

Instituto Tecnológico de San Luís Potosí

Centro de Telecomunicaciones

Teleproceso y Redes de Computadoras

Técnicas de Modulación

4. Técnicas de Modulación

4.1 Introducción

4.1.1 Señales Periódicas

4.2 Técnicas de Modulación Analógica

4.2.1 Técnicas de Modulación de Amplitud

AM Amplitude Modulation (Modulación de Amplitud)

ASK Amplitude Shift Keying (Modulación por Cambio de Amplitud)

4.2.2 Técnicas de Modulación de Frecuencia

FM Frequency Modulation (Modulación de Frecuencia)

FSK Frequency Shift Keying (Modulación por Cambio de Frecuencia)

4.2.3 Técnicas de Modulación de Fase

PSK Phase Shift Keying (Modulación por Cambio de Fase) Bifásica

PSK Phase Shift Keying (Modulación por Cambio de Fase) Tetrafásica

4.2.4 QAM Quadrature Amplitude Modulation

4.3 Técnicas de Modulación Digital

4.3.1 PAM Modulación de Amplitud de Pulso

4.3.2 PPM Modulación de Anchura de Pulso

4.3.3 PWM Modulación de Posición de Pulso

4.3.4 PCM Modulación de Código de Pulso

4. Técnicas de Modulación

4.1 Introducción

Cualquier tipo de información generada por el hombre que se desee transmitir es convertida en una señal analógica de voz, audio, video ó datos.

Estas señales se transmiten por lo general en banda base con las limitantes que esta técnica de transmisión implican; ó en banda ancha para lo cual es necesario multicanalizar el medio de comunicación utilizado. Las Técnicas de Modulación entre otras aplicaciones, significan un recurso importante para la multicanalización de un medio de comunicación.

Los módems de todas las generaciones han utilizado como principio de operación básico un técnica de modulación.

El proceso de digitalización de una señal analógica utiliza en una de sus etapas una técnica de modulación.

Por lo anterior, se entiende que las Técnicas de Modulación son un recursos importante en la tecnología actual, tanto en la transmisión, como en el procesamiento de las señales.

4.1.1 Señales Periódicas

Cualquier señal eléctrica puede caracterizarse por tres parámetros importantes: Amplitud, Frecuencia y Fase.

Para ilustrar lo anterior, considérense las señales analógicas cuya amplitud, frecuencia y fase son constantes. Estas señales son conocidas como señales analógicas periódicas Para las cuales sus parámetros característicos están definidos como:

Las señales portadoras, son señales de muy alta frecuencia -con amplitud, frecuencia y fase constantes.

Amplitud V_p .- Es la variación máxima de la señal $V(t)$ por arriba o por abajo de un nivel de referencia de cero volts.

$$\text{sen } \theta = \frac{V(t)}{V_p}$$

de donde

$$V(t) = V_p \text{ sen } \theta$$

Frecuencia.- Es el número de ciclos que se repiten por unidad de tiempo.

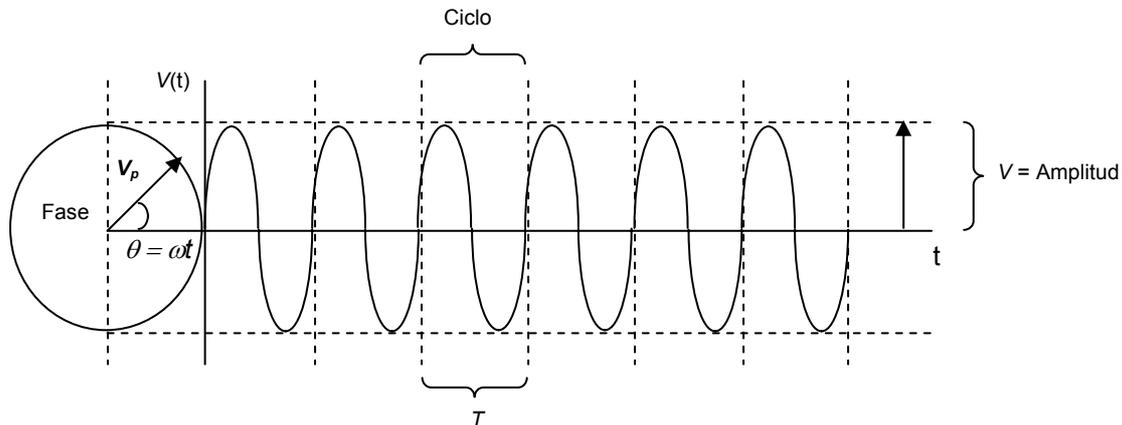
$$F = \frac{1}{T}$$

donde T es el periodo o duración de un ciclo u oscilación.

Fase.- Es el ángulo instantáneo θ (ángulo de fase) que genera el movimiento circular de un radio vector V_p de magnitud constante que se desplaza a una velocidad angular ω .

Donde:

$$\omega = \frac{\theta}{t}$$



Para un ciclo completo de la señal se tiene que:

$$t = T$$

y

$$\theta = 2\pi$$

por lo que

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

o bien,

$$\omega = 2\pi F$$

La Frecuencia de la señal es directamente proporcional a la velocidad angular .

Una técnica de modulación es un recurso que se utiliza para modificar uno de los tres parámetros constantes de una señal periódica, utilizando las variaciones de voltaje de una señal aperiódica (voz, audio, video o datos) .

Por lo anterior se entiende que, se puede modular la amplitud, se puede modular la frecuencia o se puede modular la fase una señal analógica periódica aplicando las variaciones de voltaje de una señal de banda base aperiódica.

En estudios de transmisión y técnicas de modulación, a las señales analógicas periódicas se les conoce como señales portadoras. En lo sucesivo, por señal portadora entenderemos "señal analógica periódica".

Existen otras técnicas de modulación que no requieren de modificar una señal portadora. Mas bien, la señal a procesar, o a transmitir, se muestrea, cuantifica y codifica.

Las técnicas de modulación que se basan en la modificación de una característica de una señal portadora, son llamadas Técnicas de Modulación Analógica.

Las técnicas de modulación basadas en el muestreo, cuantificación y codificación de la propia señal, son llamadas Técnicas de Modulación Digital.

4.2 Técnicas de Modulación Analógica

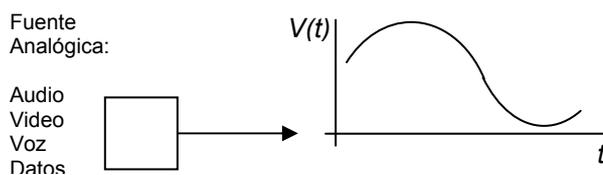
Estas técnicas, son un tipo de modulación lineal que consiste en hacer variar la amplitud de una señal portadora de forma que esta cambie de acuerdo con las variaciones de nivel de la señal moduladora, que es la información que se va a transmitir.

Anteriormente se establece que en estas técnicas, participan dos señales importantes:

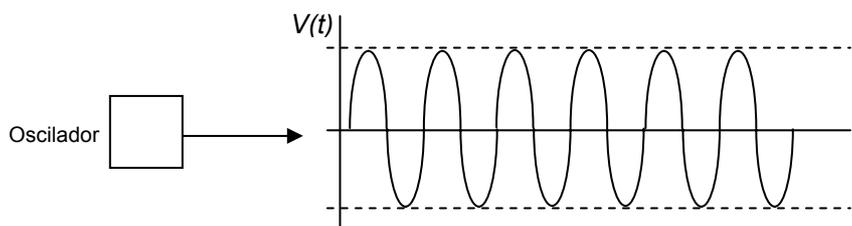
Señal Moduladora

Señal Portadora

Una *señal moduladora* es una señal de banda base de audio, video, voz ó datos. Es una señal analógica, continua en el tiempo, que particularmente, transmite la información en sus variaciones de amplitud.



Una *señal portadora* es una señal analógica de más alta frecuencia que la de la señal moduladora, con amplitud, frecuencia y fase constantes.



En esta técnica, se utilizan las variaciones de amplitud de la señal moduladora que se desea transmitir para modificar uno de los tres parámetros (amplitud, frecuencia ó fase) de la señal portadora.

De aquí que se consideren tres opciones en la técnica de modulación analógica:

Modulación de Amplitud

Modulación de Frecuencia

Modulación de Fase

4.2.1 Técnicas de Modulación de Amplitud

Modulación de Amplitud significa entonces que se utilizan las variaciones de amplitud de la moduladora para modificar la amplitud constante de la portadora.

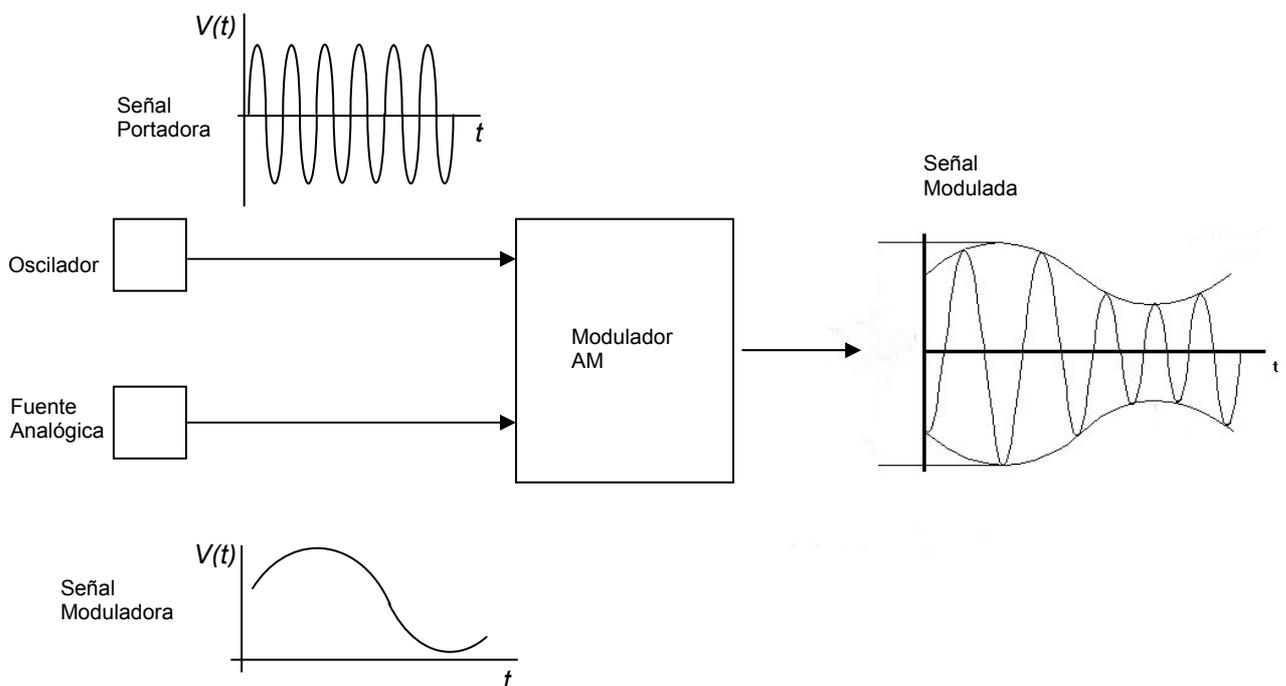
Existen dos variantes de ésta técnica:

AM Amplitude Modulation (Modulación de Amplitud)

ASK ASK Amplitude Shift Keying (Modulación por Cambio de Amplitud)

AM Amplitude Modulation (Modulación de Amplitud)

En AM se utiliza una señal analógica de banda base de voz, audio, ó video para modular la amplitud de una portadora generada por un oscilador.



Las variaciones de amplitud de la moduladora se incorporan a la portadora, en un modulador AM. La *señal modulada* obtenida de este modulador, es la señal portadora modulada en amplitud, cuya envolvente tiene la misma forma de onda de la moduladora.

Una gran ventaja de AM es que su demodulación es muy simple, y por consiguiente los receptores son sencillos y baratos.

La AM es usada en la radiofonía tanto en bandas concesionadas (Broadcast) como en las bandas permissionadas (Radioaficionados), en las ondas medias, ondas cortas, e incluso en la VHF: es utilizada en las comunicaciones radiales entre los aviones y las torres de control de los aeropuertos.

ASK Amplitude Shift Keying (Modulación por Cambio de Amplitud)

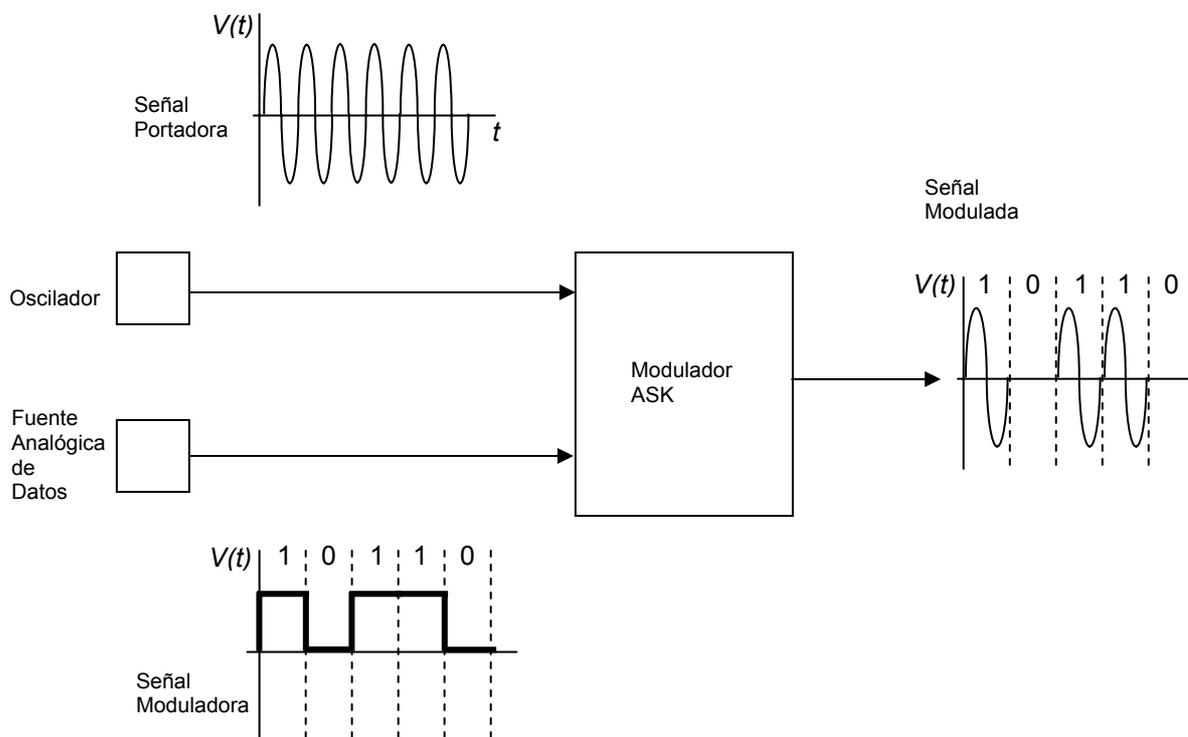
Amplitude Shift Keying, conocida como ASK, es un esquema de modulación en el que la amplitud de una portadora es modulada por una señal digital.

En esta técnica:

Se utiliza un oscilador para generar una señal portadora con amplitud, frecuencia y fase constantes.

Se utiliza un dispositivo digital para generar una señal digital de banda base.

Se utiliza un modulador para suprimir la amplitud de la señal portadora utilizando los cambios de estado lógico de la señal digital de banda base.



de tal forma que en su *constelación* I-Q, los símbolos mapeados se ubican a lo largo del eje I.

En el caso de la modulación binaria ASK, un "0" lógico se representa por,

$$V(t) = 0$$

mientras que un "1" lógico se representa por

$$V(t) = V_p \text{ sen } \omega t$$

De tratarse de modulación ASK multinivel, el número de símbolos mapeados en la constelación determinará el número de posibles niveles de amplitud que tome la señal ASK. La Figura siguiente muestra la *constelación* de la modulación binaria ASK y la señal ASK respectivamente, para la secuencia binaria 0010110.

En ASK se utilizan los cambios de estado lógico de una señal de banda base digital para modular la amplitud de una portadora generada por un oscilador.

Las variaciones de amplitud de la moduladora se incorporan a la portadora, en una modulador ASK. Este modulador manipula los cambios de estado binario de la moduladora para suprimir la amplitud de la portadora cuando se transmita un bit de nivel lógico bajo.

Las técnicas de modulación de amplitud son fáciles de implementar y muy económicas pero, puesto que la información es transmitida por las variaciones de amplitud, las técnicas comentadas son muy sensibles a cualquier tipo de interferencia y/o ruido eléctrico.

Esta técnica fue empleada en los primeros módems de muy baja velocidad que se utilizaban hace algunos años.

4.2.2 Técnicas de Modulación de Frecuencia

La Técnica de Modulación de Frecuencia es el proceso de codificar información, la cual puede estar tanto en forma digital como analógica, en una onda portadora mediante la variación de su frecuencia instantánea de acuerdo con la señal de entrada.

También, Modulación de Frecuencia significa que se utilizan las variaciones de amplitud de la moduladora para producir modificaciones en la frecuencia constante de la portadora.

Existen dos variantes de ésta técnica:

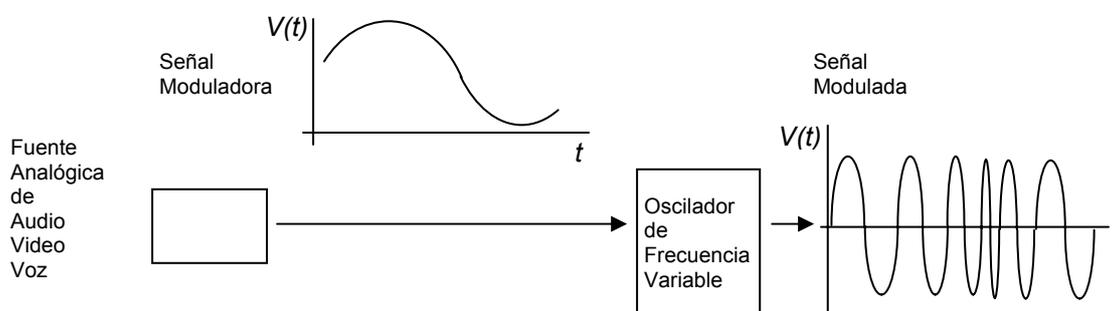
FM

FSK

FM Frequency Modulation (Modulación de Frecuencia)

En FM se utiliza una señal analógica de banda base de voz, audio ó video para modular la frecuencia de una portadora generada por un oscilador de frecuencia variable.

Las variaciones de frecuencia de la moduladora se incorporan a la portadora, en el VFO (Oscilador de Frecuencia Variable). La señal modulada obtenida, es la señal portadora modulada en frecuencia, con variaciones de frecuencia proporcionales a las variaciones de amplitud de la moduladora.

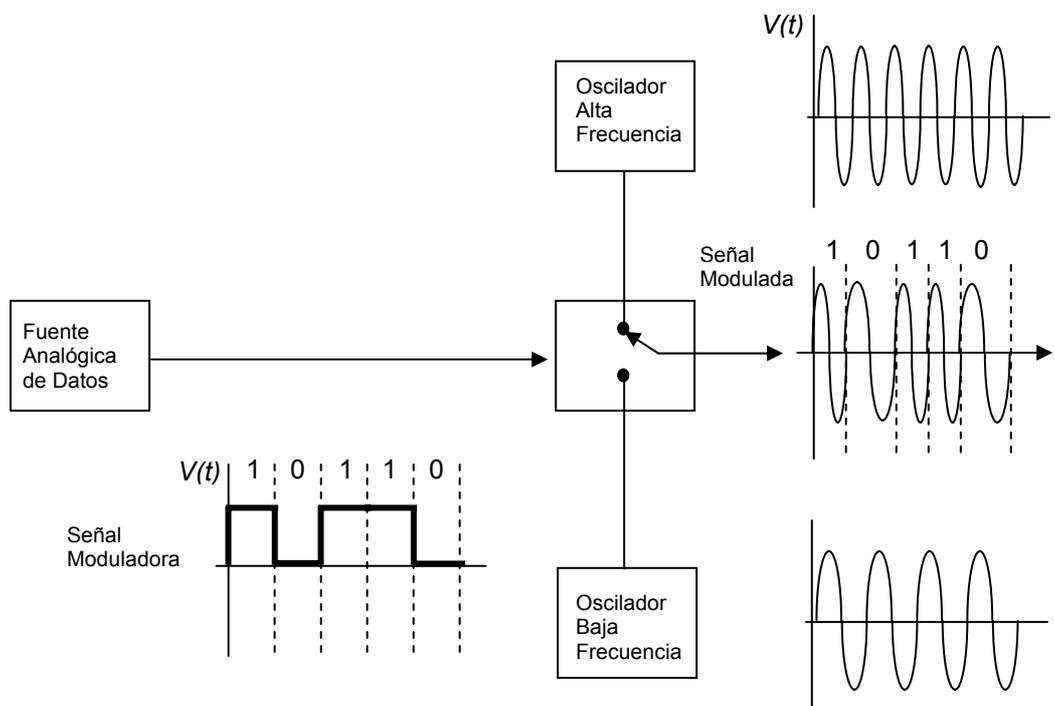


La técnica de FM tiene un desempeño superior frente al ruido que la de AM puesto que la información es transmitida en variaciones de frecuencia y no de amplitud, y por supuesto, mejora los requerimientos de potencia. Por esta razón, FM es más recomendable para transmitir audio de alta fidelidad.

Por otro lado, el ancho de banda requerido en un sistema de FM es mucho mayor que el requerido en un sistema de AM, y esta determinado por la amplitud de la moduladora.

FSK Frequency Shift Keying (Modulación por Cambio de Frecuencia)

En FSK se utilizan los cambios de estado lógico de una señal de banda base digital para seleccionar una de dos frecuencias de portadora generadas por dos osciladores.



Las variaciones de amplitud de la moduladora se incorporan a la portadora, en una modulador FSK. Este modulador manipula los cambios de estado binario de la moduladora para seleccionar una de dos frecuencias de portadora cuando se transmita un bit de nivel lógico bajo.

Las técnicas de modulación de frecuencia no son fáciles de implementar y no muy económicas pero, puesto que la información es transmitida por las variaciones de frecuencia y no de amplitud, las técnicas comentadas resultan poco sensibles a cualquier tipo de interferencia y/o ruido eléctrico.

4.2.3 Técnica de Modulación de Fase

Modulación de Fase significa que se utilizan las variaciones de amplitud de la moduladora para producir cambios en la fase constante de la portadora.

PSK Phase Shift Keying (Modulación por Cambio de Fase)

En PSK se utilizan los cambios de estado lógico de una señal de banda base digital para producir un cambio de fase en la portadora.

Las variaciones de amplitud de la moduladora se incorporan a la portadora, en una modulador PSK. Este modulador manipula los cambios de estado binario de la moduladora para producir los corrimientos de fase en la portadora cuando se transmita un cambio en el nivel lógico.

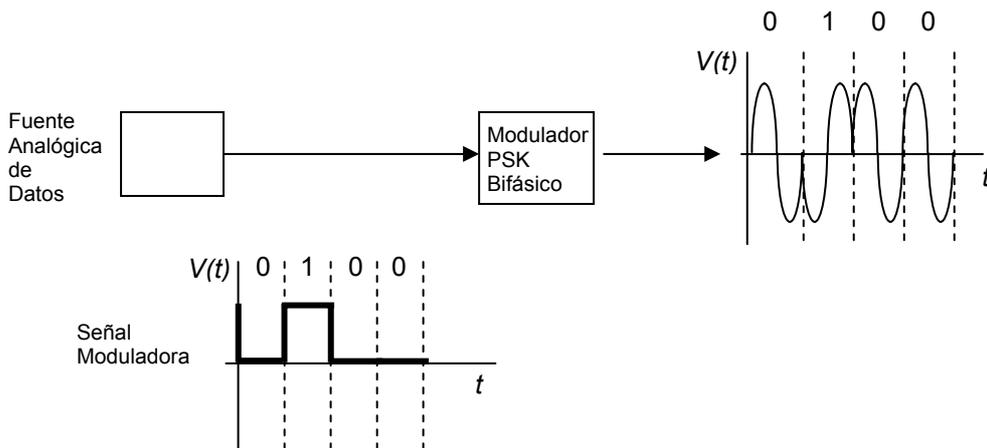
Existen dos variantes básicas de PSK

PSK Bifásica

PSK Tetrafásica

PSK Bifásica

Esta técnica consiste en originar un desplazamiento de fase de 180° grados en la fase de la portadora cuando la señal binaria moduladora cambia de estado. Si la señal de binaria no cambia de estado, la portadora se mantendrá sin cambio de fase.



En el caso de la modulación binaria ASK, un "0" lógico se representa por,

$$V(t) = V_p \text{ sen } wt$$

mientras que un "1" lógico se representa por

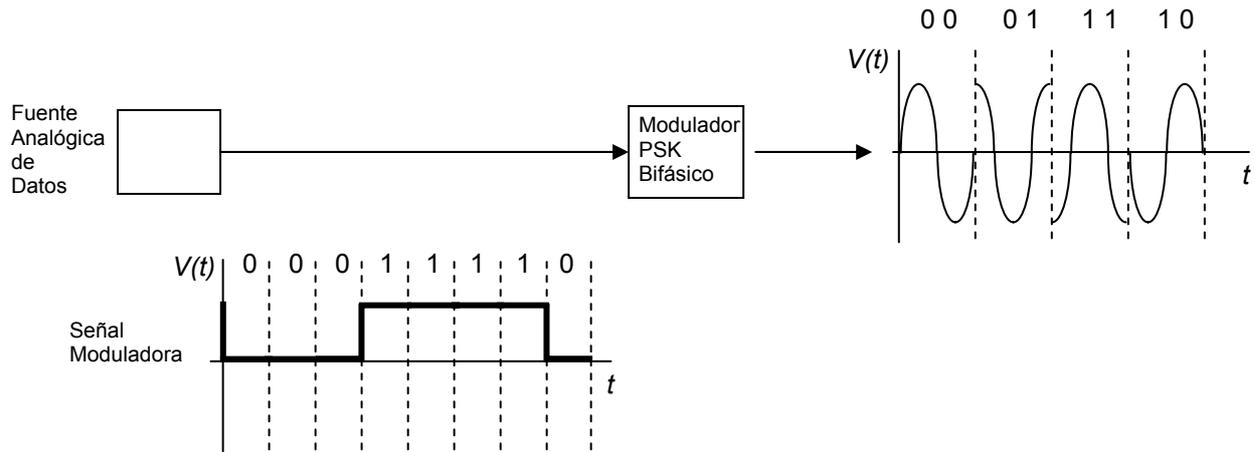
$$V(t) = V_p \text{ sen } (wt + \pi)$$

En esta técnica de modulación, se transmite un solo bit por cada estado de señal.

PSK Tetrafásica

Si consideramos que con dos bits existen cuatro posibles combinaciones, en esta técnica, el mensaje es dividido en parejas de bits llamadas *dibits*. Luego, a cada dibit se le asigna un desplazamiento de fase o estado de señal según la tabla siguiente. Entonces se transmite una portadora modulada que cambia de fase por cada dibit transmitido de acuerdo a la secuencia del mensaje.

Dibit	Corrimiento de Fase (Grados)
00	0
01	90
11	180
10	270



PSK Tetrafásica es utilizada para duplicar la velocidad de transmisión de la información en un módem ya que se transmiten dos bits por cada estado de señal.

Las técnicas de modulación de fase no son fáciles de implementar y no muy económicas. Puesto que la información es transmitida por los desplazamientos de fase, la técnica PSK resulta muy poco sensible a cualquier tipo de interferencia y/o ruido eléctrico.

4.2.4 QAM Quadrature Amplitude Modulation

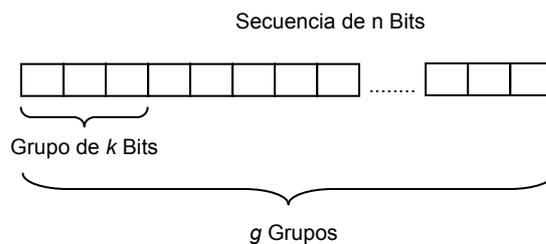
Esta técnica de modulación consiste en modular dos portadoras en amplitud, en canales individuales ó, en un solo canal para optimizar el ancho de banda, si se requiere.

En comunicación analógica se implementa la transmisión de información digital utilizando codificación y decodificación de bits considerando tres elementos:

- a.- Secuencia de Bits
- b.- Longitud de la Secuencia de Bits
- c.- Representación de la Secuencia de Bits en función de una de las características de la portadora.

La secuencia de bits representa la información digital que se desea transmitir o recibir.

La secuencia está compuesta de g grupos de bits. Cada grupo de bits consta de k bits, por lo tanto, el número $n = gk$ de bits, es denominado *longitud de la secuencia* de bits.



Cada grupo de bits se puede representar como un estado de señal en función de:

- i.- Amplitud de la portadora
- ii.- Fase de la portadora
- iii.- Amplitud y Fase de la portadora

Con cualquiera de tres las opciones anteriores, se pueden generar

$$M = 2^k \text{ estados de señal}$$

Donde k es el número de bits (en un grupo de bits) que se pueden representar por cada estado diferente de la señal portadora.

Por ejemplo, si se consideran dos niveles de amplitud de portadora ($V_p = 1$ y $V_p = \frac{1}{2}$) sin cambio de fase, se tendrán $M = 2$ estados de señal diferentes: uno de nivel 1 y otro de nivel $\frac{1}{2}$

Bit	Amplitud
0	$\frac{1}{2}$
1	1

Si

$$M = 2$$

Entonces

$$M = 2 = 2^1 \text{ estados de señal}$$

Por tanto

$$k = 1 \text{ bit por cada estado diferente de señal}$$

Lo anterior establece que cada estado de señal representará solamente un bit de información digital.

En otro ejemplo, considérense dos niveles de amplitud de portadora y cambios de fase múltiplos de $90^\circ (\pi/2)$. Se obtendrían los siguientes estados de señal:

Amplitud de Portadora	Corrimiento de la Fase
$\frac{1}{2}$	0
1	0
$\frac{1}{2}$	90
1	90
$\frac{1}{2}$	180
1	180
$\frac{1}{2}$	270
1	270

Como se puede observar en la tabla anterior, se tienen 8 estados de señal diferentes por, lo que:

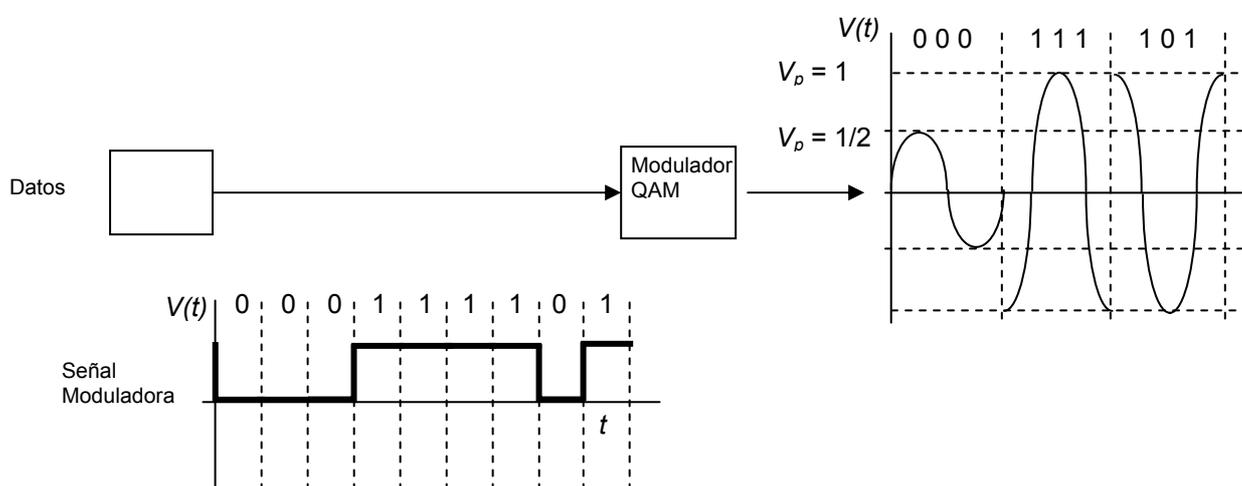
$$8 = 2^3 \text{ estados de señal diferentes}$$

por lo tanto cada estado de señal puede representar un grupo distinto de $k = 3$ bits.

Lo anterior establece que cada estado diferente de señal representará un grupo de tres bits de información digital. La tabla siguiente muestra lo comentado.

Amplitud de Portadora	Corrimiento de la Fase	Grupo de Bits
1/2	0	000
1	0	001
1/2	90	010
1	90	011
1/2	180	100
1	180	101
1/2	270	110
1	270	111

Entonces, QAM es una técnica de modulación multinivel en donde se transmite uno de los 2^k estados de señal, con distintas combinaciones de amplitud y fase.



Considerando múltiples niveles en la modulación de amplitud así como múltiples valores para el ángulo de fase en la modulación de fase, es posible transmitir grupos de k bits, por cada estado de señal diferente definido por un par de valores de amplitud y fase.

La técnica de modulación Quadrature Amplitude Modulation (QAM), es una técnica de modulación lineal que también considera la modulación de dos portadoras de la misma frecuencia desfasadas 90° , en un solo canal (Dos portadoras en cuadratura en un solo canal).

Este tipo de modulación tiene la ventaja de que ofrece la posibilidad de transmitir dos señales en la misma frecuencia, de forma que favorece el aprovechamiento del ancho de banda disponible. Tiene como inconveniente que es necesario realizar la demodulación con demoduladores síncronos.

Sistemas analógicos que utilizan la modulación QAM

La técnica Quadrature Amplitude Modulation (QAM) es utilizada en los sistemas PAL (Sistema Europeo) y NTSC (Sistema Americano) de televisión analógica para transmitir las dos señales de crominancia.

Sistemas digitales que utilizan la modulación QAM

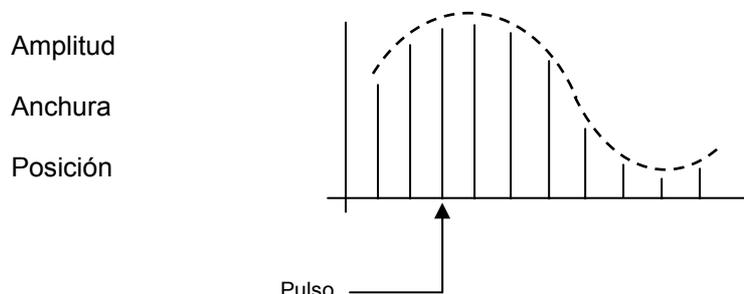
La técnica Quadrature Amplitude Modulation (QAM) es utilizada en sistemas de comunicación digital como módems que transmiten a velocidades superiores a 2400 bps bajo estándares V.22 Bis y V.32.

También es utilizada con Pulse Amplitude Modulation (PAM) en sistemas de comunicación digital inalámbrica. Dependiendo del número de símbolos existentes combinando las distintas amplitudes posibles de las dos señales que se transmiten, técnica de modulación se denomina:

- 4-QAM
- 16-QAM
- 64-QAM
- 256-QAM.

4.3 Técnicas de Modulación Digital

En esta técnica, en lugar de modular una portadora utilizando las variaciones de amplitud de una señal de banda base, la señal a transmitir, es discretizada mediante un muestreo obteniéndose un secuencia de pulsos con tres características evidentes:



Para que la señal pueda representarse lo mas preciso posible, se requiere un mínimo de pulsos en el muestreo de dicha señal. Para obtener esto, se aplica un criterio de muestreo tomando como base la frecuencia máxima, f_{max} , de la señal analógica a muestrear. Este criterio establece el mínimo número de pulsos requerido para muestrear la señal de manera efectiva; es conocido como Criterio de Nyquist y establece que,

$$f_{mue} \geq 2f_{max}$$

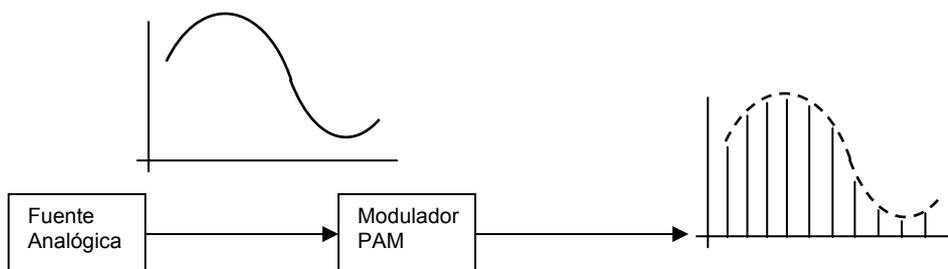
donde f_{mue} es la frecuencia de muestreo.

Las variaciones de amplitud de la señal analógica muestreada son reflejados en modificaciones en uno de los tres parámetros de los pulsos. De esta manera, se tienen las siguiente opciones de modulación digital:

- PAM Pulse Amplitud Modulation
- PWM Pulse Wide Modulation
- PPM Pulse Position Amplitud
- PCM Pulse Code Modulation

4.3.1 PAM Modulación de Amplitud de Pulso

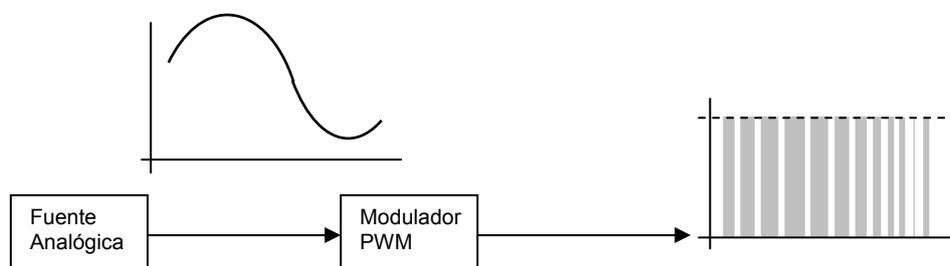
En esta técnica, las variaciones de amplitud de la señal analógica son reflejadas o mapeadas en la variación de amplitud de los pulsos.



Como todas las que involucran una modulación de amplitud, PAM, es muy susceptible a ruido eléctrico ó interferencia electromagnética.

4.3.2 PWM Modulación de Anchura de Pulso

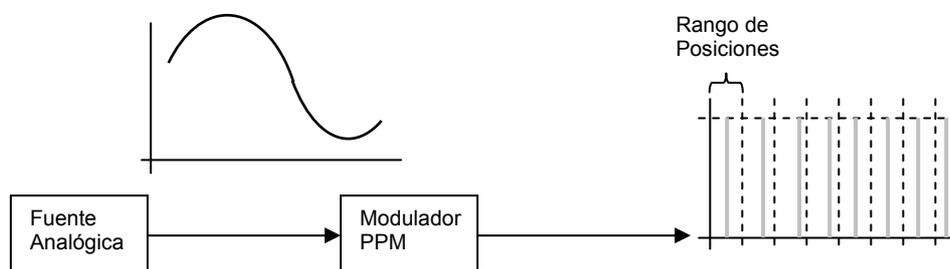
En PWM, la información es transmitida mapeando las variaciones de amplitud de la señal analógica en variaciones de anchura de los pulsos obtenidos del muestreo.



Esta técnica se utilizó en equipos de conmutación telefónica.

4.3.3 PPM Modulación de Posición de Pulso

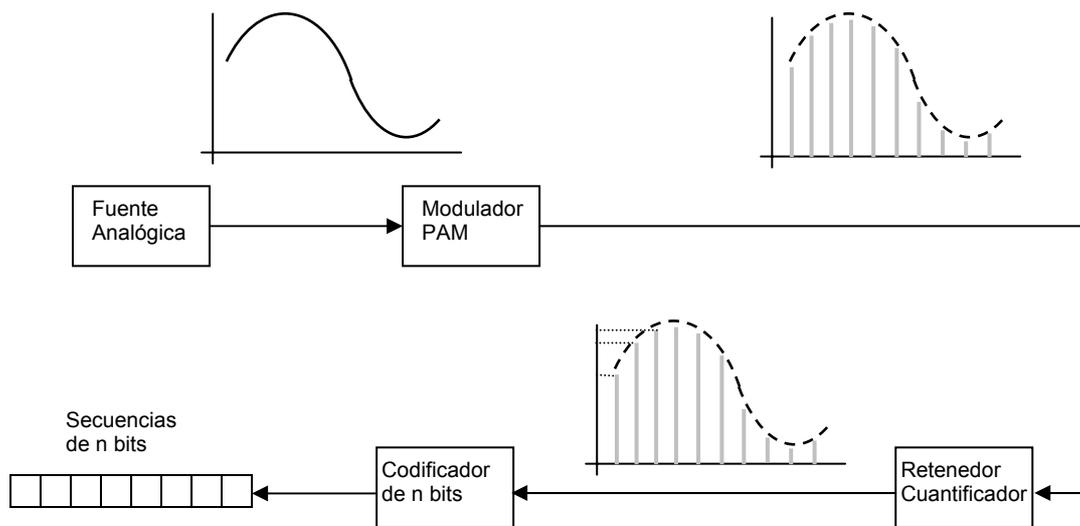
En PPM, la información es transmitida mapeando las variaciones de amplitud de la señal analógica, en variaciones de posición de los pulsos (dentro de rango de posiciones) obtenidos del muestreo.



4.3.4 PCM Modulación de Código de Pulso

En PCM, la información es transmitida mapeando las variaciones de amplitud de la señal analógica, en variaciones de amplitud de los pulsos obtenidos del muestreo (Muestreo PAM); la señal muestreada es procesada por un retenedor /cuantificador que asigna el nivel eléctrico correspondiente a la altura de cada pulso, para que finalmente, un codificador asigne una trama de n bits de acuerdo al nivel eléctrico del pulso, para codificar así, la amplitud de cada pulso (Véase figura en la página siguiente).

Considerando como un ejemplo práctico la señal de voz, esta tiene un ancho de banda de 3000 Hz. En sistemas telefónicos convencionales se utiliza una frecuencia de muestreo de 8000 muestras por segundo (ITU G.711) cumpliendo con el Criterio de Nyquist. Esto es, se generan 8000 pulsos por segundo para intentar la representación de un segundo de señal continua de voz. Como cada pulso de la muestra es codificado por 8 bits, entonces, esto significa que se requieren transmitir 64000 bits por segundo para lograr transmitir un segundo de señal de voz por la línea. Esto es lo que se llama un Canal PCM o Clear Channel.



Actualmente, se cuenta con magnificas opciones en cuanto a medios de comunicación se refiere. Tanto conductores de cobre de excelente calidad como la fibra óptica ofrecen alternativas con anchos de banda muy grandes.

Utilizando técnicas de multiplexaje TDM, un Sistema PCM incorpora 30 canales de voz o datos de 64 kbps, un canal de sincronía y un canal de señalización, lo que representa una capacidad de transmisión requerida para el medio de comunicación de 2.048 Mbps. En el capítulo siguiente se estudiarán las técnicas de multiplexaje y se estudiará de una manera más completa este sistema.

Todas las características técnicas de la Modulación PCM se detallan en la Recomendación G.711 de ITU (Antes CCITT).

Finalmente, se puede agregar que PCM es ampliamente utilizada en sistemas de comunicación digital. Se emplea para digitalizar voz, audio ó video en equipos de computo, sistemas de grabación de audio (DAT) etc.