4.4 Codificación

El codificador asigna un código binario a cada nivel de salida del cuantificador. Así si el cuantificador tiene L niveles habrá 2^n=L códigos distintos, donde cada palabra de código se corresponde con uno y solo un nivel. En el ejemplo de 8 niveles se pueden hacer 8! asignaciones posibles, se elige una de ellas que conocen transmisor y receptor, a modo de ejemplo se muestran algunas en la tabla 4.1. En general son posibles L! asignaciones.

NIVEL	Codificación 1	Codificación 2	Codificación 3	*Codificación 4*
y_4	111	000	111	*000*
y_3	110	001	110	*010*
y_2	101	010	101	*110*
y_1	100	011	100	*100*
y_{-1}	011	100	000	*101*
y_{-2}	010	101	001	*111*
y_{-3}	001	110	010	*011*
y_{-4}	000	111	011	*001*

Tabla 4.1

4.5 Modulación de Pulsos Codificados (PCM)

Así aparece la Modulación por Pulsos Codificados (*PCM, Pulse Code Modulation*). El transmisor obedece al diagrama de bloques de la figura 4.23.

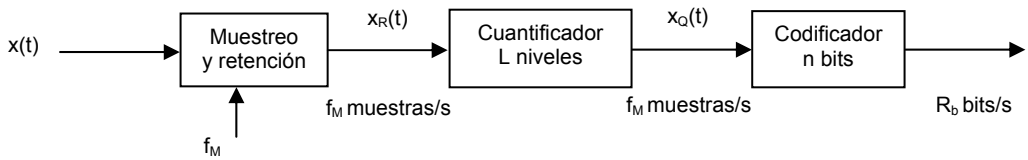

Figura 4.23

La tasa binaria de salida está dada por la expresión 4-34, y el tiempo que dura un bit (*tiempo de bit*) por 4-35.

$$R_b = f_M \cdot n \quad \text{bits/s} \tag{4-34}$$

$$T_b = \frac{1}{R_b} = \frac{1}{f_M \cdot n} = \frac{T_M}{n} \quad \text{s} \tag{4-35}$$

En la figura 4.24 se muestran señales a modo de ejemplo cuando se usa n=3 bits en el codificador (L=8 niveles). Se supone en esta figura que cuando se transmite un "0" se pone la señal a cero voltios durante T_b s, y cuando se transmite un "1" se pone la señal a +V voltios durante T_b s; esto no tiene que ser necesariamente así como se estudiará en el próximo capítulo.

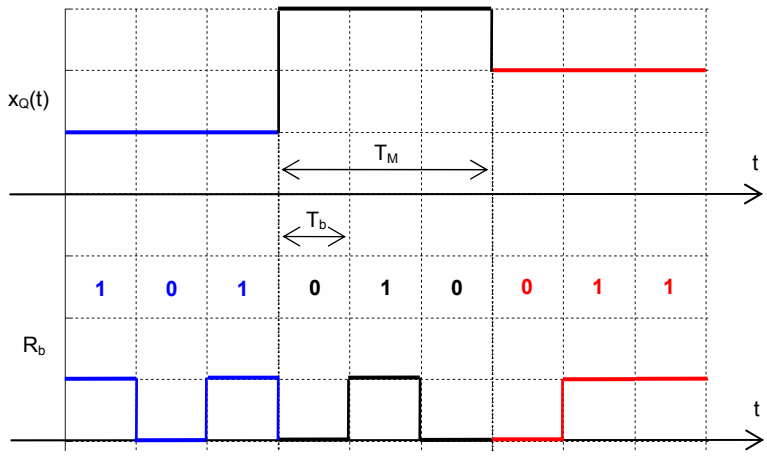

Figura 4.24

Cuestión. Sea una señal de audio de un canal telefónico que tiene componentes espectrales entre 300 y 3.400 Hz de la que se genera la señal PCM, donde la frecuencia de muestreo vale 8 kHz y se codifica con 8 bits, se pide:

- el intervalo de muestreo,
- la tasa muestras,
- el número de niveles del cuantificador,
- número de asiganciones posibles en el codificador,
- tasa binaria,
- tiempo de bit.

El receptor de PCM obedece al diagrama de bloques de la figura 4.25.

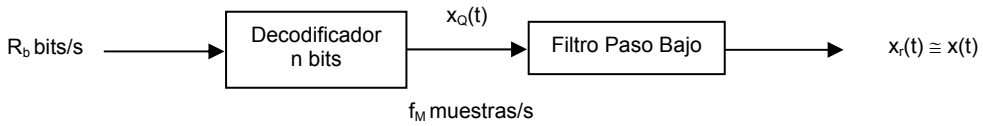

Figura 4.23

El decodificador examina cada código digital recibido y recompone el valor de la muestra cuantificada. El filtro paso bajo recupera la señal que se muestreó en el transmisor, su ancho de banda coincide con el de x(t). Cabe poner de relieve que la señal obtenida en la salida del receptor ($x_r(t)$) difiere de la señal original x(t) por dos motivos.

Por un lado existe distorsión de amplitud producida por efecto del muestreo y retención; si la frecuencia de muestreo es grande o el ciclo de trabajo de la señal muestreada es menor que 1 esta distorsión puede ser pequeña.

En segundo lugar se ha introducido en el proceso el ruido de cuantificación que es de valor pequeño y acotado.

A pesar de estos inconvenientes, la PCM ofrece ventajas, que se expondrán en las conclusiones del capítulo.

Para acabar cabe destacar la síncronía existente en el sistema PCM. En la tabla 4.2 se pone de manifiesto para el transmisor y el receptor los relojes necesarios en los diferentes bloques, además estos relojes deben tener una exacta relación de fase.

	TRANSMISOR PCM			RECEPTOR PCM
	Muestreo y retención	Cuantificador	Codificador	Decodificador
Relojes	f_M Hz	f_M Hz	f_M Hz $n \cdot f_M$ Hz = R_b Hz	f_M Hz $n \cdot f_M$ Hz = R_b Hz

Tabla 4.2

Por otro lado debe notarse que en los sistemas reales los diferentes bloques introducen retardos en la señales.

4.6 Multiplexación por División en el Tiempo (MDT)

Sean "m" señales paso bajo del igual ancho de banda, B rad/s; donde de cada una de ellas se toman f_M muestras por segundo. Finalmente estas señales se combinan en el tiempo con un multiplexor como en la figura 4.24. El muestreo realizado puede ser cualquiera de los tipos anteriores, incluso se podría incuir un cuantificador por cada señal.

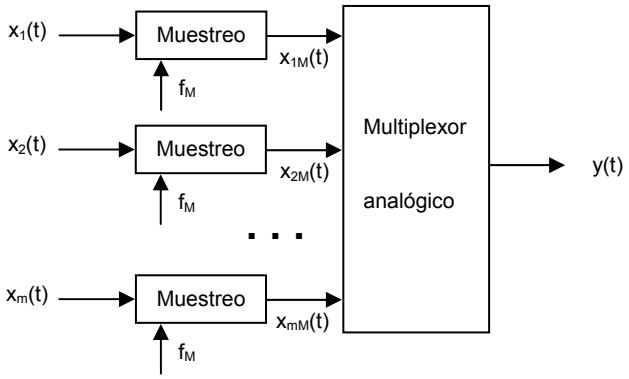

Figura 4.24

La tasa en la salida de cada muestreador vale f_M muestras por segundo. La tasa en la salida del multiplexor analógico es de $m \cdot f_M$ muestras por segundo. Esto se ilustra en la figura 4.25, donde se indican los tiempos.

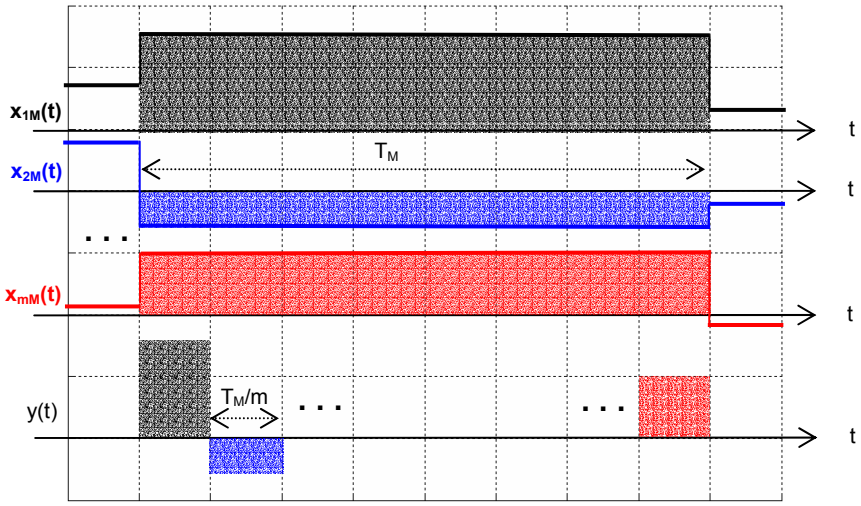

Figura 4.25

Debe notarse que las muestras de cada señal están mezcladas en frecuencia, pero separadas en frecuencia. El sistema receptor es como el de la figura 4.26.

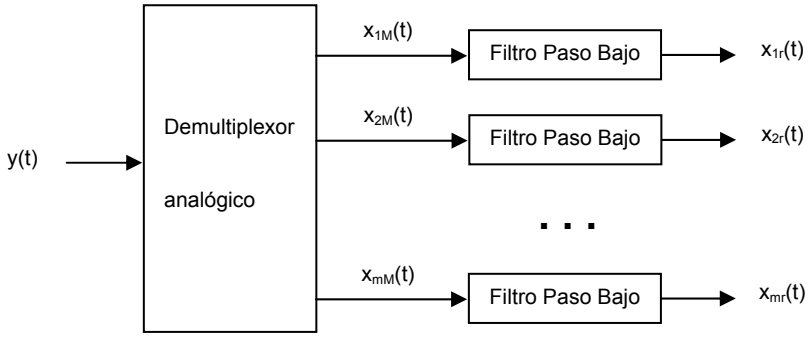

Figura 4.26

El demultiplexor separa las muestras de cada señal. Los filtros paso bajo tienen todos el mismo ancho de banda. Es de destacar la sincronía necesaria en estos sistemas y los retardos intrínsecos en las diferentes etapas.

Normalmente no se suele multiplexar las muestras, lo habitual es introducir para cada señal un cuantificador y un codificador; es decir, generar una señal PCM por cada señal de entrada, finalmente estas señales se conectan a un multiplexor digital (figura 4.27). Estos codificadores tienen una tasa de entrada de f_M muestras/s y una tasa de salida de $n \cdot f_M$ bits/s.

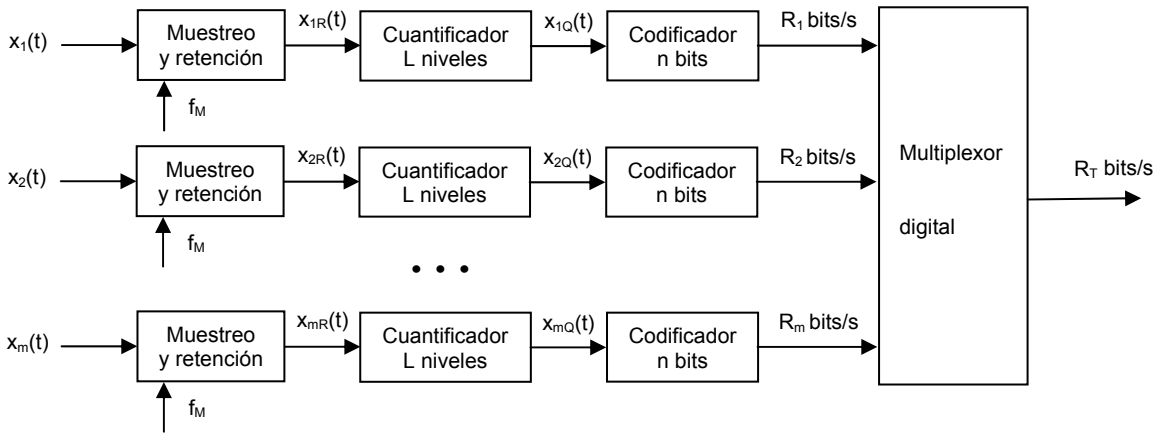

Figura 4.26

La tasa binaria final está dada por 4-36, y su el tiempo de bit en 4-37.

$$R_T = R_1 + R_2 + \ldots + R_m = m \cdot R_1 = m(f_M \cdot n) \quad \text{bits/s} \tag{4-36}$$

$$T_b = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{m \cdot R_1} = \frac{1}{m(f_M \cdot n)} = \frac{T_M}{m \cdot n} \quad \text{s} \tag{4-37}$$

En la figura 4.27 se muestra la salida del multiplexor digital, donde se supone que el números de bit de los codificadores es n=8. Se muestra el resultado cuando el multiplexor digital realiza *intercalación de palabra* o *intercalación de bit*.

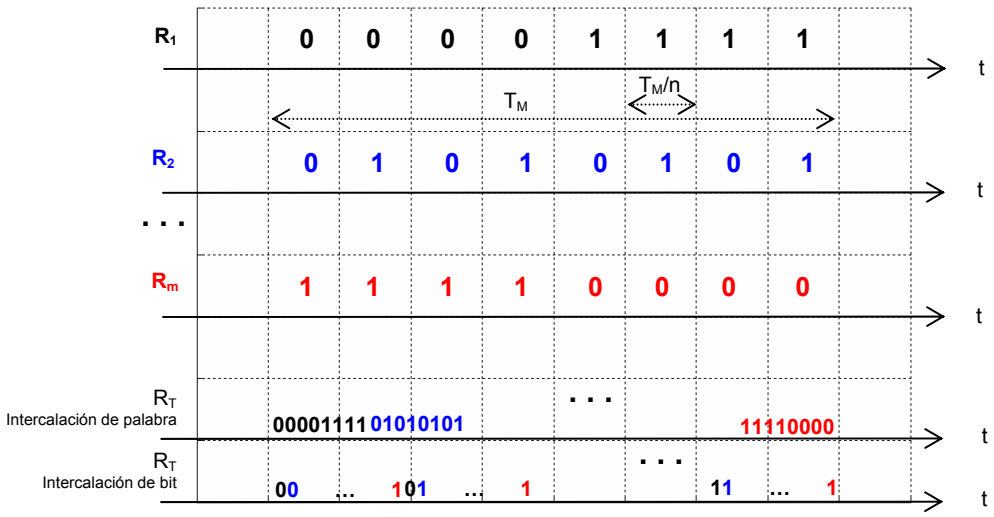

Figura 4.27

Para este caso el sistema receptor está dado por la figura 4.28. Estos decodificadores tienen una tasa de entrada de n· f_M bits/s y una tasa de salida de f_M muestras/s.

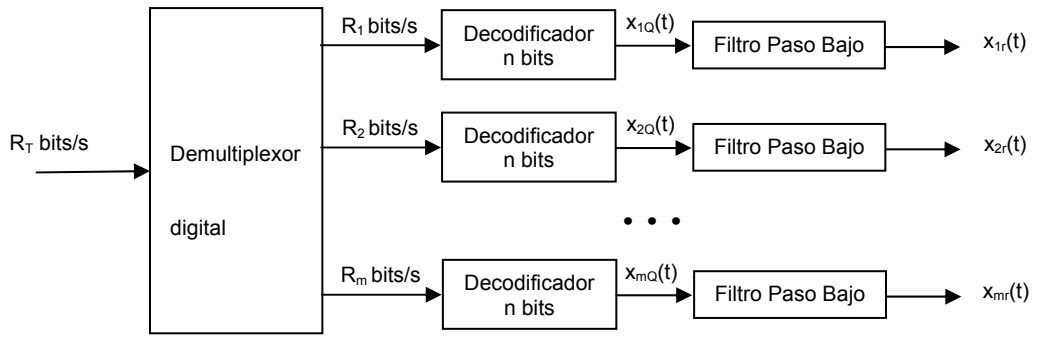

Figura 4.28

En el transmisor es posible usar solo un cuantificador y un codificador como en la figura 4.29. En este caso el codificador tiene un a tasa de entrada de $m \cdot f_M$ muestras/s y una tasas de salida de $m \cdot f_M \cdot n$ bits/s.

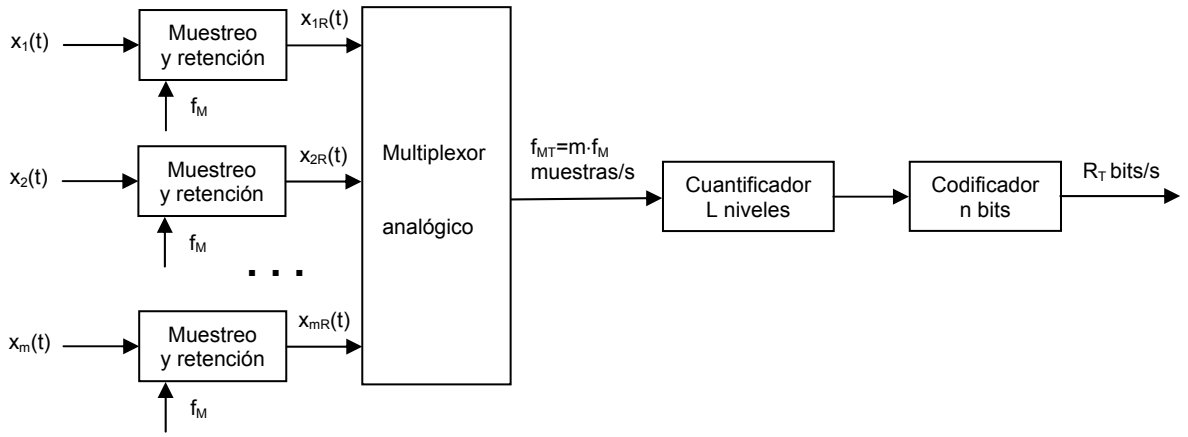

Figura 4.29

Análogamente en el receptor es posible usar solo un decodificador como en la figura 4.30. En este caso el decodificador tiene una tasa de entrada de $m \cdot f_M \cdot n$ bits/s y una tasas de salida de $m \cdot f_M$ muestras/s.

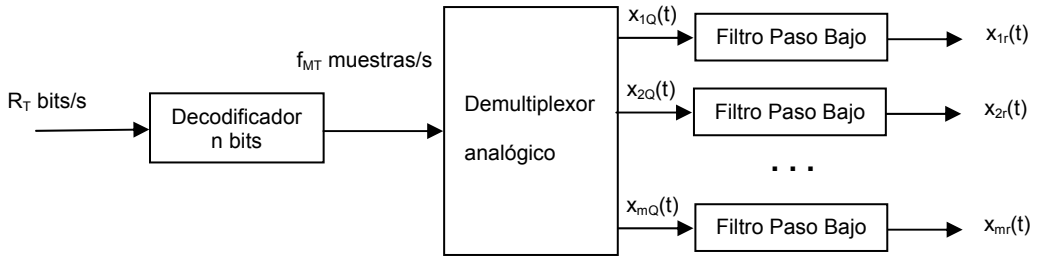

Figura 4.30

En estos sistemas el uso de un cuantificador uniforme o no uniforme no afecta a la tasas, siempre que se mantega el número de niveles, esto solo afectaría a la S/N_q.

Se insiste en la idea de que estos sistemas usan la técnica de MDT, como se muestra en la figura 4.31; las señales están mezcladas en frecuencia pero separadas en el tiempo, para facilitar la separación de las diferentes señales se añade un *tiempo de guarda* (T_g) entre ellas.

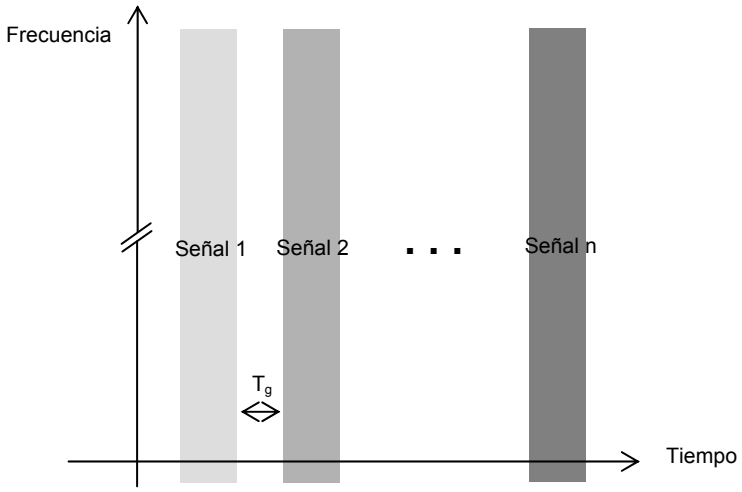

Figura 4.31

4.7 Comunicación por pulsos

Este apartado puede interpretarse como aquella situación donde la moduladora es analógica y la "portadora es digital". En este caso la señal que "porta" la información es un tren de pulsos periódico (4-38), algún parámetro de los pulsos va a variar en proporción al valor de la moduladora. A un determinado pulso de esta señal se le puede variar la amplitud, la duración y la posición del pulso, como se muestra en la figura 4.32.

$$q(t) = A \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \Pi\left(\frac{t - kT_M}{\tau}\right) \qquad (4\text{-}38)$$

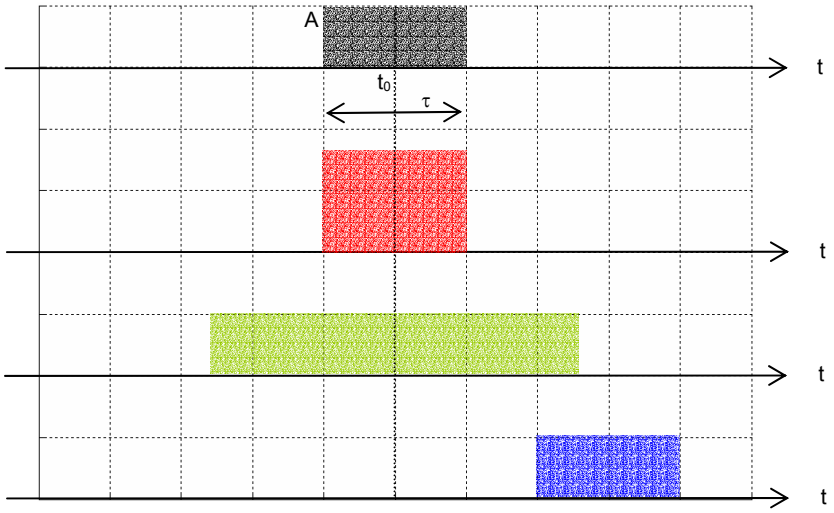

Figura 4.32

4.7.1 Modulación por Amplitud de Pulso (PAM)

Su acrónimo viene de su denomincación en inglés (*Pulse Amplitude Modulation*). Este caso coincide con el de muestreo natural o muestreo y retención (con o sin cuantificación). En el caso de muestreo y retención normalmente el ciclo de trabajo no es del 100%; es decir, $\tau<T_M$.

4.7.2 Modulación por Anchura de Pulso (PWM)

Su acrónimo viene de su denomincación en inglés (*Pulse Width Modulation*). La anchura de los pulsos varía de forma proporcional al valor de la moduladora en los instantes de muestreo, como en la figura 4.33. El valor mínimo se la señal provoca la mínima duración del pulso (τ_{min}); el máximo valor de la señal produce la máxima duración (τ_{max}), que debe ser menor que el periodo de muestreo para evitar solapamientos de los pulsos. Cuando la señal toma su valor medio la duración normalmente es la mitad del periodo de muestreo: $\tau_{x=0}=T_M/2$.

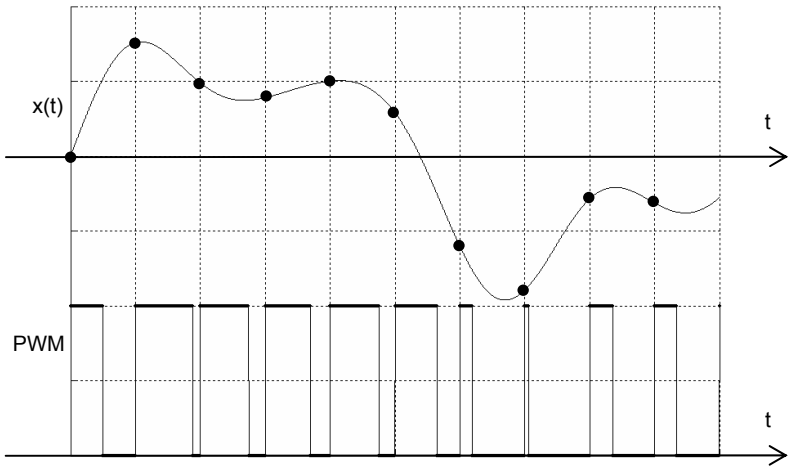

Figura 4.33

Cuestión. Estime el ancho de banda de los pulsos de la señal PWM para el caso peor.

4.7.3 Modulación por Posición de Pulsos (PPM)

Su acrónimo viene de su denomincación en inglés (*Pulse Position Modulation*). La posición de los pulsos varía de forma proporcional al valor de la moduladora en los instantes de muestreo, como en la figura 4.34. El valor mínimo se la señal provoca mínimo retardo del pulso respecto del instante de muestreo; el máximo valor de la señal produce máximo retardo del pulso. Cuando la señal toma su valor medio el desplazamiento del pulso es normalmente la mitad del periodo de muestreo ($T_M/2$). Todos los pulsos de la señal modulada tiene la misma duración, τ s.

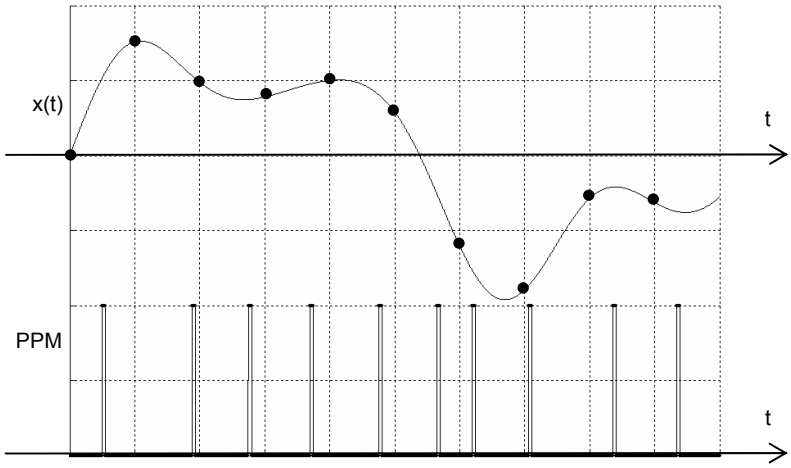

Figura 4.34

Cuestión. Estime el ancho de banda de los pulsos de la señal PWM para el caso peor.

4.8 Conclusiones

Las comunicaciones digitales presentan ventajas e inconvenientes respecto a las comunicaciones analógicas. En general son sistemas más complejos, esto queda solventado dada la facilidad de integración de circuitos digitales en un mismo integrado.

Por otro lado cabe destacar la estricta sincronía necesaria en el transmisor y el recptor; es decir, existe un sistema paralelo de sincronización, casi siempre más complicado que la cadena que lleva la información. Esto se resuelve con alguna de las técnicas de sincronización: sistema maestro, envio de pilotos de sincronismo y autosincronización. Para ello se usan circuitos especiales: Bucle Enganchado en Fase, Bucle de Costa, etc.

Por otro lado el ancho de banda aumenta considerablemente, esto no es inconveniente si se dispone de suficiente, como es el caso de los enlaces de microondas o enlaces ópticos.

En el proceso descrito aparece el N_q, pero este valor está acotado, y se consiguen altos valores de S/N_q con pocos bits por muestra de la señal (n). Si se quiere disminuir este ruido se puede aumentar n, con el inconveniente de que se aumenta la tasa binaria y el ancho de banda necesario.

Otra ventaja es que el ruido del canal no es acumulativo bajo ciertas condiciones. No importa que los pulsos en el receptor sean perfectos, lo relevante es detectar si hay o no pulso (p. eje: “0” o “1”), a partir de ese punto se puede reconstruir la información original con el solo efecto del ruido de cuantificación, de esta forma el ruido del canal puede llegar a ser despreciable en la salida del receptor. Esto no sucede en los métodos de comunicación analógicos, donde el ruido del canal es acumulativo.

Otra ventaja es que las técnicas digitales permiten el almacenamiento y retransmisión de la señal.

Finalmente el uso de ciertos códigos permite la detección o detección-correción de errores.