

**COMUNICACIONES DIGITALES**  
**3<sup>er</sup> curso Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación**  
**Mención en Sistemas de Telecomunicación**  
**Universidad de Cantabria**

# **Tema 4. Modulaciones Multiportadora**

**Jesús María Ibáñez Díaz**

**GRUPO DE TRATAMIENTO AVANZADO DE SEÑAL (G.T.A.S.)**

**[gtas.unican.es](http://gtas.unican.es)**

# Índice

## Tema 4. Modulaciones Multiportadora

### 4.1 Introducción

- 4.1.1 Fundamentos de las modulaciones multiportadora
- 4.1.2 OFDM
- 4.1.3 Historia

### 4.2 Implementación OFDM

- 4.2.1 FFT
- 4.2.2 Tiempo de guarda
- 4.2.3 Enventanado
- 4.2.4 Frecuencias de guarda
- 4.2.5 Portadoras piloto
- 4.2.6 Codificación de canal

### 4.3 Características y prestaciones OFDM

- 4.3.1 Eficiencia espectral y de potencia
- 4.3.2 Comportamiento en canales con multitrayecto
- 4.3.3 Tasa binaria adaptativa
- 4.3.4 PAPR
- 4.3.5 Sincronización
- 4.3.6 Acceso múltiple

### 4.4 Sistemas comerciales y estándares OFDM

# 4.1 Introducción

# Fundamentos de modulaciones multiportadora (I)

- **Modulación Multiportadora**

Un flujo de datos es transmitido sobre **N subportadoras**, cada una de ellas con una tasa binaria baja.

Monoportadora	Subportadora
$R_b$	$R'_b = R_b / N$
$R_s = \frac{R_b}{\log_2 M}$	$R'_s = \frac{R'_b}{\log_2 M} = \frac{R_s}{N}$
$T_s = 1 / R_s$	$T'_s = 1 / R'_s = NT_s$

- **OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing**
  - Es un caso especial de Transmisión Multiportadora
- **Búsqueda de Robustez frente a...**
  - Canales selectivos (multitrayecto)
  - Interferencias banda estrecha

... **manteniendo eficiencia espectral**

## Fundamentos de modulaciones multiportadora (II)

1. Conseguir un tiempo de símbolo,  $T_{S\_multiportadora}$ , mucho mayor que el rms de la dispersión temporal (delay spread) del canal,  $\sigma_\tau$
2. Pero sin alcanzar el tiempo de coherencia del canal,  $T_C$

$$\frac{1}{B_C} \propto \sigma_\tau \ll T_{S\_multiportadora} = NT_{S\_monoportadora} \ll T_C \propto \frac{1}{\sigma_\nu} \approx \frac{c}{f_c \nu}$$

- **Ejemplo:**

- **Dispersión del retardo**

$\sigma_\tau = 200$  ns en interiores

( $\sigma_\tau = 50$   $\mu$ s en campo abierto)

- **Tiempo de coherencia**

$\nu = 4$  km/h,  $f_c = 2.4$  GHz

( $\nu = 100$  km/h,  $f_c = 2.4$  GHz)

$T_C = 100$  ms

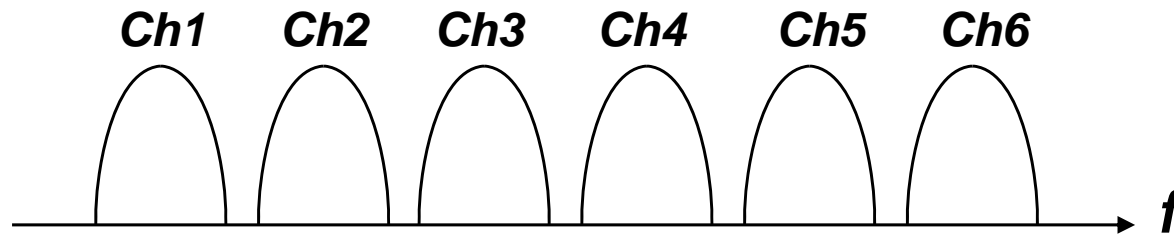
( $T_C = 4.5$  ms)

- **Diseño: búsqueda de  $T_S$  (de  $N$ ) apropiado**

# OFDM: Ortogonalidad (I)

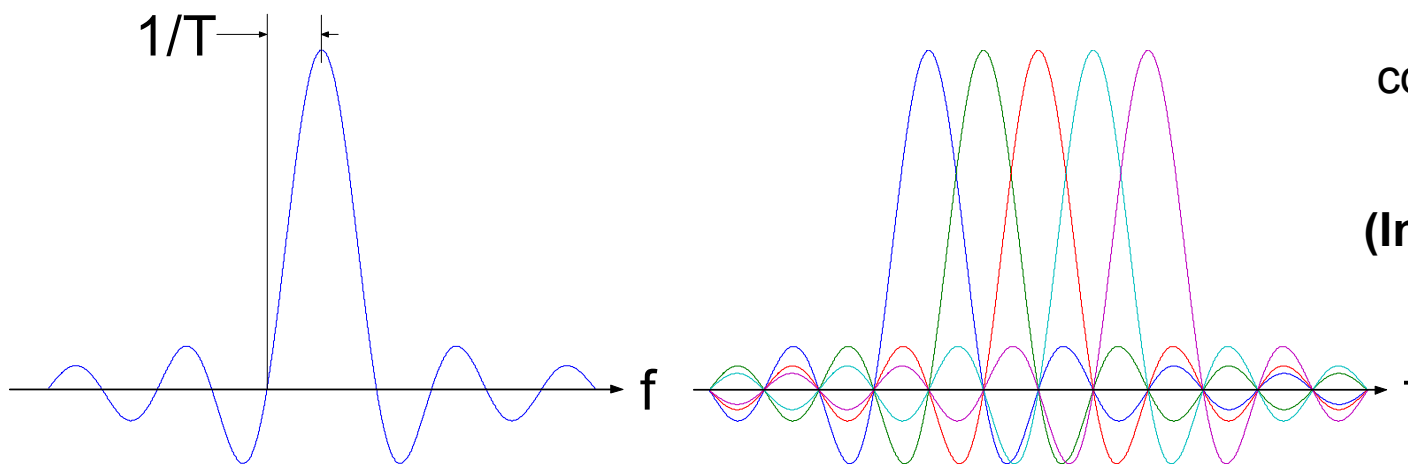
- **Multiplexación Tradicional de Frecuencia (FDM):**

Frecuencias de guarda + Filtrado



- **Multiplexación Ortogonal de Frecuencia (OFDM):**

Solapamiento de Portadoras Ortogonales (ejemplo NRZ)



$$f_k = f_o + k/T$$

con  $T = \text{Periodo de símbolo}$

**No ICI**  
(Inter-Carrier Interference)

## OFDM: Ortogonalidad (II)

- **Ejemplo de N portadoras ortogonales:**

$$s_n(t) = \sum_{k=0}^{N-1} A_{n,k} \cos(2\pi f_k t), \quad \text{para } nT \leq t < (n+1)T$$

$$\text{con } f_k = k / T = kR_s$$

- **Demodulación portadora  $f_j$  :**

$$\begin{aligned} & \int_{nT}^{(n+1)T} s_n(t) \cos(2\pi f_j t) dt \\ &= A_{n,j} \int_{nT}^{(n+1)T} \cos^2(2\pi f_j t) dt + \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^{N-1} A_{n,k} \int_{nT}^{(n+1)T} \cos(2\pi f_k t) \cos(2\pi f_j t) dt \\ &= \frac{A_{n,j} T}{2} + \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^{N-1} \frac{A_{n,k}}{2} \int_{nT}^{(n+1)T} \cos(2\pi(f_k - f_j)t) + \cos(2\pi(f_k + f_j)t) dt \end{aligned}$$

# OFDM en espacio de señal

- $N$  bases ortonormales (complejas):

$$\psi_k(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} e^{j2\pi f_k t} = \frac{1}{\sqrt{T}} (\cos(2\pi f_k t) + j \sin(2\pi f_k t)), \quad \begin{cases} 0 \leq t \leq T \\ k = 0, 1, \dots, N-1 \\ f_k = k/T = kR_s \end{cases}$$

- Espacio de señal (complejo) de dimensión  $N$  (dimensión real  $2N$ )
- Un símbolo (complejo) OFDM:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} s_k \psi_k(t), \quad \text{siendo} \quad \begin{cases} 0 \leq t < T \\ f_k = k/T \end{cases}$$

- En discreto (con  $f_s = N/T$ ), las bases y el símbolo OFDM se escriben:

$$\psi_k[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{j\frac{2\pi k}{N}n}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

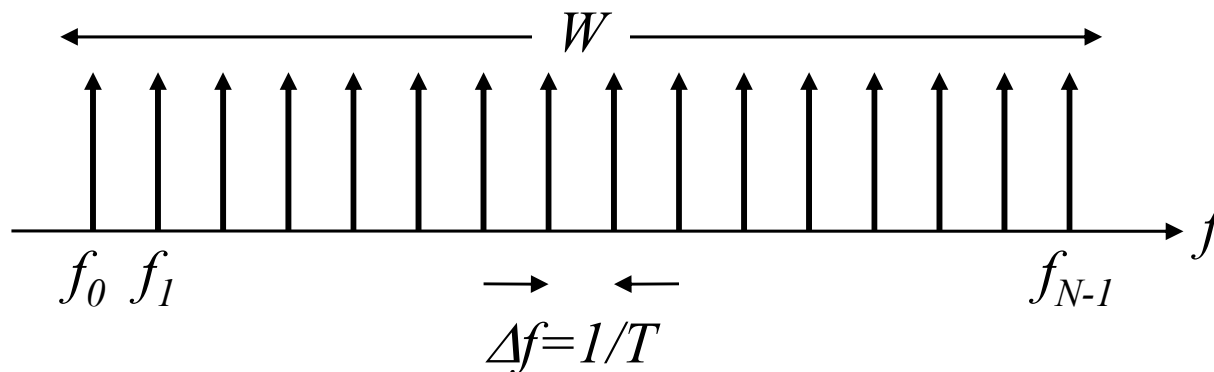
$$s[n] = \sum_{k=0}^{N-1} s_k \psi_k[n], \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$



# Multiplexación Ortogonal en Frecuencia

- El ancho de banda total  $W$  se subdivide en  $N$  subcanales
- Tasa de símbolo y binaria total:  $R_s$  baudios,  $R_b$  bps
- Tasa de símbolo y binaria por subcanal:  $R_s, R_b/N$
- Duración del símbolo OFDM:  $T=1/R_s=N\log_2 M/R_b$
- $N$  subportadoras con frecuencias:

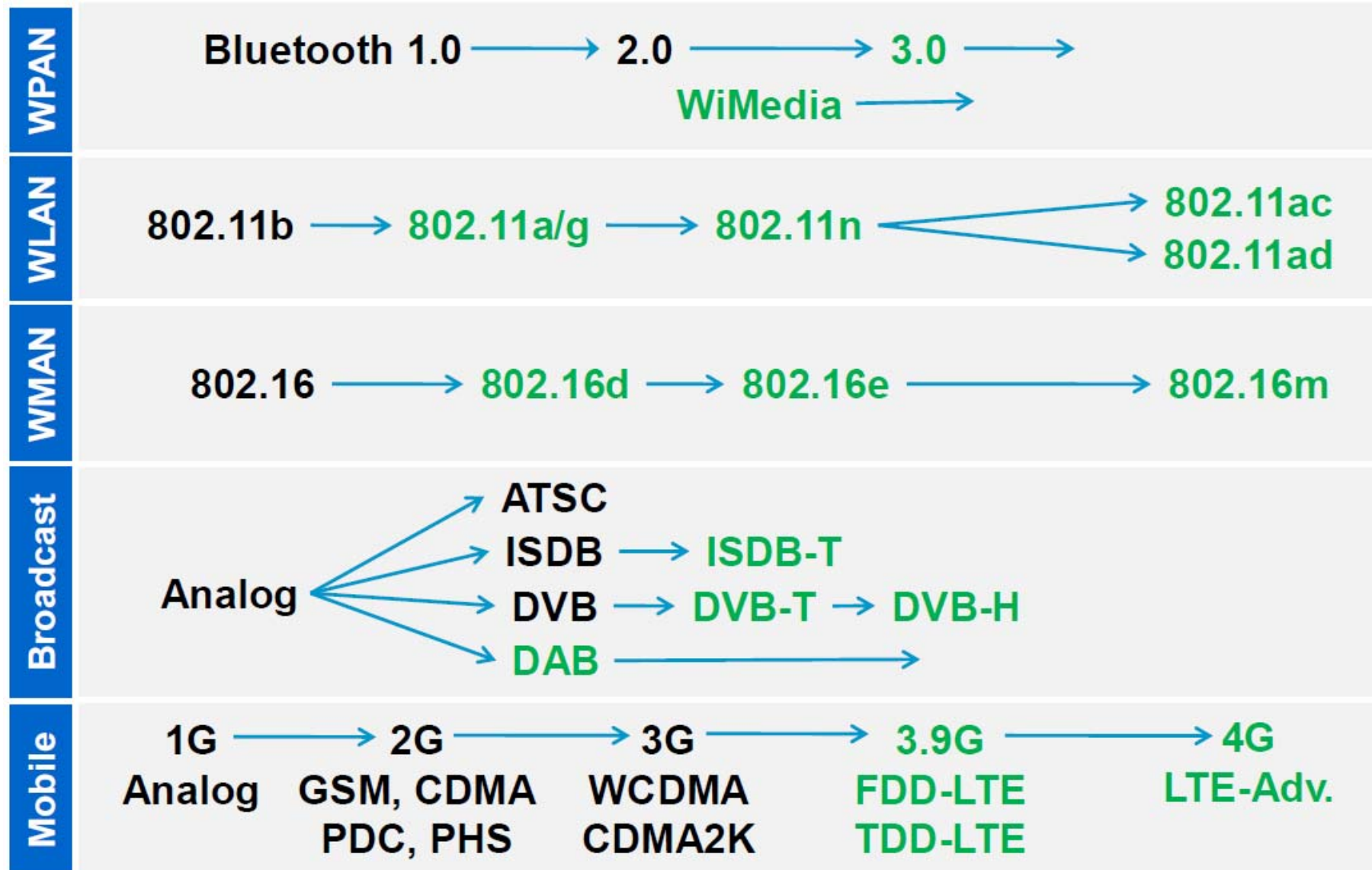
$$f_k = f_0 + k/T \text{ para } k=0, 1, 2, \dots, (N-1)$$



# Historia

- **Teoría OFDM bien conocida desde los años 50**
- **Años 60. Primeros sistemas OFDM Militares**
- **Dificultades Tecnológicas de Implementación**
- **Años 80. Primeros modems telefónicos OFDM**
- **Años 90. OFDM viable con el desarrollo de DSP**
  - HDSL, ADSL, VDSL, DAB, DVB-T, ...
- **Aplicaciones actuales:**
  - Wi-Fi, WiMAX, LTE (4G), 5G

# Evolución de estándares hacia OFDM



## 4.2 Implementación OFDM

## Implementación mediante IFFT

- Cada subportadora está modulada (BPSK, QPSK, 16QAM,...)
- Por cada símbolo OFDM, asignamos una amplitud y/o fase,  $s_k$ , a cada subportadora.
- La suma de las  $N$  subportadoras moduladas genera la forma de onda de un símbolo OFDM

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \sum_{k=0}^{N-1} s_k e^{j2\pi f_k t}, \quad \text{siendo } \begin{cases} 0 \leq t < T \\ f_k = k / T \end{cases}$$

- En discreto (con  $f_s = N/T$ ), el símbolo OFDM es:

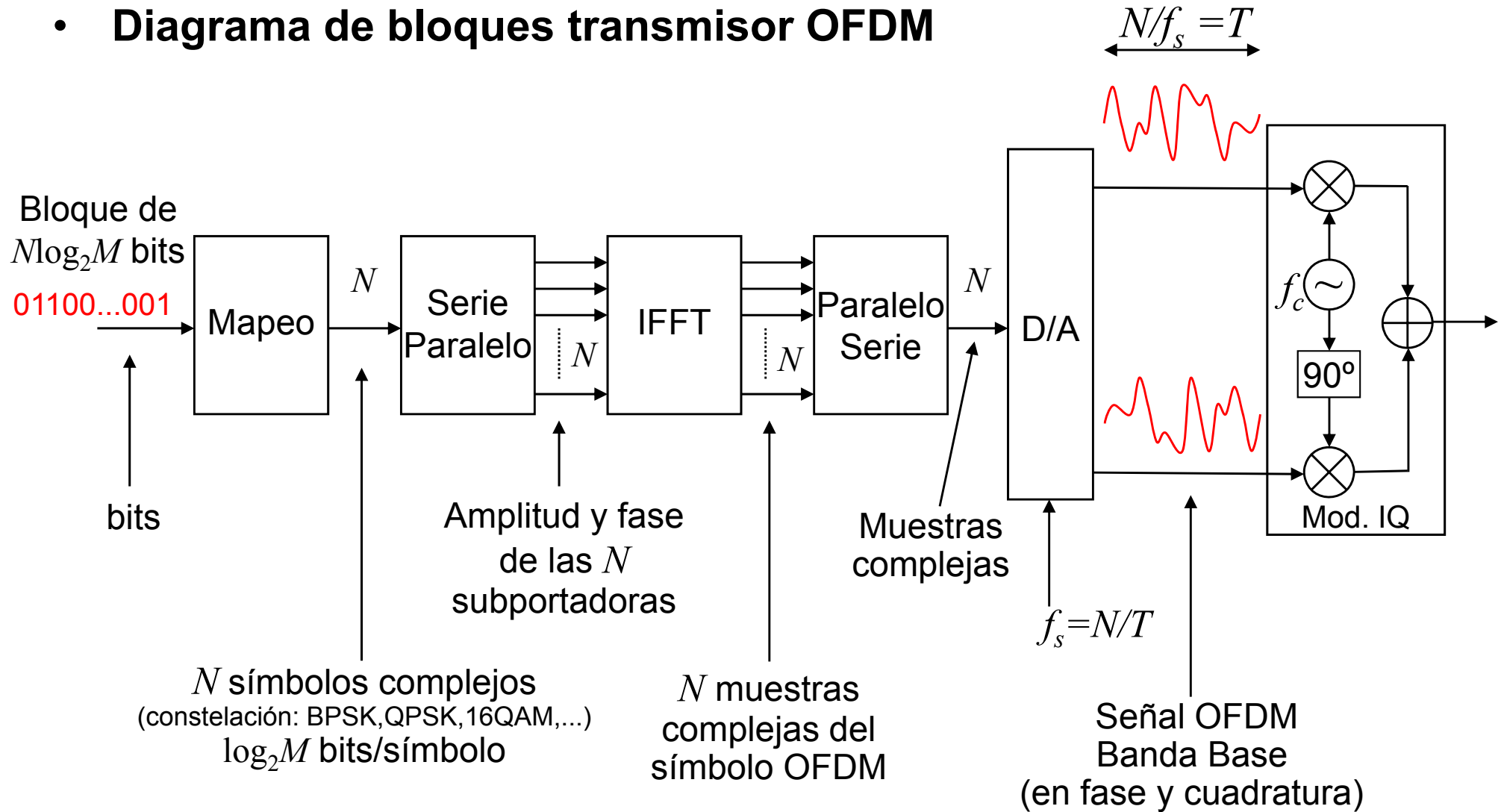
$$s[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} s_k e^{j\frac{2\pi k}{N}n}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

- **Definición de IDFT:**  $x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\frac{2\pi k}{N}n}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1$

Se implementa mediante IFFT (Transformada Rápida de Fourier Inversa)

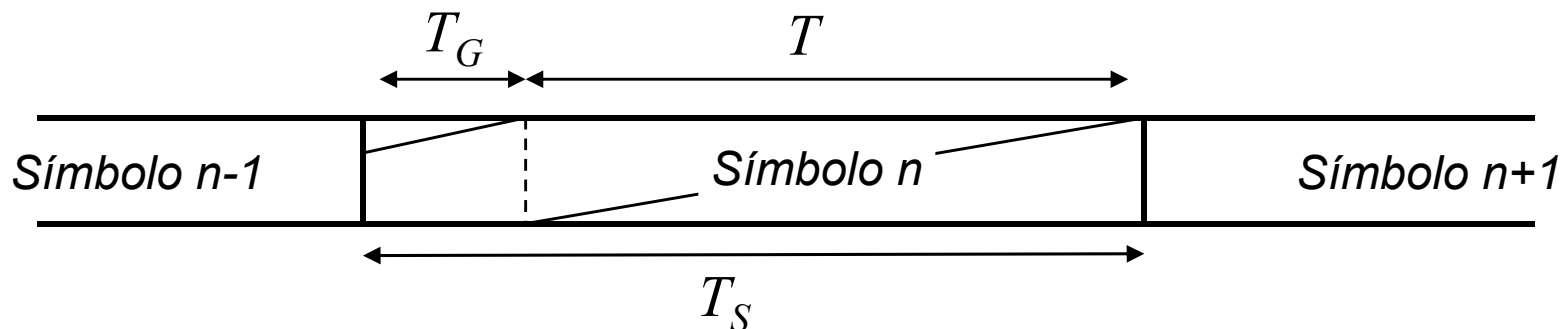
# Transmisor OFDM: basado en IFFT

- Diagrama de bloques transmisor OFDM



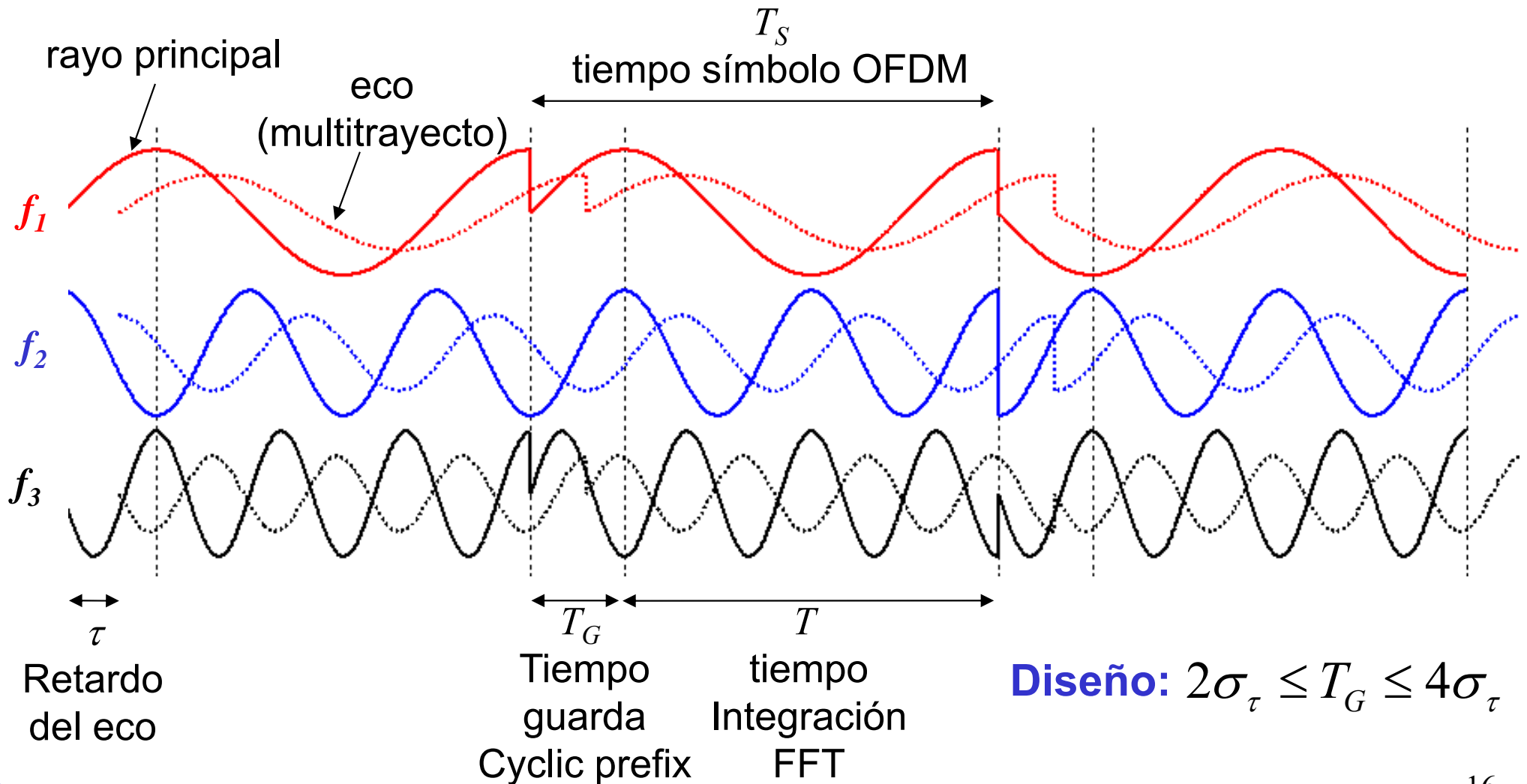
# Tiempo de Guarda (I)

- Símbolo OFDM N veces más largo  $\Rightarrow$  soporta retardos multitrayecto N veces mayores que sistema de portadora única
- Tiempo de guarda  $\Rightarrow$  Eliminación total de la ISI.
  - Tiempo de guarda mayor que dispersión temporal canal
$$T_G > \tau_{\max} \Rightarrow \text{no ISI}$$
  - Tiempo de guarda sin señal  $\Rightarrow$  perdemos ortogonalidad entre las subportadoras (ICI)
  - **Prefijo cíclico** o Extensión Cíclica (Cyclic Prefix): durante tiempo de guarda se replica el final de cada símbolo OFDM  $\Rightarrow$  no ICI
  - En recepción se desecha la señal durante el tiempo de guarda



# Tiempo de Guarda con Extensión Cíclica

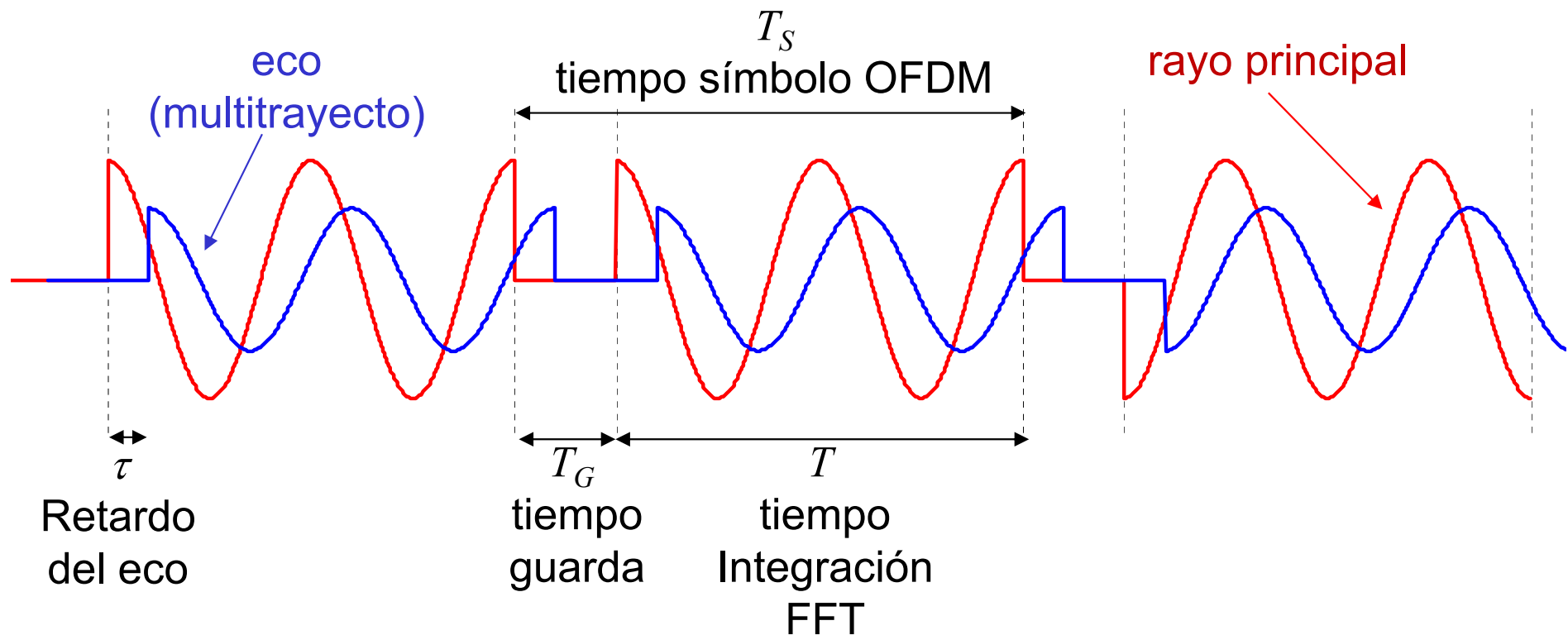
**Ejemplo: Tres subportadoras OFDM-BPSK en un canal multitrayecto de dos rayos**





# Tiempo de Guarda sin señal

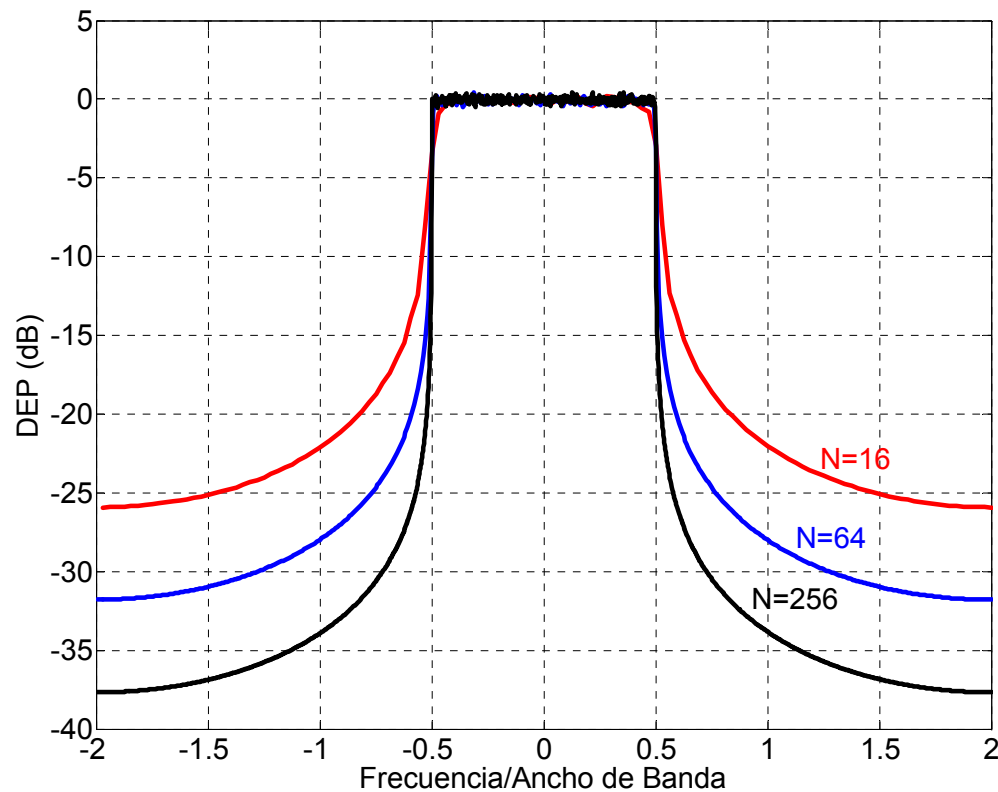
Efecto de  $T_G$  sin señal  $\rightarrow$  pérdida de ortogonalidad



[OFDM guardas.mlx](#)

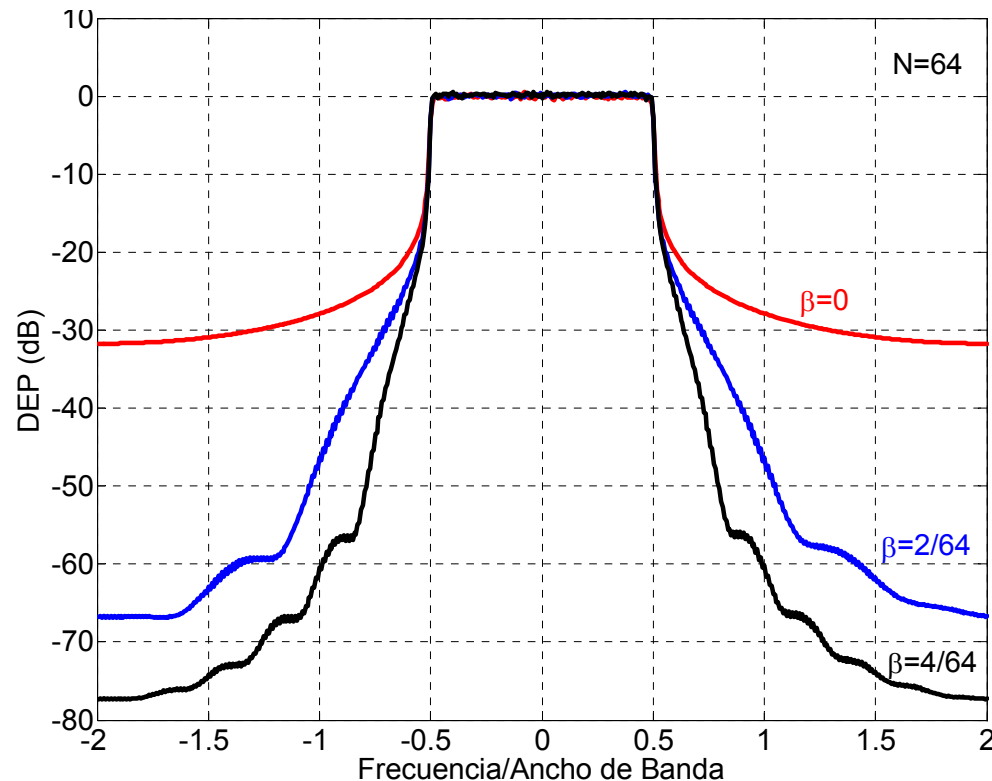
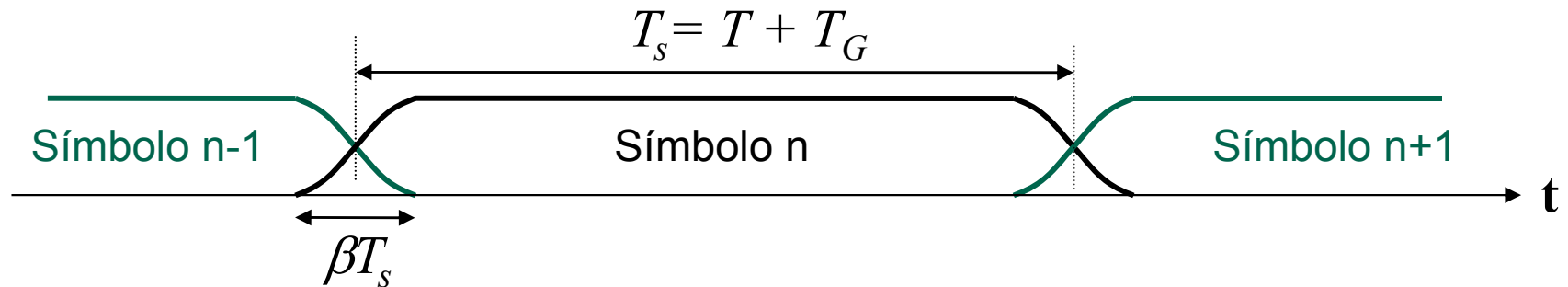
# Enventanado (I)

- Se producen fuertes transiciones de fase en los extremos del símbolo OFDM
- El espectro fuera de banda decae muy lentamente, incluso para  $N$  muy grande



# Enventanado (II)

- Se recurre a enventanar cada símbolo OFDM.



## Ventana coseno alzado:

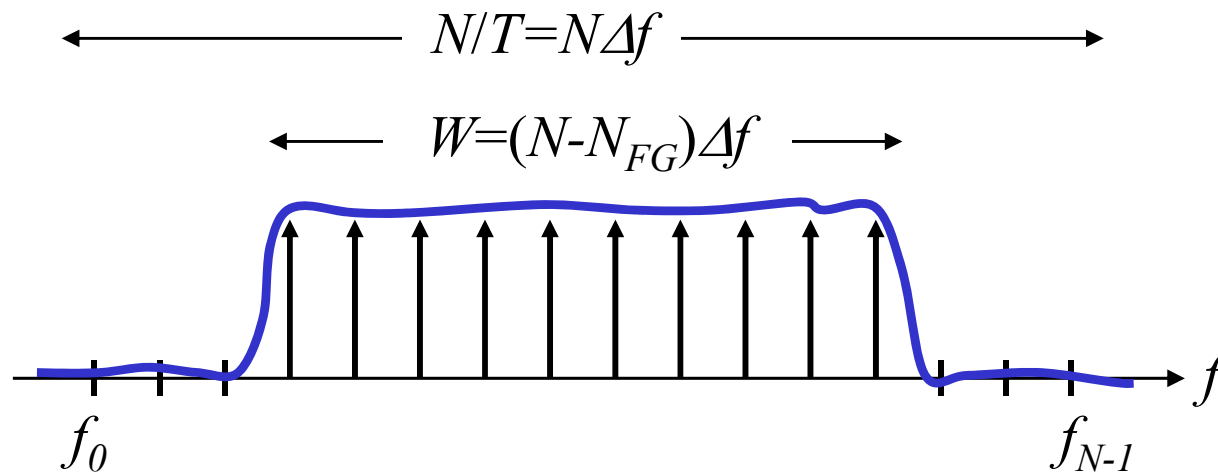
$$w(t) = \begin{cases} 0.5 + 0.5 \cos(\pi + t\pi / (\beta T_s)), & 0 \leq t \leq \beta T_s; \\ 1, & \beta T_s \leq t \leq T_s; \\ 0.5 + 0.5 \cos(\pi(t - T_s) / (\beta T_s)), & T_s \leq t \leq (1 + \beta)T_s. \end{cases}$$

- Enventanar NO es filtrar
- Enventanar reduce inmunidad frente a multitrayecto:

$$\tau \leq T_G - \beta T_s$$

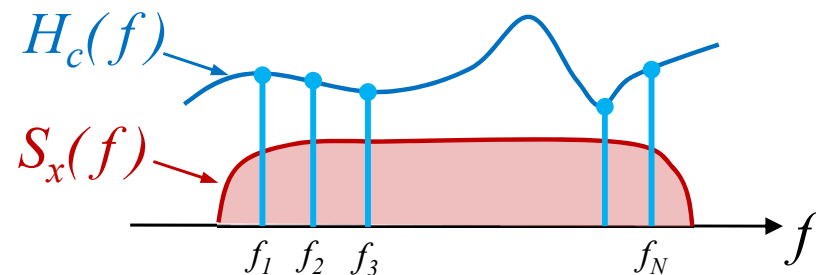
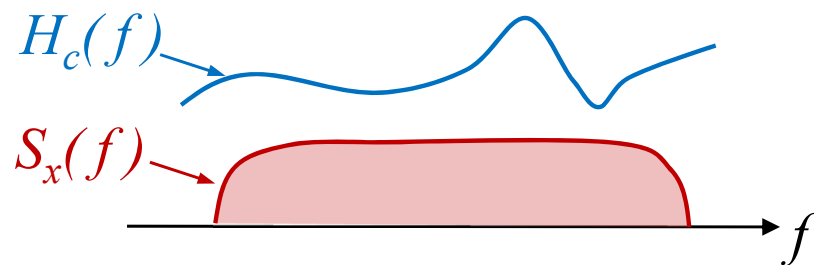
# Frecuencias de Guarda

- $N_{FG}$  portadoras de guarda (de las  $N$  subportadoras) en cada símbolo OFDM.
- Protección frente a interferencias con el canal adyacente (ACI).
- Simplifica filtros antisolapamiento/reconstructores.
- Se dejan sin modular  $N_{FG}$  portadoras en total en los extremos del espectro:



# Portadoras Piloto (I)

- $N_p$  portadoras piloto en cada símbolo OFDM: Necesarias para estima de canal en recepción.
- Debe ser posible estimar variaciones del canal en frecuencia y en el tiempo.
- A pesar del fading selectivo, cada subcanal OFDM es “plano” en frecuencia (gracias al tiempo de guarda con extensión cíclica)

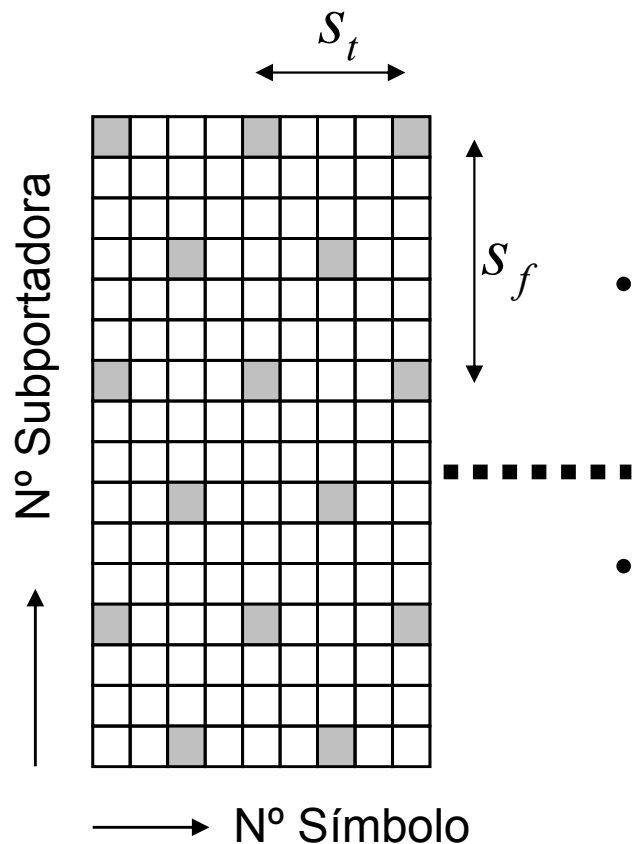


Estrategias distintas para:

- **Transmisión Continua**
- **Transmisión de Tramas**

# Portadoras Piloto (II)

- **Transmisión Continua (DAB, DVB-T,...)**



- **Espacio temporal entre pilotos:**

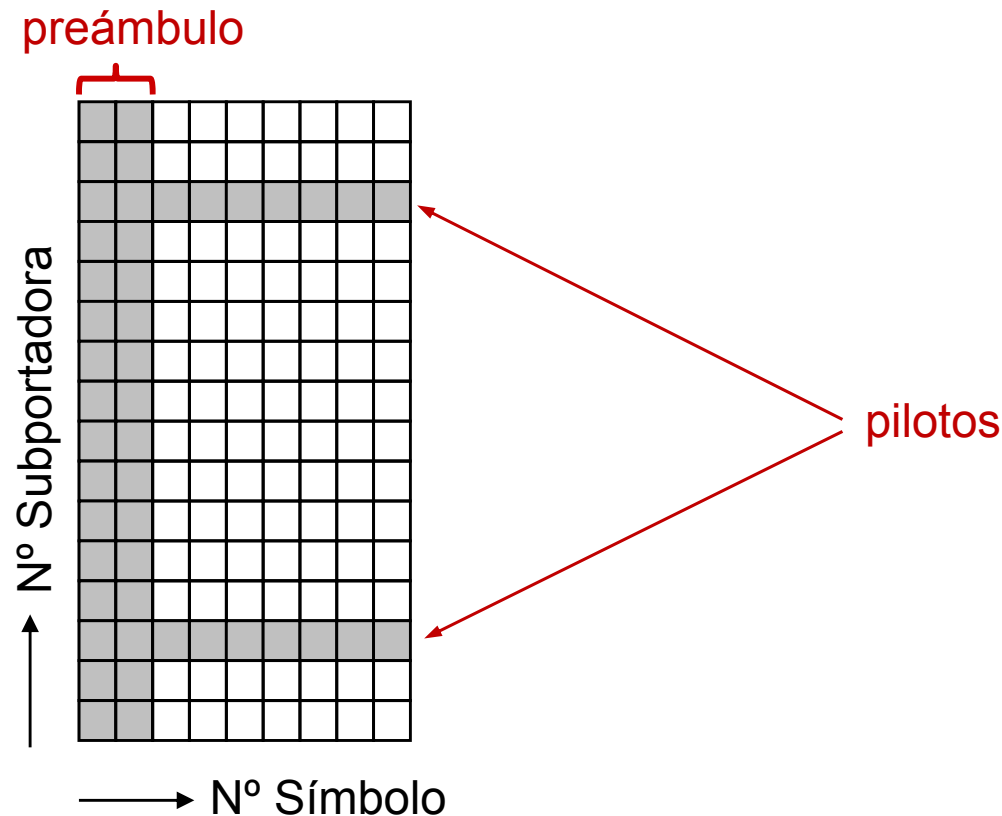
$$2s_t < T_c \propto \frac{1}{\sigma_v} \quad \text{Tiempo de coherencia}$$

- **Espacio frecuencial entre pilotos:**

$$2s_f < B_c \propto \frac{1}{\sigma_\tau} \quad \text{Ancho banda coherencia}$$

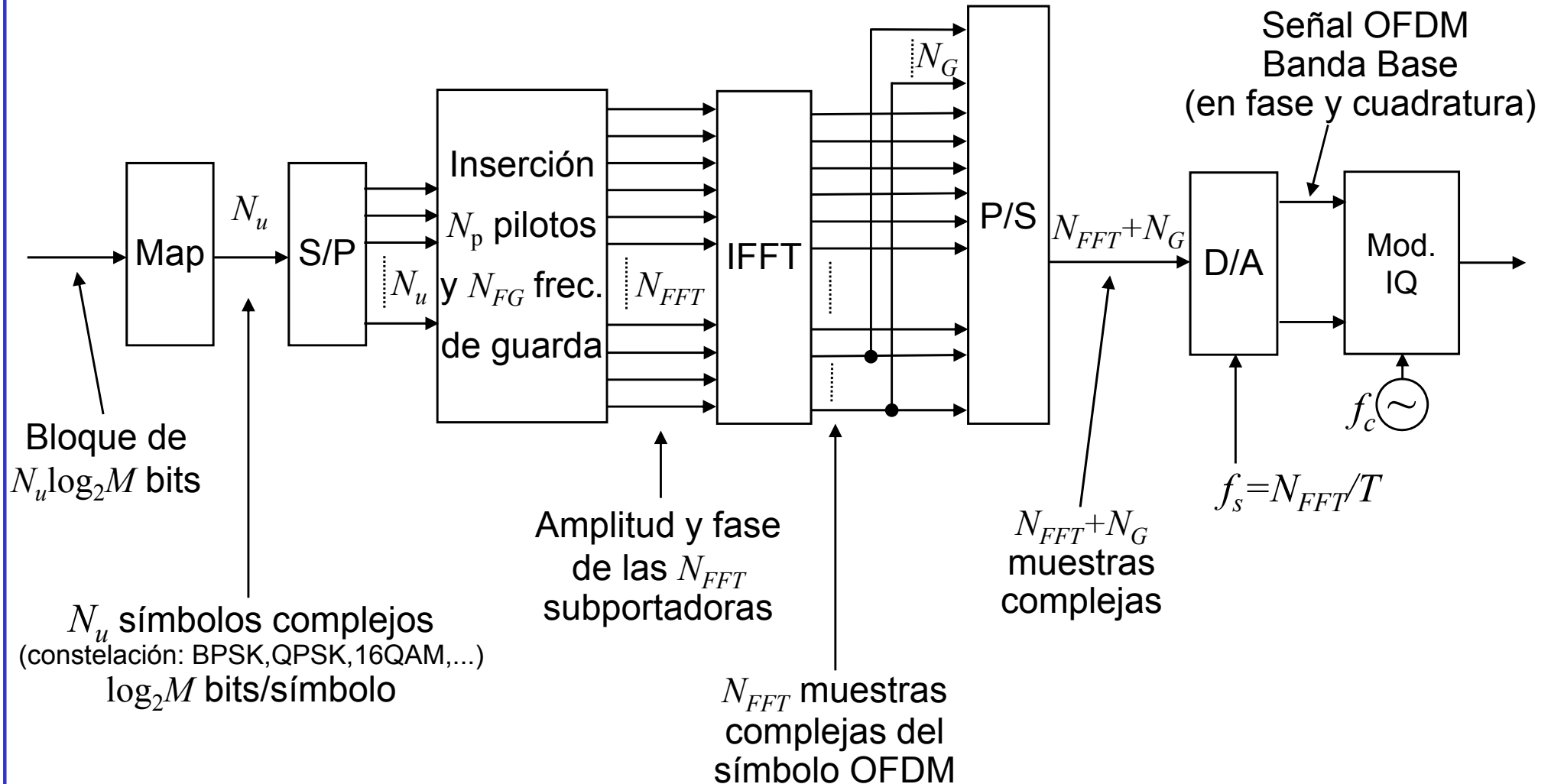
## Portadoras Piloto (III)

- **Transmisión de Tramas (Wi-Fi, WiMAX, LTE,....) :**
  - Canal invariante durante una trama:  $T_{\text{trama}} < T_c$
  - Preámbulo para estimación de canal (1 ó 2 símbolos OFDM)
  - Subportadoras piloto para seguir desviaciones frecuenciales



# Transmisor OFDM

- Transmisor OFDM con pilotos, frecuencias de guarda y extensión cíclica





## Codificación de Canal

- **OFDM evita la ISI provocada por multitrayecto mediante el uso de guarda cíclica.**
- **Pero el multitrayecto provoca fading selectivo que puede “destrozar” algunas subportadoras**
  - **BER dominada por la  $BER_k$  de las subportadoras peores.**
- **Necesidad de Codificación de Canal:**
  - **Códigos Bloque**
  - **Códigos Convolucionales**
  - **Entrelazado**

**OFDM no proporcionaría las prestaciones que presta sin una potente codificación**

# Codificación de Canal: Códigos bloque

- **Códigos bloque:**



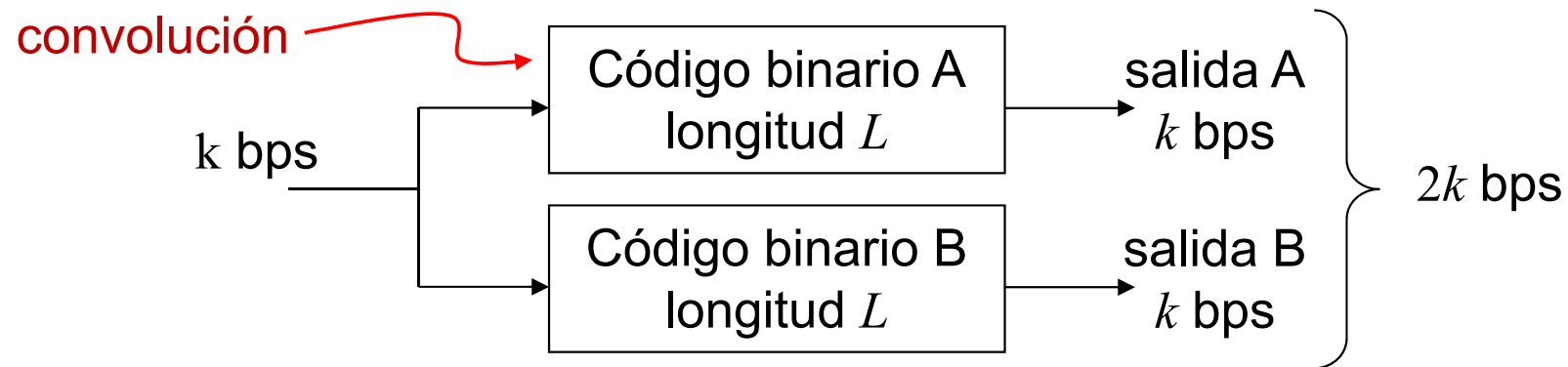
- **Aumentan la distancia de Hamming ( $d_{min} = n-k$ )**
- **Permiten corregir  $\text{floor}((d_{min}-1)/2)$  errores**

- **Códigos Reed-Solomon:**

- **Los códigos bloque más populares**
- **Capaces de corregir hasta  $\text{floor}((n-k)/2)$  símbolos**
- **Útiles en canales con errores a ráfagas.**
  - **p.e.: ciertas portadoras aisladas con fading en OFDM**

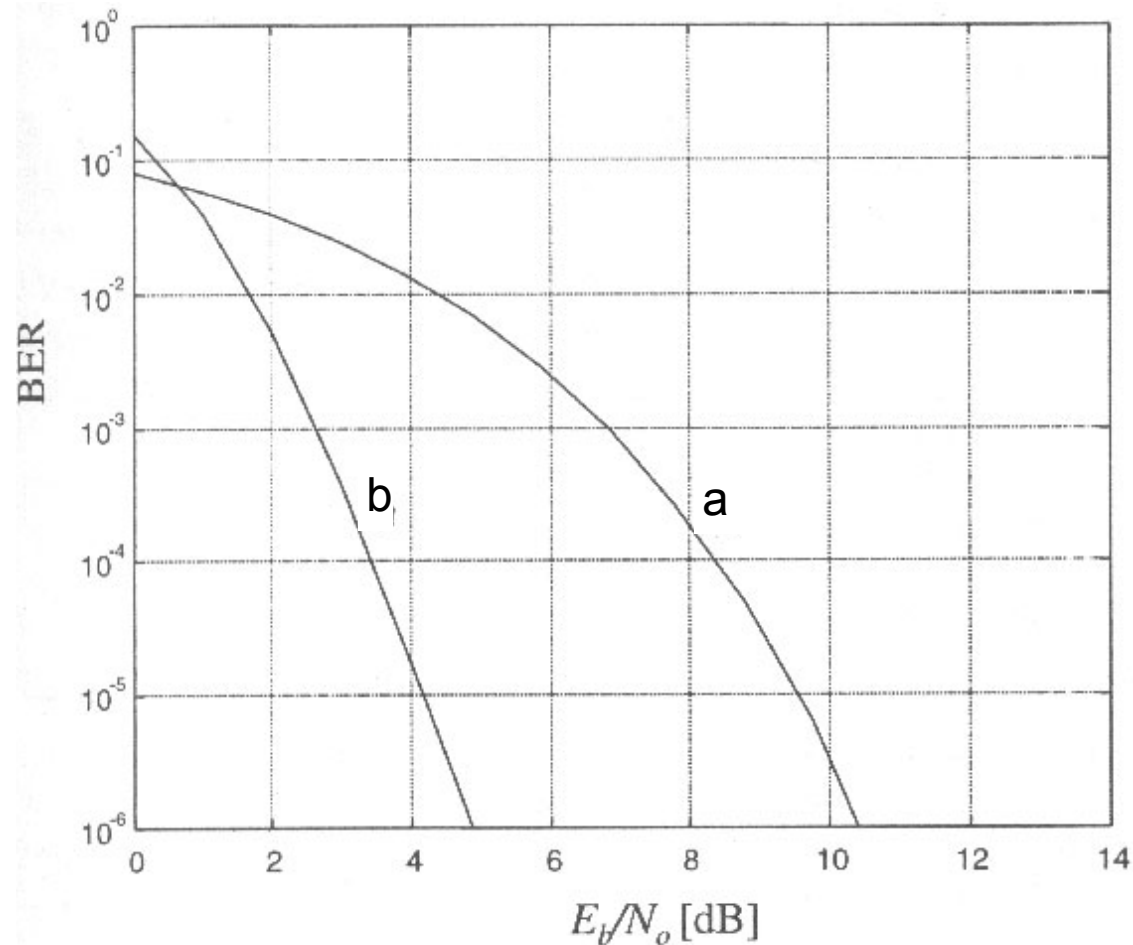
# Codificación de Canal: Códigos Convolucionales

- Transforman un flujo de  $k$  bps en  $n$  bps:  $\text{rate} = \frac{k}{n}$



- $L =$  constraint length (en la práctica  $L \leq 10$ )
- Decodificación mediante soft decoder (Viterbi)
- Prestaciones: en términos de ganancia de  $E_b/N_o$  (code gain)

# Codificación de Canal: Códigos Convolucionales

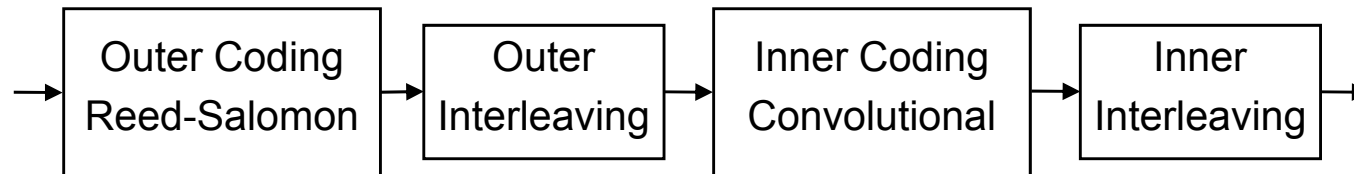


**BER frente a  $E_b/N_0$  en AWGN:**

**a) QPSK; b) QPSK con código convolucional ( $L=7$ ,  $\text{rate}=1/2$ )**

# Concatenación y Entrelazado

- **Habitualmente se combina un código bloque y un código convolucional**



- **El entrelazado (interleaving)**
  - Útil en canales con fading selectivo.
  - Reordena los bits (o símbolos) en transmisión.
  - En recepción, las ráfagas de bits (símbolos) erróneos resultan dispersadas.
  - Favorece (posibilita) las prestaciones de los códigos

## 4.3 Características y Prestaciones de OFDM

## Eficiencia espectral

- Sistema **monoportadora** M-QAM/M-PSK SQRRRC (roll\_off=r)

$$\eta = \frac{R_b}{W} = \frac{R_b}{R_s(1+r)} = \frac{\log_2 M}{1+r} \left( \frac{\text{bit/s}}{\text{Hz}} \right)$$

- En **OFDM** hay que considerar la **pérdida de eficiencia** debido a guardas temporales, portadoras piloto (y DC) y codificación.
  - Sin considerar pérdidas de eficiencia:

$$\eta = \frac{R_b}{W} = \frac{NR_{bi}}{N\Delta f} = \frac{N \log_2 M / T}{N / T} = \log_2 M \left( \frac{\text{bit/s}}{\text{Hz}} \right)$$

- Considerando pérdidas de eficiencia:

$$\eta = \log_2 M \cdot \frac{T}{T + T_G} \cdot \frac{N_u}{N_u + N_p + N_{DC}} \cdot \text{rate} \left( \frac{\text{bit/s}}{\text{Hz}} \right)$$

- Se podría incluir también la pérdida debido a preámbulos, tiempo entre tramas, ACKs, ...

## Eficiencia en potencia

- Sistema **monoportadora** , por ejemplo, QPSK en AWGN

$$BER_{QPSK} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad \text{con } E_b = \frac{P_{RX}}{R_b}$$

- En **OFDM** hay que considerar la **pérdida de eficiencia** debido a la energía “malgastada” en guardas temporales y portadoras piloto.

$$BER_{OFDM-QPSK} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad \text{con } E_b = \frac{P_{RX}}{R_b} \frac{T}{T + T_G} \cdot \frac{N_u}{N_u + N_p}$$

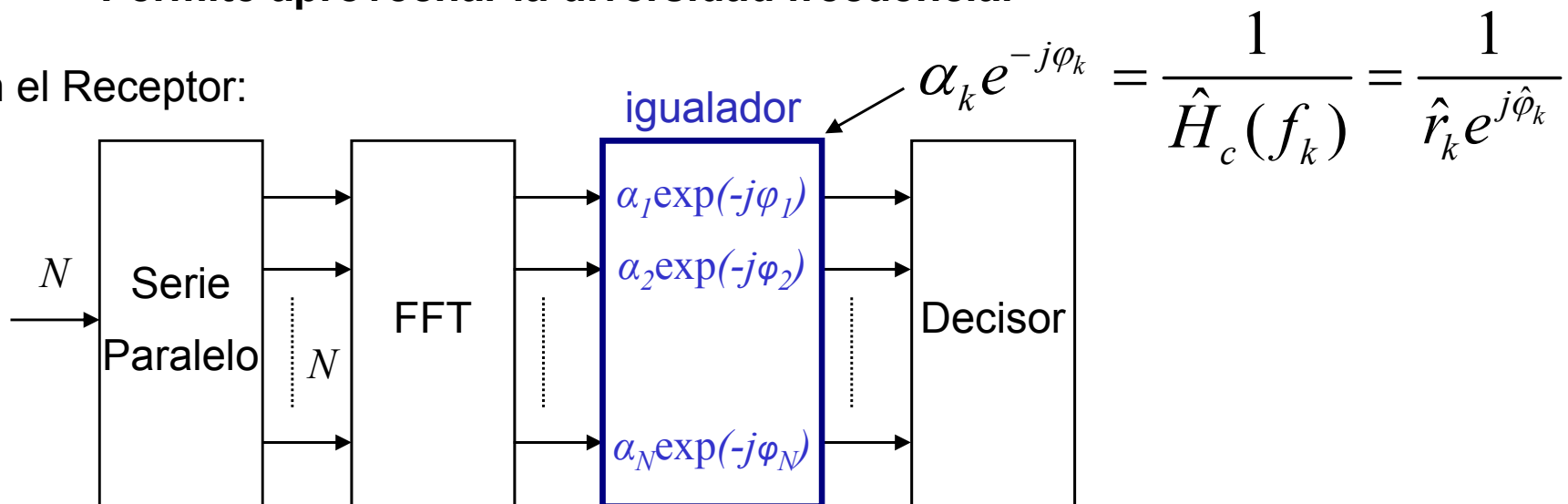
- Se podría considerar también la pérdida energética de símbolos piloto/preámbulos, señalización,...
- Hay que tener en cuenta la codificación de canal



# Comportamiento en Canal Multitrayecto

- **OFDM: una de las mejores opciones en canal multitrayecto.**
  - **Tiempo de símbolo muy largo: posibilita tiempo de guarda**
  - **Guarda cíclica: elimina la ISI producida por la dispersión del canal, resultando canales planos en cada subportadora**
    - **Estimación e Igualación de canal muy sencilla**
    - **Permite aplicar técnicas MIMO subportadora a subportadora**
  - **Codificación + entrelazado**
    - **Alivia errores de subportadoras con fading**
    - **Permite aprovechar la diversidad frecuencial**

Igualador en el Receptor:



# Tasa Binaria Adaptativa

- **OFDM** posibilita modificar la profundidad de modulación de las portadoras (BPSK, QPSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM)
- **Adaptación de la tasa binaria a:**
  - SNR del enlace
  - Bondad del canal
- **Permite coexistir receptores menos sofisticados**
- **Permite negociar la tasa binaria de una conexión**

# PAPR (I)

- **La señal OFDM tiene alto PAPR**

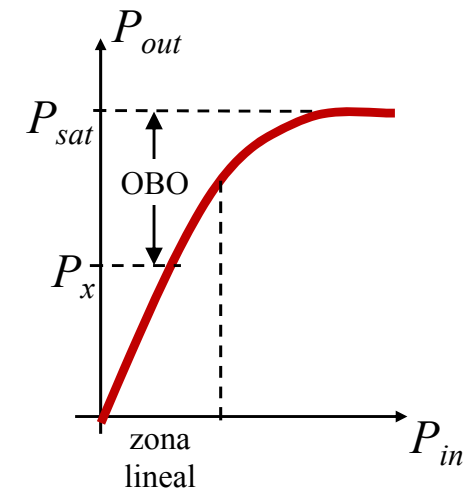
**Peak to Average Power Ratio: Relación Potencia Pico - Potencia Media**

$$\text{PAPR} = \frac{\max(x(t)x^*(t))}{E[x(t)x^*(t)]} = \frac{\max(|x(t)|^2)}{E[|x(t)|^2]}$$

- **La señal OFDM es la suma de N portadoras independientemente moduladas:**
  - **Amplitud Rama I y Rama Q ~ distribución Gaussiana**
  - **Amplitud Señal OFDM ~ Rayleigh**
  - **Potencia Instantánea Señal OFDM ~ Exponencial**
- **Son bastante probables valores de pico altos.**
- **Problemas:**
  - **Rangos de los AD's y DA's**
  - **Linealidad y Eficiencia del Amplificador de Potencia**

# PAPR elevado: soluciones

- **Clipping:** Es lo más simple, pero provoca:
  - Recrecimiento espectral (“Espectral Regrowth”)
  - Ligera degradación de BER (equivale a ruido impulsivo)
  - A menudo combinado con filtrado posterior (clipping and filtering)
- **Back-off:** Operar con el amplificador de Potencia en su zona lineal, lejos de la zona de saturación.
  - Se requieren backoffs elevados (del orden de 8 ó 10 dB)
  - Caro y poco eficiente.
- **Técnicas de búsqueda de símbolos con baja PAPR.**
  - Son técnicas complejas (computacionalmente)
  - Reducen PAPR a cambio de perder tasa binaria útil
- **Técnicas de precodificación lineal.**
  - Por ejemplo DFT-precoded OFDM (SC\_FDMA) en uplink de LTE



# Sincronización

- **Temporal:**
  - Determinar los límites de cada símbolo OFDM
  - Buscar la ventana óptima de cálculo de FFT para minimizar ISI e ICI
- **Frecuencial:**
  - Ortogonalidad sólo si Tx y Rx usan exactamente la misma frecuencia
  - Offset de frecuencia y ruido de fase del oscilador de Rx provoca ICI

**OFDM requiere técnicas de Sincronización precisas**

## Acceso Múltiple en OFDM

- **OFDMA (Orthogonal Frequency Domain Multiple Access)**
  - Se asigna un subconjunto de portadoras a cada usuario de forma fija.
  - No necesita las guardas de los sistemas FDMA no ortogonales.
- **FH-OFDMA (Frequency Hopping Orthogonal Frequency Domain Multiple Access)**
  - Se asigna a cada usuario un subconjunto de portadoras en cada intervalo de tiempo (time slot) siguiendo un código/patrón.
  - En combinación con técnicas de corrección de errores (FEC) entre slots proporciona diversidad frecuencial.
- Técnicas no afectadas por interferencia intracelda gracias a la ortogonalidad entre subportadoras, es decir, entre usuarios.

## 4.4 Sistemas comerciales y estándares OFDM

# DAB

- **DAB (Digital Audio Broadcast)**
  - **Estándar ETSI de 1995**

	<b>Modo I</b>	<b>Modo II</b>	<b>Modo III</b>	<b>Modo IV</b>
Nº Subportadoras ( $N_u+N_p$ )	1536	384	192	768
Espacio Subportadoras ( $\Delta f$ )	1 KHz	4 KHz	8 KHz	2 KHz
Tiempo Símbolo ( $T_s$ )	1.246 ms	311.5 us	155.8 us	623 us
Tiempo Guarda ( $T_G$ )	246 us	61.5 us	30.8 us	123 us
Portadora ( $f_o$ )	<375 MHz	<1.5 GHz	<3 GHz	<1.5 GHz
Separación Transmisores	<96 Km	<24 Km	<12 Km	<48 Km

- **Modulación DQPSK**
- **Tasa Binaria**  $R_b = 2N/T_s \approx 2.47$  Mbps
- **Ancho de Banda**  $W=N\Delta f \approx 1.536$  MHz
- **Código Convolutacional (entre 1/4 y 8/9)**



# DVB-T

- **DVB-T (Digital Video Broadcast - Terrestrial)**
  - **Estándar ETSI de 1997**

	<b>Modo 2k</b>	<b>Modo 8k</b>
Nº Subportadoras útiles ( $N_u$ )	1512	6048
Nº Subportadoras piloto ( $N_p$ )	193	769
Espacio Subportadoras ( $\Delta f$ )	4.464 KHz	1.116 KHz
Tiempo FFT (T)	224 us	896 us
Tiempo Guarda ( $T_G$ )	7-56 us	28-224 us
Frecuencias de guarda (k)	171	687

- **Modulación QPSK, 16QAM ó 64QAM**
- **Tasa Binaria: 12.2 Mbps (2k, QPSK) a 44.3 Mbps (8k, 64QAM)**
- **Reed-Solomon(204,188) y Convolutacional 1/2,2/3,3/4,5/6 ó 7/8**

## 802.11 (WiFi)

- **802.11a/g: Estándar de WLAN usando OFDM en la banda ISM 2.4 GHz (802.11g) y 5 GHz (802.11a)**

Nº Subportadoras útiles ( $N_u$ )	48
Nº Subportadoras piloto ( $N_p$ )	4
Espacio Subportadoras ( $\Delta f$ )	312.5 KHz
Tiempo Símbolo ( $T_s$ )	4 us
Tiempo Guarda ( $T_G$ )	800 ns
Número de pilotos ( $N_p$ )	4
Ancho de Banda ( $B_T$ )	16.56 MHz

- **Modulación BPSK, QPSK, 16QAM ó 64QAM**
- **Tasa Binaria Neta 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 ó 54 Mbps**
- **Código convolucional 1/2, 2/3, 3/4**
- **Tramas con preámbulo de entrenamiento para AGC, ajuste de frecuencia, temporización y estima de canal.**
- **802.11n: MIMO4x4+ agregación canales (20/40 MHz) → 600 Mbps**
- **802.11ac: MU-MIMO8x8 + 256QAM + 40/80/160 MHz → 6.24 Gbps**
- **802.11ad @60GHz: SC/OFDM + 2.16GHz + beamforming → 6.76Gbps**

## 802.16 (WiMAX)

- **Estándar de WMAN usando OFDMA en las bandas 2.5, 3.5 y 5.8 GHz (802.16-2004)**

Número de Subportadoras (N)	128	512	1024	2048
Espacio Subportadoras ( $\Delta f$ )	10.94 KHz			
Tiempo Símbolo ( $T_S$ )	102.9 us			
Tiempo Guarda ( $T_G$ )	11.4 us			
Ancho Banda ( $B_T$ en MHz)	1.25	5	10	20

- **Sistemas MIMO con modulación QPSK, 16QAM ó 64QAM**
- **Tasa Binaria Neta hasta 100 Mbps**
- **Código convolucional 1/2, 2/3, 3/4, 5/4**
- **Turbo Código Convolucional 1/2, 2/3, 3/4, 5/4**
- **Tramas con 1 símbolo de preámbulo para sincronización.**
- **WiMAX móvil hasta 120 Km/h (802.16e).**

# LTE (telefonía móvil 4G)

- **UMTS LTE Release 8.**

**Estándar de telefonía móvil de 4ª generación (LTE-A en 4.5G)**

Tamaño FFT ( $N_{FFT}$ )	128	256	512	1024	1536	2048
Espacio Subportadoras ( $\Delta f$ )	15 KHz					
Tiempo FFT (T)	66.7us					
Tiempo Guarda ( $T_G$ )	4.7 us / 16.6 us / 33 us					
Ancho Banda ( $B_T$ en MHz)	1.4	3	5	10	15	20

- **Multiplexación combinada OFDMA y TDMA**

- 1 Resource Block (RB) = 12 subportadoras de un slot (6/7 símbolos OFDM)

- **MIMO 4x4 con modulación QPSK, 16QAM ó 64QAM**

- **Tasa Binaria neta pico: 300 Mbps en DL, 75 Mbps en UL**

- **Downlink (DL): Usa OFDM convencional**

- **Uplink (UL): Usa DFT-precoded OFDM**

- También denominada single carrier FDMA (SC\_FDMA )
- Reduce el PAPR → menor consumo y mayor cobertura de los terminales

## Bibliografía específica OFDM

- [1] R. Van Nee, R. Prasad, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House Publishers, 2000.
- [2] H. Schulze, C. Lüders, Theory and Applications of CDMA and OFDM Wideband Wireless Communications, John Wiley & Sons, 2005
- [3] L. Hanzo, M Munster, B. J. Choi, T. Keller, OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting, John Wiley & Sons, 2003
- [4] R. Prasad, Universal Wireless Personal Communications, Artech House Publishers, 1998.
- [5] E. A. Lee, D. G. Messerschmitt, Digital Communication, Kluwer Academic Publishers, 1988
- [6] S. B. Weinstein, P. M. Ebert, "Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform", IEEE Trans. on Comm. vol COM-19, n° 5, pp. 628-634, 1971
- [7] W. Y. Zou, Y. Wu, "COFDM: An Overview", IEEE Trans. on Broadcasting vol 41, n° 1 1995
- [8] K. Etemad, "Overview of Mobile WiMAX Technology and Evolution", IEEE Communications Magazine vol 46, n° 10, pp 31-40, Octubre 2008
- [9] L. Verma, M. Fakharzadeh, S. Choi, "WiFi on steroids: 802.11ac and 802.11ad", IEEE Wireless Communications vol 20, n° 6, pp 30-35, Diciembre 2013