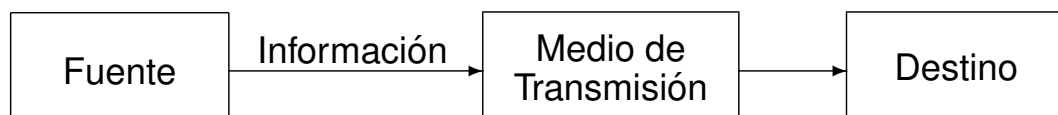


# TEMA 1

## INTRODUCCIÓN

### Definición: sistema de comunicaciones

- Finalidad de un sistema de comunicaciones: *transmisión*
- Transmisión: *Proceso de **enviar**, transportar, información de un punto (fuente) hasta otro punto (destino) a través de un canal o medio de transmisión*



- Sistema de comunicaciones analógico
  - Diseñado para enviar como información una forma de onda continua
- Sistema de comunicaciones digital
  - Diseñado para enviar como información una secuencia símbolos pertenecientes a un conjunto finito
    - Ejemplo más común: Bits:  $\{0, 1\}$
- Preponderancia de los sistemas de comunicaciones digitales

## Ventajas de los sistemas digitales

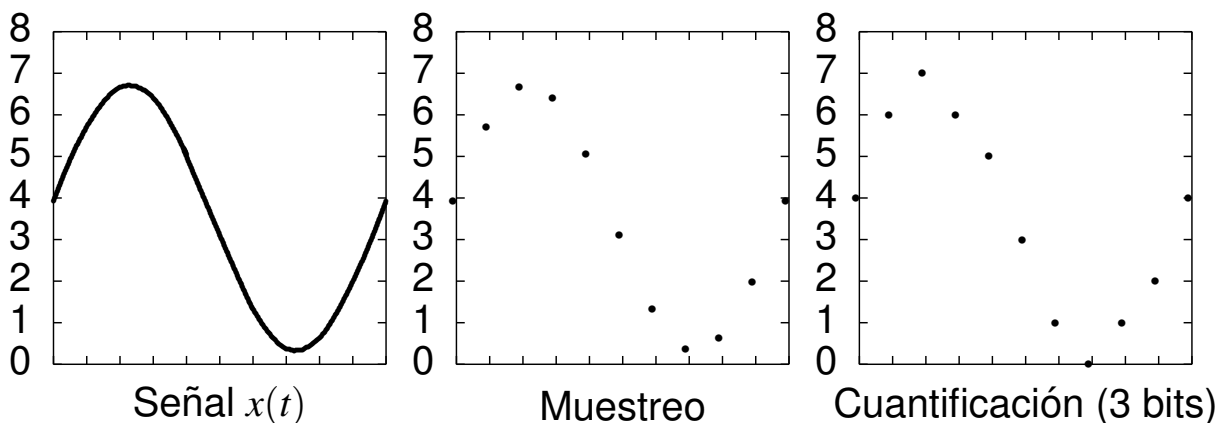
- Capacidad de regeneración
- Formato independiente del tipo de información (voz, datos, TV, etc.)
- Permite corregir la distorsión introducida por el canal (igualación)
- Permite utilizar CDM/CDMA (además de FDM/FDMA y TDM/TDMA) como mecanismo de multiplexación/acceso al medio
- Existen técnicas de detección y corrección de errores
- La información se puede encriptar (proteger)
- Los circuitos son, en general
  - Más fiables
  - De menor coste
  - Más flexibles (programables)

## Desventajas de los sistemas digitales

- Necesidad de sincronismo
- Mayor ancho de banda
- Muchas fuentes de información son de naturaleza analógica
  - Conversión A/D
    - Muestreo
    - Cuantificación → error de cuantificación
  - Conversión D/A
    - Interpolación
    - Filtrado paso bajo

## Conversión Analógico Digital (A/D)

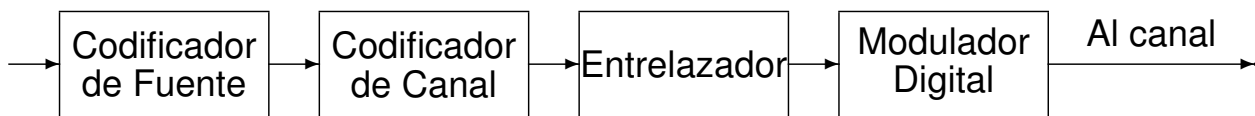
- Fuentes analógicas: amplitudes continuas, tiempo continuo
- Conversión analógico/digital:
  - Muestreo: tiempo discreto,  $x$  muestras/s
  - Cuantificación: amplitudes discretas,  $n$  bits/muestra
    - Ruido de cuantificación: sólo hay  $2^n$  niveles de cuantificación



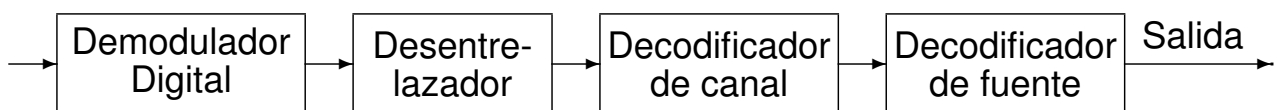
- Velocidad binaria (bits/s): Frecuencia de muestreo (muestras/s)  $\times$  bits/muestra

## Transmisor/Receptor Digital

- Transmisor digital



- Receptor digital



## Codificadores de fuente y de canal

- Codificador de fuente

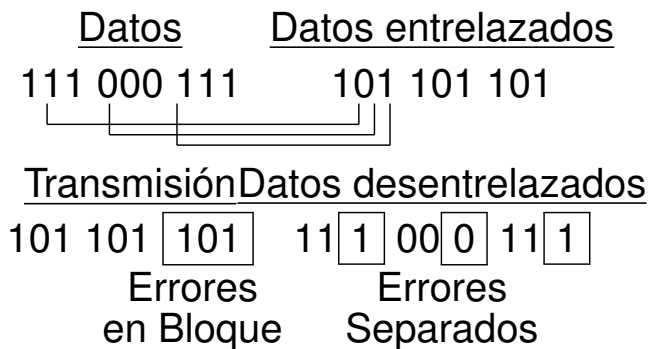
- Reduce la redundancia de la fuente (compresión)
- Reducción de la tasa binaria a transmitir

- Codificador de canal

- Detección y corrección de errores
- Introducción de redundancia de forma controlada
- Capacidad de detección/corrección en función de su complejidad
- Ejemplo más sencillo: códigos de repetición
  - Código de repetición de orden 1:  $0 \rightarrow 00$   $1 \rightarrow 11$ 
    - Detecta 1 error sobre un bloque de dos bits
  - Código de repetición de orden 2:  $0 \rightarrow 000$   $1 \rightarrow 111$ 
    - Detecta 2 errores o corrige 1 error (corrección basada en decisión por mayoría) sobre un bloque de tres bits

# Entrelazado (Interleaving)

- Protección frente a errores de ráfaga
- Reordenación de bits
- Ejemplo más sencillo: entrelazadores bloque matriciales



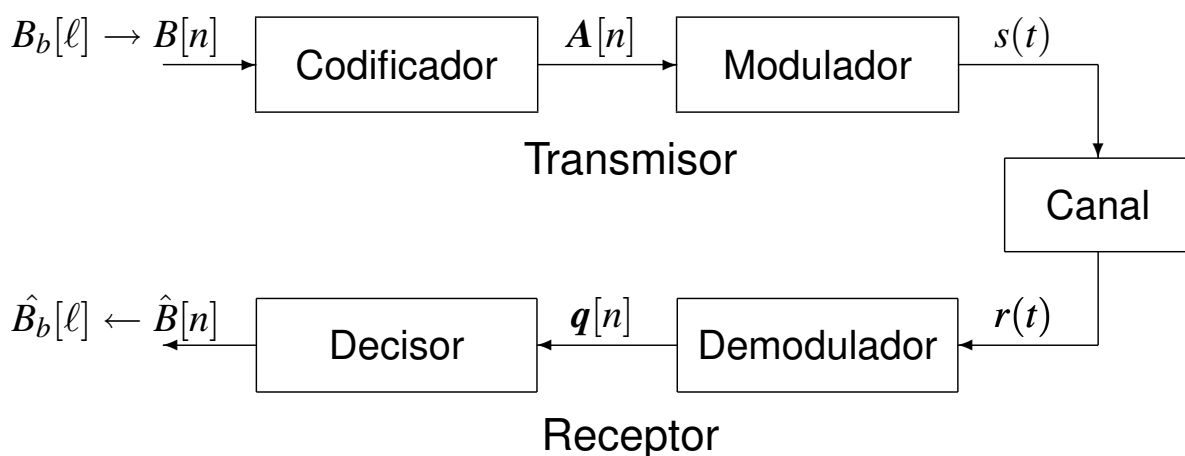
Entrelazador  $N_c \times N_b$       Desentrelazador  $N_b \times N_c$

1	0	1
1	0	1
1	0	1

1	1	1
0	0	0
1	1	1

Entada de datos: por columnas  
Salida de datos: por filas

# Modelo de comunicación digital



$$B_b[l] \in \{0, 1\}$$

$$B \rightarrow b_i, \quad i = 0, 1, \dots, M - 1$$

$$A \rightarrow a_i, \quad i = 0, 1, \dots, M - 1$$

$$a_i = \begin{bmatrix} a_{i,0} \\ a_{i,1} \\ \vdots \\ a_{i,N-1} \end{bmatrix}$$

## Codificador

- Representación discreta de las señales
  - Constelación:  $\{\mathbf{a}_i\}_{i=0}^{M-1}$
- $M = 2^m$  símbolos -  $m = \log_2 M$  bits por símbolo
- Velocidad binaria ( $R_b$ ) - Velocidad de símbolo ( $R_s$ )

$$R_b = \frac{1}{T_b} \text{ bits/s} - R_s = \frac{1}{T} \text{ símbolos/s (baudios)} - R_b = m \cdot R_s$$

- Diseño de la constelación:  $P_e, BER, E_s$ 
  - Prestaciones: distancia entre símbolos (distancia mínima)

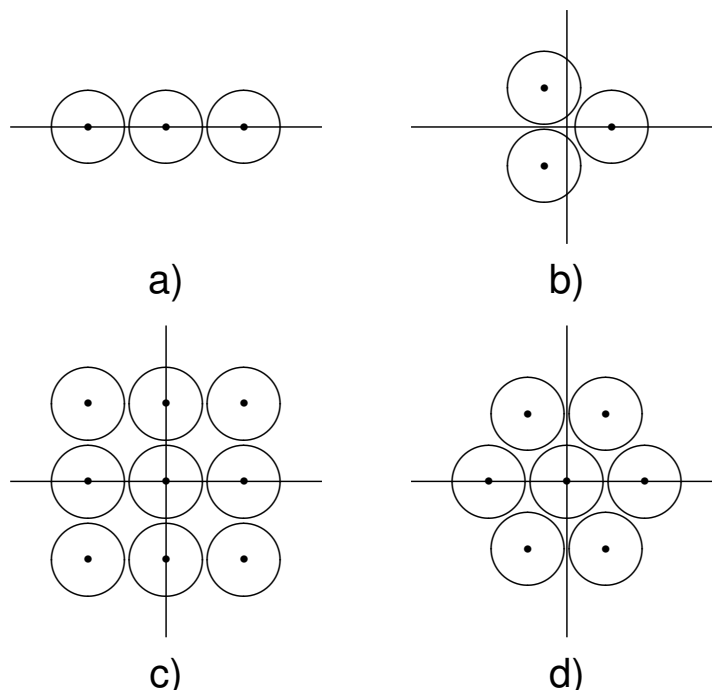
$$d(\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j) = \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (a_{i,k} - a_{j,k})^2}$$

- Energía de un símbolo: norma al cuadrado

$$\mathcal{E}\{\mathbf{a}_i\} = \|\mathbf{a}_i\|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} (a_{i,k})^2$$

## Codificador (II)

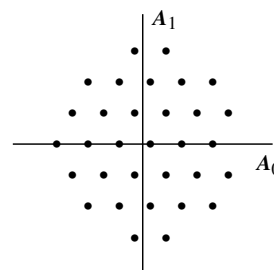
- Diseño de la constelación:  $P_e, BER, E_s$
- Diseño óptimo: Empaquetado de esferas



## Codificador (III)

- Empaquetado de esferas

- Óptimo:  $P_e$  mínima para una  $E_s$  dada
- Constelaciones hexagonales



- Consideraciones prácticas

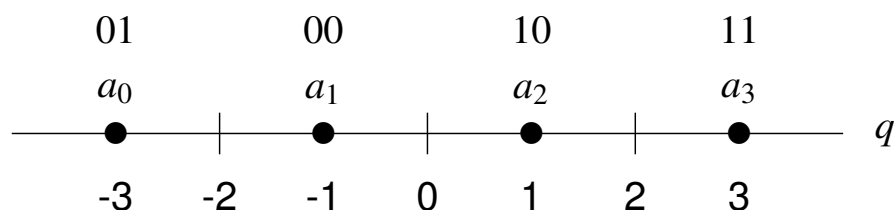
- Facilidad de implementación del transmisor
- Limitación de la energía de pico
- Relación potencia media/potencia de pico
- Facilidad de implementación del receptor
- ⇒ Constelaciones QAM, PSK, unipolares, ortogonales, ...

- Asignación binaria

- $M$  símbolos  $\rightarrow m = \log_2 M$  bits/símbolo
- Codificación de Gray (minimiza la BER)

## Codificación de Gray

- Codificar símbolos adyacentes (a mínima distancia) con una asignación binaria que difiera únicamente en un bit

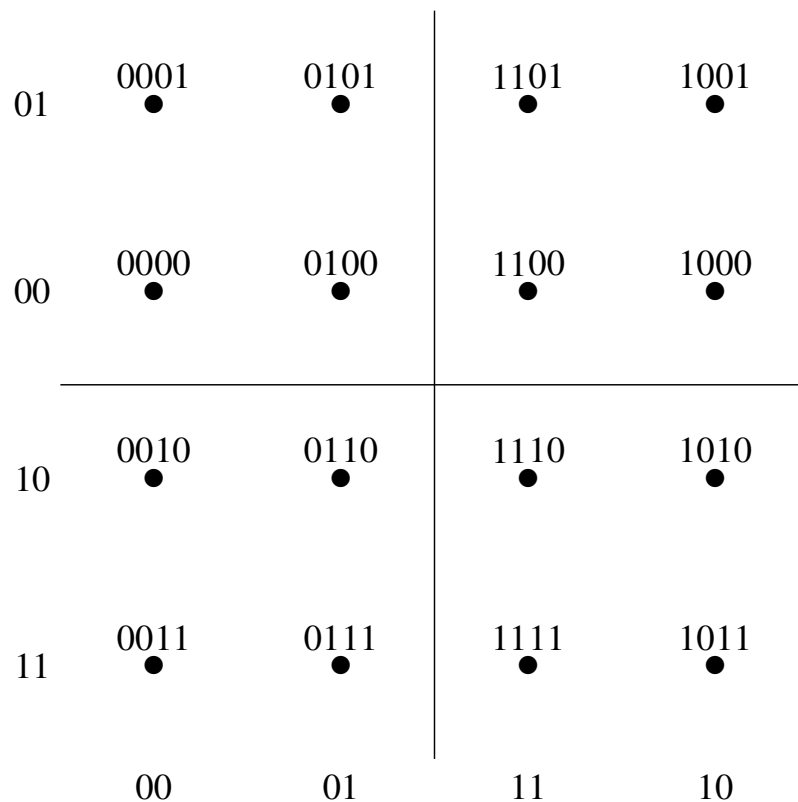


- Para relaciones señal a ruido altas

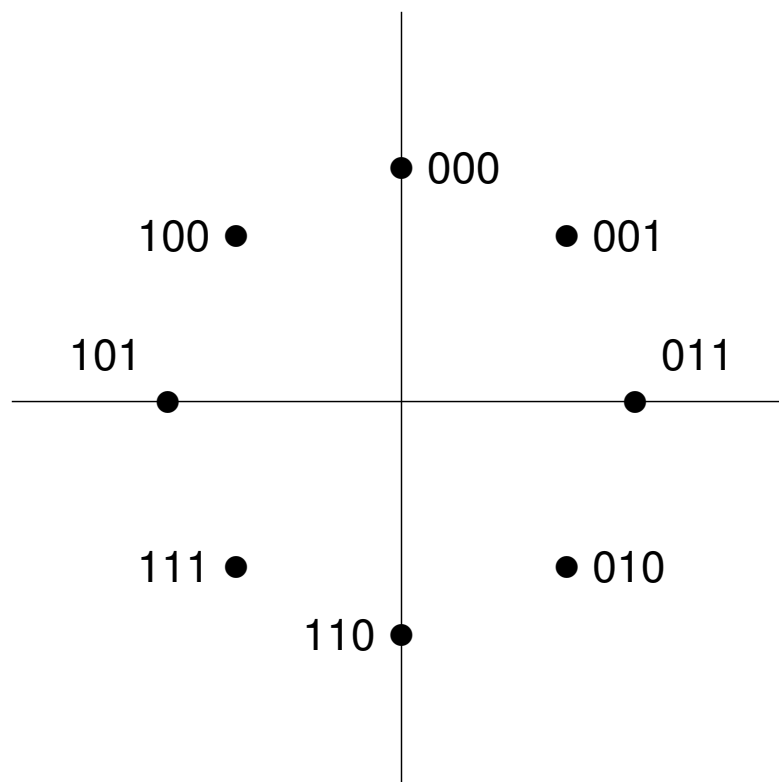
$$BER \approx \frac{1}{m} \cdot P_e$$

$m = \log_2(M)$ : número de bits por símbolo

## Codificación Gray QAM



## Codificación Gray PSK





# Modulador

- Transformación de símbolos a formas de onda analógicas
  - Determina las características espectrales de la señal
  - Adecuación a las características del canal
- Base ortonormal en un espacio de señales de dimensión  $N$

$$\{\phi_j(t)\}, \quad j = 0, \dots, N-1$$

Definidas en el intervalo de duración de un símbolo  $0 \leq t < T$

- Ejemplo  $N = 2$

$$\phi_0(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right), \quad \phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$$

- Generación de la forma de onda asociada al símbolo  $\mathbf{a}_i$

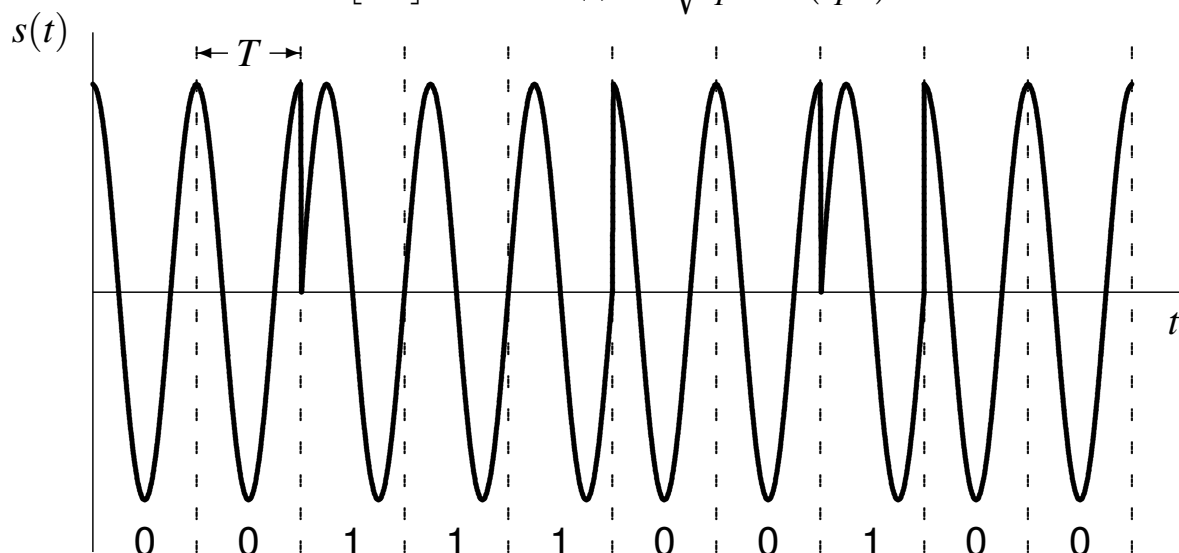
$$s_i(t) = \sum_{j=0}^{N-1} a_{i,j} \cdot \phi_j(t), \quad 0 \leq t < T$$

## Modulador - Transmisión indefinida

$$s(t) = \sum_n \sum_{j=0}^{N-1} A_j[n] \cdot \phi_j(t - nT)$$

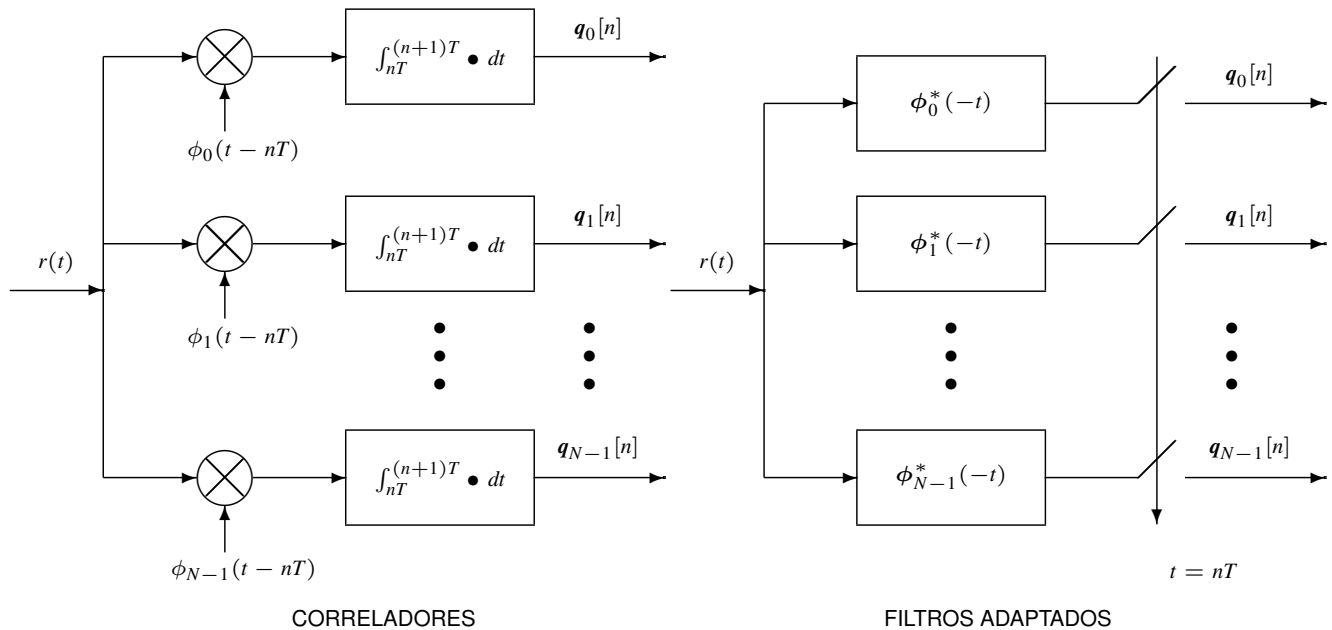
$$1 \rightarrow \mathbf{a}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow s_0(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right), \quad 0 \leq t < T$$

$$0 \rightarrow \mathbf{a}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \rightarrow s_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right), \quad 0 \leq t < T$$



## Demodulador

- Representación en tiempo discreto de una señal continua



## Decisor

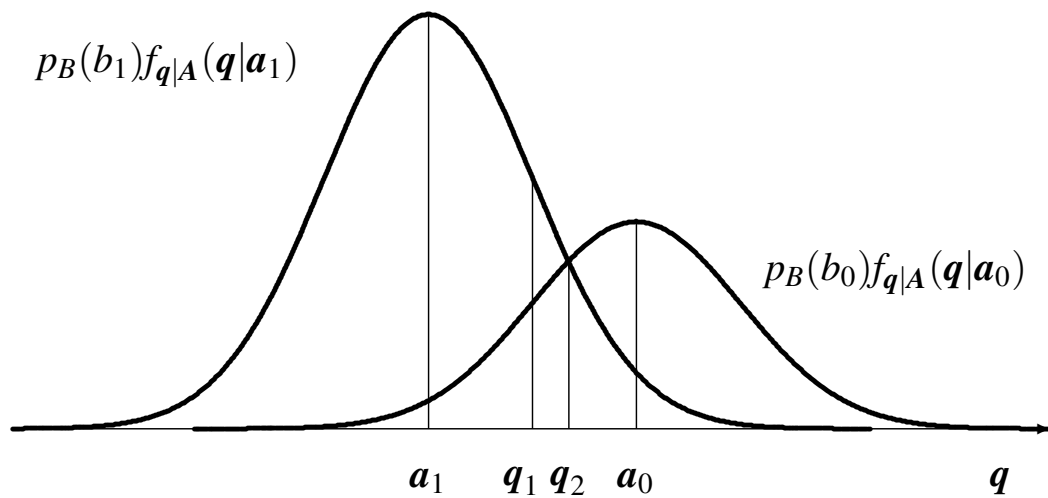
- Regiones de decisión:  $\hat{B} = b_j$  si  $\mathbf{q}_0 \in I_j$
- Minimizar la probabilidad de error de símbolo
  - Asignación para  $\mathbf{q}_0$ : región de decisión del símbolo que maximiza la probabilidad a posteriori  $p_{B|q}(b_j|\mathbf{q}_0)$ 
    - Símbolo  $\mathbf{a}_j$  que maximiza  $p_A(\mathbf{a}_j) \cdot f_{q|A}(\mathbf{q}_0|\mathbf{a}_j)$  (Criterio MAP)
  - Si los símbolos son equiprobables
    - Símbolo  $\mathbf{a}_j$  que maximiza  $f_{q|A}(\mathbf{q}_0|\mathbf{a}_j)$  (Criterio ML)
- Modelo de canal gaussiano (situación ideal)

$$\mathbf{q}[n] = \mathbf{A}[n] + \mathbf{z}[n]$$

- Ruido  $\mathbf{z}[n]$ : Distribución gaussiana  $N$ -dimensional

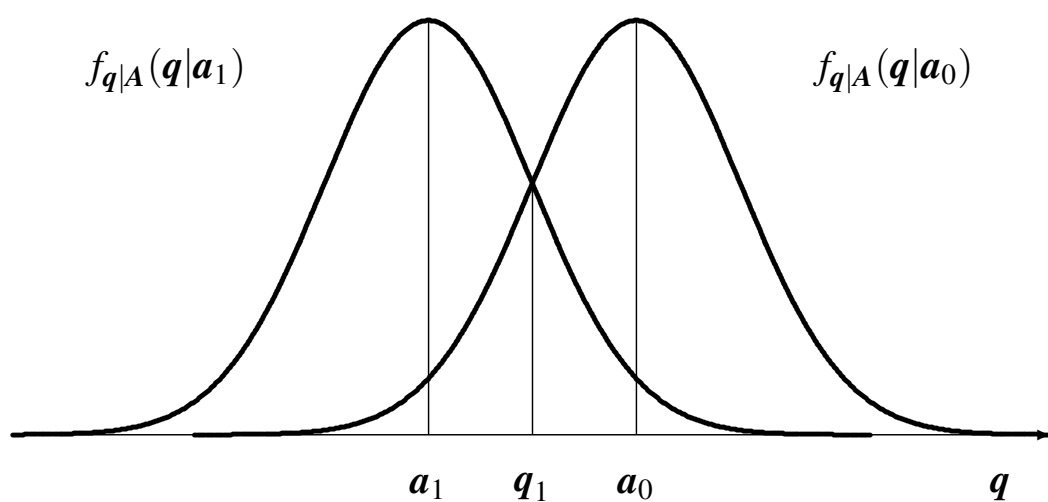
$$f_{q|A}(\mathbf{q}|\mathbf{a}_i) = \frac{1}{(\pi N_0)^{N/2}} e^{-\frac{\|\mathbf{q}-\mathbf{a}_i\|^2}{N_0}}$$

## Criterio MAP



$$I_1 = (-\infty, q_2), \quad I_0 = [q_2, \infty)$$
$$p_B(b_0) < p_B(b_1) \Rightarrow d(q_2, a_0) < d(q_2, a_1)$$

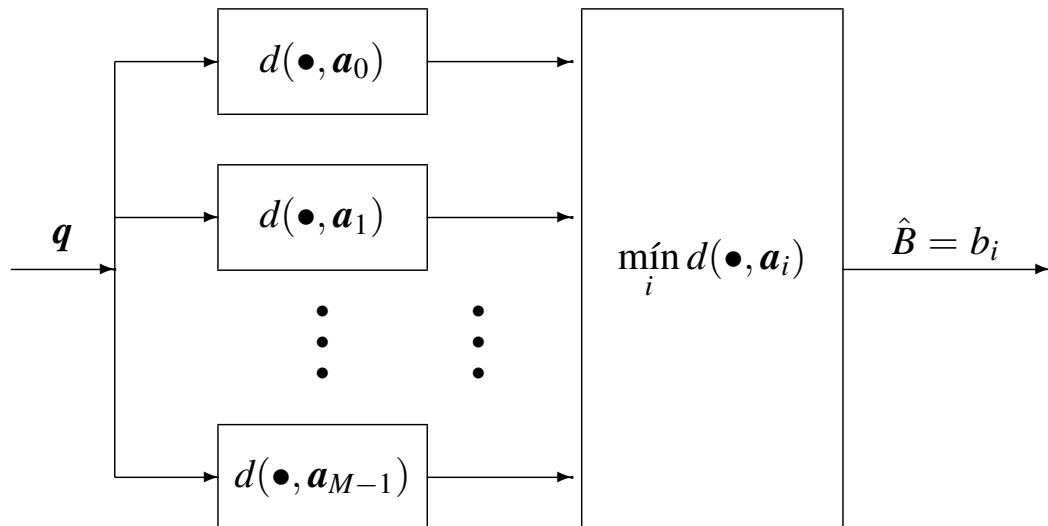
## Criterio ML ( $b_i$ equiprobables)



$$q_1 = \frac{a_0 + a_1}{2}, \quad I_1 = (-\infty, q_1), \quad I_0 = [q_1, \infty)$$

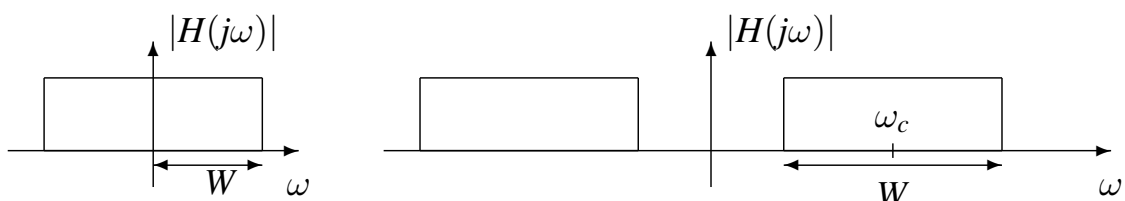
## Decisor de mínima distancia

- Ruido gaussiano
- Símbolos equiprobables



## Características de los canales reales

- Limitación en el ancho de banda
  - El canal disponible normalmente tiene un ancho de banda utilizable limitado ( $B$  Hz,  $W = 2\pi B$  rad./s)
    - Canales en banda base
    - Canales paso banda (frecuencia central  $\omega_c$  rad./s)



- Introducción de distorsiones (canales no ideales)
  - Ruido (gausiano)
  - Distorsión lineal: modelo lineal e invariante:  $h(t)$ ,  $H(j\omega)$

$$q[n] \neq A[n] + z[n]$$

- Distorsión no lineal (no se considerará aquí)