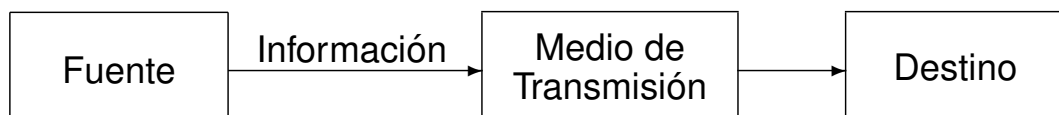


# TEMA 1

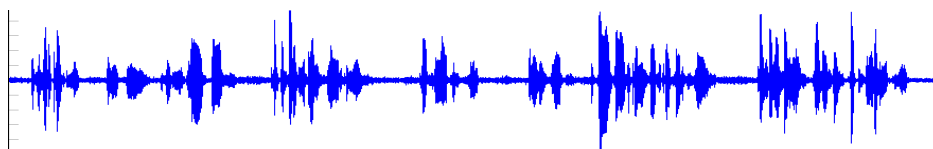
## INTRODUCCIÓN

### 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*



- Representación física de la información para su transmisión
  - ▶ Caso más habitual: señal eléctrica o electromagnética
    - ★ Conversión información / señal eléctrica: Transductor
    - Ejemplo: salida de un micrófono (señal de voz)



# Sistemas de comunicaciones analógicos y digitales

## ● 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 de símbolos pertenecientes a un alfabeto finito ( $M$  posibles valores para cada símbolo)
  - ★ Ejemplo más común: Bits ( $M = 2$ ):  $\{0, 1\}$ 
    - Información: 0110001101110011010101110010011010...
- ▶ Transmisión a una velocidad (tasa de símbolo) dada:  $R_s$  símbolos/s
  - ★ Se transmite un símbolo cada  $T = \frac{1}{R_s}$  segundos
- ▶ Los símbolos han de convertirse en señales eléctricas para su transmisión
  - ★ Cada símbolo se asocia a una forma de onda
  - ★ Caso más simple: formas de onda de  $T = \frac{1}{R_s}$  segundos

## ● Preponderancia de los sistemas de comunicaciones digitales

## Ventajas de los sistemas digitales

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

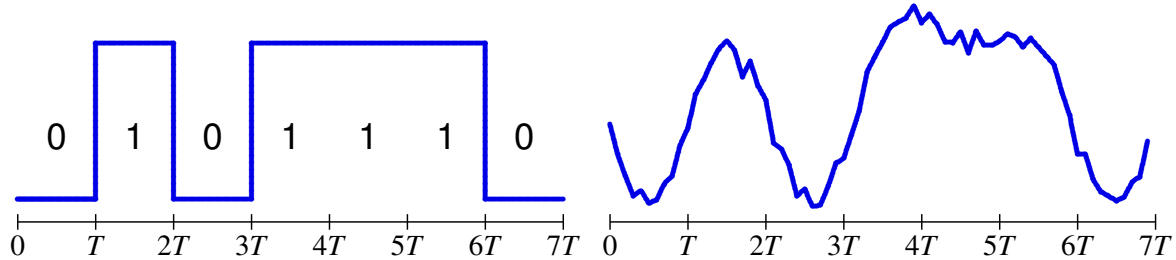
# Regeneración digital

CODIFICACIÓN DE BITS - Sistema binario con pulsos rectangulares

1  $\equiv$  Nivel alto

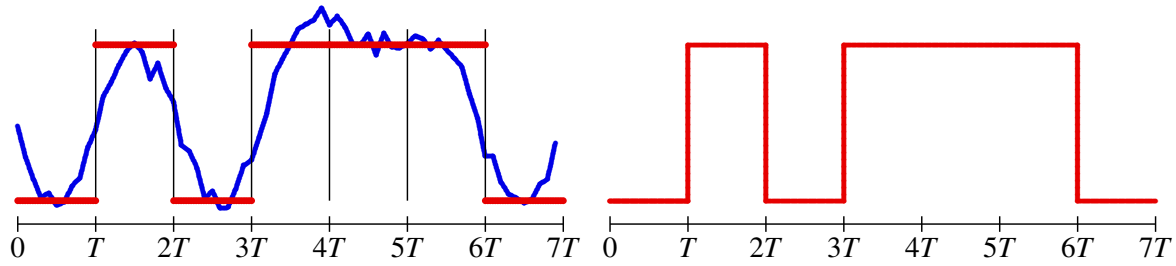
0  $\equiv$  Nivel bajo

SEÑAL DIGITAL TRANSMITIDA    SEÑAL RECIBIDA DISTORSIONADA



IDENTIFICACIÓN DE CADA SÍMBOLO

SEÑAL REGENERADA

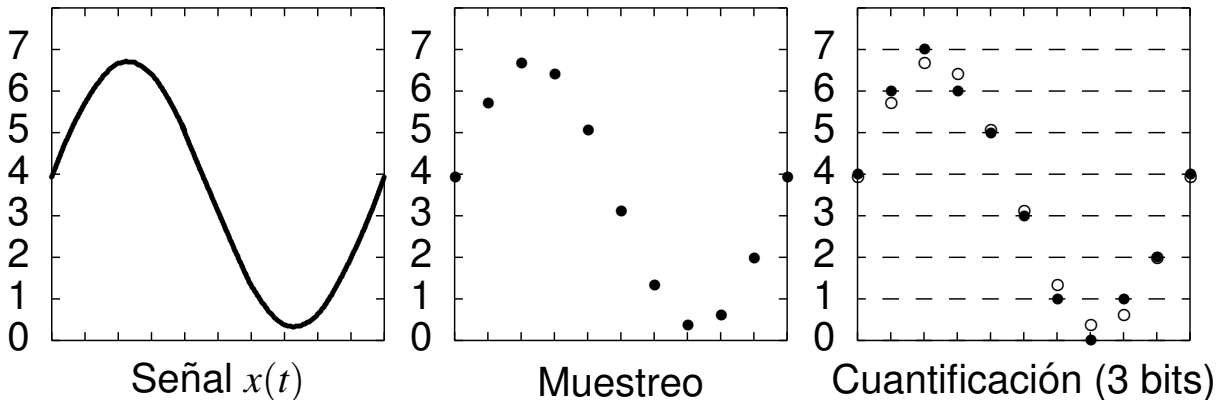


## Desventajas de los sistemas digitales

- Necesidad de sincronismo
  - ▶ Identificación del intervalo de cada símbolo
- Mayor ancho de banda
- Muchas fuentes de información son de naturaleza analógica
  - ▶ Conversión A/D
    - ★ Muestreo
    - ★ Cuantificación  $\rightarrow$  error de cuantificación
  - ▶ Conversión D/A
    - ★ Interpolación
    - ★ Filtrado paso bajo

## Conversión Analógico Digital (A/D)

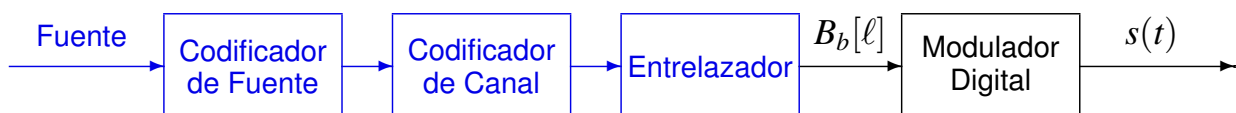
- Fuentes analógicas: amplitudes continuas, tiempo continuo
- Conversión analógico/digital:
  - ▶ Tiempo discreto: Muestreo a frecuencia  $f_s$  muestras/s
  - ▶ Amplitudes discretas: Cuantificación a  $n$  bits/muestra
    - ★ Ruido de cuantificación: sólo hay  $2^n$  niveles de cuantificación
      - Diferencia entre valor muestreado y valor cuantificado
    - ★ Decece a medida que se incrementa  $n$



- Tasa binaria (bits/s):  $R_b = f_s$  (muestras/s)  $\times n$  (bits/muestra)

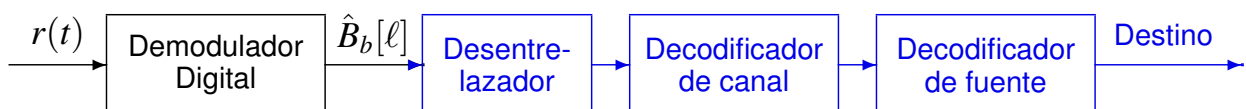
## Transmisor/Receptor Digital - Bloques funcionales básicos

- Transmisor digital



- ▶ Modulador digital: Transmisión de una secuencia de símbolos (generalmente bits,  $B_b[l]$ ) a través de una canal de comunicaciones (señal electromagnética  $s(t)$ )

- Receptor digital



- ▶ Demodulador digital: Recuperación de la secuencia de símbolos (bits,  $\hat{B}_b[l]$ ) a partir de la señal recibida través de una canal de comunicaciones,  $r(t)$

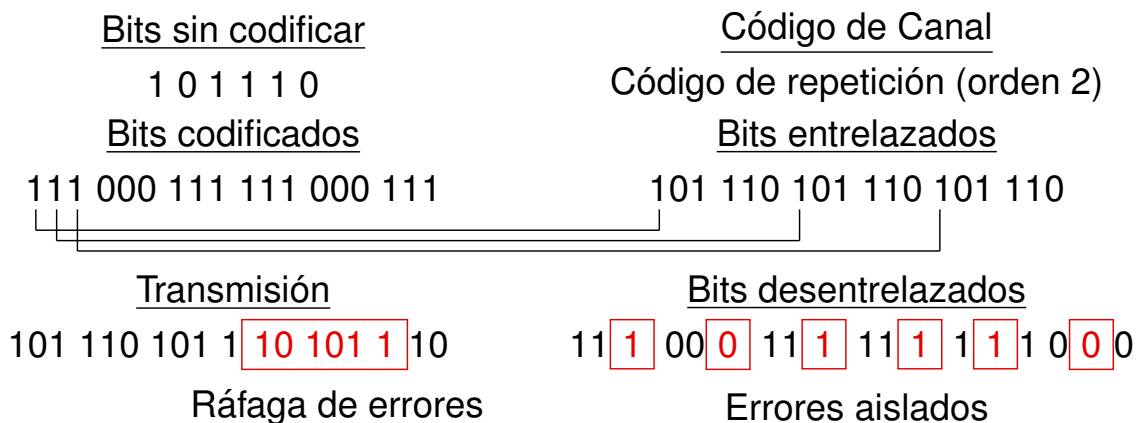
## Codificadores de fuente y de canal

- 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
  - ▶ En combinación con el codificador de canal
- Reordenación de bits
  - ▶ Objetivo: transformar errores de ráfaga en errores aislados
    - ★ El decodificador de canal puede corregir relativamente pocos errores por bloque
- Clases de entrelazadores
  - ▶ Entrelazadores bloque
  - ▶ Entrelazadores convolucionales

## Entrelazado - Un ejemplo



1	0	1	1	1	0
1	0	1	1	1	0
1	0	1	1	1	0

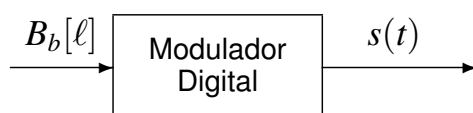
Entrelazador  
 $N_c \times N_b$

Entrelazador Bloque  
Entrada de bits: por columna  
Salida de bits: por fila

1	1	1
0	0	0
1	1	1
1	1	1
1	1	1
0	0	0

Desentrelazador  
 $N_b \times N_c$

## Modulador digital



- Transmisión de bits a una tasa binaria  $R_b = \frac{1}{T_b}$  bits/s
  - ▶ Conversión en una señal eléctrica  $s(t)$
- Transmisión de bits por bloques - Secuencia de símbolos
  - ▶ Segmentación de la secuencia  $B_b[l]$  en bloques de  $m$  bits
  - ▶ Cada bloque de  $m$  bits es un símbolo
    - ★ 1 símbolo  $\equiv m$  bits
    - ★ Alfabeto de posibles símbolos:  $M = 2^m$  símbolos:  $B \in \{b_i\}_{i=0}^{N-1}$
  - ▶ Secuencia de símbolos  $B[n]$ 
    - ★ Tasa de símbolo  $R_s = \frac{1}{T}$  símbolos/s (baudios)
    - ★ Relación entre tasas  $R_b / R_s$ :  $R_b = m \cdot R_s$  (o también  $T = m \cdot T_b$ )
    - ★ Alfabeto de posibles símbolos:  $M = 2^m$  símbolos:  $B \in \{b_i\}_{i=0}^{N-1}$
  - ▶ Transmisión de un símbolo (bloque de  $m$  bits) cada  $T$  seg.
- Conversión de secuencia de bits/símbolos a señal  $s(t)$ 
  - ▶ Generación por tramos: “fragmentos” de  $T$  segundos (correspondientes a 1 símbolo)
    - ★ Intervalo de símbolo para  $B[n]$ : intervalo  $nT \leq t < (n+1)T$

## Conversión símbolo / señal - Modelo más simple

- Se estudia inicialmente el caso del primer símbolo
  - ▶  $B \equiv B[0]$
  - ▶ Intervalo de símbolo:  $0 \leq t < T$
- Conversión símbolo / señal
  - ▶ Alfabeto de  $M$  posibles símbolos:  $B \in \{b_0, b_1, \dots, b_{M-1}\}$
  - ▶ Definición de  $M$  formas de onda de duración  $T$  segundos

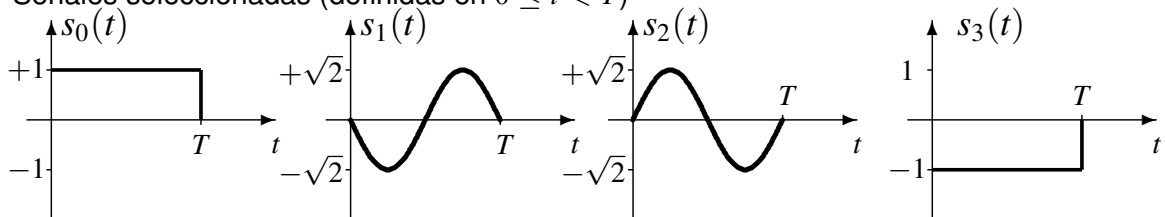
$$\{s_0(t), s_1(t), \dots, s_{M-1}(t)\}, \text{ definidas en } 0 \leq t < T$$

- ▶ Asociación símbolo / forma de onda:  $b_i \leftrightarrow s_i(t)$
- ▶ Generación de la señal a transmitir
  - ★ Si  $B = b_i$ , entonces  $s(t) = s_i(t)$
- Transmisión del símbolo  $B[n]$ 
  - ▶ Intervalo de símbolo:  $nT \leq t < (n+1)T$
  - ▶ Valor de símbolo:  $B[n] = b_j$ 
    - ★ Se traslada la forma de onda asociada a  $b_j$  al intervalo

$$s(t) = s_j(t - nT), \text{ en } nT \leq t < (n+1)T$$

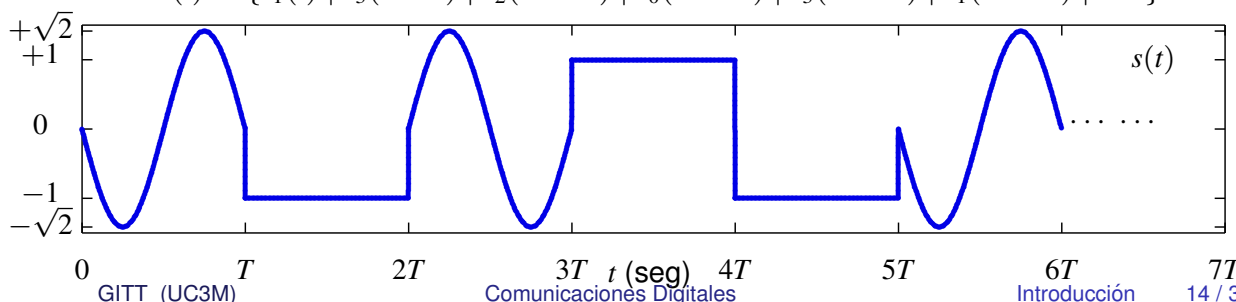
## Ejemplo $M = 4$

- Número de bits por símbolo:  $m = 2 \rightarrow M = 4$  símbolos
- Símbolos:  $b_0 \equiv 00, b_1 \equiv 01, b_2 \equiv 10, b_3 \equiv 11$
- Señales seleccionadas (definidas en  $0 \leq t < T$ )



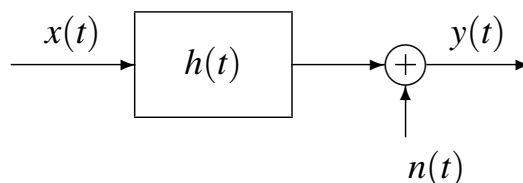
- Secuencia a transmitir:  $B_b[\ell] = 011110001101 \dots$
- Secuencia de símbolos
  - ▶ Segmentación de  $B_b[\ell]$ :  $01 \mid 11 \mid 10 \mid 00 \mid 11 \mid 01 \mid \dots$
  - ▶ Secuencia  $B[n] = b_1 \mid b_3 \mid b_2 \mid b_0 \mid b_3 \mid b_1 \mid \dots$

- Señal transmitida
  - ▶ Generación por intervalos:
 
$$s(t) = \{s_1(t) \mid s_3(t - T) \mid s_2(t - 2T) \mid s_0(t - 3T) \mid s_3(t - 4T) \mid s_1(t - 5T) \mid \dots\}$$



## Transmisión a través del canal

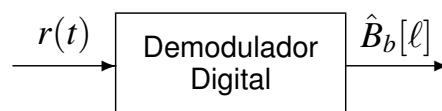
- Señal recibida a la salida del canal,  $r(t)$ 
  - ▶ La señal sufre distorsiones durante la transmisión
  - ▶ No coincide con la señal transmitida:  $r(t) \neq s(t)$
- Modelo de canal - Efectos de distorsión considerados
  - ▶ Distorsión lineal
    - ★ Modelo: sistema lineal e invariante,  $h(t)$ ,  $H(j\omega)$
  - ▶ Ruido térmico
    - ★ Modelo: proceso aleatorio  $n(t)$  estacionario, ergódico, blanco, gaussiano, con densidad espectral de potencia  $S_n(f) = \frac{N_0}{2}$ , siendo  $N_0 = kT$



- ▶ Señal recibida

$$r(t) = s(t) * h(t) + n(t)$$

## Demodulador digital

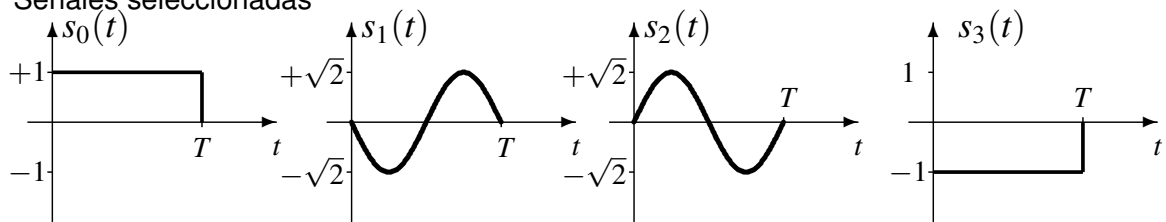


- Recuperación de la secuencia de bits  $B_b[\ell]$  a partir de la señal recibida a través del canal,  $r(t)$ 
  - ▶ La señal sufre distorsiones en la transmisión:  $r(t) \neq s(t)$
- Procesado de  $r(t)$  para recuperar los bits transmitidos
  - ▶ Procesado a tramos: partición en intervalos de símbolo
  - ▶ Estimación del símbolo ( $m$  bits) transmitido en cada intervalo
- Estima del primer símbolo:  $\hat{B} \equiv \hat{B}[0]$ 
  - ▶ Observación de la señal  $r(t)$  en el primer intervalo:  $0 \leq t < T$
  - ▶ Comparar con las  $M$  posibles formas de onda transmitidas
    - ★ Si la "más parecida" es  $s_k(t)$ , entonces  $\hat{B} = b_k$
- Estima del símbolo de índice  $n$ :  $\hat{B}[n]$ 
  - ▶ Observar la señal  $r(t)$  en el intervalo  $nT \leq t < (n+1)T$
  - ▶ Comparar con las  $M$  posibles formas de onda
    - ★ Si la "más parecida" es  $s_v(t)$ , entonces  $\hat{B} = b_v$

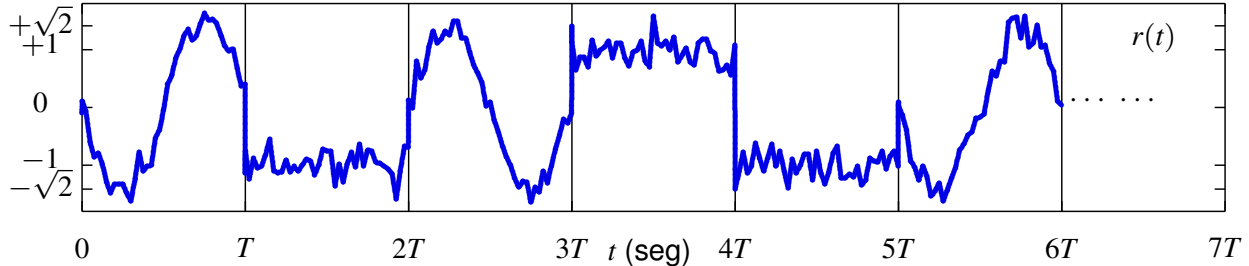


## Ejemplo $M = 4$

- Símbolos:  $b_0 \equiv 00, b_1 \equiv 01, b_2 \equiv 10, b_3 \equiv 11$
- Señales seleccionadas



- Señal recibida



- Detección de símbolos

- ▶ Segmentación de la señal en intervalos de símbolo

- ★  $n = 0$ , intervalo  $0 \leq t < T$  - Señal "más parecida":  $s_1(t) \rightarrow \hat{B}[0] = b_1$
- ★  $n = 1$ , intervalo  $T \leq t < 2T$  - Señal "más parecida":  $s_3(t) \rightarrow \hat{B}[1] = b_3$
- ★ Siguiendo el mismo proceso:  $\hat{B}[2] = b_2, \hat{B}[3] = b_0, \hat{B}[4] = b_3, \hat{B}[5] = b_1$

- Secuencia bits:  $B[n] = b_1|b_3|b_2|b_0|b_3|b_1| \dots \Rightarrow B_b[\ell]: 01|11|10|00|11|01| \dots$

## Selección de las $M$ fomas de onda - Restricciones

- Energía de la señal transmitida

- ▶ Energía media por símbolo transmitido

- ★ Probabilidad de cada símbolo:  $p_B(b_i) = P(B[n] = b_i)$
- ★ Energía media por símbolo

$$E_s = \sum_{i=0}^{M-1} p_B(b_i) \cdot \mathcal{E}\{s_i(t)\}$$

- Adecuación al canal

- ▶ Minimizar la distorsión que sufre la señal en la transmisión

- ▶ Situación ideal:  $s(t) * h(t) = s(t) \rightarrow r(t) = s(t) + n(t)$

- ★ Se consigue si:  $s_i(t) * h(t) = s_i(t)$  para  $i = 0, 1, \dots, M-1$

- Prestaciones: probabilidad de equivocarse al estimar

- ▶ Depende del "parecido" entre señales

- ▶ Medida de "parecido": distancia entre señales

$$d(s_i(t), s_j(t)) = \sqrt{\mathcal{E}\{s_i(t) - s_j(t)\}} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |s_i(t) - s_j(t)|^2 dt}$$

- ★ Reducir errores: incrementar la distancia entre señales

## Selección de las $M$ formas de onda - Representación discreta

- Considerar simultáneamente estas 3 restricciones es difícil en el dominio temporal continuo
- Representación discreta de las señales
  - ▶ Puntos en un espacio de Hilbert  $N$ -dimensional
    - ★ Coordenadas: vector  $N$ -dimensional (Codificador)

$$s_i(t) \rightarrow \mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} a_{i,0} \\ a_{i,1} \\ \vdots \\ a_{i,N-1} \end{bmatrix}$$

- ★ Base ortonormal:  $N$  señales ortonormales (Modulador)

$$\{\phi_0(t), \phi_1(t), \dots, \phi_{N-1}(t)\}, \quad \mathcal{E}\{\phi_j(t)\} = 1, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \phi_j(t) \cdot \phi_k^*(t) dt = 0, \text{ if } k \neq j$$

- ★ Definición de señales en esta representación discreta

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

## Modelo básico de comunicación digital

- Conversión en dos pasos
  - ▶ Codificador: Convierte cada bloque de  $m$  bits ( $b_i$ ) en un punto en el espacio  $N$ -dimensional ( $\mathbf{a}_i$ )
    - ★ Energía y parecido se pueden medir en la representación discreta

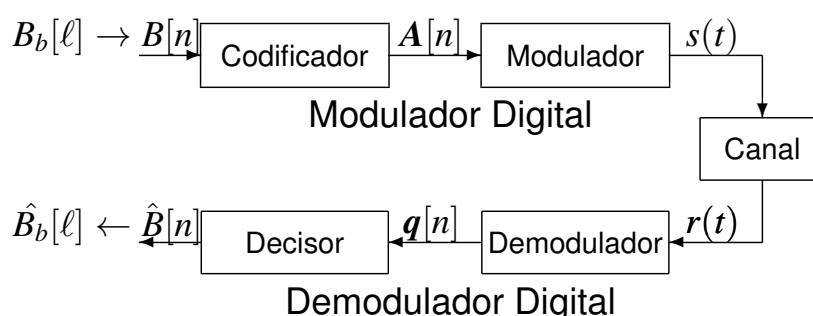
$$\mathcal{E}\{s_i(t)\} \equiv \mathcal{E}\{\mathbf{a}_i\} = \|\mathbf{a}_i\|^2$$

$$d(s_i(t), s_k(t)) \equiv d(\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_k) = \|\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_k\|$$

- ▶ Modulador: Genera la señal asociada a cada símbolo ( $s_i(t)$ ) usando la base
  - ★ Adaptación al canal requiere la adaptación de cada elemento de la base

$$\text{Adaptación ideal : } \phi_j(t) * h(t) = \phi_j(t), \quad \forall j$$

- Modelo de comunicación digital básico



## Codificador

- Convierte una secuencia de bits,  $B_b[\ell]$ , en una secuencia de representaciones discretas de señales (símbolos),  $A[n]$ 
  - ▶ Posibles valores para  $A[n]$ : Constelación:  $\{\mathbf{a}_i\}_{i=0}^{M-1}$ ,  $\mathbf{a}_i \in \mathbb{R}^N$
- $M = 2^m$  symbols -  $m = \log_2 M$  bits por símbolo
- Tasa binaria:  $R_b$  - Tasa de símbolo:  $R_s$

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

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

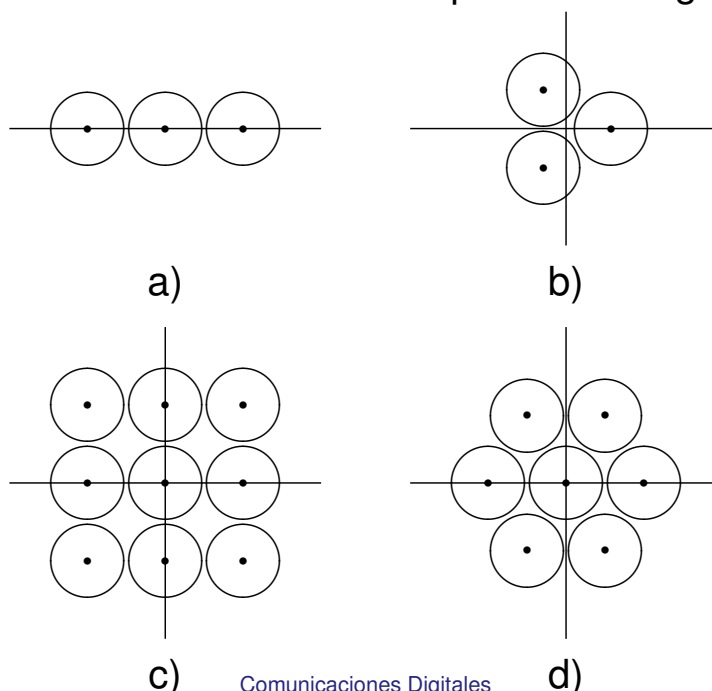
$$d(\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j) = \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (a_{i,k} - a_{j,k})^2}$$

- ▶ Energía de símbolo: norma (distancia al origen) al cuadrado

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

## Codificador (II)

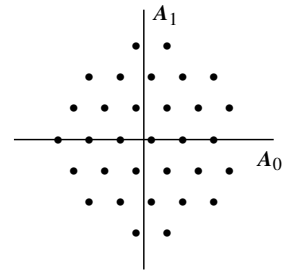
- Diseño de la constelación:  $P_e$ ,  $BER$ ,  $E_s$
- Diseño óptimo: Empaquetado de esferas a), b), y d)
  - ▶ Garantiza una mínima distancia entre símbolos colocando los símbolos lo más cercanos posible al origen



## 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)

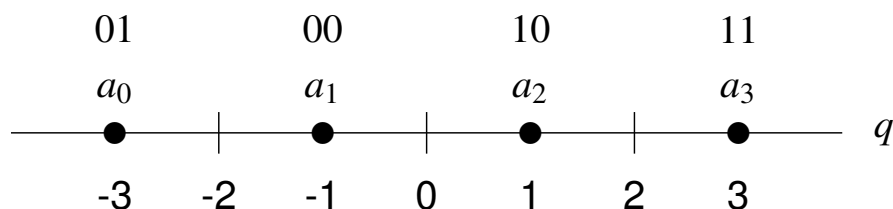
## Asignación binaria: Codificación de Gray

- Asignación binaria

- ▶ Asociar cada posible combinación de  $m$  bits a un punto de la constelación

- Mínima BER para una  $P_e$  dada: Codificación de Gray

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

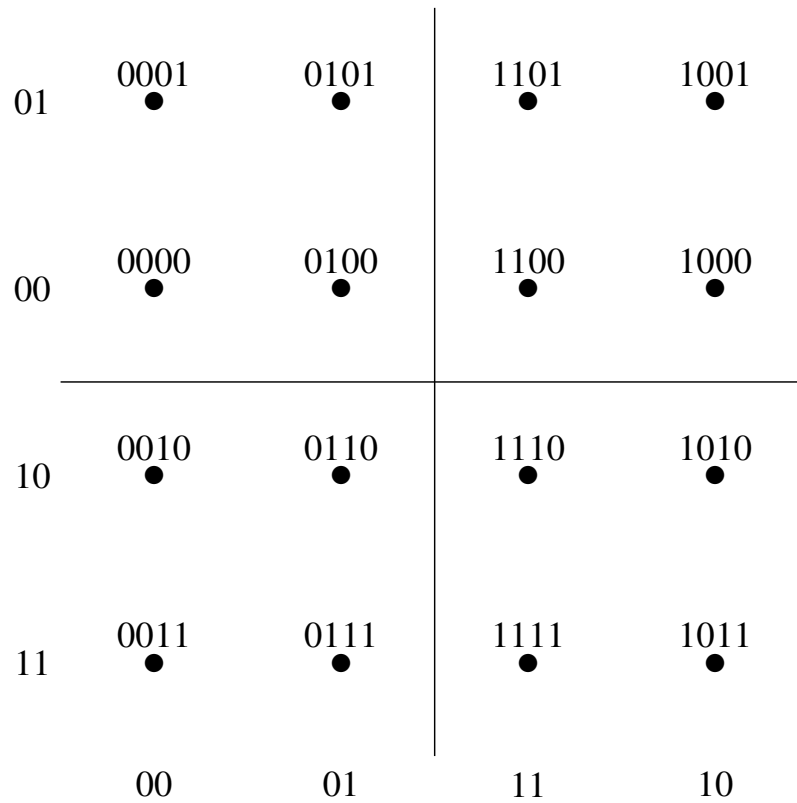


- ▶ Para relaciones señal a ruido altas

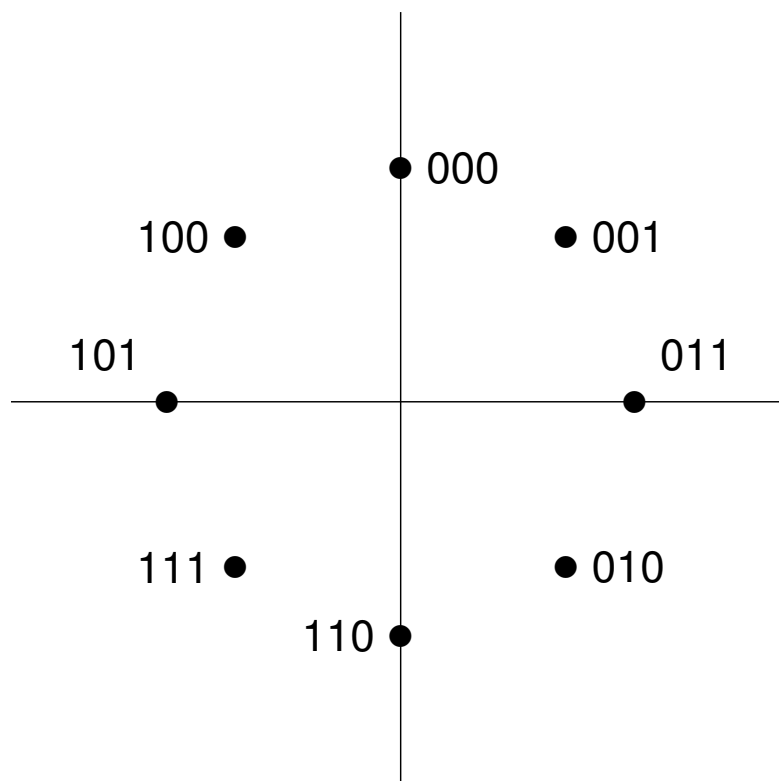
$$BER \approx \frac{1}{m} \cdot P_e$$

$m = \log_2(M)$ : 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  $0 \leq t < T$

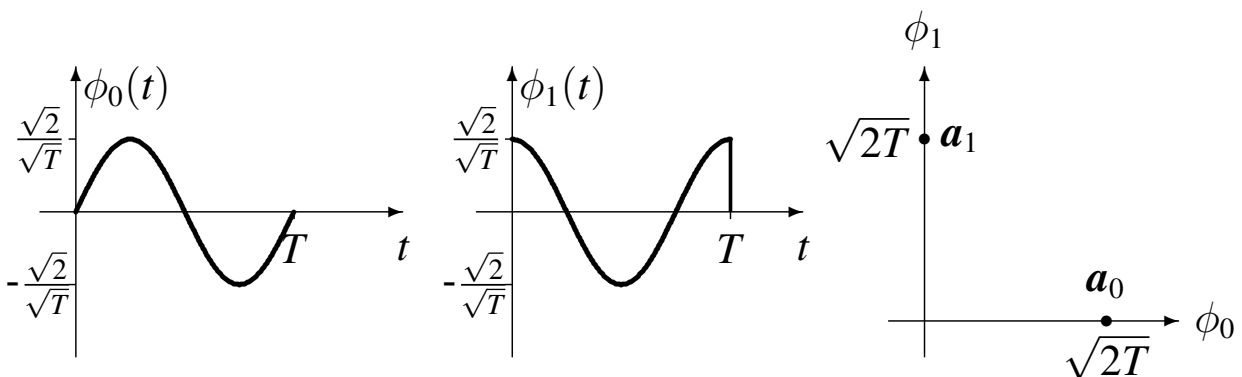
- ▶ Ejemplo  $N = 2$

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

- Generación de la forma de onda asociada al símbolo  $a_i$

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

## Base y constelación - Ejemplo $N = 2$



$$\mathbf{a}_0 = \begin{bmatrix} a_{0,0} \\ a_{0,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2T} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a}_1 = \begin{bmatrix} a_{1,0} \\ a_{1,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{2T} \end{bmatrix}$$

$$s_0(t) = a_{0,0} \cdot \phi_0(t) + a_{0,1} \cdot \phi_1(t)$$

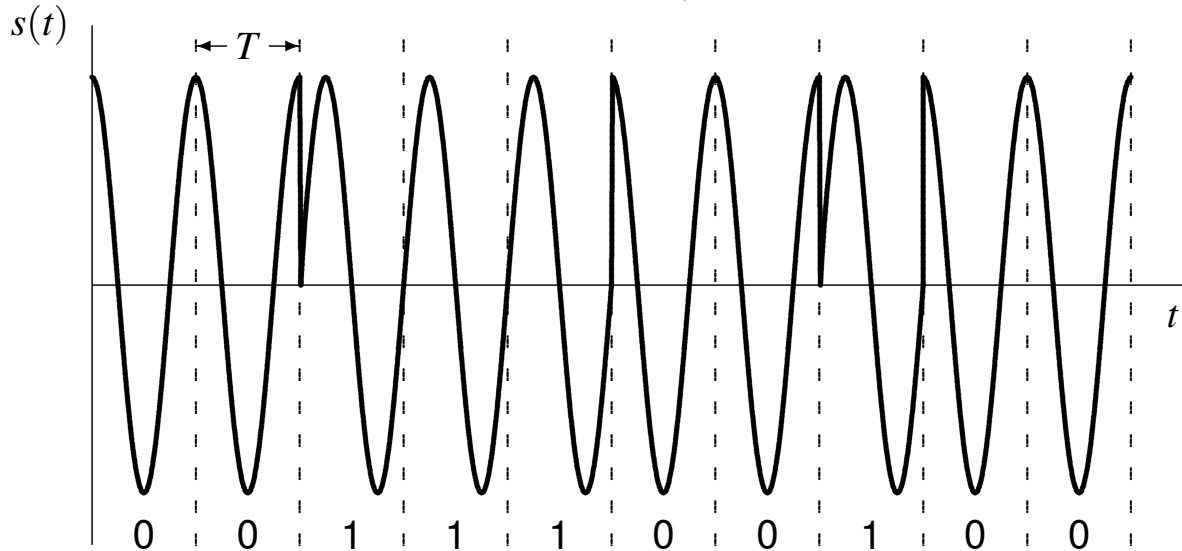
$$s_1(t) = a_{1,0} \cdot \phi_0(t) + a_{1,1} \cdot \phi_1(t)$$

## Modulador - Transmisión indefinida

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

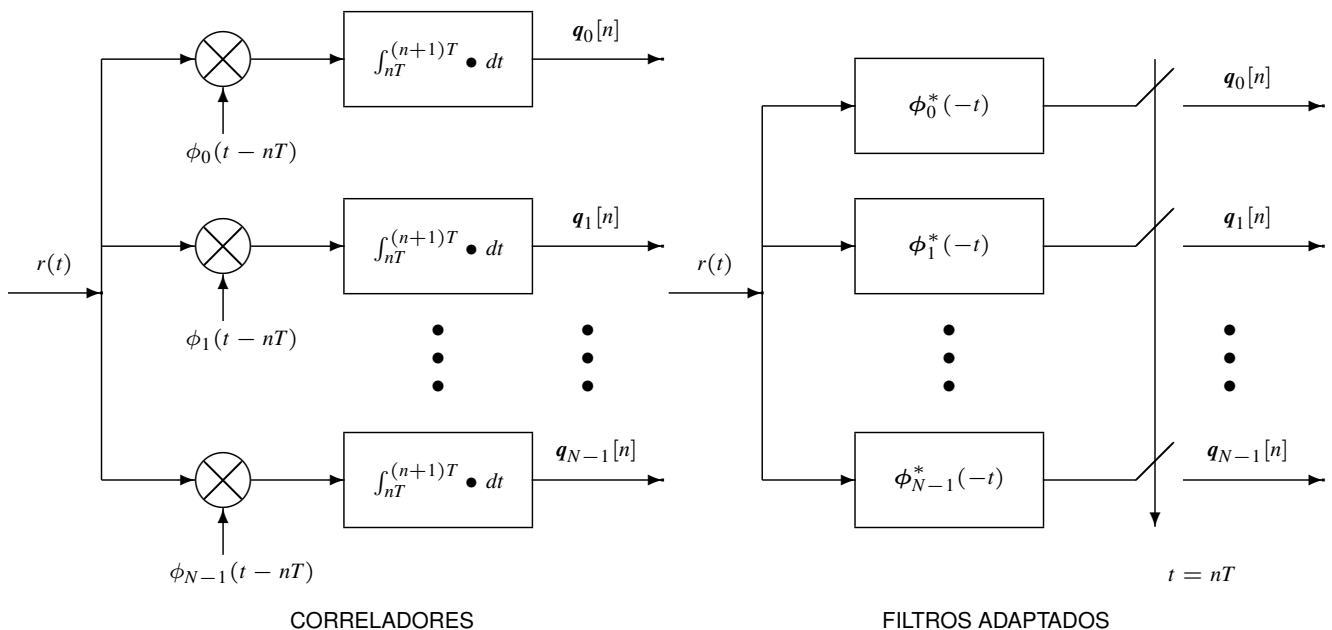
$$1 \rightarrow \mathbf{a}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow s_0(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right), \quad 0 \leq t < T$$

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



## 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)

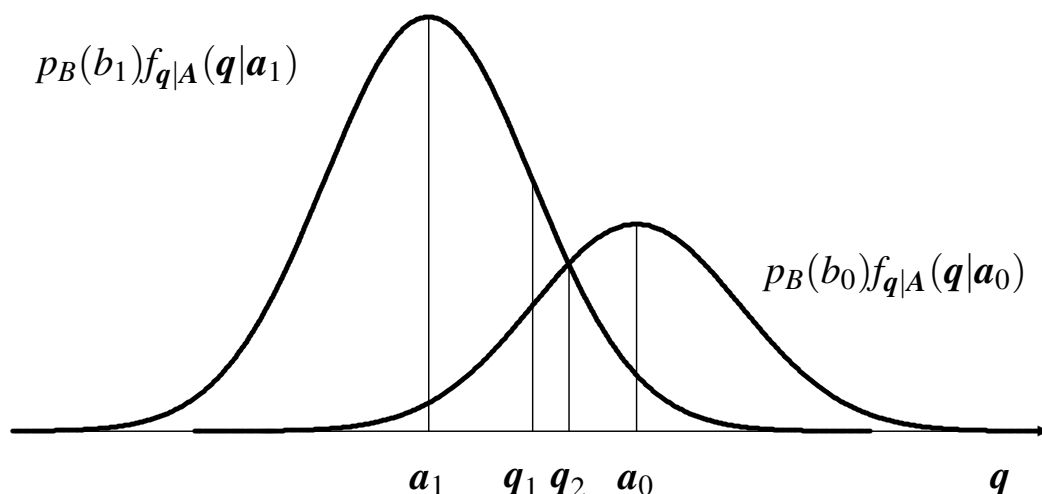
$$\mathbf{q}[n] = \mathbf{A}[n] + \mathbf{z}[n]$$

Observación igual a símbolo transmitido más ruido

- ▶ Se asume adaptación perfecta al canal (selección ideal de la base ortonormal  $\{\phi_j(t)\}_{j=0}^{N-1}$ )
- ▶ 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

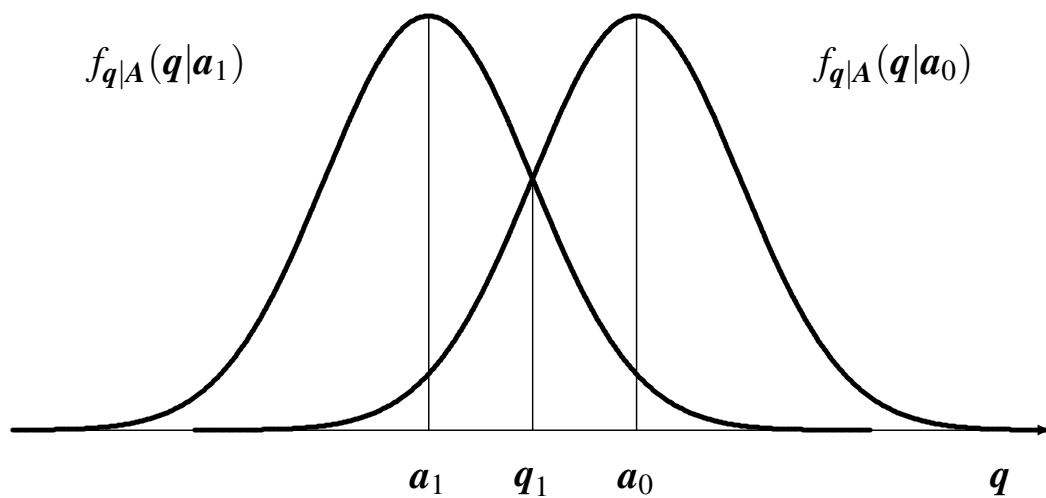


$$I_1 = (-\infty, q_2), \quad I_0 = [q_2, \infty)$$

$$p_B(b_0) < p_B(b_1) \Rightarrow d(q_2, a_0) < d(q_2, a_1)$$



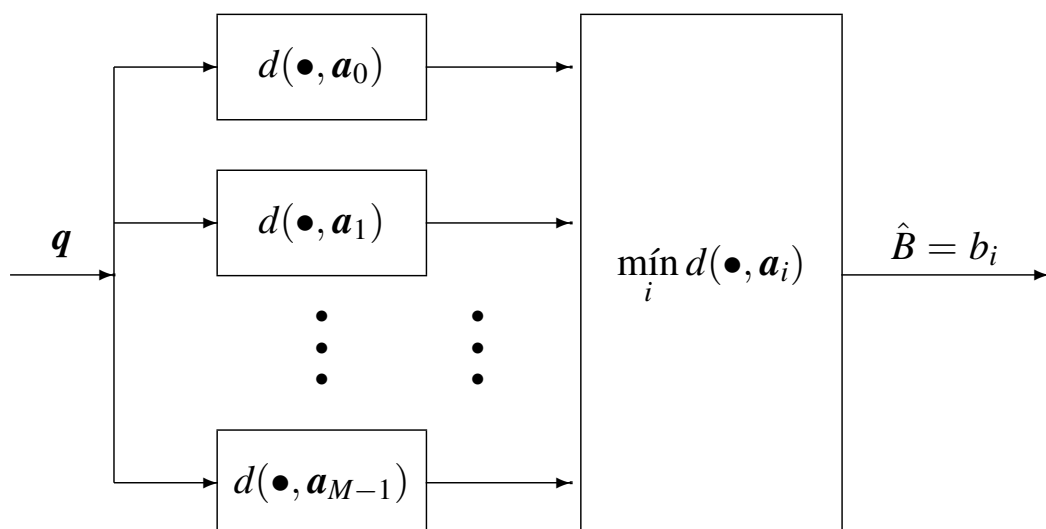
## Criterio ML ( $b_i$ equiprobables)



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

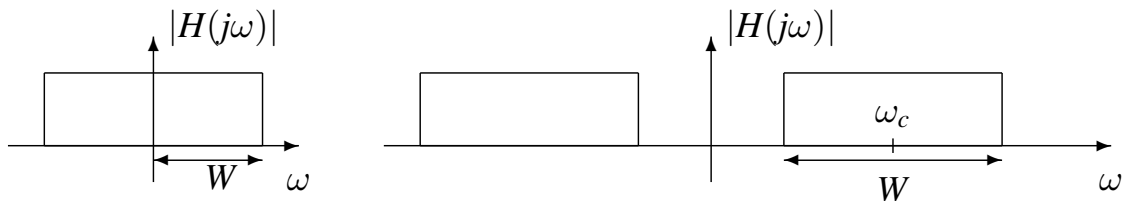
## Decisor de mínima distancia

- 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)



- ▶ Las señales transmitidas tienen que adecuarse a esta restricción en el ancho de banda disponible
- 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): distorsión de intermodulación (IMD)

## Principales objetivos de *Comunicaciones Digitales*

- Extender el modelo básico de comunicaciones digitales para considerar las restricciones realistas introducidas por el canal
  - ▶ Analizar los mecanismos necesarios para generar señales limitadas en banda
    - ★ En banda base
    - ★ En paso banda
  - ▶ Analizar el efecto de la distorsión lineal y los mecanismos disponibles para manejarlos en el receptor
    - ★ Receptor óptimo
    - ★ Receptores sub-óptimos (con menores requerimientos para su implementación)
  - ▶ Analizar las técnicas que permiten controlar la probabilidad de error en el sistema