

Introducción

Tanto la información analógica como la digital pueden ser codificadas mediante señales analógicas o digitales.

Datos digitales, señales digitales: se logra asignando un nivel de tensión al 1 binario y otro distinto al 0. Para mejorar las prestaciones hay que utilizar códigos distintos al anterior, alterando el espectro de la señal y proporcionando capacidad de sincronización.

Datos digitales, señales analógicas: los módems convierten los datos digitales en señales analógicas para transmitir a través de líneas analógicas. Las técnicas básicas son la *modulación por desplazamiento de amplitud* (ASK), *modulación por desplazamiento de frecuencia* (FSK) y *modulación por desplazamiento de fase* (PSK).

Datos analógicos, señales digitales: voz y video se digitalizan para ser transmitidos en sistemas digitales. La técnica más sencilla es la *modulación por impulsos codificados* (PCM) la cual implica un muestreo de los datos analógicos y una cuantización de las muestras.

Datos analógicos, señales analógicas: los datos analógicos se modulan mediante una portadora para generar una señal analógica en una banda de frecuencias diferente, la cual se puede utilizar en un sistema de transmisión analógico. Las técnicas básicas son la *modulación de amplitud* (AM), *modulación de frecuencia* (FM) y la *modulación de fase* (PM).

En la **señalización digital**, una fuente de datos $g(t)$, que puede ser analógica o digital, se codifica en una señal digital $x(t)$. La forma de onda que tome $x(t)$ dependerá de la técnica de codificación elegida. La codificación se puede elegir intentando minimizar el ancho de banda o para minimizar la tasa de errores.

La **transmisión analógica** se basa en la señal continua de frecuencia constante denominada **señal portadora**. Los datos se pueden transmitir modulando la señal portadora. La **modulación** es el proceso de codificar los datos generados por la fuente en la señal portadora de frecuencia f_c . Todas las técnicas de modulación se basan en la modificación de los 3 parámetros fundamentales de la portadora. A, F y ϕ .

La señal de entrada se denomina señal moduladora o, también, **señal en banda base**. A la señal resultante de la modulación de la portadora se le denomina señal modulada, ésta es una señal pasabanda. La localización del ancho de banda dependerá de f_c , ya que, por lo gral, estará centrado en torno a ésta.

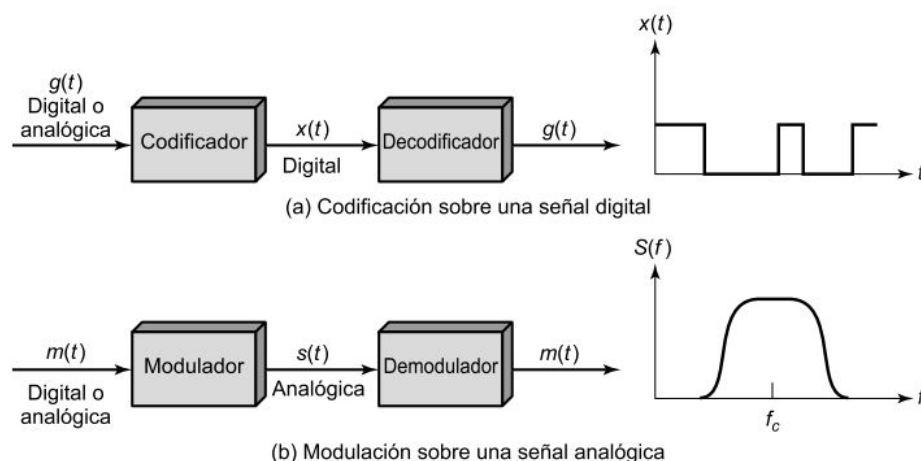


Figura 5.1. Técnicas de codificación y modulación.

Datos digitales, señales digitales

Una señal digital es una secuencia de pulsos de tensión discretos y discontinuos.

Si todos los elementos de señal tienen el mismo signo algebraico la señal es **unipolar**. En una señal **polar**, por el contrario, un estado lógico se representará mediante un nivel positivo de tensión y el otro mediante un nivel negativo. La **velocidad de transmisión**, es la velocidad, expresada en bits por segundo, a la que se transmiten los datos. La **velocidad de modulación**, es la velocidad a la que cambia el nivel de la señal, que dependerá del esquema de codificación elegido. Esta última se expresa en **baudios**, que equivale a un elemento de señal por segundo.

Tareas involucradas al interpretar las señales digitales en el receptor: Primero, el receptor debe conocer o determinar la duración de cada bit. Segundo, el receptor debe determinar si el nivel de cada bit es alto (0) o bajo (1). Estas tareas se realizan muestreando a la mitad del intervalo temporal que ocupa cada bit y comparando posteriormente el valor obtenido con un umbral. Debido al ruido y otros defectos en la transmisión puede que haya errores.

¿Qué factores determinan el éxito o el fracaso del receptor al interpretar la señal de entrada?

Hay 3 factores importantes: la relación Señal ruido, la velocidad de transmisión y el ancho de banda. Si se supone los otros factores constantes, se puede afirmar que:

- El incremento en la velocidad de transmisión aumentará la tasa de errores por bit. (BER).
- Un incremento en la SNR reduce la tasa de errores por bit.
- Un incremento del ancho de banda permite un aumento en la velocidad de transmisión.

Hay otro factor que se puede utilizar para mejorar las prestaciones del sistema, el cual no es otro sino el propio **esquema de codificación**, que es simplemente la correspondencia que se establece entre los bits de los datos con los elementos de señal.

A continuación se consideran los siguientes procedimientos a tener en cuenta para la evaluación y comparación de las técnicas de codificación.

-Espectro de la señal: La ausencia de componente continua es una característica deseable. Si la señal tiene componente continua, para su transmisión se requiere la existencia de una conexión física directa; si la señal no contiene componente continua, es posible su transmisión mediante transformadores acoplados. De esta manera, se proporciona un aislamiento eléctrico excelente y se reducen las interferencias. Un buen diseño debería concentrar la potencia transmitida en la parte central del ancho de banda de la señal transmitida. En tal caso, se tendrá una distorsión menor en la señal recibida.

-Sincronización: para determinar el inicio y fin de cada bit. Proporcionar la sincronización mediante la propia señal transmitida se puede conseguir si se adopta un esquema de codificación adecuado.

-Detección de errores: Es función de la capa de enlace de datos. Pero, es útil incorporar alguna capacidad de detección de errores en el propio esquema de codificación, situado en la capa física, permitiendo que los errores se detecten más rápidamente.

-Inmunidad al ruido e interferencias: algunos códigos exhiben un comportamiento superior que otros en presencia de ruido.

-Coste y complejidad: En particular, cuanto mayor es la velocidad de modulación para una velocidad de transmisión dada, mayor es el coste. En lo que sigue se describirán algunos códigos que implican una velocidad de modulación superior a la velocidad de transmisión de datos real.

No Retorno a Zero: un nivel de tensión para un 1 y otro nivel para el 0. La ausencia de tensión para representar el 0 binario, mientras que el nivel constante positivo para representar el 1. Este código se denomina **NRZ** (Non Return to Zero). Sin embargo, es más habitual usar el nivel negativo para representar un valor binario y una tensión positiva para el otro. Este código se denomina **no retorno a nivel cero NRZ-L**.

Una variante del NRZ se denomina **NRZI** (Noreturn to Zero, invert on ones). AL igual que NRZ-L y NRZI mantiene constante el nivel de tensión durante la duración de un bit. Hay una transición al inicio del intervalo de duración del bit. Un 1 se codifica mediante la transición (bajo a alto, o , alto a bajo), mientras que un cero se representa por la ausencia de transición. Una ventaja de esto es que en presencia de ruido puede ser más seguro detectar una transición en lugar de comparar un valor con un umbral.

Los códigos NRZ son fáciles de implementar y hacen un uso eficaz del ancho de banda. La principal limitación de las señales NRZ es la presencia de componente continua y la ausencia de capacidad de sincronización

Binario multinivel: Estos códigos usan más de 2 niveles de señal.

En el caso del esquema **bipolar-AMI**, un 0 binario se representa por ausencia de señal y el 1 con un pulso negativo o positivo. Los pulsos correspondientes a los 1 deben tener polaridad alternante. Este tipo de esquemas tiene las siguientes ventajas. Primero, no habrá problemas de sincronización en el caso que de cadenas largas de 1 (sigue con problemas en una cadena larga de 0). Segundo, debido a que los pulsos correspondientes a los 1 alternan el nivel de tensión, no hay componente continua. Además, el ancho de banda de la señal resultante es menor que en NRZ. Por último, la alternancia entre los pulsos proporciona una forma sencilla de detectar errores.

Los códigos **pseudoternarios** comparten las características del esquema anterior. En este caso, el bit 1 se representa con ausencia de señal y el 0 mediante pulsos de polaridad alternante. (Ahora no hay sincronización en cadenas largas de 1).

En la codificación binaria multinivel, la señal puede tomar 3 valores posibles en cada elemento de señal $+A, 0$ y $-A$. El receptor está obligado a distinguir 3 valores, por esto la señal de un código binario multinivel necesita aproximadamente 3dB más de potencia que las señales de 2 valores. Dicho de otro modo, dada una SNR, la tasa de errores por bit para los códigos NRZ es significativamente menor que la correspondiente en un código binario multinivel.

Bifase: bajo el término bifase se engloba a un conjunto de técnicas de codificación alternativas diseñadas para superar las dificultades encontradas en los códigos NRZ.

Manchester: siempre hay una transición en mitad del intervalo de duración del bit. Esta transición sirve como procedimiento de sincronización, a la vez que sirve para transmitir datos: una transición de bajo a alto representa un 1 y una transición de alto a bajo representa un 0. En **Manchester diferencial**, la transición a la mitad del intervalo es sólo para sincronización. La codificación de un 0 se representa por la presencia de una transición al principio del intervalo del bit, y un 1 mediante la ausencia de una transición al principio del intervalo.

Para todas las técnicas bifase, la velocidad de modulación máxima es el doble que en los NRZ, lo que significa que el ancho de banda necesario es mayor. A su vez, estos esquemas tienen las siguientes ventajas:

-*Sincronización*: el receptor puede sincronizarse usando la transición a mitad del intervalo del bit. Estos códigos se denominan “autosincronizados”.

-*No tienen componente continua*: sin componente continua reduce las interferencias.

-*Detección de errores*: se pueden detectar errores si se descubre una ausencia de transición esperada en mitad del intervalo.

Técnicas de aleatorización: el éxito obtenido por los esquemas bifase en torno de las redes LAN a velocidades relativamente altas, no es trasladable a las redes de larga distancia. La razón principal estriba en el hecho de que la bifase requiere una alta velocidad de modulación comparada con la velocidad de transmisión obtenida para los otros.

Un enfoque alternativo consiste en utilizar alguna técnica que desordene la información. La idea en este tipo de técnicas es sencilla: reemplazar las secuencias de bits que den lugar a niveles de tensión constante por otras secuencias que proporcionen suficiente número de transiciones, de tal forma que el reloj del receptor pueda mantenerse sincronizado. En el receptor se debe identificar la secuencia reemplazada y sustituirla por la secuencia original (de la misma longitud, por lo que no afecta la velocidad de transmisión). Los objetivos de estas técnicas se pueden resumir:

-*Evitar la componente continua*.

-*Evitar las secuencias largas correspondientes a niveles de tensión nula*.

-*No reducir la velocidad de transmisión de datos*.

-*Tener capacidad de detectar errores*.

B8ZS: se denomina bipolar con sustitución de 8 ceros, el cual se basa en Bipolar-AMI. Antes mencionamos la pérdida de sincronización en cadenas largas de ceros. Para evitar este problema, la codificación se realiza con las siguientes reglas.

-Si aparece un octeto con todos ceros y el último valor de tensión anterior a dicho octeto fue positivo, dicho octeto se codifica como 00+-0-+.

-Si aparece un octeto con todos ceros y el último valor de tensión anterior a dicho octeto fue negativo, dicho octeto se codifica como 00-+0+-.

Con esto se fuerzan 2 violaciones del código AMI.

HDB3: se denomina bipolar de alta densidad de tres ceros, también basada en AMI. En este esquema las cadenas de 4 ceros se reemplazan por cadenas que contienen uno o dos pulsos. En este caso, el cuarto 0 se sustituye por una violación de código. Además, en las violaciones siguientes, se considera una regla adicional para asegurar que las mismas tengan una polaridad alternante, evitando la componente continua.

Tabla 5.4. Reglas de sustitución en HDB3.

Polaridad del pulso anterior	Número de pulsos bipolares (unos) desde la última sustitución	
	Impar	Par
-	000 -	+ 00 +
+	000 +	- 00 -

Ninguno de estos 2 esquemas contiene componente continua. La mayor parte de la energía se concentra en una región estrecha en torno a la frecuencia correspondiente a la mitad de

la velocidad de transmisión. Por tanto, estos códigos son adecuados para la transmisión a altas velocidades.

Datos Digitales, Señales Analógicas

En la red telefónica los módem se usan para que las señales estén en el rango de frecuencias de la voz, las mismas técnicas se pueden usar para módem a frecuencias más altas.

La modulación implica la modificación de uno o varios de los 3 parámetros fundamentales que caracterizan a la señal portadora: amplitud, frecuencia o fase. Para esto hay 3 técnicas de modulación que transforman los datos digitales en señales analógicas: ASK, FSK y PSK.

Modulación por desplazamiento de amplitud. Los 2 valores binarios se representan mediante 2 amplitudes diferentes de la portadora. La señal transmitida por cada intervalo correspondiente a la duración de un bit es:

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

ASK es sensible a cambios repentinos de la ganancia. Se usa para la transmisión de datos digitales en fibras ópticas.

Modulación por desplazamiento de frecuencia. El esquema más habitual es el binario BFSK. En este caso, los 2 valores se representan mediante 2 frecuencias diferentes, próximas a la frecuencia de la portadora. La señal transmitida en cada intervalo correspondiente a la duración de un bit será

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

donde f_1 y f_2 corresponden a desplazamientos de la frecuencia portadora f_c , de igual magnitud, pero en sentidos opuestos.

BFSK es menos sensible a errores que ASK.

Una señal más eficaz en el uso del ancho de banda, pero también más sensible a errores, es la FSK múltiple (**MFSK**), en la que se usan más de 2 frecuencias. En este caso, cada elemento de señalización representará más de 1 bit.

Modulación por desplazamiento de fase. En este esquema, la fase de la señal portadora se desplaza para representar los datos digitales.

PSK de dos niveles. Conocido como desplazamiento de fase binario, que utiliza 2 fases para representar los 2 dígitos binarios. La señal transmitida durante el intervalo correspondiente a un bit es

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

que cuenta con un desplazamiento de 180° , esto nos permite utilizar la forma del lado derecho.

Se puede conseguir un uso más eficaz del ancho de banda si cada elemento de señalización representa más de un bit. Por ejemplo, en lugar de un desplazamiento de fase

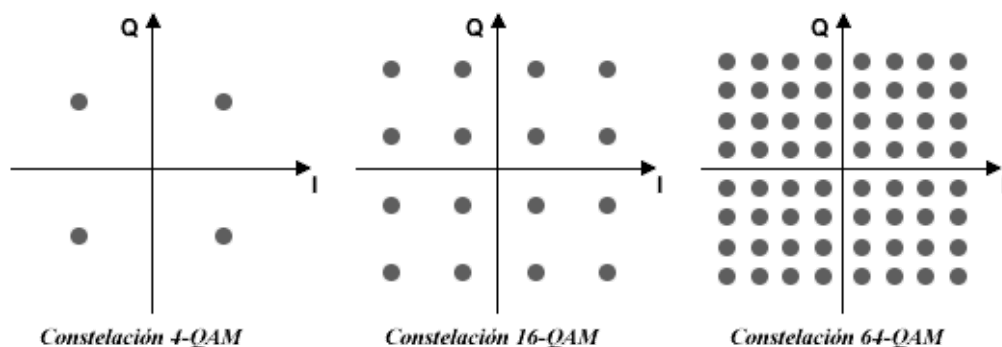
de 180° , una técnica habitual de codificación, conocida como **modulación por desplazamiento de fase en cuadratura QPSK**, considera desplazamiento múltiplos de 90° . Por lo tanto cada elemento de señalización representa 2 bits en lugar de 1.

$$\text{QPSK} \quad s(t) = \begin{cases} A \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}\right) & 11 \\ A \cos\left(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}\right) & 01 \\ A \cos\left(2\pi f_c t - \frac{3\pi}{4}\right) & 00 \\ A \cos\left(2\pi f_c t - \frac{\pi}{4}\right) & 10 \end{cases}$$

PSK multinivel. La utilización de varios niveles se puede extender para transmitir más de 2 bits de una vez. Por ejemplo, usando 8 ángulos de fase diferentes es posible transmitir de una vez 3 bits. Es más, cada ángulo puede tener más de una amplitud. Esto último pone de manifiesto la diferencia entre velocidad de transmisión (bps) y velocidad de modulación (baudios) de la señal.

Modulación de amplitud en cuadratura QAM. Es una técnica de señalización analógica que se utiliza en algunas normas inalámbricas y en las líneas ADSL. Esta técnica de modulación es una combinación de ASK y PSK. En QAM se aprovecha el hecho de que es posible enviar simultáneamente 2 señales diferentes sobre la misma frecuencia portadora, utilizando 2 réplicas de la misma, desplazadas entre sí 90° . En QAM cada portadora se modula usando ASK. Las 2 señales independientes se transmiten sobre el mismo medio. En el receptor, las 2 señales se demodulan, combinándose para reproducir la señal binaria de entrada.

Si se utiliza un esquema ASK con 2 niveles, entonces cada una de las 2 secuencias binarias se podrá representar mediante 2 estados, que combinadas dan lugar a una señal con $4(2 \times 2)$ posibles estados de señalización. Si se usa ASK con 4 niveles, entonces la secuencia combinada podrá tomar uno de entre $16(4 \times 4)$ estados. Para un ancho de banda dado, cuanto mayor sea el número de estados, mayor será la velocidad de transmisión posible. Pero, cuanto mayor sea el número de estados, mayor será la tasa potencial de errores por bit debida al ruido y a la atenuación.



Datos Analógicos, Señales Digitales

En esta sección se estudia el proceso de conversión de datos analógicos a datos digitales, este proceso también es denominado *digitalización*. Una vez que los datos analógicos se

convierten a digitales puede ocurrir una serie de cosas, las 3 más habituales son las siguientes:

- 1-Los datos digitales se transmiten usando NRZ-L.
- 2-Los datos digitales se codifican usando un código diferente a NRZ-L.
- 3-Los datos digitales se convierten a señales analógicas, usando las técnicas ASK,FSK, PSK,etc.

Un ejemplo de este último procedimiento, se da cuando se representan algunos datos de voz digitalizados, los cuales son posteriormente convertidos en señales analógicas de tipo ASK. Los datos de voz, al haber sido digitalizados, se pueden procesar como si fueran digitales, incluso cuando los requisitos de transmisión (por ejemplo, microondas) fueren la utilización de señales analógicas.

El dispositivo que se utiliza para la conversión de los datos analógicos en digitales (y al revés) se denomina *codec*.

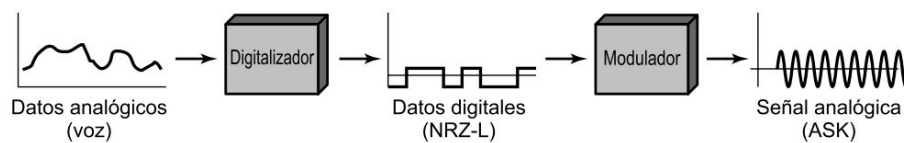


Figura 5.15. Digitalización de datos analógicos.

Las 2 técnicas más importantes usadas en los codec son la modulación por impulsos codificados y la modulación Delta.

Modulación por Impulsos Codificados (PCM). Se basa en el teorema del muestreo. (Si una señal se muestra a intervalos regulares de tiempo con una frecuencia mayor al doble de la frecuencia más alta de la señal, la señal se puede reconstruir a partir de esas muestras).

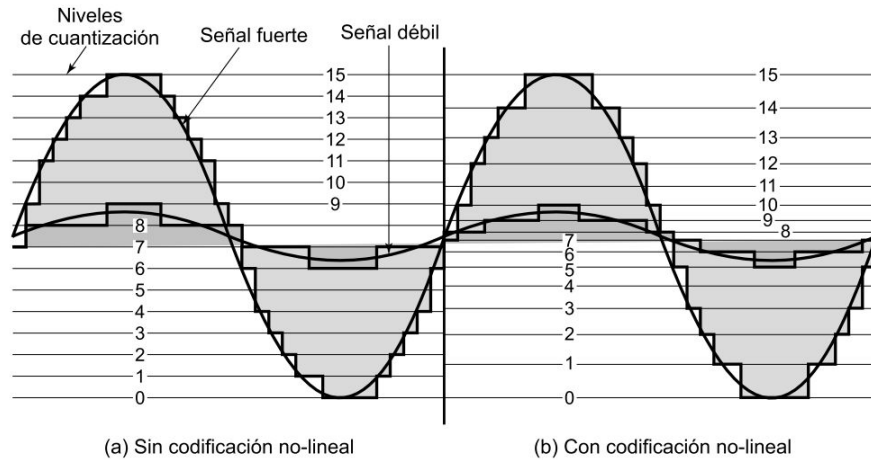
Para convertir las muestras analógicas PAM (Modulación por impulsos de amplitud) a digital, a cada una de ellas se les debe asignar un código binario.

Cada muestra PAM se aproxima mediante su *cuantización* en una de los n niveles (por ejemplo 16) posibles. Entonces cada una de las muestras se puede representar por 4 bits. Sin embargo, debido a que los niveles cuantizados son sólo aproximaciones, es imposible recuperar la señal original con exactitud.

La técnica PCM genera la señal digital tomando como entrada la señal analógica continua en el tiempo y amplitud. La señal digital resultante consiste en bloques de n bits donde cada número de n bits corresponde con la amplitud de un impulso PCM.

Al cuantizar los impulsos PAM, la señal original sólo se aproxima, por lo que no podrá ser recuperada con exactitud. Este efecto se denomina *error de cuantización* o *ruido de cuantización*.

Generalmente, el esquema PCM se refina mediante técnicas denominadas de codificación no lineal, en la que los niveles de cuantización no están igualmente separados. Al utilizar un número mayor de niveles de cuantización para señales de poca amplitud y un número menor para las señales de mayor amplitud se consigue una reducción en la distorsión media de la señal.



En un sistema PCM la codificación no lineal puede conseguir una mejora significativa de la SNR. Para señales de voz se han conseguido mejoras de 24 a 30 dB.

Modulación Delta. Aquí la entrada analógica se aproxima mediante una función escalera que en cada intervalo de muestreo sube o baja un nivel de cuantización. La característica principal de la función escalera es que su comportamiento es binario. Por lo tanto, la salida del modulador delta se puede representar mediante un único bit para cada muestra. Resumiendo, en lugar de aproximar las amplitudes, DM obtiene una cadena de bits que aproxima a la derivada 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. La función escalera se compara con la señal de entrada en cada intervalo de muestreo. Si el valor de la forma de onda muestreada supera el de la función escalera, se genera un 1; en otro caso 0. Por lo tanto, la función escalera siempre se modifica en la dirección de la señal de entrada. La función reconstruida se podrá suavizar mediante algún procedimiento de integración o mediante un filtro pasa bajo que genere una aproximación analógica a la señal de entrada. La principal ventaja de DM sobre PCM es su sencillez de implementación. No obstante, PCM consigue en general una mejor SNR para la misma velocidad de transmisión. Las técnicas de transmisión digital se utilizan cada vez más en la transmisión de datos analógicos, por las siguientes razones:

- Debido a que se usan repetidores en lugar de amplificadores, no hay ruido aditivo.
- Para señales digitales, en lugar de usar multiplexación en frecuencias (FDM) se usa la multiplexación por división en el tiempo (TDM). En TDM no hay ruido de intermodulación, aunque, como ya se ha visto, sí que está presente en FDM.
- La conversión a señales digitales permite el uso de técnicas más eficaces de conmutación.

Datos Analógicos, Señales Analógicas
AM-FM-PM.