

Sistemas de Comunicación Digital

INF2010

Clase 4:

Modulación por codificación de pulsos

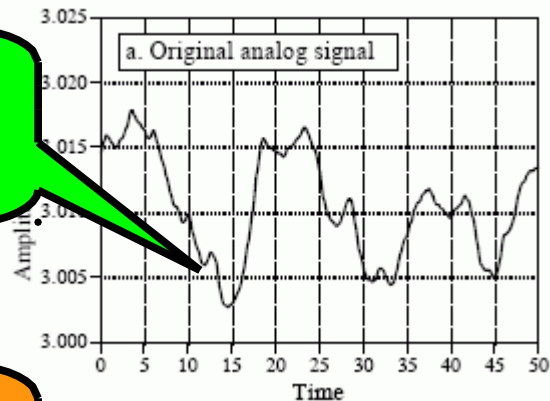
Pulsos de Banda Base

- La PCM (Modulación por Codificación de Pulsos) es una conversión A/D donde:
 - Las muestras de la señal analógica están representadas por **palabras digitales**
 - Que conforman un **flujo serial de bits**
- Para n dígitos posibles, existen $M = 2^n$ palabras de codificación **únicas y posibles**.
- Cada una de ellas responde a un **único nivel de amplitud**.
- Como la señal analógica puede tomar infinitos valores, la conversión de un nivel analógico a un código lleva el nombre de **cuantificación**

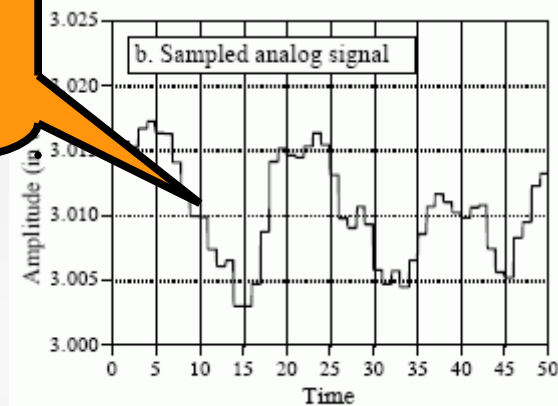
Pulsos de Banda Base

- El método es reemplazar el valor de la muestra $w(kT_s)$ por el valor más cercano permitido.

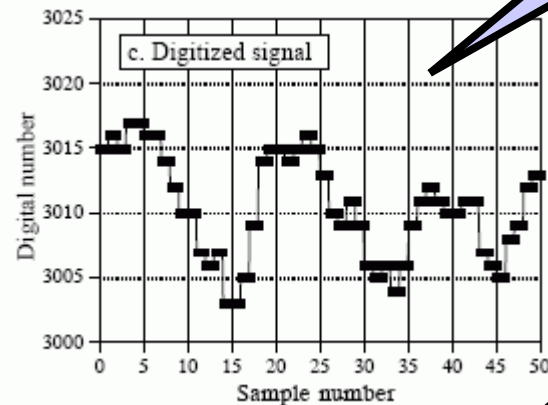
Señal Original



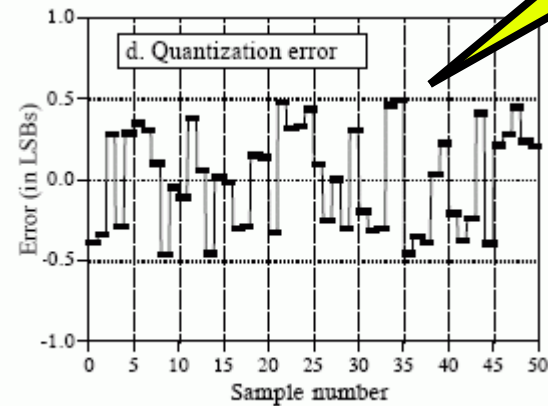
Señal Muestreada



Señal Cuantizada



Ruido de Cuantización

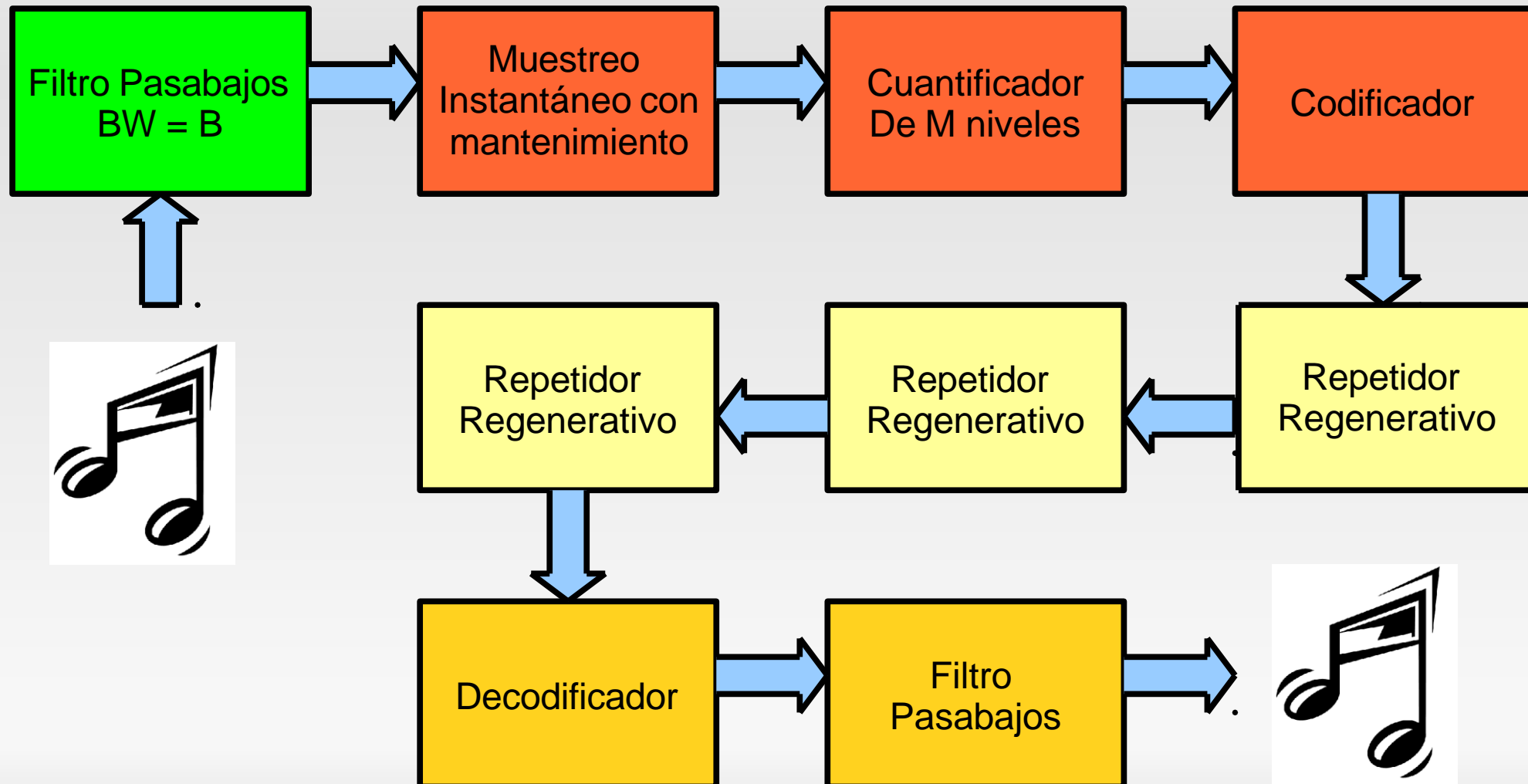


Pulsos de Banda Base

- Se puede tomar la secuencia de bits generada y transmitirla junto con otras fuentes a través de la **multiplexación**
- Es una ventaja en los sistemas PCM telefónicos para **regenerar señales**
- Mejora el **rendimiento de ruido**: un sistema digital es más inmune al ruido que uno analógico.
- La gran desventaja es que el ancho de banda del PCM es **mayor que el de la banda base**.

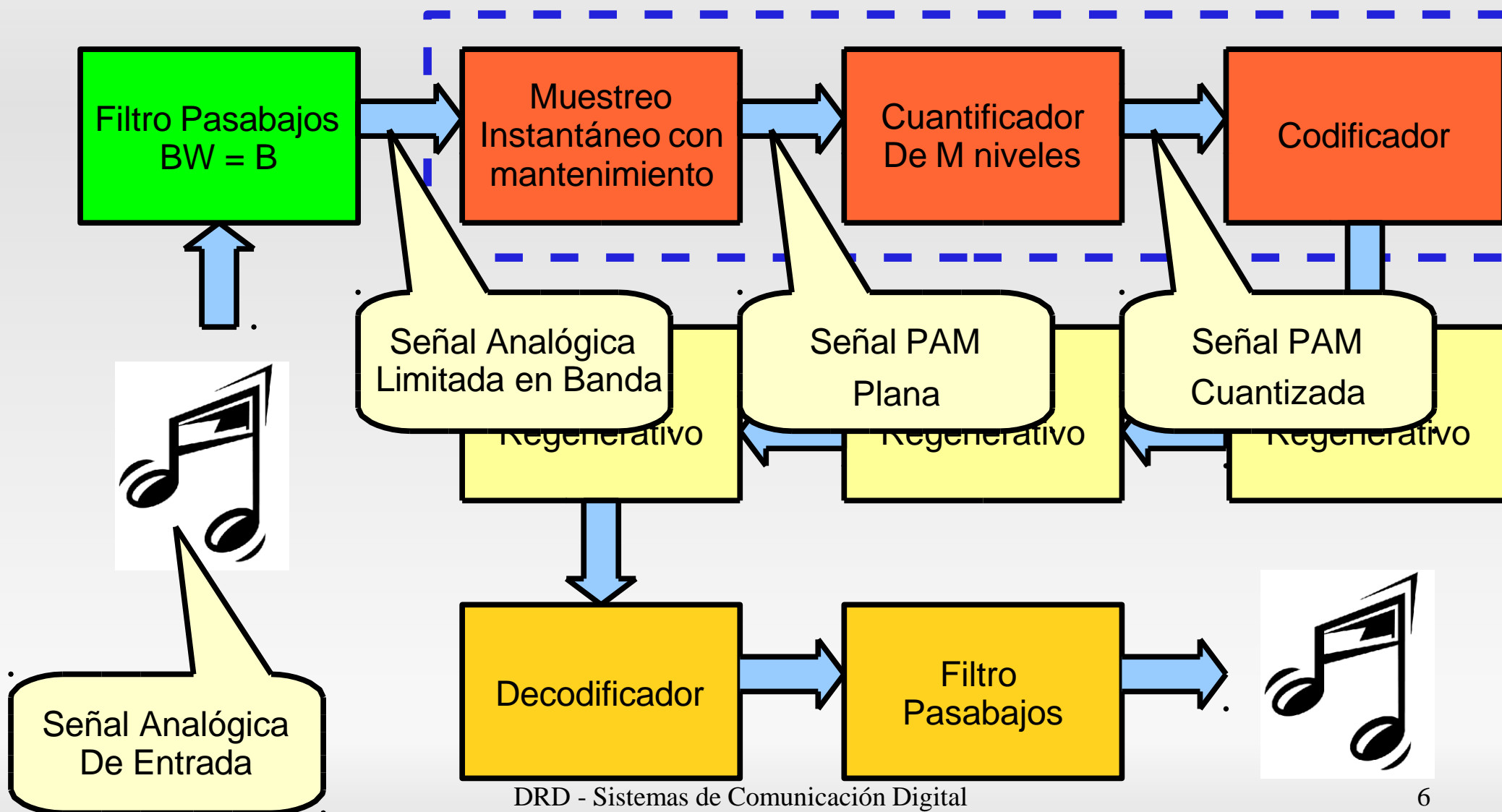
Pulsos de Banda Base

- Estructura del sistema de comunicación (sist. Telefónico):



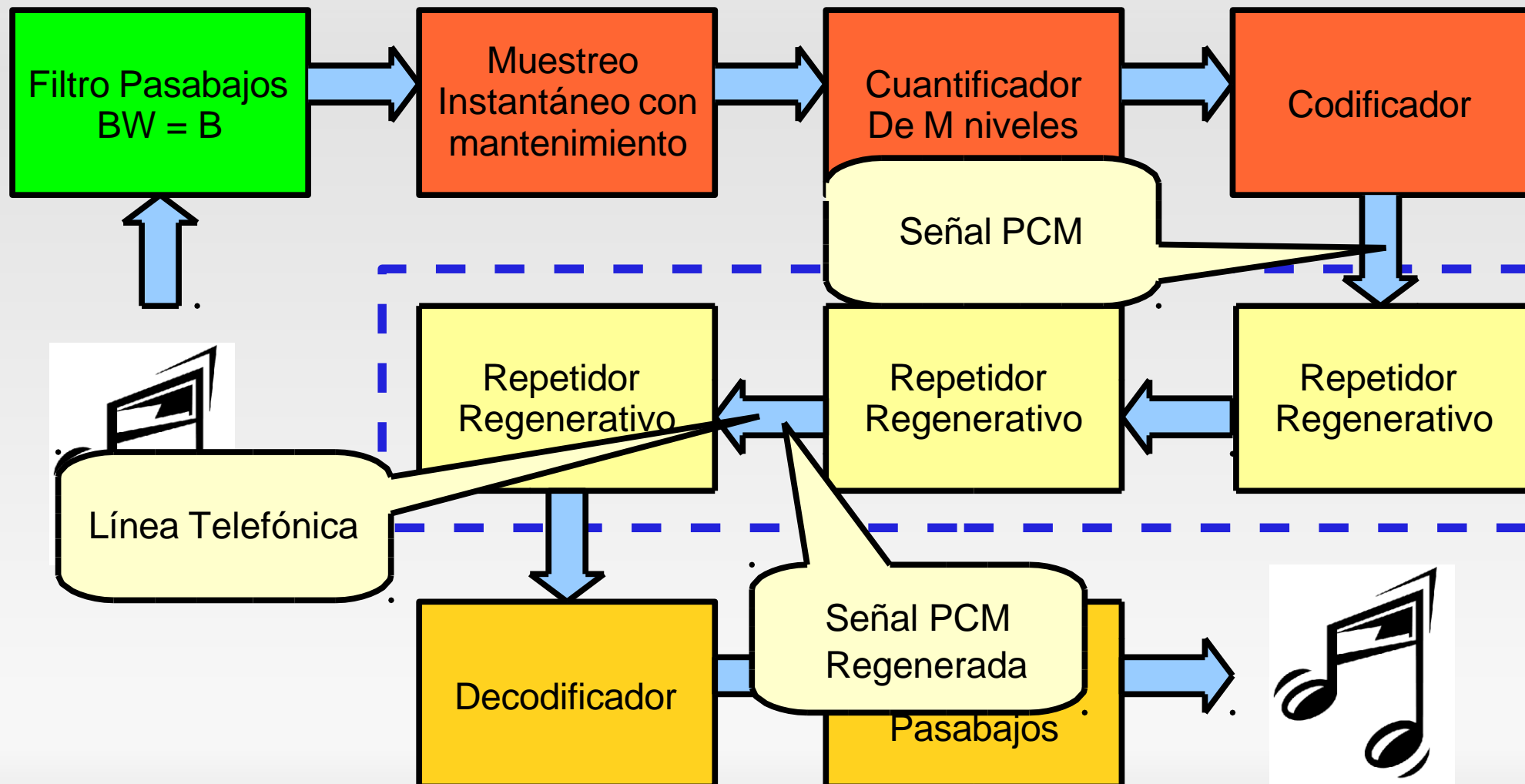
Pulsos de Banda Base

- Estructura del sistema de comunicación (sist. Telefónico):



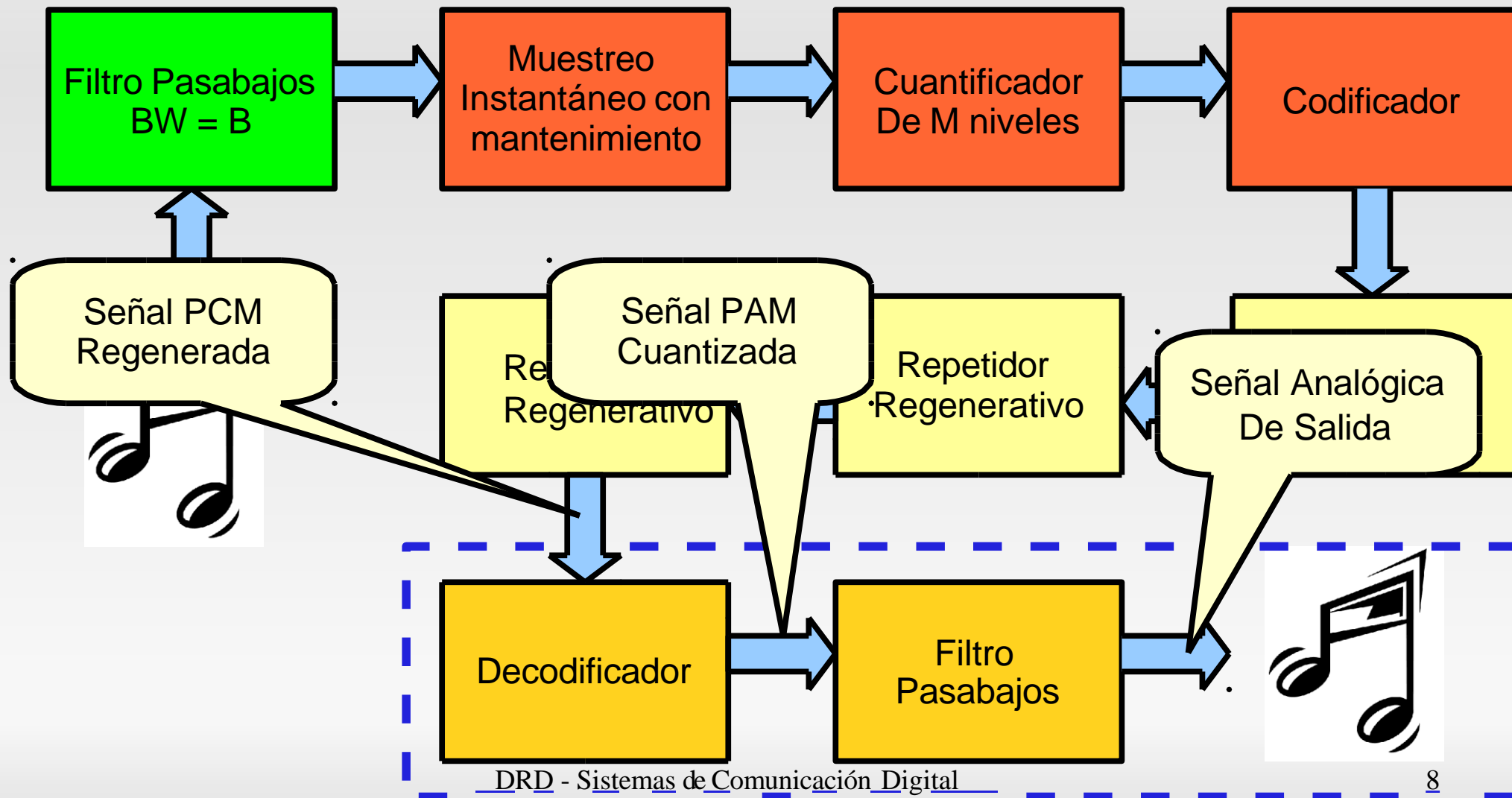
Pulsos de Banda Base

- Estructura del sistema de comunicación (sist. Telefónico):



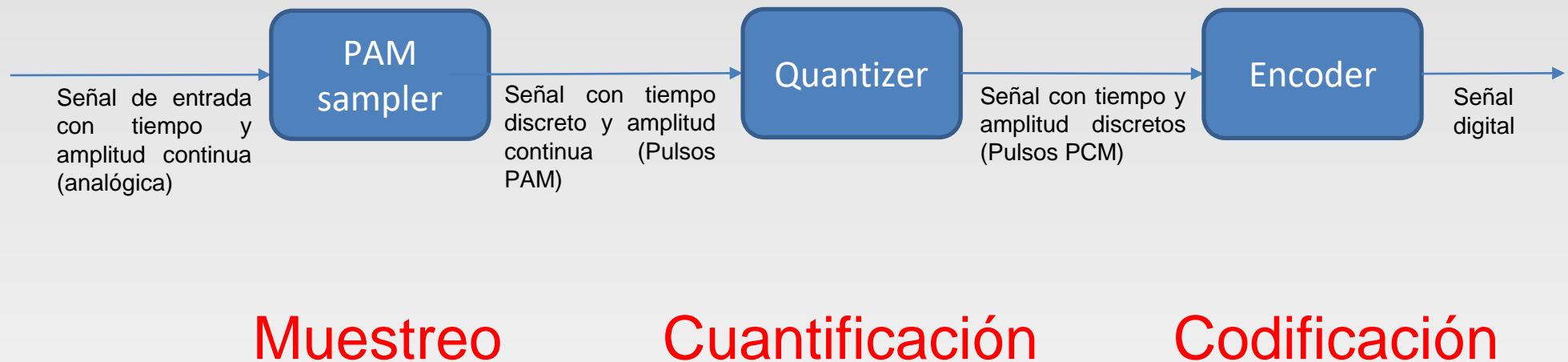
Pulsos de Banda Base

- Estructura del sistema de comunicación (sist. Telefónico):



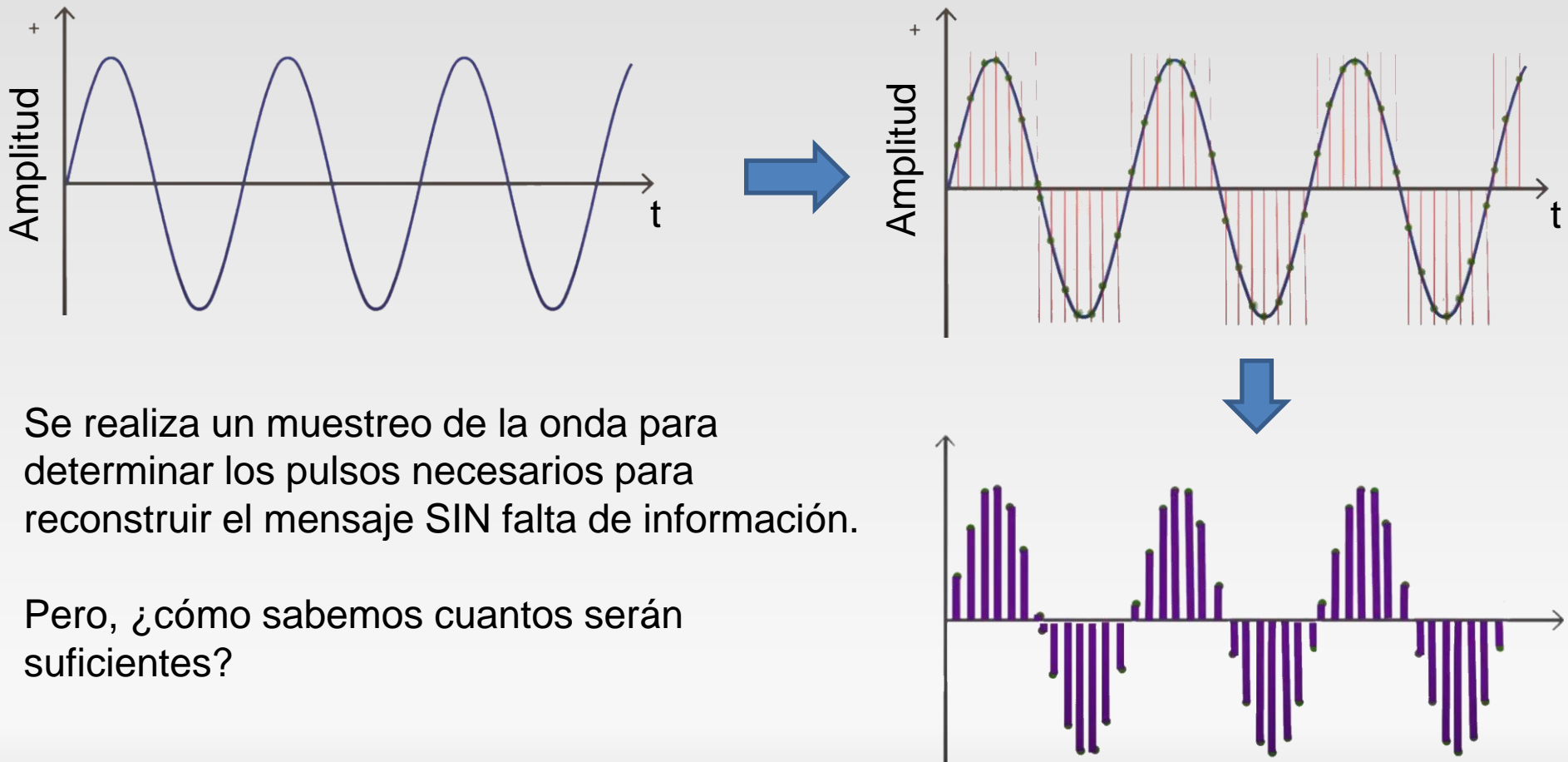
Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

El PCM posee 3 operaciones básicas



Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

¿Qué sucede en el Muestreo?



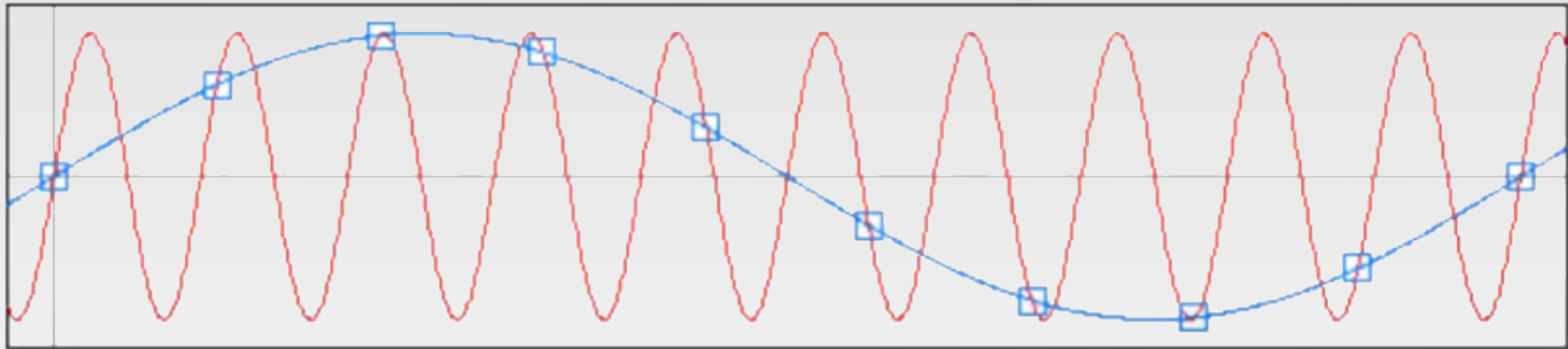
Se realiza un muestreo de la onda para determinar los pulsos necesarios para reconstruir el mensaje SIN falta de información.

Pero, ¿cómo sabemos cuantos serán suficientes?

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

Pero, ¿cómo sabemos cuantos serán suficientes?

Tener cuidado, pues podemos perder información al muestrear. A este fenómeno de se llama ALIASING



Onda roja: Señal original muestreada.
Onda azul: Señal reconstruida

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

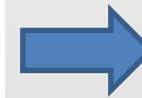
Teorema del muestreo de (Nyquist-Shannon)

Se puede reconstruir de manera exacta una señal periódica continua en banda a partir de sus muestras, si la señal está limitada en banda y la tasa de muestreo es superior al doble de su ancho de banda (B).

$$f_s \geq 2f_{\max}$$

$$f_s \geq 2B$$

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)



= 8, 9, 11, 13, 14, 15, 15

¿Cómo lo enviamos?

¡Traducimos a binario!

8 = 1000

9 = 1001

11 = 1011

13 = 1101

14 = 1110

15 = 1111



= 100010011011110111101111

3. Codificación

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

- El PCM surge de 3 operaciones básicas:
 - Muestreo
 - Cuantización
 - Codificación
- Propongamos $M=8$ niveles, y un cuantizador uniforme: todos los escalones son iguales.
- Debido a que existe una diferencia entre la señal analógica y el valor de amplitud de cada escalón, se produce un error.
- El error se nota en la reconstrucción de la señal.
- El valor peak del error es la mitad de un paso del cuantizador.

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

- Finalmente, se codifica asignando a cada nivel un código único.
- Por ejemplo, se utiliza el código Gray, cuya característica es que hay un sólo cambio de bit entre un código y el siguiente.
- La ventaja es que un error de un bit cambia un solo nivel a la salida, mientras el bit de signo no sea el afectado.
- Se podrían usar códigos que no fueran binarios (multinivel) pero esto exige un decodificador del mismo tipo, para reducir el ancho de banda.

Decimal	Gray
+7	110
+5	111
+3	101
+1	100
-1	000
-3	001
-5	011
-7	010

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

Modulación PCM

Cuantización

Muestreo

Codificación

Error

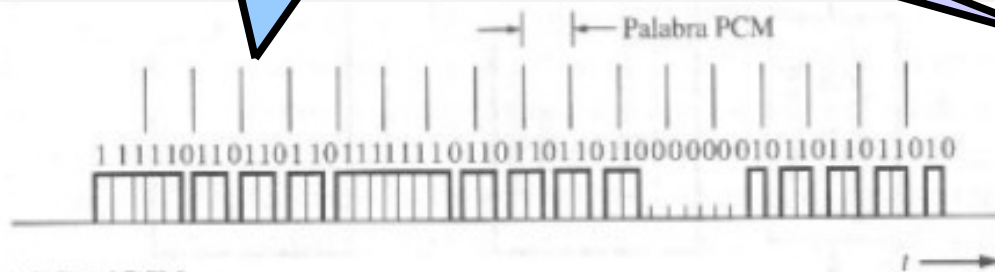
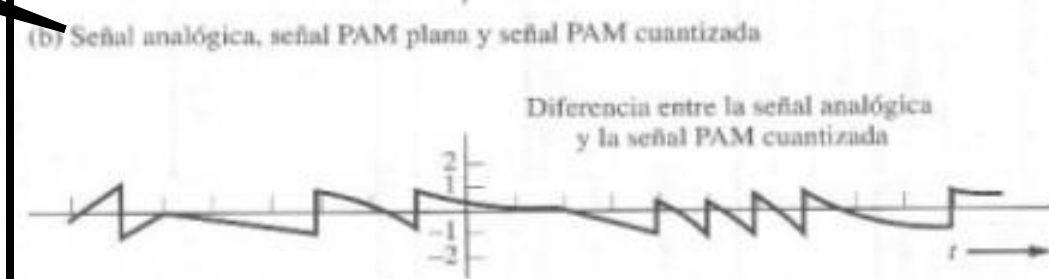
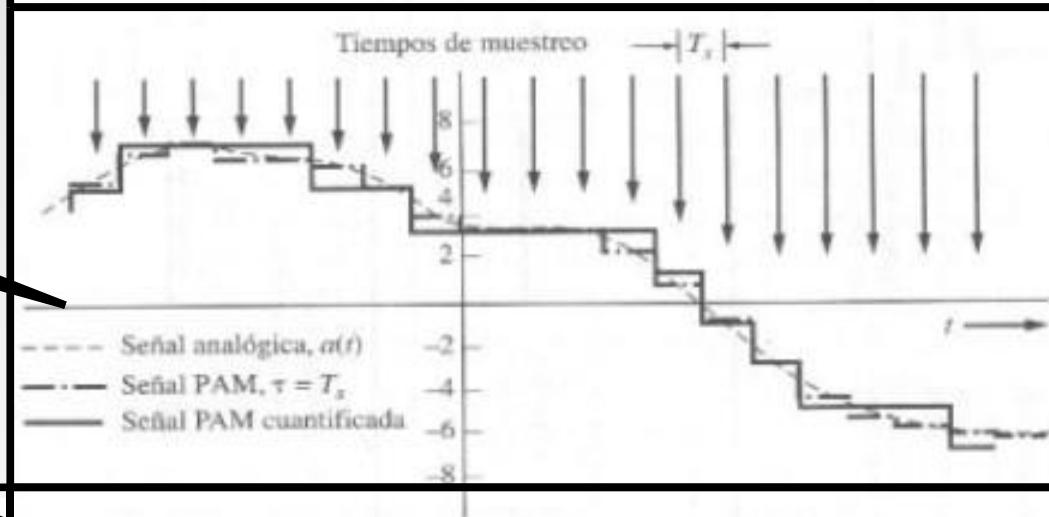
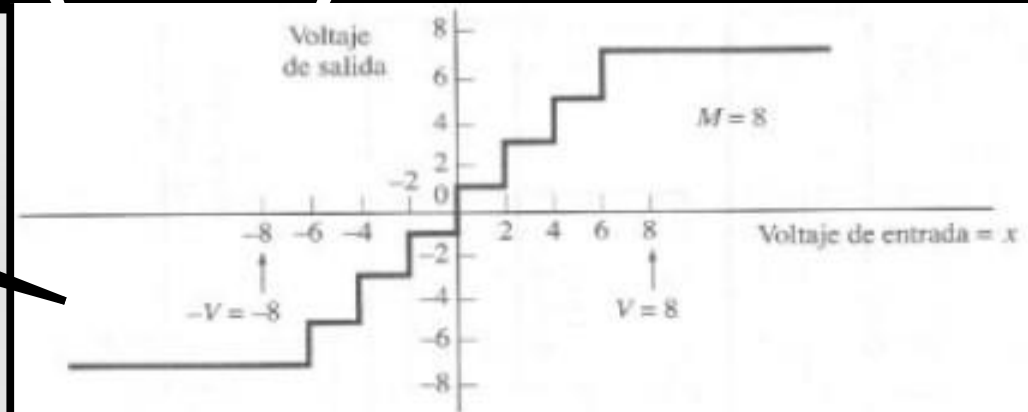


Figura 3-8 Ilustración de las formas de onda en un sistema PCM.

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

Ancho de banda PCM:

- PCM es una función no lineal de la señal de entrada.
- El espectro no está relacionado (directamente) con la señal original.
- El ancho de banda depende de la velocidad de bit (bit rate) y de la forma de onda utilizada para representar los datos.
- El bit rate es:

$$R = n \cdot f_s$$

- Con n =número de bits de la palabra PCM, y f_s es la frecuencia de muestreo.

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

- El mejor caso de ancho de banda PCM se da cuando se representa la onda con una señal tipo $\sin(x)/x$.
- Entonces, deducimos que:

$$B_{PCM} \geq \frac{1}{2} R = \frac{1}{2} n \cdot f_s$$

- Consideramos que el ancho de banda (BW) se extiende hasta el primer nulo en el dominio de la frecuencia.
- Para un pulso rectangular, esto vale:

$$B_{PCM} = R = n \cdot f_s$$

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

- Ejemplos de ancho de banda y la SNR según cantidad de niveles utilizados:

Número de niveles del cuantizador, M	Longitud de la palabra PCM, n Bits	Ancho de banda de la señal PCM	Relaciones de ruido de cuantización a potencia de señal analógica recuperada (dB)	
			$(S/N)_{\text{pico de salida}}$	$(S/N)_{\text{salida}}$
2	1	2B	10.8	6.0
4	2	4B	16.8	12.0
8	3	6B	22.8	18.1
16	4	8B	28.9	24.1
32	5	10B	34.9	30.1
64	6	12B	40.9	36.1
128	7	14B	46.9	42.1
256	8	16B	52.9	48.2
512	9	18B	59.0	54.2
1024	10	20B	65.0	60.2
2048	11	22B	71.0	66.2
4096	12	24B	77.0	72.2
8192	13	26B	83.0	78.3
16384	14	28B	89.1	84.3
32768	15	30B	95.11	90.3
65536	16	32B	101.1	96.3

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

- Efectos del ruido:
 - Ruido de cuantización
 - Errores de bits en la señal PCM recuperada, culpa del ruido del canal o de un filtrado no adecuado (ISI)
- Definimos (por ahora) a la relación de la Señal peak al promedio del ruido como:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{peaksalida}} = \frac{3M^2}{1 + 4(M^2 - 1)P_e}$$

- Y a la relación promedio de la señal respecto del promedio del ruido como:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{salida}} = \frac{M^2}{1 + 4(M^2 - 1)P_e}$$

P_e : Probabilidad de error de bit en la señal PCM

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

- P_e es la probabilidad de error en la señal PCM recuperada.
- M es la cantidad de niveles de cuantización de la señal
- En muchos sistemas, P_e es despreciable en relación con el resto de los valores de la fórmula.
- Podemos decir, simplificando:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{peaksalida} = 3M^2$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{salida} = M^2$$

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

- Si calculamos los valores en dB, nos da:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{peaksalida[dB]} = 6.02n + 3.77dB$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{salida[dB]} = 6.02n$$

- Significa que por cada nuevo bit de cuantización que se use, la relación señal a ruido mejora en 6dB.

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

- Una consideración importante es que la señal abarque todos los códigos del cuantizador.
- Para señales más débiles, el valor de SNR debe recalcularse.
- Hay 4 tipos distintos de ruido a la salida del cuantizador:
 - **Ruido de sobrecarga** (saturación)
 - **Ruido aleatorio**, debido al ruido blanco montado en la señal
 - **Ruido granular**, cuando la señal tiene una amplitud cercana al tamaño de un paso del cuantizador.
 - Se puede disminuir aumentando la cantidad de niveles
 - O usando cuantización no uniforme

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

- Y el ruido de búsqueda, debido a la oscilación cuando no hay entrada o cuando ésta es una constante
 - Se produce un tono de frecuencia $\frac{1}{2} f_s$
 - Se llama también ruido de canal en reposo

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

Ejercicio:

- Un sistema de sonido requiere un máximo de 1% de distorsión (error). La frecuencia máxima corresponde a 22kHz.
 - a) ¿Qué velocidad PCM tiene a la salida el sistema?
 - b) ¿Cuál es la relación señal a ruido (por cuantización) máxima y promedio para el caso en que la señal codificada tenga máxima amplitud?

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

Resolución:

- 1% de error implica 1 nivel entre 100. La potencia de 2 más cercana que mejora esta calidad es 128.
- Entonces, se usan 128 niveles, codificando en 7 bits.
- La señal se muestrea al **doble** de la frecuencia máxima, 22KHz: $f_{\text{muestreo}} = 44\text{KHz}$.
- Por cada muestra, hay 7 bits:
 $44000\text{muestras/s} * 7\text{bits/muestra} = 308.000 \text{ bits/s}$
- El ancho de banda mínimo para reconstruir un pulso cuadrado en banda base es 2 veces la velocidad de bits:
 $616\text{KHz (14B según tabla)}$
- Según la tabla/fórmula , para 7 bits: $46.9\text{dB y } 42.1\text{dB}$

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

- Ejemplos de ancho de banda y la SNR según cantidad de niveles utilizados:

Número de niveles del cuantizador, M	Longitud de la palabra PCM, n Bits	Ancho de banda de la señal PCM	Relaciones de ruido de cuantización a potencia de señal analógica recuperada (dB)	
			$(S/N)_{\text{pico de salida}}$	$(S/N)_{\text{salida}}$
2	1	2B	10.8	6.0
4	2	4B	16.8	12.0
8	3	6B	22.8	18.1
16	4	8B	28.9	24.1
32	5	10B	34.9	30.1
64	6	12B	40.9	36.1
128	7	14B	46.9	42.1
256	8	16B	52.9	48.2
512	9	18B	59.0	54.2
1024	10	20B	65.0	60.2
2048	11	22B	71.0	66.2
4096	12	24B	77.0	72.2
8192	13	26B	83.0	78.3
16384	14	28B	89.1	84.3
32768	15	30B	95.11	90.3
65536	16	32B	101.1	96.3

Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

En resumen:

- La codificación PCM es resultado de 3 etapas: Muestreo, cuantificación y codificación.
 - El muestreo exige al menos el doble de la frecuencia máxima de la señal de entrada
 - El ancho de banda a la salida del codificador está dado por la cantidad de bits multiplicada por la frecuencia de muestreo
-
- Existen varios tipos de ruido en la codificación lineal: sobrecarga, aleatorio y granular.
 - El ruido de cuantización se suma al ruido en la señal original