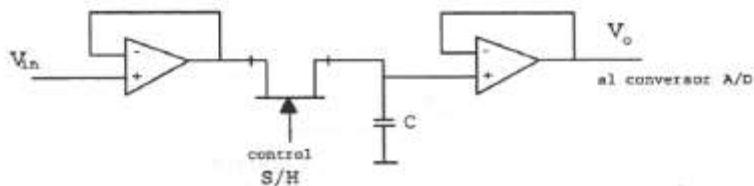
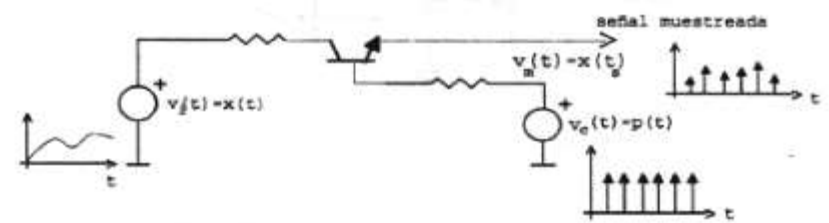


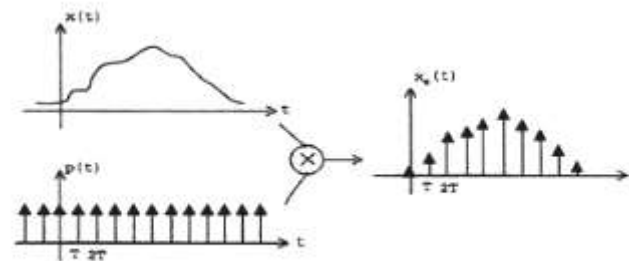
# Muestreo, Cuantificación y Codificación



Esquema básico de un módulo de muestreo y mantenimiento.

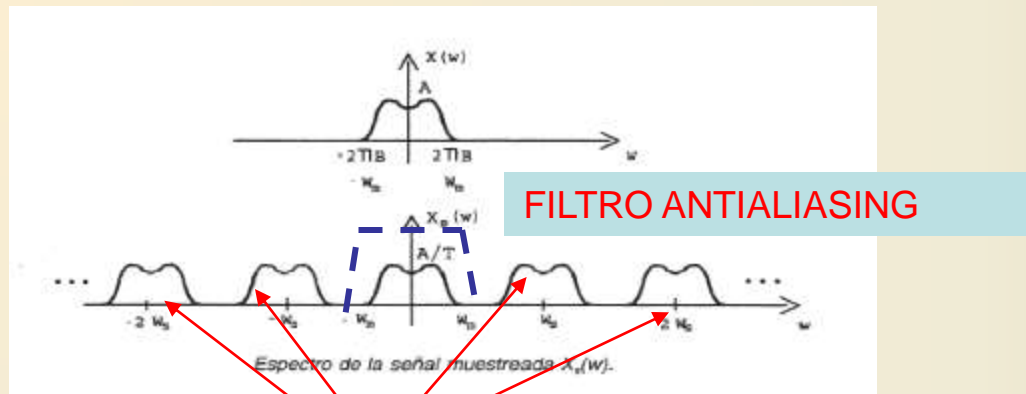


Muestreador ideal. La señal  $p(t)$  es un tren de deltas de Dirac.

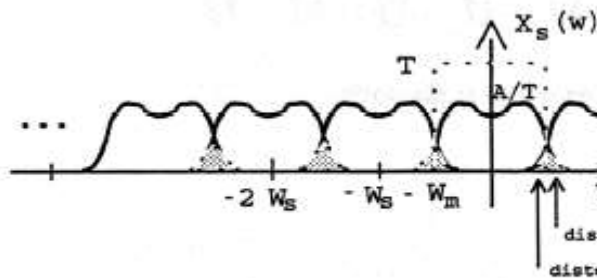


Muestreo ideal de una señal analógica.

# Espectro de la señal muestreada



Alias



Solapamiento de espectros: distorsiones

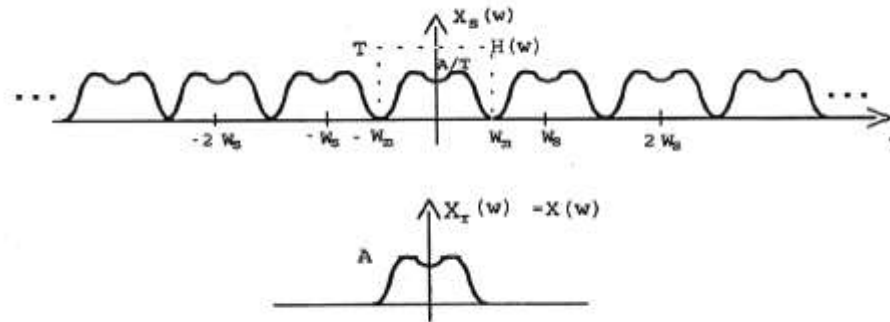
Por lo tanto, para que no se produzca "aliasing" se debe cumplir la condición de Nyquist: la frecuencia de muestreo debe de ser mayor o igual que dos veces la mayor frecuencia ( $w_m$  o  $f_{max}$ ) del espectro de la señal a muestrear.

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

( $f_N$  : frecuencia de Nyquist)

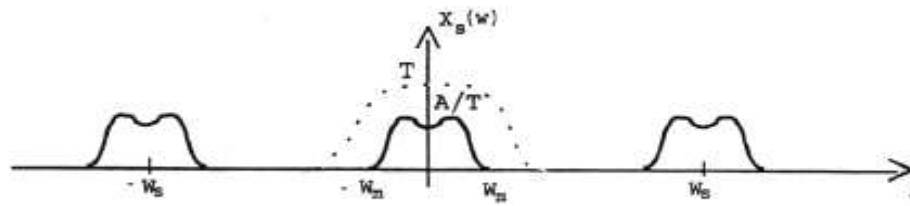
# Reconstrucción de la señal muestreada

## Filtrado ideal



*Reconstrucción de la señal por filtrado paso-bajo ideal.*

## Filtrado real. ( $w_s > 2w_m$ )

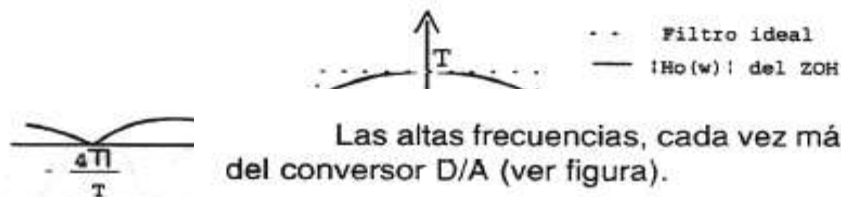


*Filtrado no ideal.*

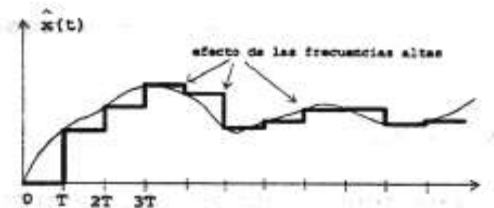
# Reconstrucción de la señal muestreada (2)

Cualquier sistema digital con un convertor D/A de los más habituales actúa efectuando una operación llamada de retención de orden cero ("zero order hold" en inglés, ZOH). La retención de orden cero consiste en mantener constante el valor de la salida hasta que hay un nuevo cambio en el convertor D/A.

En la siguiente figura en que se representa el comportamiento frecuencial del ZOH, puede comprobarse que el ZOH produce un efecto de filtrado paso-bajo.



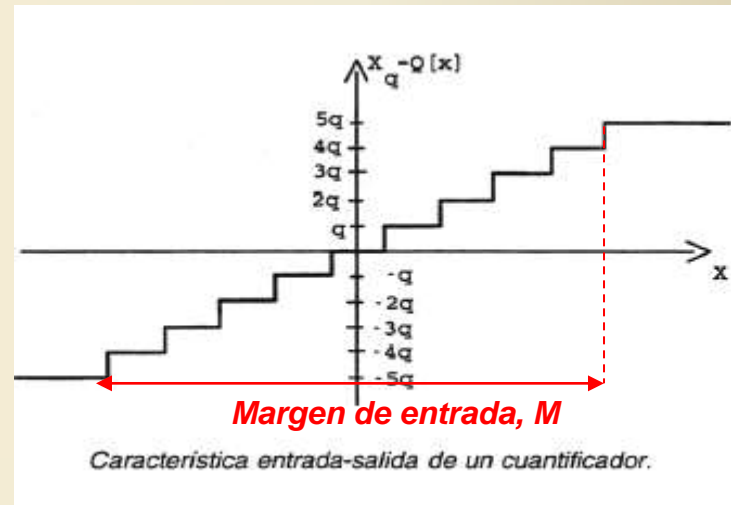
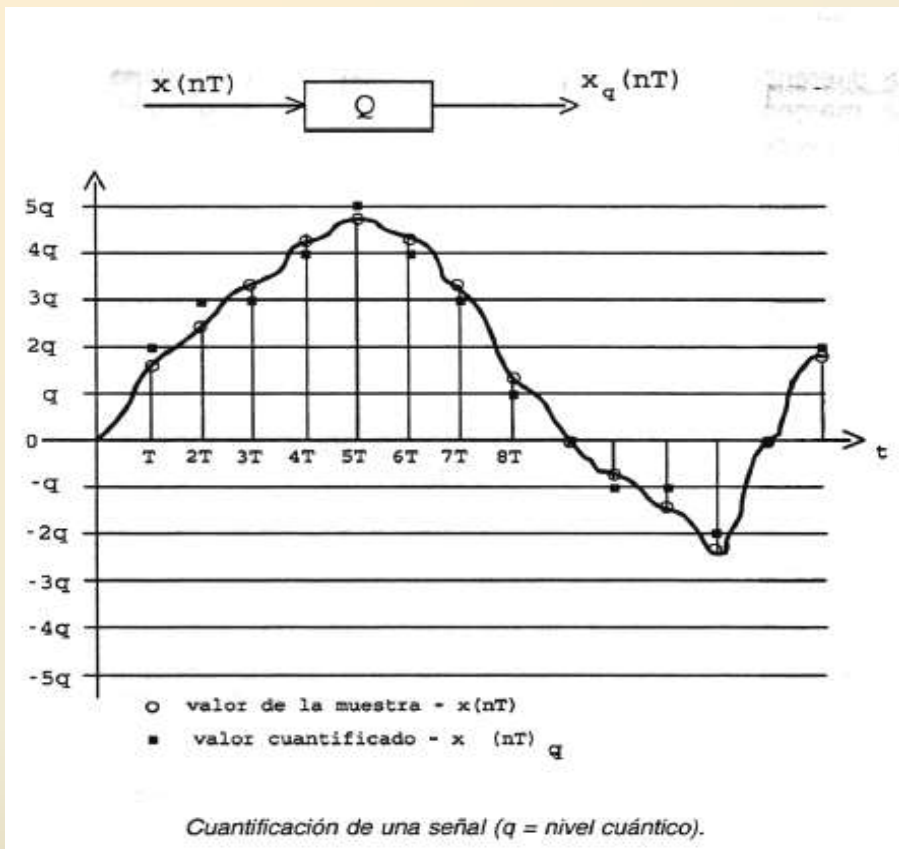
Las altas frecuencias, cada vez más atenuadas, también aparecen a la salida del convertor D/A (ver figura).



Forma temporal de la salida del convertor D/A.

Si bien el ZOH es un reconstructor peor que un filtro paso-bajo diseñado para reconstruir la señal, su calidad es válida en muchas aplicaciones. Si no fuera así, siempre puede añadirse un filtro paso-bajo a la salida del ZOH (convertor D/A) para mejorar la forma de la señal reconstruida.

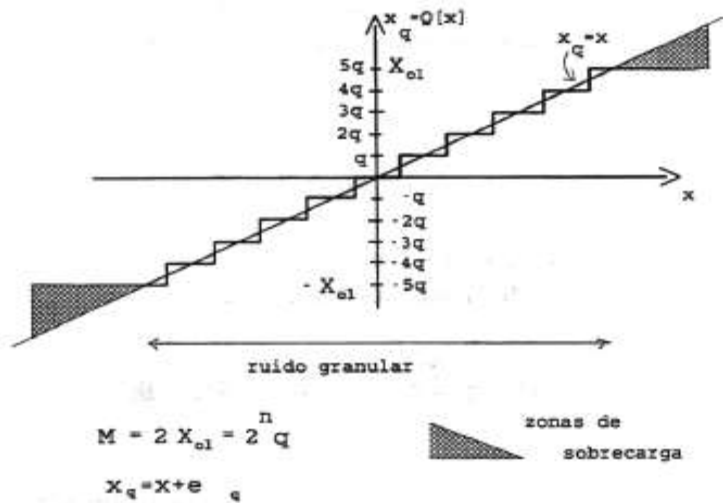
# Cuantificación



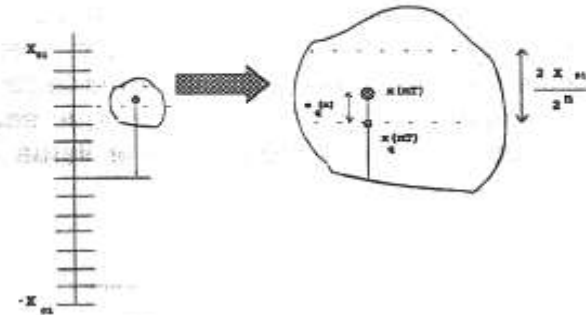
Paso de cuantificación o "quanto"

$$q = \frac{M}{2^n}$$

# Error de Cuantificación



Si la cuantificación la efectúa un conversor A/D con un margen de entrada de  $+V$  a  $-V$  voltios, el valor de  $M$  será:  $M = 2 X_{01} = 2^n q = 2 V$ .



Errores de cuantificación ( $n$  = número de bits).

## RELACIÓN SEÑAL/RUIDO

A) Señal en todo el rango del convertidor

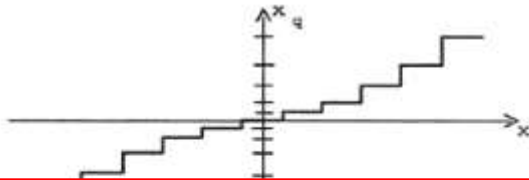
$$SNR = \frac{P_x}{P_{eq}} = \frac{3}{2} 2^{2n}$$

$$SNR = 10 \log\left(\frac{P_x}{P_{eq}}\right) = 10 \log\left(\frac{3}{2}\right) + 10 \log(2^{2n}) = 20n \log(2) + 1,76 = \boxed{6,02n + 1,76 \text{ dB}}$$

B) Señal aleatoria (gaussiana)

$$SNR = 10 \log\left(\frac{P_x}{P_{eq}}\right) = \boxed{6,02n - 2,27 \text{ dB}}$$

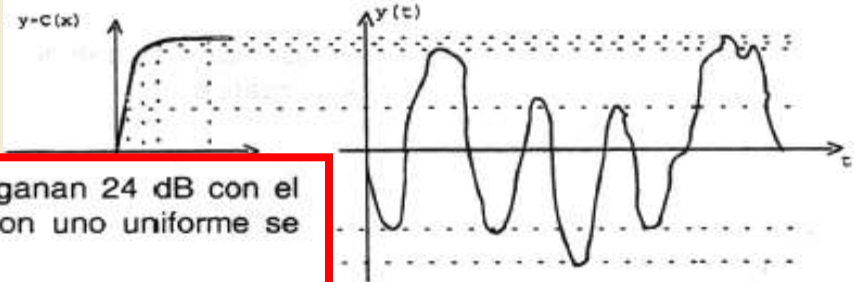
# Cuantificación no uniforme



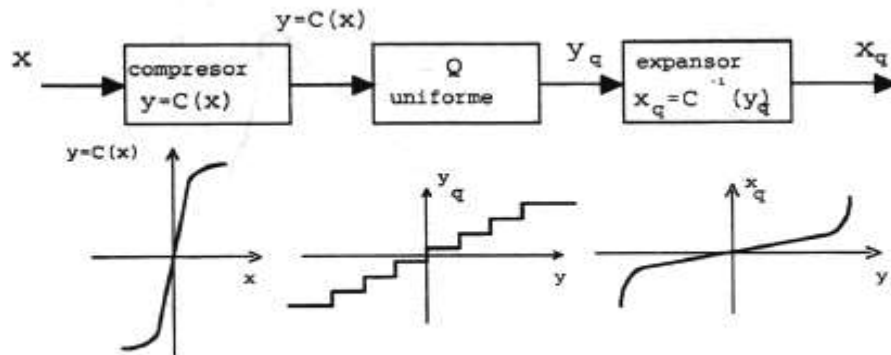
Para niveles de señal bajos (inferiores a -15 dB), se ganan 24 dB con el cuantificador no uniforme. Así para tener la misma mejora con uno uniforme se necesitaría:

$$\text{Incremento de SNR} = 6,02n = 24 \quad n = 4 \text{ bits}$$

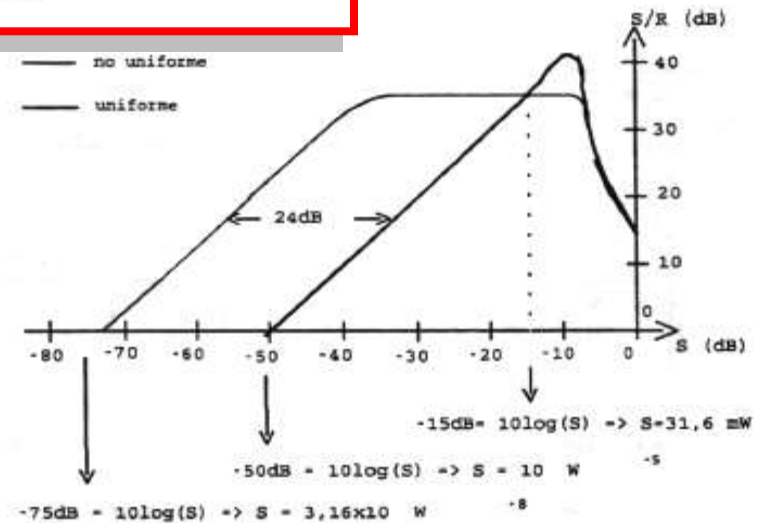
es decir, se requeriría un conversor uniforme de  $8 + 4 = 12$  bits.



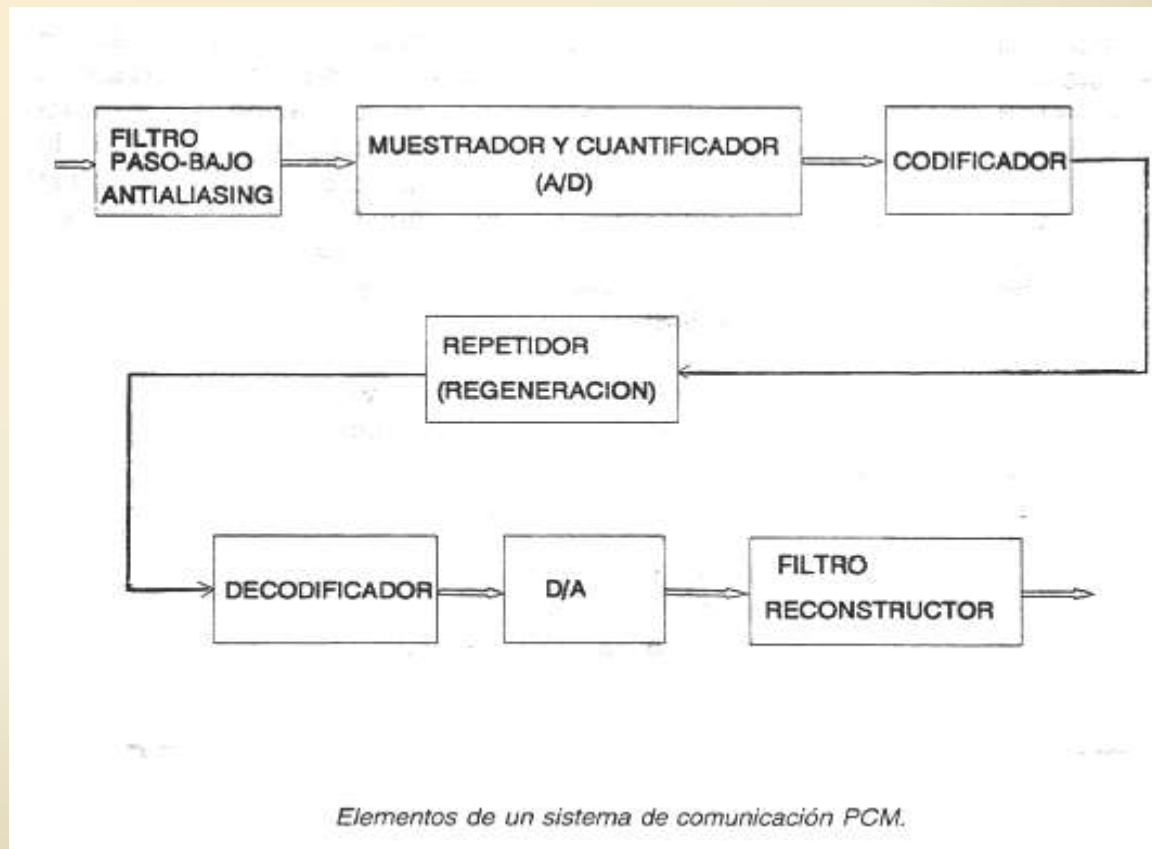
Característica en no uniformemente.



Cuantificador uniforme con compresor: cuantificación no uniforme.

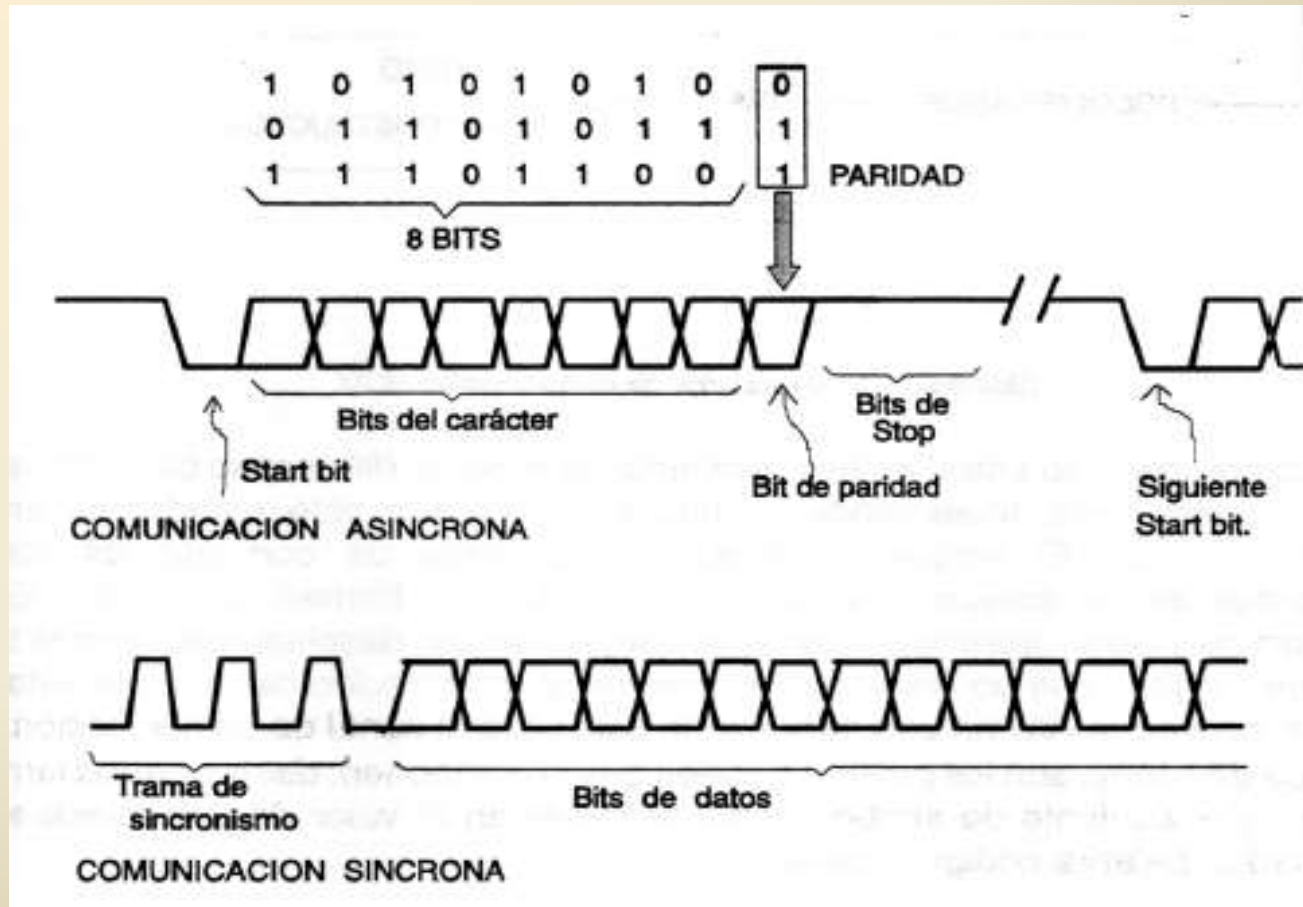


# Codificación PCM



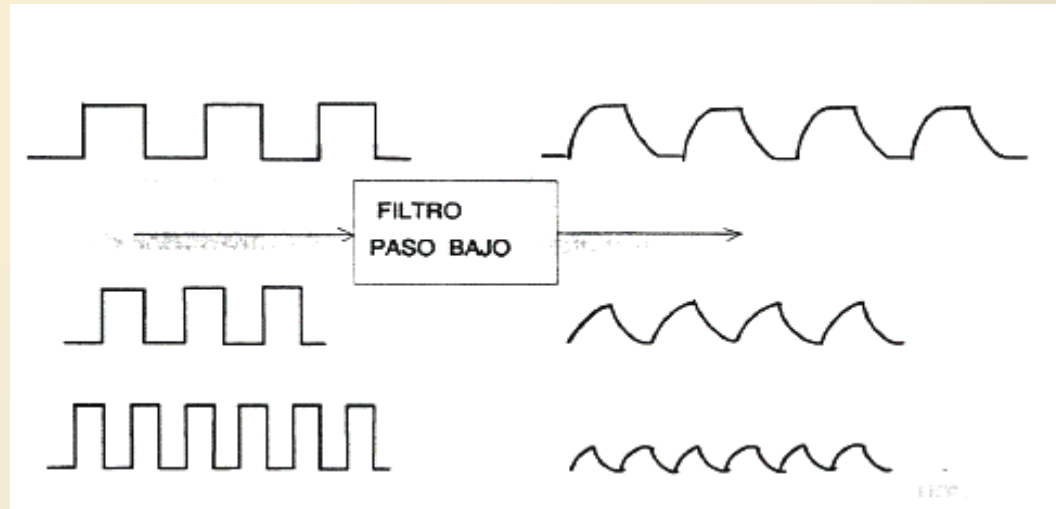


# Transmisión síncrona y asíncrona



# Velocidad de transmisión

Efecto paso bajo del canal de comunicaciones



Efecto del ruido (Teorema de Shannon)

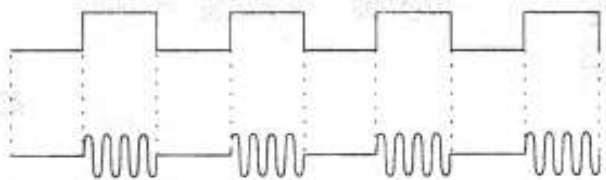
$$\text{MAXIMOS BITS POR SEGUNDO (bps)} = BW * \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

# Modulaciones digitales

---

- Necesidad de las modulaciones
    - Transmitir una señal en banda base a través de un canal pasobanda
    - Compartir varias señales en un mismo canal
    - Llevar la señal a una banda frecuencial más limpia de interferencias
    - Aumentar la frecuencia para hacer más efectiva la radiación de las antenas
-

# Modulación ASK



La expresión matemática de una modulación OOK es,

$$S(t) = \begin{cases} \cos 2\pi f_c t, & \text{si } u(t) = 1 \\ 0, & \text{si } u(t) = 0 \end{cases}$$

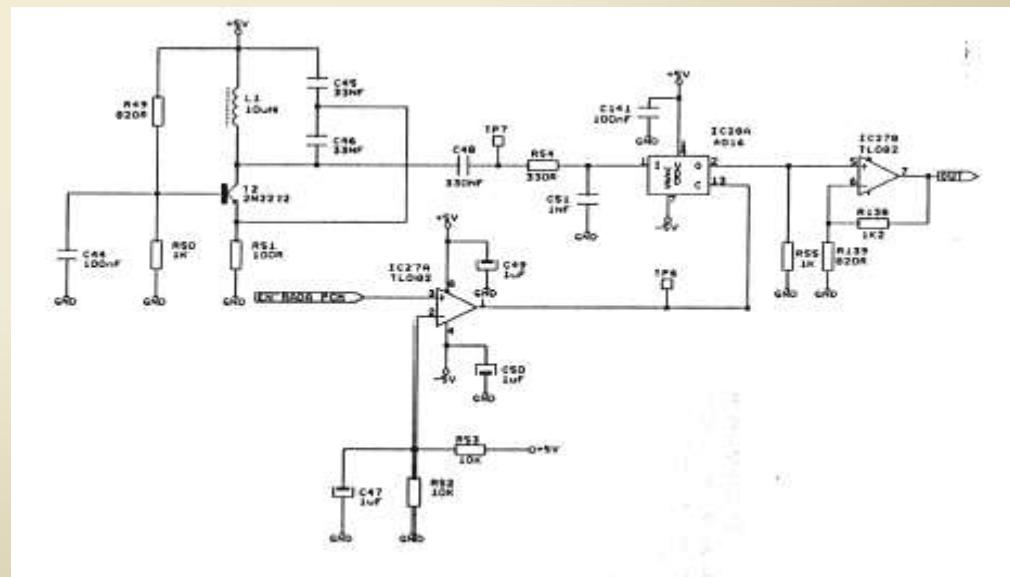
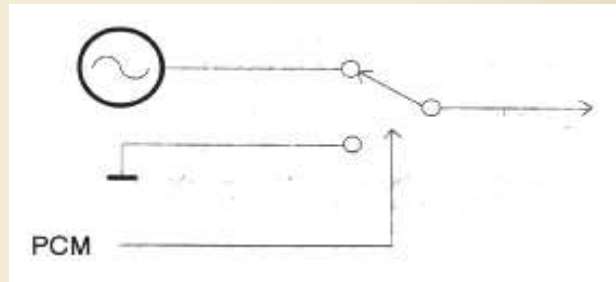
donde,

$S(t)$  = señal modulada en amplitud,

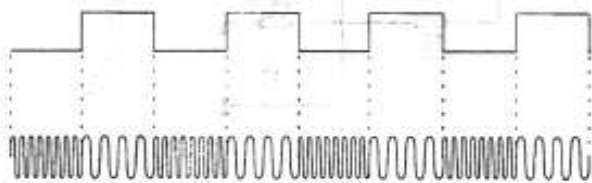
$u(t)$  = señal binaria moduladora,

$f_c$  = frecuencia portadora.

La constelación de una modulación ASK es la siguiente:

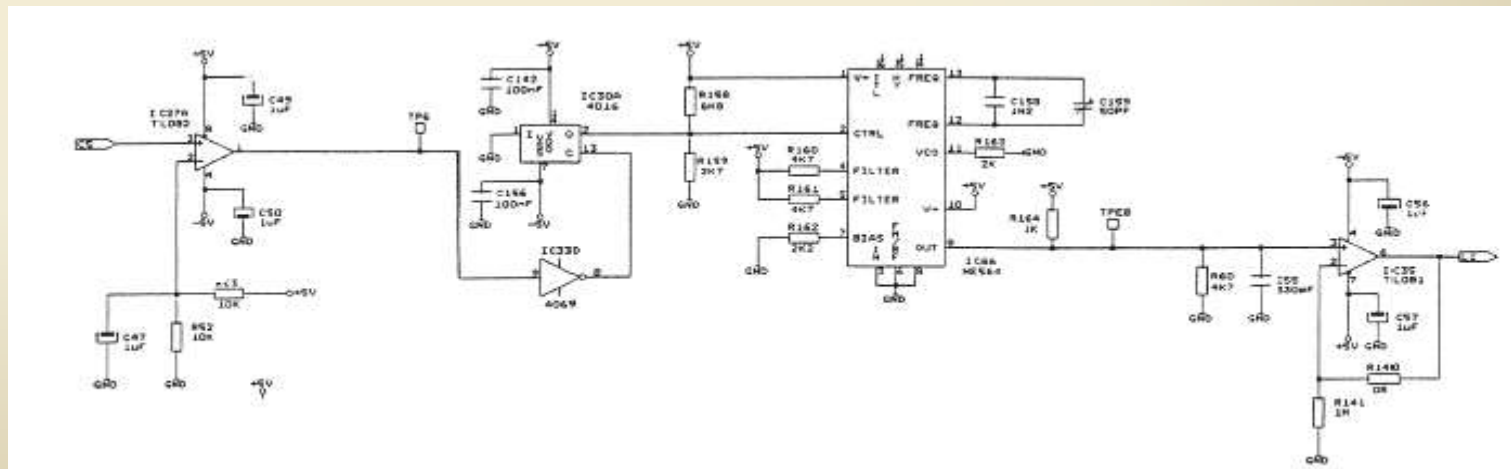
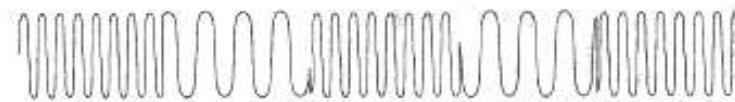
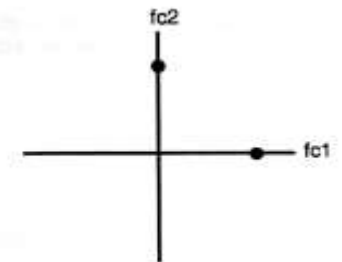
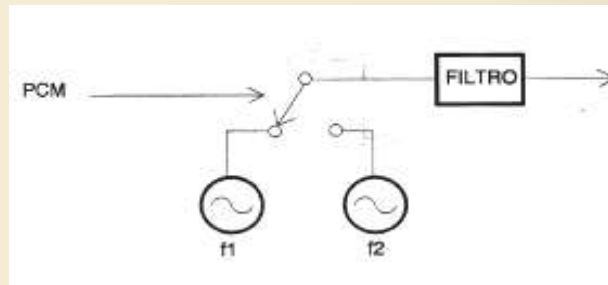


# Modulación FSK

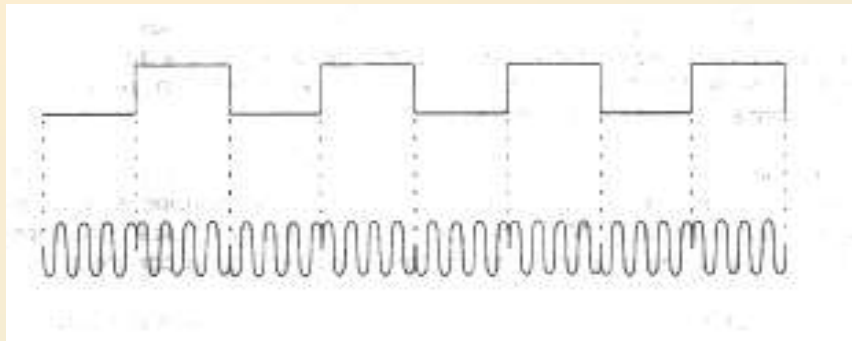


La expresión matemática que describe la modulación FSK es,

$$S(t) = \begin{cases} \cos 2\pi f_{c_1} t, & \text{si } u(t) = 1 \\ \cos 2\pi f_{c_2} t, & \text{si } u(t) = 0 \end{cases}$$



# Modulación BPSK



La ecuación matemática de una modulación BPSK es,

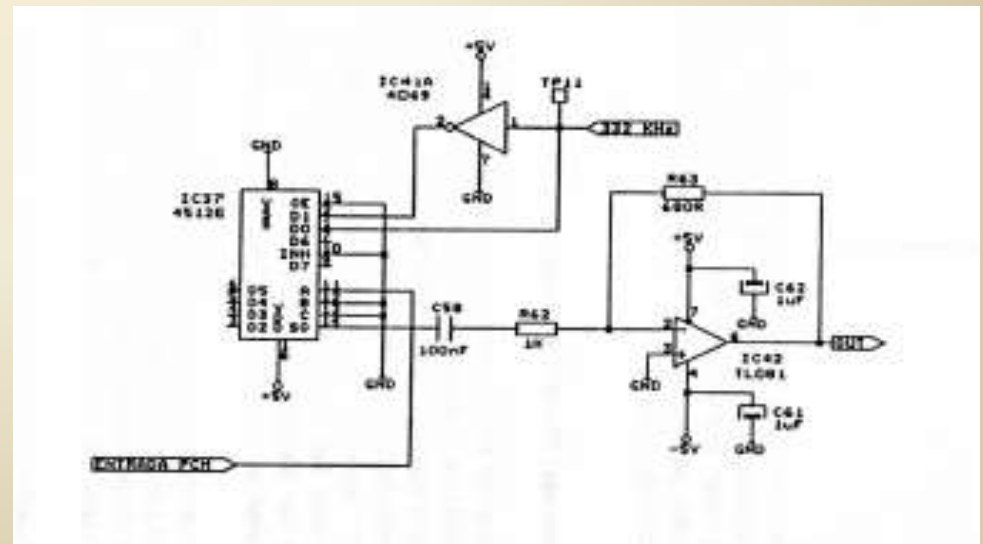
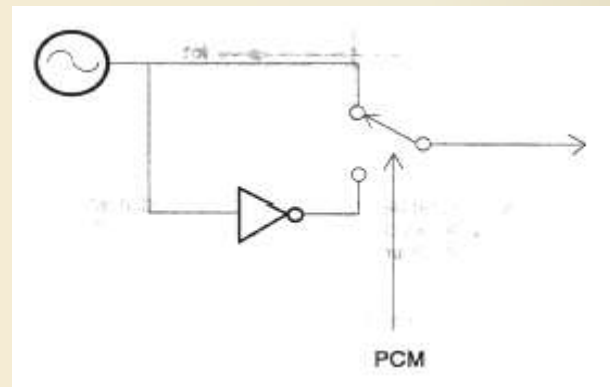
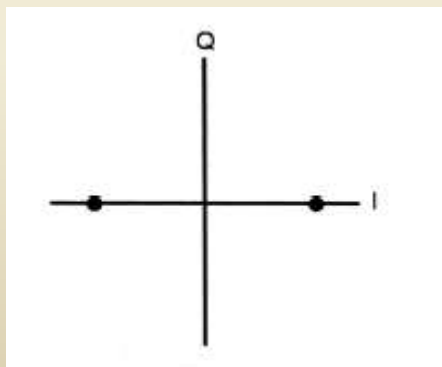
$$S(t) = u(t) \cos 2\pi f_c t$$

donde,

$S(t)$  = señal modulada en fase binaria,

$u(t)$  = señal moduladora binaria (los valores lógicos '1' y '0' toman en  $u(t)$  los valores 1 y -1 respectivamente),

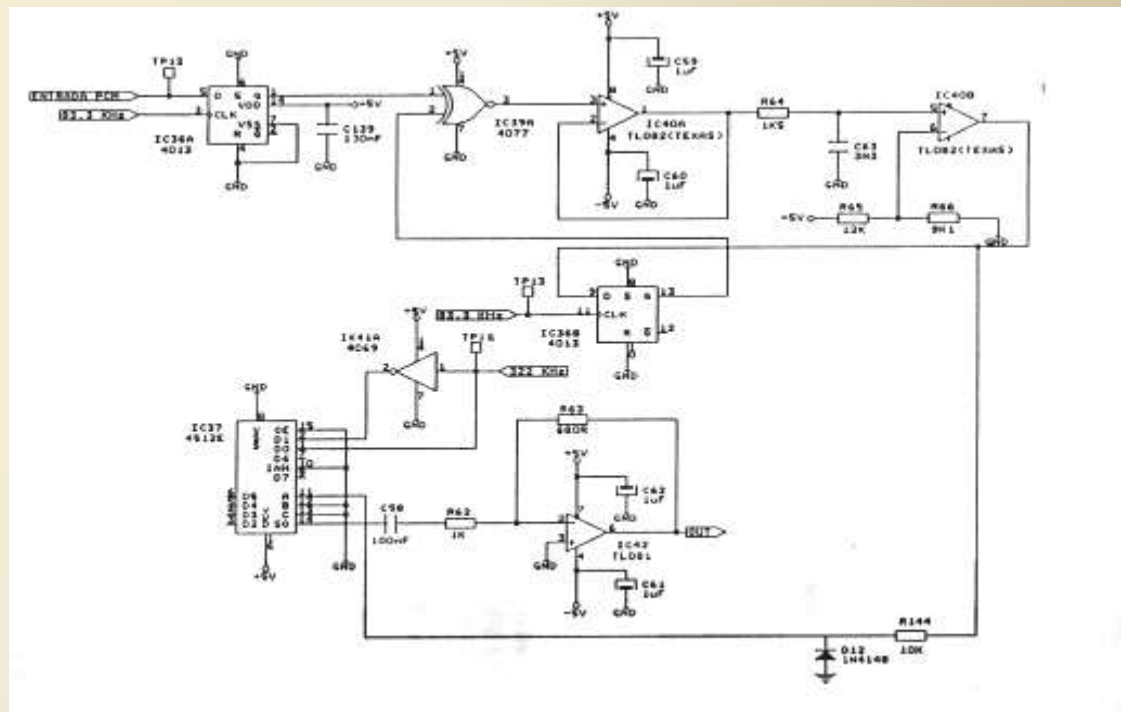
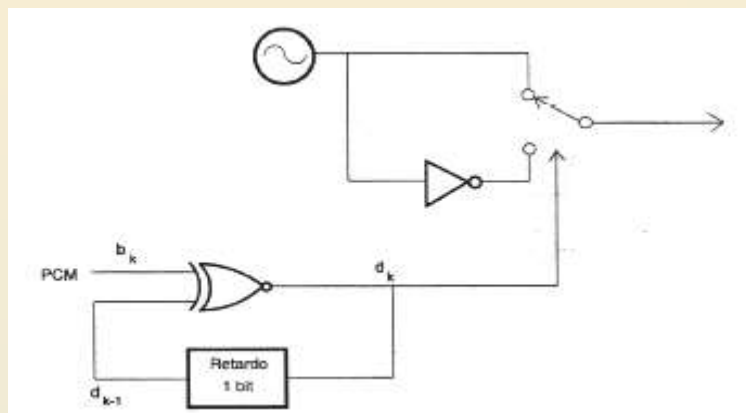
$f_c$  = frecuencia portadora.



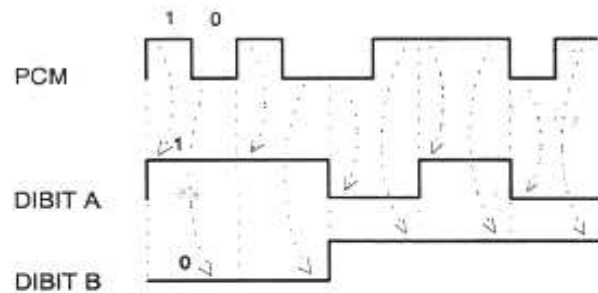
# Modulación DPSK

$$d_k = b_k \oplus d_{k-1}$$

$b_k$  00101111001100010110  
 $d_k$  101100000100010110001



# Modulación QPSK



La asignación de los dígitos a la fase transmitida es según la siguiente tabla:

$A_k$	$B_k$	FASE	$I_k$	$Q_k$
1	1	$45^\circ$	1	1
0	1	$135^\circ$	-1	1
0	0	$225^\circ$	-1	-1
1	0	$315^\circ$	1	-1

$$s(t) = I_k \cos 2\pi f_c t + Q_k \sin 2\pi f_c t$$

donde,

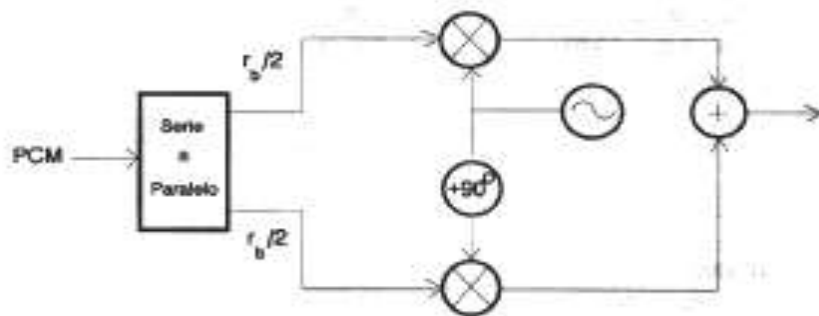
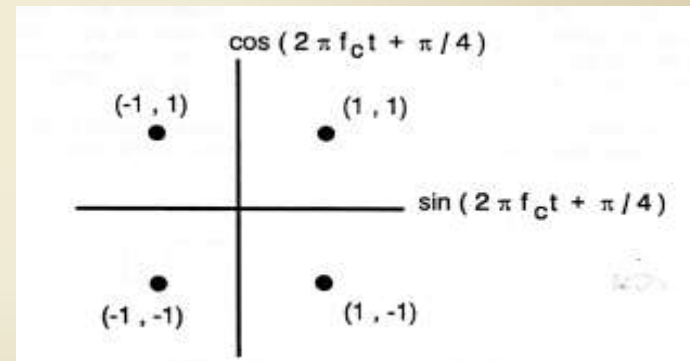
$s(t)$  = señal modulada en QPSK,

$I_k, Q_k$  = representan los dígitos,

$f_c$  = frecuencia portadora.

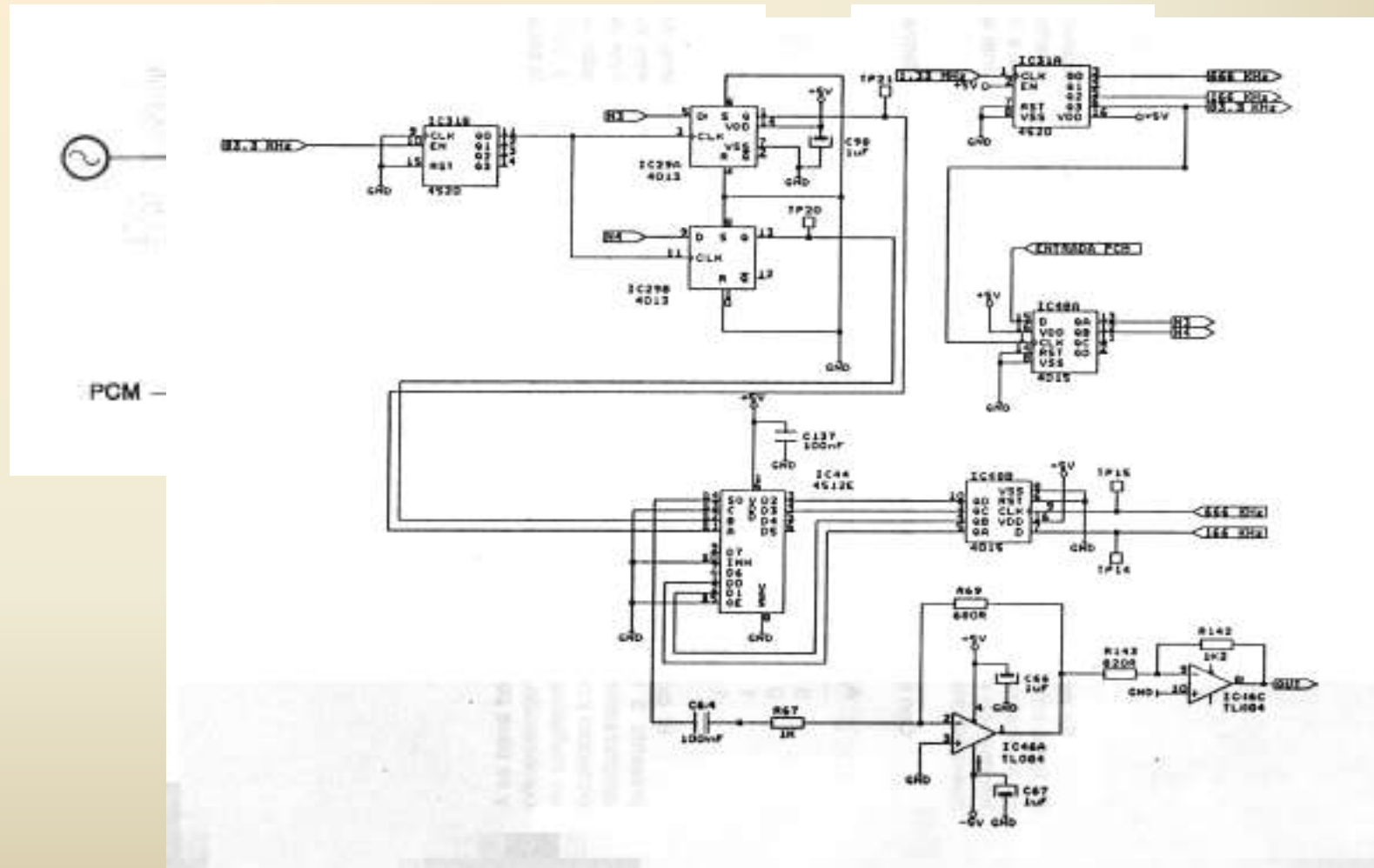
Una representación alternativa, y más usada, de  $s(t)$  que desplaza las fases  $45^\circ$  es la siguiente:

$$s(t) = I_k \cos (2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}) + Q_k \sin (2\pi f_c t + \frac{\pi}{4})$$





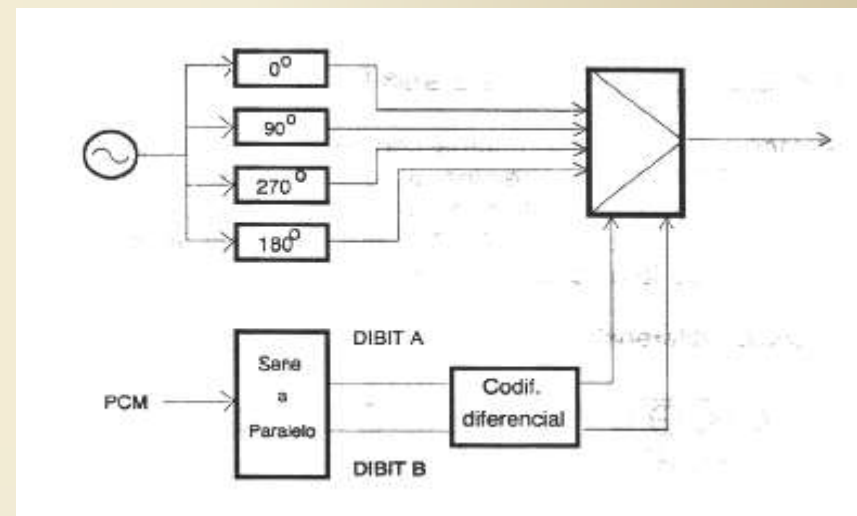
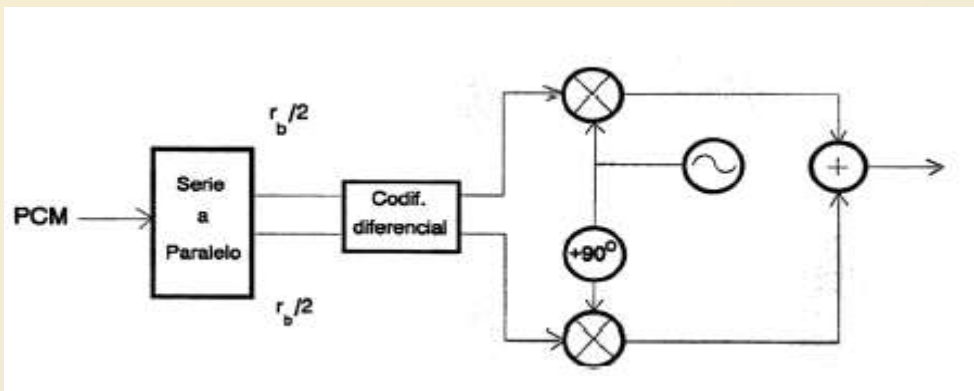
# Modulación QPSK (2)



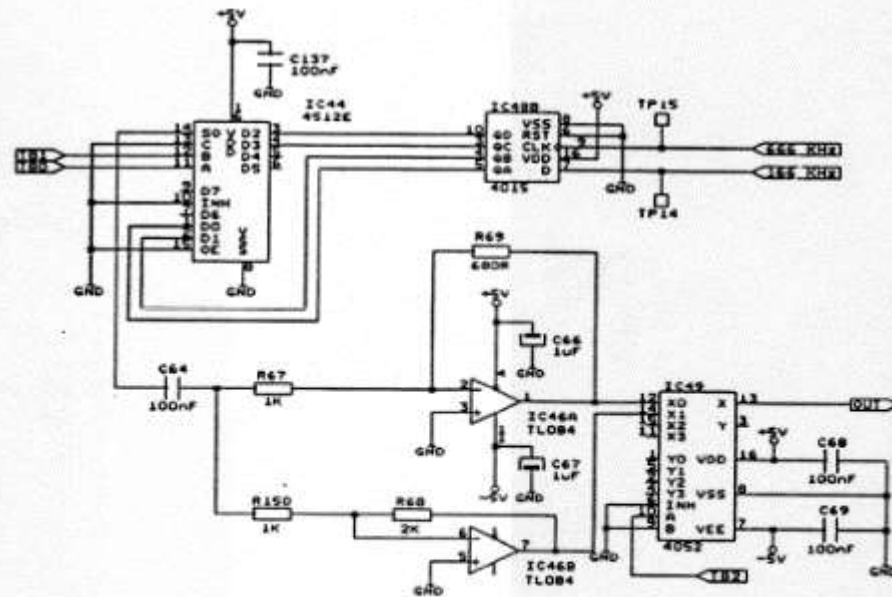
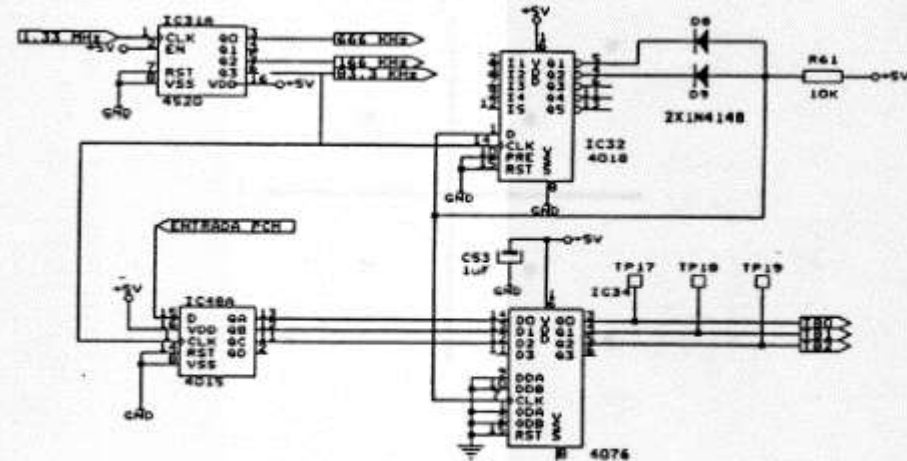
# Modulación DQPSK

$$I_k = \overline{(A_k \oplus B_k)}(A_k \oplus I_{k-1}) + (A_k \oplus B_k)(B_k \oplus Q_{k-1})$$

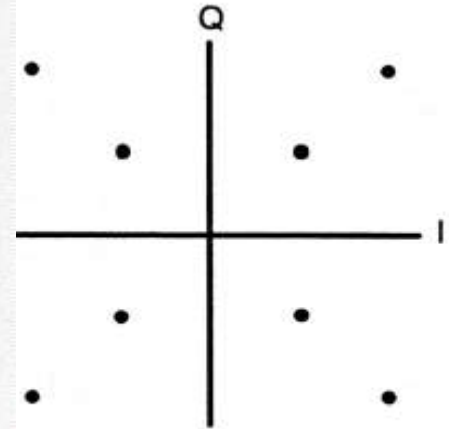
$$Q_k = \overline{(A_k \oplus B_k)}(B_k \oplus Q_{k-1}) + (A_k \oplus B_k)(A_k \oplus I_{k-1})$$



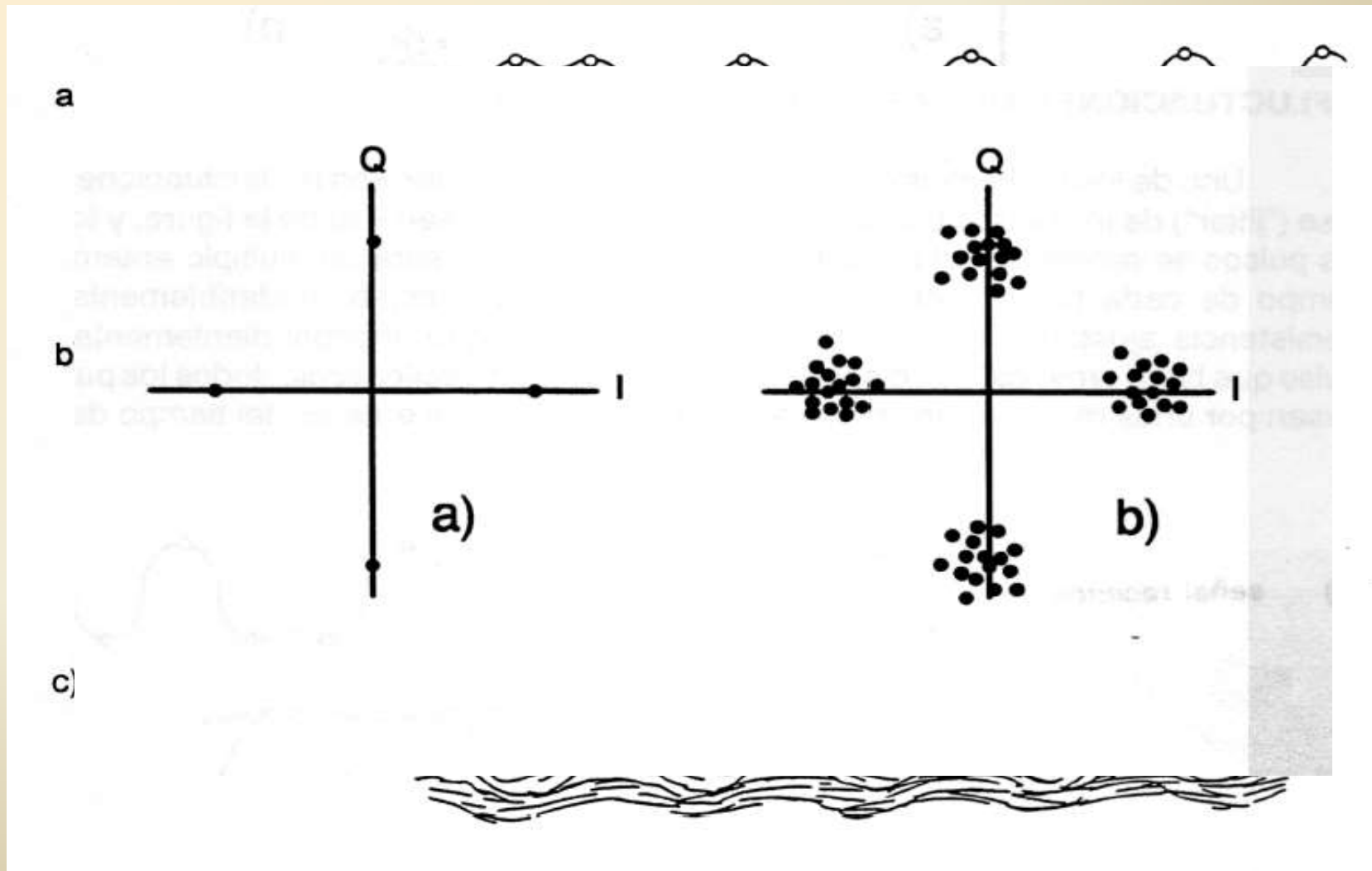
FCM



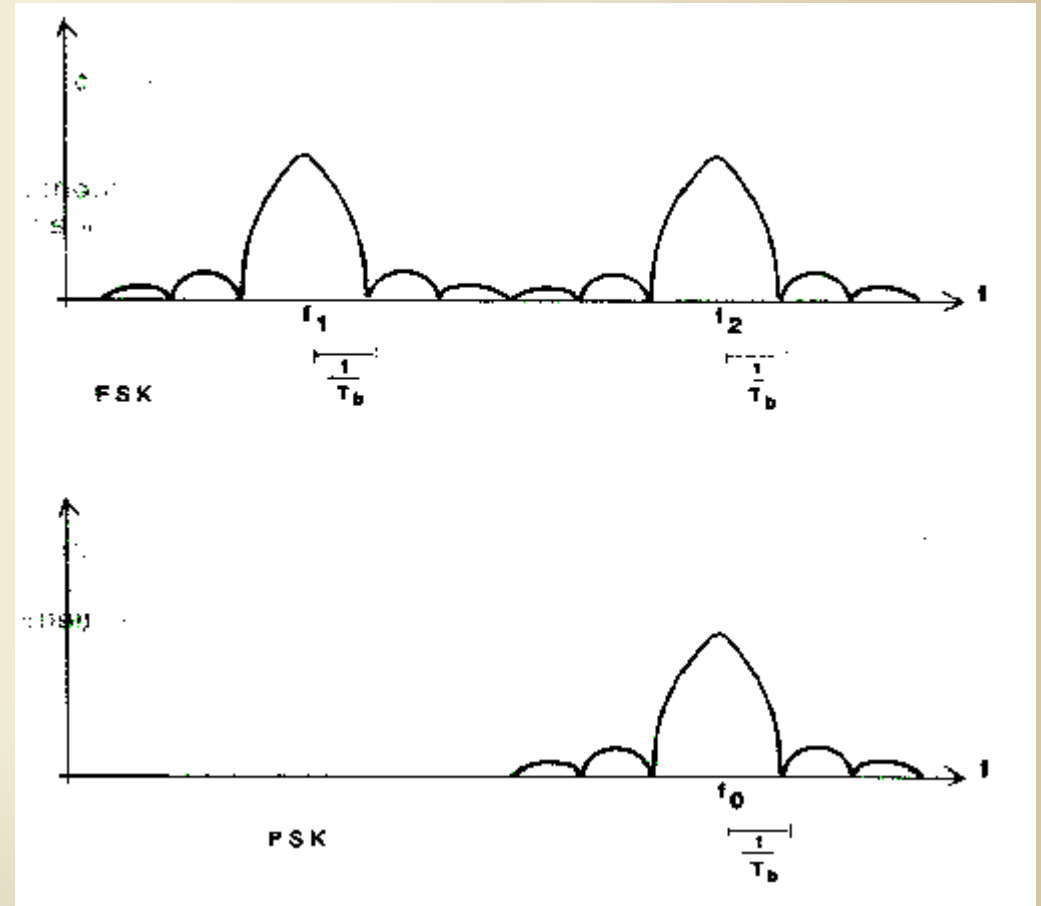
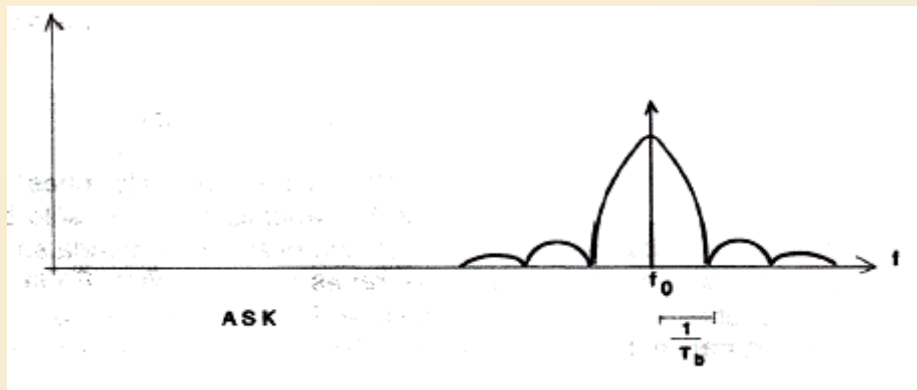
MODULADOR QAM



# Fluctuaciones de fase: Diagrama de ojo



# Anchos de banda de las modulaciones



# Eficiencia espectral

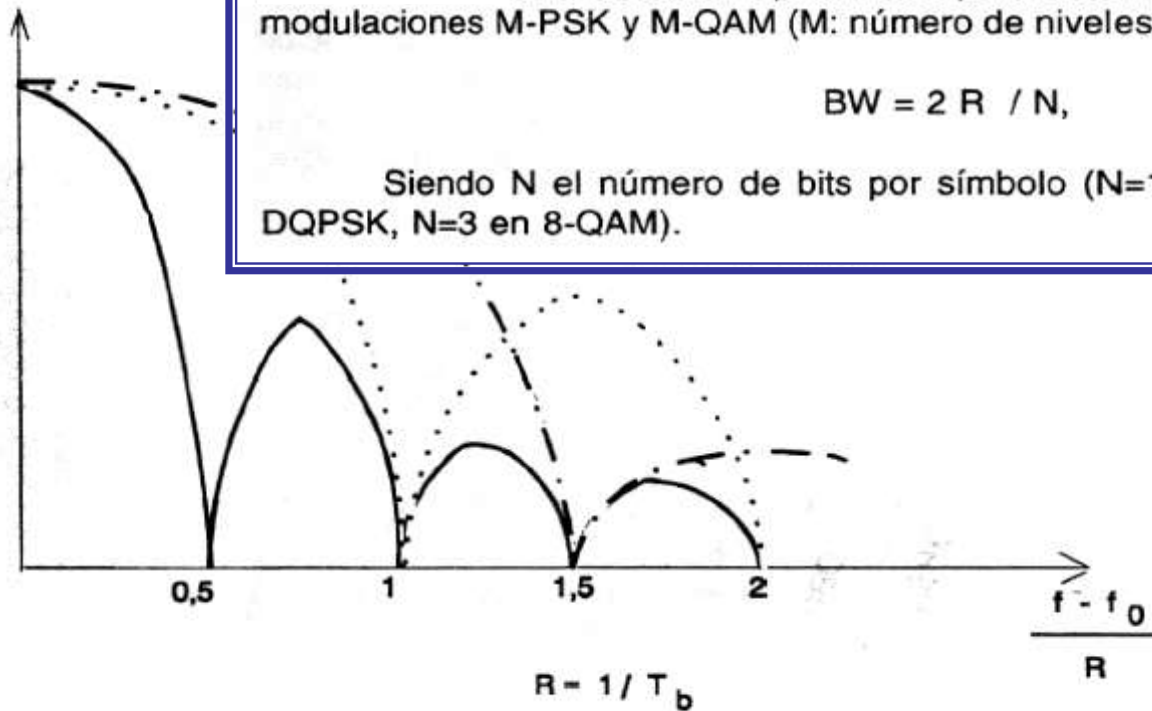
$$\text{Ef. Espectral} = R / BW \quad (\text{unidades: bits/s/Hz})$$

Velocidad de transmisión

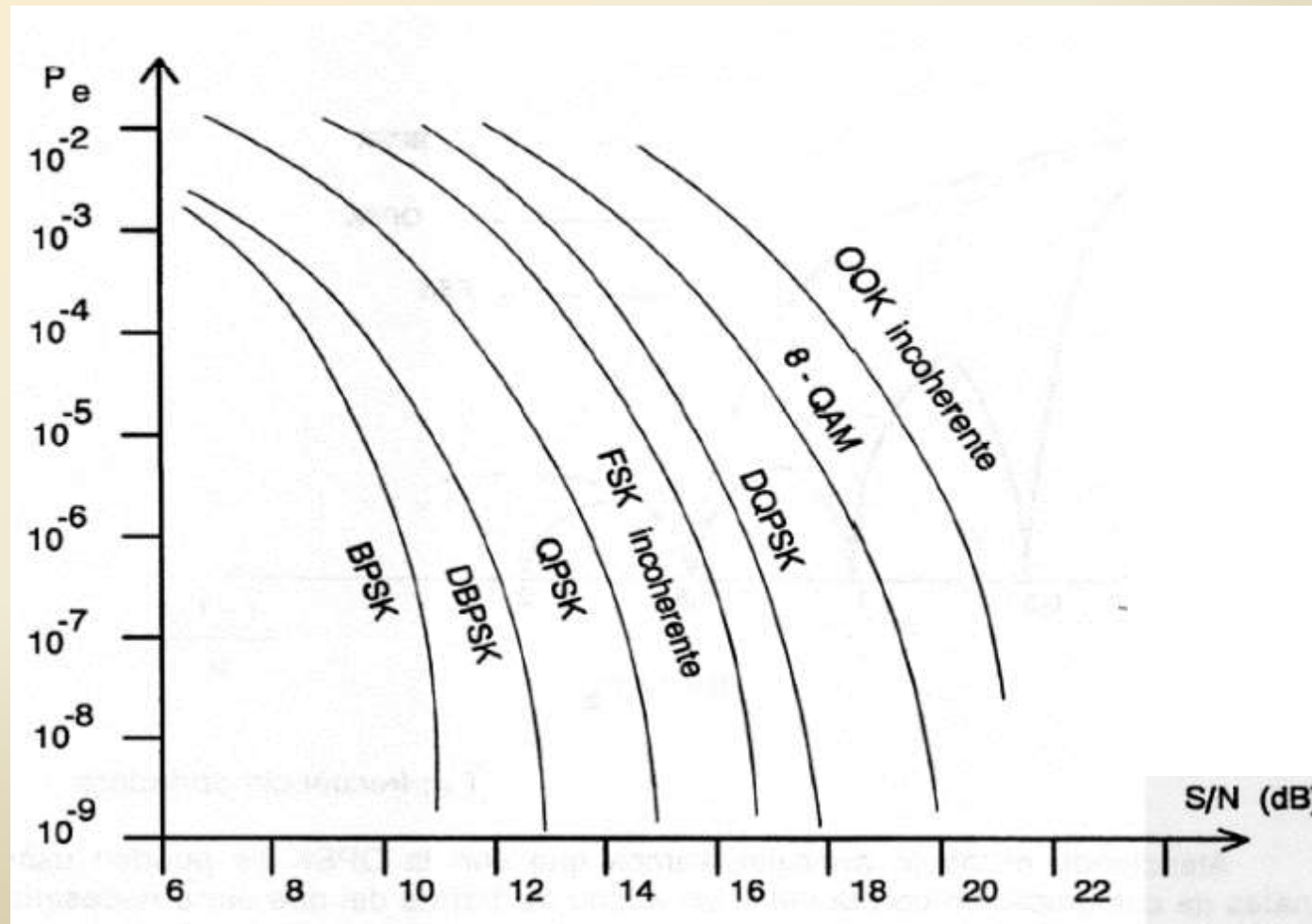
Una ecuación aproximada para determinar el ancho de banda para modulaciones M-PSK y M-QAM (M: número de niveles) viene dada por la expresión:

$$BW = 2 R / N,$$

Siendo N el número de bits por símbolo (N=1 en BPSK, N=2 en QPSK y DQPSK, N=3 en 8-QAM).

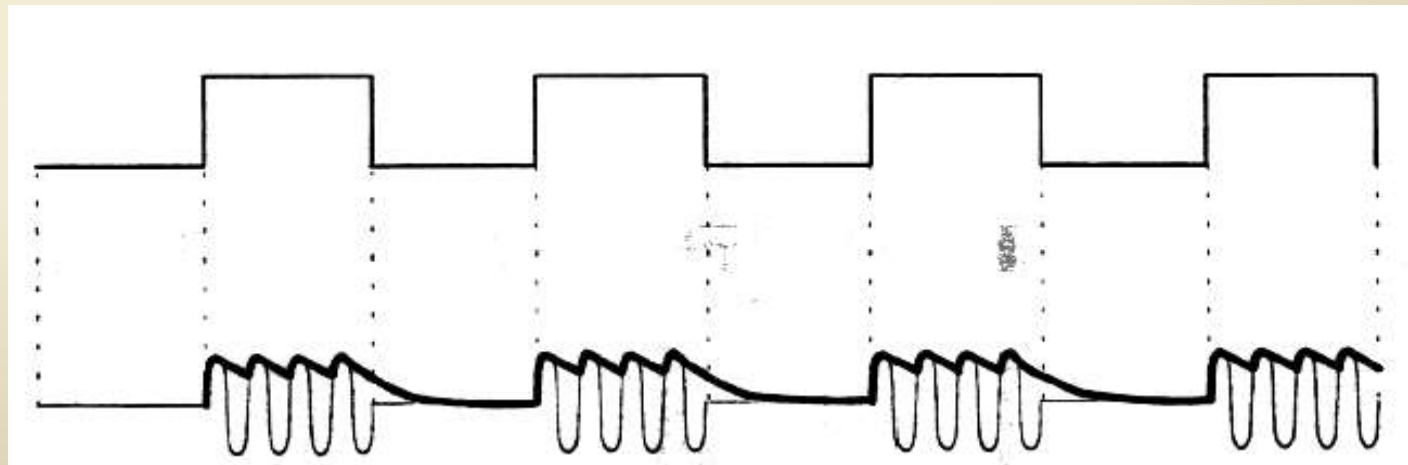
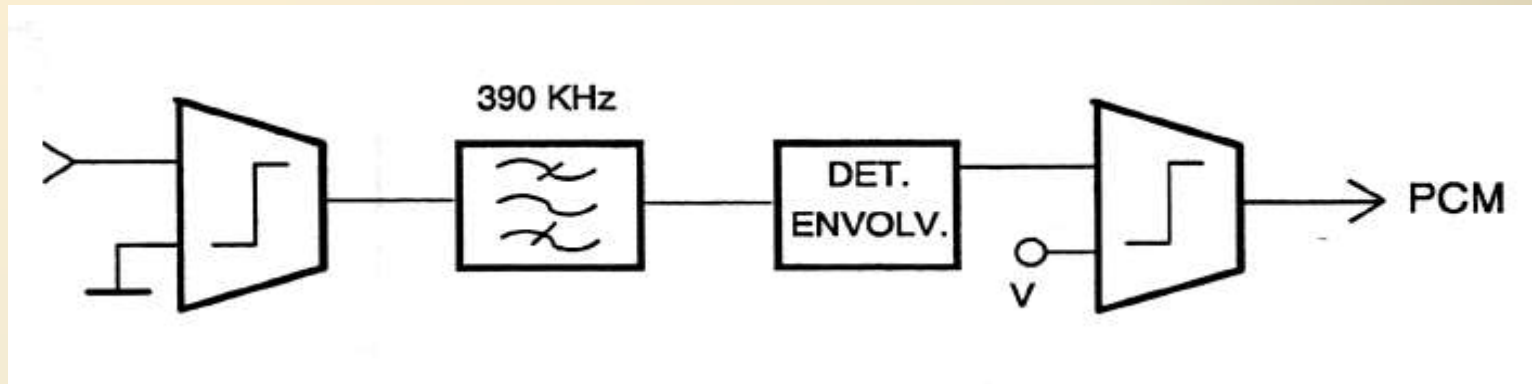


# Probabilidades de error



# Demodulaciones

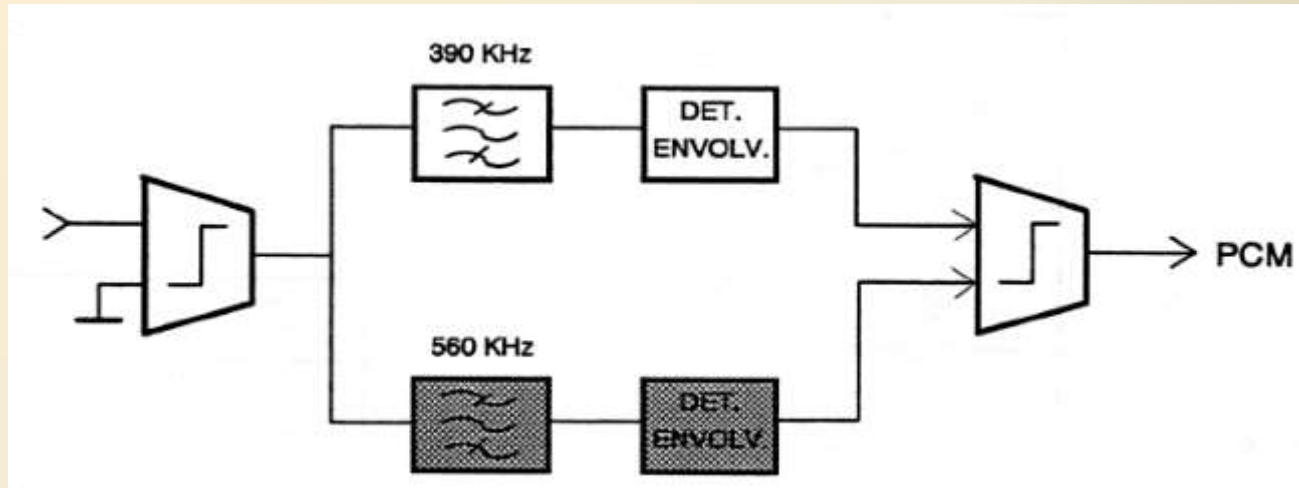
## ASK



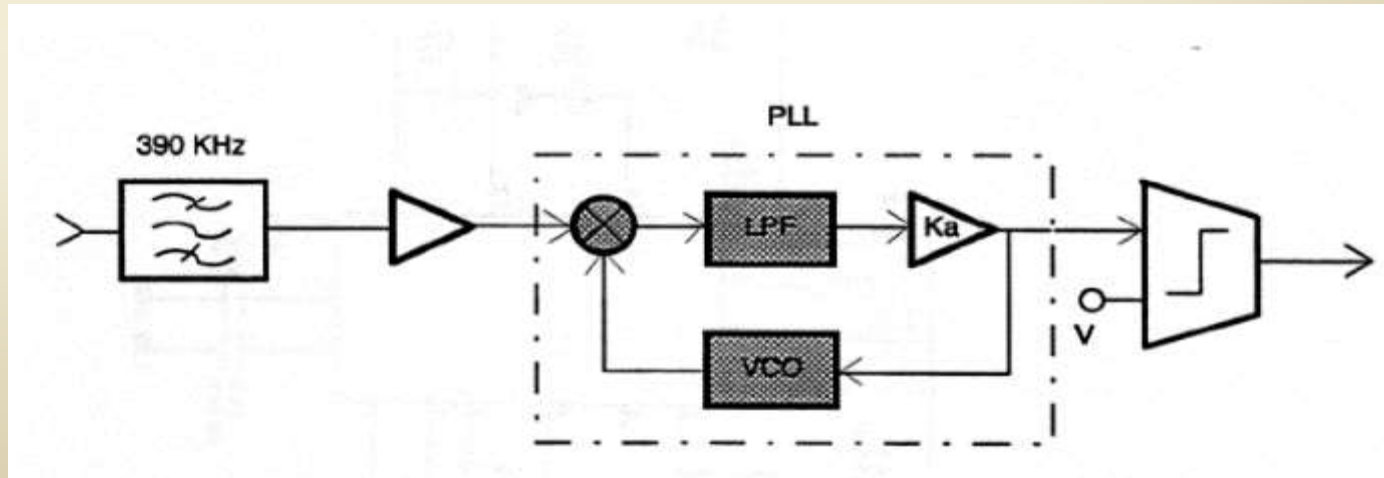


# Demodulaciones:FSK

DF -FSK

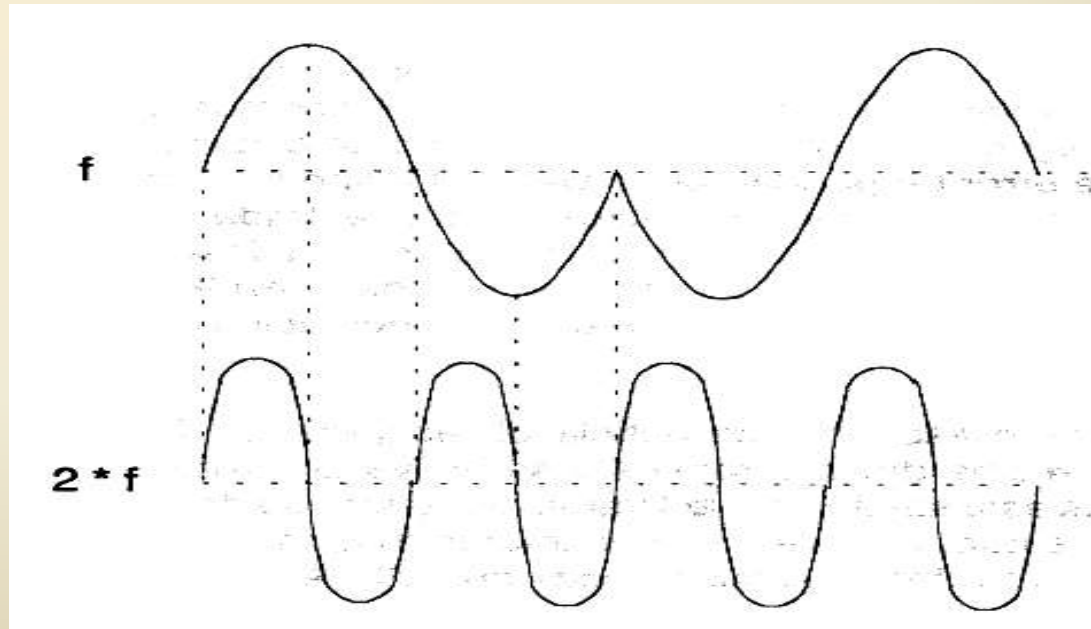


FSK-PLL

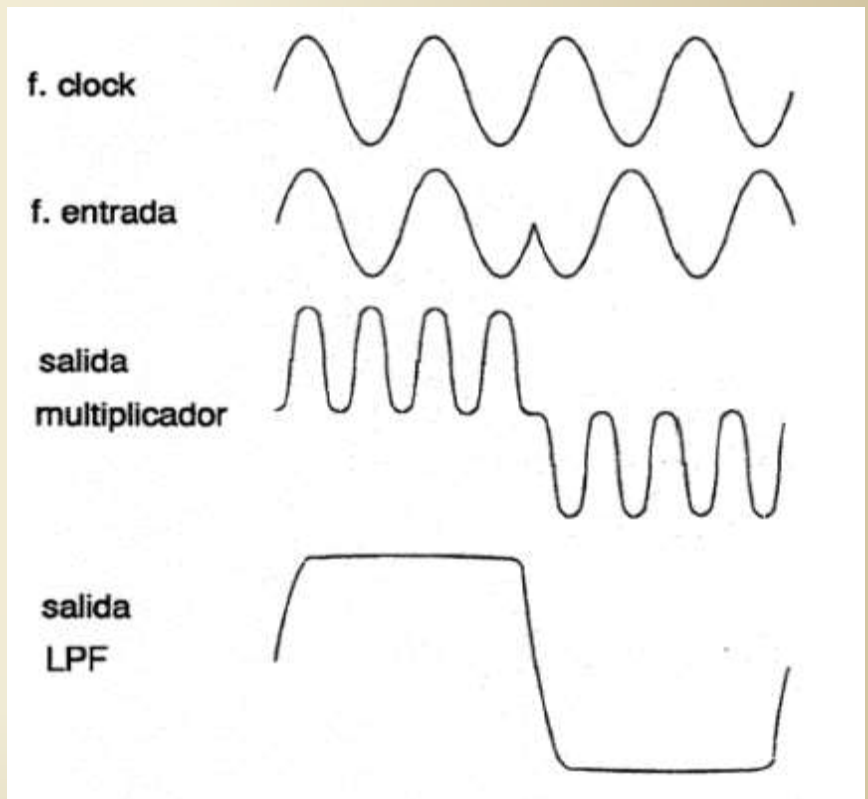
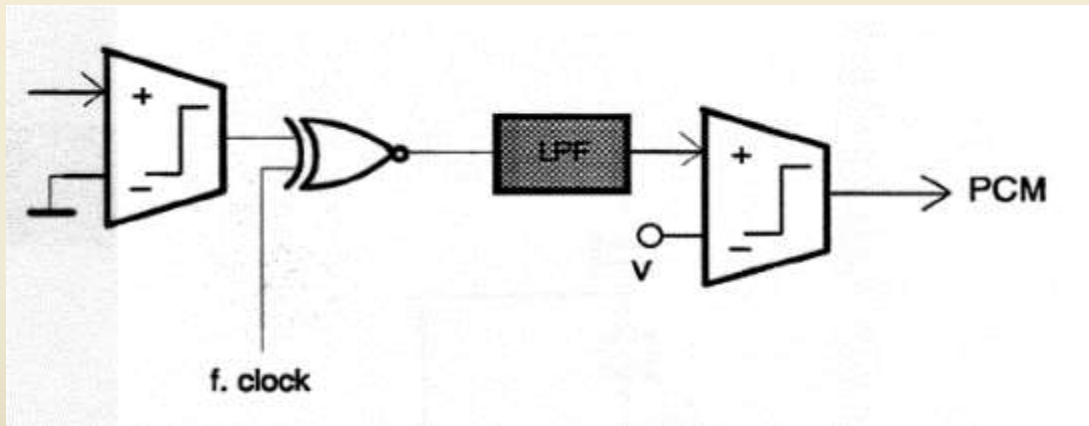
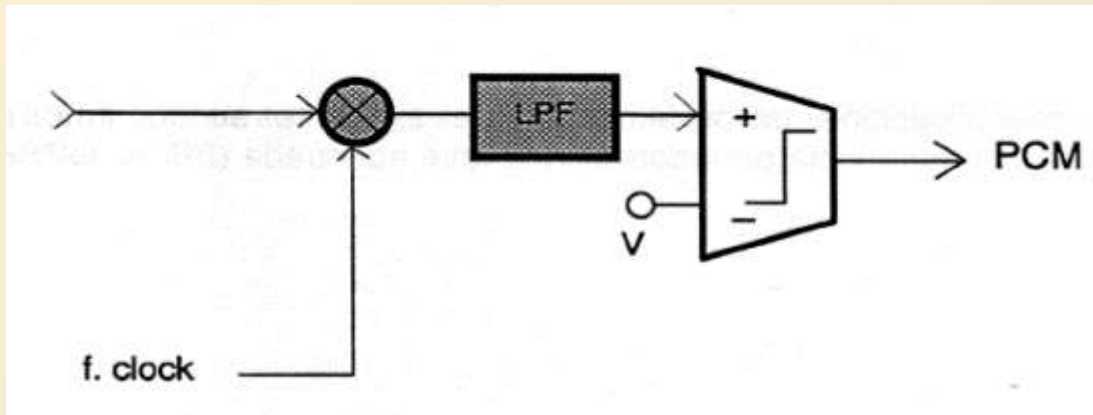


# Recuperación de la portadora

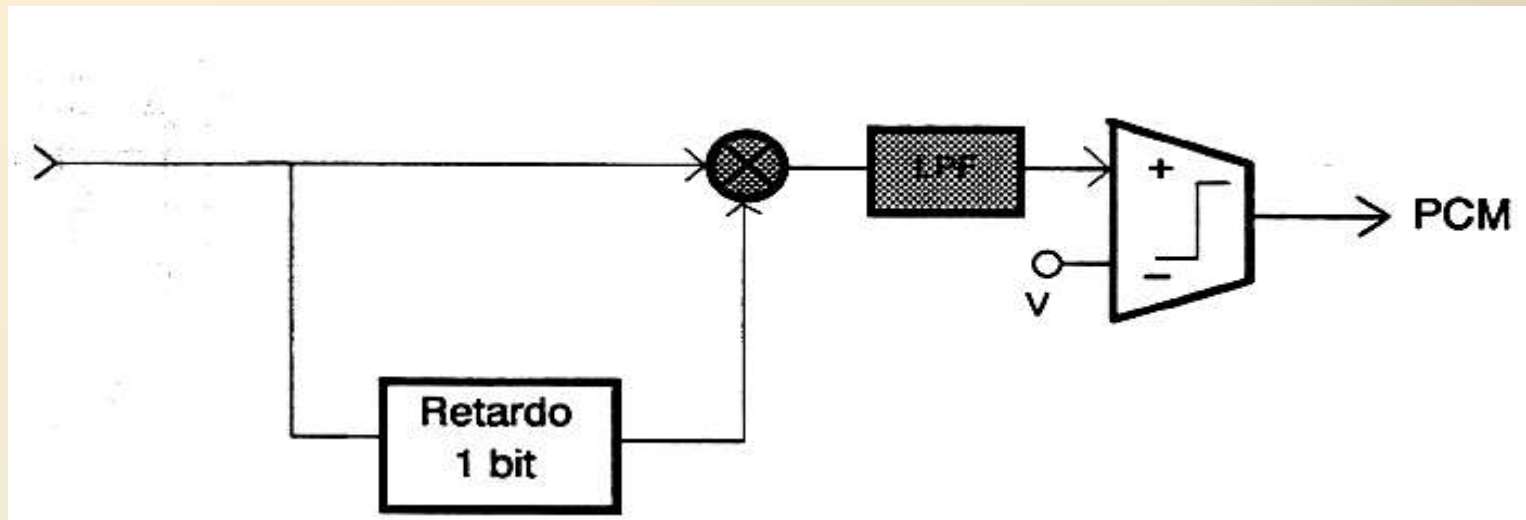
$$\begin{aligned}\cos^2(\omega_0 t + \phi) &= \cos(\omega_0 t + \phi) \cdot \cos(\omega_0 t + \phi) = \\ &= \frac{\cos(2\omega_0 t + 2\phi) + \cos 0}{2} = \frac{\cos(2\omega_0 t + 2\phi) + 1}{2}\end{aligned}$$



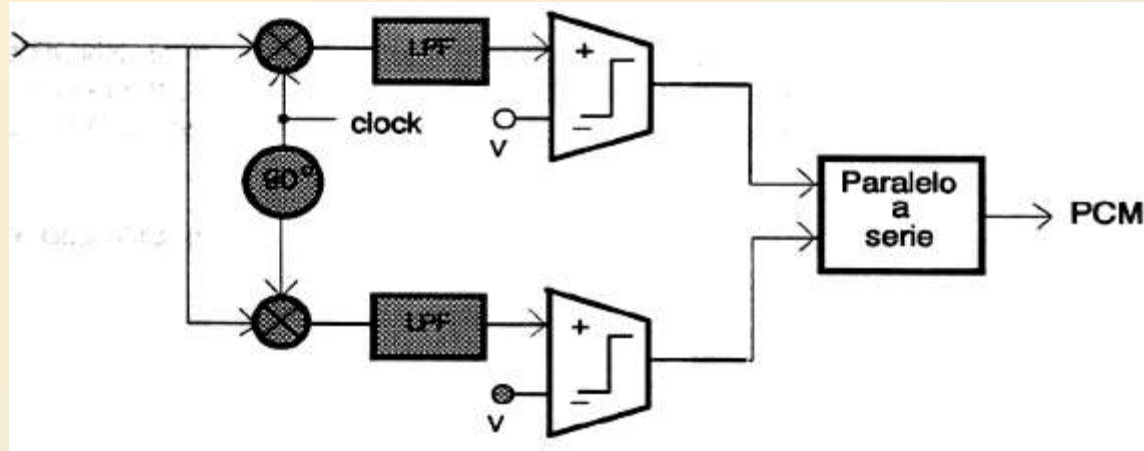
# Demodulaciones: BPSK



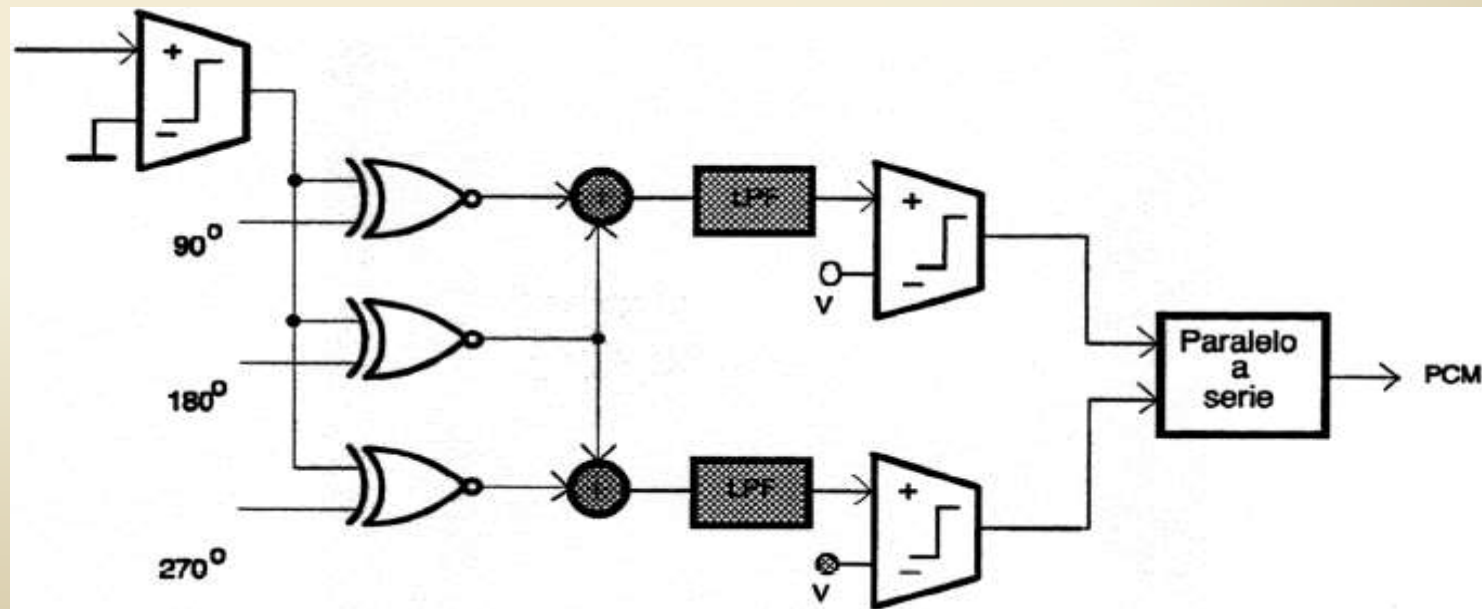
# Demodulaciones:DPSK



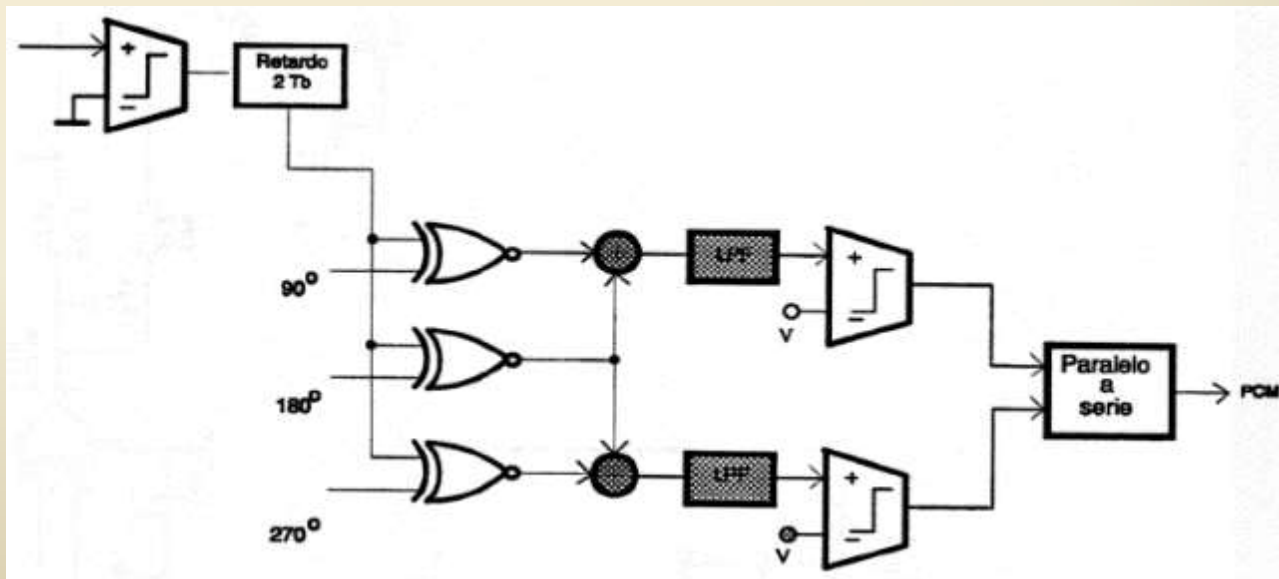
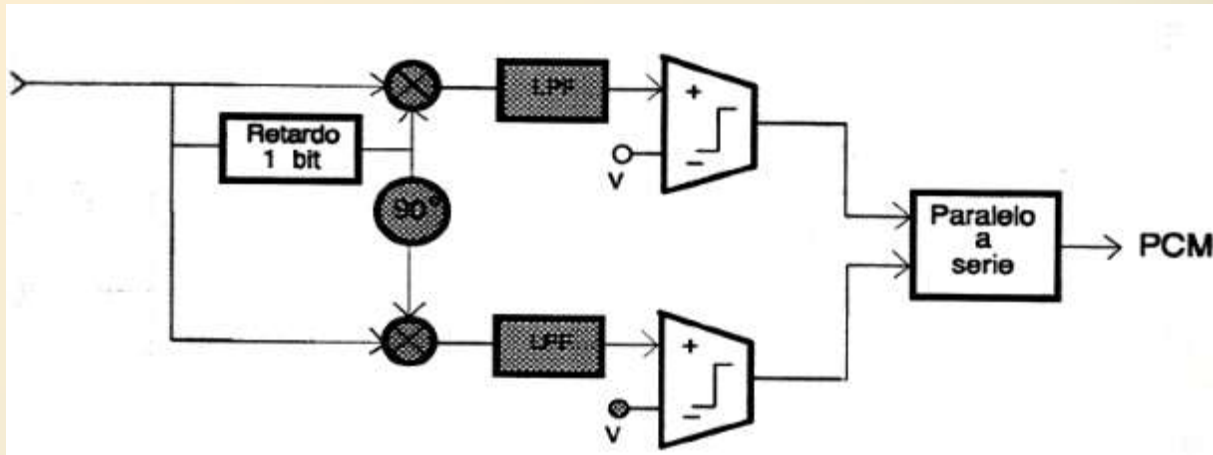
# Demodulaciones:QPSK



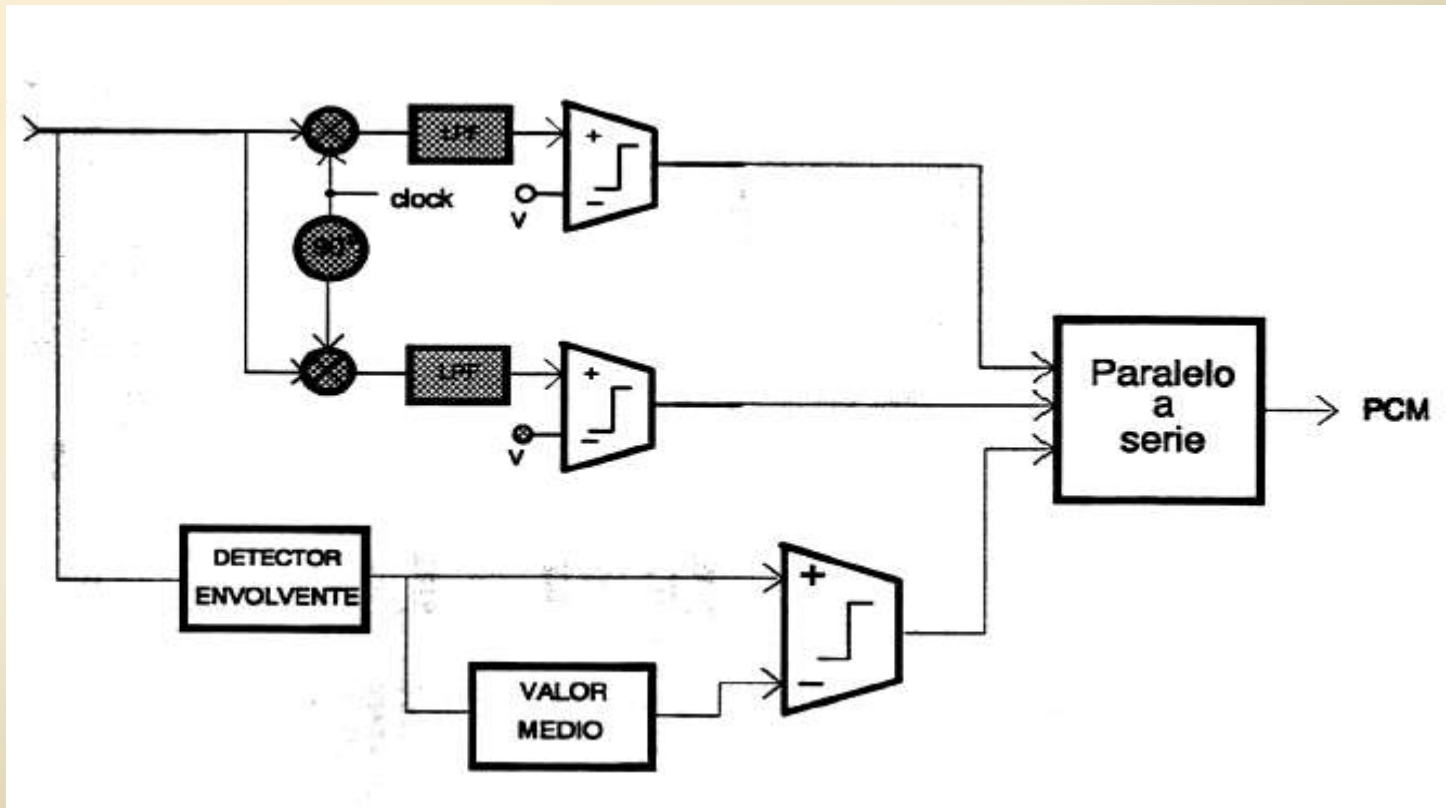
$A_k$	$B_k$		$0^\circ$	$90^\circ$	$180^\circ$	$270^\circ$
0	0		1	0	0	0
0	1		0	1	0	0
1	1		0	0	1	0
1	0		0	0	0	1



# Demodulaciones: QPSK



# Demodulaciones:QAM



# Canal de transmisión

---

## 7.1 Línea bifilar

La transmisión de comunicaciones eléctricas por cables con pares metálicos representa la aplicación más antigua en la transmisión de señales analógicas telefónicas y telegráficas (digitales).

La línea bifilar está formada por dos hilos conductores situados paralelamente. La mayor ventaja que presenta es el precio. Una de las desventajas es la sensibilidad ante interferencias electromagnéticas (campo eléctrico y magnético). La interferencia de tipo magnético se puede reducir si el bucle formado por los dos hilos es pequeño, manteniendo una separación pequeña entre ellos y trenzando los cables. Con los dos hilos juntos se puede reducir la interferencia eléctrica. Otros inconvenientes de este tipo de canal es el pequeño ancho de banda que soporta, y que mantiene la continuidad óhmica entre el emisor y el receptor por lo que puede producir problemas debido a la falta de independencia de los dos sistemas. Frente a la línea coaxial tiene, como ventaja, una menor capacidad parásita.



# Canal de transmisión

---

## 7.2 Línea coaxial

A diferencia de los cables con pares simétricos que se utilizan básicamente para sistemas con capacidades de transmisión pequeñas, el cable coaxial se emplea en sistemas con mayor capacidad (mayor número de canales a transmitir), debido a que el ancho de banda que puede soportar es mucho mayor, así como su precio.

Una línea coaxial está formada por dos conductores concéntricos separados por un aislante. El conductor interno es el que lleva la información y el externo suele estar conectado a la tensión de referencia del circuito y hace de pantalla electrostática del conductor interno. El cable coaxial es mucho más robusto ante interferencias eléctricas debido al apantallamiento del que dispone, en cambio, es sensible a las magnéticas, aunque se vean reducidas por la proximidad de los dos conductores.

La capacidad parásita que presenta es mucho mayor que la de la línea bifilar debido al condensador formado entre el conductor interior y el exterior, que suele ser del orden de 50 a 100 pF/m, dependiendo de las dimensiones y distancia entre conductores. Al igual que la línea bifilar, mantiene la continuidad óhmica entre emisor y receptor.

---

# Canal de transmisión

## 7.3 Fibra óptica

La transmisión de comunicaciones electroópticas mediante fibras ópticas ofrece grandes ventajas técnicas y económicas.

La fibra óptica está formada por un material transmisor de la luz recubierto de otro material opaco. El material conductor de la luz, en las fibras de bajo precio, suele ser el plástico.

Las ventajas que ofrece la fibra óptica son:

- Bajas pérdidas.
- Gran ancho de banda, más incluso que el cable coaxial. Las limitaciones del ancho de banda, por lo general, dependen de fenómenos de dispersión ópticos.
- Pequeño tamaño.
- Bajo precio por fibra (calculado sobre grandes instalaciones).
- Insensibilidad ante interferencias electromagnéticas, debido a que es un sistema basado en transmisión óptica.
- Alta estabilidad con la temperatura.
- No hay continuidad óhmica entre emisor y receptor. Esto puede presentar una ventaja por ejemplo en el caso de que exista una diferencia de potencial alta entre las tomas de tierra del emisor y del receptor.

Según la propagación de las formas de onda (modos) luminosas en el núcleo, se diferencia entre fibras multimodo y fibras monomodo. Según sea el transcurso del índice de refracción a través de la sección transversal de una fibra óptica, entre fibras de salto de índice y de índice gradual.

En las fibras de salto de índice, más económicas, se produce un ensanche del impulso transmitido como consecuencia de los diferentes tiempos de propagación. Esto significa que el ancho de banda transmitido será menor cuanto mayores sean las diferencias de los tiempos de propagación en el punto de recepción.

Con las fibras de índice gradual se alcanzan anchuras de banda de transmisión sensiblemente mayores.

En la fibra monomodo, debido al pequeño diámetro sólo es posible la propagación de un modo. Su principal ventaja es su gran anchura de banda, por lo que es especialmente adecuada para sistemas de transmisión de gran velocidad.

# Canal de transmisión

---

## 7.4 Enlace por infrarrojos

A diferencia de la fibra óptica que es una emisión de radiación conducida por el interior de la fibra, en este caso la emisión infrarroja es en el espacio libre (vía "aire"). Esto repercute en una mayor atenuación y en un efecto de directividad entre el emisor y el receptor. Es el sistema clásico utilizado en mandos a distancia.

Debido a la atenuación que presenta este tipo de enlace es un sistema útil para distancias cortas, relativamente barato y cómodo. Debe existir visión óptica entre emisor y receptor, ya que los rayos infrarrojos no atraviesan las superficies opacas.

Tampoco es sensible a las interferencias electromagnéticas ni supone continuidad óhmica entre emisor y receptor. Sin embargo, debido a variaciones de la luz infrarroja en el ambiente, pueden producirse interferencias y captarse ruidos. Asimismo, los objetos a una cierta temperatura emiten infrarrojos, por lo que su presencia en el entorno del canal de comunicaciones puede modificar el nivel de ruido en la recepción.

Para mejorar la eficiencia de la comunicación suelen usarse ópticas en el emisor y/o en el receptor para concentrar los rayos infrarrojos transmitidos o recibidos.

---



# Canal de transmisión

---

## 7.5 Enlace vía radio

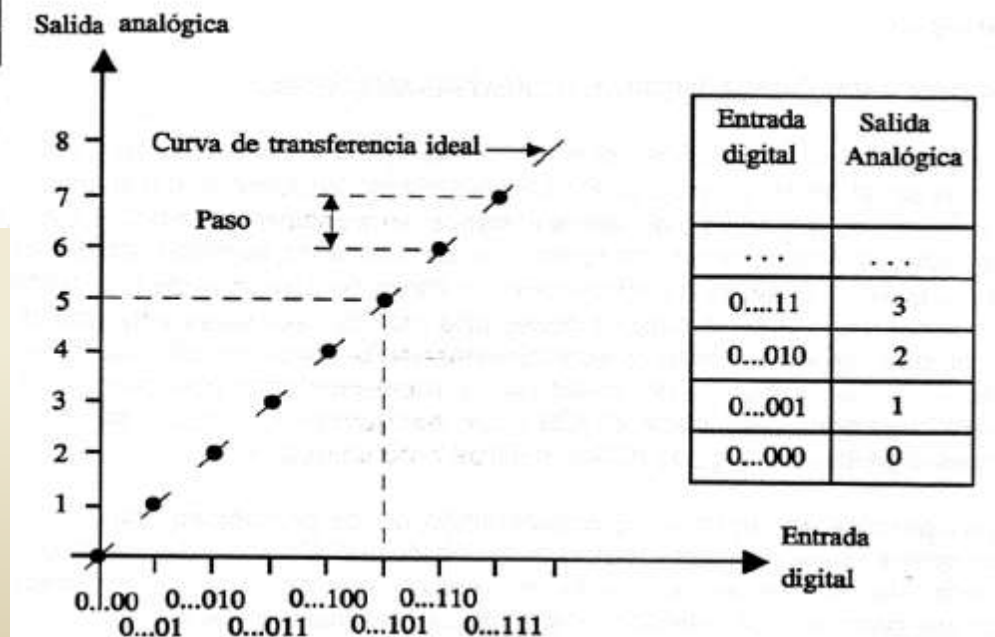
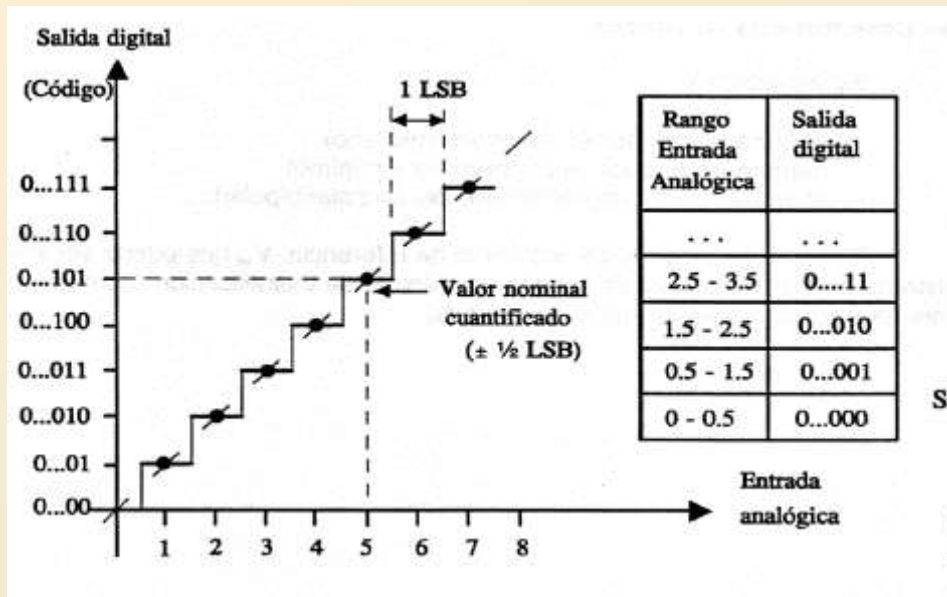
Es el sistema más utilizado hoy en día en comunicaciones y radiodifusión comercial.

En el equipo se transmite con una portadora a 27 MHz, con una modulación de amplitud. El medio, al igual que en infrarrojos, también introduce una degradación en la información. Al no existir un soporte físico este sistema resulta en general bastante barato, especialmente para largas distancias.

Es sensible a interferencias electromagnéticas que caigan dentro de la banda utilizada. La interferencia puede provenir de una máquina o incluso de otra emisora que esté utilizando una banda cercana a la nuestra.

---

# Conversión A/D y D/A



# Conversión A/D

## a.- Características de entrada

Se especifican:

- el número de canales (normalmente uno)
- margen de entrada (valor máximo y mínimo)
- el tipo de señal (tensión/corriente, unipolar/bipolar)...

También se dispone de una señal de referencia,  $V_{ref}$ , que puede ser interna o externa a partir de la cual se obtiene el intervalo de cuantificación (normalmente es interna y queda transparente al diseñador).

## b.- Características de salida

Se especifican:

- el número de bits de salida que determinan la **resolución** del CAD. Esta se define como el menor cambio que se debe producir en la señal analógica de entrada para tener un cambio perceptible a su salida. Esta magnitud define el **LSB** (Least Significant Bit), bit menos significativo, usado como unidad de referencia para otros parámetros en las especificaciones. Así, si se dispone de un conversor de  $n$  bits, se tienen  $2^n$  códigos digitales posibles.

Por tanto, se tiene que:

$$1 \text{ LSB} = V_{ie} / (2^n - 1) \text{ donde } V_{ie} \text{ es el valor de fondo de escala.}$$

En la práctica la resolución viene limitada por el ruido presente en el sistema de adquisición.

- el código de salida (binario natural, BCD...)
- velocidad de salida (bit rate) en conversores de salida serie.

# Conversión A/D

## c.- Características de la relación entrada-salida

En la transformación de la relación entre la entrada y la salida, se definen dos parámetros relativos a la **exactitud** y a la **velocidad**.

La **velocidad de conversión** se refiere al tiempo necesario para realizar una conversión para una entrada determinada. Se trata de uno de los factores que influyen en la elección de un CAD.

En el proceso de cuantificación, se definen dos parámetros relativos a la **exactitud del sistema**. Estos errores se definen en cinco términos:

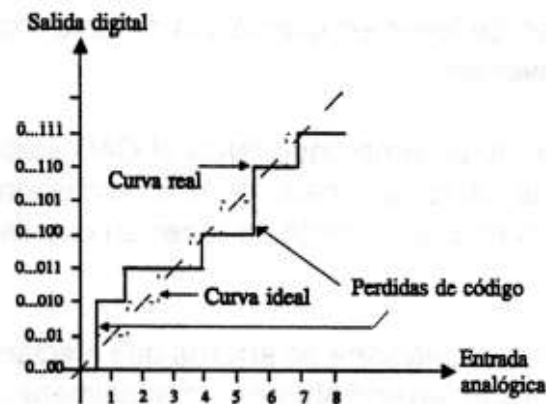
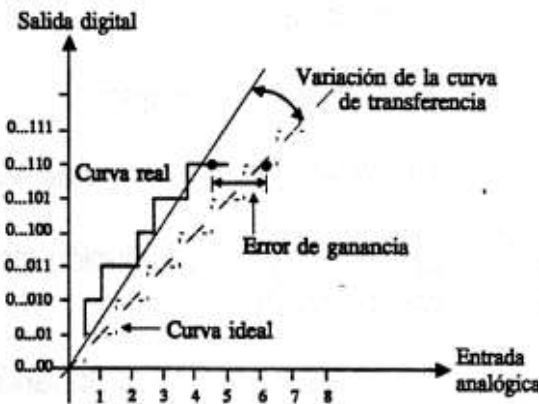
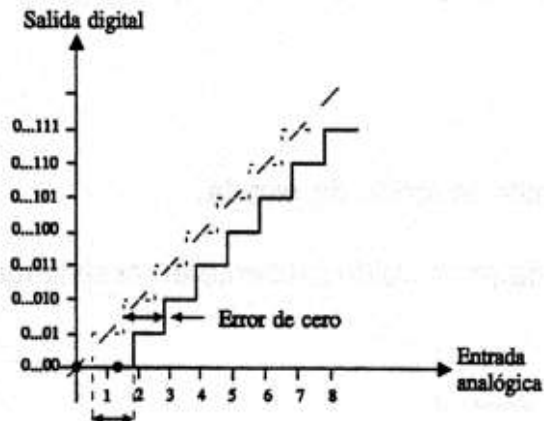
Estos dos errores se pueden corregir mediante calibración.

- No-linealidad diferencial (differential non linearity), definida como la anchura de paso de cuantificación actual y el valor ideal de un LSB. Por consiguiente, si éstos coinciden, este error es cero. Sino, se pueden perder códigos en la conversión (fig.1.1.c.).
- No-linealidad integral (integral non-linearity), definida como la desviación de los valores de la función de transferencia actual con la ideal cuando los errores de cero y ganancia son nulos.

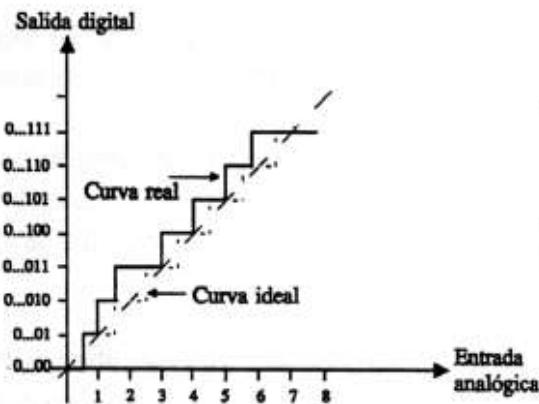
- Error de cero (offset error), definido como la diferencia entre el valor de offset nominal y actual, como se muestra en la figura 1.1.a. En este caso, para un CAD, se produce un desplazamiento horizontal de la curva de un  $\frac{1}{2}$  LSB que afecta a todos los códigos.
- Error de ganancia (gain error), definido como la diferencia entre la pendiente de la curva de transferencia real y la ideal, en ausencia de otros errores (fig.1.1.b).

- Monotonicidad, es un parámetro que garantiza que el conversor no cambia de polaridad, de forma que no se puedan presentar dos salidas para una misma entrada.

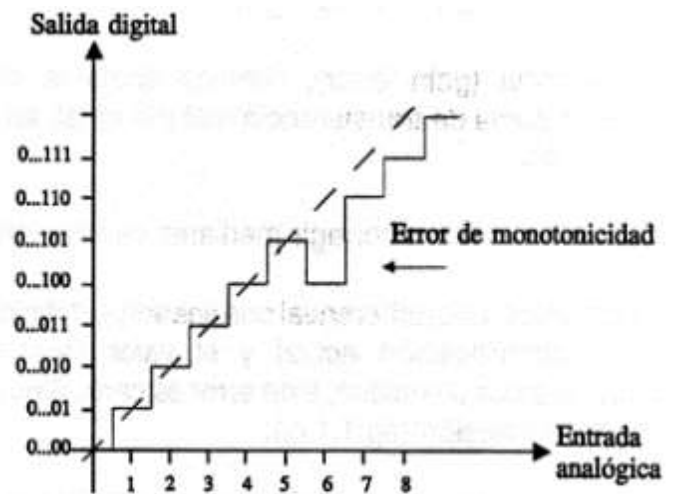
# Conversión A/D: Tipos de errores



c) No-linealidad diferencial



d) No-linealidad integral



e) No monotonicidad

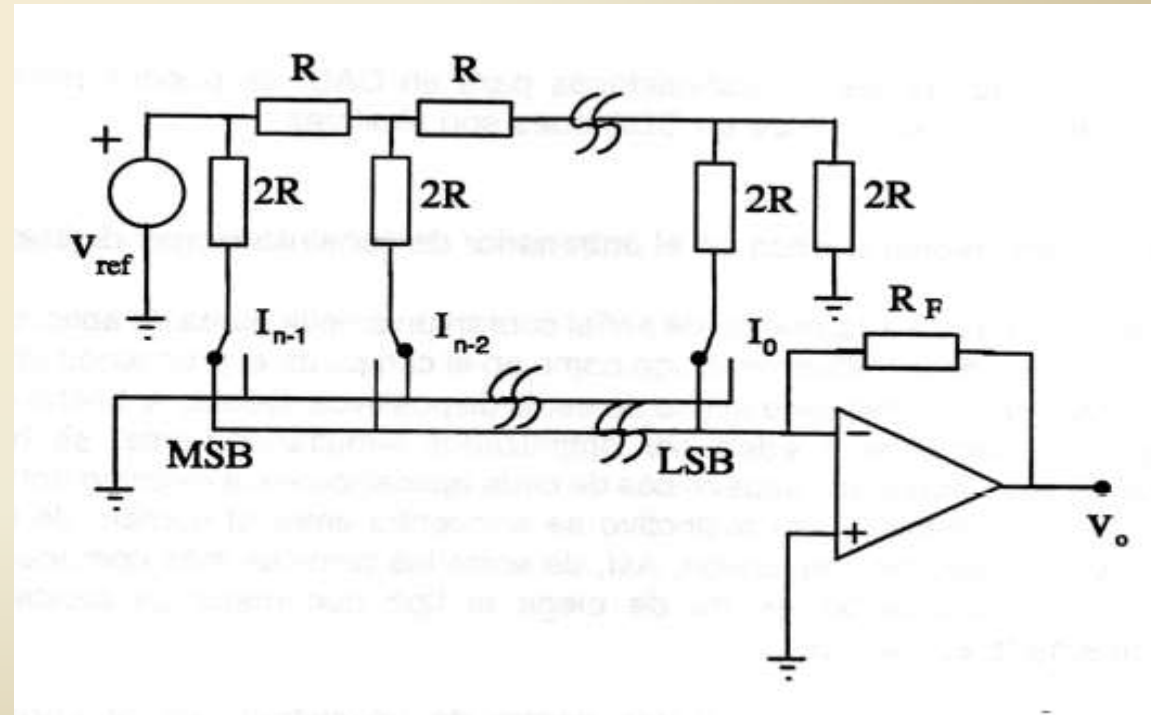


# Convertidores A/D y D/A utilizados en el Entrenador

## Convertidor D/A : R-2R ladder

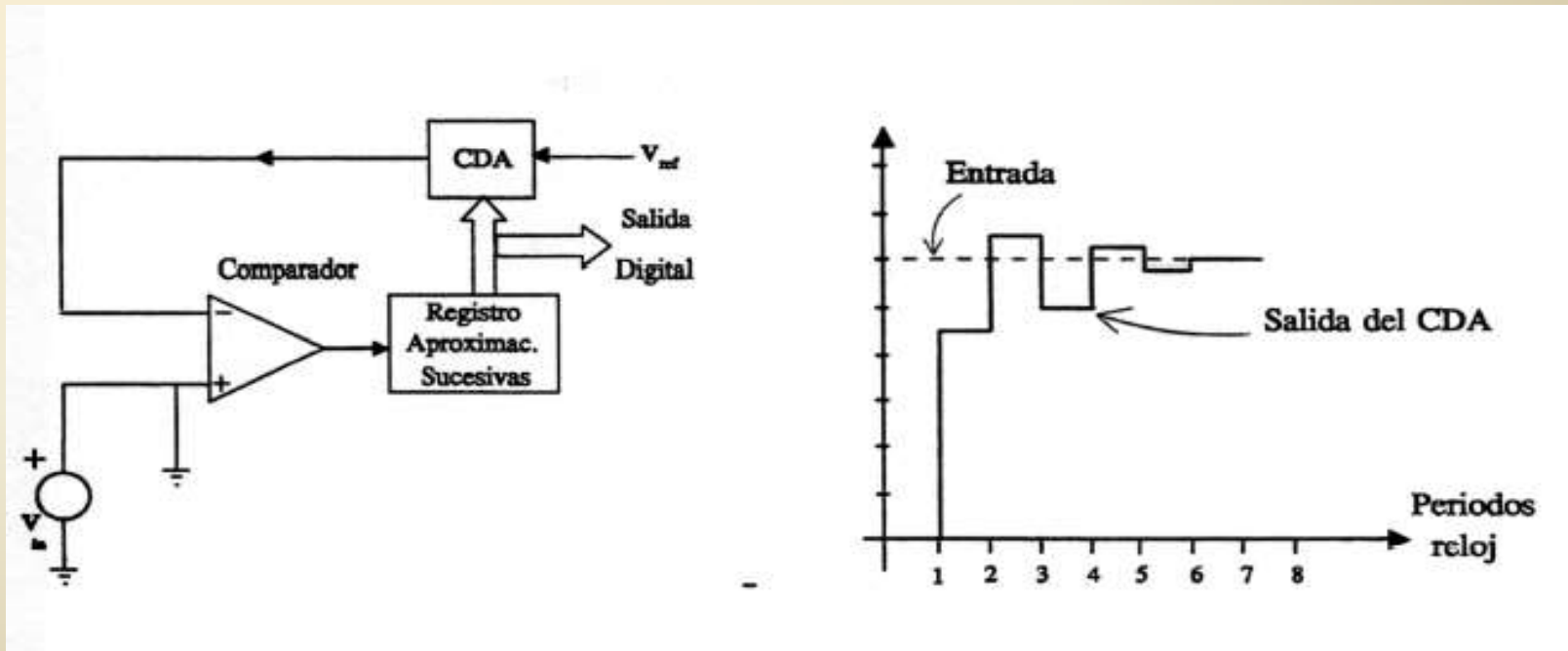
$$V_o = V_{ref} (I_{n-1}2^{-1} + I_{n-2}2^{-2} + \dots + I_02^{-n})$$

donde  $V_{ref}$  es la tensión analógica de referencia.

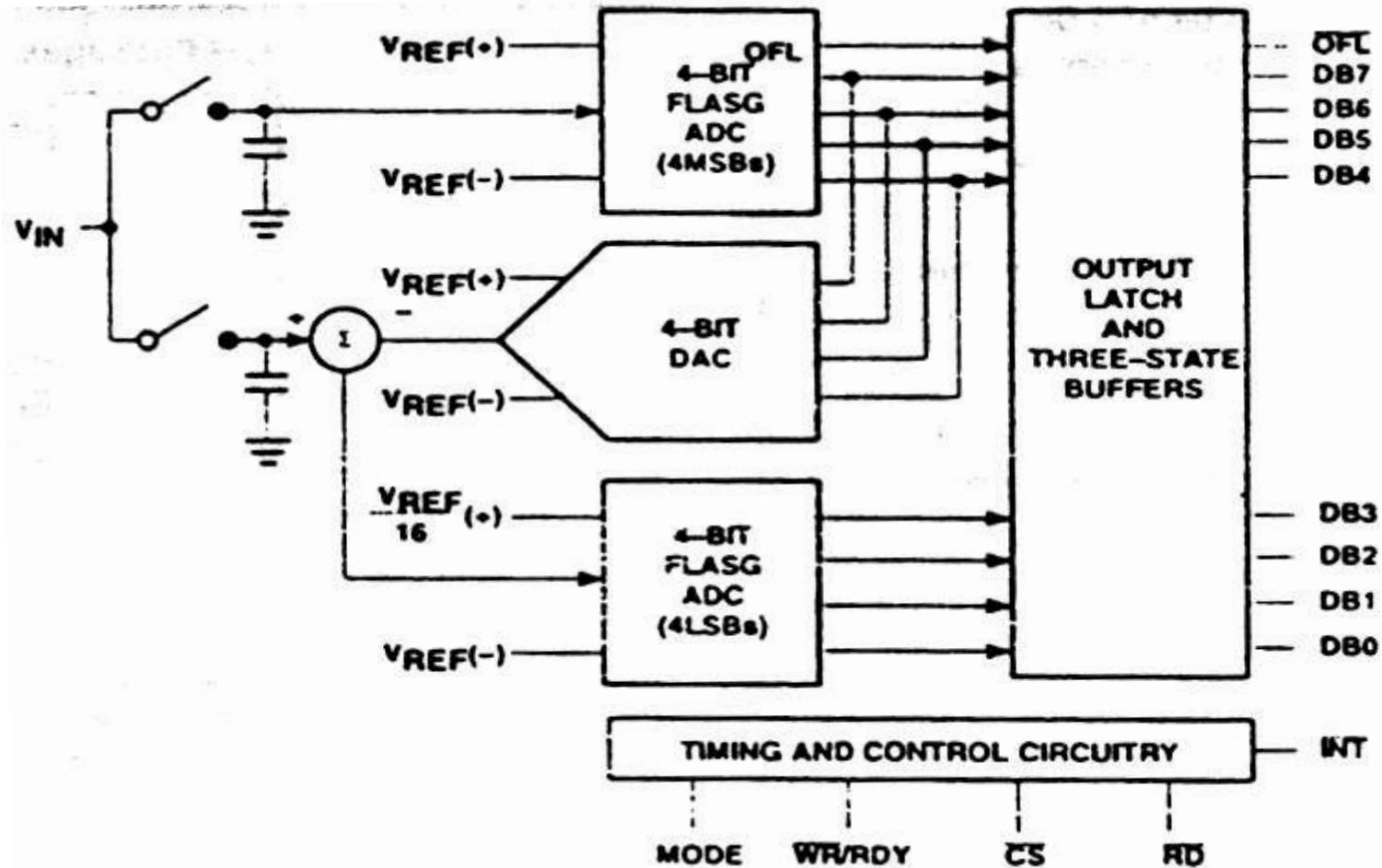


# Convertidores A/D y D/A utilizados en el Entrenador

## Convertidor A/D : Convertidor FLASH



# Convertidor ADC0820: Diagrama de bloques



# Convertidor DAC08: Diagrama de bloques

