

Capítulo 3. CODIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En una red de computadores se necesita que la información, que se intercambian dos o más dispositivos, sea transformada para adecuarse al medio físico de transmisión que los conecta. En este capítulo se trata la conversión de señales digitales y analógicas, así como las técnicas de modulación que se emplean para llevar a cabo la codificación de datos en señales en función de su naturaleza digital o analógica. Además, en este capítulo, se explica como conseguir una adecuada eficiencia del medio físico, haciendo uso de técnicas de multiplexación. Con estas técnicas se permite transmitir simultáneamente varias señales a través de un mismo enlace de datos.

3.1. Señales y tipos de señalización

En el capítulo anterior, se hizo una clasificación de tipos de señales en función de su naturaleza. Además, se hizo hincapié en como las señales que se transmiten a través de un medio de transmisión tienen la finalidad de transportar secuencias de bits correspondientes a la información que se desea comunicar e intercambiar entre emisor y receptor. Sin embargo, no se comentó como esa información binaria se transporta en forma de señal y si esta información es necesario que sea codificada o no. Pero antes de comentar estos dos aspectos, conviene hacer una breve clasificación de los tipos de datos que pueden componer la información que se desea enviar, y el tipo de señales que se pueden emplear para transportar estos datos.

3.1.1. Tipos de datos y de señales

Los mensajes de información que intercambian un emisor y un receptor en un sistema de comunicación pueden estar compuestos por datos digitales o por datos analógicos. El empleo de un tipo u otro de datos para componer el mensaje depende de los recursos y dispositivos disponibles en la comunicación. Así, si emisor y receptor son dos seres humanos, los datos los compondrán con naturaleza analógica, sin embargo si emisor y receptor son dos PCs, los datos los compondrán con naturaleza digital.

Del mismo modo, esos datos ya sean analógicos o digitales, en muchos casos es necesario adaptarlos o no al medio físico que se empleará en el proceso de transmisión. Por lo tanto, estos datos se someterán a lo que se conoce como proceso de señalización o codificación para llevar a cabo esta adaptación.

En función de los datos que constituyen el mensaje y las señales que se emplean para transportar dichos datos, se dispone de las siguientes cuatro situaciones:

- *Datos digitales+señales digitales*: Es la forma más simple de codificar, ya que datos y señales tienen la misma naturaleza digital. Este tipo de codificación se conoce como codificación de línea. La manera más sencilla para realizar la codificación de línea es asignar un nivel de tensión al '1' binario y otro nivel de tensión distinto al '0' binario. Sin embargo, en muchos casos para mejorar las prestaciones conviene emplear bloques de datos mayores a un bit, para ser codificados en niveles de tensión, así como mecanismos de sincronismo. Las técnicas más empleadas son las codificaciones banda base y sus variantes.
- *Datos analógicos+señales digitales*: En este caso, los datos son analógicos como por ejemplo la voz humana o el video y televisión convencional. En tales casos, es necesario someter a los datos a un proceso de digitalización para poder ser transmitidos a través de sistemas digitales. La técnica más empleada en los procesos de digitalización es la que se emplea para almacenar música en soportes digitales como es la codificación PCM y sus variantes. El dispositivo empleado se denomina CODEC.
- *Datos digitales+señales analógicas*: Este otro caso es el caso más común que nos encontramos en nuestros hogares cuando queremos comunicar nuestro PC con otro a través de la red telefónica conmutada. Los datos almacenados en memoria de los computadores personales son secuencias de bits que representan ficheros, imágenes, texto, video, etc. y éstos se quieren transportar a través de líneas de cableado que

soportan señales analógicas. En tal caso, un dispositivo DCE del tipo MODEM convertirá los datos digitales en señales analógicas. Las técnicas que emplean los MODEMs para adecuar la señal son las basadas en modulación por desplazamiento de fase (PSK), modulación por variación de amplitud (ASK) y modulación por variación de frecuencias (FSK). Técnicas que se comentarán más adelante.

- *Datos analógicos+señales analógicas*: El último de los casos es cuando los datos son analógicos, como la voz humana, y para ser transmitido por líneas analógicas no deben alterar su naturaleza. Estos datos simplemente se modulan mediante una señal cuya banda de frecuencias (FM), amplitudes (AM) o fases (PM) son las adecuadas para transmitir por el medio físico escogido.

Este capítulo se centrará principalmente en comentar las técnicas de codificación que se emplean cuando los datos son digitales. Aunque, también, se comentará la posibilidad de transmitir datos analógicos a través de señales digitales, es decir, codificaciones que se emplean en transmisiones digitales.

3.1.2. Tipos de señalización en transmisiones digitales.

Como ya se ha comentado anteriormente, existen dos posibles tipos de señalización en transmisiones digitales: aquellos que emplean datos analógicos y los que emplean datos digitales, en ambos, las señales empleadas serán digitales. El proceso de señalización se denomina *codificación de línea*. Para hacer más entendible este proceso se van a definir dos conceptos: *elemento de señal* y *elemento de datos*. Ambos constituyen posibles elementos de señalización en el proceso de codificación.

- *Elemento de datos*: Es la unidad más pequeña que representa un elemento de información a transmitir.
- *Elemento de señal*: Es la unidad de tiempo más pequeña de una señal digital que se transmite.

De ahí se puede determinar que el elemento de datos es la información que se transporta en la señal y el elemento de señal son los portadores de la los datos.

De estos dos conceptos se puede extraer la relación existente entre velocidad de modulación y velocidad de transmisión que se comentó en el capítulo 2. Así, la velocidad de transmisión mide la tasa de datos que define el número de elementos de datos (bits) enviados por unidad de tiempo (segundo). Sin embargo, la velocidad de modulación determina el número de elementos de señal enviados por unidad de tiempo (segundo), es decir determina la tasa de señal.

Uno de los objetivos de cualquier sistema de comunicaciones es aumentar la tasa de datos al mismo tiempo que se busca reducir la tasa de señales. Este hecho supone un aumento en la velocidad de transmisión sin necesidad de aumentar el ancho de banda que se necesita para transmitir la señal.

Las técnicas de codificación se pueden catalogar en métodos de señalización del tipo:

- *Banda base*: Cuando se emplean estas técnicas, la información a transmitir (secuencia de bits) se envían empleando una codificación de línea, es decir sin necesidad de realizar modificaciones para enviarla por el medio.
- *Banda modulada*: En este tipo de técnicas, la información a transmitir (secuencia de bits) tiene que ser adaptada para ser enviada a través del medio físico.

El empleo de unas técnicas de codificación depende del medio físico que se va a utilizar en la transmisión y de las especificaciones de éste, así como de otros factores que influyen en el intercambio de datos entre dispositivos. Así, factores como el ancho de banda del medio, sincronización entre emisor y receptor, inmunidad al ruido y a las interferencias en el medio físico, el coste de complejidad de implementación de la técnica de codificación o la necesidad de incorporar mecanismos para la detección de errores, son algunos de los factores que determinan la técnica a escoger e implementar.

- *Sincronismo*: Se requiere que los métodos de codificación, en muchos casos, incorporen mecanismos para interpretar correctamente las señales que el receptor recibe procedente del emisor.
- *Ruido e Interferencias*: Se requiere que el método de codificación sea lo más inmune a perturbaciones.
- *Complejidad*: Los métodos complejos son más costosos de implementar que los sencillos. De ahí que un método que necesita mayor número de niveles de señal sea más complejo que otro que necesita menos.
- *Detección de errores*: Es importante, que los métodos de codificación incorporen mecanismos para la detección de errores en el código generado y transmitido.

3.2. Codificación Banda Base

Existen varios mecanismos de codificación banda base. Estos se pueden catalogar de acuerdo a una serie de características que determinan su espectro de señal:

- *Unipolar*: Cuando en el espectro de la señal todos los niveles se encuentran a un mismo lado del eje de tiempo. Es decir, todos los niveles tienen valores de tensión mayores o iguales a cero, o todos son menores o iguales a cero.
- *Bipolar*: Cuando en el espectro de la señal los niveles se pueden encontrar a ambos lados del eje de tiempo. Es decir, pueden tener valores positivos o negativos indistintamente.
- *Multinivel*: Cuando en el espectro de la señal se pueden tener diferentes tipos de elementos de señal, permitiendo diferentes niveles de señal para codificar los elementos de datos. Esto permite aumentar la velocidad de transmisión, aumentando el número de bits por baudio que se codifican por elemento de señal.

3.2.1. Codificación binaria

Son mecanismos de codificación unipolar o bipolar. En estos casos, se suele asignar niveles de tensión asociados a cada valor de bit ('0' o '1').

De entre ellos destacan las codificaciones NRZ (No retorno a cero) y RZ (Retorno a cero). Tradicionalmente, el esquema NRZ y RZ fueron diseñados como unipolares.

En el *NRZ*, el dato '1' se codifica como un nivel de tensión positivo y el dato '0' como un nivel de tensión negativo. Se denomina NRZ porque la señal no regresa a nivel de tensión cero en mitad del elemento de señalización que define el bit en la señal.

Sin embargo, el *RZ* nace para solventar algunos de los problemas que tiene el método de codificación NRZ. Así, en el método NRZ, el principal problema surge cuando emisor y receptor no

están sincronizados para el envío y recepción de datos. Esto es así porque el receptor no sabe dónde termina un bit y comienza el siguiente con ese mecanismo de señalización. El RZ utiliza tres valores de tensión (positivo, negativo y cero) para codificar los datos y la señal no cambia entre bits sino durante la propia duración del bit. La señal vuelve a cero en la segunda mitad de la duración de cada bit (Figura 3.1).

Generalmente, éste tipo de métodos se suele emplear en la grabación magnética de datos digitales y no suelen ser muy atractivos para la codificación previa necesaria para transmisión de señales.

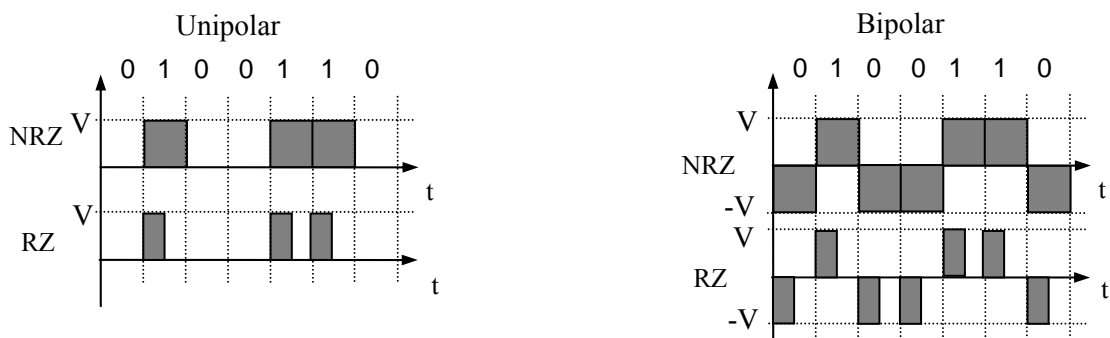


Figura 3-1: Ejemplos codificaciones binarias.

3.2.2. Codificación Manchester

Son mecanismos de codificación bipolar. En estos casos, a cada valor de bit ('0' o '1') se le asocian transiciones de nivel entre dos tensiones. El nivel de tensión permanece en un valor durante la primera mitad y se mueve a otro nivel durante la segunda mitad de duración del bit. Esta transición en mitad de la duración del bit permite utilizarse como elemento de sincronización entre emisor y receptor (Figura 3.2).

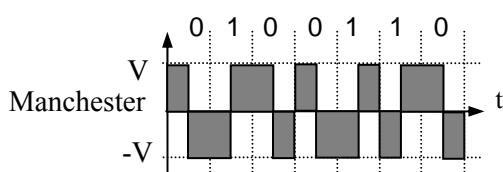


Figura 3-2: Ejemplo codificación Manchester.

En este método es posible incorporar mecanismos de detección de errores. Mecanismos que consistirían en comprobar la presencia o ausencia de transiciones en mitad del intervalo de tiempo. En caso de ausencia, se estaría produciendo un error.

Éste método se suele emplear para la codificación de señales que se transmiten en redes LAN con topología en bus sobre par trenzado o cable coaxial y empleando método de acceso al medio CSMA/CD, es decir, en concreto las redes del tipo IEEE 802.3 (Consultar Capítulo 4).

3.2.3. Codificación Manchester diferencial

También son mecanismos de codificación bipolar. En estos casos, a cada valor de bit ('0' o '1') se le asocian transiciones de nivel entre dos tensiones. El nivel de tensión permanece en un valor durante la primera mitad y se mueve a otro nivel durante la segunda mitad de duración del bit. Sin embargo, la diferencia con el método Manchester viene dada por la necesidad de determinar los valores del bit al comienzo de éste. Así, si un bit se codifica con una transición dada, y el siguiente bit es un '0' entonces se mantendrá la transición, si es un '1' entonces se cambia la transición (Figura 3.3).

Este método se suele emplear para la codificación de señales que se transmiten en redes LAN con topología en anillo y empleando método de acceso al medio basado en testigo, es decir, en concreto las redes del tipo IEEE 802.5 (Consultar Capítulo 4).

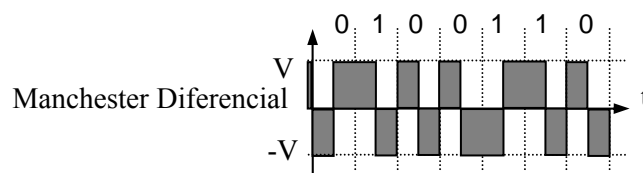


Figura 3-3: Ejemplo codificación Manchester Diferencial.

3.2.4. Codificación 2B1Q

Se trata de un mecanismo multinivel. Su nombre indica que codifica patrones de $m=2$ elementos de datos en un patrón de $n=1$ elemento de señal. Los dos tipos de elementos de datos son '0' o '1' y por lo tanto se pueden producir $2^m=2^2=4$ patrones de datos. Es decir, cada elemento de señal está representado por 2 bits, y el conjunto de todos los pares de bits posibles representan los 4 patrones de datos o niveles de tensión que puede adoptar la señal a transmitir (Figura 3.4).

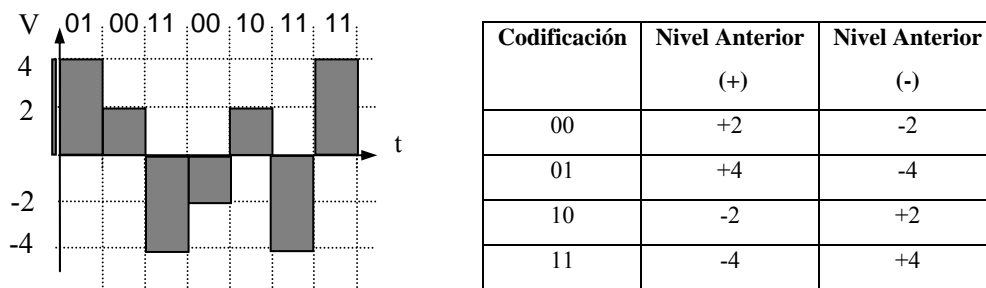


Figura 3-4: Ejemplo de codificación 2B1Q.

Por ejemplo, se supone que se quiere codificar la secuencia '01' en un elemento de señal. Así, como la señal en un instante anterior tenía un nivel positivo de tensión, el '01' se codifica con una tensión de +4 voltios. Sin embargo, si la señal en el instante anterior hubiese tenido un nivel negativo de tensión se hubiera codificado como -4 voltios (Figura 3.4).

Este tipo de codificación se emplea en las líneas xDSL (líneas de abonado digital) para ofrecer una conexión de alta velocidad en Internet empleando líneas telefónicas convencionales. Además, la codificación en varios niveles mediante tablas permite realizar codificaciones aleatorias evitando acoplamientos entre señales.

3.2.5. Codificación 8B6T

Otro mecanismo multinivel es la codificación 8B6T. Su nombre indica que codifica patrones de $m=8$ elementos de datos en un patrón de $n=6$ elementos de señal. Los dos tipos de elementos de datos son '0' o '1' y por lo tanto se pueden producir $2^m=2^8=256$ patrones de datos. Sin embargo, considerando 3 niveles de tensión (positivo, negativo y cero), es posible codificar $3^n=3^6=478$ patrones de señal distintos. Es decir, cada elemento de señal está representado por 8 bits, y el conjunto de todos los octetos de bits posibles representan los 256 patrones de datos o niveles de tensión que puede adoptar la señal a transmitir (Figura 3.5) y disponemos de 478 patrones de señal para codificarlos.

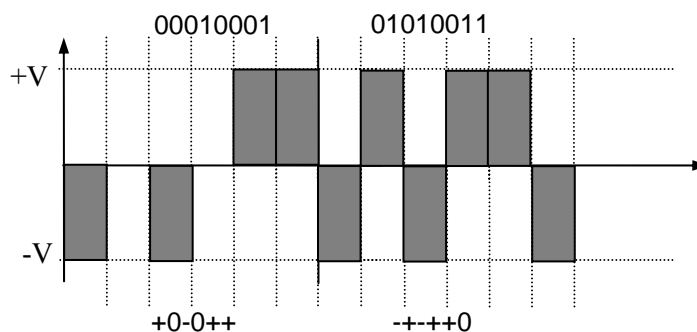


Figura 3-5: Ejemplo de codificación 8B6T de 2 patrones de datos de 8 bits cada uno codificados con 6 elementos de señal.

Este tipo de codificación se emplea en los medios físicos 100Base-4T de redes LAN que se comentarán en el Capítulo 4.

3.2.6. Otras codificaciones

Las técnicas de codificación banda base que se han expuesto en este capítulo no son las únicas existentes. En la actualidad, existen otras muchas técnicas de codificación que aunque no se hayan presentado en detalle si son de especial interés como esquemas de codificación de muchas de las tecnologías actuales y futura, por lo tanto, merecen al menos ser mencionadas. Entre ellas, caben destacar la codificación MLT-3, la codificación 4B/5B y la codificación HDB3.

- **MLT-3:** Es una codificación multilínea. A diferencia de las codificaciones NRZ, RZ y Manchester, codifica más de dos niveles de tensión. En concreto codifica tres niveles de tensión, y emplea más de una línea para transmitir los datos. Esta codificación se emplea para enviar a 100Mbps por un cable de cobre convencional.
- **4B/5B:** Es una codificación de bloques. Las codificaciones en bloques cambian bloques de datos de m bits en bloques de datos de n bits, donde $n>m$. Por lo tanto, permiten añadir bits redundantes para asegurar el proceso de sincronización y detección de errores. En este caso se cambian 4 bits por bloques de 5 bits. Existen más variantes de la codificación por bloques. Las más conocidas son 8B/10B donde se cambian bloques de 8 bits por bloques de 10 bits, la 3B/4B que cambia bloques de 3 bits por bloques de 4 bits, y la 5B/6B que cambia bloques de 5 bits por 6 bits.
- **HDB3:** Es una codificación bipolar con sustitución de varios ceros consecutivos por una secuencia determinada de voltajes. Así, en HDB3, si hay que transmitir una secuencia de 4 ceros consecutivos, éstos se sustituyen por 000V o B00V dependiendo

del número de pulsos distintos de cero después de la última sustitución. Donde V indica mantener la polaridad respecto al último pulso distinto de cero. Y B indica cambiar la polaridad respecto al último pulso distinto de cero.

3.3. Codificación Banda Modulada

La codificación banda modulada se emplea cuando la información tiene que ser adaptada para poder ser transmitida por un medio físico. Esto ocurre cuando los datos a transmitir y el medio que se emplea en la transmisión no soportan la misma naturaleza de señales. Por ejemplo, los datos tienen naturaleza digital, sin embargo el medio físico sólo soporta señales analógicas y, por lo tanto, se requiere que esos datos digitales sean codificados en forma de señales analógicas (Ej. MODEM). Para llevar a cabo esta adaptación se emplea lo que se conoce como proceso de modulación. El proceso de modulación emplea tipos de señales distintas que se denominan:

- *Portadora*: Es la señal que se quiere transmitir y que debe ser modificada para codificar los datos que se desea enviar.
- *Moduladora*: Es la señal que se emplea para modificar algún parámetro de la portadora, para que esta última pueda ser transmitida. Representa los datos digitales que se quieren hacer llegar al receptor.
- *Modulada*: Es la señal que se obtiene después de modificar la portador. Esta es la señal que se transmite por el medio físico y incorpora la codificación de los datos digitales.

Existen varias técnicas de codificación banda modulada. Éstas se catalogan según la naturaleza digital o analógica del los tipos de señal portadora y moduladora. Así:

- *Modulación analógica*: Cuando la señal portadora es analógica y la señal moduladora es digital.
- *Modulación digital*: Cuando la señal portadora es digital y la señal moduladora es analógica.

3.3.1. Modulación analógica

Estas se pueden catalogar de acuerdo al parámetro de la señal portadora que se modifica para codificar los datos de la señal de la moduladora.

Así, si la señal portadora es analógica se describe a partir de tres parámetros básicos: frecuencia, amplitud y fase. Por lo tanto, si el parámetro que se modifica es la amplitud la modulación se conoce como *ASK* o desplazamiento en amplitud. Si por el contrario, el parámetro que se modifica es la frecuencia, entonces la modulación se denomina *FSK* o desplazamiento en frecuencias. Y finalmente, si el parámetro es la fase entonces se denomina modulación *PSK* o desplazamiento en fase. A continuación se mostrará con cierto detalle como se realiza cada una de estas modulaciones.

Modulación ASK

La modulación ASK se caracteriza por ser una modulación analógica en amplitud, donde la señal portadora modifica su amplitud en función del valor de la amplitud en la señal moduladora. Así, finalmente, los valores binarios de la señal moduladora estarán representados en la señal modulada por dos amplitudes diferentes de la señal portadora (Figura 3.6).

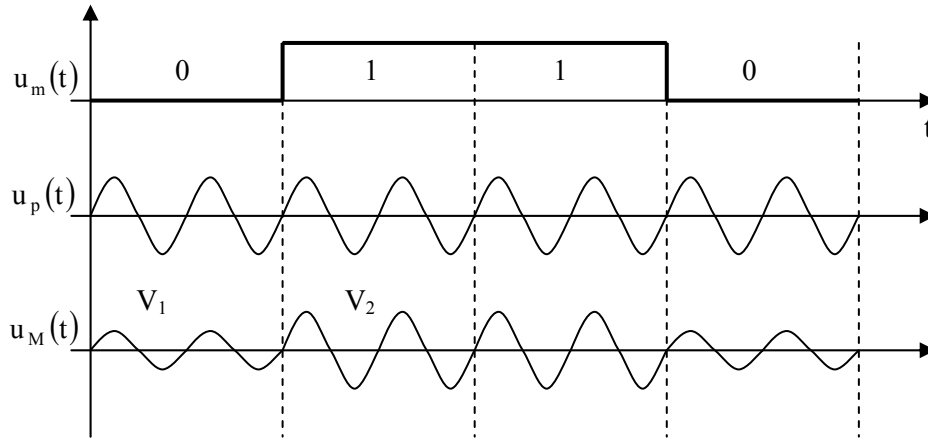


Figura 3-6: Ejemplo de modulación ASK.

La señal moduladora que contiene los datos digitales, matemáticamente, se puede representar como una señal compuesta periódica cualquiera. Señal que se puede descomponer como una serie infinita de funciones simples (senos y cosenos) de diferente amplitud y frecuencia.

$$u_m(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi n f_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(2\pi n f_0 t) \quad (3.1)$$

Además, la señal portadora que el medio físico soporta para transmitir se representa como una señal senoidal cualquiera de amplitud máxima un valor de tensión V.

$$u_p(t) = V \sin(2\pi f_p t + \phi) \quad (3.2)$$

Por lo tanto, la señal modulada se puede calcular a partir de una composición de las señales de las Ecuaciones (3.1) y (3.2), como se indica en la Ecuación (3.3).

$$u_M(t) = u_p(t) \circ u_m(t) = \begin{cases} V_1 \sin(2\pi f_p t + \phi) & \text{si } u_m = '0' \\ V_2 \sin(2\pi f_p t + \phi) & \text{si } u_m = '1' \end{cases} \quad (3.3)$$

Modulación FSK

La modulación FSK se caracteriza por ser una modulación analógica en frecuencias, donde se emplean dos señales portadoras con frecuencias distintas. De este modo, los valores binarios de la señal moduladora estarán representados en la señal modulada por dos frecuencias diferentes, cada una de ellas correspondientes a cada una de las dos señales portadoras (Figura 3.7).

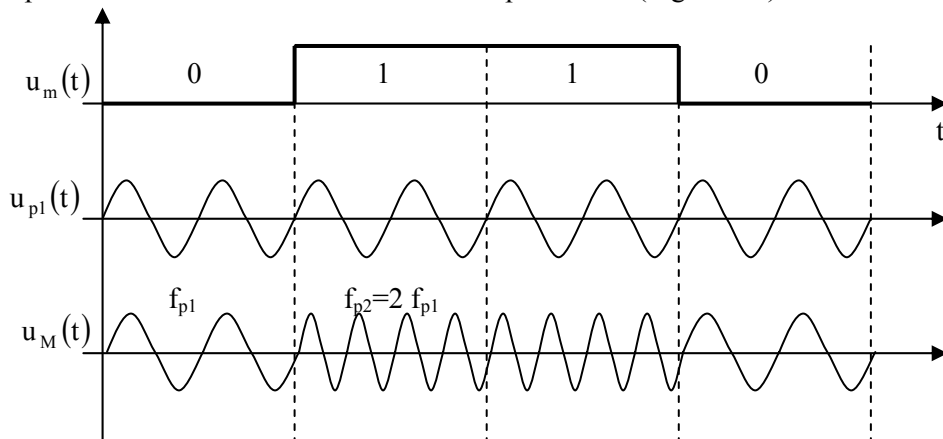


Figura 3-7: Ejemplo de modulación FSK.

Para este tipo de modulación, la señal moduladora se vuelve a representar por la Ecuación (3.1). Sin embargo, se emplean dos señales portadoras de igual fase y amplitud, pero con distinta frecuencia, como se indica en las Ecuaciones (3.4) y (3.5). En concreto en el ejemplo de la Figura 3.7 se ha empleado una frecuencia $f_{p2} = 2(f_{p1})$.

$$u_{p1}(t) = V \sin(2\pi f_{p1} t + \varphi) \text{ si '0'}$$
 (3.4)

$$u_{p2}(t) = V \sin(2\pi f_{p2} t + \varphi) \text{ si '1'}$$
 (3.5)

En este caso, la señal modulada se puede calcular a partir de una composición de las señales de las Ecuaciones (3.1), (3.4) y (3.5), como se indica en la Ecuación (3.6).

$$u_M(t) = u_{p1}(t) \circ u_m(t) + u_{p2}(t) \circ \text{inversa}(u_m(t))$$
 (3.6)

Modulación PSK

La modulación PSK se caracteriza por ser una modulación analógica en fase, donde se emplea una portadora cuyo parámetro de fase se modifica en función del valor de la señal moduladora que codifica '0' y '1'. De este modo, los valores binarios de la señal moduladora estarán representados en la señal modulada por dos fases diferentes de la señal portadora empleada en el proceso. Por ejemplo en la Figura 3.8, la señal portadora codifica un '1' modificando su fase 180° y codifica '0' manteniendo su fase original en 0° .

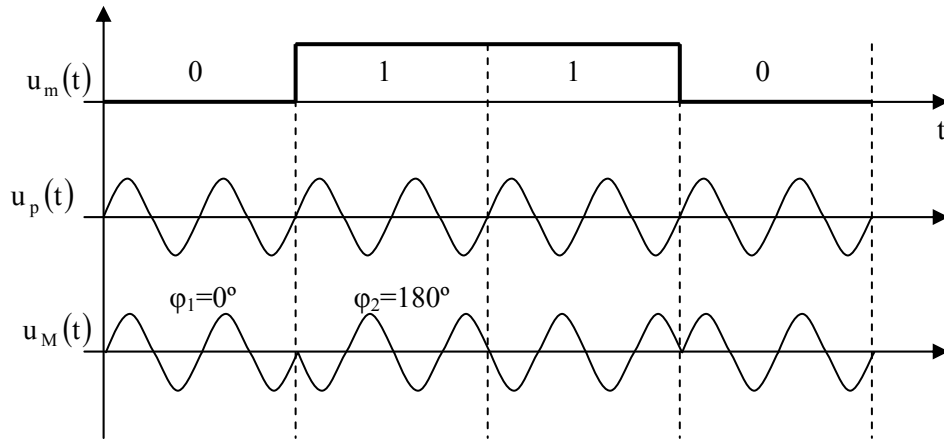


Figura 3-8: Ejemplo de modulación PSK.

En la modulación PSK, la señal moduladora de nuevo se representa por la Ecuación (3.1). La señal portadora es una señal senoidal arbitraria, cuya representación matemática ya se indicó en la ecuación (3.2). No obstante, la señal modulada (3.7) es la señal portadora adelantada o atrasada en fase dependiendo de los datos que modela la señal moduladora. Para el ejemplo de la Figura 3.8, $\varphi_1 = 0^\circ$ y $\varphi_2 = \pi \text{ rad} = 180^\circ$.

$$u_M(t) = \begin{cases} V \sin(2\pi f_p t + \varphi_1) & \text{'0'} \\ V \sin(2\pi f_p t + \varphi_2) & \text{'1'} \end{cases}$$
 (3.7)

Modulación QPSK

La modulación QPSK es una variante de la modulación PSK. También se conoce con el nombre de PSK con desplazamiento de fase en cuadratura.

En este tipo de modulación, en lugar de emplear un desplazamiento en fase de 180° se emplean desplazamientos de fase de la señal portadora correspondientes a múltiplos de 90° . Así, la señal modulada adquiere la representación matemática de la Ecuación (3.8).

$$u_M(t) = \begin{cases} V \sin(2\pi f_p t + 0) & '00' \\ V \sin(2\pi f_p t + \pi/2) & '01' \\ V \sin(2\pi f_p t + \pi) & '11' \\ V \sin(2\pi f_p t + 3\pi/2) & '10' \end{cases} \quad (3.8)$$

Este tipo de modulación permite que cada elemento de señal se represente con 2 bits. Este tipo de señalización permite aumentar la velocidad de modulación en el proceso de transmisión.

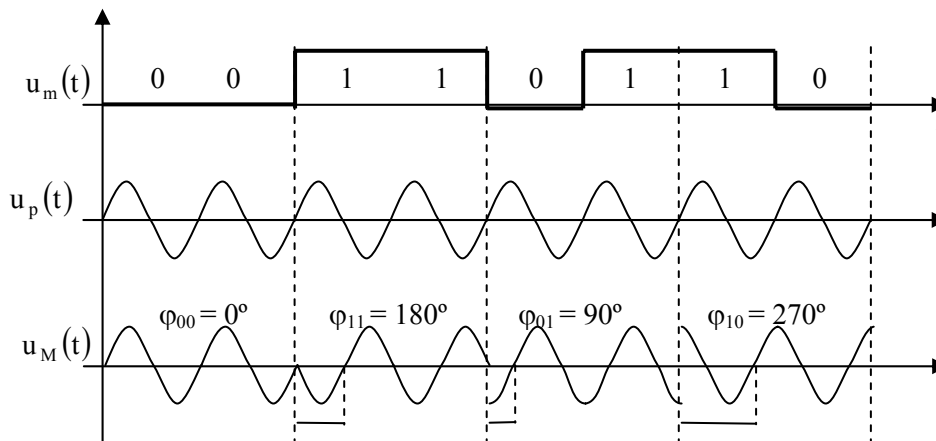


Figura 3-9: Ejemplo de modulación QPSK.

Modulación QAM

La modulación *QAM* es una variante de la modulación ASK y PSK. En este tipo de modulación se emplean distintas amplitudes y desplazamientos de fase de la señal portadora.

Existen numerosas variaciones posibles en la modulación *QAM* en función del número de niveles de señalización que se emplean. De ahí que se haya diseñado una herramienta gráfica, conocida como '*Diagrama de Fase*', que permite relacionar niveles de señalización con número de bits que se pueden enviar por cada nivel de señalización (Figura 3.10).

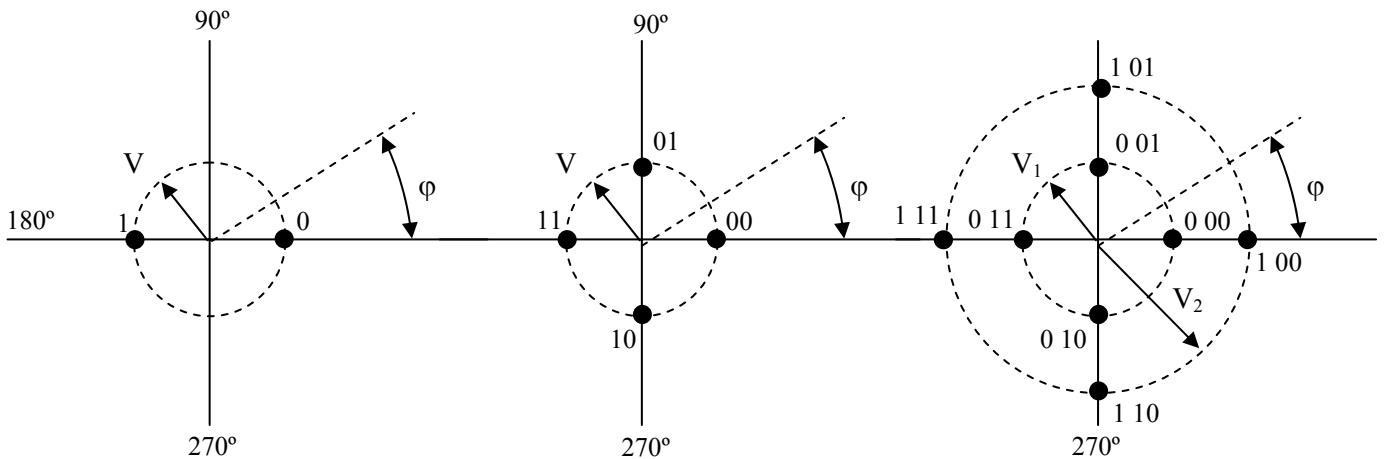


Figura 3-10: Diagramas de Fase.

Otras modulaciones

Además, a parte de las modulaciones anteriormente mencionadas, existen modulaciones que se pueden implementar como modificaciones de las anteriores. Así, se conoce la modulación *MFSK* como una modulación multinivel de la modulación *FSK*. Es decir, la modulación *MFSK* emplea más de dos señales portadoras. Por ejemplo, cuatro señales portadoras todas ellas iguales pero con frecuencias distintas. Con ello se consigue, al igual que en QPSK, enviar 2 bits al mismo tiempo. Por lo tanto, del mismo modo, si se desean enviar 3 bits, se necesitarían ocho señales portadoras de frecuencias distintas, y así sucesivamente. No obstante, es importante constatar que se requiere que las frecuencias estén lo suficientemente separadas entre sí para que los sistemas moduladores y demoduladores funcionen adecuadamente.

3.3.2. Modulación digital

Si la modulación analógica convertía datos digitales a señales analógicas, la modulación digital consiste en convertir señales analógicas a datos digitales. Por lo general, cualquier dato analógico está representado directamente por una señal analógica, de ahí que la modulación digital, por lo tanto, consista en convertir señales analógicas a datos digitales. Como representación de datos analógicos mediante señales analógicas se tiene la información creada por un micrófono a través de un equipo de sonido, la creada por una cámara de televisión, etc. En algunos ámbitos se conoce a este proceso de modulación digital como proceso de digitalización de información.

Entre las técnicas de modulación digital destacan dos: Modulación por codificación de pulsos o *PCM* y Modulación por codificación diferencial de pulsos o *PCM diferencial*. Además, destaca la modulación Delta o *DM* como una técnica de *PCM diferencial*.

Una vez que las señales analógicas se han convertido en datos digitales, es posible emplear cualquiera de las técnicas de codificación Banda Base (ver Apartado 3.2) para transformar esos datos en señales digitales.

Modulación PCM

La técnica PCM permite transformar una señal analógica en una señal digital a partir de tres procesos: muestreo, cuantificación y codificación.

- *Muestreo*: Proceso que permite adquirir un conjunto de muestras de la señal analógica en ciertos instantes de tiempo. La señal se muestrea con una frecuencia de muestreo igual a dos veces el ancho de banda del medio, de acuerdo al teorema de Nyquist.
- *Cuantificación*: La señal analógica muestreada es un conjunto de pulsos con valores de amplitud comprendidos entre la mínima y la máxima amplitud de la señal. El proceso de cuantificación consiste en dividir el rango de valores de amplitud en un conjunto discreto de niveles q , tomando un valor fijo de incremento. Posteriormente, se asigna un nivel concreto a cada valor de amplitud.
- *Codificación*: Proceso que permite asignar a cada muestra cuantificada una secuencia de bits que representan el nivel de cuantificación. Así, a partir del número de niveles q que cuantifican una señal muestreada, se puede calcular el número de bits necesarios para codificar el valor de cuantificación, como $q=2^n$, siendo n el número de bits empleados para la codificación

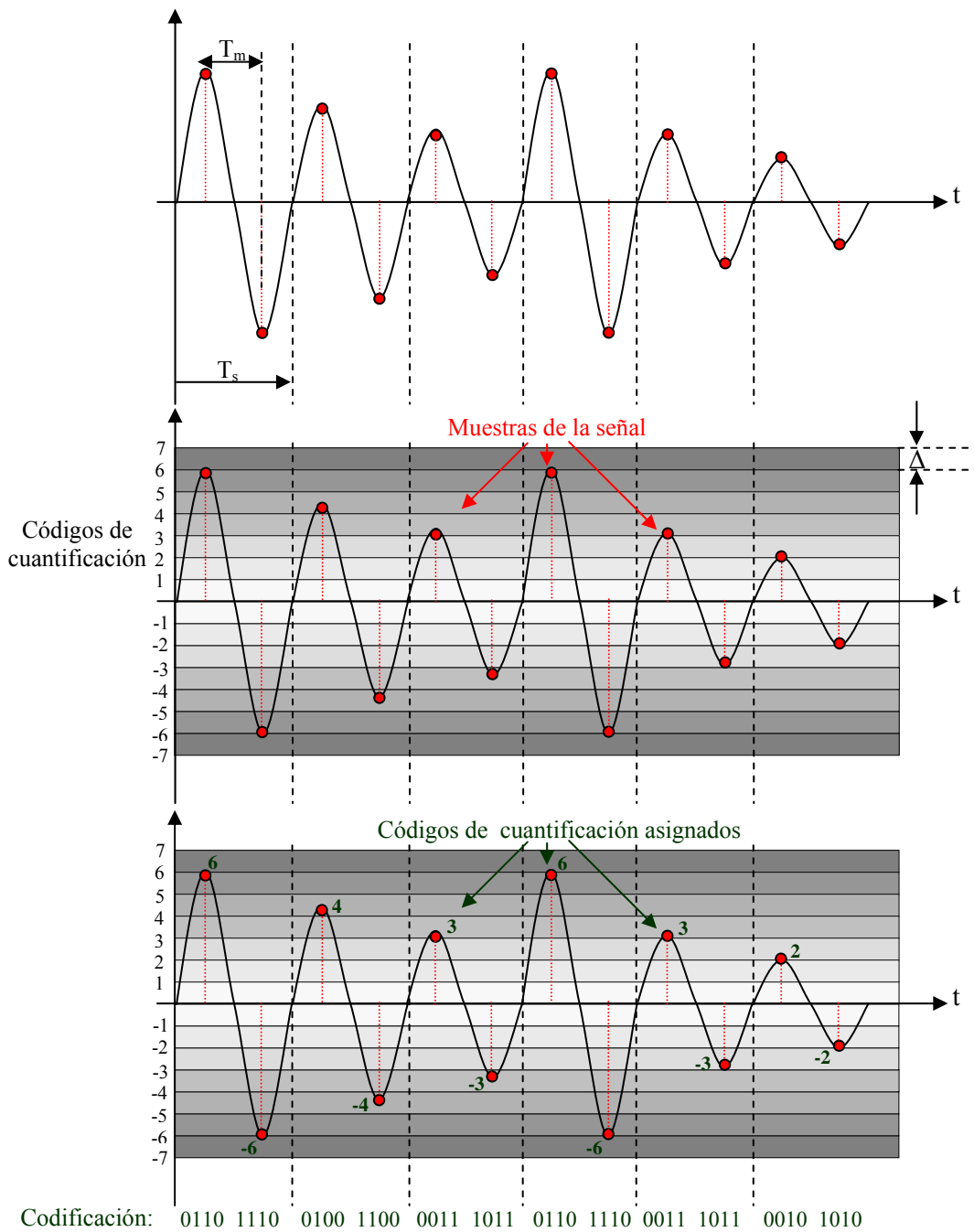


Figura 3-11: Procesos de muestreo, cuantificación y codificación PCM.

En la figura 3.11, se ha realizado un proceso de modulación PCM. Inicialmente, se ha sometido a una señal analógica a un proceso de muestreo ideal, tomando muestras cada T_m segundos, donde T_m se conoce como periodo de muestreo. Al proceso de muestreo también se le conoce como PAM o modulación por amplitud de pulsos. En este proceso se ha obtenido un conjunto de pulsos con valores de amplitud comprendidos entre la mínima y máxima amplitud de la señal. Durante el proceso de muestreo, las muestras obtenidas pueden ser no enteras. Posteriormente, se ha aplicado un proceso de cuantificación, en el cual se le asigna a cada valor de muestreo o PAM un código de cuantificación. Para ello, el primer paso es dividir el rango de amplitudes en zonas de una anchura Δ , y a continuación en un segundo paso se asignan valores cuantificados de acuerdo a la zona a la que más se

aproxime el valor de muestreo o PAM. La elección del número de niveles y de la anchura Δ , dependen de la precisión con la que se desee recuperar la señal analógica original.

En el caso mostrado en la figura 3.11 se ha dividido el rango de amplitudes en $q=15$ posibles códigos de cuantificación comprendidos entre $[-7, 7]$. Y a cada una de las 12 muestras se les ha asignado un valor cuantificado dentro de ese intervalo, en función del valor de cuantificación más próximo. En concreto, los valores asignados son 6, -6, 4, -4, 3, -3, 6, -6, 3, -3, 2 y -2.

Todo proceso de cuantificación tiene errores. La cuantificación es un proceso de aproximación, puesto que los valores de amplitud de las muestras del proceso PAM pueden no ser enteros y es necesario redondearlos, aproximándolos al valor de cuantificación más cercano. Un ejemplo de este error se observa en la cuarta muestra de la figura 3.11, donde el valor PAM es algo menor que -4, y sin embargo se aproxima por el valor -4 por ser el más cercano, con el consiguiente error de redondeo. No obstante, en la misma figura, la quinta muestra tiene error de cuantificación cero. Además es fácil comprobar que el error de cuantificación depende del número de niveles.

Por último, el proceso de codificación supone la última etapa de la técnica de Modulación por Codificación de Pulsos (PCM). En esta etapa, cada una de las muestras cuantificadas se codifica con n bits. El número de bits para codificar cada muestra se calcula a partir del número de niveles de cuantificación como ya se había comentado previamente. Para el caso de la figura 3.11, y de acuerdo a la fórmula $q=2^n$, se tiene que $15=2^n$ y por lo tanto $n=4$. Una vez determinado el número de bits, es necesario asociar a todos los códigos de cuantificación un código binario. En el ejemplo mostrado en la figura 3.11, los 15 niveles comprendidos entre $[-7, 7]$ se codificaran con los 4 bits calculados. Una manera de proceder típica es asignar el código binario correspondiente al valor decimal del nivel de cuantificación asignado a la muestra. Así, la primera muestra tiene asignado el valor +6, por lo tanto, se codifica con su valor binario de 4 bits, 0110, y se emplea el complemento a dos para los valores negativos. No obstante, es posible asignar otros códigos preestablecidos para codificar cada nivel de cuantificación.

Ejercicio 3.1

Un dispositivo de red envía una señal analógica como la que se muestra en la figura 3.12. Se quiere transformar mediante la técnica PCM para enviarla a través de un medio físico digital. Realiza el proceso de conversión considerando que la señal analógica posee una frecuencia inferior de 0 Hz, una frecuencia superior de 100Hz y que se propaga en 0.05s y contesta a las siguientes cuestiones:

- Determina la frecuencia de muestreo del proceso PAM. ¿Cuántas muestras se extraerán de la señal exactamente?*
- Atendiendo a todos los valores posibles de amplitud, determina el número de bits necesarios para la cuantificación de las muestras.*
- Determina la secuencia de bits que hay que enviar si se codifica la señal mediante PCM, asignando un código binario a cada uno de los valores de amplitud.*

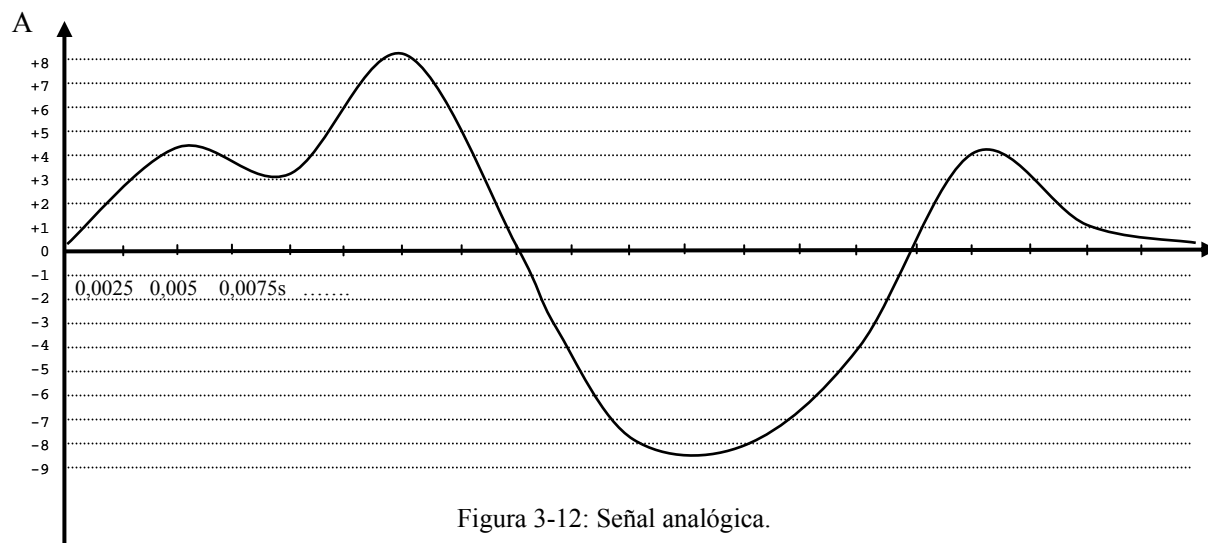


Figura 3-12: Señal analógica.

a) $B=100\text{Hz}-0\text{Hz}=100\text{Hz}$, $f=2B=200\text{Hz} \rightarrow T=1/f=1/200=0,005\text{s}$ y por lo tanto una muestra cada 0,005 segundos. $\rightarrow 0,05/0,005=10$ muestras

b) Hay que codificar 18 valores entre -9 y +8. Se necesitarán, por lo tanto, 5 bits para codificar los 18 valores posibles de tensión, ya que el número de bits viene dado por $n=\log_2 N$ donde $N=18$. Así, $n=\log_2 18=4.17$ bits. Y puesto que con 4 bits sólo se podrían codificar 16 valores, hay que optar por el valor entero inmediatamente superior a 4.17 que es 5.

c) Un posible código binario para cada uno de los valores de tensión podría ser:

8	01000	-1	10001
7	00111	-2	10010
6	00101	-3	10011
5	00101	-4	10100
4	00100	-5	10101
3	00011	-6	10110
2	00010	-7	10111
1	00001	-8	11000
0	00000	-9	11001

Los valores de tensión a codificar para el periodo de muestreo, son: +4, +3, +8, 0, -8, -8, -4, +4, +1

.La codificación sería: 00100 00011 01000 00000 11000 11000 10100 00100 00001

Modulación PCM diferencial

La técnica PCM diferencial es una variación de la técnica PCM convencional. Esta técnica también permite transformar una señal analógica en una señal digital a partir de tres procesos: muestreo, cuantificación y codificación. La diferencia respecto a la técnica PCM reside en el proceso de codificación de la señal muestreada. Y la ventaja frente a la PCM es que es más sencilla de implementar.

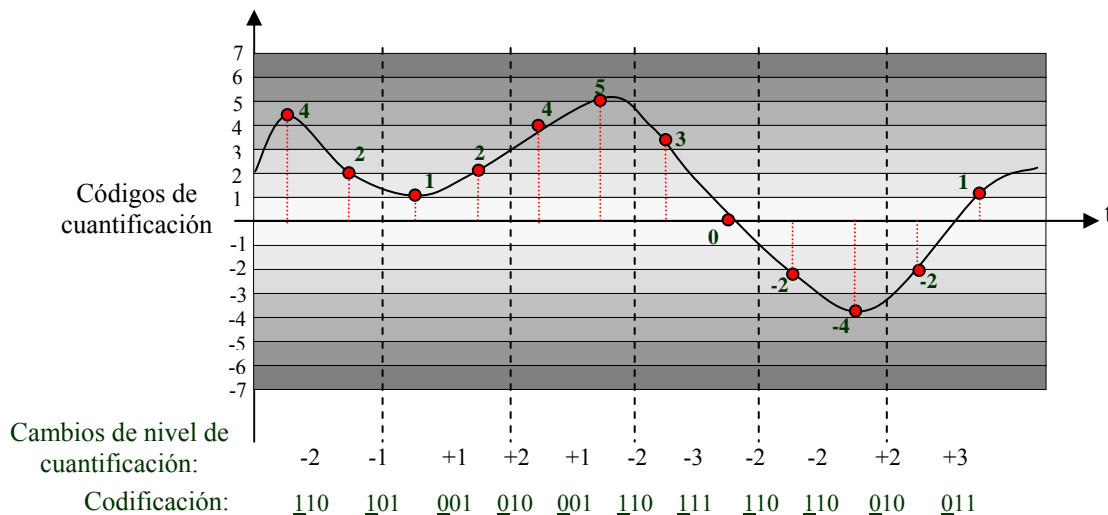


Figura 3-13: Procesos de codificación PCM diferencial.

En el proceso de codificación, la técnica PCM diferencial no codifica la muestra en función del nivel de cuantificación más próximo como ocurría en PCM, sino que codifica el incremento o decremento entre dos muestras cuantificadas consecutivas. Así, se codificará con el bit '1' cuando el cambio entre dichos valores de cuantificación sea de decrecimiento y se codificará con el bit '0' cuando el cambio entre esos valores de cuantificación sea de crecimiento. Y a ese bit de signo, que determina si hay crecimiento o decrecimiento, se le añaden tantos bits como sean necesarios para codificar en binario el valor absoluto del número de niveles de cuantificación en el que difieren dos muestras consecutivas. Así, observando la figura 3.13, se comprueba que entre la primera muestra +4 y la segunda muestra +2, se ha producido un decrecimiento de 2 niveles de cuantificación. Por lo tanto, la codificación en este caso es 110 donde el primer bit '1' indica decrecimiento y los otros dos bits '10' indican el número de niveles que decrece la señal.

El principal inconveniente de la técnica PCM diferencial radica en que imposibilita la codificación de señales constantes, ya que en este tipo de señales no habría crecimientos ni decrecimientos de señal para ser codificados. Sin embargo, disfruta de varias ventajas frente a la técnica PCM, entre las que destacan dos:

- PCM diferencial permite aumentar la velocidad de transmisión en algunos casos, puesto que generalmente reduce el número de bits a transmitir.
- PCM diferencial permite emplear medios físicos que soportan un número limitado de bits para el proceso de codificación de niveles de cuantificación.

Ejercicio 3.2

Un dispositivo inalámbrico envía una señal analógica como la que se muestra en la figura 3.14. Se quiere transformar mediante la técnica PCM diferencial para enviarla a través de un medio físico digital. Realiza el proceso de conversión considerando que la señal analógica posee una frecuencia inferior de 0 Hz, una frecuencia superior de 125Hz y que se propaga en 0.064s y contesta a las siguientes cuestiones:

- Determina la frecuencia de muestreo del proceso PAM. ¿Cuántas muestras se extraerán de la señal exactamente?
- Determina la secuencia de bits que hay que enviar si se codifica la señal mediante PCM diferencial.
- ¿Es posible ahorrar bits a transmitir codificando la señal de la figura 3.14 con esta técnica con respecto al haber usado la PCM? Si es posible calcula cuántos bits se han ahorrado en la transmisión de la señal, y sino es posible justifica la razón de qué sea así.

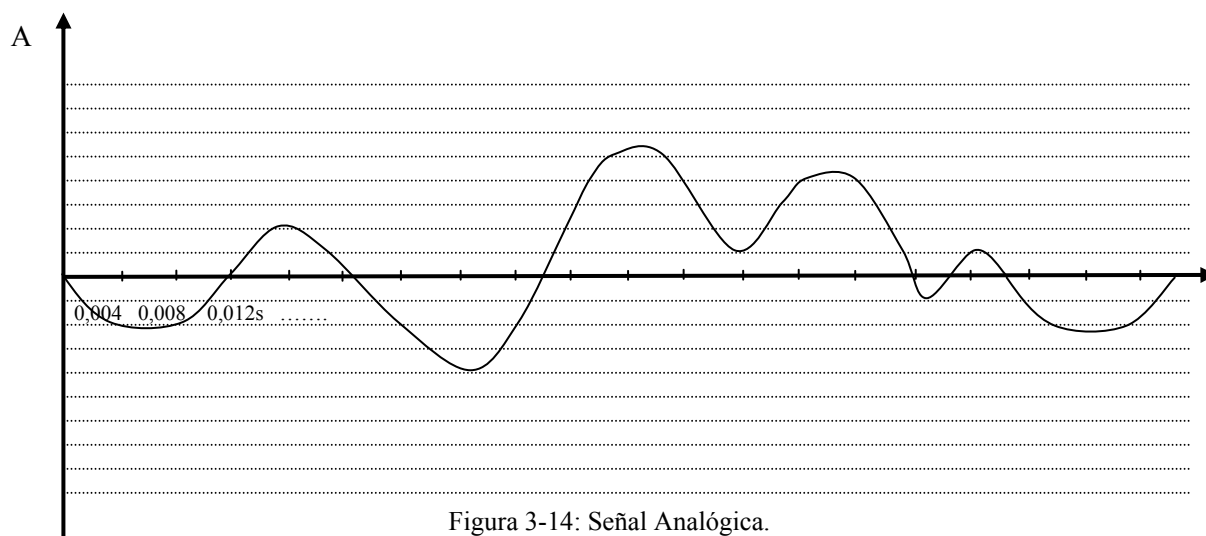


Figura 3-14: Señal Analógica.

- a) $B=125\text{Hz}-0\text{Hz}=125\text{Hz}$, $f=2B=250\text{Hz} \rightarrow T=1/f=1/250=0,004\text{s}$ y por lo tanto una muestra cada 0,004 segundos. $\rightarrow 0,064/0,004=16$ muestras
- b) Incrementos a codificar: -2,0,+2,+2,-2,-2,-2,+2,+4,+3,-1,-3,+3,0,-4,+1. Se necesitarán, por lo tanto, 3 bits para indicar el incremento o decremento, y 1 bit adicional para indicar si es incremento o decremento, en total 4 bits. La codificación sería: 1010 0000 0010 0010 1010 1010 1010 0010 0100 0011 1001 1011 0011 0000 1100 0001
- c) Con PCM diferencial se han empleado 4 bits, con PCM hubieran sido necesarios bits para codificar los 10 niveles posibles desde -4 a 5. Y para codificar 10 niveles son necesarios 4 bits. Por lo tanto, en este caso no hay un ahorro de bits a transmitir.

Modulación Delta

La técnica Modulación Delta o DM es un caso particular de la técnica de modulación PCM diferencial. Esta técnica además de reducir la complejidad respecto a la PCM, reduce la información a transmitir y precisa un ancho de banda más pequeño para realizar la transmisión por un medio físico.

En el proceso de codificación, la técnica DM codifica únicamente los cambios positivos o negativos entre dos muestras cuantificadas consecutivas. Es decir, cuando entre dos muestras consecutivas se produzca un incremento en los valores de cuantificación, se codificará con el bit '1' y cuando el cambio entre dichos valores de cuantificación sea un decremento se codificará con el bit '0'. En esta técnica no es necesario codificar cuántos niveles de variación supone ese incremento o decremento, sino únicamente el hecho de que haya variación independientemente de cual sea su valor.

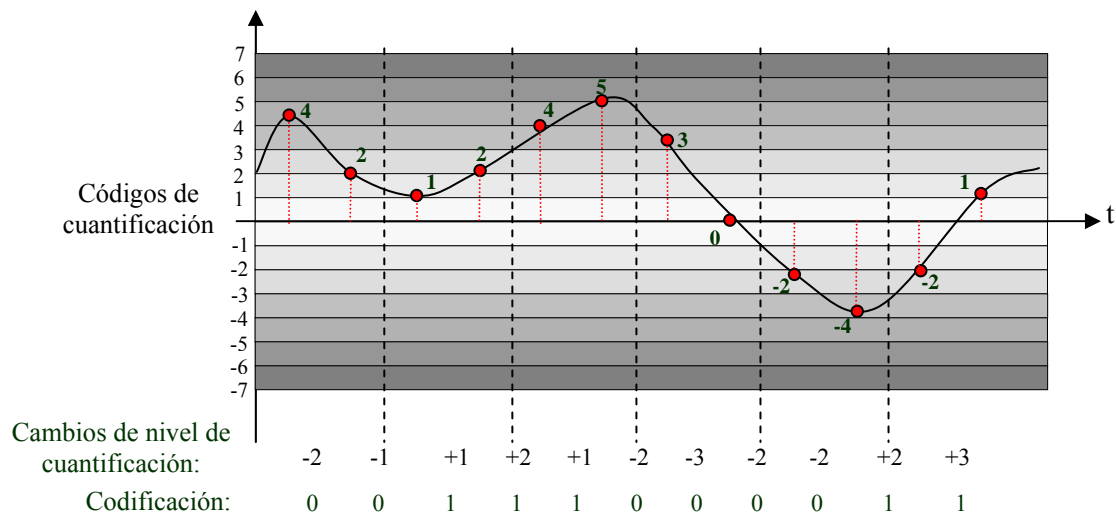


Figura 3-15: Proceso de codificación DM.

Para llevar a cabo una modulación DM en la práctica (Figura 3.16), el sistema modulador construye una segunda señal denominada señal escalera, y compara la señal analógica a transmitir con esta señal escalera. Así, el modulador para cada muestra es capaz de determinar los incrementos o decrementos comparando el valor de la señal analógica con el último valor de la señal escalera. Cuando la amplitud de la señal analógica es mayor que la de escalera el siguiente bit será un '1' y cuando sea menor será un '0'.

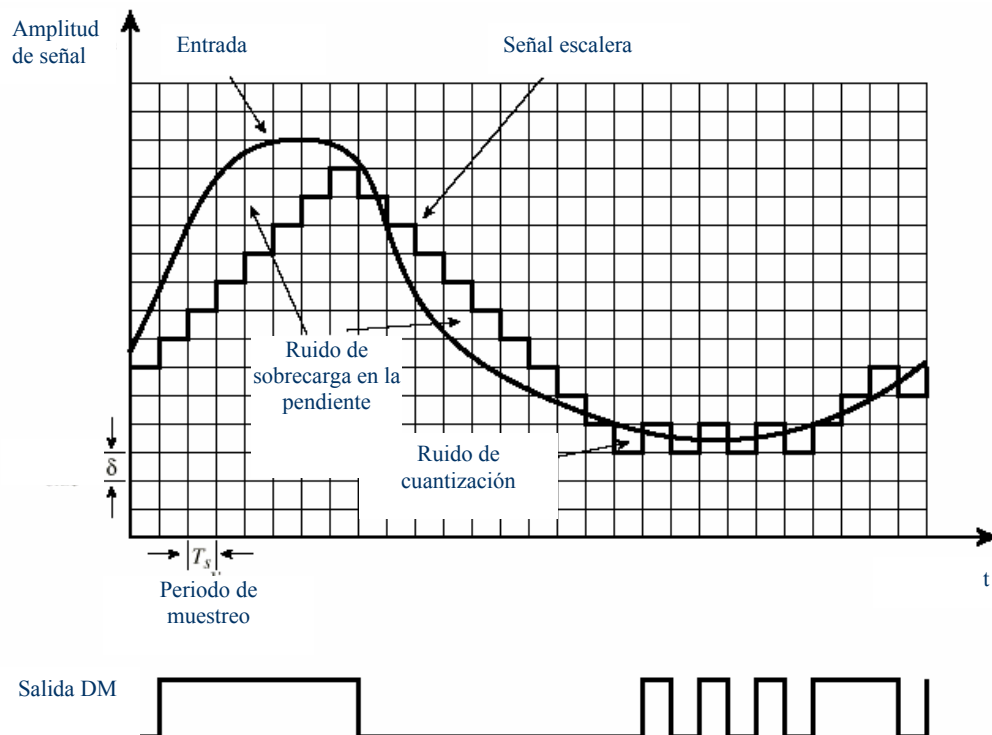


Figura 3-16: Proceso real de codificación DM usando señal escalera.

3.4. Multiplexación

Como ya se comentó en el Capítulo 2, el ancho de banda determina las prestaciones de un medio físico. Además, las especificaciones de un medio físico se rigen por ancho de banda limitado, además de por una velocidad máxima de transmisión, entre otros muchos factores.

En muchas ocasiones, los dispositivos que se conectan a un medio físico requieren de menor ancho de banda del que soporta el medio en cuestión. En estos casos, el medio físico puede ser compartido para realizar transmisiones simultáneamente por varios dispositivos. Por lo tanto, se define *multiplexación* como el conjunto de técnicas que permiten transmitir varias señales a la vez a través de un mismo medio físico que forma parte de un único enlace de datos. El objetivo de la multiplexación consiste en realizar un empleo eficiente de medios físicos con gran ancho de banda, permitiendo que éstos transporten señales de distintos dispositivos a la vez. La multiplexación, por lo tanto, es importante para que medios físicos con gran ancho de banda como son el cable coaxial, la fibra óptica o las microondas terrestres puedan ser empleados para transmitir varias señales simultáneamente. De este modo, se evita que se malgaste el uso de medios físicos, con gran ancho de banda, con transmisiones que no requieren tanto ancho de banda.

Así, para hacer un uso eficiente de los enlaces de comunicaciones se emplean técnicas de multiplexación. Existen tres tipos de técnicas básicas de multiplexación:

- *Multiplexación por división en frecuencias (FDM)*: Es una técnica de multiplexación analógica que consiste en transmitir varias señales por un mismo medio, asignando una banda de frecuencias diferente para cada señal. Se emplea cuando el rango de frecuencias del ancho de banda útil del medio supera el ancho de banda requerido por cada señal que se desea transmitir.
- *Multiplexación por división en tiempos (TDM)*: Es una técnica de multiplexación digital que consiste en transmitir datos digitales procedentes de distintos dispositivos por un mismo medio. En TDM se divide el enlace de datos en porciones de tiempo, y se asigna una porción de tiempo a cada dispositivo durante la cual puede transmitir datos.
- *Multiplexación por longitud de onda (WDM)*: Es una técnica de multiplexación analógica que consiste en transmitir varias señales luminosas sobre un mismo enlace de fibra óptica. La técnica es conceptualmente similar a la FDM, consiste en combinar señales con frecuencias distintas. La diferencia es que en WDM las frecuencias de las señales son muy altas comparadas con las que se emplean en FDM.



Figura 3-17: Proceso de multiplexación y demultiplexación.

3.4.1. Multiplexación por división en frecuencias

La multiplexación por división del medio en frecuencias se aplica cuando el ancho de banda útil de un enlace de datos es mayor que los anchos de banda combinados de las señales que se desea transmitir. Esta técnica permite transmitir varias señales simultáneamente si cada una de ellas se modula con señales portadoras de frecuencias distintas. Además, se requiere que las frecuencias de las señales portadoras se encuentren separadas entre sí para evitar solapamientos e interferencias. Posteriormente, las señales moduladas se combinan formando una señal compuesta que se transporta por el enlace de datos.

Todo sistema de multiplexación requiere de un sistema de demultiplexación que separe la señal compuesta formada en el proceso de multiplexación en un conjunto de señales distintas (Figura 3.17). El proceso de multiplexación se lleva a cabo en el dispositivo emisor (Figura 3.18) y el proceso de demultiplexación se realiza en el dispositivo receptor (Figura 3.19).

Proceso de Multiplexación

Observando la Figura 3.18a se muestra un esquema general de multiplexación por división en frecuencias. Así, varias señales $u_m(t)$ se quieren enviar a través de un mismo enlace de datos. Para ello, cada señal $u_m(t)$ se modula mediante una señal portadora $u_p(t)$ y posteriormente, cada señal modulada $u_{Mi}(t)$ resultante se suma para dar lugar a una señal modulada de banda compuesta, $u_{MB}(t)$.

Como se observa en la Figura 3.18b, el espectro de la señal modulada en banda compuesta, $u_{MB}(t)$, está representado por la suma de los espectros de las señales $u_{mi}(t)$ desplazados hasta quedar centrados en cada una de las frecuencias de las señales portadoras $u_{pi}(t)$. Y las frecuencias f_{pi} de las señales portadoras $u_{pi}(t)$ se han escogido de modo que los anchos de bandas de las distintas señales, B_i , no se solapen entre sí.

En el esquema, se puede observar como la suma de los anchos de banda de cada una de las distintas señales, B_i , es inferior al ancho de banda del medio físico, B .

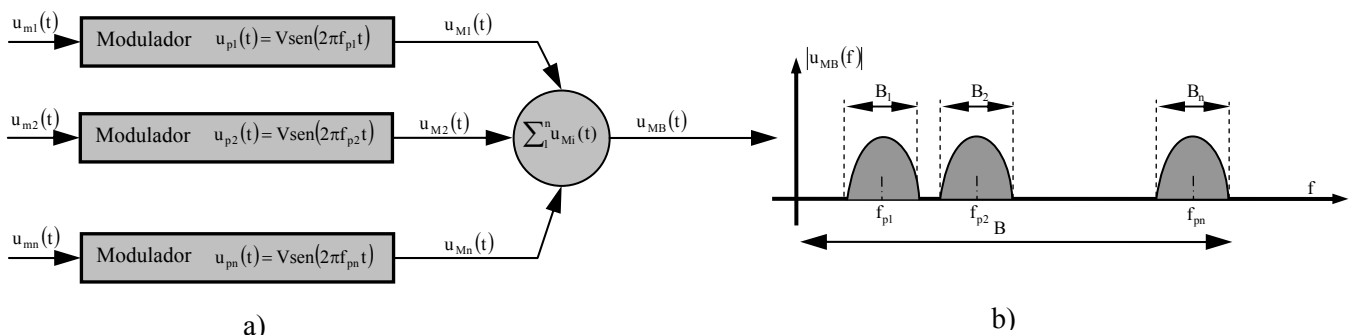


Figura 3-18: Multiplexación FDM. a) Modulación. b) Señales multiplexadas

Proceso de Demultiplexación

El proceso demultiplexador emplea un conjunto de filtros paso banda que permiten descomponer la señal multiplexada, es decir, la señal en banda base compuesta, en un conjunto de señales simples. Una vez los filtros han permitido obtener las señales moduladas individuales procedentes de diferentes dispositivos, éstas se hacen pasar por un sistema demodulador que separa las señales moduladoras de sus portadoras (Figura 3.19).

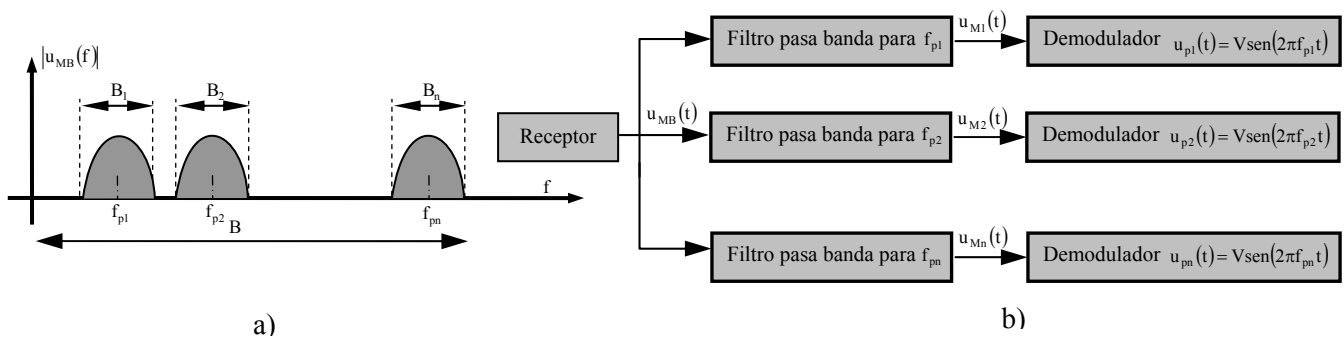


Figura 3-19: Demultiplexación FDM.

3.4.2. Multiplexación por división en tiempos

La multiplexación por división del medio en tiempos se aplica cuando la velocidad de transmisión máxima que soporta el medio físico es superior a la velocidad de transmisión de la suma de todas las señales digitales que se desea transmitir.

Existen dos tipos básicos de multiplexación por división de tiempos: *TDM síncrono* y *TDM estadístico*. A continuación se presentan ambos tipos.

Multiplexación TDM síncrona

Esta técnica permite transmitir varias señales simultáneamente si las distintas partes de cada una de ellas se entremezclan. Este proceso de mezcla se puede realizar empleando partes de cada señal de un bit, de bloques de octetos u otras cantidades de bits superiores. Al número de bits que constituyen estos bloques o porciones de señal se les llama *ranuras temporales*. Así, cada trama que se enviará por el medio consta de un conjunto de ranuras temporales, y se asigna a cada dispositivo emisor una o más ranuras temporales por trama. El resultado es una trama de bits formada por un conjunto de bits de datos procedentes de distintos dispositivos y todos ellos mezclados entre sí.

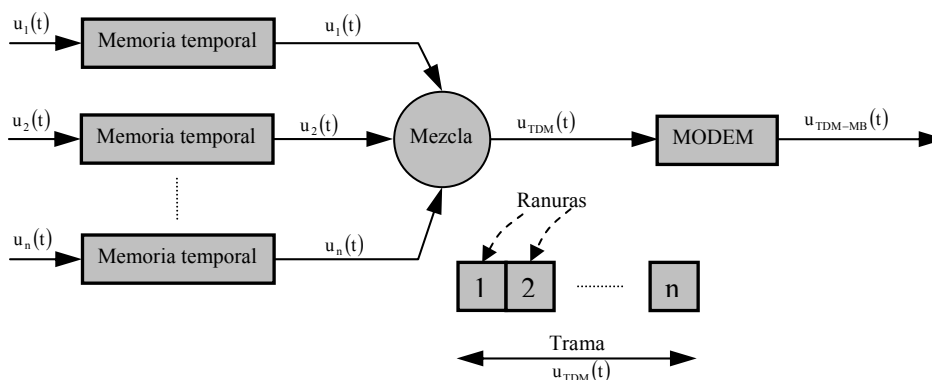


Figura 3-20: Multiplexación TDM síncrona.

Observando la Figura 3.20 se muestra un esquema general de multiplexación por división en tiempos. Así, varias señales $u_i(t)$ se quieren enviar a través de un mismo enlace de datos. Para ello, cada señal $u_i(t)$ se almacena temporalmente en un buffer. Posteriormente, se comprueban

secuencialmente los buffer para extraer los datos almacenados y componer una señal de datos mezclada $u_{\text{TDM}}(t)$ y finalmente, cada señal modulada $u_{\text{TDM}}(t)$ puede ser transmitida directamente por un medio digital o quizás necesite transformarse a señal analógica, $u_{\text{TDM-MB}}(t)$, modulándose con un MODEM para transmitirse por un medio analógico.

Por supuesto, en el dispositivo receptor, deberá procederse de modo inverso para extraer las señales $u_i(t)$ y deshacer todos y cada uno de los procesos ejecutados en la fase de multiplexación. A este proceso inverso se le conoce con el nombre de *demultiplexación*.

Por lo general, en una multiplexación TDM que se emplea para multiplexar n dispositivos conectados, donde todos y cada uno de ellos necesita enviar la misma tasa de datos, se emplean n ranuras de tiempo. De este modo, se asigna una ranura a cada dispositivo. Si la duración en tiempo de la trama de datos que componen los datos entremezclados es T , entonces la duración de cada ranura de tiempo será de T/n .

En el caso en que los n dispositivos conectados, necesiten enviar distinta tasa de datos, la multiplexación TDM tiene que emplear tres posibles estrategias. Estas estrategias se emplearán en función del tipo de tasa de datos que se necesita enviar:

- Tasa de datos distinta en los dispositivos, pero la tasa de un dispositivo sea múltiplo de la de los otros.
- Tasa de datos distinta en los dispositivos, y esas tasas no correspondan a valores múltiplos enteros unos de otros.

Para el primer caso se pueden emplear las estrategias TDM de:

- *Asignación de Múltiples ranuras*: Esta estrategia consiste en asignar más de una ranura en una trama a un mismo dispositivo de entrada. Por ejemplo, supóngase que se tienen que enviar datos de tres dispositivos A, B y C. Además, se sabe que los dispositivos A y B tienen una tasa de 10Kbps y el dispositivo C una tasa del doble, es decir, 20Kbps. Se puede asignar una ranura a A, otra ranura a B y dos ranuras a C. De este modo, en vez de emplear 3 ranuras que corresponderían a los 3 dispositivos, se emplean 4 ranuras, para conseguir múltiplos de 10Kbps.
- *Multiplexación multinivel*: Está estrategia consiste en multiplexar en varios niveles. Por ejemplo, se tienen que enviar datos de tres dispositivos A, B y C. Además, se sabe que los dispositivos A y B tienen una tasa de 10Kbps y el dispositivo C una tasa del doble, es decir, 20Kbps. Entonces, se puede multiplexar A y B y posteriormente, como si formasen una única fuente AB, luego multiplexar C con la fuente AB que se obtiene como resultado de la multiplexación anterior.

Para el segundo de los casos se puede emplear la estrategia TDM de *inserción de pulsos*, también llamada *inserción de bits*. En estos casos se opta por comprobar qué dispositivo tiene la tasa de bits más grande, y se añaden bits de relleno a las tasas de bits del resto de dispositivos para que todos tengan la misma tasa de datos.

Multiplexación TDM estadística

La multiplexación síncrona tiene algunos inconvenientes y no es tan eficiente como cabría pensar, a pesar de las estrategias adoptadas cuando la tasa de datos no es la misma en todas los dispositivos. Un ejemplo de esta ineficiencia es como se desaprovechan ranuras temporales de la trama a transmitir cuando un dispositivo de entrada no tiene datos para cargar en la ranura, porque no está en disposición de enviar datos. Esto es así, porque TDM síncrona siempre asigna ranuras temporales a los dispositivos conectados al enlace tenga o no que transmitir datos en ese momento.

Este problema puede ser solucionado haciendo que el sistema de multiplexación asigne ranuras dinámicamente, basándose en la demanda. Es decir, sólo cuando el dispositivo de entrada tenga datos que transmitir recibe la asignación de una ranura. A esta estrategia de multiplexación se le

conoce con el nombre de *TDM estadística*. En la multiplexación estadística, si se requiere multiplexar n dispositivos conectados, se emplean m ranuras de tiempo, donde $m < n$, ya que el sistema multiplexor comprueba cada dispositivo de entrada cíclicamente. Si el dispositivo tiene datos para enviar se asigna ranura y sino pasa al siguiente dispositivo y realiza el mismo proceso, y así sucesivamente.

La multiplexación estadística requiere de un procedimiento de direccionamiento, ya que al no haber ranuras reservadas y preasignadas a cada dispositivo de entrada, no se sabe en que orden van los datos, y qué ranura corresponde a cada dispositivo de entrada. Este hecho obliga a insertar bits adicionales en la cabecera de cada ranura, que permitan identificar el dispositivo.

Comparación de multiplexaciones TDM síncronas con distintas estrategias

En la figura 3.21, se muestra el funcionamiento de las distintas estrategias de TDM síncrono. Así, en la Figura 3.21a se observa como se multiplexan 4 canales de 50Kbps cada uno utilizando una ranura de tiempo de 2 bits y un TDM síncrono porque la tasa de datos es la misma en todos los dispositivos de entrada. Sin embargo, en la figura 3.21b y 3.21c las tasas de los dispositivos de entrada son distintas. En concreto en la figura 3.21b se dispone de 3 canales donde uno de ellos es el doble de tasa que los otros dos, y se ha adoptado una estrategia de multiplexación multinivel de 2 niveles de multiplexación. Primero se multiplexan las fuentes A y B, y el enlace resultante AB se emplea para multiplexarlo con el dispositivo C. De ese modo la trama queda dividida en 2 ranuras de 4 bits, una ranura para el resultado de la multiplexación de AB y otra para C. Y finalmente, en la figura 3.21c se dispone de 4 canales, dos de ellos tienen el triple de tasa de datos que los otros dos. Se ha optado por emplear la técnica de múltiples ranuras, para asignar más de una ranura a la fuente A y B. En concreto se han asignado ranuras de un bit para C y D, y tres ranuras de un bit para A y B. En todos estos ejemplos se ha presupuesto que el tamaño de trama a emplear es de 8 bits, y que la máxima velocidad que soporta el enlace es de 200Kbps.

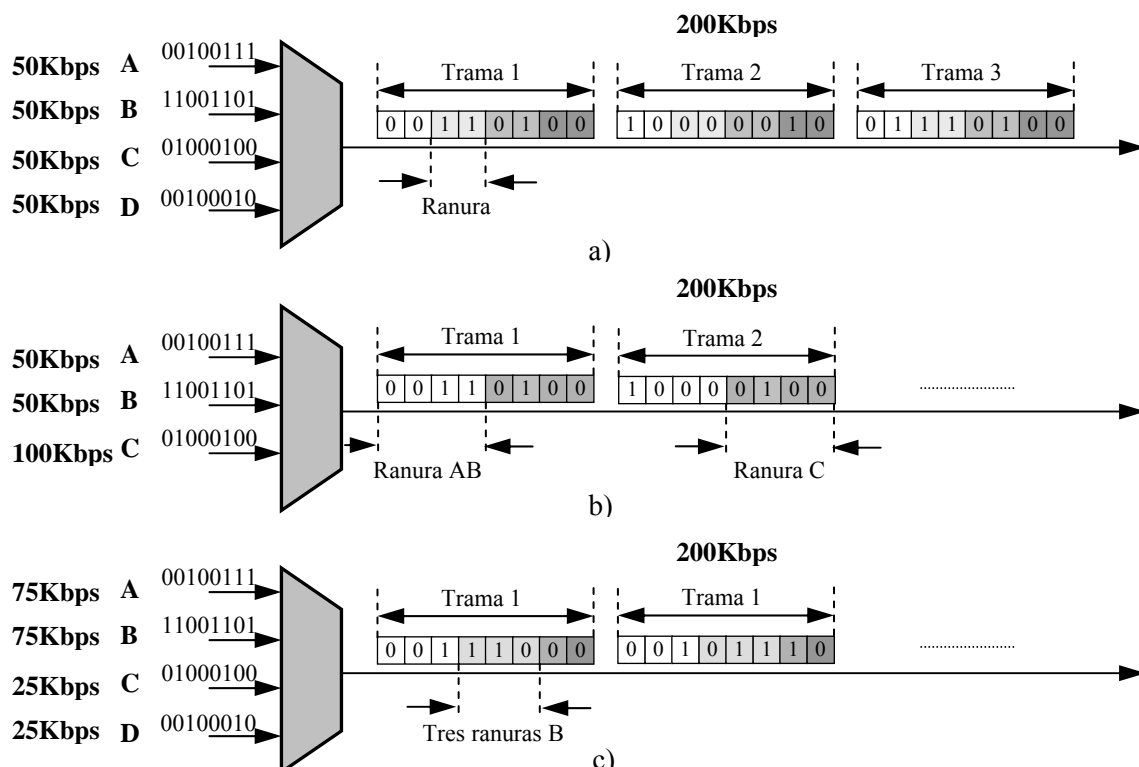


Figura 3-21: Ejemplos de Multiplexación. a) TDM síncrono. b) TDM síncrono multinivel. c) TDM síncrono con múltiples ranuras.

Comparación de multiplexaciones TDM síncrona y estadística

En la figura 3.22, se compara los métodos de multiplexación síncrona y estadística cuando alguno de los dispositivos no tiene datos para enviar. En tal caso, en el TDM síncrono aparecen ranuras vacías, que muestran la ineficiencia de este método. Sin embargo, el TDM estadístico como se observar es mucho más eficiente con el medio físico, enviando los datos en menos tiempo.

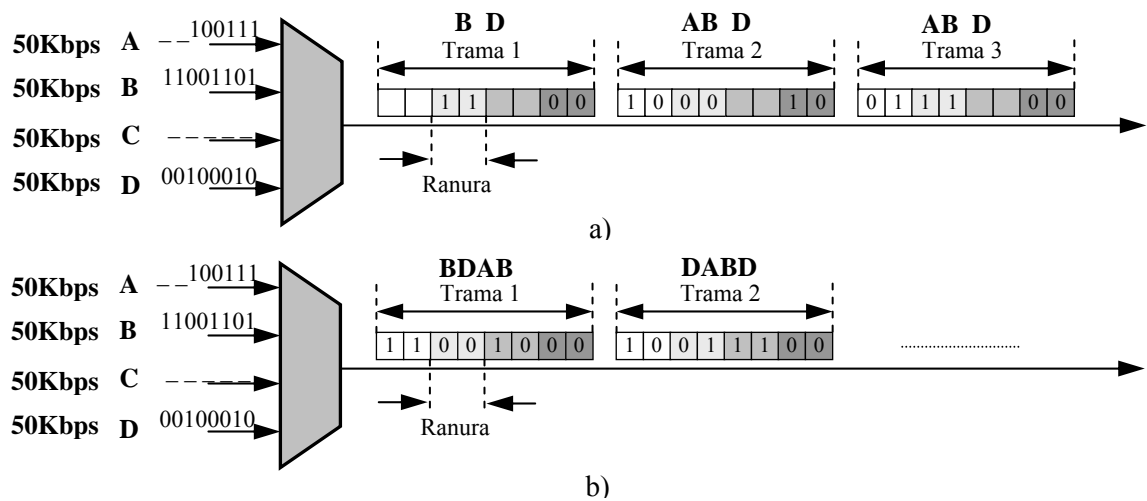


Figura 3-22: a) TDM síncrono con ranuras vacías. b) TDM estadística.