

Tema 3

Codificación de datos

3. CODIFICACIÓN DE DATOS	3
3.1. INTRODUCCIÓN A LA CODIFICACIÓN DE DATOS	3
3.2. CODIFICACIÓN	5
3.3. DATOS DIGITALES - SEÑALES DIGITALES	7
3.3.1. <i>Unipolar</i>	8
3.3.2. <i>Polar</i>	9
3.3.2.1. NRZ	9
3.3.2.1.1 NRZ-L	9
3.3.2.1.2 NRZ-I	9
3.3.2.2. RZ.....	11
3.3.2.3. Bifase.....	11
3.3.2.3.1 Manchester	11
3.3.2.3.2 Manchester Diferencial:	12
3.3.3. <i>Bipolar</i>	13
3.3.3.1. Bipolar AML	13
3.3.3.2. B8ZS.....	14
3.3.3.3. HDB3	15
3.4. DATOS DIGITALES - SEÑALES ANALÓGICAS.....	17
3.4.1. <i>Modulación de Amplitud (ASK)</i>	18
3.4.2. <i>Modulación de Frecuencia (FSK)</i>	20
3.4.3. <i>Modulación de Fase (PSK)</i>	23
3.4.4. <i>Quadrature Amplitud Modulation (QAM)</i>	26
3.5. DATOS ANALÓGICOS – SEÑALES DIGITALES	28
3.5.1. <i>Modulación por impulsos codificados PCM</i>	29
3.5.2. <i>Modulación Delta</i>	32
3.6. DATOS ANALÓGICOS – SEÑALES ANALÓGICAS.....	33
3.6.1. <i>Modulación en Amplitud (AM)</i>	34
3.6.2. <i>Modulación en Frecuencias (FM)</i>	35
3.6.3. <i>Modulación en Fase (PM)</i>	35
3.7. ESPECTRO EXPANDIDO	36

3. CODIFICACIÓN DE DATOS

3.1. Introducción a la codificación de datos

La comunicación o transmisión de datos se ocupa del intercambio de información codificada digitalmente entre dos equipos terminales de datos (DTE). La separación física de los dos equipos puede variar desde unas cuantas decenas de metros hasta miles de kilómetros.

En el contexto de la comunicación de datos, normalmente, reservamos el término “Dato” para describir un conjunto o bloque de uno o más caracteres alfabéticos o numéricos codificados en forma digital que se intercambian entre dos dispositivos. Normalmente, estos dispositivos también tienen que intercambiar mensajes de control, con lo que, para distinguir los dos tipos de mensajes (datos y control), con el término más general de “Información” describimos los datos de usuario reales que se intercambian a través del recurso de comunicación.

En cualquier sistema digital, la pérdida o alteración de un solo bit (dígito binario) de información puede ser crucial. Por tanto, la comunicación de datos no sólo se ocupa de la forma en que se transmiten los datos por el medio de transmisión físico, sino también de las técnicas de detección y corrección de errores en la transmisión, así como del control de la tasa de transferencia de datos, del formato de los datos transferidos y de otros aspectos relacionados.

Cuando introducimos datos en un ordenador a través del teclado, los circuitos electrónicos codifican cada elemento tecleado (caracteres numéricos o alfabéticos) para obtener un patrón equivalente codificado en binario, mediante uno de los esquemas de codificación estándar para intercambiar la información (EBCDIC, ASCII). En el caso de datos de salida el procedimiento es similar, en este caso se descodifica cada patrón codificado en binario al carácter correspondiente. Se denominan palabras de código a los patrones de bits codificados que representan cada carácter. Los códigos más extendidos en computación son:

- **EBCDIC** (“*Extended Binary Coded Decimal Interchange Code*”). Código de 8 bits empleados en los equipos fabricados por IBM. Es un código propietario pero se emplea con mucha frecuencia.
- **ASCII** (“*American Standards Committee for Information Interchange*”). Es igual al IA5 (Alfabeto Internacional Nº 5) de la ITU-T y también al ISO 645. Es un código de 7 bits usado muy frecuentemente.

Ambos códigos contienen todos los caracteres alfabéticos, numéricos y de puntuación normales (imprimibles), además de una serie de caracteres de control adicionales (no imprimibles), que se listan a continuación:

Control del formato

BS: Retroceso
HT: Tabulador horizontal
LF: Avance línea
VT: Tabulador vertical
FF: Avance página
CR: Retorno Carro

Control de la transmisión

SOH: Inicio cabecera
STX: Inicio texto
ETX: Fin texto
EOT: Fin transmisión
ENQ: Solicitud respuesta
ACK: Confirmación positiva
NACK: Confirmación negativa
SYN: Sincronización
ETB: Fin de bloque datos

Separadores de información

FS: Separador de fichero
GS: Separador de grupo
RS: Separador de registro
US: Separador de uniones

Otras

NUL: Nulo
BEL: Sonido
SO: Inicio caracteres especiales
SI: Fin caracteres especiales
DEL: Eliminar
SP: Espacio
DLE: Carácter enlace
DC1,DC2,DC3,DC4: Control dispositivos
CAN: Cancelar
EM: Fin de medio físico
SUB: Substitución
ESC: Carácter de escape

Aunque dichos códigos sirven para operaciones de entrada y salida, una vez que los datos han sido introducidos en el ordenador, lo normal que se conviertan y almacenen en una forma binaria de longitud fija, de longitud 8, 16 o 32 bits.

Llamamos **byte** a un patrón binario de 8 bits y palabra a patrones más largos. Al comunicar datos entre dos DTE's, lo normal es utilizar múltiples elementos de longitud fija cada uno de 8 bits. Así pues, en algunos casos los 8 bits transmitidos a través de un enlace de datos pueden representar un carácter imprimible codificado en binario (7 bits de datos y 1 bit de error), mientras que en otros casos puede representar un componente de 8 bits de un valor más grandes. En este último caso, se dice que el elemento es un byte, o en comunicaciones se conoce también por octeto.

3.2. Codificación

En la transmisión de datos se debe tener en cuenta la naturaleza de los datos, cómo se propagan físicamente, y qué procesamientos o ajustes se necesitan a lo largo del camino para asegurar que los datos que se reciban sean inteligibles. Para todas estas consideraciones, el punto crucial es si se tratan de entidades digitales o analógicas.

Sabemos que los datos son las entidades que transportan información, y las señales son codificaciones eléctricas o electromagnéticas de los datos. La señalización es el acto de propagar la señal a través de un medio adecuado. Vamos a definir la señalización como la comunicación de datos mediante la propagación y procesamiento de señales electromagnéticas. Tipos:

Señalización Digital: una fuente de datos $g(t)$ (digital o analógica), codifica una señal digital $x(t)$. La forma de onda que adopte $x(t)$ dependerá del esquema de codificación utilizado y ésta se escogerá intentando optimizar el medio de transmisión según algún criterio, por ejemplo, maximizar el ancho de banda o minimizar errores (*Figura 3-1 (a)*)

Señalización analógica: utiliza una señal continua de frecuencia constante denominada Portadora, compatible con el medio de transmisión utilizado. Los datos se pueden transmitir modulando la señal portadora, donde por modulación se entiende el proceso de codificar los datos generados por la fuente con una señal de frecuencia f_c . Cualquier esquema de modulación involucra alguno de los parámetros fundamentales de la señal: Amplitud, Frecuencia o Fase. La señal de entrada $s(t)$, analógica o digital, se llama moduladora o señal banda-base. El resultado de la modulación es una portadora llamada señal modulada $s(t)$.

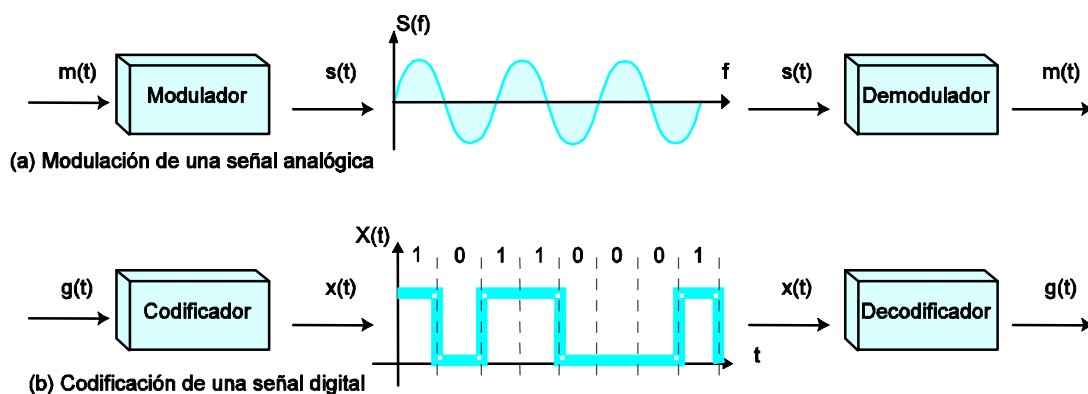


Figura 3-1. Técnicas de modulación y codificación.

A continuación se detallan las cuatro posibles combinaciones:

- **Datos digitales, señales digitales (Digital/Digital):** en general, el equipamiento para codificación digital de señales digitales es menos complicado y menos costoso que el equipamiento necesario para transmitir datos digitales modulando señales analógicas.
- **Datos digitales, señales analógicas (Digital/Analógico):** algunos medios de transmisión, por ejemplo, fibra óptica y medios no guiados, sólo permiten la transmisión de señales analógicas.
- **Datos analógicos, señales digitales (Analógico/Digital):** la conversión de datos analógicos en digitales permite la utilización de las técnicas más recientes de equipos de conmutación para transmisión digital.
- **Datos analógicos, señales analógicas (Analógico/Analógico):** los datos analógicos de naturaleza eléctrica se pueden transmitir fácilmente y de una forma poco costosa en banda base. Esto, por ejemplo, se utiliza en transmisión de voz en líneas telefónicas. La modulación se utiliza frecuentemente para desplazar el ancho de banda de la señal en banda base hacia otra zona del espectro. De esta manera podemos multiplexar varias señales, cada una en una posición diferente del espectro, en el mismo medio de transmisión.

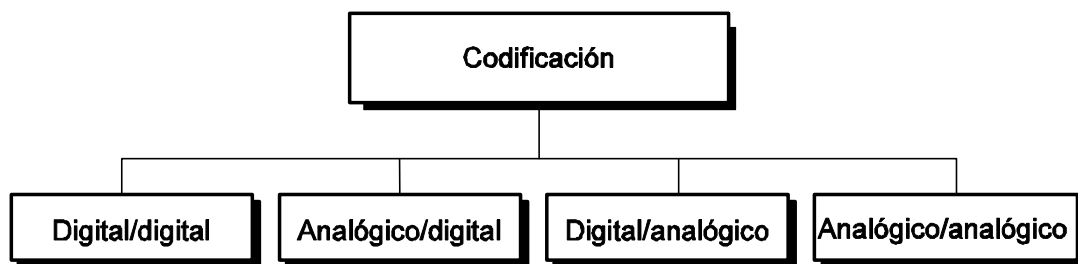


Figura 3-2. Diferentes esquemas de codificación.

3.3. Datos digitales - señales digitales

Para llevar a cabo una transmisión digital, hay que tener en cuenta una serie de factores. El primero es que el receptor debe conocer la temporización de cada bit, es decir, debe saber exactamente cuando empieza a recibir un bit y cuando termina de recibirlo. La segunda es que el receptor debe determinar si el nivel de la señal, para cada posición de bit, es alto ('1') o bajo ('0').

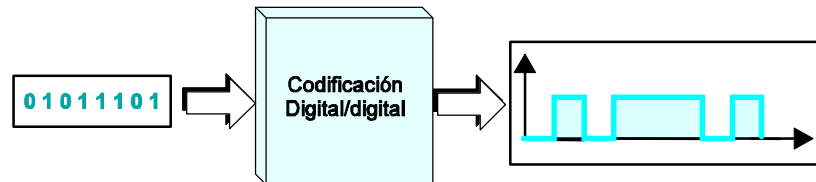


Figura 3-3. Codificación digital/digital.

Una vez considerados todos los aspectos básicos, se puede llevar a cabo la transmisión teniendo en cuenta que se pueden producir errores, que vendrán provocados por un cambio en la relación señal/ruido, velocidad de transmisión, ancho de banda insuficiente u otros fenómenos de diversa naturaleza. Hay múltiples esquemas de codificación de los datos. Para elegir la más adecuada en cada transmisión hay varios factores a tener en cuenta:

- **Espectro de la señal:** la ausencia de componentes de altas frecuencias significa que se necesita menos ancho de banda para su transmisión. La importancia de los efectos relacionados con la distorsión de la señal y las interferencias también va a depender de las propiedades espectrales de la señal transmitida.
- **Sincronización:** ya se ha mencionado en varias ocasiones la necesidad de detectar principio y fin de cada bit. Para ello, una aproximación bastante costosa, es transmitir una señal de reloj por separado para sincronizar emisor y receptor. La alternativa es conseguir la sincronización mediante la propia señal transmitida, lo que puede conseguirse si se adopta un esquema de codificación adecuado.
- **Detección de errores:** es útil disponer de alguna capacidad de detección de errores incorporada al esquema de codificación situado en la capa física. De esta manera, conseguimos que los errores se detecten más rápidamente.
- **Inmunidad frente a interferencias y ruido:** algunos códigos muestran un comportamiento mejor que otros en presencia de ruido. Esto se mide en términos de la tasa de error por bit.
- **Coste y complejidad:** aunque el coste de la lógica digital continúa bajando, no se debe ignorar este factor. En particular, cuando mayor es la razón de elementos de señal para una velocidad de transmisión dada, mayor es el coste.

Se han desarrollado múltiples esquemas de codificación digital/digital, no obstante, sólo estudiaremos aquellas útiles en transmisión de datos. Podemos distinguir tres grandes categorías: unipolar, polar y bipolar. (Figura 3-4).

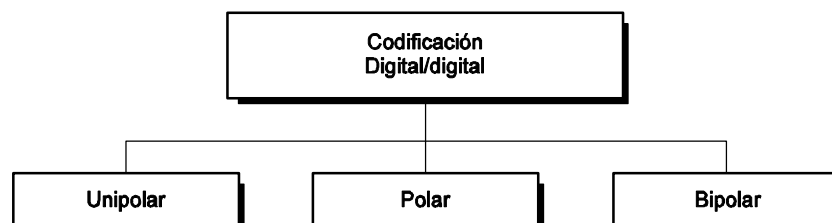


Figura 3-4. Esquemas de codificación digital/digital

3.3.1.Unipolar

Se trata de la codificación más simple y rudimentaria. Aunque está completamente en desuso hoy en día, su simplicidad proporciona una sencilla introducción a los conceptos desarrollados con los sistemas de codificación más complejos y nos permite examinar los tipos de problemas que pueden presentarse en cualquier sistema de transmisión digital.

Los sistemas de transmisión digital funcionan enviando pulsos de corriente a través del medio de comunicación, normalmente algún tipo de cable. En la mayoría de tipos de codificación hay un nivel de voltaje para codificar el estado '1' y otro nivel para el valor '0'. La polaridad de un pulso se refiere a si éste es positivo o negativo. Así, la codificación unipolar usa sola una polaridad, codificando únicamente uno de los dos estados binarios, normalmente el '1', que toma una polaridad positiva o negativa. El otro estado, normalmente el '0', se representa por 0 voltios, es decir, línea ociosa. (Figura 3-5).

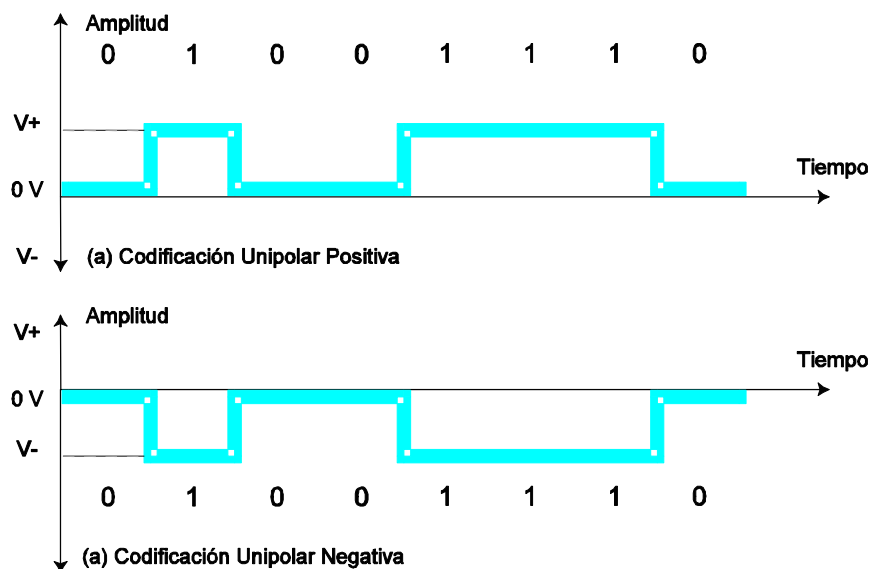


Figura 3-5. Codificación Unipolar.

Ventajas	Inconvenientes
Sencilla y económica.	Componente continua: La amplitud media de una señal con codificación unipolar es distinta de cero. Esto crea lo que se llama “componente de corriente continua”. Cuando una señal tiene componente continua no puede viajar por medios que no pueden manejar las componentes continuas, como señales del tipo microondas.
	Poca capacidad de sincronización: Al ser un esquema de codificación donde se producen largas cadenas de 0s ó 1s, es difícil la sincronización del receptor, que necesita de múltiples cambios de polaridad para alcanzar dicha sincronización.

3.3.2. Polar

La codificación Polar utiliza dos niveles de voltaje: positivo y negativo. Al utilizar dos niveles, en la mayoría de los métodos, se reduce el nivel de voltaje medio en la línea, y el problema de la componente continua de la codificación Unipolar se alivia. Existen muchas variaciones de codificación polar, no obstante, sólo vamos a estudiar las tres mas utilizadas: *No Retorno a Cero (NRZ)*, *Retorno a Cero (RZ)* y *Bifase*.

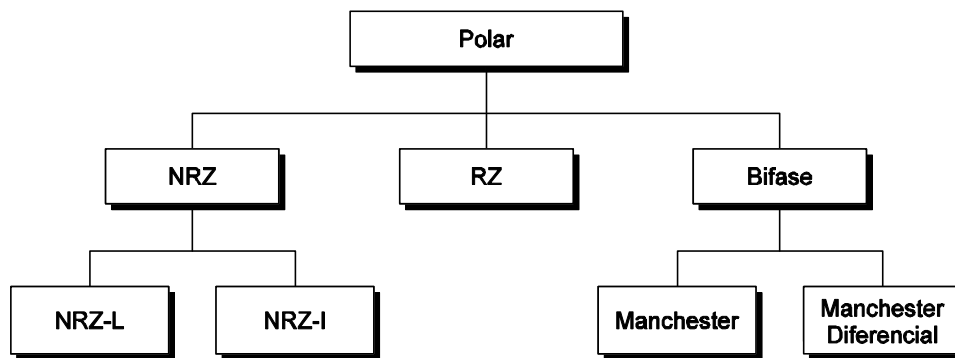


Figura 3-6. Codificación Polar.

3.3.2.1. NRZ

En el esquema NRZ (*"Non return to zero"*, *"No retorno a cero"*), el nivel de la señal es siempre positivo o negativo. Al contrario que en la codificación unipolar, donde un bit '0' se representa por la línea en reposo, en los sistemas NRZ, si la línea está en reposo significa que no se está transmitiendo nada. Los dos métodos más utilizados son (Figura 3-7):

3.3.2.1.1 NRZ-L

(*"Non return to zero level"*, *"No retorno a cero"*). En esta codificación, el nivel de la señal depende del tipo de bit que representa. Un voltaje positivo significa que el bit es un '1', y un voltaje negativo que el bit es un '0'. Así, el nivel de la señal sólo depende del valor del bit actual.

3.3.2.1.2 NRZ-I

(*"Non return to zero - invert on ones"*, *"No retorno a cero – Invertiendo en unos"*). En esta codificación, el bit '1' se representa con la inversión del nivel de voltaje. Lo que representa el bit '1' es la transición entre un voltaje positivo y negativo, o al revés, no los voltajes en sí mismos. Un bit '0' no provoca un cambio de estado en la señal. Así pues, el nivel de la señal no sólo depende del valor del bit actual, sino también del bit anterior.

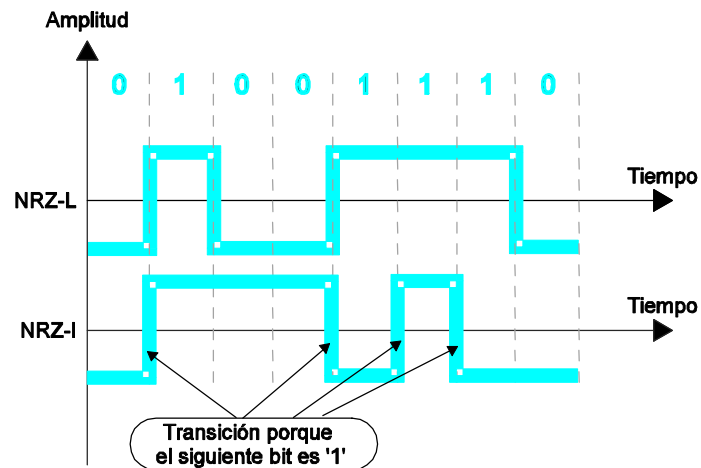


Figura 3-7. Codificación NRZ.

La codificación NRZ-I es un ejemplo de **codificación diferencial**, donde en lugar de determinar el valor absoluto, la señal se decodifica comparando la polaridad de los elementos de señal adyacentes. Su uso se reduce a grabaciones magnéticas.

Ventajas	Inconvenientes
Mayor eficacia frente a ruidos, pues siempre es más fácil detectar una transición que un determinado valor umbral.	Ausencia de sincronización total. Las cadenas de ceros siguen causando problemas de sincronización, aunque estadísticamente, las cadenas de unos suceden más frecuentemente que las cadenas de ceros.
Aumento de la capacidad de sincronización. Siempre que se encuentre un '1' va a haber un cambio de estado en la señal, que puede ser utilizado por el receptor para sincronizarse con el emisor	Componente continua
Fácil implementación	

3.3.2.2. RZ

Aunque la codificación NRZ-I resuelve los problemas de sincronización para las secuencias más frecuentes, que son las de '1', siguen planteando problemas para las secuencias de '0'. La única manera de resolver los problemas de sincronización para cualquier tipo de secuencia es que ambos tipos de bit provoquen un cambio de estado en la señal, y esto es precisamente la base de la codificación RZ ("Return to Zero", "Retorno a cero").

La codificación RZ utiliza tres valores: *positivo*, *negativo* y *cero*. La señal no cambia entre bits, sino durante ellos. Es igual que NRZ-L donde un voltaje positivo significa un '1', y un voltaje negativo significa un '0', pero además, en medio del intervalo de cada bit, la señal regresa a voltaje 0. En resumen, podemos decir, que un bit '1' se representa por una transición de positivo a 0, y un bit '0' se representa con la transición de negativo a 0, con retorno a voltaje 0 en mitad del intervalo (Figura 3-8).

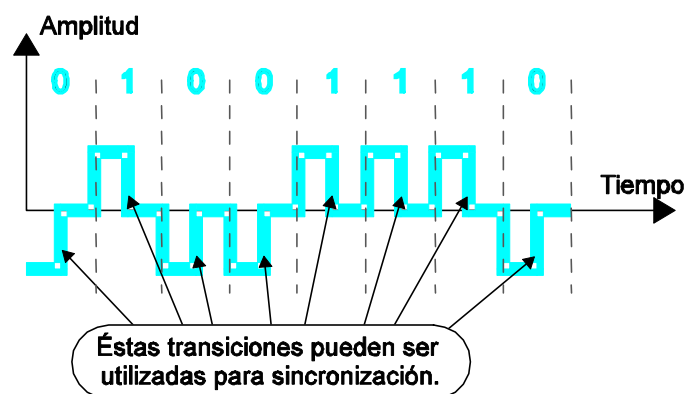


Figura 3-8. Codificación RZ.

Ventajas	Inconvenientes
Aumento de la capacidad de sincronización, por el aumento de transiciones.	Necesita dos cambios en la señal para codificar un único bit, con lo que consume más ancho de banda.

3.3.2.3. Bifase

Este tipo de codificación sea quizás la más efectiva para resolver el problema de la sincronización. En este método, la señal cambia en medio del intervalo del bit, pero no retorno a cero, sino que continua el resto del intervalo en el polo opuesto, y es precisamente este cambio a mitad del intervalo el que le permite mantener la sincronización. Hay dos tipos de codificación Bifase (Figura 3-9): Manchester y Manchester Diferencial.

3.3.2.3.1 Manchester

La Codificación Manchester usa la inversión de la polaridad en medio del intervalo del bit tanto para sincronización como para representación del valor del bit. Una transición de polaridad negativa a positiva representa el valor binario '1', y una transición de positiva a negativa representa un '0'. Destacar que la Codificación Manchester consigue el mismo nivel de sincronización que RZ, pero con sólo dos niveles de amplitud.

3.3.2.3.2 Manchester Diferencial:

En codificación Manchester Diferencial, la inversión en medio del intervalo del bit se usa sólo para sincronización, y para identificar el bit se usa la presencia o ausencia de una transición adicional al principio del intervalo. Una transición significa un bit '0', y si no hay transición significa un bit '1'. La codificación Manchester Diferencial necesita dos cambios de señal para representar el bit '0', pero sólo uno para representar el bit '1'. Esto hace que la velocidad de modulación máxima sea el doble que en NRZ, necesitándose, por tanto, un ancho de banda mayor.

Ventajas

- **Sincronización:** Debido a que la transición siempre ocurre en el intervalo de duración correspondiente a un bit, el receptor puede sincronizarse en cualquier momento. Por esta cualidad, los códigos Bifase se denominan también, auto-sincronizados.
- **Ausencia de Componente Continua.**
- **Detección de errores:** Puede detectar errores si se detecta una ausencia de transición en mitad del intervalo. Para que el ruido produjera un error no detectado, tendría que invertir la señal antes y después de la transición.

En general, los códigos Bifase se utilizan en transmisión de datos. En particular, el código Manchester se ha elegido como parte de la especificación IEEE 802.3 para la transmisión en redes LAN con bus CSMA/CD con cable coaxial en banda base o par trenzado. La codificación Manchester Diferencial se ha elegido en la especificación IEEE 802.5 para redes LAN en anillo con paso de testigo, con cable par trenzado apantallado.

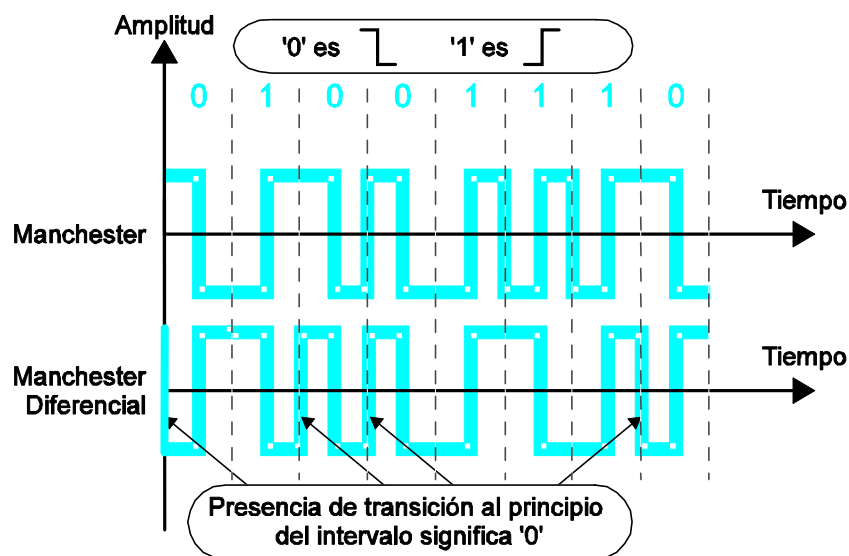


Figura 3-9. Codificación Bifase.

3.3.3. Bipolar

La codificación Bipolar, igual que la RZ, utiliza tres niveles de voltaje: *positivo*, *negativo* y *cero*. Pero aquí el nivel de voltaje cero se utiliza para representar un bit '0'. Los bits '1' se codifican como valores de voltaje positivo y negativo de forma alterna. Si el primer '1' se representa por una amplitud positiva, el segundo se representa con una amplitud negativa, el tercero positiva, etc. Siempre se produce una alternancia entre los valores de amplitud para representar los bits '1', aunque estos bits no sean consecutivos. Hay 3 tipos de codificación Bipolar: *AMI*, *B8Z2*, *HDB3*.

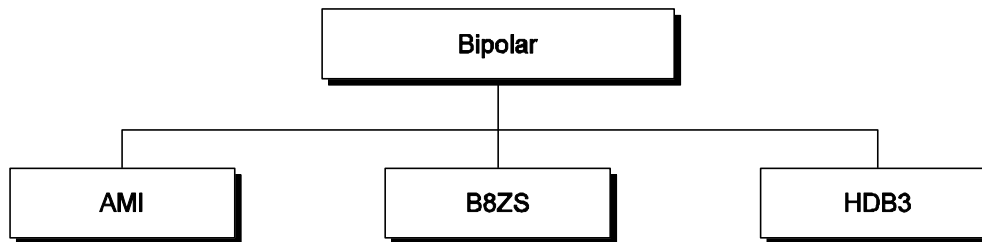


Figura 3-10. Esquema de codificación Bipolar.

3.3.3.1. Bipolar AMI

La codificación Bipolar AMI ("*Alternate Mark Inversion*") es la codificación Bipolar más sencilla. Los bits '1' se codifican alternando las polaridades positivas y negativas, y el bit '0' con cero voltios. Al invertir la polaridad de la señal en cada ocurrencia de un bit '1' se consiguen dos cosas: primero, que la componente continua sea 0, y segundo, permite la sincronización de una secuencia larga de '1'. No obstante, tiene el problema de no asegurar la sincronización de una secuencia larga de '0'. Se han desarrollado dos variantes de la codificación Bipolar AMI para solucionar el problema de la sincronización de secuencias de ceros: *B8ZS* (América del Norte) y *HDB3* (Japón)

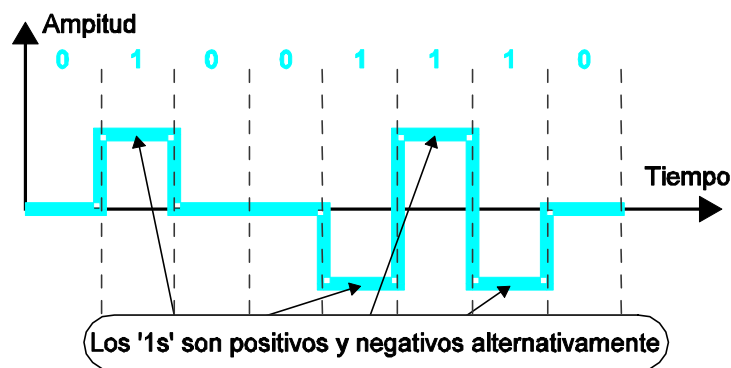


Figura 3-11. Codificación AMI.

3.3.3.2. B8ZS

La codificación bipolar con sustitución de cadenas de 8 ceros (B8ZS: “*Bipolar 8-Zero Substitution*”) se comporta en la mayoría de las situaciones de forma idéntica a la Bipolar AMI. La diferencia entre ambas ocurre cuando se encuentran en la secuencia a codificar 8 o más '0' consecutivos. La solución que proporciona B8ZS es forzar cambios artificiales, llamados **violaciones**, en la señal correspondiente a la cadena de '0'. Cuando aparecen ocho '0' consecutivos, B8ZS introduce cambios en el patrón basados en la polaridad del último bit '1' codificado:

- Polaridad del bit anterior **positiva** \bar{P} los ocho ceros se codifican como: **000+-0-+**
- Polaridad del bit anterior **negativa** \bar{P} los ocho ceros se codifican como: **000-+0+-**

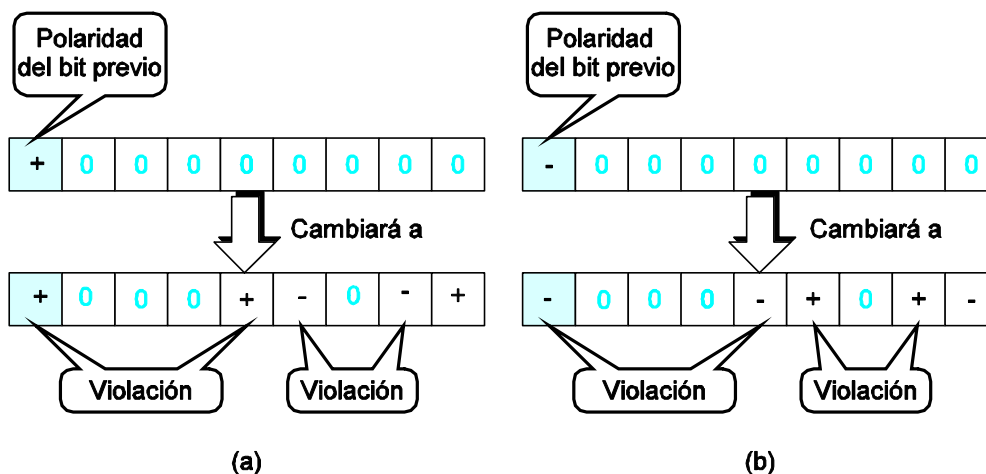


Figura 3-12. Codificación B8ZS.

Con este procedimiento se fuerzan dos violaciones de código del código AMI, lo cual es muy improbable que hay sido causado por el ruido u otras perturbaciones. Recordemos que el receptor está buscando polaridades alternas para identificar '1'. Cuando encuentra dos polaridades iguales a cada lado de una secuencia de tres '0', reconoce que es una violación introducida deliberadamente y no un error. A continuación sigue buscando el segundo par esperado de violaciones, decodifica el octeto de ceros y regresa al modo bipolar AMI normal.

3.3.3.3. HDB3

En Europa y Japón se ha resuelto el problema de sincronización de la codificación Bipolar AMI para una secuencia larga de ceros, con la codificación HDB3 ("High Density Bipolar 3"). Aquí se cambia la polaridad de la señal cada vez que se encuentran cuatro '0' consecutivos, sin necesidad de esperar a los ocho como la codificación B8ZS. En este esquema de codificación, el patrón de violaciones también se basa en la polaridad del bit '1' anterior, pero al contrario que B8ZS, aquí también influye la cantidad de '1' aparecidos desde la última sustitución:

- Si el número de pulsos bipolares (unos) es **impar** desde la última sustitución, HDB3 **P** pone una violación en la polaridad para el **cuarto 0** consecutivo. Entonces:
 - Si la polaridad del último pulso es **positiva P** se pone polaridad **positiva**.
 - Si la polaridad del último pulso es **negativa P** se pone polaridad **negativa**.
- Si el número de pulsos bipolares (unos) es **par** desde la última sustitución, HDB3 **P** pone violaciones en la polaridad del **primer y cuarto 0**. Entonces:
 - Si la polaridad del último pulso es **positiva P** ambas violaciones son **negativas**.
 - Si la polaridad del último pulso es **negativa P** ambas violaciones serán **positivas**.

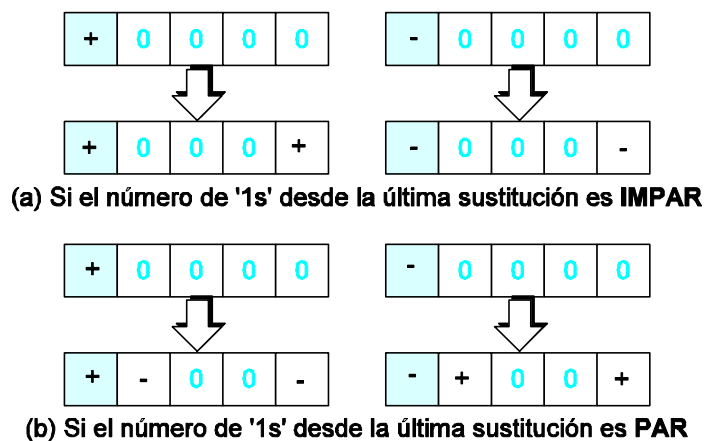
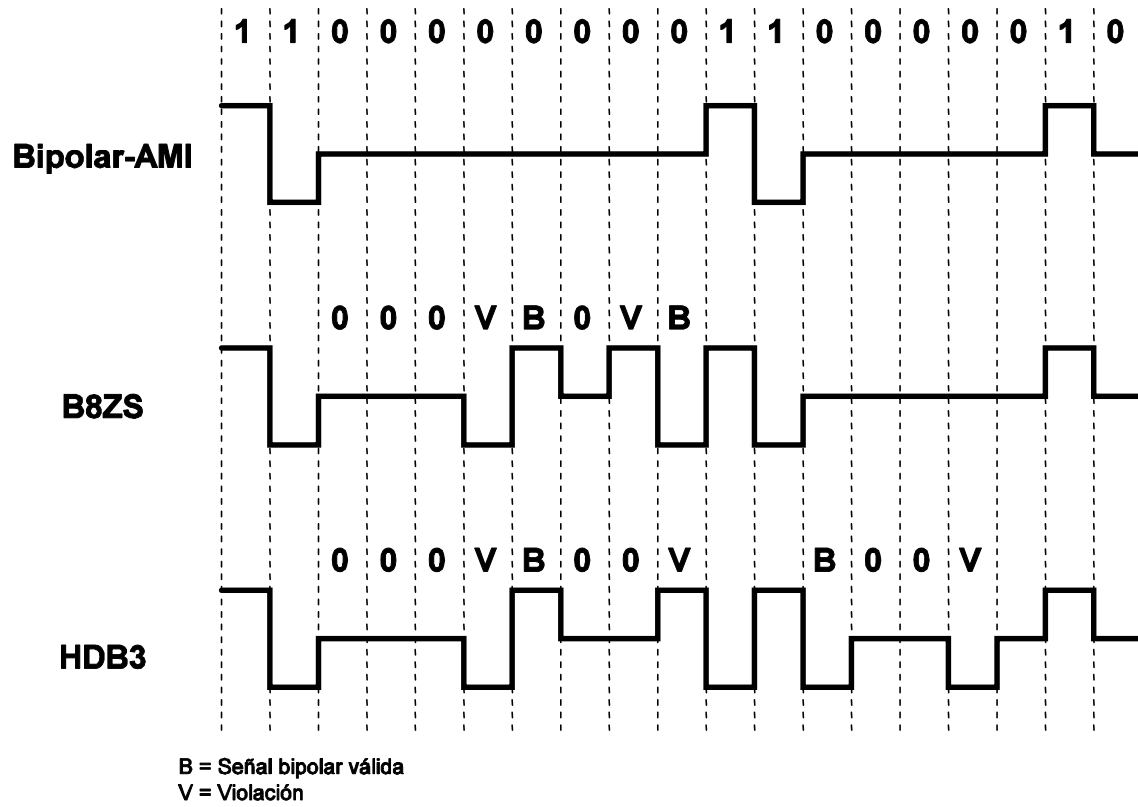


Figura 3-13. Codificación HDB3.

Ejemplo

Codificar la secuencia 11000000011000010 en todos los esquemas de codificación Bipolar que conozcas:

Solución:



3.4. Datos digitales - señales analógicas

Consideremos ahora el caso de la transmisión de datos digitales usando señales analógicas. La situación más conocida es la transmisión de datos digitales a través de la red telefónica conmutada. Esta red se diseñó para recibir, conmutar y transmitir señales analógicas en el rango de frecuencias de voz 300-3.400 Hz. No es, por tanto, adecuada para la transmisión de señales digitales desde el terminal del abonado, para ello es necesario el uso del módem que convierten los datos digitales en analógicos y viceversa. (Figura 3-14).

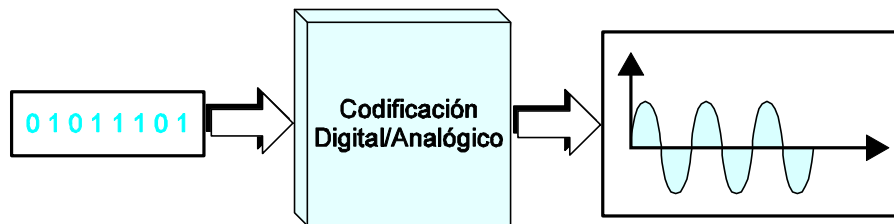


Figura 3-14. Codificación Digital/Analógica.

En esta sección se presentan tres técnicas básicas de modulación, una por parámetro característico: *Modulación en amplitud (ASK)*, *modulación en frecuencia (FSK)*, *modulación en fase (PSK)* y *modulación QAM*.

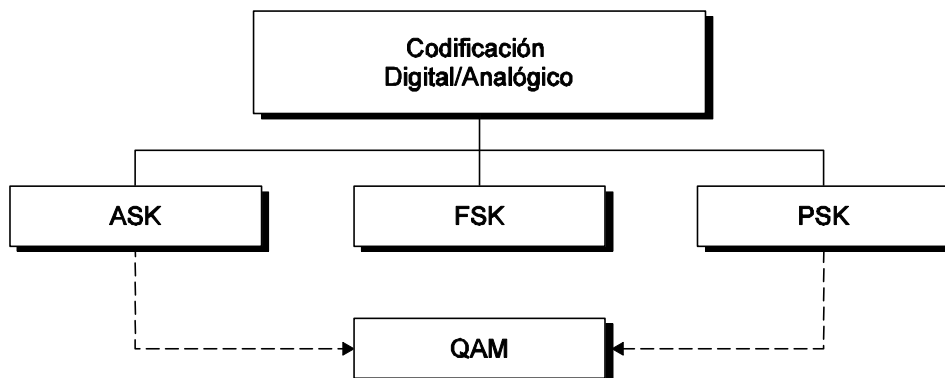


Figura 3-15. Codificación Digital/Analógica.

3.4.1. Modulación de Amplitud (ASK)

En la modulación por desplazamiento de la amplitud ASK (“*Amplitudes-Shift Keying*”), los dos valores binarios (‘0’ y ‘1’) se representan por dos amplitudes diferentes en la señal portadora. Normalmente una de las amplitudes es 0, es decir, uno de los dígitos binarios se representa por la presencia de la portadora (con Amplitud constante), y el otro dígito por ausencia de la portadora. La señal resultante es:

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2 \Pi f_c t) & 1 \text{ binario} \\ 0 & 0 \text{ binario} \end{cases}$$

En la *Figura 3-16* podemos ver el resultado de codificación por Modulación de la Amplitud ASK. Se utiliza únicamente en líneas telefónicas a baja velocidad y en transmisión de datos digitales en fibra óptica, un elemento de señal se representa con presencia de luz, y el otro con ausencia de luz. Recordemos que el ancho de banda de una señal es el total de frecuencias de dicha señal. Haciendo la descomposición en el dominio de frecuencias, una señal modulada estará formada por infinitas componentes de frecuencia, centradas en torno a la frecuencia de la portadora f_c .

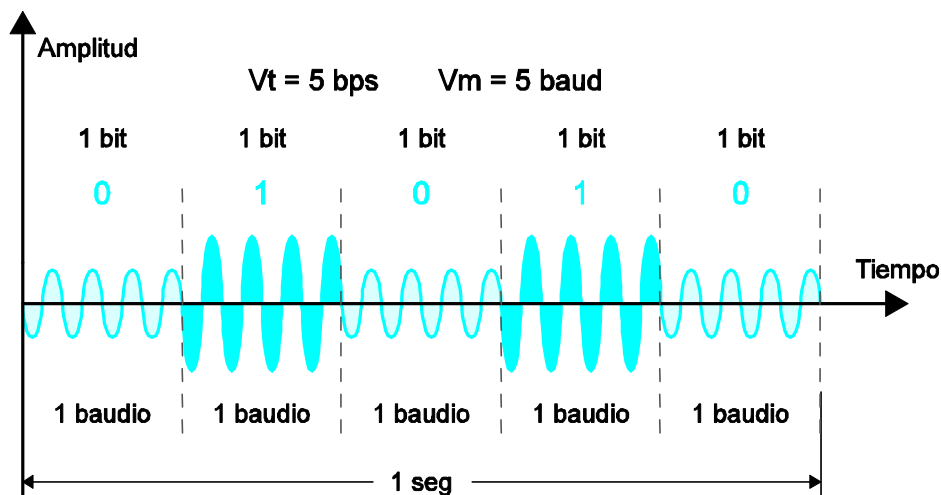


Figura 3-16. Codificación ASK.

Por simplificación, utilizaremos la frecuencia portadora f_c , y el conjunto de frecuencias a ambos lados de la misma (Figura 3-17). Por tanto, el ancho de banda (BW, "Bandwidth") de una señal modulada ASK responde a la expresión:

$$BW = (1 + d)V_m$$

Donde:

BW : ancho de banda

d : factor de línea (en condiciones ideales = 0)

V_m = velocidad de Modulación (baudios)

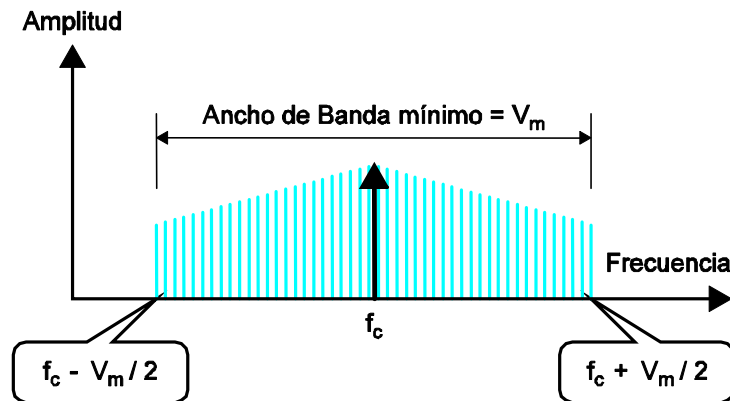


Figura 3-17. Relación entre Velocidad de modulación y ancho de banda en codificación ASK.

Ejemplo

Dado un ancho de banda $BW=10000$ Hz. En el rango de 1000 a 11000 Hz, representar el diagrama de modulación para una señal modulada ASK en modo full-duplex. Representar las frecuencias portadoras en cada dirección, asumiendo que no existen saltos entre las bandas de ambas direcciones.

SOLUCIÓN:

Como se trata de transmisión ASK en modo full-duplex. El ancho de banda en cada dirección será:

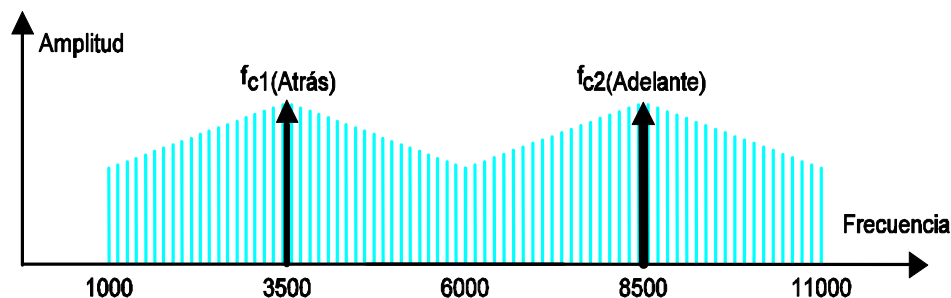
$$BW = \frac{10000}{2} = 5000 \text{ Hz}$$

Elegimos cada f_c (una en cada sentido de transmisión) en medio de cada banda, para que no hayan saltos de frecuencias, entonces:

$$f_{c1} = 1000 + 5000/2 = 3500 \text{ Hz}$$

$$f_{c2} = 11000 - 5000/2 = 8500 \text{ Hz}$$

Gráficamente:



3.4.2. Modulación de Frecuencia (FSK)

En la modulación por desplazamiento de la frecuencia FSK (*"Frequency-Shift Keying"*), (Figura 3-18), los dos valores binarios se representan mediante dos frecuencias diferentes próximas a la frecuencia de la señal portadora, con lo que la señal modulada queda de la siguiente forma:

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t) & 1 \text{ binario} \\ A \cos(2\pi f_2 t) & 0 \text{ binario} \end{cases}$$

Donde f_1 y f_2 son desplazamientos de igual magnitud pero de sentidos opuestos de la frecuencia de la portadora.

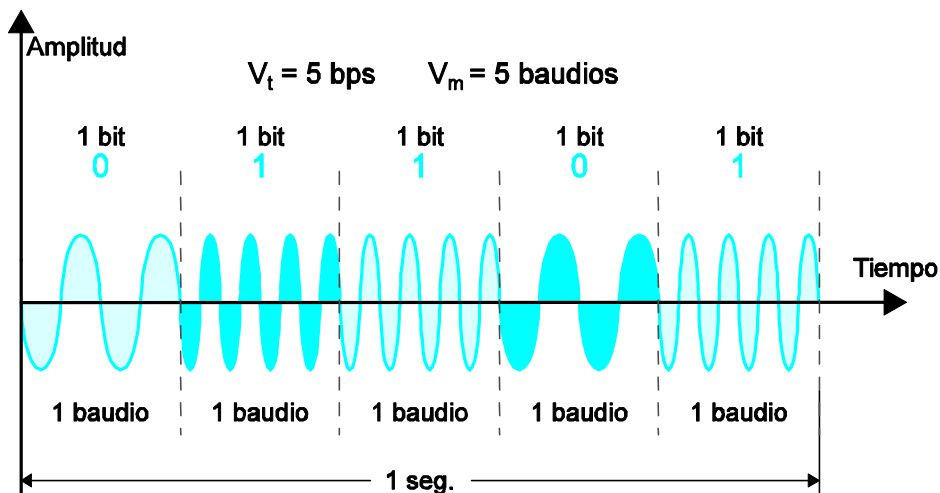


Figura 3-18. Codificación FSK.

La modulación FSK consiste en el desplazamiento de la señal entre dos frecuencias distintas, por tanto, el espectro de una señal en modulación FSK es la combinación de dos señales ASK centradas en las frecuencias portadoras f_{c0} y f_{c1} (Figura 3-19). Por tanto, el ancho de banda necesario para una transmisión FSK es la Velocidad de Modulación más el desplazamiento en frecuencias (diferencia entre las diferentes frecuencias).

$$BW = V_m + (f_{c1} - f_{c0})$$

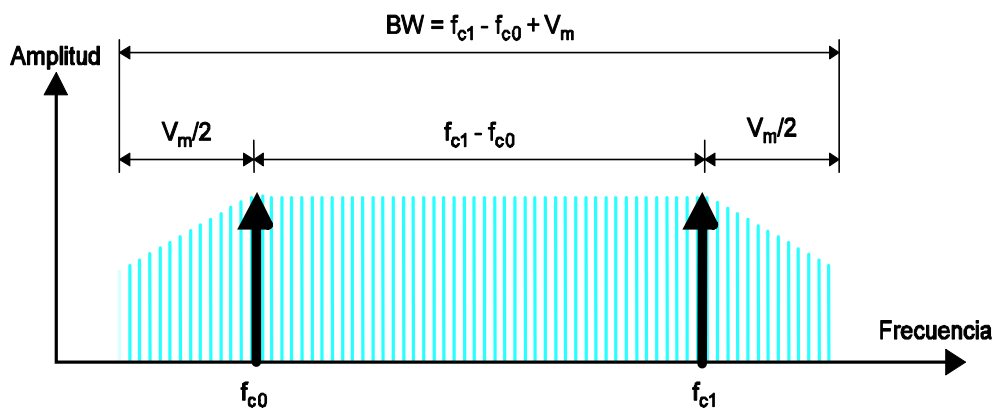


Figura 3-19. Relación entre Velocidad de modulación y ancho de banda en Codificación FSK.

Ejemplo

Calcular el ancho de banda BW para una determinada señal FSK a 2000 bps, en modo half-duplex y con un desplazamiento de portadoras de 3000 Hz.

Solución:

Sean f_{c0} y f_{c1} las frecuencias portadoras

Como el ancho de banda es:

$$BW = V_m + (f_{c1} - f_{c0})$$

Y como la Velocidad de Modulación es igual a la Velocidad de Transferencia, entonces

$$BW = 2000 + 3000 = 5000 \text{ Hz}$$

Ejemplo

Calcular la velocidad de transferencia para una señal FSK, si el ancho de banda es de 12000 Hz, un desplazamiento de portadoras de 2000 Hz y modo full-duplex.

Solución:

Por ser transmisión full-duplex, tendremos 6000 Hz en cada dirección

Sean f_{c0} y f_{c1} las frecuencias portadoras.

Como el ancho de banda es:

$$\left. \begin{array}{l} BW = 2000 + 3000 = 5000 \text{ Hz} \\ V_m = BW - (f_{c1} - f_{c0}) \end{array} \right\} \Rightarrow V_m = 6000 - 2000 = 4000 \text{ Hz}$$

Y como la $V_m = V_t$, entonces:

$$V_t = 4000 \text{ bps}$$

En la *Figura 3-20* se muestra un ejemplo del uso de FSK en una transmisión full-duplex en una línea de calidad telefónica. La figura representa el funcionamiento de la serie de módems *Bell System 108*. Sabemos que la línea telefónica soporta frecuencias en el rango 300-3400 Hz, y al ser transmisión full-duplex se transmite en ambos sentidos de forma simultánea, por lo que debe de repartirse la banda de frecuencias para los dos sentidos.. Así, el reparto se hace en torno a los 1700 Hz, estando centrado un sentido en 1170 Hz y el otro en 2125 Hz, desplazándose ambos 100 Hz a cada lado. Se puede observar el efecto de esta transmisión simultánea en ambos sentidos, donde cada zona sombreada corresponde a un sentido de la comunicación. Podemos observar como existe un pequeño solapamiento de ambas zonas, es decir, se produce cierta interferencia entre ellas.

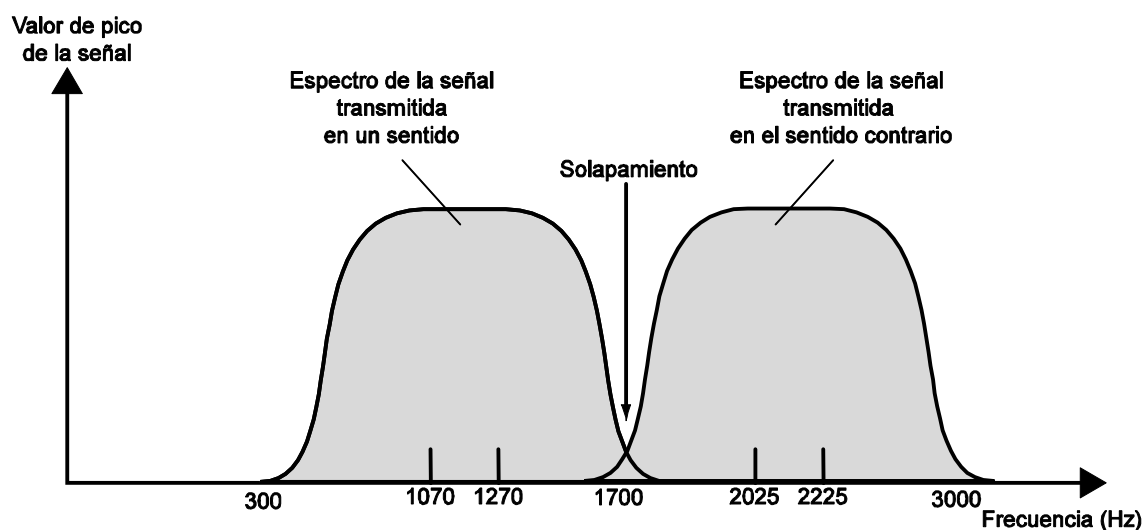


Figura 3-20. Transmisión "full-duplex" en una línea de calidad telefónica.

FSK es menos sensible a errores que ASK, por lo que en líneas de calidad telefónica se utiliza típicamente a velocidades de hasta 1200 bps. También se usa frecuentemente en transmisión de radio a más altas frecuencias (3-20 MHz). También se puede usar a frecuencias superiores en LAN con cable coaxial.

3.4.3.Modulación de Fase (PSK)

En la modulación por desplazamiento de fase (PSK, “Phase-Shift Keying”) (Figura 3-21), la fase la señal portadora se traslada para representar la información. En este sistema, un ‘0’ binario se representa enviando una señal de la misma fase que la señal enviada anteriormente. El valor ‘1’ binario se representa enviando una señal de fase opuesta a la enviada previamente. Esta técnica se denomina PSK diferencial, puesto que la fase se traslada con referencia al bit transmitido previamente, así que la señal resultante queda:

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2 \Pi f_c t + \Pi) & 1 \text{ binario} \\ A \cos(2 \Pi f_c t) & 0 \text{ binario} \end{cases}$$

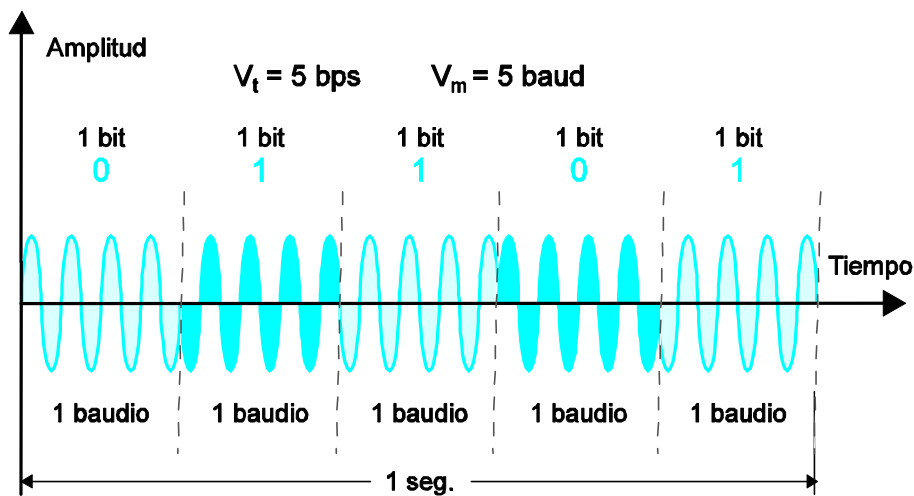


Figura 3-21. Codificación PSK.

El método anterior se denomina 2-PSK, o PSK binario, porque utiliza dos fases diferentes (0 y 180 grados) para la codificación. En la Figura 3-22 se muestra la relación entre el valor de fase de la señal y el valor de bit, así como la representación en el dominio del tiempo. Hemos utilizado dos variaciones de fase, cada una de las fases representa un bit.

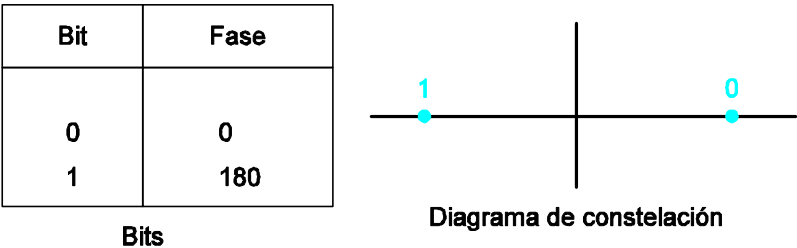


Figura 3-22. Constelación PSK.

De la misma forma, podemos utilizar cuatro variaciones de fase, y en cada una de las fases podemos representar dos bits (*Figura 3-23*). Ésta técnica se denomina 4-PSK o Q-PSK. El par de bits representados por cada fase se denomina **dibit**.

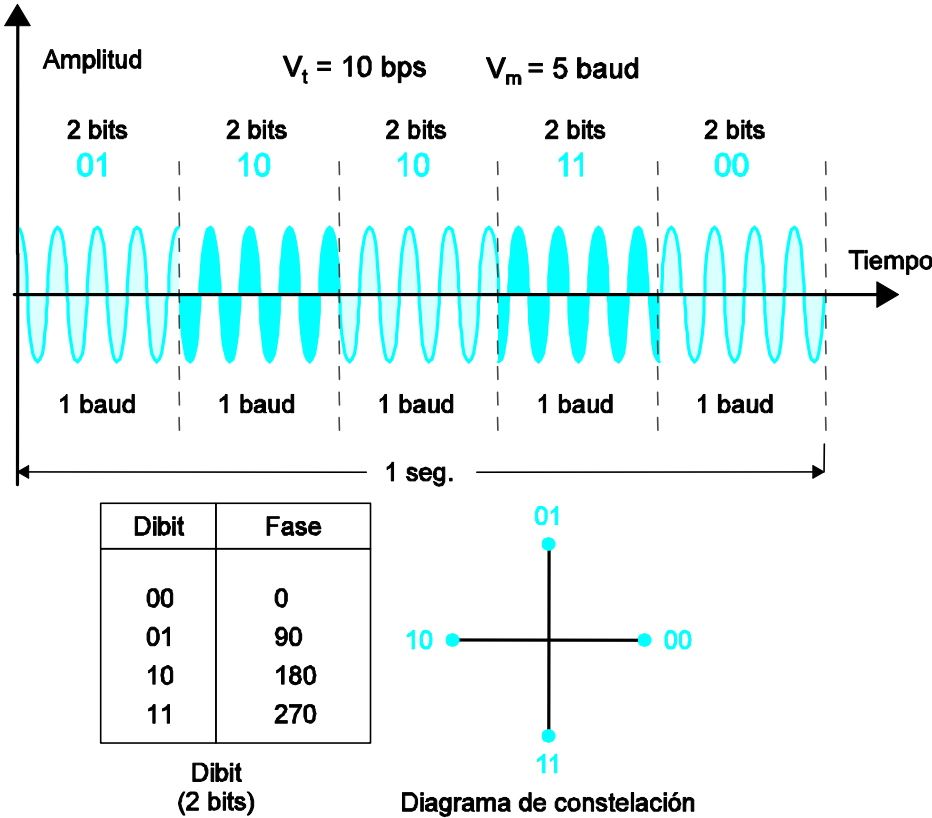


Figura 3-23. Codificación 4-PSK.

Se puede extender la idea a 8-PSK. En este caso, varía la señal en desplazamientos de 45° . Por lo tanto, con 8 posibles estados y en cada uno de ellos podemos representar 3 bits (tribit) ($2^3=8$) (*Figura 3-24*).

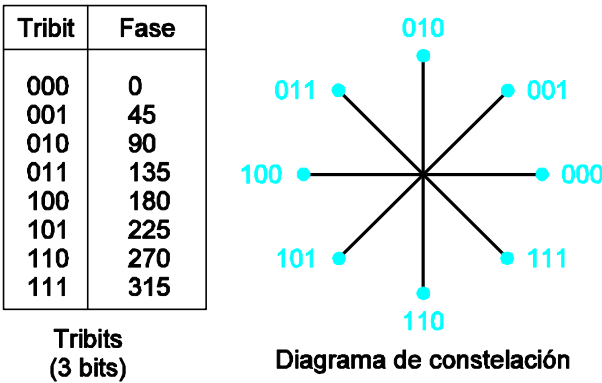


Figura 3-24. 8-PSK.

Los requisitos de ancho de banda para la transmisión PSK son los mismos que para la transmisión ASK. Sin embargo, ya hemos visto que la Velocidad de Transmisión en modulación PSK son mucho más elevadas que utilizando técnicas de modulación ASK.

Por tanto, tenemos que la Velocidad de Modulación es la misma tanto en modulación ASK como en Modulación PSK, y la Velocidad de Transmisión se multiplica por dos, tres, etc., utilizando la misma Velocidad de Modulación.

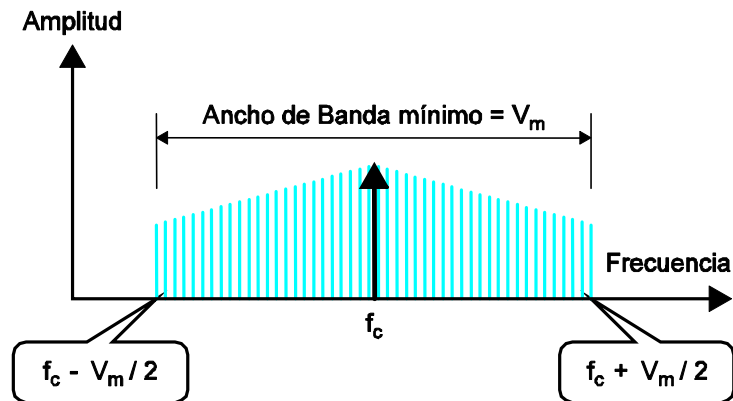


Figura 3-25. Relación entre Velocidad de modulación y ancho de banda en codificación ASK.

Ejemplo

Calcular el ancho de banda para una señal 4-PSK transmitiendo a 2000 bps en modo half-duplex.

Solución:

En transmisión 4-PSK, tenemos que:

$$V_t = 2V_m$$

Luego:

$$V_m = \frac{1}{2}V_t = \frac{1}{2}2000 = 1000 \text{ baudios}$$

El ancho de banda para transmisión PSK es igual a la velocidad de modulación, por lo tanto:

$$BW = 1000 \text{ Hz}$$

Ejemplo

Calcular la V_m y la V_t de una señal 8-PSK de ancho de banda de 5000 Hz

Solución:

Para transmisión PSK, la Velocidad de Modulación es igual al ancho de banda, luego:

$$\left. \begin{array}{l} V_m = 5000 \text{ baudios} \\ V_t = 3V_m \end{array} \right\} \Rightarrow V_t = 3V_m = 3 * 5000 = 15000 \text{ bps}$$

3.4.4. Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

El esquema de modulación QAM combina la modulaciones en amplitud ASK y fase PSK, de forma que se obtenga el máximo contraste entre cada bit, dibit, tribit, etc. Consiste en variar los cambios en fase y amplitud simultaneamente, de forma que si tenemos a variaciones en amplitud y β variaciones en fase, obtendremos $a \cdot \beta$ posibles variaciones de señal. En la *Figura 3-26* se muestra el diagrama para 4-QAM (1 amplitud \times 4 fases) y 8-QAM (2 amplitud \times 4 fases). Y su representación temporal la podemos observar en la *Figura 3-27*.

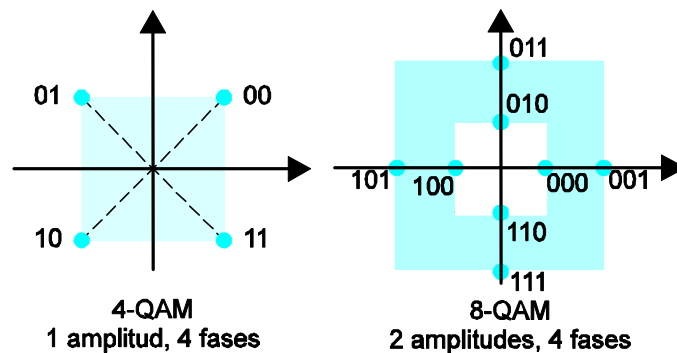


Figura 3-26. Constelaciones 4-QAM y 8-QAM.

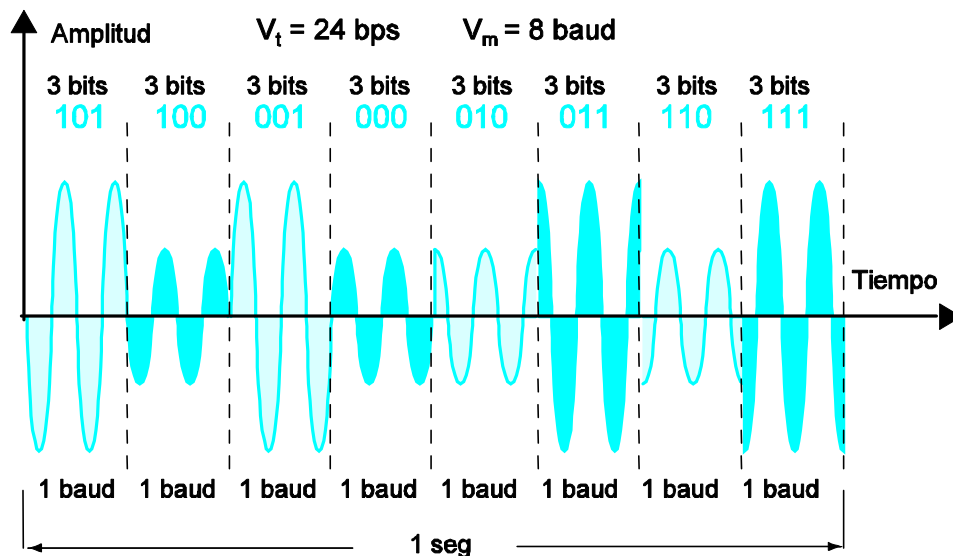


Figura 3-27. Codificación 8-QAM.

En la *Figura 3-28* se muestran varias configuraciones 16-QAM, utilizadas en modems comerciales y en recomendaciones de ISO.

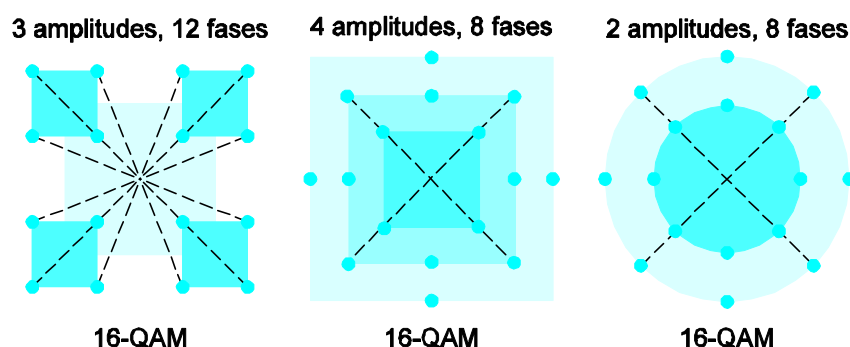


Figura 3-28. Constelaciones 16-QAM.

En el esquema de la *Figura 3-29* se puede comparar la diferencia entre la velocidad de transmisión (V_t) (*bps*) y la velocidad de modulación (V_m) (*baudios*). Si asumimos en este esquema que las posibles combinaciones de amplitud y fase nos dan 16 representaciones distintas, podremos codificar 4 bits de información en cada señal elemental que transmita el módem. Si la velocidad de transmisión es de 9600 *bps*, la velocidad de modulación se puede ver como el nº de bits que se transmiten por unidad de tiempo, dividido por el número de bits que se envían en cada señal elemental. En nuestro ejemplo, la velocidad de modulación será:

$$V_m = \frac{9600 \text{ bits/seg}}{4 \text{ bits/señal}} = 2400 \text{ señales / seg} = 2400 \text{ baudios}$$

Esta es la razón por la que se pueden conseguir velocidades de bits más altas sobre líneas de voz usando esquemas de modulación más complejos.

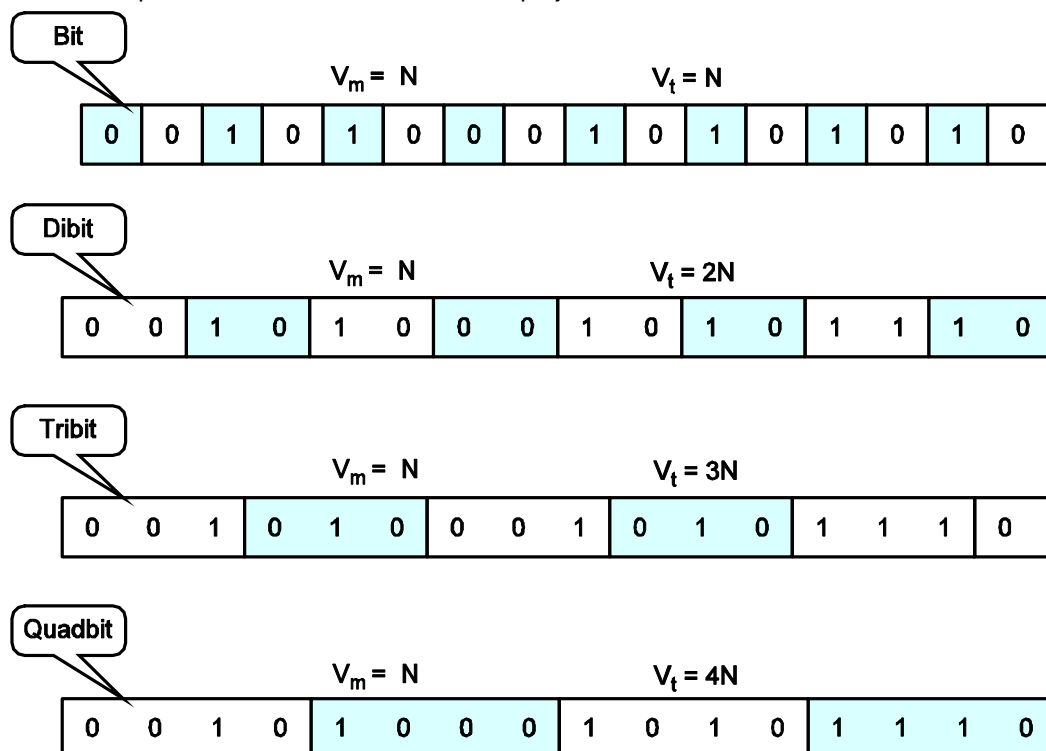


Figura 3-29. Relación entre V_m y V_t en transmisión multinivel.

3.5. Datos analógicos – Señales digitales

En este apartado examinamos el proceso de conversión de datos analógicos en señales digitales. Estrictamente hablando, deberíamos referirnos a este proceso como una conversión de datos analógicos en datos digitales, este proceso se conoce como **digitalización** (Figura 3-30).

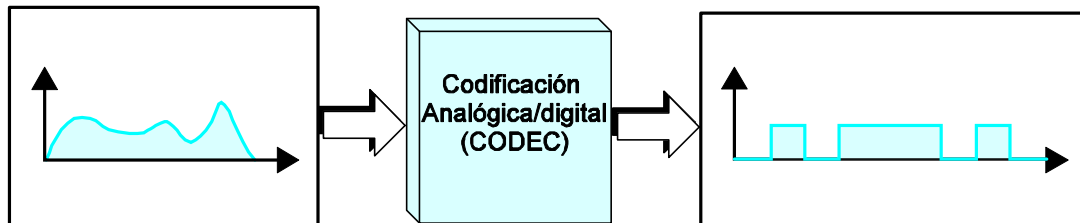


Figura 3-30. Codificación analógico/digital.

Una vez realizado el proceso de digitalización, pueden ocurrir los siguientes casos_

- Los datos digitales pueden transmitirse usando NRZ-L. En este caso, se ha realizado directamente una conversión de datos analógicos a señales digitales.
- Los datos digitales se codifican usando un código diferente al NRZ-L. Por tanto, se necesita un paso adicional.
- Los datos digitales se convierten en señales analógicas, usando una de las técnicas de modulación presentadas en apartados anteriores.

Este último procedimiento se muestra en la Figura 3-31; los datos de voz que digitalizan y posteriormente se convierten en señales analógicas tipo ASK. Los datos de voz, al haber sido digitalizados, se pueden tratar como si fueran digitales, incluso cuando los requisitos de transmisión (por ejemplo la utilización de microondas) fueren la utilización de señales analógicas.

El dispositivo que se utiliza para la conversión de los datos analógicos en digitales y posteriormente recupera los datos analógicos iniciales de los digitales se denomina CODEC (codificador-decodificador). En este apartado estudiaremos las dos técnicas más importantes que se usan en los CODECS: **Modulación por impulsos codificados**, **Modulación por impulsos de amplitud** y **Modulación delta**.

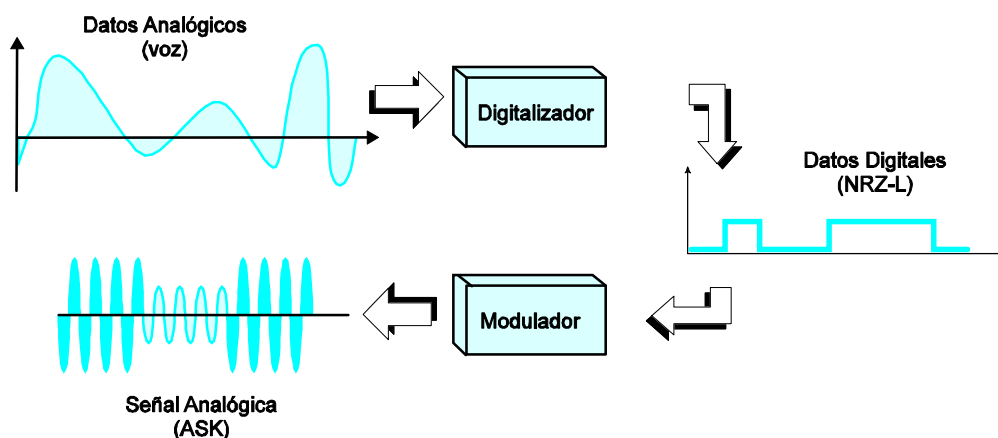


Figura 3-31. Digitalización y Modulación.

3.5.1. Modulación por impulsos codificados PCM

La Modulación por impulsos codificados (PCM, “Pulse Code Modulation”) está basada en el teorema del muestreo que dice:

“Si una señal $f(t)$ se muestrea a intervalos regulares de tiempo con una frecuencia mayor que le doble de la frecuencia significativa más alta de la señal, entonces las muestras así obtenidas contienen toda la información de la señal original. La función $f(t)$ puede reconstruirse a partir de esas muestras mediante la utilización de un filtro paso-bajo”.

Por ejemplo, si la voz está limitada a frecuencias menores de 4000 Hz, realizando un muestreo de 8000 muestras/seg, obtendríamos las características completas de una señal de voz.

Supongamos que la señal original está limitada a un ancho de banda B . Las muestras las tomamos a una velocidad $2B$, es decir, una muestra cada $1/2B$ segundos. Estas muestras se representan como pulsos estrechos cuya amplitud es proporcional al valor de la señal original. Este proceso se denomina **Modulación por pulsos de amplitud** (PAM, “Pulse Amplitude Modulation”), y es el primer paso en la modulación PCM (Figura 3-32).

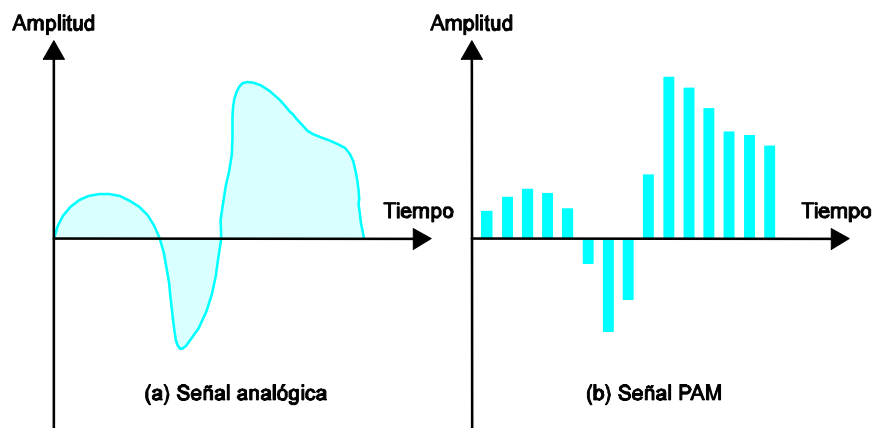


Figura 3-32. Modulación PAM.

Una vez construido el **diagrama de pulsos PAM**, se realiza el proceso de **cuantización** de las muestras PAM, que consiste en la aproximación de dichas muestras a un valor entero, dentro de un determinado rango de valores enteros (Figura 3-33 (a)). Posteriormente, se realiza una conversión a binario de los valores enteros de las muestras (Figura 3-33 (b)).

El proceso de transmisión continuará enviando los bloques de n bits que proporcionan las amplitudes de los pulsos PCM (Figura 3-33 (c)). En el dispositivo receptor, este proceso se realiza el proceso inverso, obteniendo una señal analógica. En la restauración de la señal se produce el denominado **ruido de cuantización**, debido a que al redondear el valor de un pulso PAM al entero más cercano, la señal original se ha convertido a valores aproximados, y no puede recuperarse exactamente.

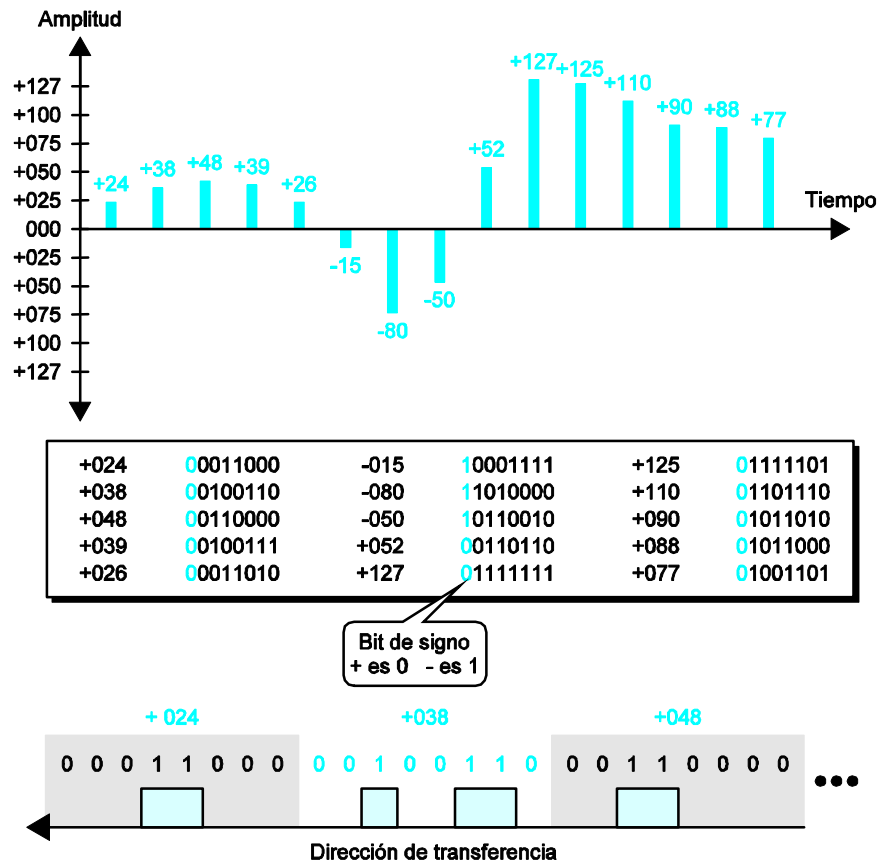


Figura 3-33. (a) Señal cuantizada PAM. (b) Magnitudes y signos de señales cuantizadas. (c) PCM.

En la *Figura 3-34* podemos observar el proceso completo de la codificación PCM, desde la señal analógica, hasta la codificación digital.

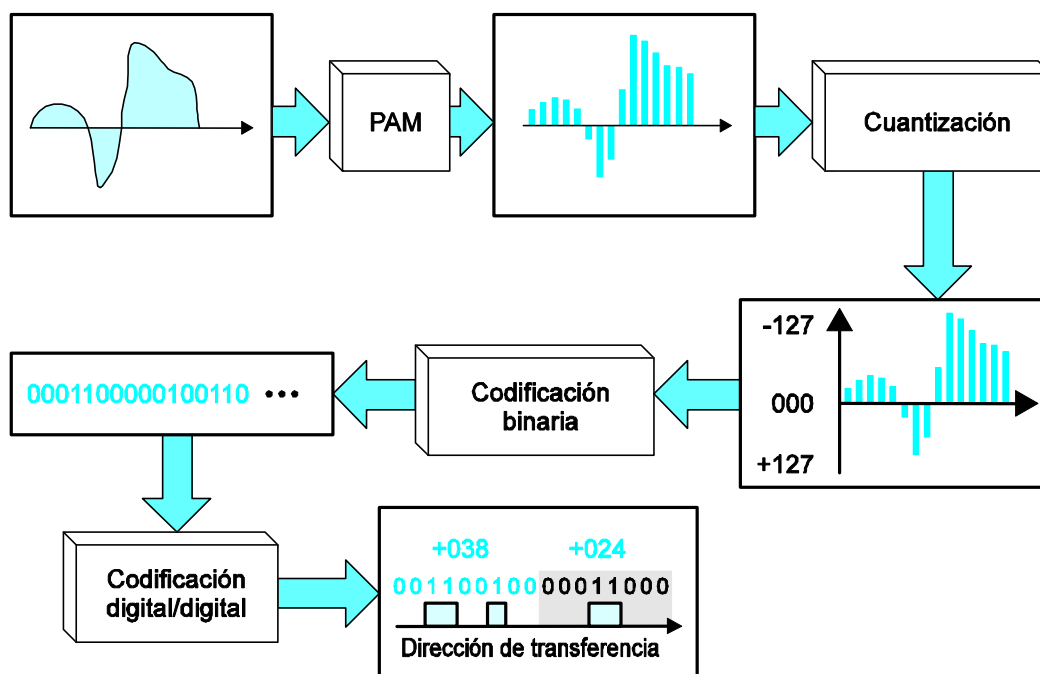


Figura 3-34. Codificación digital PCM de una señal analógica.

3.5.2. Modulación Delta

Para mejorar las prestaciones de la codificación PCM, o para reducir su complejidad, se han desarrollado un gran número de técnicas. Una de las alternativas de mayor uso es la modulación delta (DM, “Delta Modulation”).

En la modulación delta, la entrada analógica se aproxima mediante una función escalera que en cada intervalo de muestreo (T_s) sube o baja un nivel de cuantización (d). En la *Figura 3-35* se muestra un ejemplo, en el que la función escalera está superpuesta a la señal original. La característica principal de la función escalera es que su comportamiento es binario: en cada instante de muestreo la función sube o baja una cantidad constante d . Por tanto, la salida del modulador delta se puede representar mediante un único bit para cada muestra. En esencia se genera una cadena de bits aproximando la derivada en lugar de la amplitud de la señal analógica de entrada; se genera un '1' si la función escalera sube en el siguiente intervalo, o un '0' en cualquier otro caso.

Hay dos parámetros importantes en el esquema DM; el **tamaño del cuanto** asignado a cada dígito binario, d , y la **frecuencia de muestra**. Se debe elegir d para conseguir un compromiso entre los tipos de error o ruido (ruido de sobrecarga y ruido de cuantización). (*Figura 3-35*).

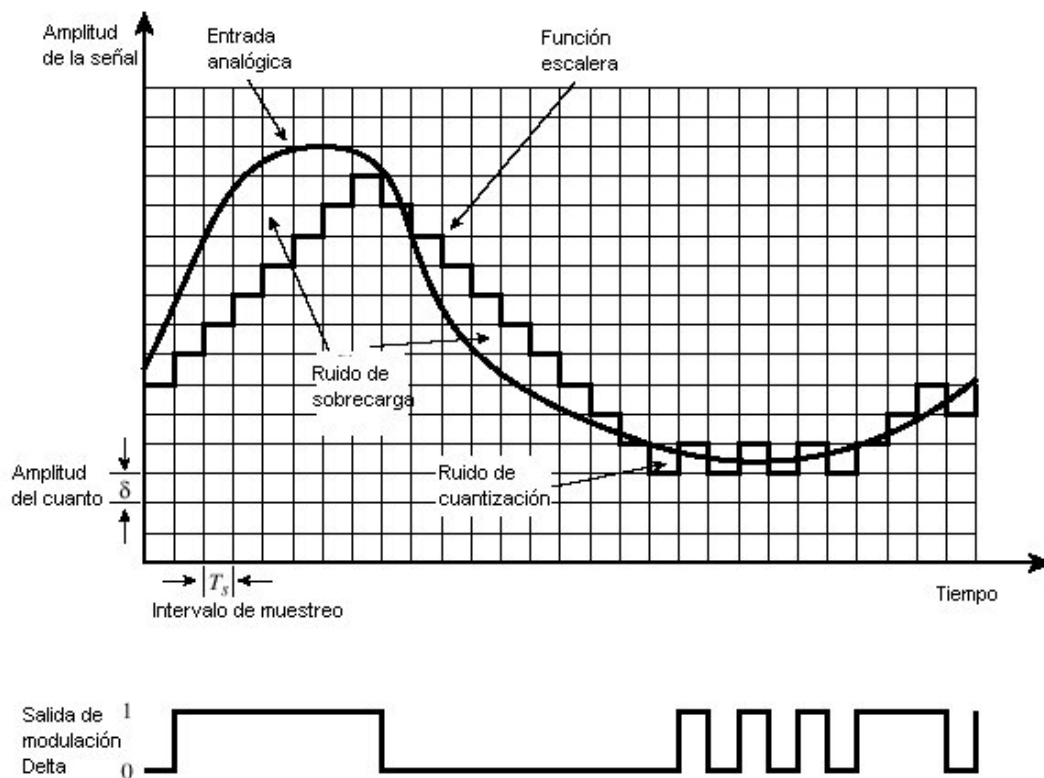


Figura 3-35. Ejemplo de Modulación Delta.

3.6. Datos analógicos – señales analógicas

La modulación la hemos definido como el proceso de combinar una señal de entrada $m(t)$ y una señal portadora f_c para producir una señal $s(t)$ cuyo ancho de banda esté, normalmente, centrado en torno a f_c . Para el caso de datos digitales, la razón de modular es evidente: convertir los datos digitales en analógicos cuando sólo existe la posibilidad de transmisión analógica. El motivo cuando los datos son analógicos es menos evidente, pero hay dos razones fundamentales: Para llevar a cabo una transmisión más efectiva puede ser que se necesite una frecuencia mayor. Para las transmisiones sobre medios no guiados es virtualmente imposible realizarlas con señales de banda-base, ya que se necesitarían antenas de muchos kilómetros de diámetro. La modulación permite el multiplexado por división de frecuencia, consiguiéndose transmitir más cantidad de información.

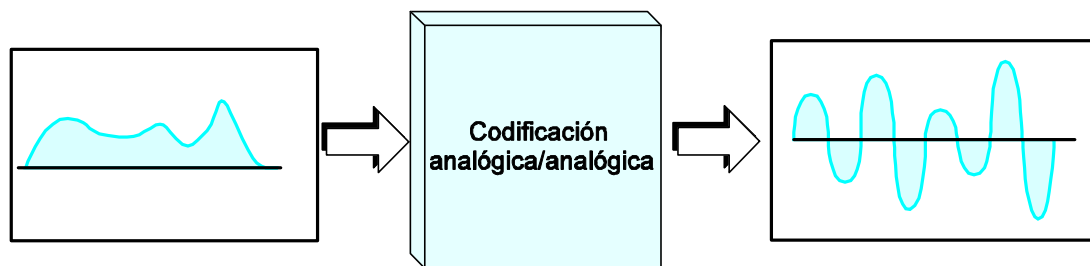


Figura 3-36. Codificación analógica/analógica.

Existen tres esquemas principales de modulación: **modulación en amplitud (AM)**, **modulación en frecuencia (FM)** y **modulación en fase (PM)**.

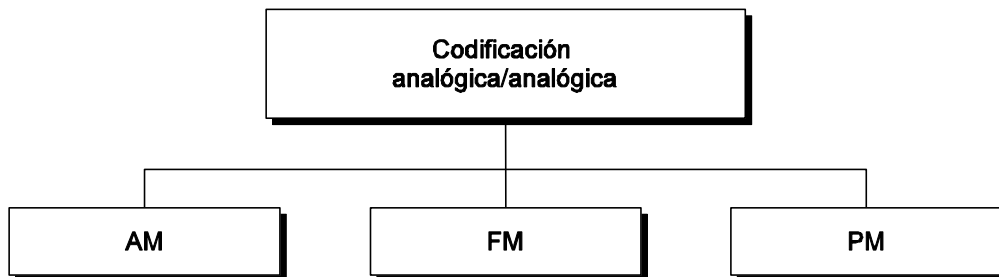


Figura 3-37. Codificación analógica/analógica.

3.6.1. Modulación en Amplitud (AM)

La modulación en amplitud AM (*"Amplitude Modulation"*) es la modulación más sencilla (Figura 3-38). Matemáticamente el proceso se puede expresar como:

$$s(t) = [1 + n_a x(t)] \cos 2\pi f_c t$$

Donde $2\pi f_c t$ es la portadora y $x(t)$ es la señal de entrada, ambas normalizadas a la amplitud unidad. El parámetro n_a , denominado Índice de modulación.

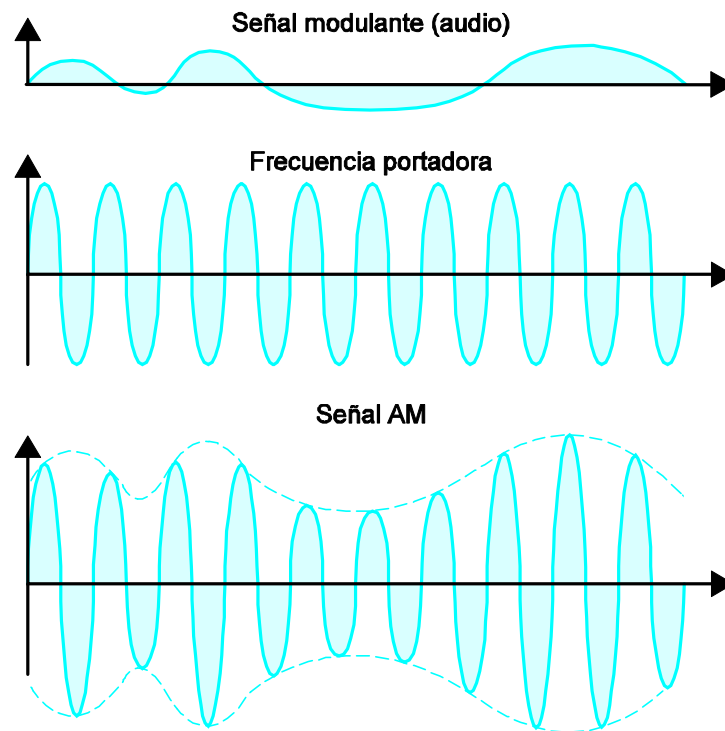


Figura 3-38. Modulación AM.

3.6.2. Modulación en Frecuencias (FM)

("Frequency Modulation"): la señal modulada se expresa como:

$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \Phi(t)]$$

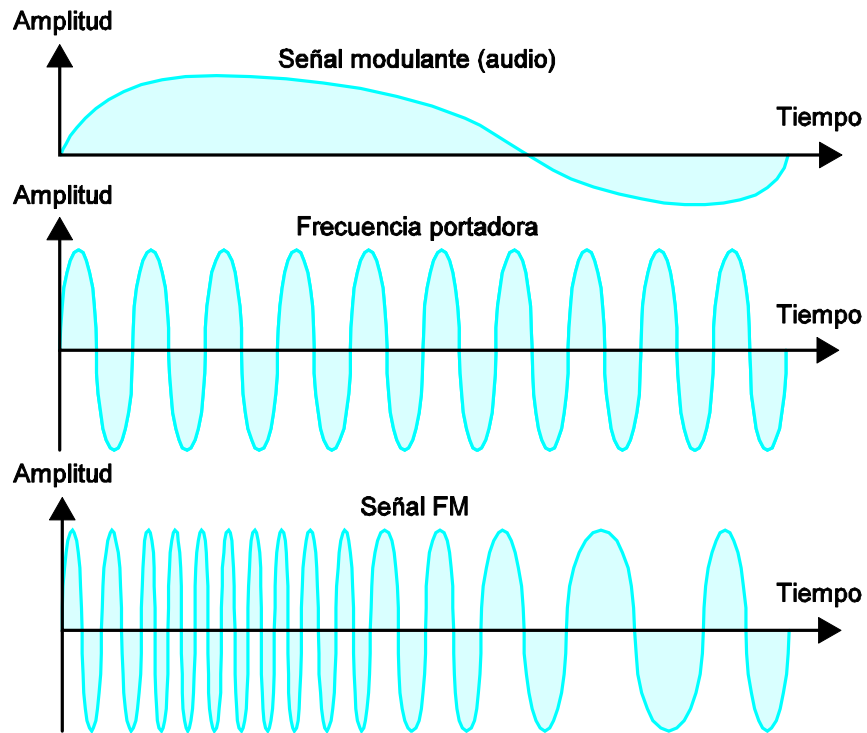


Figura 3-39. Modulación FM.

3.6.3. Modulación en Fase (PM)

("Phase Modulation"): la fase es proporcional a la señal moduladora:

$$\Phi(t) = n_p m(t)$$

3.7. Espectro Expandido

Un esquema de transmisión cada vez más popular es la denominada de **espectro expandido** ("Spread Spectrum"). En realidad no se puede encuadrar con propiedad en ninguna de las técnicas estudiadas hasta ahora en este capítulo, ya que se puede usar para transmitir tanto señales analógicas como digitales, mediante la utilización de una señal analógica. Se está utilizando en la actualidad en diversos desarrollos de redes de datos inalámbricas, además de otras aplicaciones de teléfonos inalámbricos. La idea básica consiste en expandir la información de la señal sobre un ancho de banda mayor para con ello dificultar las interferencias y su interceptación.

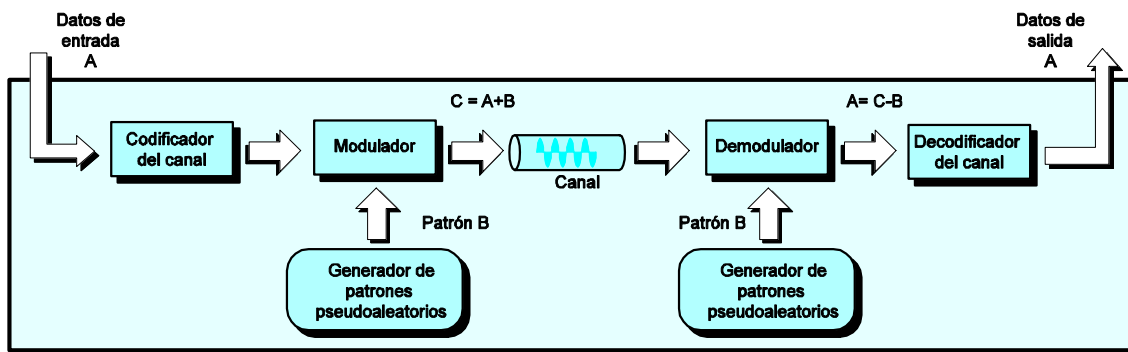


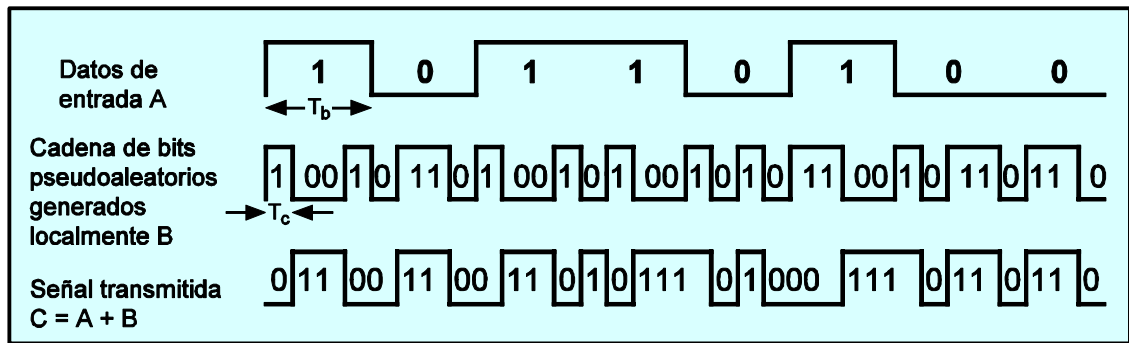
Figura 3-40. Modelo general para un sistema de comunicación digital con espectro expandido.

En la Figura 3-40 se muestra el diagrama de bloques de un esquema de un sistema de espectro expandido. El codificador produce una señal analógica a partir de los datos de entrada con un ancho de banda relativamente estrecho en torno a su frecuencia central. Esta señal se modula posteriormente utilizando una secuencia de dígitos pseudoaleatoria. Con esta modulación lo que se pretende es aumentar drásticamente el ancho de banda (espectro expandido) de la señal a transmitir. En el receptor se utiliza la misma secuencia de dígitos pseudoaleatoria para demodular la señal de espectro expandido. Por último, la señal demodulada se decodifica para recuperar los datos originales. Las dos variantes existentes del espectro expandido son el **salto de frecuencias** y **secuencia directa**.

- **Espectro expandido por salto de frecuencias:** la señal se emite sobre una serie de radio-frecuencias aparentemente aleatorias, saltando de frecuencia en frecuencia por cada fracción de segundo transcurrida. El receptor captará el mensaje saltando de frecuencia en frecuencia sincronamente con el transmisor. Los receptores no autorizados escucharán una señal ininteligible. Se utiliza en sistemas de espionaje y comunicaciones militares.
- **Espectro expandido por secuencia directa:** cada bit de la señal original se representa mediante varios bits de la señal transmitida; a este procedimiento se le denomina **código de compartición**. Este código expande la señal a una banda de frecuencias mayor, directamente proporcional al número de bits que se usen. Por tanto, un código de compartición de 10 bits expande la señal a una banda de frecuencias 10 veces mayor que un código de compartición de 1 bit.

Espectro expandido por secuencia directa consiste en combinar la cadena de dígitos con la cadena de bits pseudoaleatorios utilizando la función OR-exclusiva. En la *Figura 3-41* se muestra un ejemplo con un código de compartición de 4 bits. Obsérvese que el bit '1' de información invierte los bits pseudoaleatorios, mientras que un bit '0' hace que los bits pseudoaleatorios se transmitan sin ser invertidos. La cadena resultante de bits tiene la misma velocidad de transmisión que la secuencia original pseudoaleatorios, por tanto, tiene un ancho de banda mayor que la cadena de información. En el ejemplo, la cadena de bits pseudoaleatorios tiene una frecuencia de reloj cuatro veces la frecuencia de los bits de información.

Emisor



Receptor

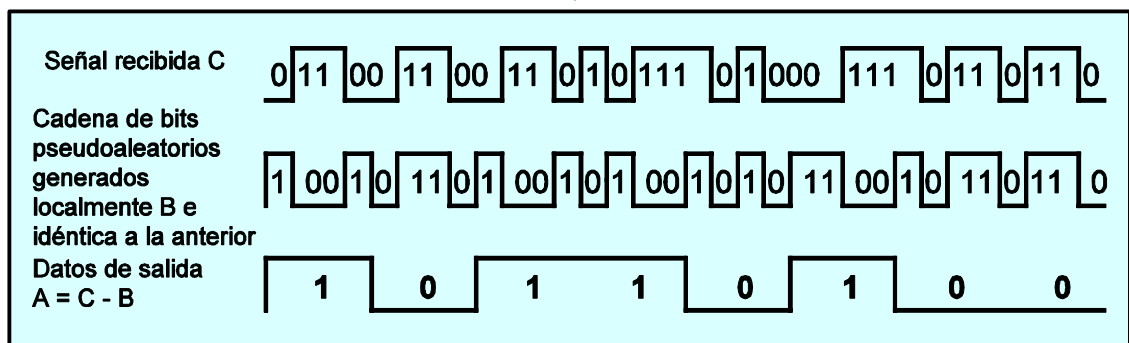


Figura 3-41. Ejemplo de espectro expandido mediante secuencia directa.