

UNIDAD II.

TÉCNICAS DE MODULACIÓN

En telecomunicación el término modulación engloba el conjunto de técnicas para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda sinusoidal. Estas técnicas permiten un mejor aprovechamiento del canal de comunicación lo que posibilita transmitir más información en forma simultánea, protegiéndola de posibles interferencias y ruidos.

Concepto: Modular una señal consiste en modificar alguna de las características de esa señal, llamada portadora, de acuerdo con las características de otra señal llamada moduladora.

En la figura 2.18 se puede observar que la señal portadora es modificada basándose en la amplitud de la señal moduladora y la señal resultante es la que se muestra en el lado derecho de la figura. El objetivo de modular una señal, es tener un control sobre la misma.

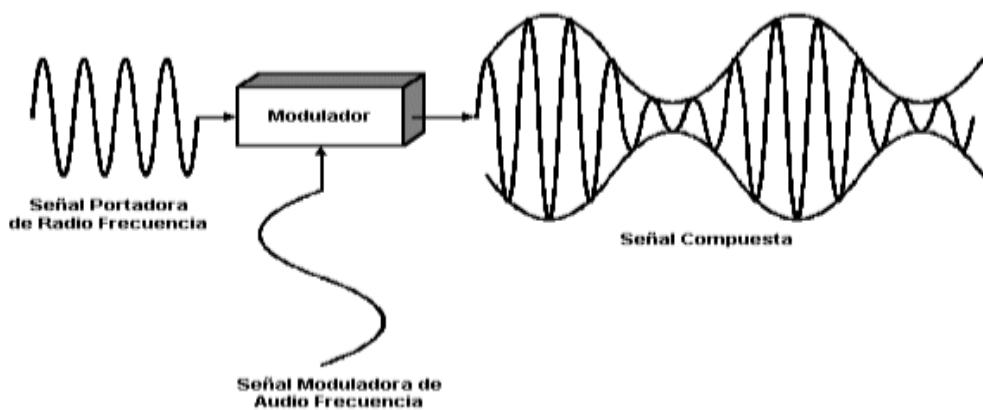


Figura 2.18 Ejemplo de Modulación

El control se hará sobre ciertos elementos característicos de una oscilación continua; estos son modificados según la forma de onda de la señal que se desea transmitir.

Los parámetros o magnitudes fundamentales de una señal analógica son:

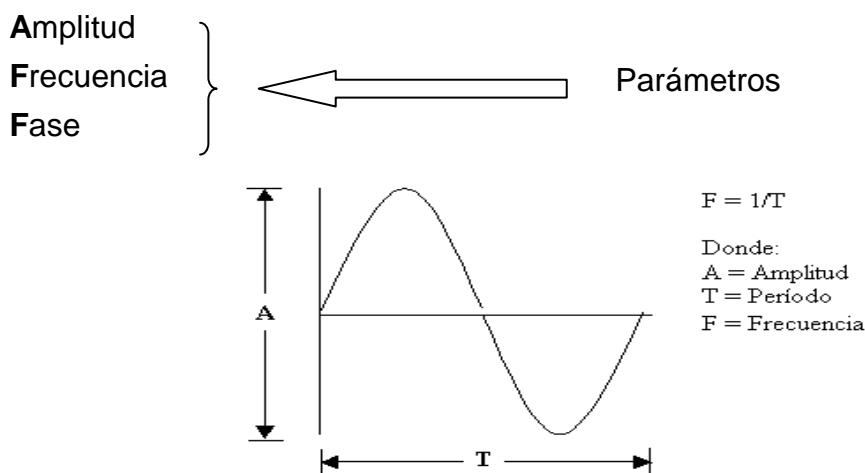


Figura 2.19 Parámetros Fundamentales de una señal analógica.

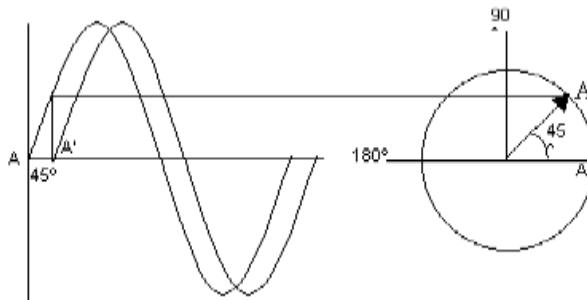


Figura 2.20 Frecuencia de una señal analógica. ^[10]

2.1 IMPORTANCIA DE LA MODULACIÓN

Estas técnicas de modulación permiten un mejor aprovechamiento del canal de comunicación lo que posibilita transmitir más información en forma simultánea, protegiéndola de posibles interferencias y ruidos.

10.- http://primero.webege.com/index.php?option=com_content&view=article&id=56&Itemid=67

Existen varias razones para modular, entre ellas:

Facilita la propagación de la señal de información por cable o por el aire.

Ordena el radioespectro, distribuyendo canales a cada información distinta.

Disminuye dimensiones de antenas.

Optimiza el ancho de banda de cada canal.

Evita interferencia entre canales.

Protege a la información de las degradaciones por ruido.

Define la calidad de la información transmitida.

Existen básicamente dos tipos de modulación:

La modulación analógica, que se realiza a partir de señales analógicas de información, por ejemplo la voz humana, audio y video en su forma eléctrica y la modulación digital, que se lleva a cabo a partir de señales generadas por fuentes digitales, por ejemplo una computadora.^[11]

La información debe ser transformada en señales antes de poder ser transportada a través de un medio de comunicación. Evidentemente, una señal sólo se puede transmitir por un canal que permita la propagación de ese tipo de señales. Así, una señal eléctrica se propaga principalmente por medio de alambres conductores, una señal acústica generalmente se propaga mejor por el aire.

11.- http://primero.webege.com/index.php?option=com_content&view=article&id=57&Itemid=68

Cómo transformar la información depende de su formato original y del formato usado por el hardware de comunicaciones.

Una señal simple no transporta información de la misma forma que una línea recta no hace referencia a ninguna palabra. La señal debe ser manipulada, introduciendo cambios identificables que puedan ser reconocidos en el emisor y el receptor como representativos de la información transmitida. Primero la información debe ser traducida a patrones acordados de ceros y unos, por ejemplo usando el American Standard Code for Information Interchange (ASCII).

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

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

Se denomina modulación al proceso de colocar la información contenida en una señal, generalmente de baja frecuencia, sobre una señal de alta frecuencia.

A la señal resultante de este proceso se le denomina señal modulada y ésta es la señal que se transmite.

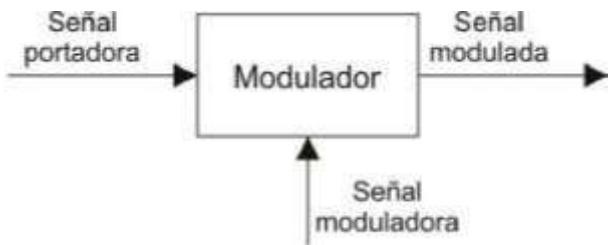


Figura. 2.1.21 Modulación.

Es necesario modular las señales por diferentes razones:

- 1) Si todos los usuarios transmiten a la frecuencia de la señal original o moduladora, no será posible reconocer la información contenida en dicha señal, debido a la interferencia entre las señales transmitidas por diferentes usuarios.
- 2) A altas frecuencias se tiene mayor eficiencia en la transmisión, de acuerdo al medio que se emplee.
- 3) Se aprovecha mejor el espectro electromagnético, ya que permite la multiplexación (multicanalización) por frecuencias.
- 4) En caso de transmisión inalámbrica, las antenas tienen medidas más razonables.

En resumen, la modulación permite aprovechar mejor el canal de comunicación ya que posibilita transmitir más información en forma simultánea por un mismo canal y/o proteger la información de posibles interferencias y ruidos.

Se llama demodulación al proceso mediante el cual es posible recuperar la señal de datos de una señal modulada.



Figura. 2.1.22 Demodulación.

El Módem es un dispositivo de transmisión que contiene un modulador y un demodulador.

Los datos se almacenan en una computadora en forma de ceros y unos. Habitualmente, para transportarlos de un lugar a otro (dentro o fuera de la computadora), es necesario convertirlos en señales digitales. Esto es lo que se denomina conversión digital a digital o codificación de los datos digitales dentro de una señal digital o simplemente modulación en banda base.

A veces es necesario convertir una señal analógica (como la voz en una conversación telefónica) en una señal digital por distintas razones, como reducir el efecto del ruido. Esto es lo que se denomina conversión analógica a digital o digitalización de una señal analógica. Otras veces, se requiere enviar una señal digital que sale de una computadora a través de un medio diseñado para transmitir señales analógicas. Por ejemplo, para enviar datos de un lugar a otro usando la red pública de telefonía, sería necesario convertir la señal digital producida por la computadora en una señal analógica. Esto es lo que se denomina conversión digital a analógica o modulación de una señal digital.

A menudo se desea enviar una señal analógica a larga distancia utilizando medios analógicos. Por ejemplo, la voz o la música de una estación de radio, que naturalmente emite una señal analógica, se transmiten a través del aire. Sin embargo, la frecuencia de la música o la voz no es apropiada para este tipo de transmisión. La señal debería ser transportada mediante una señal de alta frecuencia. Esto es lo que se denomina conversión de analógico a analógico o modulación de una señal analógica.

Las señales de información corresponden a la portadora, mientras que las señales de datos corresponden a la señal base o moduladora. De acuerdo al sistema de transmisión, se pueden tener los siguientes casos.

Señal Moduladora (Base)	Señal Portadora	Técnica
Analógica	Analógica	Modulación analógica
Analógica	Digital	Conversión analógico a digital
Digital	Digital	Modulación en banda base
Digital	Analógica	Modulación digital

Tabla 2.1.6 Tipos de modulación ^[12]

2.2 TÉCNICAS DE MODULACIÓN ANALÓGICA

La amplia naturaleza de las señales analógicas es evidente, cualquier forma de onda está disponible con toda seguridad en el ámbito analógico, nos encontramos con una onda original y una distorsión de la que tenemos que identificar la onda original de la distorsionada.

12.-<https://www.itescam.edu.mx/principal/webalumnos>

PCM, MODULACIÓN POR CODIFICACIÓN DE PULSOS

Se basa como la anterior en el teorema de muestreo: “ Si una señal $f(t)$ se muestrea a intervalos regulares de tiempo con una frecuencia mayor que el doble de la frecuencia significativa más alta de la señal, entonces las muestras así obtenidas contienen toda la información de la señal original.

En el receptor, este proceso se invierte, pero por supuesto se ha perdido algo de información al codificar, por lo que la señal obtenida no es exactamente igual que la original (se le ha introducido ruido de cuantización).

Codificación Analógica-Digital. Este tipo de codificación es la representación de información analógica en una señal digital. Por ejemplo para grabar la voz de un cantante sobre un CD se usan significados digitales para grabar la información analógica. Para hacerlos, se debe de reducir el nº infinito potencial posible de valores en un mensaje analógico de modo que puedan ser representados como una cadena digital con un mínimo de información.

Codificación analógica-digital. En la codificación analógica-digital, estamos representando la información contenida a partir de una serie de pulsos digitales (1s ó 0s).

MODULACIÓN DE AMPLITUD DE PULSO (PAM)

El primer paso en la codificación analógica - digital se llama PAM. Esta técnica recoge información análoga, la muestra (ó la prueba), y genera una serie de pulsos basados en los resultados de la prueba.

En PAM, la señal original se muestra a intervalos iguales, PAM usa una técnica llamada probada y tomada. En un momento dado el nivel de la señal es leído y retenido brevemente. PAM sea ineficaz en comunicaciones, es porque aunque traduzca la forma actual de la onda a una serie de pulsos, siguen teniendo amplitud, todavía señal analógica y no digital. Para hacerlos digitales, se deben de modificar usando modulación de código de pulso (PCM).

Modulación PCM modifica los pulsos creados por PAM para crear una señal completamente digital. Para hacerlo, PCM, en primer lugar, cuantifica los pulsos de PAM. La cuantificación es un método de asignación de los valores enteros a un rango.

Los dígitos binarios son transformados en una señal digital usando una de las técnicas de codage digital-digital. PCM se construye actualmente a través de 4 procesos separados: PAM, cuantificación, codage digital-digital.

La modulación analógica es la representación de información analógica mediante una señal analógica. La radio es un ejemplo de una comunicación de analógico a analógico. La Tabla 2.1 muestra la relación entre la información analógica, el conversor hardware de analógico a analógico y la señal analógica resultante.

La modulación analógica a analógica se puede conseguir básicamente de dos formas: modulación en amplitud (AM), modulación en frecuencia (FM).

2.2.1 MODULACIÓN EN AMPLITUD (AM).

Los métodos utilizados es la amplitud modulada que como su nombre lo indica consiste en variar la amplitud de la onda de radio. La onda de radiofrecuencia modulada es transmitida a alta potencia los receptores reciben la señal con baja potencia. Esta señal se debe amplificar.

Supongamos una señal de entrada “(E₀)” se amplifica con una ganancia constante “(g)” la salida “(SM)” es el producto “SM=E₀.g”. Si g es variable en el tiempo entre 0 y un máximo, volviendo a cero. ^[13]

En transmisión AM (Amplitud de Modulación), la señal portadora se modula de forma que su amplitud varíe con los cambios de amplitud de la señal modulada.

La frecuencia y la fase de la portadora son siempre las mismas; solamente la amplitud cambia para seguir las variaciones en la información. Las figura 2.2.1.23 muestra las relaciones de la señal moduladora, la señal portadora y la señal AM resultante.

Un modulador AM es un dispositivo con dos señales de entrada, una señal portadora de amplitud y frecuencia constante, y la señal de información o moduladora. El parámetro de la señal portadora que es modificado por la señal moduladora es la amplitud.

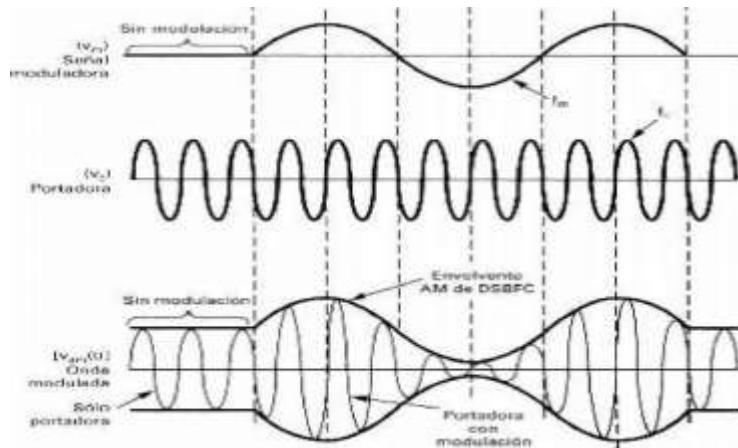


Figura 2.2.1.23 Señal modulada en amplitud (AM).

La señal modulada tendrá una amplitud que será igual al valor pico de la señal portadora más el valor instantáneo de la señal moduladora. Debido a que en general una señal analógica moduladora no es senoidal pura, sino que tiene una forma cualquiera, a la misma la podemos desarrollar en serie de Fourier y ello da lugar a que dicha señal esté compuesta por la suma de señales de diferentes frecuencias. De acuerdo a ello, al modular no tendremos dos frecuencias laterales, sino que tendremos dos conjuntos a los que se denomina banda lateral inferior y banda lateral superior.

Como la información está contenida en la señal moduladora, se observa que en la transmisión dicha información se encontrará contenida en las bandas laterales, ello hace que sea necesario determinado ancho de banda para la transmisión de la información.

2.2.1.1 ANCHO DE BANDA EN AM.

El ancho de banda de una señal AM es igual al doble del ancho de banda de la señal modulada y cubre un rango centrado alrededor de la frecuencia de la portadora (véase la figura 2.2.1.1.24). La porción sombreada del gráfico es el espectro de frecuencia de la señal.

BW_m = Ancho de banda de la señal moduladora (audio)

BW_t = Ancho de banda total (radio) f_c — Frecuencia de la portadora

El ancho de banda de una señal de audio (voz y música) es habitualmente 5 KHz. Por tanto, una estación de radio AM necesita un ancho de banda mínimo de 10 KHz. De hecho, la Comisión Federal de Telecomunicaciones (Cofetel) permite 10 KHz para cada estación AM.

Las estaciones AM pueden tener frecuencia de portadora en el espectro de la banda entre 530 y 1,700 KHz (1.7 MHz). Sin embargo, la frecuencia de la portadora de cada estación debe estar separada de las de sus lados por al menos 10 KHz (un ancho de banda AM) para evitar interferencias. Si una estación usa una frecuencia portadora de 1,100 KHz, la frecuencia de la portadora de la siguiente estación no puede ser menor de 1,110 KHz (véase la figura 2.2.1.1.24).

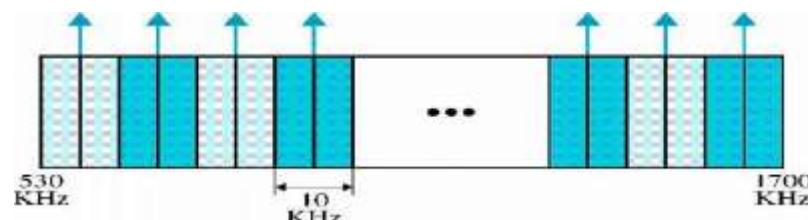


Figura 2.2.1.1.24 Asignación de banda en AM.

El ancho de banda total necesario para AM se puede determinar a partir del ancho de banda de una señal de audio: $BW = 2 \times BW$.

Ejemplo:

Si se tiene una señal de audio con un ancho de banda (Band Width BW) de 4 KHz. y se quiere modular en AM se necesita dos veces el ancho de banda de la señal original: Solución:

$$BW = 2 \times 4\text{KHz}.$$

2.2.2 MODULACIÓN EN FRECUENCIA (FM).

En la transmisión FM (Frecuencia de Modulación), se modula la frecuencia de la señal portadora para seguir los cambios en los niveles de voltaje (amplitud) de la señal modulada. La amplitud pico y la fase de la señal portadora permanecen constantes, pero a medida que la amplitud de la señal de información cambia, la frecuencia de la portadora cambia proporcionalmente. La figura 2.2.2.25 muestra las relaciones de la señal moduladora, la señal portadora y la señal FM resultante.

De acuerdo a lo dicho anteriormente, la frecuencia de la señal modulada variará alrededor de la frecuencia de la señal portadora de acuerdo a la siguiente expresión:

(f_p = frecuencia de portadora y f_m = frecuencia moduladora).

$$f = f_p + A \operatorname{sen}(2\pi f_m t)$$

Por lo tanto la expresión matemática de la señal modulada resulta:

$$v_p(t) = V \operatorname{sen}[2\pi(f_p + A \operatorname{sen}(2\pi f_m t))t]$$

Donde Af es la desviación de frecuencia y es el máximo cambio de frecuencia que puede experimentar la frecuencia de la señal portadora.

A la variación total de frecuencia desde la más baja hasta la más alta, se la conoce como oscilación de portadora. De esta forma, una señal moduladora que tiene picos positivos y negativos, tal como una señal senoidal pura, provocara una oscilación de portadora igual a 2 veces la desviación de frecuencia. Al analizar el espectro de frecuencias de una señal modulada en frecuencia, observamos que se tienen infinitas frecuencias laterales, espaciadas en fm, alrededor de la frecuencia de la señal portadora f_p ; sin embargo la mayor parte de las frecuencias laterales tienen poca amplitud, lo que indica que no contienen cantidades significativas de potencia. El análisis de Fourier indica que el número de frecuencias laterales que contienen cantidades significativas de potencia, depende del índice de modulación de la señal modulada, y por lo tanto el ancho de banda efectivo también dependerá de dicho índice.

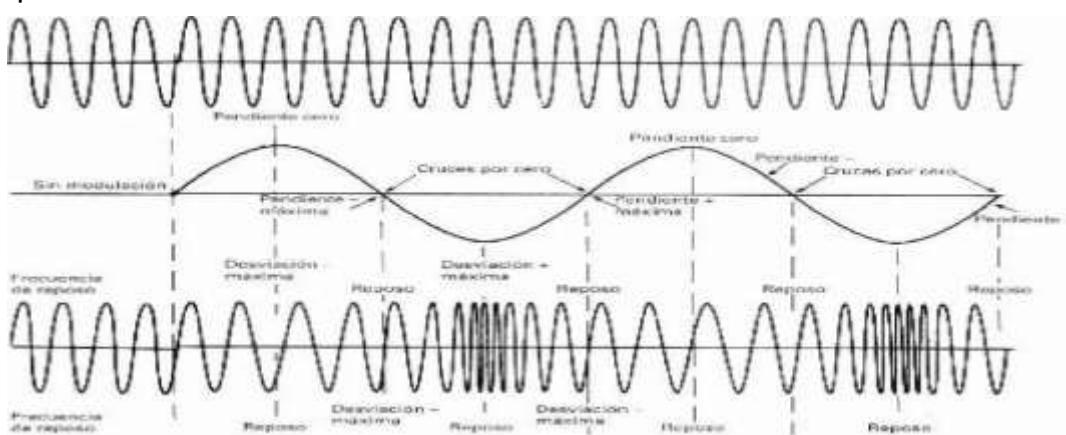


Figura 2.2.2.25 Señal modulada en frecuencia (FM).

El ancho de banda de una señal de audio (voz y música) en estéreo es casi 15 KHz. Cada estación de radio FM necesita, por tanto, un ancho de banda mínimo de 150 KHz. La Cofetel asigna 200 KHz (0.2 MHz) para cada estación, de forma que haya espacio para las bandas de seguridad.

Las estaciones FM pueden tener frecuencias portadoras en una banda entre los 88 y los 108 MHz. Las estaciones deben estar separadas por al menos 200 KHz para evitar que sus anchos de banda se solapen. Para que haya más privacidad, la Cofetel exige que en un área determinada solamente se puedan utilizar asignaciones de anchos de banda alternativos. Las restantes permanecen sin usar para prevenir cualquier posibilidad de interferencias entre dos estaciones cualquiera. Dada la banda de 88 a 108 MHz de rango, hay 100 anchos de banda FM potenciales en un área, de los cuales 50 pueden operar en cualquier momento.

Por ejemplo, si se tiene una señal de audio con un ancho de banda de 4 MHz. y considerando que una señal FM requiere 10 veces el ancho de banda de la señal original:

$$BW = 10 \times 4\text{MHz} = 40\text{MHz}^{[14]}$$

14.-http://primero.webege.com/index.php?option=com_content&view=article&id=60&Itemid=71

2.2 CONVERSIÓN ANALÓGICA A DIGITAL.

Para realizar esa tarea, el conversor **ADC** (Analog-to-Digital Converter, Conversor Analógico Digital) tiene que efectuar los siguientes procesos:

- 1.- Muestreo de la señal analógica.
- 2.- Cuantización de la propia señal
- 3.- Codificación del resultado de la cuantización, en código binario.

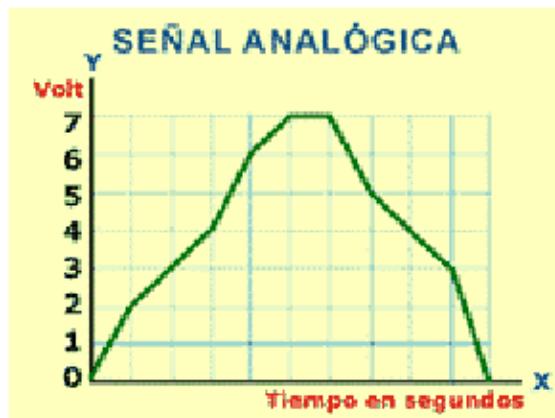


Figura 2.3.26 Muestreo de la señal analógica.

Representación gráfica de medio ciclo positivo (+), correspondiente a una señal eléctrica analógica de < sonido, con sus correspondientes armónicos.

Como se podrá observar, los valores de variación de la < tensión o voltaje en esta sinusoides pueden variar en una escala que va de “0” a “7” volt.

Para convertir una señal analógica en digital, el primer paso consiste en realizar un muestreo (sampling) de ésta, o lo que es igual, tomar diferentes muestras de tensiones o voltajes en diferentes puntos de la onda senoidal.

La frecuencia a la que se realiza el muestreo se denomina razón, tasa o también frecuencia de muestreo y se mide en kilohertz (kHz).

En el caso de una grabación digital de audio, a mayor cantidad de muestras tomadas, mayor calidad y fidelidad tendrá la señal digital resultante. Durante el proceso de muestreo se asignan valores numéricos equivalentes a la tensión o voltaje existente en diferentes puntos de la sinusoides, con la finalidad de realizar a continuación el proceso de cuantización.

Las tasas o frecuencias de muestreo más utilizadas para audio digital son las siguientes:

24 000 muestras por segundo (24 kHz).

30 000 muestras por segundo (30 kHz).

44 100 muestras por segundo (44,1 kHz) (Calidad de CD).

48 000 muestras por segundo (48 kHz).

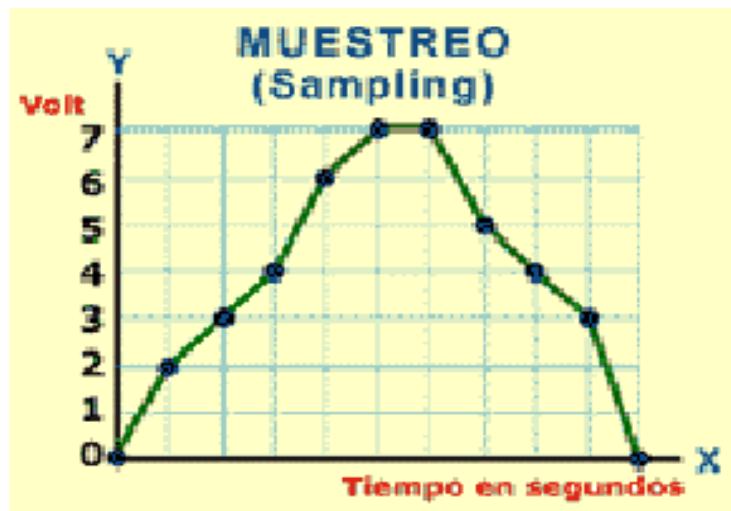


Figura 2.3.27 Tasa de Muestreo Sampling.

Para realizar el muestreo (sampling) de una señal eléctrica analógica y convertirla después en digital, el primer paso consiste en tomar valores discretos de tensión o voltaje a intervalos regulares en diferentes puntos de la onda.

CUANTIZACIÓN DE LA SEÑAL ANALÓGICA.

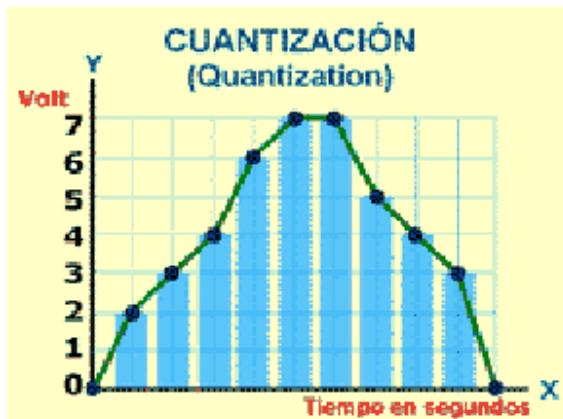


Figura 2.3.28 Muestreo de la señal analógica.

Proceso de cuantización (quantization) de la señal eléctrica analógica para su conversión en señal digital.

CODIFICACIÓN DE LA SEÑAL EN CÓDIGO BINARIO.

Después de realizada la cuantización, los valores de las tomas de voltajes se representan numéricamente por medio de códigos y estándares previamente establecidos. Lo más común es codificar la señal digital en código numérico binario.

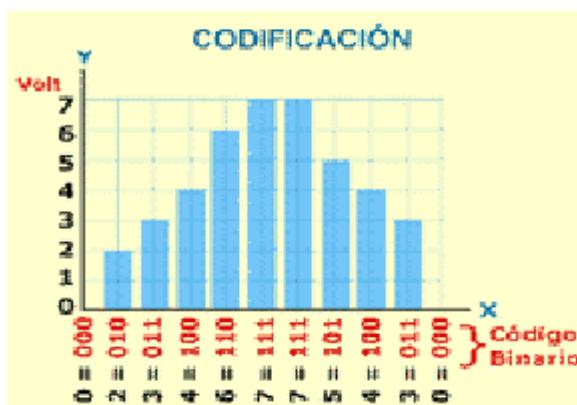


Figura 2.3.29 Muestreo de la señal analógica.

La codificación permite asignarle valores numéricos binarios equivalentes a los valores de tensiones o voltajes que conforman la señal eléctrica analógica original.^[15]

A veces es necesario digitalizar una señal analógica. Por ejemplo, para enviar la voz humana a larga distancia, es necesario digitalizarla puesto que las señales digitales son menos vulnerables al ruido. Esto se denomina conversión de analógico a digital o digitalización de una señal analógica. Para llevarla a cabo, es necesario efectuar una reducción del número de valores, potencialmente infinitos en un mensaje analógico, de forma que puedan ser representados como un flujo digital con una pérdida mínima de información. Hay varios métodos para efectuar la conversión de analógico a digital. La figura 2.3.30 muestra un conversor de analógico a digital, denominado uncodec (codificador-decodificador).



Figura 2.3.30 Conversión Analógico a Digital.

En la conversión de analógico a digital, se representa la información contenida en una onda continua como una serie de pulsos digitales (unos o ceros). La conversión de analógico a digital puede hacer uso de cualquiera de las señales digitales.^[16]

15.- http://primero.webege.com/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=72
16.- <http://www.rfernando.net/modules/tutorials/doc/redes/modem.html>

2.3.1 TEOREMA DE MUESTREO (NYQUIST).

El ingeniero sueco Harry Nyquist formuló el siguiente teorema para obtener una grabación digital de calidad: **“La frecuencia de muestreo mínima requerida para realizar una grabación digital de calidad, debe ser igual al doble de la frecuencia de audio de la señal analógica que se pretenda digitalizar y grabar”.**

Este teorema recibe también el nombre de “Condición de Nyquist”.

Es decir, que la tasa de muestreo se debe realizar, al menos, al doble de la frecuencia de los sonidos más agudos que puede captar el oído humano que son 20 mil hertz por segundo (20 kHz). Por ese motivo se escogió la frecuencia de 44,1 kHz como tasa de muestreo para obtener “calidad de CD”, pues al ser un poco más del doble de 20 kHz, incluye las frecuencias más altas que el sentido del oído puede captar.

El teorema trata con el muestreo, que no debe ser confundido o asociado con la cuantificación, proceso que sigue al de muestreo en la digitalización de una señal y que, al contrario del muestreo, no es reversible (se produce una pérdida de información en el proceso de cuantificación, incluso en el caso ideal teórico, que se traduce en una distorsión conocida como error o ruido de cuantificación y que establece un límite teórico superior a la relación señal-ruido). Dicho de otro modo, desde el punto de vista del teorema, las muestras discretas de una señal son valores exactos que aún no han sufrido redondeo o truncamiento alguno sobre una precisión determinada, estas aún

no han sido cuantificadas. El teorema demuestra que la reconstrucción exacta de una señal periódica continua en banda base a partir de sus muestras es matemáticamente posible si la señal está limitada en banda y la tasa de muestreo es superior al doble de su ancho de banda. [17]

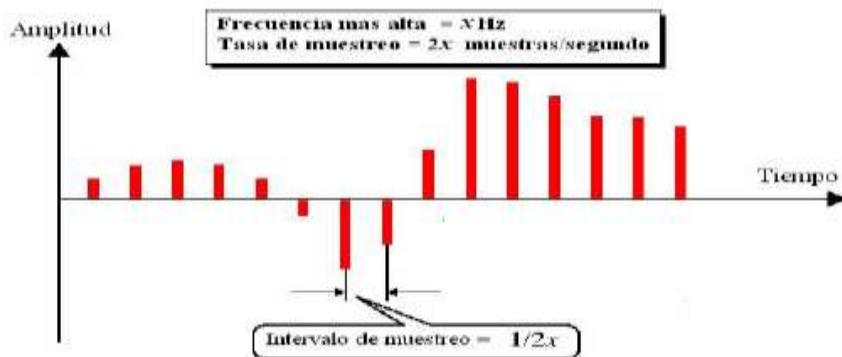


Figura 2.3.1.31 Teorema de Nyquist.

Si el criterio no es satisfecho, existirán frecuencias cuyo muestreo coincide con otras, fenómeno conocido como "alias" (En inglés "aliasing").

Muestreo de una señal senoidal.

Cuando se obtienen muestras periódicas de una señal senoidal, puede ocurrir que se obtengan las mismas muestras que se obtendrían de una señal senoidal igualmente pero con frecuencia más baja. Específicamente, si una senoidal de frecuencia f Hz es muestreada m veces por segundo, y $m < f / 2$, entonces las muestras resultantes también serán compatibles con una sinusode de frecuencia $f - 2m$.

Cada una de las senoidales se convierte en un "alias" para la otra. Ver figura 2.3.1.32

17.- http://primero.webege.com/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=72

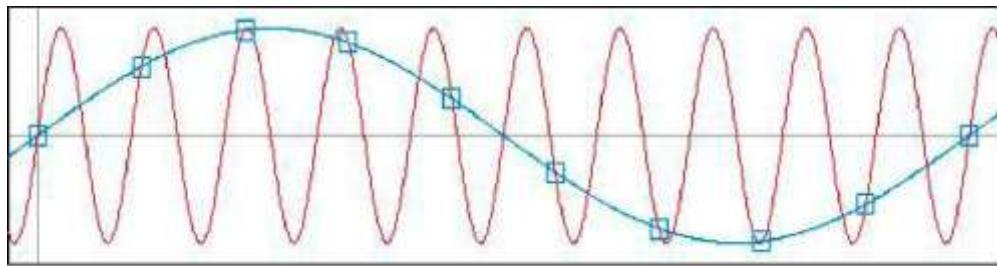


Figura 2.3.1.32 Teorema de Nyquist.

Por tanto, si se muestrea a la frecuencia m una señal analógica que contiene las dos frecuencias, la señal no podrá ser reconstruida.

Criterio de Nyquist.

Está demostrado rigurosamente que para evitar el "aliasing" es necesario asegurarse de que en la señal analógica a muestrear con una frecuencia m , no existen componentes sinusoidales de frecuencia mayor a $2m$. Esta condición es llamada el criterio de Nyquist, y es equivalente a decir que la frecuencia de muestreo m debe ser al menos dos veces mayor que el ancho de banda de la señal.

El Teorema de Nyquist indica que la frecuencia de muestreo mínima que tenemos que utilizar debe ser mayor que $2f_{\max}$, donde f_{\max} es la frecuencia máxima de la señal compleja. Si utilizamos esa frecuencia de muestreo, podremos reproducir posteriormente la señal a partir de las muestras tomadas. Si utilizáramos una frecuencia más alta de la que nos dice Nyquist obtendríamos una representación más exacta de la señal de entrada.

Por tanto, si se quiere muestrear voz telefónica con una frecuencia máxima de 4,000 Hz, es necesario muestrear a una tasa de muestreo de 8,000 muestras por segundo.

Una tasa de muestreo del doble de la frecuencia de x Hz indica que la señal se debe muestrear cada $1/2x$ segundos. Usando el ejemplo de la transmisión de voz sobre una línea de teléfono, esto significa que hay que muestrear una vez cada $1/8,000$ segundos.

Otro ejemplo

Se tiene una señal con un ancho de banda de 10.000 Hz (1.000 al 11.000 Hz) y si la tasa de muestreo debe ser dos veces la frecuencia más alta en la señal:

Tasa de muestreo igual = $2 \times 11,000 = 22,000$ muestras / segundo.

¿Cuántos bits por muestra?

Después de que se haya encontrado la tasa de muestreo, es necesario determinar el número de bits que se van a transmitir con cada muestra. Esto depende del nivel de precisión que sea necesario. El número de bits se elige de forma que la señal original se pueda reproducir con la precisión deseada en amplitud.

Si cuando está muestreando una señal, cada muestra necesita al menos 12 niveles de precisión (+0 a +5 y -0 a -5), se necesitan cuatro bits; un bit para el signo y tres bits para el valor. Un valor de tres bits permite representar $2^3 = 8$ niveles (000 a 111), lo que es más de lo que se necesita. Un valor con dos

bits no es suficiente puesto que $2^2 = 4$. Un valor de cuatro bits es demasiado porque $2^4=16$.

Tasa de bits.

Después de hallar el número de bits por muestra, se puede calcular la tasa de bits usando la fórmula siguiente:

Tasa de bits = Tasa de muestreo x Número de bits por muestra.

Ejemplo:

Para digitalizar la voz humana que normalmente contiene frecuencias entre los 0 y los 4,000 Hz la tasa de muestreo es:

Tasa de muestreo = $4.000 \times 2 = 8,000$ muestras / segundo

La tasa de bits se puede calcular como: Tasa de bits = Tasa de muestreo x Número de bits por muestra.

Tasa de bits = $8.000 \times 8 = 64.000$ bits/s =64 Kbps.

2.4 MODULACIÓN EN BANDA BASE.

La codificación o conversión digital a digital, es la representación de la información digital mediante una señal digital. Por ejemplo, cuando se transmiten datos desde una computadora a una impresora o desde una computadora a otra computadora, tanto los datos originales como los datos transmitidos son digitales. En este tipo de codificación, los unos y ceros binarios generados por una computadora se traduce a una secuencia de pulsos de voltaje que se pueden propagar por un cable.

Se denomina banda base al conjunto de señales que no sufren ningún proceso de modulación a la salida de la fuente que las origina, es decir son

señales que son transmitidas en su frecuencia original. Dichas señales se pueden codificar y ello da lugar a los códigos de banda base.

De todos los mecanismos usados para la codificación digital a digital, los más útiles para la transmisión de datos se pueden agrupar en tres amplias categorías: Unipolar, Polar y Bipolar (Ver figura 2.4.33).

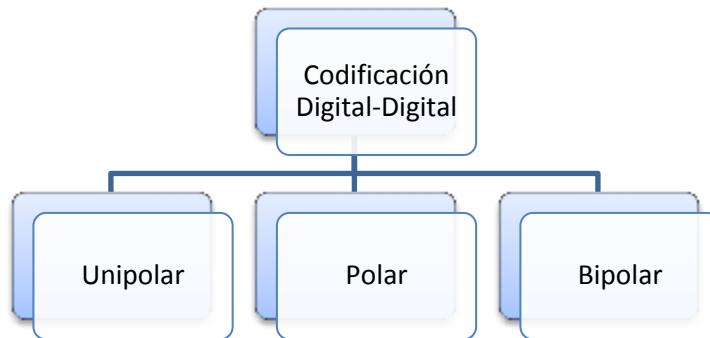


Figura 2.4.33 Tipos de codificación Digital-Digital.

Unipolar, usa un único valor de nivel positivo o negativo, que generalmente representa el '1' y el '0' mantiene la señal a 0. No tiene variantes. Ver figura 2.4.34.

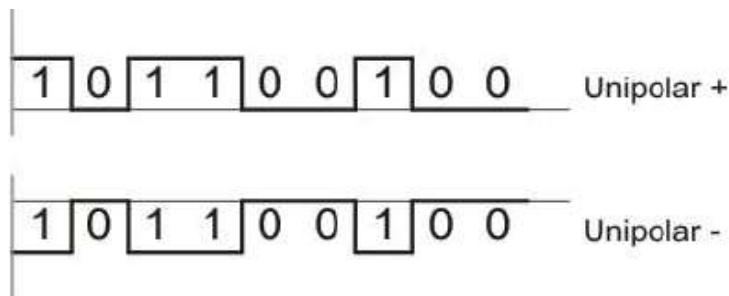


Figura 2.4.34 Codificación Unipolar.

Polar, usa dos niveles de amplitud. Hay varias opciones de codificación: NRZ, RZ, Bifásica, Manchester y Manchester diferencial. Ver figura 2.4.35.

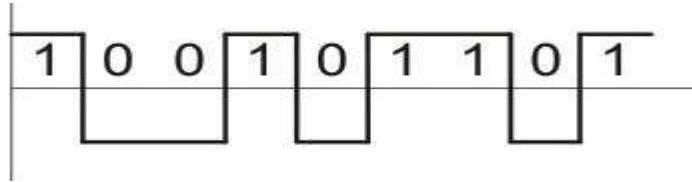


Figura 2.4.35 Codificación Polar.

Bipolar, usa tres niveles: positivo, cero y negativo. Opciones: Bipolar con Inversión de marca alternada (AMI), Bipolar con sustitución de 8 ceros (B8ZS) y Bipolar 3 de alta densidad (HDB3). Ver figura 2.4.36.

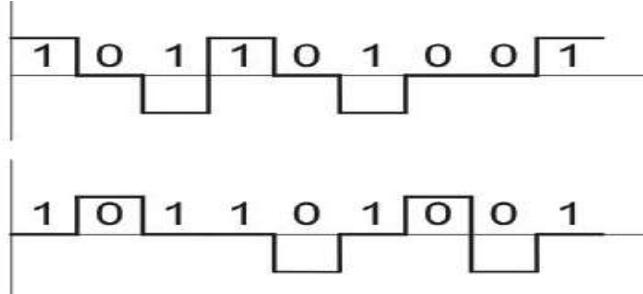


Figura 2.4.36 Codificación Bipolar.^[18]

2.4.1 CODIFICACIÓN UNIPOLAR (AMPLITUD).

Se denomina modulación en amplitud, a aquella en que el parámetro de la señal de la portadora que se va a variar, es la amplitud.

Cuando la señal moduladora es de origen digital, la modulación de la portadora está representada por corrientes de amplitudes distintas y se denomina modulación por desplazamiento de amplitud (ASK).

Existen dos tipos de modulación en amplitud:

Por variación de nivel de la onda portadora.

Por supresión de onda portadora.^[19]

18.-<http://www.rhernando.net/modules/tutorials/doc/redes/modem.html>

19.- http://primero.webege.com/index.php?option=com_content&view=article&id=64&Itemid=75

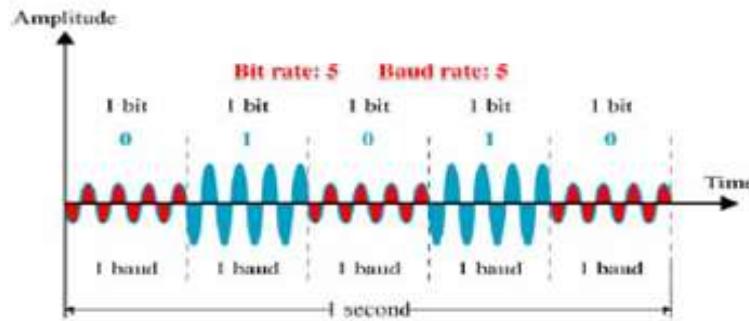


Figura 2.4.1.37 Codificación Unipolar.

La codificación Unipolar o Codificación Amplitud es muy sencilla y muy primitiva. Aunque actualmente está casi obsoleta, su sencillez proporciona una forma fácil de presentar los conceptos usados con los sistemas de codificación más complejos y permite examinar los tipos de problemas que se deben resolver en los sistemas de transmisión digital.

El sistema de transmisión digital funciona enviando pulsos de voltaje por un medio de enlace, habitualmente un cable o un hilo. En la mayoría de los tipos de codificación, hay un nivel de voltaje para el 0 binario y otro nivel de voltaje para el 1. La polaridad del impulso indica si es positivo o negativo. La codificación unipolar se denomina así porque usa únicamente una polaridad. Esta polaridad se asigna a uno de los dos estados binarios, habitualmente el 1. El otro estado, habitualmente el 0, se representa por el voltaje 0.

La Figura 2.4.1.37 muestra la idea de la codificación unipolar. En este ejemplo, los unos se codifican con un valor positivo o negativo y los ceros se codifican como el valor cero. Además de ser muy sencilla, la codificación unipolar admite una implementación barata. Sin embargo, la codificación

unipolar tiene al menos dos problemas que la hacen poco deseable: una componente DC y la sincronización.

Componente DC.

La amplitud media de una señal con codificación unipolar no es cero. Esto crea lo que se llama una componente de corriente continua (DC) (un componente con frecuencia cero). Cuando una señal contiene una componente DC, no puede viajar a través de medios que no pueden gestionar este tipo de componentes.

Sincronización.

Cuando una señal no varía, el receptor no puede determinar el principio y el final de cada bit. Por tanto, en la codificación unipolar puede haber problemas de sincronización siempre que el flujo de datos contenga largas series continuas de ceros y unos. Los esquemas de codificación digital usan cambios en el nivel de voltaje para indicar cambios en el tipo de bit. Un cambio de señal indica también que un bit ha terminado y que ha comenzado un nuevo bit. Sin embargo, en la codificación unipolar, una serie del mismo tipo de bit, digamos siete unos, no generará cambios de voltaje, existiendo solamente una línea de voltaje positivo o negativo que dura siete veces más que la de un único bit. Puesto que no hay cambio de señal para indicar el comienzo de la siguiente secuencia de bits, el receptor tiene que confiar en un temporizador.

Dada una tasa de bit esperada de 1,000 bps, si el receptor detecta un voltaje positivo que dura 0.005 segundos, interpreta que recibe un 1 cada 0.001 segundo, es decir, cinco unos.

Por desgracia, la falta de sincronización entre los relojes del emisor y el receptor distorsiona la temporización de la señal de forma que, por ejemplo, cinco unos pueden ser enviados en 0.006 segundos, originando la recepción de un bit 1 extra en el receptor. Este bit extra en el flujo de datos hace que todo lo que llegue detrás se decodifique erróneamente. Para controlar la sincronización de los medios de transmisión unipolar se ha desarrollado una solución consistente en usar una línea distinta que, en paralelo, lleva un pulso de reloj y que permite al dispositivo de recepción re-sincronizar su temporizador con el de la señal. Pero doblar el número de líneas usadas para la transmisión incrementa el costo y da como resultado soluciones poco económicas.

2.4.2 CODIFICACIÓN POLAR: NRZ, NRZ-L, AMPLITUD Y AMPLITUD DIFERENCIAL.

En este caso la señal tomará valores positivos para un 1 lógico y negativos para un 0 lógico pero nunca toma el valor 0.

La codificación polar usa dos niveles de voltaje: uno positivo y uno negativo. Gracias al uso de dos niveles, en la mayoría de los métodos de codificación polar se reduce el nivel de voltaje medio de la línea y se alivia el problema de la componente DC existente en la codificación unipolar. En las codificaciones

Manchester y Manchester diferencial, cada bit se define mediante voltajes positivos y negativos, de tal forma que la componente DC queda totalmente eliminada. La Figura 2.4.2.38 muestra los tipos de codificación polar.

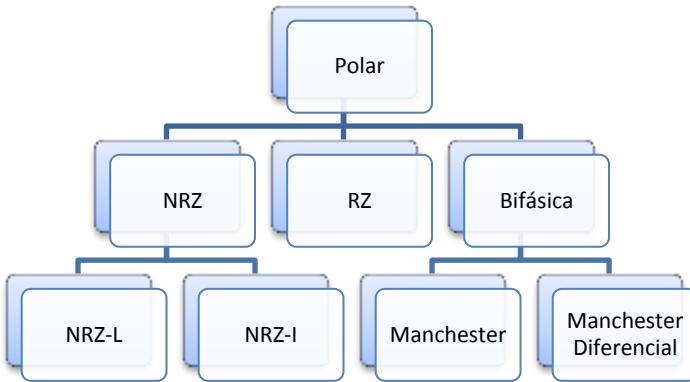


Figura 2.4.2.38 Tipos de codificación polar.

De las muchas variantes existentes de la codificación polar, se examinarán solamente las tres más populares: sin retorno a cero (NRZ), con retorno a cero (RZ) y bifásica. La codificación NRZ incluye dos métodos: sin retorno al nivel cero, nivel (NRZ-L) y sin retorno a cero invertido (NRZ-I). El método bifásico también tiene dos variantes.

El primero, el Manchester, es el método usado en las LAN de tipo Ethernet. El segundo, Manchester diferencial, es el método usado en las LAN de tipo Token Ring.

A) SIN RETORNO A CERO (NRZ)

En la codificación NRZ, el nivel de la señal es siempre positivo o negativo. A continuación se muestran los dos métodos más populares de transmisión NRZ.

CODIFICACIÓN NRZ-L.

En la codificación NRZ-L, el nivel de la señal depende del tipo de bit que representa. Habitualmente, un valor de voltaje positivo indica que el bit es un 0 y un valor de voltaje negativo significa que el bit es un 1 (o viceversa); por tanto, el nivel de la señal depende del estado del bit. Cuando hay un flujo grande de ceros o unos en los datos puede surgir un problema. El receptor recibe un voltaje continuo y debería determinar cuántos bits se han enviado mediante su reloj, que puede estar o no sincronizado con el reloj del emisor.

CODIFICACIÓN NRZ-I.

En NRZ-I, una inversión del nivel de voltaje representa un bit 1. Es la transición entre el valor de voltaje positivo y negativo, no los voltajes en sí mismos, lo que representa un bit 1. Un bit 0 se representa sin ningún cambio. NRZ-I es mejor que NRZ-L debido a la sincronización implícita provista por el cambio de señal cada vez que se encuentra un 1. La existencia de unos en el flujo de datos permite al receptor sincronizar su temporizador con la llegada real de la transmisión. Las tiras de ceros todavía pueden causar problemas, pero debido a que los ceros son menos frecuentes, el problema es menor.

La figura 2.4.2.39 muestra las representaciones NRZ-L y NRZ-I de la misma serie de bits. En la secuencia NRZ-L, los voltajes positivos y negativos tienen un significado específico: positivo para 0 y negativo para 1.

En la secuencia NRZ-I, los voltajes no tienen significado por sí mismos. En su lugar, el receptor mira los cambios de nivel como base para reconocer los unos.

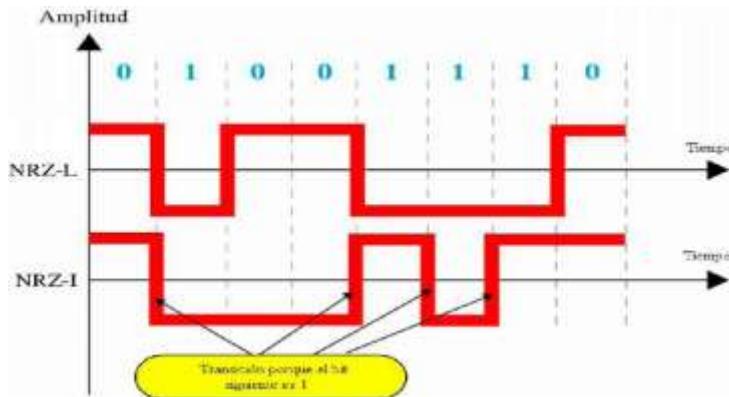


Figura 2.4.2.39 Codificaciones NRZ-L y NRZ-I.

B) CODIFICACIÓN CON RETORNO A CERO (RZ).

Como se puede ver, siempre que los datos originales contienen tiras de unos o ceros consecutivos, el receptor puede sufrir pérdidas. Como se mencionó en la discusión de la codificación unipolar, una forma de asegurar la sincronización es enviar una señal específica para temporización por un canal distinto. Sin embargo, esta solución es cara y genera sus propios errores. Una solución mejor es incluir de alguna forma la sincronización dentro de la señal codificada, algo similar a la solución provista por NRZ-I, pero capaz de manejar tiras de ceros y de unos.

Para asegurar la sincronización debe haber un cambio de señal para cada bit. El receptor puede usar estos cambios para construir, actualizar y sincronizar su reloj. Como se vio anteriormente, la técnica NRZ-I hace esto

para secuencias de unos. Pero para que haya cambios con cada bit, es necesario tener más de dos valores. Una solución es la codificación con retorno a cero (RZ), que usa tres valores: positivo, negativo y cero.

En RZ, la señal no cambia entre los bits sino durante cada bit. Al igual que NRZ-L, un voltaje positivo significa 1 y un voltaje negativo significa 0. Pero, a diferencia de NRZ-L, a medio camino en cada intervalo de bit, la señal vuelve a 0. Un bit 1 se representa realmente por una transición del voltaje positivo al cero y un bit 0 por una transición del voltaje negativo al cero, en lugar de por una transición positiva o negativa únicamente. La figura 2.4.2.40 ilustra este concepto.

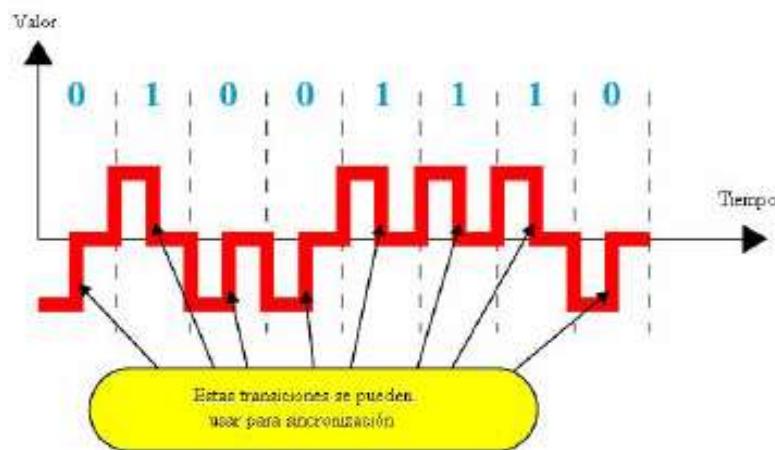


Figura 2.4.2.40 Codificación RZ.

La principal desventaja de la codificación RZ es que necesita dos cambios de señal para codificar un bit y, por tanto, ocupa más ancho de banda. Pero, de las tres alternativas examinadas hasta el momento, es la más efectiva.

C) CODIFICACIÓN BIFÁSICA.

Probablemente, la mejor solución existente para el problema de la sincronización es la codificación bifásica. En este método, la señal cambia en medio del intervalo de bit, pero no vuelve a cero. En lugar de eso, continúa hasta el polo opuesto. Como en RZ, estas transiciones a mitad del intervalo permiten la sincronización. Como se mencionó anteriormente, en las redes se usan actualmente dos tipos de codificación bifásica: Manchester y Manchester diferencial.

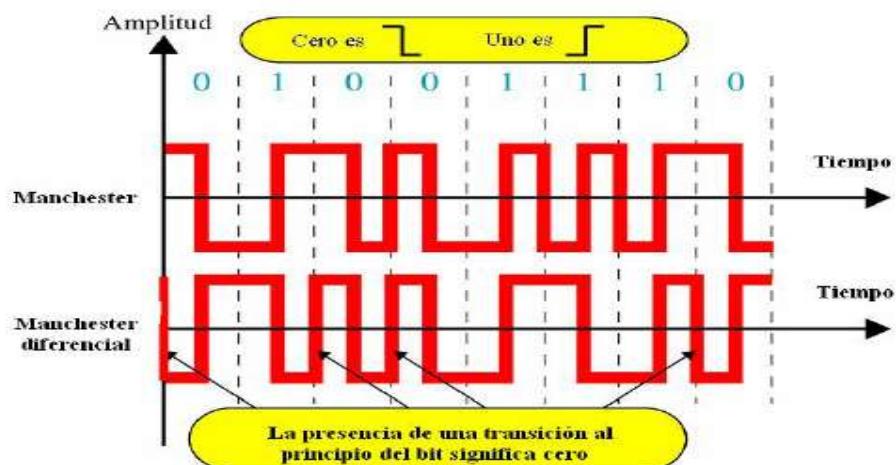


Figura 2.4.2.41 Codificación Manchester y Manchester diferencial.

CODIFICACIÓN MANCHESTER.

La codificación Manchester usa la inversión en mitad de cada intervalo de bit para sincronizar y para representar bits. Una transición de negativo a positivo representa un 1 binario y una transición positivo a negativo representa un 0 binario. Usando una transición con ese doble objetivo, la codificación Manchester logra el mismo nivel de sincronización que RZ pero con dos

valores de amplitud. En la codificación Manchester, la transición en mitad de cada bit se usa tanto para sincronización como para representación de bit.

CODIFICACIÓN MANCHESTER DIFERENCIAL.

En la codificación Manchester diferencial, la inversión en la mitad del intervalo de bit se usa para sincronización, pero la presencia o ausencia de una transición adicional al principio de cada intervalo se usa para identificar el bit. Una transición significa un 0 binario, mientras que la ausencia de transición significa un 1 binario. El método Manchester diferencial necesita dos cambios de señal para representar el 0 binario, pero solamente uno para representar el 1 binario. La figura 2.4.2.41 muestra las señales Manchester y Manchester diferencial para el mismo patrón de bits.

2.4.3 CODIFICACIÓN AMPLITUD: AMI, B8ZS, HDB3.

La codificación bipolar, como la RZ, usa tres niveles de voltaje: positivo, negativo y cero. Sin embargo, a diferencia de la RZ, el nivel cero se usa en la codificación bipolar para representar el 0 binario. Los unos se representan alternando voltajes positivos y negativos. Si el primer bit 1 se representa con una amplitud positiva, el segundo se representará con una amplitud negativa, el tercero con una amplitud positiva. Esta alternancia ocurre incluso cuando los bits uno no son consecutivos.

Hay tres tipos de codificación bipolar que son populares en la industria de transmisión de datos: AMI, B8ZS y HDB3 (véase la figura 2.4.3.42).

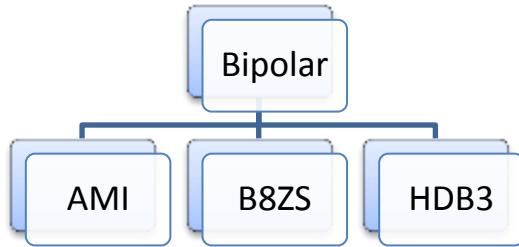


Figura 2.4.3.42 Tipos de codificación bipolar.

La Bipolar con inversión de marca alternada (AMI).

Es la forma más sencilla de codificación bipolar. En el nombre inversión de marca alternada, la palabra marca viene de la telegrafía y significa 1. Por tanto, AMI significa inversión a 1 alterno. Un valor neutral, es decir, un voltaje 0, representa el 0 binario. Los unos binarios se representan alternando valores de voltaje positivos y negativos. La figura 2.4.3.43 muestra un ejemplo.

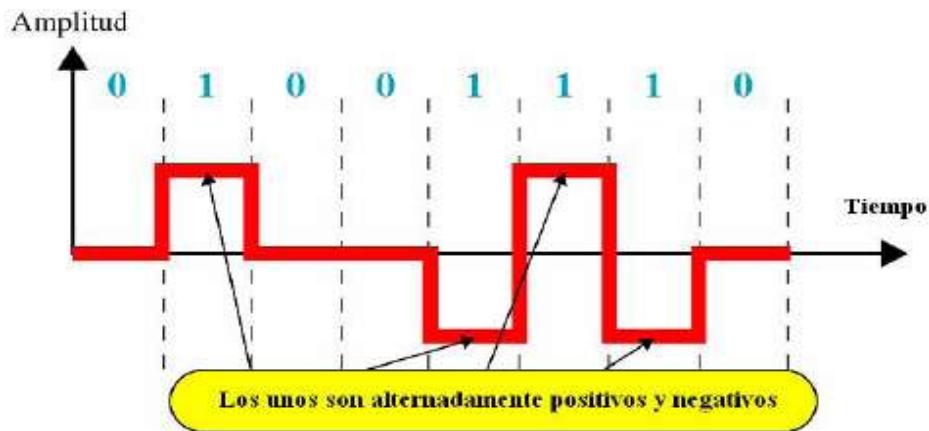


Figura 2.4.3.43 Codificación bipolar AMI.

Existe una variación de la AMI bipolar, que se denomina pseudoternaria, en la que el 0 binario alterna entre valores positivos y negativos. Invirtiendo la

señal en cada ocurrencia de un 1, la AMI bipolar resuelve dos problemas: primero, el componente DC es cero y, segundo una secuencia larga de unos permanece sincronizada. No hay mecanismo que asegure la sincronización de tiras largas de ceros.

Se han desarrollado dos variantes de AMI bipolar para resolver el problema de la sincronización de secuencias de ceros, especialmente para transmisiones a larga distancia. La primera, usada en Norteamérica, se denomina bipolar con sustitución de 8 ceros (B8ZS). La segunda, usada en Europa y Japón, se denomina bipolar 3 de alta densidad (HDB3). Ambas son adaptaciones de la AMI bipolar que modifican el patrón original solamente en el caso de que haya múltiples ceros consecutivos.

BIPOLAR CON SUSTITUCIÓN DE 8 CEROS (B8ZS).

B8ZS es la convención adoptada en Norteamérica para proporcionar sincronización de secuencias largas de ceros. En la mayoría de los casos, B8ZS funciona de forma idéntica a AMI bipolar. AMI bipolar cambia polos cada vez que encuentra un 1. Estos cambios proporcionan la sincronización necesaria en el receptor. Pero la señal no cambia durante las cadenas de ceros, por lo que a menudo la sincronización se pierde.

La diferencia entre B8ZS y la AMI bipolar se produce cuando se encuentran ocho o más ceros consecutivos dentro del flujo de datos. La solución provista por B8ZS es forzar cambios artificiales de señal, denominadas violaciones, dentro de la tira de ceros.

Cada vez que hay una sucesión de ocho ceros, B8ZS introduce cambios en el patrón basados en la polaridad del 1 anterior (el 1 que ocurrió justo antes de los ceros). Véase la figura 2.4.3.44.

Si el valor del 1 anterior era positivo, los ocho ceros se codificarán entonces como cero, cero, cero, positivo, negativo, cero, negativo, positivo. Recuerde que el receptor está buscando polaridades alternas para identificar unos. Cuando encuentra dos cargas positivas consecutivas alrededor de tres ceros, reconoce el patrón como una violación introducida deliberadamente y no como un error. A continuación busca el segundo par de violaciones esperadas. Cuando las encuentra, el receptor traduce los bits a ceros y vuelve otra vez al modo normal AMI bipolar.

Si la polaridad del 1 anterior es negativa, el patrón de la violación es el mismo, pero con polaridades inversas. Ambos patrones, positivo y negativo, se muestran en la figura 2.4.3.44.

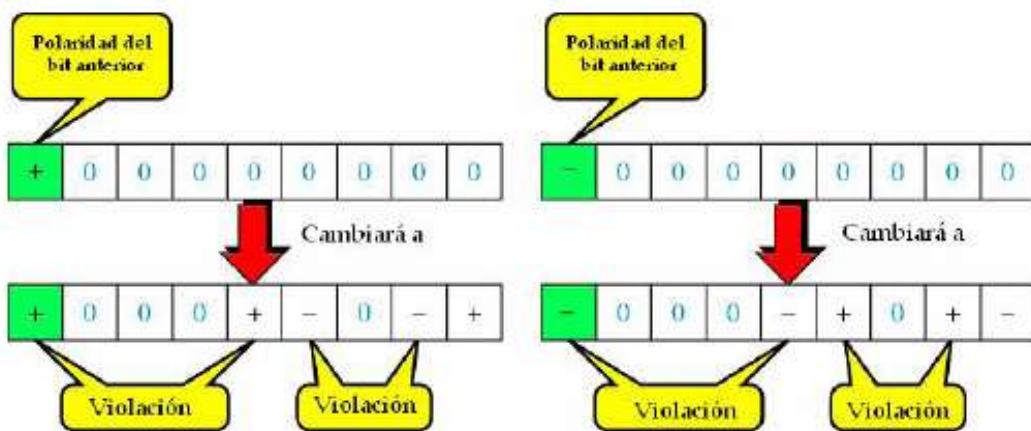
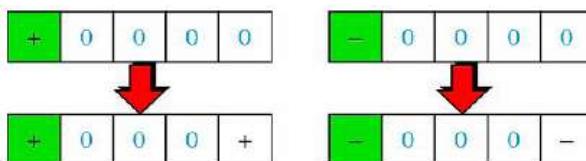


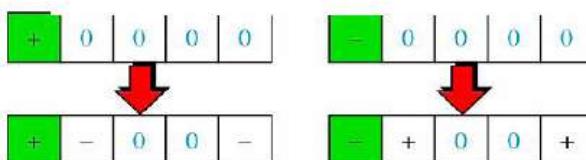
Figura 2.4.3.44 Codificación B8ZS.

BIPOLAR 3 DE ALTA DENSIDAD (HDB3).

El problema de sincronizar ráfagas de ceros consecutivos se ha resuelto de forma diferente en Europa y Japón que en los Estados Unidos. Esta convención, denominada HDB3, introduce cambios dentro del patrón AMI bipolar cada vez que se encuentran cuatro ceros consecutivos en lugar de esperar por los ocho del método B8ZS usado en Norteamérica. Aunque el nombre es HDB3, el patrón cambia cada vez que se encuentra cuatro ceros seguidos (véase la figura 2.4.3.45).



a) Si el número de unos desde la última sustitución es impar.



b) Si el número de unos desde la última sustitución es par.

Figura 2.4.3.45 Codificación HDB3.

Al igual que en B8ZS, el patrón de violaciones en HDB3 se basa en la polaridad del bit 1 anterior. Pero a diferencia del B8ZS, HDB3 también mira el número de unos que se han producido en el flujo de bits desde la última sustitución. Si el número de unos desde la última sustitución es impar, HDB3 pone una violación en el lugar del cuarto 0 consecutivo.

Si la polaridad del bit anterior era positiva, la violación es positiva. Si la polaridad del bit anterior era negativa, la polaridad es negativa.

Siempre que el número de unos de la última sustitución sea par, B8ZS coloca una violación en el lugar del primer y cuarto 0 consecutivo. Si la polaridad del bit anterior era positiva, ambas violaciones son negativas. Si la polaridad del bit anterior era negativa, ambas violaciones son positivas. Los cuatro patrones se muestran en la figura 2.4.3.45. Como se puede ver, la cuestión es violar el patrón estándar de forma que una máquina pueda reconocer las violaciones como deliberadas y usarlas para sincronizar el sistema.

Ejemplo 1:

Codificar el flujo de bits 10000000000100 usando B8ZS. Asumir que la polaridad del primer 1 es positiva.

Amplitud

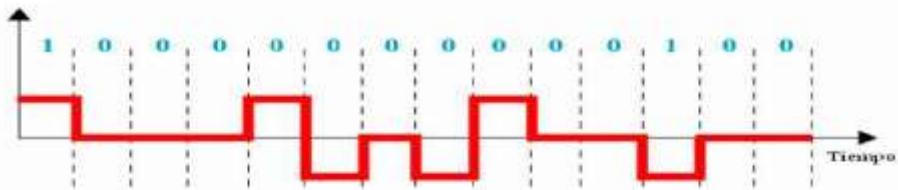


Figura 2.4.4.46 Solución al ejemplo 1.

Ejemplo 2:

Codificar el flujo de bits 10000000000100 usando HDB3. Asumir que el número de unos hasta ahora es impar y que el primero es positivo.

Solución:

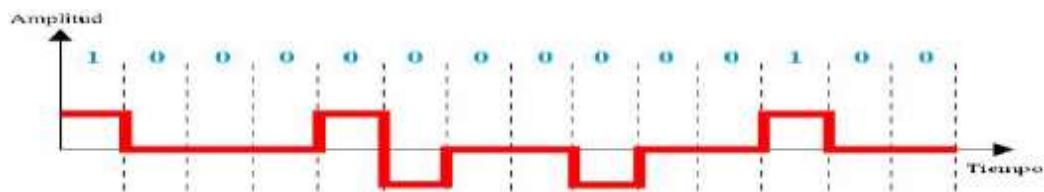


Figura 2.4.3.47 Solución al ejemplo 2.

2.5 TÉCNICAS DE MODULACIÓN DIGITAL.

La conversión de digital a analógico, o modulación de digital a analógico, es el proceso de cambiar una de las características de una señal de base analógica en información basada en una señal digital (ceros y unos). Por ejemplo, cuando se transmiten datos de una computadora a otra a través de una red telefónica pública, los datos originales son digitales, pero, debido a que los cables telefónicos transportan señales analógicas, es necesario convertir dichos datos. Los datos digitales deben ser modulados sobre una señal analógica que ha sido manipulada para aparecer como dos valores distintos correspondientes al 0 y al 1 binario. La figura 2.5.48 muestra la relación entre la información digital, el hardware de modulación de digital a analógico y el valor de la señal analógica resultante. De los muchos mecanismos existentes para la modulación de digital a analógico se van a tratar únicamente los más útiles para la transmisión de datos.



Figura 2.5.48 Modulación digital a analógico.

En el subtema anterior se hace mención de las siguientes tres características: amplitud, frecuencia y fase. Cuando se cambian cualquiera de estas características, se crea una segunda versión de esta onda. Si se dice entonces que la onda original representa el 1 binario, la variación puede representar el 0 binario, o viceversa. Por tanto, cambiando el aspecto de una señal eléctrica sencilla hacia delante y hacia atrás, puede servir para representar datos digitales.

Cualquiera de las tres características citadas puede alterarse de esta forma, dándonos al menos tres mecanismos para modular datos digitales en señales analógicas: Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK), Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) y Modulación por desplazamiento de fase (PSK). Además, hay un cuarto mecanismo (y mejor) que combina cambios en fase y amplitud, que se denomina modulación de amplitud en cuadratura (QAM). QAM es la más eficiente de estas opciones y es el mecanismo que se usa en todos los módems modernos (véase la figura 2.5.49).

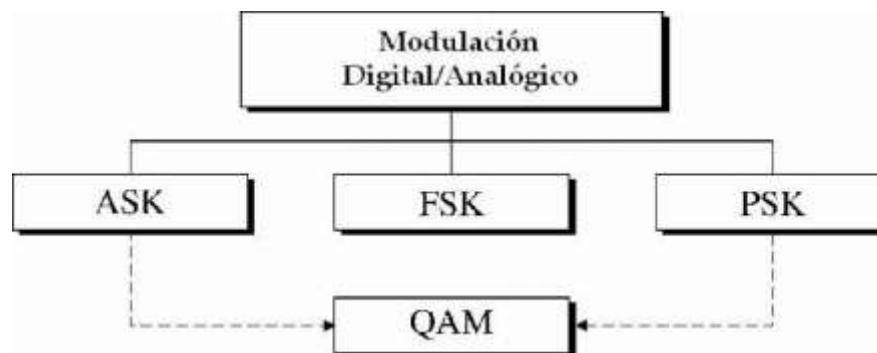


Figura 2.5.49 Métodos de Modulación Digital a Analógico.

ASPECTOS DE LA CONVERSIÓN DE DIGITAL A ANALÓGICO.

Antes de discutir los métodos específicos de la modulación digital a analógica, hay que definir dos aspectos básicos: tasa de bit / baudio y señal portadora.

TASA DE BITS Y TASA DE BAUDIOS.

Dos términos que se usan frecuentemente en la transmisión de datos son la tasa de bits y la tasa de baudios. La tasa de bits es el número de bits transmitidos durante un segundo. La tasa de baudios indica el número de unidades de señal por segundo necesarias para representar estos bits. Cuando se habla de la eficiencia de las computadoras, la tasa de bits es lo más importante; se quiere saber cuánto cuesta procesar cada pieza de la información. Sin embargo, en la transmisión de datos es más importante conocer la eficiencia con que se puede mover los datos de un lado para otro, tanto en piezas como en bloques. Cuantas menos unidades de señal sean necesarias, más eficiente será el sistema y menor será el ancho de banda para transmitir más bits; por tanto, es más importante lo concerniente a la tasa de baudios. La tasa de baudios determina el ancho de banda necesario para enviar la señal.

La tasa de bits es igual a la tasa de baudios por el número de bits representados para cada unidad de señal. La tasa de baudios es igual a la tasa de bits dividida por el número de bits representados por cada desplazamiento de la señal.

La tasa de bits siempre es mayor o igual que la tasa de baudios.

Una analogía puede clarificar los conceptos de baudio y de bit. En transporte, un baudio es análogo a un coche mientras que un bit es análogo a un pasajero. Un coche puede llevar uno o más pasajeros. Si 1,000 coches van desde un lugar a otro llevando cada uno un pasajero (el conductor), entonces han transportado 1,000 pasajeros. Sin embargo, si cada coche lleva cuatro pasajeros (se comparten los coches), entonces se han transportado 4,000 pasajeros. Observe que el número de coches, no el número de pasajeros, determina el tráfico y, por tanto, las necesidades de autopistas más grandes. Similarmente, el número de baudios determina el ancho de banda necesario, no el número de bits.

Ejemplo 2.3.

Una señal analógica transporta cuatro bits en cada señal elemental. Si se envían 1,000 elementos de señal por segundo, calcular la tasa de baudios y la tasa de bits.

Solución.

Tasa de baudios = Número de elementos de señal = 1,000 baudios por segundo
Tasa de bits = Tasa de baudios x Número de bits por elementos de señal = $1,000 \times 4 = 4,000$ bps.

Ejemplo 2.4.

La tasa de bits de la señal es 3,000. Si cada elemento de señal transporta 6 bits, ¿cuál es la tasa de baudio?

Solución:

Tasa de baudios = Tasa de bits / Número de bits por elemento señal = 3,000
/ 6 = 500 baudios por segundo.

SEÑAL PORTADORA.

En la transmisión analógica, el dispositivo emisor produce una señal de alta frecuencia que actúa como base para la señal de información. Esta señal base se denomina señal portadora o frecuencia portadora. El dispositivo que la recibe está ajustado para la frecuencia de la señal portadora que espera del emisor. La información digital se modula sobre la señal portadora modificando una o más de sus características (amplitud, frecuencia, fase). Este tipo de modificación se denomina modulación (o Modulación por desplazamiento) y la señal de información se denomina señal modulada.

2.5.1 MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE AMPLITUD (ASK).

En la Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK, Amplitude Shift Keying), la potencia de la señal portadora se cambia para representar el 1 o 0 binario. Tanto la frecuencia como la fase permanecen constantes mientras que la amplitud cambia. El voltaje que represente el 1 y el voltaje que represente el 0 se dejan para los diseñadores del sistema. La duración del bit es el periodo de tiempo que define un bit. La amplitud pico de la señal durante cada duración del bit es constante y su valor depende del bit (0 o 1). La velocidad de transmisión usando ASK está limitada por las características físicas del medio de transmisión.

La figura 2.5.1.50 muestra una visión conceptual del ASK.

Por desgracia, la transmisión ASK es altamente susceptible a la interferencia por ruidos. El término ruido se refiere a los voltajes no intencionales introducidos dentro de una línea por fenómenos variados tales como el calor o la inducción electromagnética creada por otras fuentes. Estos voltajes no intencionales se combinan con la señal y cambian su amplitud. Un 0 se puede cambiar a un 1 y un 1 a un 0. Así se puede ver que el ruido es especialmente problemático para ASK, que confía únicamente en la amplitud para el reconocimiento.

Habitualmente el ruido afecta a la amplitud; por tanto, ASK es el método de modulación más afectado por el ruido.

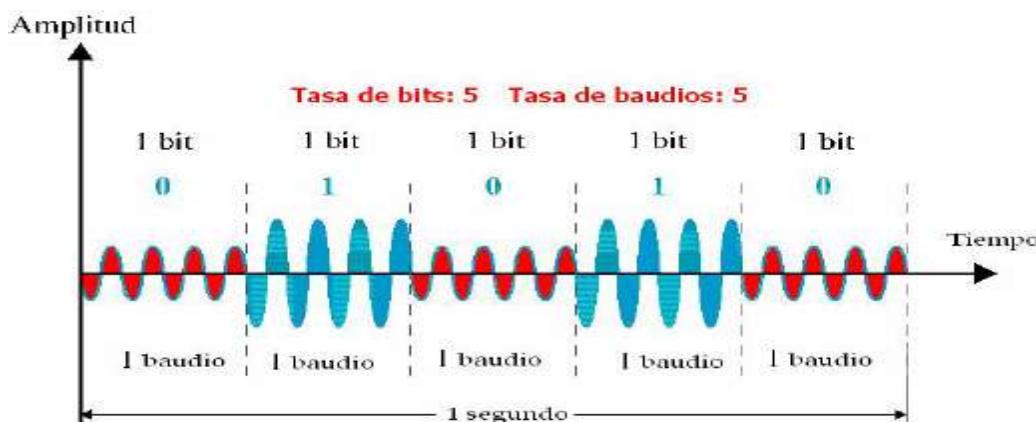


Figura 2.5.1.50 Modulación ASK.

ANCHO DE BANDA DE ASK

El ancho de banda de una señal es el rango total de frecuencias ocupadas por esa señal. Cuando se descompone una señal modulada con ASK, se obtiene un espectro de muchas frecuencias simples.

Sin embargo, las más significativas son aquellas entre $f_c - N_{baudio} / 2$ y $f_c + N_{baudio} / 2$ con la frecuencia de la portadora, f_c en el centro (véase la Figura 2.5.1.52).

Los requisitos de ancho de banda para ASK se calculan usando la fórmula:

$$BW = (l + d) \times N_{baudio}$$

Donde; BW es el ancho de banda N_{baudio} es la tasa de baudios d es un factor relacionado con la condición de la línea (con un valor mínimo de 0).

Como se puede ver, el ancho de banda mínimo necesario para la transmisión es igual a la tasa de baudios.

Aunque hay únicamente una frecuencia portadora, el proceso de modulación produce una señal compleja que es una combinación de muchas señales sencillas, cada una de las cuales tiene una frecuencia distinta.

Ejemplo 2.5.

Encontrar el ancho de banda mínimo para una señal ASK que transmite 2,000 bps. El modo de transmisión es semidúplex.

Solución.

En ASK la tasa de baudios y la tasa de bits son la misma. La tasa de baudios, por tanto, es 2,000. Una señal ASK necesita un ancho de banda mínimo igual a la tasa de baudios. Por tanto, el ancho de banda mínimo es 2,000 Hz.

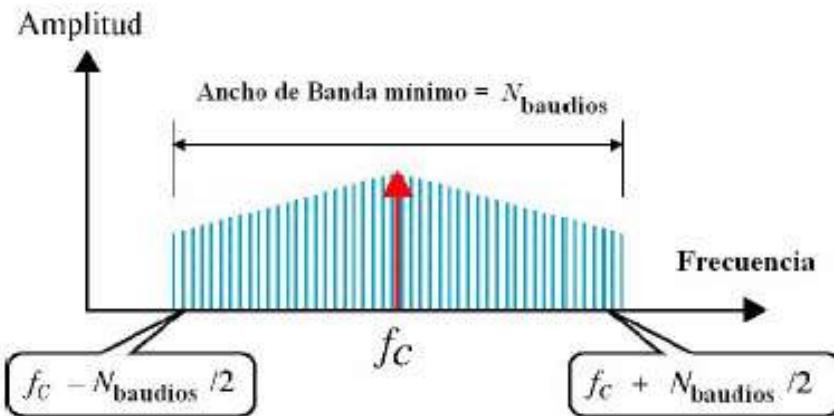


Figura 2.5.1.51 Relación entre la tasa de baudios y ancho de banda en ASK.

Ejemplo 2.6.

Dado un ancho de banda de 5,000 Hz para una señal ASK, ¿cuál es la tasa de baudios y la tasa de bits?

Solución.

En ASK la tasa de baudios es la misma que el ancho de banda, lo que significa que la tasa de baudios es 5,000. Pero, debido a que la tasa de baudios y la tasa de bits son también la misma en ASK, la tasa de bits es 5,000 bps.

Ejemplo 2.7

Dado un ancho de banda de 100 KHz (200 KHz a 300 KHz), dibujar un diagrama ASK full-dúplex del sistema. Encuentre las portadoras y los anchos de banda en cada dirección. Asumir que no hay intervalo entre las bandas de ambas direcciones.

Solución.

Para ASK full-dúplex, el ancho de banda en cada dirección es:

$$BW = 100 \text{ KHz}/2 = 50 \text{ KHz}$$

Las frecuencias de las portadoras se pueden elegir en la mitad de cada banda (ver la figura 2.5.1.52).

$$\begin{aligned}f_{c1(ida)} &= 200 + 50/2 = 225 \text{ KHz} \\f_{c2(regreso)} &= 300 - 50/2 = 275 \text{ KHz}\end{aligned}$$

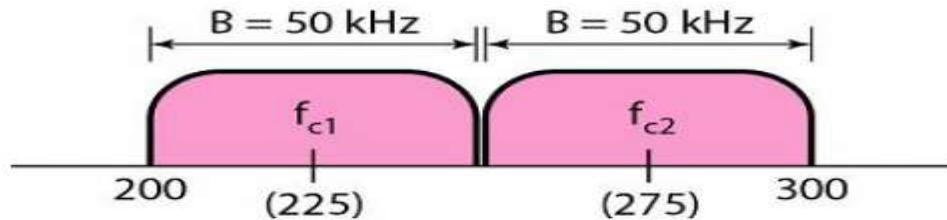


Figura 2.5.1.52 Solución al Ejemplo 2.7.

2.5.2 MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA (FSK).

En la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK, Frequency Shift Keying), la frecuencia de la señal portadora cambia para representar el 1 y el 0 binario. La frecuencia de la señal durante la duración del bit es constante y su valor depende de un bit (0 o 1): tanto la amplitud de pico como la fase permanecen constantes. La Figura 2.5.2.53 muestra una visión conceptual de FSK. FSK evita la mayor parte de los problemas de ruidos de ASK. Debido a que el dispositivo receptor está buscando cambios específicos de frecuencia en un cierto número de períodos, puede ignorar los picos de voltaje. Los factores que limitan la FSK son las capacidades físicas de la portadora.

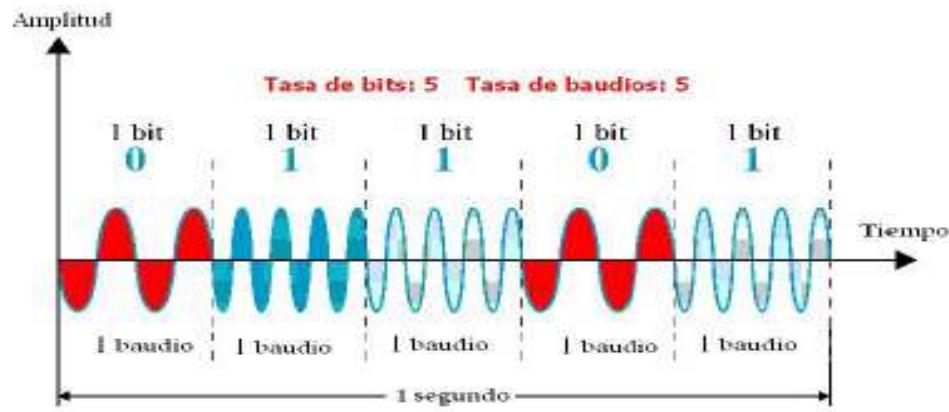


Figura 2.5.2.53 Modulación FSK.

ANCHO DE BANDA PARA FSK.

Aunque FSK cambia entre dos frecuencias portadoras, es fácil analizar como dos frecuencias coexistentes. Se puede decir que el espectro de FSK es la combinación de dos espectros ASK centrados alrededor de f_{c0} y f_{c1} .

El ancho de banda necesario para la transmisión con FSK es igual a la tasa de baudios de la señal más el desplazamiento de frecuencia (diferencia entre las dos frecuencias de las portadoras): $BW = (f_{c1} - f_{c0}) + Nbaudio$. Véase la figura 2.5.2.54.

Aunque hay dos frecuencias portadoras, el proceso de modulación produce una señal compuesta que es una combinación de muchas señales simples, cada una con frecuencia distinta.

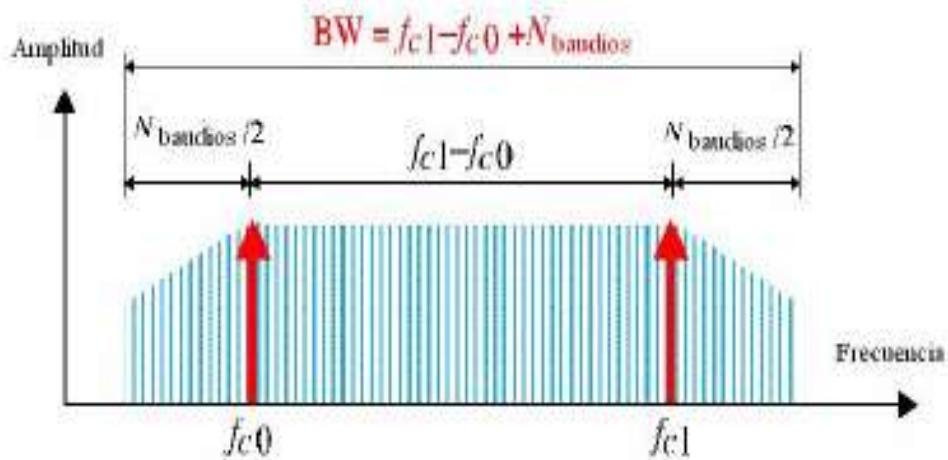


Figura 2.5.2.54 Relación entre la tasa de baudios y ancho de banda en ASK.

Ejemplo 2.8.

Encontrar el ancho de banda máximo para una señal FSK que se transmite a 2,000 bps. La transmisión es en modo semi-dúplex y las portadoras deben estar separadas por 3,000 Hz.

Solución

Para FSK, si f_{c1} y f_{c0} son las frecuencias portadoras, entonces:

$BW = (\text{Tasa de baudios} + f_{c1} - f_{c0})$. Sin embargo, la tasa de baudios es la misma que la tasa de bits.

Por tanto, $BW = (\text{Tasa de baudios} + f_{c1} - f_{c0}) = 2000 + 3000 = 5000 \text{ Hz}$.

Ejemplo:

Encuentre la máxima tasa de bits de una señal FSK si el ancho de banda del medio es 12,000 Hz y la diferencia entre las dos portadoras debe ser al menos 2,000 Hz. La transmisión se lleva a cabo en modo full-dúplex.

Solución:

Debido a que la transmisión es en modo full-dúplex, sólo se asignan 6,000 Hz para cada dirección. Para FSK, s_{if_i} y f_{c0} son las frecuencias portadoras,

$$BW = \text{Tasa de baudios} + (f_{c1} - f_{c0})\text{Tasa de baudios} = BW - (F_{c1} - F_{c0}) =$$

$$6,000 - 2,000 = 4,000\text{Hz}.$$

Pero, debido a que la tasa de baudios es la misma que la tasa de bits, la tasa de bits es 4,000 bps.

2.5.3 MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE (PSK).

En la modulación por desplazamiento de fase (PSK, Phase Shift Keying), la fase de la portadora cambia para representar el 1 o el 0 binario. Tanto la amplitud de pico como la frecuencia permanecen constantes mientras la fase cambia. Por ejemplo, si se comienza con una fase de 0 grados para representar un 0 binario, se puede cambiar la fase a 180 grados para enviar un 1 binario. La fase de la señal durante la duración de cada bit es constante y su valor depende del bit (0 o 1). La Figura 2.5.3.55 da una visión conceptual de PSK.

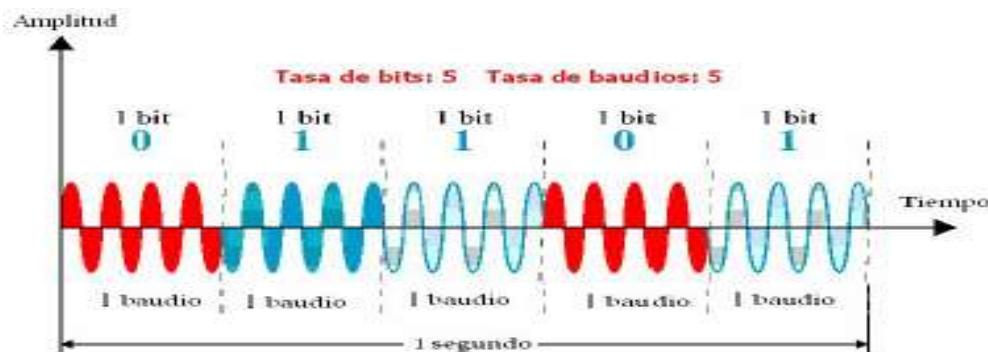


Figura 2.5.3.55 Modulación PSK.

El método anterior se denomina a menudo 2-PSK, o PSK binario, debido a que se usan dos fases distintas (0 y 180 grados). La figura 2.5.3.56 aclara este punto mostrando la relación entre la fase y el valor binario. Un segundo diagrama, denominado constelación o diagrama fase estado, muestra la misma relación ilustrando solamente las fases.

PSK no es susceptible a la degradación por ruido que afecta a ASK ni a las limitaciones de banda de FSK. Esto significa que pequeñas variaciones en la señal se pueden detectar fiablemente en el receptor. Además, en lugar de utilizar solamente dos variaciones de una señal, cada una representando un bit, se pueden utilizar cuatro variaciones y dejar que cada desplazamiento de fase represente dos bits (véase la Figura 2.5.3.57).

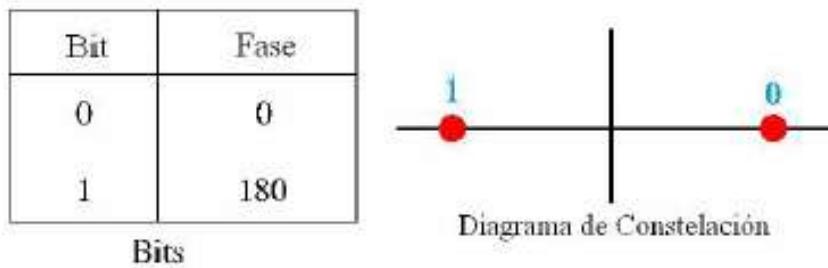


Figura 2.5.3.56 Constelación PSK.

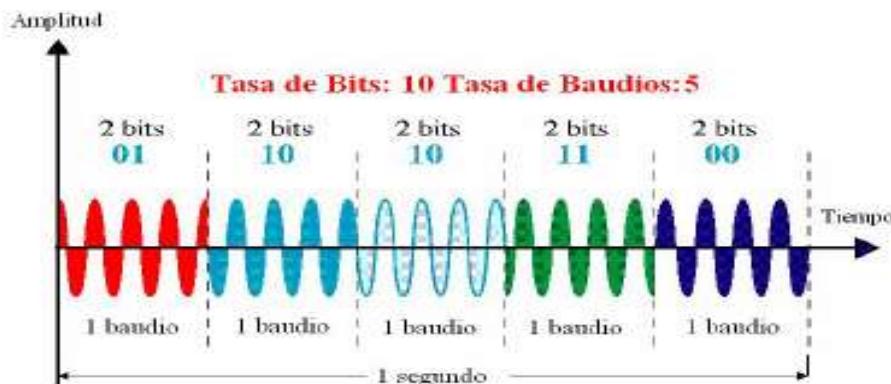


Figura 2.5.3.57 Modulación 4-PSK.

El diagrama de constelación para la señal de la figura 2.5.3.57 se muestra en la figura 2.5.3.58. Una fase de 0 grados representa ahora 00, 90 grados representa 01, 180 grados representa 10 y 270 grados representa 11. Esta técnica se denomina 4-PSK o Q-PSK. El par de bits representados por cada fase se denomina díbit. Usando 4-PSK se puede transmitir datos dos veces más rápido que con 2-PSK.

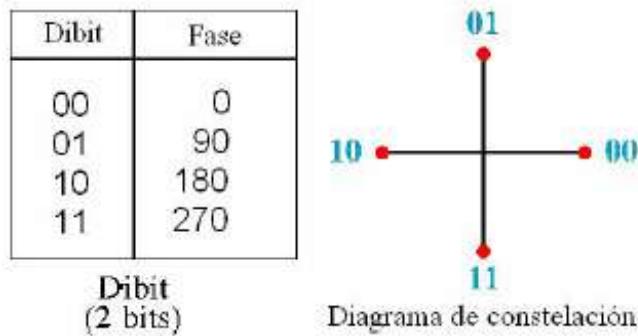


Figura 2.5.3.58 Características de Modulación 4-PSK.

Se puede extender esta idea hasta 8-PSK. En lugar de 90 grados se puede variar la señal en desplazamientos de 45 grados. Con ocho fases distintas, cada desplazamiento puede representar 3 bits (untribit) al mismo tiempo. (Como se puede ver, la relación del número de bits por desplazamiento del número de fases es potencia de dos. Cuando hay cuatro fases posibles, se pueden enviar dos bits al mismo tiempo -2^2 es igual a 4.

Cuando hay ocho fases posibles, se pueden enviar tres bits al mismo tiempo -2^3 es igual a 8.) La figura 2.5.3.59 muestra la relación entre los desplazamientos de fase y los tribits que cada uno representa: 8-PSK es tres veces más rápido que 2-PSK.

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



Figura 2.5.3.59 Características de Modulación 8-PSK.

ANCHO DE BANDA PARA PSK.

El ancho de banda mínimo necesario para transmisión PSK es el mismo que se necesita para la transmisión ASK, y por las mismas razones. Como ya hemos visto, la máxima tasa de bits en transmisión PSK es, sin embargo, potencialmente mucho mayor que la de ASK. Por tanto, mientras que la máxima tasa de baudios de ASK y PSK son las mismas para un ancho de banda determinado, la tasa de bits con PSK, usando el mismo ancho de banda, puede ser dos o más veces mayor (véase la figura 2.5.3.60).

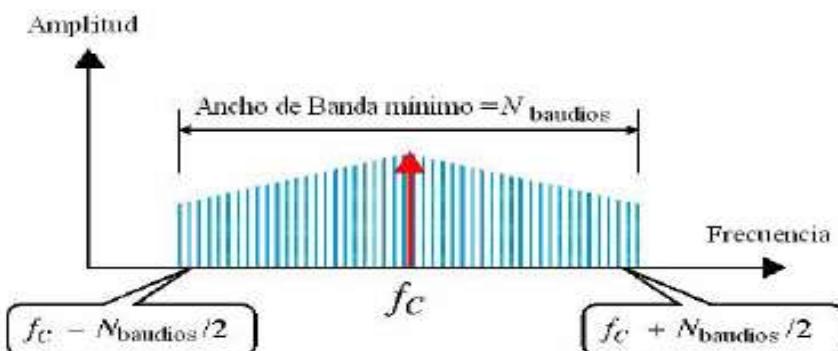


Figura 2.5.3.60 Relación entre ancho de banda y tasa en baudios en PSK.

Ejemplo 2.10.

Determinar el ancho de banda de una señal 4-PSK transmitiendo a 2,000 bps. La transmisión se lleva a cabo en modo semi-dúplex.

Solución:

Para 4-PSK la tasa de baudios es la mitad de la tasa de bits. La tasa de baudios es, por tanto, 1,000. Una señal PSK necesita un ancho de banda igual a su tasa de baudios. Por consiguiente, el ancho de banda es 1,000 Hz.

Ejemplo 2.11.

Dado un ancho de banda de 5,000 Hz para una señal 8-PSK, ¿cuál es la tasa de baudios y la tasa de bits?

Solución:

Para PSK la tasa de baudios es la misma que el ancho de banda, lo que significa que el ancho de banda es 5,000. Pero en 8-PSK la tasa de bits es tres veces más grande que la tasa de baudios, por lo que la tasa de bits es 15,000 bps.

2.5.4 MODULACIÓN DE AMPLITUD EN CUADRATURA (QAM).

PSK está limitado por la habilidad de los equipos de distinguir pequeñas diferencias en fase. Este factor limita su tasa de bits potencial.

Hasta ahora, se han ido alterando únicamente las tres características de una onda seno una cada vez, pero ¿qué pasa si se alteran dos? Las limitaciones del ancho de banda hacen que las combinaciones de FSK con otros cambios sean prácticamente inútiles. Pero ¿por qué no combinar ASK y PSK? En ese caso se podrían tener x variaciones en fase y variaciones en amplitud, dándonos x veces y posibles variaciones y el número correspondiente de bits por variación.

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM) hace justamente eso.

El término cuadratura se deriva de las restricciones necesarias para el rendimiento mínimo y está relacionado con la trigonometría.

Las variaciones posibles de QAM son numerosas. Teóricamente, cualquier valor medible de cambios en amplitud se puede combinar con cualquier valor de cambios en fase. La figura 2.5.4.61 muestra dos combinaciones posibles, 4-QAM y 8-QAM.

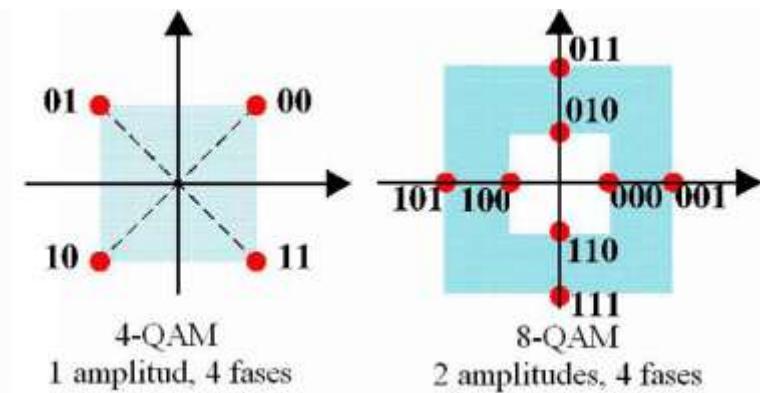


Figura 2.5.4.61 Constelaciones 4-QAM y 8-QAM.

En ambos casos, el número de desplazamientos de amplitud es menor que el número de desplazamientos de fase. Debido a que los cambios de amplitud son susceptibles al ruido y requieren diferencias en el desplazamiento de lo que necesitan los cambios en fase, el número de desplazamientos en fase usados en un sistema QAM es siempre mayor que el número de desplazamientos en amplitud. La gráfica en el dominio del tiempo correspondiente a la señal 8-QAM de la Figura 2.5.4.44 se muestra en la Figura 2.5.4.62.

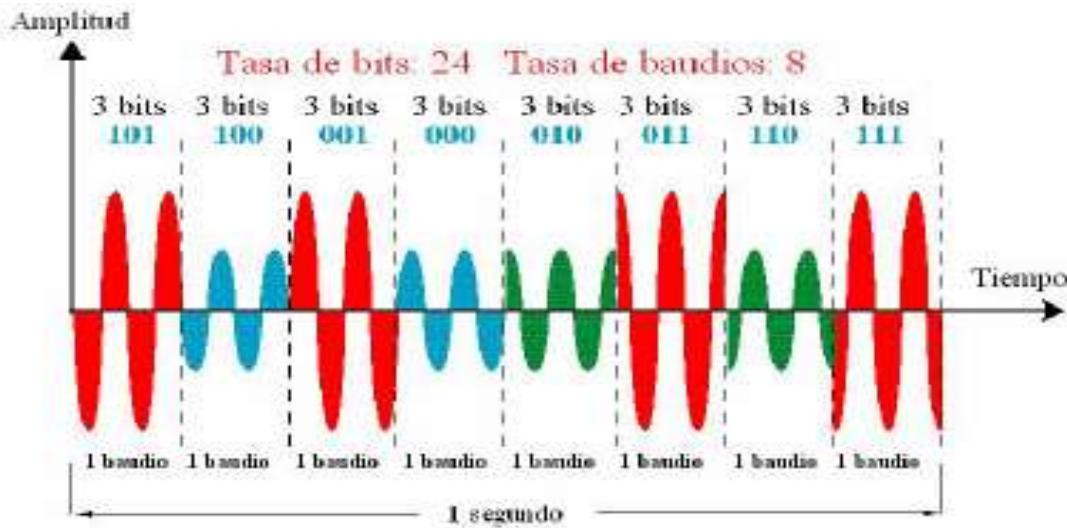


Figura 2.5.4.62 Dominio del tiempo para una señal 8-QAM.

También son posibles otras relaciones geométricas. En la Figura 2.5.4.63 se muestran tres configuraciones populares de 16-QAM. El primer ejemplo, tres amplitudes y 12 fases, maneja el ruido mejor debido a una mayor proporción del desplazamiento de fase a la amplitud.

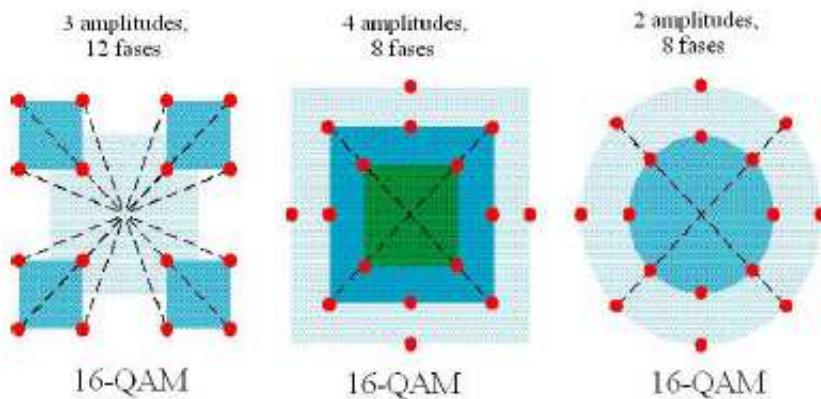


Figura 2.5.4.63 Constelaciones 16-QAM.

Esta es la recomendación de ITU-T. El segundo ejemplo, cuatro amplitudes y 8 fases, es la recomendación de OSI. Si se examina el gráfico cuidadosamente, se podrá observar que, aunque se basa en círculos

concéntricos, no se usan todas las intersecciones de la fase con la amplitud. De hecho, 4 veces 8 permitirían hasta 32 variaciones posibles. Pero usando sólo la mitad de estas posibilidades, las diferencias medibles entre desplazamientos se incrementan y se asegura una mayor legibilidad de la señal. Además, varios diseños QAM enlazan amplitudes específicas con fases específicas. Esto significa que, incluso con los problemas de ruido asociados con el desplazamiento en amplitud, el significado de un desplazamiento se pueda recuperar a partir de la información de fase. Por tanto, en general, se puede decir que una segunda ventaja de QAM sobre ASK es su menor susceptibilidad al ruido.

ANCHO DE BANDA PARA QAM.

El ancho de banda mínimo necesario para una transmisión QAM es el mismo que es necesario para transmisión ASK y PSK. QAM tiene las mismas ventajas que PSK sobre ASK.

COMPARACIÓN BIT/BAUDIO.

Asumiendo que una señal FSK sobre líneas de teléfono de tipo voz puede enviar 1,200 bits por segundo, la tasa de bits es 1,200 bps. Cada desplazamiento de frecuencia representa un único bit; por lo que necesita 1,200 elementos de señal para enviar 1.200 bits. Por tanto, su tasa de baudios es también 1,200 bps. Cada variación de la señal en un sistema 8 QAM representa, sin embargo, tres bits. Por tanto, una tasa de bits de 1,200 bps usando 8-QAM, tiene una tasa de baudios de sólo 400.

Como muestra la figura 2.5.4.64, un sistema díbit tiene una tasa de baudios que es la mitad de su tasa de bits, un sistema tríbit tiene una tasa de baudios de un tercio de la tasa de bits y un sistema quadbit tiene una tasa de baudios de un cuarto de la tasa de bit.



Figura 2.5.4.64 Bit y Baudio.

La tabla de la figura 2.5.4.48 muestra las tasas comparativas de bits y baudios para los distintos métodos de modulación de digital a analógico.

Modulación	Unidades	Bits/Baudios	Tasa de Baudios	Tasa de Bits
ASK,FSK,2-PSK	Bit	1	N	N
4-PSK, 4-QAM	Díbit	2	N	2N
8-PSK,8-QAM	Tribit	3	N	3N
16-QAM	Quadbit	4	N	4N
32-QAM	Pentabit	5	N	5N
64-QAM	Hexabit	6	N	6N
128-QAM	Septabit	7	N	7N
256-QAM	Octabit	8	N	8N

Tabla 2.5.4.7 Comparación de tasas de bits y de baudios^[19]

RESUMEN DE UNIDAD.

Una Señal puede ser transmitida de diferentes maneras de tal forma que puedan ser codificadas por un aparato o por un equipo de cómputo; se puede enviar por ondas electromagnéticas, por señales de 1 y 0 interpretadas por una pc, o por una señal telefónica.

Los datos se almacenan en una computadora en forma de ceros y unos. Habitualmente, para transportarlos de un lugar a otro (dentro o fuera de la computadora), es necesario convertirlos en señales digitales.

La modulación permite aprovechar mejor el canal de comunicación ya que posibilita transmitir más información en forma simultánea por un mismo canal y/o proteger la información de posibles interferencias y ruidos.

El ancho de banda Am es la señal modulada y el ancho de banda Fm es la frecuencia de modulación de una señal.

A la variación total de frecuencia desde la más baja hasta la más alta, se la conoce como oscilación de portadora.

Los mecanismos para modular datos digitales en señales analógicas son: Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK), Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK), Modulación por desplazamiento de fase (PSK), existe un cuarto mecanismo que combina cambios en fase y amplitud y que se denomina modulación de amplitud en cuadratura (QAM).

La importancia de las técnicas de modulación permite un mejor aprovechamiento del canal de comunicación lo que posibilita transmitir más información en forma simultánea, protegiéndola de posibles interferencias y ruidos.

EJERCICIOS

Un diagrama de constelación está formado por ocho puntos igualmente espaciados sobre un círculo. Si la tasa de bits es 4,800 bps, ¿cuál es la tasa de baudios?

Solución

La constelación indica 8-PSK con los puntos separados 45 grados. Puesto que $2^3 = 8$, se transmiten tres bits con cada elemento señal. Además, la tasa de baudios es $4,800/3 = 1,600$ baudios.

Calcular la tasa de bits para una señal 16-QAM de 1,000 baudios.

Solución

Una señal 16-QAM significa que hay cuatro bits por elemento de señal, puesto que $2^4 = 16$.

Así $1,000 \times 4 = 4,000$ bps.

Calcular la tasa de baudios para una señal 64-QAM de 72,000 bps.

Solución

Una señal 64-QAM indica que hay 6 bits por elemento de señal, puesto que $2^6 = 64$. Así, $72,000/6 = 12,000$ baudios.

Realizar ejercicios sobre las diferentes técnicas de modulación.

Analizar los postulados de los teoremas de Nyquist y Shannon para realizar ejercicios que reafirmen los conocimientos.