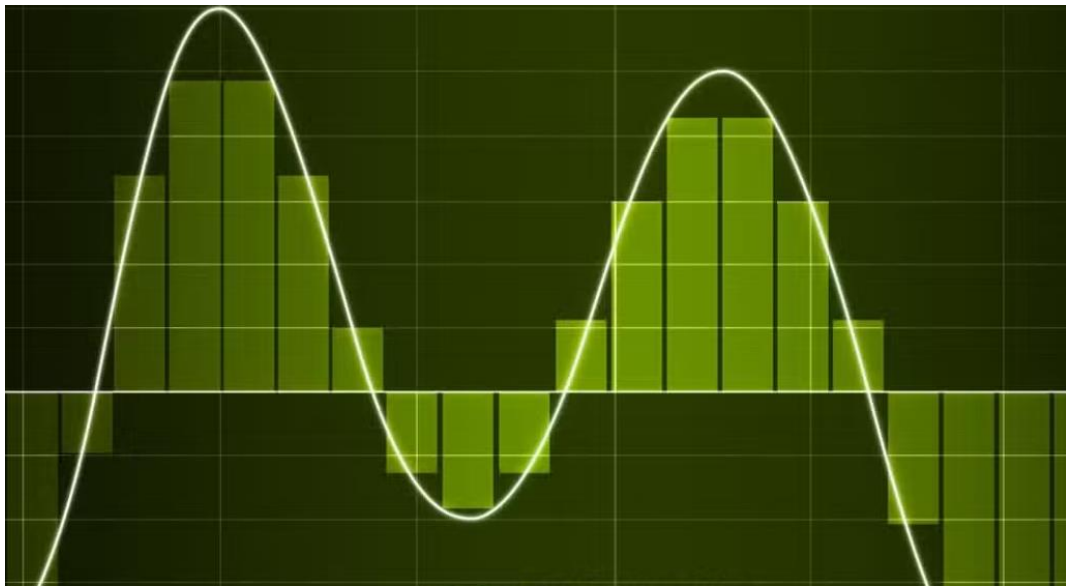


Modulación en fase (PM)

Aínda que a PM é menos familiar, utilízase moito en comunicacións de datos como veremos cando analicemos os sistemas de modulación dixital. Tamén se utiliza nalgúns transmisores de FM como un paso intermedio na xeración de FM. Como xa dixemos a FM e a PM están estreitamente relacionadas e é moi sinxelo cambiar dunha á outra.

5.4 MODULACIÓNS DIXITAIS.

Sinais analóxicos e sinais dixitais



No mundo da electrónica e as comunicacións, os sinais analóxicos e dixitais son fundamentais para a transmisión e o procesamento da información. Aínda que ambos desempeñan funcións esenciais, as súas características e aplicacións son moi diferentes.

Un sinal analóxico é unha representación continua dunha magnitude física. Estes sinais varían de forma continua co tempo e, dentro dun marxe, poden tomar calquer valor. As sinais que nos atopamos na natureza (presión, temperatura,...) son sinais analóxicos.

As características fundamentais dos sinais analóxicos son:

- **Continuidade:** Son sinais continuos; non presentan interrupcións nin saltos.
- **Variedade de valores:** Poden tomar calquer valor nun rango determinado.
- **Sensibilidade á distorsión e ao ruído:** Son máis susceptibles á degradación por interferenzas e ruído.

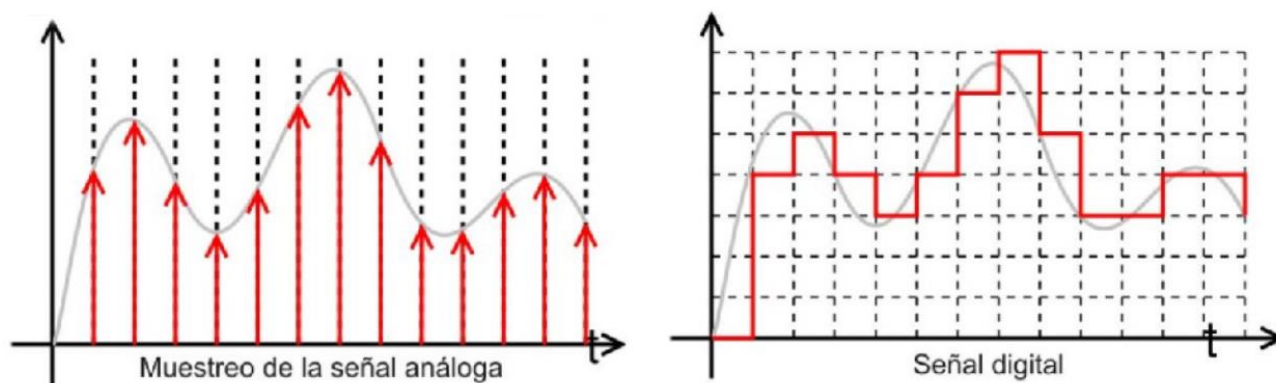
Os sinais dixitais son sinais cuantificados; so varían a intervalos (escalonados) cuantificados. É dicir, entre un intervalo e o seguinte non poden tomar valores intermedios. Cando o sinal dixital so pode tomar dous estados diferentes, denomínase *sinal binario*.

O termo dixital deriva de dígito; iso quere dicir que os sistemas dixitais operan con información numérica.

As características fundamentais dos sinais dixitais son:

- **Discreción:** Os valores que toma un sinal dixital son específicos e separados.
- **Valores binarios:** Comunmente os sistemas dixitais empregan un sistema binario.
- **Robustez ante o ruído:** Son menos susceptibles á degradación por interferencias e ruído.

Cando se teñen que procesar sinais analóxicos mediante sistemas dixitais precísase duns circuítos chamados *convertidores A/D*, de maneira que se obtén unha información dixital correspondente ao sinal analóxico. Cando os datos dixitais teñen que actuar sobre un dispositivo analóxico, precísase dun *convertidor D/A*, obténdose así o sinal analóxico correspondente a uns datos dixitais.



Sistemas e códigos de numeración

A base dun sistema de numeración é o número de símbolos distintos empregados para a representación das cantidades. O sistema de numeración empregado na vida cotiá é o *sistema decimal*, de base 10, no cal existen 10 símbolos diferentes, do 0 ata o 9.

O sistema máis empregado nos sistemas dixitais é o sistema binario, de base 2, no que existen soamente dous símbolos; o 0 e o 1.

Nun sistema de base b, un número N calquera pode representarse mediante un polinomio de potencias da base , multiplicada por un símbolo pertencente ao sistema.

Vexamos isto cuns exemplos:

- Representa mediante un polinomio de potencias o seguinte número en base 10:

$$87,54 = 8 \cdot 10^1 + 7 \cdot 10^0 + 5 \cdot 10^{-1} + 4 \cdot 10^{-2}$$

- Representa mediante un polinomio de potencias o seguinte número en base 2:

$$1011,11 = 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2}$$

Para identificar o sistema ao cal pertence un número sóese indicar a base como subíndice:

$$87,54_{10}; 673,54_8; 1011,11_2$$

Sistema binario

Este sistema so emprega dous símbolos, o 0 e o 1. A conversión dun número en base 2 a decimal realízase facilmente representando o número mediante o seu polinomio equivalente e operando este en base 10:

$$1011,11_2 = 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2} = 8 + 4 + 1 + 0,5 + 0,25 = 13,75$$

Na seguinte táboa podemos ver a equivalencia entre os dezaseis primeiros números enteros do sistema binario e decimal:

Sistema binario				Sistema decimal
2^3	2^2	2^1	2^0	
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	2
0	0	1	1	3
0	1	0	0	4
0	1	0	1	5
0	1	1	0	6
0	1	1	1	7
1	0	0	0	8
1	0	0	1	9
1	0	1	0	10
1	0	1	1	11
1	1	0	0	12
1	1	0	1	13
1	1	1	0	14
1	1	1	1	15

A conversión de decimal a binario faise dividindo a cantidade decimal por 2, apuntando os restos, ata obter un cociente 0. O último resto obtido é o *bit máis significativo* (MSB) e o primeiro é o *bit menos significativo* (LSB).

Exemplo:

Convertir o número 153_{10} a binario.

$$\begin{array}{r} 153 \overline{) 2} \\ \underline{1} 76 \overline{) 2} \\ 0 38 \overline{) 2} \\ 0 19 \overline{) 2} \\ 1 9 \overline{) 2} \\ 1 4 \overline{) 2} \\ 0 2 \overline{) 2} \\ 0 1 \overline{) 2} \\ \text{MSB } 1 0 \end{array}$$

Tipos de modulación dixitais

As modulacións dixitais que se utilizan para transmitir información por un medio de transmisión analóxico denomínase **modulacións dixitais de onda continua**.

A diferenza dos sistemas analóxicos, nos sistemas dixitais a información non está contida na forma de onda do sinal, senón nunha cadea de bits. O obxectivo das modulacións dixitais é que o receptor reciba a mesma secuencia de bits transmitida.

Nas modulacións dixitais de onda continua, o sinal portador segue sendo analóxico; en cambio, o sinal de información (sinal modulador) é un sinal dixital. É dicir, un fluxo continuo de bits. Este é o caso, por exemplo, dos sinais de radio e TV dixital que, a pesar de que a fonte orixinal é analóxica, antes da modulación a información a transmitir sofre un proceso de dixitalización.

As modulacións dixitais básicas seguen o mesmo principio de funcionamento que as modulacións analóxicas, onde o sinal modulador modifica un dos parámetros do sinal portador. Dentro do grupo de transmisións con sinais de transmisión analóxicos e datos dixitais se teñen os seguintes casos de técnicas de modulación ou codificación dependendo do parámetro do sinal portador que é afectado ou variado:

Desprazamento de amplitude – **ASK** (Amplitudes-shift keying).

Desprazamento de frecuencia – **FSK** (Frequency-shift keying).

Desprazamento de fase – **PSK** (Phase-shift keying).

Os demais tipos de modulación dixital como son **QAM** e **COFDM** son creados a partir destes tipos máis elementais.

Existen unha serie de parámetros propios das modulacións dixitais que explicaremos antes de comezar coa análise das mesmas e que nos axudarán a comprender as diferenzas entre elas.

Símbolo

Nas modulacións dixitais a moduladora é dixital e, polo tanto, só pode tomar un conxunto discreto de valores. Deste xeito precisaremos tantas variacións sobre o sinal portador como posibles valores tome o sinal modulador. A cada unha destas variacións posibles do sinal portador chamáremoslle **símbolo**.

Velocidade de modulación (Taxa de baudios)

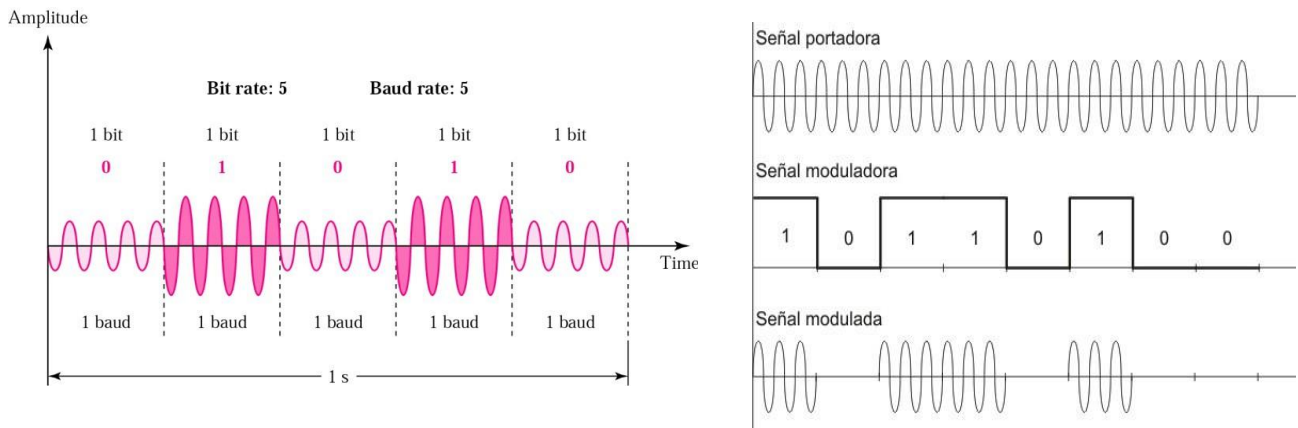
A velocidade de modulación é o número de símbolos que un sistema é capaz de transmitir en un segundo. A velocidade de modulación será o parámetro que nos axude a determinar o ancho de banda do sinal modulado xa que determina a taxa de variación do mesmo. A velocidade de modulación mídese en símbolos por segundo ou **baudios**.

Velocidade de transmisión (Taxa de bits)

A velocidade de transmisión é o número de bits que un sistema é capaz de transmitir en un segundo. Dado que un sistema de modulación dixital transmite símbolos en lugar de bits, a velocidade de transmisión dependerá do número de bits que se podan codificar en cada símbolo. Xeralmente os sistemas de modulación dixital están pensados para transmitir fluxos de bits e, polo tanto, o número de símbolos correspóndese con unha potencia de 2. Nestes casos a **velocidade de transmisión** será o produto da **velocidade de modulación** polo **número de bits por símbolo**.

5.4.1 AMPLITUDE SHIFT KEYING (ASK).

En ASK, modulación por desprazamento de amplitude, os dous valores binarios, 0 e 1, represéntanse con dúas amplitudes diferentes. É usual que unha das dúas amplitudes sexa cero. Neste caso un dos díxitos binarios represéntase mediante a presenza da portadora e o outro díxito con ausencia do sinal portador, este tipo chamase OOK (On-Off Keying).



Como é unha modulación de amplitude, o sinal portador ten a mesma expresión que se viu en AM. Pero o sinal modulador é dixital. A súa expresión é:

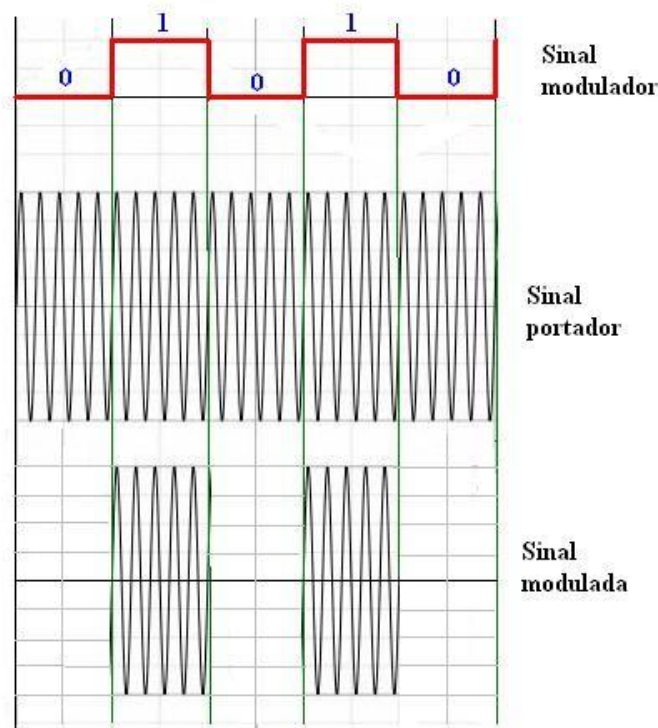
$$V_m(t) = 0V \text{ para el valor "0".}$$

$$V_m(t) = V_p V \text{ para el valor "1".}$$

E polo tanto, o sinal modulado ($V_M(t)$) só toma os seguintes valores:

- Cando o sinal modulador sexa "0": $V_M(t) = 0$
- Cando o sinal modulador sexa "1": $V_M(t) = V_p \text{ sen}(2\pi f_p t)$

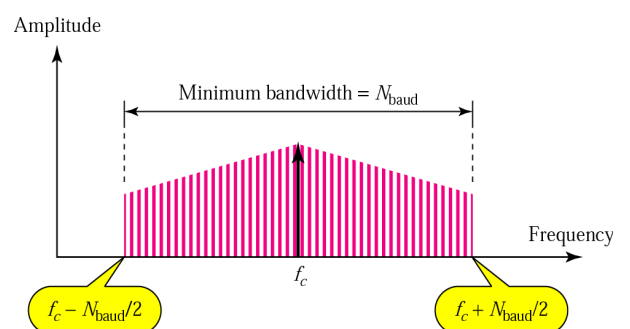
O sinal modulado pode representarse da seguinte maneira:



En xeral, a taxa de modulación será igual á taxa de bits xa que solo existen dous símbolos, que se codifican unicamente cun bit.

Existen tamén formas de ASK denominadas "multinivel", en las cuales la amplitud de la señal modulada toma más de dos valores.

A pesar de existir unha única frecuencia portadora o proceso de modulación produce un espectro que se estende a ambos lados da frecuencia da portadora, do mesmo xeito que sucedía en AM. Cando analizamos o espectro dun sinal ASK observamos que este se atopa, como mínimo, entre $f_p - N_{\text{baud}}/2$ e $f_p + N_{\text{baud}}/2$ coa frecuencia portadora f_p no medio.



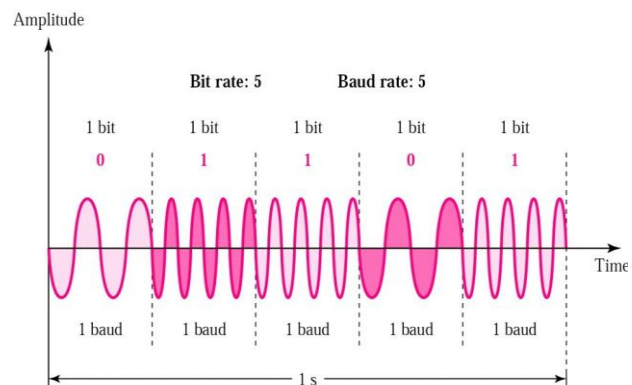
O ancho de banda mínimo do sinal modulado será $BW = N_{\text{baud}}$.

Do mesmo xeito que a AM, ASK é sensible ás interferencias xa que estas adoitan afectar á amplitude dos sinais; ademais trátase dunha técnica de modulación ineficaz en canto ao uso do ancho de banda.

A técnica ASK utilízase para a transmisión de datos dixitais en fibras ópticas. Nos transmisores con LED empregase OOK, é dicir, un elemento de sinal represéntase mediante un pulso de luz, mentres que o outro se representa mediante a ausencia de luz. Os transmisores láser teñen normalmente un valor de desprazamento (offset), que fai que o dispositivo emita un sinal de alta intensidade para representar un elemento e un sinal de menor amplitude para representar ao outro.

5.4.2 FREQUENCY SHIFT KEYING (FSK).

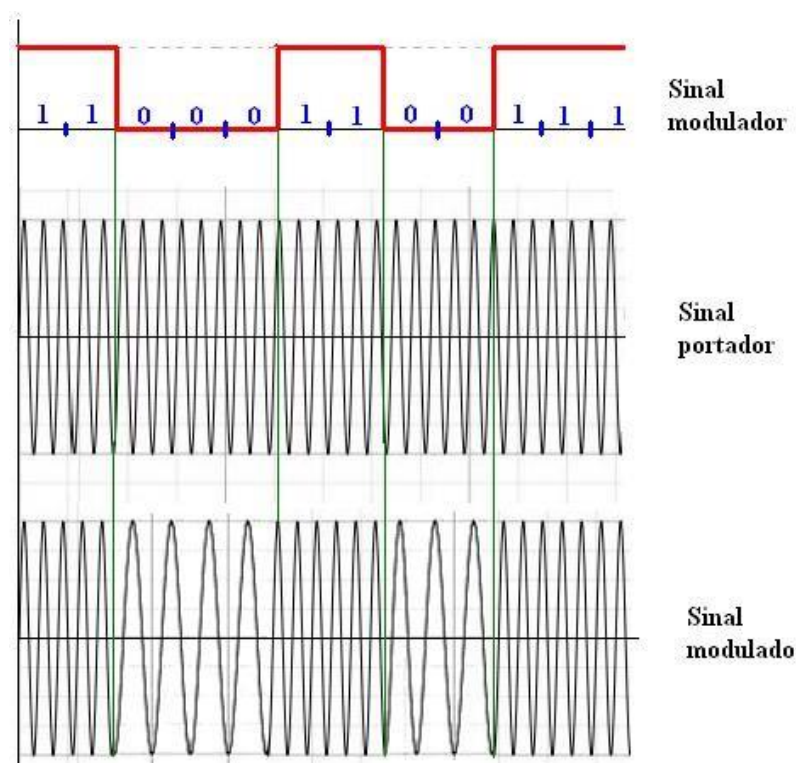
En FSK, modulación por desprazamento de frecuencia, os dous valores binarios, 0 e 1, represéntanse con dúas frecuencias diferentes f_{c1} e f_{c2} . A frecuencia permanece constante durante cada bit e o seu valor só depende do valor do mesmo. A amplitude e a fase permanecen constantes en todo momento.



A expresión para o estado lóxico “1” é: $V_M(t) = V_P \text{Sen}(2\pi f_1 t)$

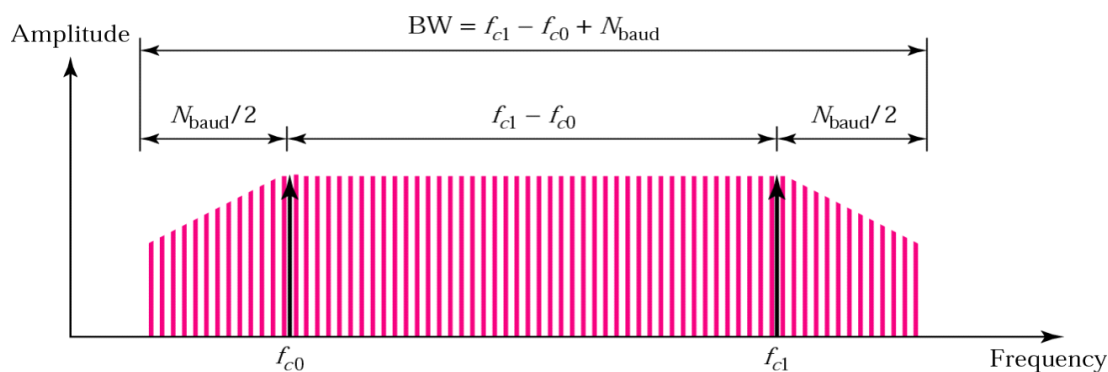
E para o estado lóxico “0” é: $V_M(t) = V_P \text{Sen}(2\pi f_2 t)$

O sinal modulado pode representarse da seguinte maneira:



FSK evita en gran medida os problemas co ruído xa que o receptor está esperando cambios de frecuencia coñecidos a intervalos de tempo que tamén son coñecidos. Isto fai que poidan ignorarse os cambios de amplitude.

Como FSK varía entre dúas frecuencias portadoras o modo máis sinxelo de analízalo é como dúas frecuencias portadoras coexistentes. O espectro FSK pode caracterizarse como a combinación de dous sinais OOK centradas cada unha nunha das frecuencias que representan os bits f_{c1} e f_{c2} .



O ancho de banda requirido é entón igual ao Baud rate do sinal máis a diferenza entre as dúas portadoras: $BW = f_{c1} - f_{c2} + N_{\text{baud}}$.

Os primeiros MODEMS telefónicos operaban en FSK e tamén se emprega habitualmente en algúns sistemas dixitais de radioaficionados.

Existe tamén unha variante na que se empregan máis de dúas frecuencias, trátase de MFSK pero o seu uso é moi pouco frecuente.

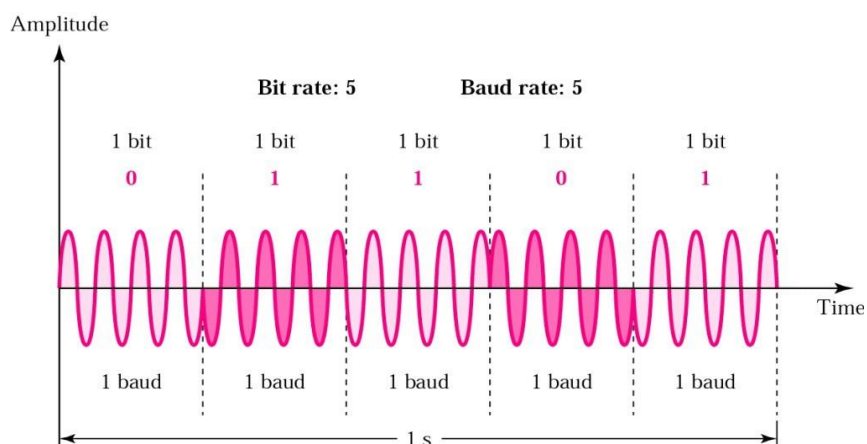
5.4.3 PHASE SHIFT KEYING (PSK).

En PSK, modulación por desprazamento de fase, a fase da portadora é modificada para representar os símbolos do sinal dixital. A amplitude e a frecuencia permanecen constantes mentres que a fase varía en función do símbolo.

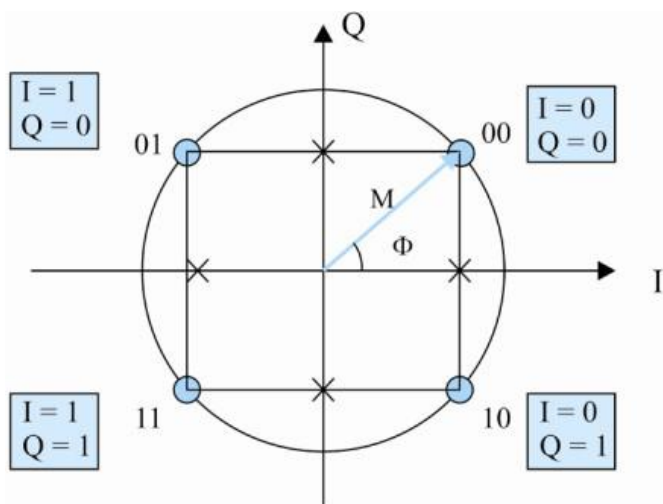
PSK non é susceptible á degradación producida en ASK polo ruído e ademais non está limitada polas limitacións de ancho de banda sufridas por FSK. Pola súa parte o ancho de banda mínimo requirido para PSK é o mesmo que para ASK, é dicir, igual á velocidade de modulación (N_{baud}).

BPSK

En 2-PSK ou BPSK: Utilizamos dúas fases da mesma portadora (0° e 180°) para representar os dous valores binarios 0 e 1.



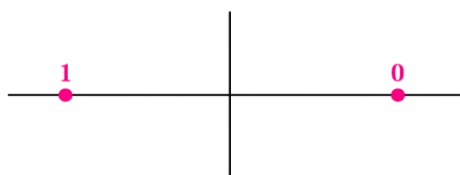
A representación de todos os estados posibles dunha modulación denomínase **constelación**. A constelación indica a amplitude (M) e a fase (ϕ) de cada un dos símbolos da modulación.



O diagrama de constelación e a táboa de estados mostran a relación entre símbolos e fases.

Bit	Phase
0	0°
1	180°

Bits



Constellation diagram

A velocidade de transmisión é igual á velocidade de modulación xa que se envía 1 bit por símbolo.

QPSK

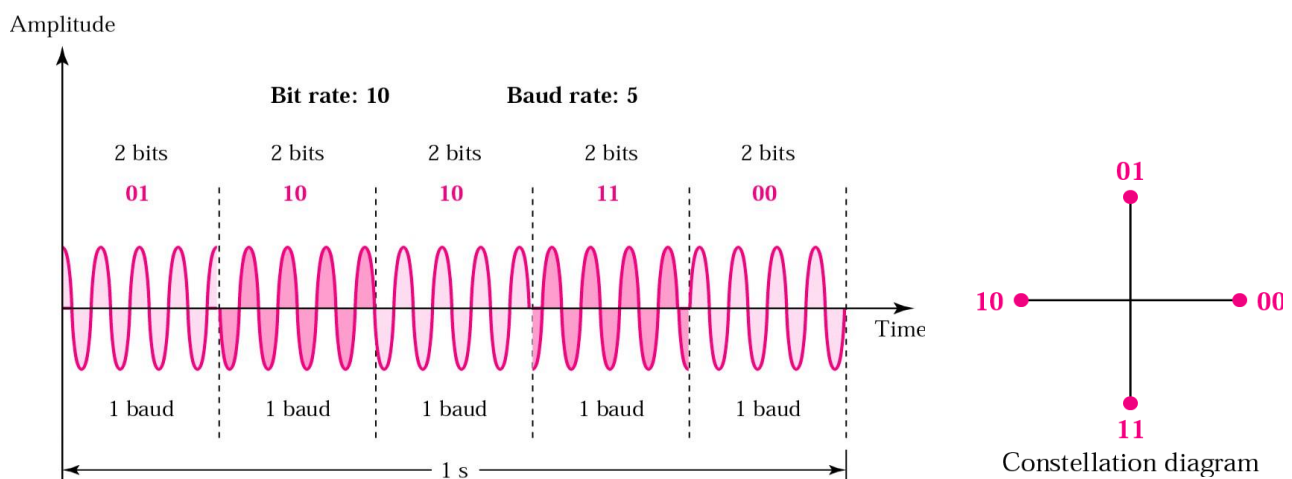
Variacións de fase menores a 180° poden ser detectadas de modo eficiente polos receptores. Así, en lugar de usar só dúas fases diferentes é posible empregar 4 de modo que cada fase (símbolo) represente 2 bits.

Segundo este esquema a fase de 0° representa 00; a de 90° representa 01; a de 180° representa 10 e a de 270° representa 11. Esta técnica chámase 4-PSK ou QPSK. O par de bits representados por cada fase chámase dibit. Podemos transmitir datos o dobre de rápido empregando QPSK que con BPSK. Coa mesma taxa de modulación teremos o dobre de taxa de bits. Na figura da dereita poden verse a táboa de estados.

Dibit	Phase
00	0
01	90
10	180
11	270

Dibit
(2 bits)

A continuación móstranse un diagrama amplitude-tempo e o diagrama de constelación para a modulación QPSK.



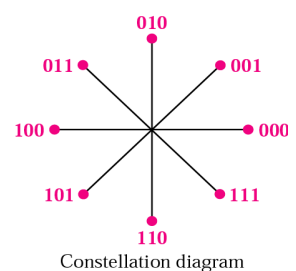
A velocidade de transmisión é o dobre da velocidade de modulación xa que se envían 2 bits por símbolo. No mesmo ancho de banda (mesma velocidade de modulación) que empregando ASK ou BPSK envíase o dobre de información.

8-PSK

En lugar da intervalos de 90° , podemos cambiar a fase a intervalos de 45° . Con 8 fases diferentes cada fase (símbolo) representa 3 bits (1 tribit).

Tribit	Phase
000	0
001	45
010	90
011	135
100	180
101	225
110	270
111	315

Tribits
(3 bits)



8-PSK é 3 veces máis eficaz que BPSK. A velocidade de transmisión é o triple da velocidade de modulación xa que se envían 3 bits por símbolo. No mesmo ancho de banda (mesma velocidade de modulación) que empregando ASK ou BPSK envíase o triple de bits.

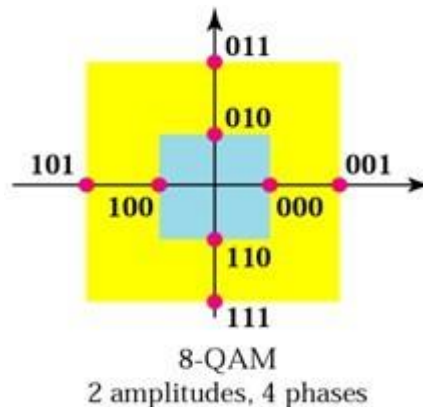
PSK máis aló de 8-PSK non resulta práctico. De feito 8-PSK xa é pouco empregado na práctica. Os esquemas BPSK e QPSK son moi importantes e están recollidos nalgúns dos estándares máis importantes de radiocomunicacións (WiFi, Bluetooth, WiMAX...) para ser empregados cando a canle é ruidosa xa que, se as condicións son óptimas, existen estándares máis eficientes.

5.4.4 QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION (QAM).

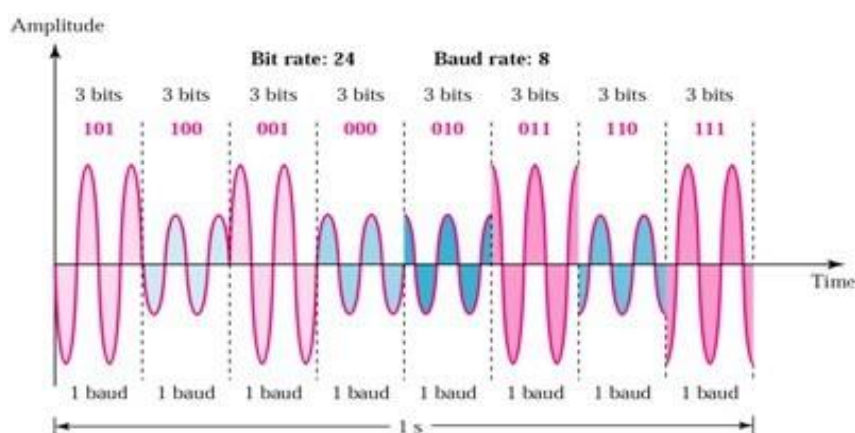
QAM xorde da idea de combinar diferentes técnicas vistas (PSK, FSK e ASK) para dar lugar a unha de mellor rendemento. As limitacións de ancho de banda de FSK fan que non resulte práctico usar combinacións dela. Sen embargo combinando ASK e PSK poderemos ter N posibles amplitudes e M posibles fases obtendo $M \cdot N$ símbolos. A isto chámasele modulación de amplitude en cuadratura (QAM).

En QAM tratamos de combinar ASK e PSK de modo que o contraste entre os símbolos resultantes sexa o maior posible. En xeral o número de posibles amplitudes é menor que o de fases para evitar os problemas co ruído característicos de ASK. Para minimizar estes problemas é conveniente que a diferenza entre as posibles amplitudes sexa grande.

Por exemplo en 8-QAM cada símbolo equivale a = 3 bits (1 tritbit). A correspondente constelación pode verse na figura da dereita.

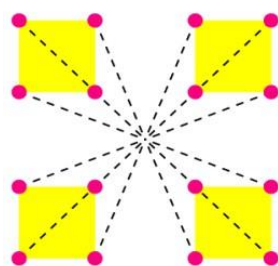


A continuación, na figura de debaixo pode verse un exemplo de forma de onda:



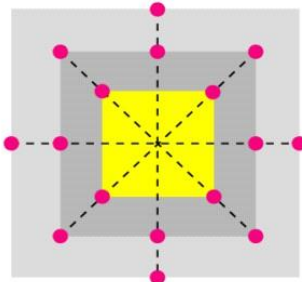
En 16-QAM temos estas 3 posibilidades(existen máis):

3 amplitudes, 12 phases



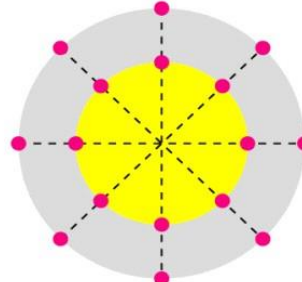
16-QAM

4 amplitudes, 8 phases



16-QAM

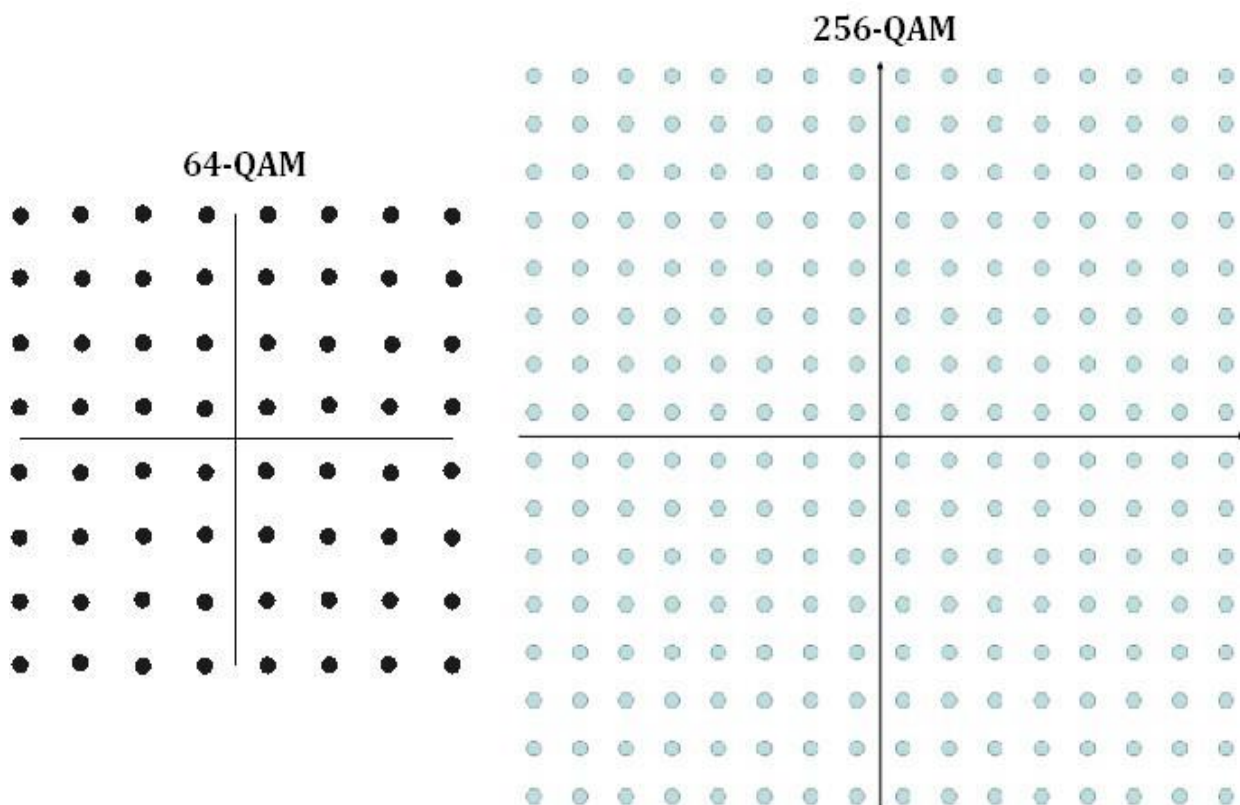
2 amplitudes, 8 phases



16-QAM

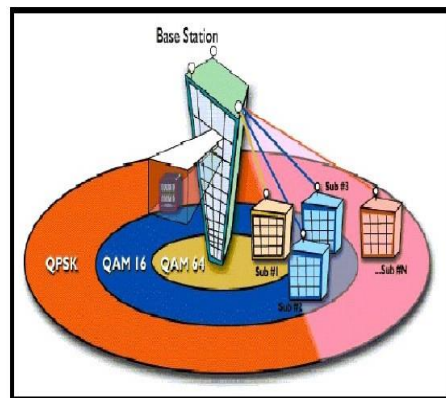
A primeira é a recomendación da ITU-T. Emprega 3 amplitudes e 12 fases, é a que mellor xestiona o ruído (máis fases e menos amplitudes). A segunda é a recomendación de OSI, obsérvese como só 16 das 32 combinacións posibles son empregadas para facilitar o recoñecemento dos símbolos.

Seguindo a mesma filosofía chégase aos esquemas de modulación 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM e 256-QAM. As constelacións de 64-QAM e 256-QAM aparecen na figura a continuación.



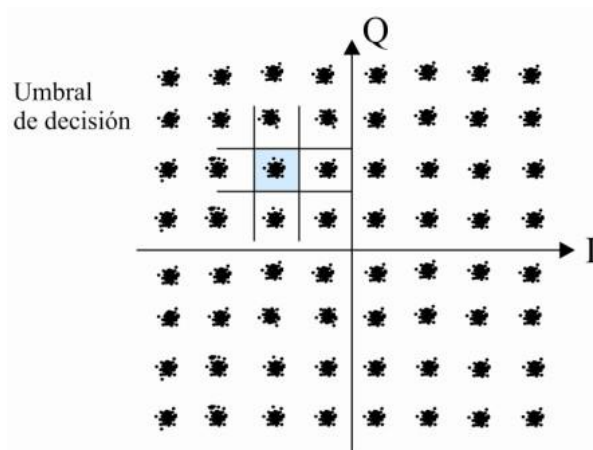
Mentres que as modulaci3ns de maior orde permiten taxas de transmisi3n moito m3is elevadas a igualdade de ancho de banda e, polo tanto, unha maior eficiencia espectral, isto ten un prezo. Canto maior 3 a orde dun esquema de modulaci3n menos resistente 3 este ante os r3idos e as interferencias.

Por este motivo moitos dos sistemas modernos de radiocomunicaci3ns empregan t3cnicas de modulaci3n adaptativas. Este tipo de sistemas miden as condici3ns da canle e elixen o esquema de modulaci3n que proporcione un mellor rendemento nesas condici3ns. Pensemos que o rendemento dun enlace pode ser maior empregando un esquema de modulaci3n de orde inferior sempre que se reduza suficientemente o n3mero de erros e reenv3os. Os est3ndares modernos de redes LAN/MAN inal3mbricas empregan estas t3cnicas de modulaci3n adaptativa. 3 o caso de WiFi 802.11g, WiFi 802.11n e dos diferentes est3ndares de WiMAX 802.16.

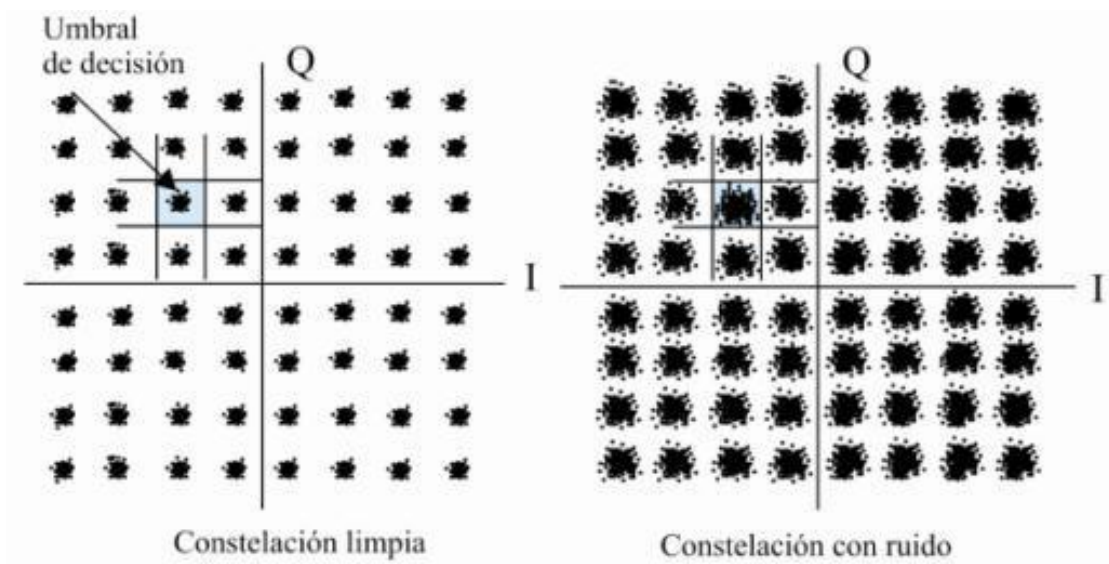


5.4.5 DEMODULACI3N DE SINAIS DIXITAIS.

No receptor, a principal funci3n que realiza o demodulador 3 decidir o s3mbolo transmitido en funci3n do sinal recibido. Debido aos efectos de propagaci3n do sinal, este recibirase con r3ido, polo que o demodulador debe decidir segundo un **umbral de decisi3n**.



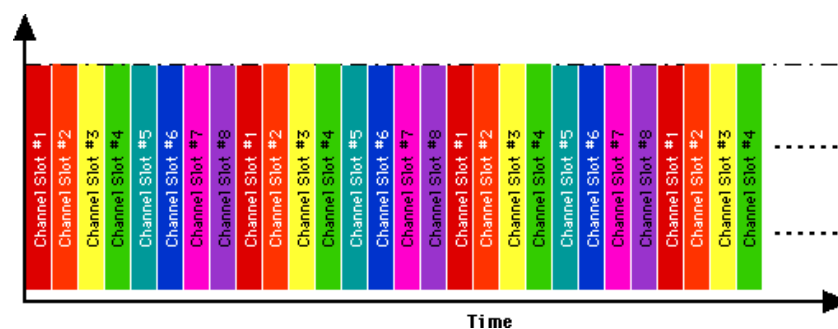
No caso dunha transmisi3n con moito r3ido, 3 posible que a informaci3n recibida conte3a erros, e que un s3mbolo caia f3ra do seu umbral de decisi3n. A figura seguinte compara unha constelaci3n libre de r3ido e outra con moito r3ido, na que 3 posible que haxa moitos erros de transmisi3n:



5.5 MULTIPLEXACIÓN

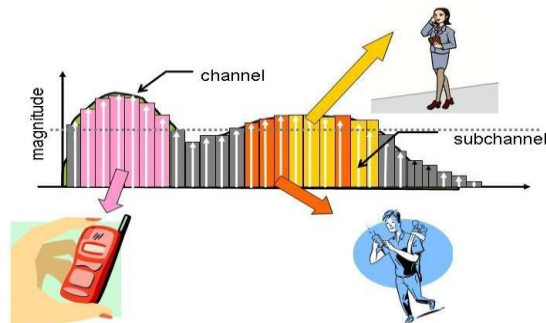
A multiplexación é un conxunto de técnicas que permiten transmitir varios sinais ou fluxos dixitais conxuntamente a través dun único sinal. Mediante a multiplexación dividimos unha única canle de radio en múltiples canles lóxicas para dar servizo a múltiples aplicacións ou a múltiples usuarios. As estratexias de multiplexación máis habituais son:

Multiplexación por división de tempo ou TDM (Time Division Multiplexing) - O ancho de banda total da canle é asignado a un fluxo de información durante unha fracción do tempo total (time slot); deste xeito varios fluxos comparten a canle por quendas. Estes time slots poden non ser iguais entre si para establecer fluxos de distinta capacidade. Tamén existe o TDM asíncrono ou estatístico no que os time slots non son fixos senón que o seu tamaño adaptación ás características do tráfico en cada momento aproveitando mellor a ligazón a conta de complicar o sistema. Emprégase habitualmente con sinais dixitais.



Multiplexación por división de frecuencia ou FDM (Frequency Division Multiplexing) -

Modúlase cada un dos sinais que se desexa transmitir sobre unha frecuencia portadora diferente de xeito que o ancho de banda total da canle é dividido entre os diferentes fluxos de comunicación. Deste xeito pódense transmitir varios subcanaís de banda estreita a través dunha única canle de banda ancha. Cando se emprega en fibras ópticas denomínase **multiplexación por división de lonxitude de onda**, ou WDM do inglés Wavelength Division Multiplexing. Emprégase habitualmente con sinais analóxicos.



A multiplexación por división en código ou CDM (Code division multiplexing) –

Asígnase a cada fluxo de comunicación un código de transmisión distinto (e único) para modular o seu sinal. Ao combinar o sinal recibido co código asignado a un determinado fluxo é posible recuperar a información dese fluxo en particular e rexeitar o resto de sinais e as interferencias. A selección dos códigos a empregar para a modulación é vital para o bo desempeño dos sistemas CDM.

Cando o protocolo de multiplexación está pensado para que múltiples usuarios compartan un medio común denomínase, ás veces, **control de acceso ao medio ou método de acceso múltiple**. Falaremos entón de acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), acceso múltiple por división de tempo ou (TDMA) e acceso múltiple por división de código (CDMA).

En ocasións, cando a multiplexación se emprega para posibilitar que a comunicación a través dun enlace sexa bidireccional, chámasele duplexación.