



TRABAJO PRÁCTICO III

Docentes:

Ing. Mario Tejerina – Ing. Fernanda Villarrubia

Temas para el desarrollo del práctico

- Sistema de comunicación
- Señales
- Tipos de Señales

PARTE I

Marco Teórico (Unidad 3:1)

Introducción: el sistema de comunicaciones

Antes de abordar cada tema en detalle, conviene situar los conceptos dentro de un esquema general. Un sistema de comunicaciones puede modelarse como una cadena de procesos cuyo objetivo es transportar información desde una fuente hacia un destino a través de un medio físico imperfecto.

El esquema básico incluye: la fuente de información (voz, imagen, datos), un transductor que la convierte en una señal eléctrica, un digitalizador (cuando se trabaja con sistemas digitales), un modulador que adapta la señal al medio, un canal de transmisión que introduce atenuación y ruido, y la cadena inversa en el receptor (demodulador, decodificador, transductor de salida).

Los cinco temas de este apunte se articulan dentro de esa cadena: (1) la naturaleza de las señales que se manipulan, (2) su clasificación, (3) cómo digitalizar una señal analógica mediante PCM, (4) cómo modularla sobre una portadora para enviarla por un medio real, y (5) cómo compartir un único medio entre múltiples señales simultáneamente.

1. Señales

Una señal es la representación física o matemática de una magnitud que varía en función de una o más variables independientes (típicamente el tiempo) y que transporta información de un emisor a un receptor. Matemáticamente, una señal se modela como una función $s(t)$, donde t es el tiempo y s representa la magnitud variable (voltaje, presión, intensidad luminosa, etc.).

En telecomunicaciones, la señal es el vehículo de la información: voz, video, datos, lecturas de sensores. Su análisis riguroso requiere abordarla desde dos perspectivas complementarias: el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia.

1.1. Parámetros fundamentales de una señal senoidal

La señal periódica más simple y elemental es la senoide pura, descrita por la siguiente expresión:

$$s(t) = A \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t + \phi)$$

Cualquier señal periódica, por compleja que sea, puede descomponerse en suma de senoideas (análisis de Fourier). Por eso conocer en profundidad los parámetros de la senoide es la base del análisis de señales.

- **Amplitud (A):** valor máximo (pico) que alcanza la señal. Se mide en volts (V) para señales eléctricas, pascales para acústicas, watts para potencia. Determina la energía o intensidad transmitida.
- **Frecuencia (f):** cantidad de ciclos completos por unidad de tiempo. Se mide en hertz (Hz). Es inversa al período: $T = 1/f$. La frecuencia angular $\omega = 2\pi f$ se mide en rad/s.
- **Período (T):** tiempo que tarda la señal en completar un ciclo. Se mide en segundos.
- **Fase (ϕ):** desplazamiento angular de la señal respecto a un origen de referencia. Se mide en grados o radianes. Define el corrimiento horizontal de la senoide.
- **Longitud de onda (λ):** distancia recorrida por la señal en un ciclo completo. Se mide en metros y se calcula como $\lambda = c / f$, donde c es la velocidad de propagación en el medio.

1.2. Dominio del tiempo y dominio de la frecuencia

En el dominio del tiempo se observa cómo varía la amplitud de la señal instante por instante (forma de onda). Es la representación más intuitiva: un osciloscopio común muestra señales en este dominio.

En el dominio de la frecuencia se descompone la señal en sus componentes armónicas (las distintas senoideas puras que la integran), indicando con qué amplitud y fase aparece cada una. Esta descomposición se logra mediante la Transformada de Fourier (o Serie de Fourier para señales periódicas). Un analizador de espectros muestra señales en este dominio.

Ambas representaciones son equivalentes y contienen la misma información: una se obtiene de la otra mediante la transformada (y su inversa). Pero ciertos fenómenos se entienden mucho mejor en uno u otro dominio.

1.3. Espectro y ancho de banda

Se denomina espectro al conjunto de frecuencias presentes en una señal. Si la señal tiene componentes desde una frecuencia mínima f_{\min} hasta una frecuencia máxima f_{\max} , su ancho de banda se define como:

$$BW = f_{\max} - f_{\min} \text{ [Hz]}$$

El ancho de banda es un recurso fundamental y limitado en telecomunicaciones. Una señal de voz humana ocupa aproximadamente 4 kHz (telefonía) o 20 kHz (alta fidelidad); una señal de televisión analógica ocupaba unos 6 MHz; una conexión Wi-Fi moderna puede usar canales de 20, 40, 80 o 160 MHz.

1.4. Potencia, decibeles y relación señal/ruido

La potencia de una señal (P) mide la energía que transporta por unidad de tiempo y se expresa en watts. En la práctica, las potencias en comunicaciones varían en rangos enormes (desde microvatios en una antena hasta kilovatios en un transmisor), por lo que es habitual expresarlas en escala logarítmica usando decibeles (dB):

$$\text{Ganancia [dB]} = 10 \cdot \log_{10}(P_{\text{salida}} / P_{\text{entrada}})$$

Si el resultado es positivo, hay amplificación; si es negativo, hay atenuación. Una variante muy usada es el dBm, que mide potencia absoluta respecto a 1 mW: $P[\text{dBm}] = 10 \cdot \log_{10}(P/1 \text{ mW})$.

Todo canal real introduce ruido: perturbaciones aleatorias que se suman a la señal y dificultan su recuperación. La relación señal/ruido (Signal-to-Noise Ratio, SNR) cuantifica cuánto más potente es la señal útil respecto al ruido:

$$\text{SNR [dB]} = 10 \cdot \log_{10}(P_{\text{señal}} / P_{\text{ruido}})$$

Una SNR alta (típicamente > 20 dB) permite comunicaciones limpias. Una SNR baja (< 10 dB) degrada severamente la transmisión y obliga a usar esquemas de modulación más robustos pero menos eficientes.

1.5. Capacidad del canal: teorema de Shannon-Hartley

Claude Shannon demostró en 1948 que existe un límite teórico máximo a la cantidad de información que puede transmitirse por un canal con ruido, en función de su ancho de banda y de la SNR:

$$C = BW \cdot \log_2(1 + \text{SNR}) \text{ [bps]}$$

Donde C es la capacidad máxima del canal en bits por segundo, BW es el ancho de banda en hertz y SNR es la relación señal/ruido (en escala lineal, no en dB). Este resultado, conocido como teorema de Shannon-Hartley, marca un techo absoluto: ningún esquema de modulación puede superarlo.

Toda la ingeniería moderna de comunicaciones consiste, en última instancia, en acercarse lo más posible a esa cota.

Ejemplo: un canal de telefonía con $BW = 3,1$ kHz y $SNR = 30$ dB (es decir, SNR lineal = 1000) tiene una capacidad máxima de $C \approx 3.100 \cdot \log_2(1001) \approx 30,9$ kbps. Esto explica por qué los módems telefónicos no pudieron superar los 56 kbps (que ya excedían el límite teórico estricto y exigían condiciones casi ideales).

2. Tipos de Señales

Las señales se clasifican según múltiples criterios. A continuación se presentan los más relevantes para el estudio de las comunicaciones.

2.1. Analógicas vs Digitales

- **Señales analógicas:** toman infinitos valores dentro de un rango continuo. La amplitud varía suavemente con el tiempo. Ejemplos: la voz captada por un micrófono, una onda senoidal pura, la salida de un sensor de temperatura, una señal de audio en un cable RCA.
- **Señales digitales:** toman un número finito y discreto de valores (típicamente dos: 0 y 1 en sistemas binarios). Presentan transiciones abruptas entre niveles. Ejemplos: la salida de una computadora, un tren de pulsos NRZ, los datos en un cable Ethernet.

La elección entre transmitir señales analógicas o digitales tiene implicancias profundas. Las señales digitales pueden regenerarse perfectamente (no acumulan ruido al pasar por repetidores), permiten compresión, encriptación y multiplexación más flexibles, y se procesan con electrónica integrada de bajo costo. Por estas razones, prácticamente toda comunicación moderna es digital.

2.2. Continuas vs Discretas (en el tiempo)

Una señal es continua en el tiempo si está definida para todo instante t (existe un valor $s(t)$ para cualquier valor real de t). Es discreta si sólo está definida en instantes puntuales, típicamente equiespaciados: $s[n]$ con n entero. El proceso de muestreo, central en PCM, convierte una señal continua en una señal discreta.

Nótese que una señal puede ser discreta en el tiempo y aún tomar valores continuos en amplitud (señal muestreada pero no cuantizada). Una señal digital, en cambio, es discreta tanto en tiempo como en amplitud.

2.3. Periódicas vs Aperiódicas

Una señal es periódica si se repite idéntica cada T segundos: $s(t) = s(t + T)$ para todo t . El menor T que cumple esta condición es el período fundamental. Es aperiódica si no presenta esa repetición.

La voz humana, considerada en su totalidad, es aperiódica. Sin embargo, en intervalos breves (del orden de los milisegundos) puede modelarse como suma de componentes cuasi-periódicas: en eso se basan los codificadores de voz modernos.

2.4. Simples vs Compuestas

Una señal simple es una senoide pura. Una señal compuesta es la suma de varias señales simples de distinta frecuencia. El teorema de Fourier garantiza que cualquier señal compuesta (periódica) puede descomponerse en suma de senoideas cuyas frecuencias son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental (armónicos). Las señales aperiódicas se descomponen en una integral de senoideas (Transformada de Fourier).

2.5. Determinísticas vs Aleatorias

Una señal determinística puede predecirse con exactitud mediante una expresión matemática (ej. una senoide o un pulso rectangular). Una señal aleatoria sólo puede caracterizarse estadísticamente: se conocen sus propiedades medias (potencia media, distribución de probabilidad, densidad espectral) pero no su valor exacto en cada instante.

El ruido es el ejemplo paradigmático de señal aleatoria. El ruido térmico, generado por el movimiento aleatorio de los electrones en cualquier conductor a temperatura superior al cero absoluto, está presente en todo canal real y es la principal limitante de la capacidad de comunicación, como ya se vio con Shannon.

2.6. Banda base vs Paso banda

Una señal está en banda base cuando su espectro está concentrado alrededor de la frecuencia cero (es decir, ocupa frecuencias bajas, desde 0 Hz hasta su frecuencia máxima). Ejemplos: la voz directa de un micrófono, una señal NRZ saliendo de una computadora.

Una señal está en paso banda (o banda pasante) cuando su espectro está concentrado alrededor de una frecuencia central $f_c \gg 0$, distinta de cero. Ejemplos: una emisión de radio FM, una señal Wi-Fi a 2,4 GHz, una emisión de TV digital.

Las señales en banda base no pueden transmitirse por la mayoría de los medios físicos (aire, fibra óptica, cable coaxial de RF). Para enviarlas, deben trasladarse al rango adecuado mediante un proceso de modulación que las convierta en señales paso banda. Esto motiva el capítulo siguiente sobre modulación digital por portadora.

2.7. Códigos de línea: señales digitales en banda base

Cuando una señal digital se transmite directamente (sin portadora) por un medio guiado, como un cable Ethernet o una conexión USB, debe representarse mediante una forma de onda concreta. Los códigos de línea son las distintas convenciones para asignar formas de onda a los bits. Los más conocidos son:

- **NRZ (Non-Return to Zero):** nivel alto para el 1 y nivel bajo (o negativo) para el 0. Simple pero no contiene información de sincronismo: largas secuencias de 0 o de 1 generan una señal constante.
- **RZ (Return to Zero):** la señal retorna a cero a mitad de cada bit. Provee sincronismo a costa de ocupar el doble de ancho de banda.
- **Manchester:** cada bit se representa por una transición: el 0 es una transición de alto a bajo en mitad del intervalo, el 1 de bajo a alto (o la convención inversa). Garantiza sincronismo y se usaba en Ethernet 10BASE-T.
- **Bipolar (AMI):** los 1s se representan alternando polaridad (positivo, negativo, positivo...) y los 0s con tensión nula. Elimina la componente continua y se usa en E1/T1.

3. Conversión Analógica-Digital: PCM

La modulación por codificación de pulsos (Pulse Code Modulation, PCM) es la técnica estándar para convertir una señal analógica en una secuencia digital binaria. Es la base de la telefonía digital, el audio en CD, la mayoría de los formatos de audio sin compresión y, en general, de prácticamente todos los sistemas digitales que parten de un mundo analógico.

PCM consta de tres etapas secuenciales: muestreo, cuantización y codificación. A la salida se obtiene un flujo binario que representa fielmente (dentro de cierta tolerancia) a la señal original.

3.1. Muestreo y teorema de Nyquist-Shannon

El muestreo consiste en tomar valores instantáneos (muestras) de la señal analógica a intervalos regulares de tiempo T_s . La frecuencia de muestreo es $f_s = 1/T_s$.

La pregunta clave es: ¿con qué frecuencia debe muestrearse una señal para poder reconstruirla sin pérdida de información? La respuesta la dio Nyquist en 1928 y la formalizó Shannon en 1949:

$$f_s \geq 2 \cdot f_{\text{max}} \quad (\text{Teorema de Nyquist-Shannon})$$

La frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima presente en la señal. Si esta condición no se cumple, se produce el fenómeno conocido como aliasing: componentes de alta frecuencia se confunden con componentes de baja frecuencia, distorsionando irreversiblemente la señal reconstruida.

Para garantizar el cumplimiento del teorema, antes del muestreador se coloca siempre un filtro pasabajos antialiasing, que elimina toda componente por encima de $f_s/2$.

Ejemplos prácticos: la voz telefónica se limita a 4 kHz y se muestrea a 8 kHz; el audio en CD se muestrea a 44,1 kHz para cubrir el rango audible humano (hasta 20 kHz); el audio profesional usa 48 kHz, 96 kHz o incluso 192 kHz.

3.2. Cuantización

Cada muestra obtenida es un número real con infinitos valores posibles. La cuantización aproxima cada muestra al nivel más cercano de un conjunto finito de L niveles preestablecidos. Si se utilizan n bits por muestra, entonces:

$$L = 2^n \quad \text{niveles de cuantización}$$

Con 8 bits se obtienen 256 niveles; con 16 bits, 65.536; con 24 bits, más de 16 millones.

3.2.1. Cuantización uniforme vs no uniforme

En la cuantización uniforme, los niveles están equiespaciados a lo largo de todo el rango de la señal. Es simple, pero ineficiente cuando la señal tiene una distribución no uniforme de amplitudes.

La voz humana, por ejemplo, presenta amplitudes pequeñas la mayor parte del tiempo y picos altos sólo ocasionales. Si se usa cuantización uniforme, los niveles bajos quedan groseramente representados (mucho error relativo) y los altos sobredimensionados.

La cuantización no uniforme asigna niveles más densos en las amplitudes pequeñas y más espaciados en las grandes, mejorando notablemente la calidad subjetiva. Esto se logra aplicando una compresión logarítmica antes de la cuantización uniforme. Los dos estándares internacionales son:

- **Ley μ (mu-law):** utilizada en América del Norte y Japón. $\mu = 255$.
- **Ley A (A-law):** utilizada en Europa, América Latina y la mayor parte del mundo. $A = 87,6$.

Ambas son la base del estándar telefónico G.711 de la UIT-T.

3.2.2. Error de cuantización y SNR

La diferencia entre el valor real de la muestra y el nivel asignado se denomina error de cuantización. Este error es inevitable e irreversible: una vez cuantizada, la señal nunca podrá recuperar la precisión original. Se manifiesta como un ruido superpuesto a la señal, llamado ruido de cuantización.

Puede demostrarse que, para una cuantización uniforme con n bits, la relación señal/ruido de cuantización aproximada es:

$$\text{SNR}_q \text{ [dB]} \approx 6,02 \cdot n + 1,76$$

Cada bit adicional mejora la SNR en aproximadamente 6 dB. Por eso, pasar de 8 a 16 bits no es un cambio menor: la calidad mejora en 48 dB (más de 250 veces en escala lineal).

3.3. Codificación

Cada nivel cuantizado se representa con una palabra binaria de n bits (típicamente en código binario natural o en complemento a dos para amplitudes con signo). La salida del codificador PCM es entonces un flujo binario continuo cuya tasa es:

$$R = f_s \cdot n \quad [\text{bps}]$$

Ejemplos:

- Telefonía digital PCM estándar G.711: $f_s = 8 \text{ kHz}$, $n = 8 \text{ bits}$ → $R = 64 \text{ kbps}$ por canal.
- Audio en CD: $f_s = 44,1 \text{ kHz}$, $n = 16 \text{ bits}$, 2 canales (estéreo) → $R = 1.411,2 \text{ kbps} \approx 1,41 \text{ Mbps}$.
- Audio de estudio profesional: $f_s = 96 \text{ kHz}$, $n = 24 \text{ bits}$ → $R = 2,3 \text{ Mbps}$ por canal.

3.4. Variantes evolutivas de PCM

Como PCM puro genera tasas de bits muy elevadas, se desarrollaron variantes que aprovechan la redundancia natural de las señales reales para reducir la tasa sin pérdida apreciable de calidad:

- **DPCM (Differential PCM)**: codifica la diferencia entre muestras consecutivas en lugar del valor absoluto, aprovechando que en señales reales esa diferencia suele ser pequeña.
- **ADPCM (Adaptive DPCM)**: variante adaptativa que ajusta dinámicamente el paso de cuantización según la actividad de la señal. Reduce la voz a 32 kbps (estándar G.726) sin degradación perceptible.
- **DM (Delta Modulation)**: variante extrema que codifica cada muestra con un solo bit (subió o bajó respecto a la anterior). Simple pero requiere f_s muy alta.

4. Modulación Digital por Portadora

Una vez obtenida la señal digital (por ejemplo, tras PCM), suele ser necesario transmitirla a través de un medio que no acepta señales en banda base: el aire, el cable coaxial de RF, la fibra óptica o las líneas telefónicas en frecuencias acústicas. Para ello se utiliza una portadora: una señal senoidal de alta frecuencia cuyas características se modifican según los bits a transmitir.

La portadora se expresa como:

$$c(t) = A \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t + \phi)$$

Los tres parámetros susceptibles de ser modificados son la amplitud A , la frecuencia f_c y la fase ϕ . Cada esquema de modulación digital actúa sobre uno o varios de estos parámetros simultáneamente.

4.1. Tasa de bits, tasa de símbolos y eficiencia espectral

Un concepto central en modulación digital es la distinción entre tasa de bits y tasa de símbolos. Un símbolo es cada uno de los estados distintos que el modulador puede transmitir en un intervalo elemental llamado tiempo de símbolo. Si el modulador puede generar M símbolos distintos, cada símbolo transporta $\log_2(M)$ bits de información.

$$R_b = R_s \cdot \log_2(M) \quad [\text{bps}]$$

Donde R_b es la tasa de bits (bps), R_s es la tasa de símbolos (baudios o símbolos/segundo) y M es el tamaño del alfabeto de símbolos. La eficiencia espectral mide cuántos bits por segundo se transmiten por cada hertz de ancho de banda:

$$\eta = R_b / BW \quad [\text{bps/Hz}]$$

Un esquema de modulación se considera eficiente espectralmente cuando logra altos valores de η . Sin embargo, como veremos, esta eficiencia se paga con mayor sensibilidad al ruido.

4.2. ASK — Amplitude Shift Keying

Modulación por desplazamiento de amplitud. La amplitud de la portadora cambia según el valor del bit: típicamente se transmite una portadora con amplitud A para el bit 1 y amplitud 0 (ausencia de señal) para el bit 0. Esta variante particular se llama OOK (On-Off Keying).

- **Ventajas:** muy simple de implementar; bajo costo.
- **Desventajas:** muy vulnerable al ruido y a las variaciones de potencia del canal (atenuación variable, desvanecimientos). Poco eficiente espectralmente.
- **Aplicaciones típicas:** controles remotos infrarrojos, fibra óptica simple, RFID de baja gama, sensores ASK de domótica.

4.3. FSK — Frequency Shift Keying

Modulación por desplazamiento de frecuencia. Se utilizan dos (o más) frecuencias distintas para representar los bits o símbolos. Por ejemplo, f_1 para el bit 1 y f_2 para el bit 0. La amplitud y la fase se mantienen, idealmente, constantes.

- **Ventajas:** más robusta al ruido que ASK porque no depende de la amplitud, que es el parámetro más afectado por el canal.
- **Desventajas:** requiere mayor ancho de banda que ASK para una misma tasa de bits.
- **Aplicaciones típicas:** módems telefónicos antiguos (Bell 103, 300 bps), radio digital de baja velocidad, telemetría, paging, una variante (GFSK) en Bluetooth clásico.

4.4. PSK — Phase Shift Keying

Modulación por desplazamiento de fase. La fase de la portadora cambia según el símbolo a transmitir, mientras que amplitud y frecuencia permanecen constantes.

4.4.1. BPSK (Binary PSK)

Utiliza dos fases distintas: 0° y 180° . Cada símbolo es un bit ($M = 2$). En el plano complejo, los símbolos se representan como dos puntos diametralmente opuestos sobre el eje real. Esta separación máxima la hace muy robusta al ruido: BPSK es el esquema digital más resistente al ruido entre los de uso común.

4.4.2. QPSK (Quadrature PSK)

Utiliza cuatro fases: 45° , 135° , 225° y 315° (o, equivalentemente, 0° , 90° , 180° y 270°). Cada símbolo transporta 2 bits ($M = 4$), duplicando la eficiencia espectral respecto a BPSK con un costo aceptable en SNR requerida.

En el plano complejo, los cuatro símbolos forman un cuadrado centrado en el origen. Este tipo de gráfico se denomina constelación: cada punto representa un símbolo posible, y la distancia entre puntos vecinos define la robustez frente al ruido.

- **Aplicaciones típicas de BPSK/QPSK:** comunicaciones satelitales, telefonía móvil (LTE en condiciones débiles), Wi-Fi a velocidades bajas, RFID, sistemas de control industrial.

4.5. QAM — Quadrature Amplitude Modulation

Modulación combinada de amplitud y fase. La portadora puede asumir distintos valores de amplitud y fase simultáneamente, formando una constelación de M puntos distribuidos sobre el plano complejo (no sólo sobre un círculo como en PSK). Las constelaciones más comunes son cuadradas: QAM-16 ($4 \times 4 = 16$ puntos), QAM-64 ($8 \times 8 = 64$), QAM-256 ($16 \times 16 = 256$), QAM-1024, QAM-4096.

En QAM- M , cada símbolo transporta $\log_2(M)$ bits. Por ejemplo, QAM-256 transmite 8 bits por símbolo, lo que permite altísimas tasas de transferencia en un ancho de banda dado.

- **Ventajas:** máxima eficiencia espectral entre los esquemas tradicionales.
- **Desventajas:** a medida que M crece, los puntos de la constelación se acercan entre sí y se vuelven más fácilmente confundibles ante el ruido. QAM-256 requiere una SNR aproximadamente 18 dB mayor que QPSK para la misma tasa de error.
- **Aplicaciones típicas:** Wi-Fi moderno (802.11ac/ax usan hasta QAM-1024), LTE/5G, televisión digital por cable (DOCSIS, hasta QAM-4096 en DOCSIS 3.1), módems ADSL/VDSL.

4.6. Compromiso fundamental: eficiencia vs robustez

Existe un compromiso ineludible en toda modulación digital: a mayor eficiencia espectral (más bits/Hz), mayor sensibilidad al ruido (se requiere mayor SNR para mantener una misma tasa de error). La tasa de error de bits (BER, Bit Error Rate) es la medida estándar para cuantificar la calidad de la recepción.

Por eso los sistemas modernos no usan una modulación fija sino modulación adaptativa: miden continuamente la calidad del canal y eligen el esquema más eficiente que la SNR actual les permite sostener. Cuando un cliente Wi-Fi se aleja del router, el sistema baja automáticamente de QAM-1024 a QAM-256, luego a QAM-64, QAM-16, QPSK y BPSK según se degrada el enlace.

4.7. Cuadro comparativo de esquemas

Esquema	Parámetro modificado	Bits por símbolo	Robustez al ruido	Eficiencia espectral
ASK / OOK	Amplitud	1	Baja	Baja
FSK	Frecuencia	1 (binaria)	Media-Alta	Baja
BPSK	Fase	1	Muy Alta	Media
QPSK	Fase	2	Alta	Media-Alta
QAM-16	Amplitud + Fase	4	Media	Alta
QAM-64	Amplitud + Fase	6	Baja-Media	Muy Alta
QAM-256	Amplitud + Fase	8	Baja	Muy Alta
QAM-1024	Amplitud + Fase	10	Muy Baja	Máxima

5. Multiplexación

La multiplexación es el conjunto de técnicas que permiten compartir un único medio de transmisión entre varias señales o usuarios simultáneamente. El dispositivo que combina las señales en el origen se denomina multiplexor (MUX) y el que las separa en el destino, demultiplexor (DEMUX).

El objetivo es aprovechar al máximo la capacidad del canal compartiendo alguno de sus recursos: ancho de banda, tiempo, frecuencia o longitud de onda. Las técnicas se clasifican según qué recurso se reparte entre las señales que comparten el medio.

5.1. FDM — Frequency Division Multiplexing

Multiplexación por división de frecuencia. El ancho de banda total del medio se divide en sub-bandas (canales) no superpuestas, y cada señal se transmite simultáneamente en una sub-banda distinta. Entre canales adyacentes se reservan bandas de guarda para evitar interferencias.

- **Característica:** las señales viajan simultáneamente pero en frecuencias diferentes.
- **Aplicaciones:** radio AM (canales de 10 kHz) y FM (canales de 200 kHz), televisión analógica por aire y cable, telefonía analógica de larga distancia (sistema portador L).
- **Limitaciones:** desperdicia ancho de banda en las bandas de guarda; requiere filtros analógicos costosos y selectivos.

5.2. WDM — Wavelength Division Multiplexing

Multiplexación por división de longitud de onda. Es esencialmente FDM aplicada al dominio óptico: por una misma fibra óptica se transmiten simultáneamente decenas o cientos de señales láser, cada una con una longitud de onda diferente (recordemos que λ y f son inversamente proporcionales).

- **Variantes:** CWDM (Coarse WDM, hasta 18 canales) y DWDM (Dense WDM, hasta 160 canales o más por fibra).
- **Aplicaciones:** backbones ópticos de larga distancia, cables submarinos transoceánicos, redes metropolitanas. Permite que una sola fibra transporte varios terabits por segundo.

5.3. TDM — Time Division Multiplexing

Multiplexación por división de tiempo. El medio se asigna íntegro pero por turnos: cada señal recibe ranuras de tiempo (slots) cíclicas en las que tiene acceso exclusivo al canal. La señal resultante es la concatenación temporal de fragmentos de cada fuente.

5.3.1. TDM síncrona

A cada usuario se le asigna un slot fijo en cada ciclo (llamado trama), esté o no transmitiendo información. Si un usuario no tiene datos, su slot se transmite vacío. Es predecible, simple y

proporciona garantía de ancho de banda dedicado, pero ineficiente cuando el tráfico es desigual o intermitente.

Ejemplo paradigmático: la trama E1 europea agrupa 32 canales de 8 bits cada uno, repetidos 8.000 veces por segundo (uno por cada muestra PCM). De los 32 canales, 30 transportan voz, uno se usa para sincronismo y otro para señalización. La tasa total resulta: $32 \cdot 8 \cdot 8.000 = 2.048 \text{ kbps} = 2,048 \text{ Mbps}$. La trama T1 norteamericana, similar, agrupa 24 canales y alcanza 1,544 Mbps.

5.3.2. TDM estadística (o asíncrona)

Los slots se asignan dinámicamente sólo a los usuarios que tienen datos para transmitir. Requiere identificar a qué usuario pertenece cada slot mediante una cabecera, pero aprovecha mucho mejor el canal cuando el tráfico es a ráfagas. Es la base conceptual de la conmutación de paquetes utilizada en Internet.

- **Aplicaciones de TDM en general:** jerarquías telefónicas digitales (E1, T1, E3, SDH/SONET), GSM (combinada con FDM), Ethernet (en cierta lectura, TDM estadístico).

5.4. OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Multiplexación por división de frecuencia ortogonal. Es una variante avanzada de FDM en la que el ancho de banda se divide en una gran cantidad de subportadoras estrechas (típicamente desde decenas hasta miles), espaciadas de manera tal que son matemáticamente ortogonales entre sí.

La ortogonalidad significa que, en el punto exacto de máxima amplitud de una subportadora, todas las demás cruzan por cero. Esto permite que las subportadoras se superpongan en frecuencia sin interferirse, eliminando las bandas de guarda y maximizando el aprovechamiento del espectro.

Cada subportadora transmite un flujo de datos a baja velocidad, modulado normalmente con QAM. El conjunto se procesa eficientemente mediante la Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT) en el transmisor y la FFT en el receptor. Esta implementación digital eficiente fue clave para la popularización de OFDM a partir de los años 2000.

- **Ventajas:** altísima eficiencia espectral; gran robustez frente al desvanecimiento selectivo en frecuencia y a la propagación multicamino (multipath), comunes en entornos inalámbricos urbanos.
- **Desventajas:** mayor complejidad computacional; sensibilidad a errores de sincronización de frecuencia; relación pico/promedio (PAPR) elevada, lo que exige amplificadores lineales.
- **Aplicaciones:** Wi-Fi (802.11a/g/n/ac/ax/be), LTE, 5G NR, televisión digital terrestre (DVB-T/T2, ISDB-T), ADSL y VDSL en su variante DMT, PLC (Power Line Communication).

5.5. Mención adicional: CDM y SDM

Existen además otras técnicas modernas:

- **CDM/CDMA (Code Division Multiplexing):** todas las señales comparten el mismo ancho de banda al mismo tiempo, pero cada una está codificada con una secuencia pseudoaleatoria única (código) que permite separarlas en el receptor. Fue la base del estándar IS-95 (CDMAOne) y del UMTS 3G.
- **SDM (Space Division Multiplexing):** aprovecha múltiples antenas (sistemas MIMO) para transmitir flujos independientes en el mismo tiempo y frecuencia, separándolos espacialmente. Fundamental en Wi-Fi moderno, LTE y 5G.

PARTE II

PARTE PRÁCTICA

Ejercicio 1 — Conversión Analógica-Digital (PCM)

Una emisora de radio decide digitalizar la señal de audio musical de uno de sus estudios para transmitirla por un enlace IP. La señal analógica de audio tiene un ancho de banda comprendido entre 20 Hz y 20 kHz. Para asegurar calidad de alta fidelidad, se elige una cuantización de 16 bits por muestra y se utiliza una frecuencia de muestreo igual a 2,2 veces la frecuencia máxima de la señal.

Se pide:

- 1) Determinar la frecuencia de muestreo (f_s) utilizada y justificar por qué se elige mayor que el mínimo teórico de Nyquist.
- 2) Calcular cuántos niveles de cuantización (L) se obtienen con la cantidad de bits indicada.
- 3) Calcular la tasa de bits R (en kbps) que genera un único canal de audio (mono).
- 4) Si la transmisión es estéreo (dos canales independientes), ¿cuál es la tasa de bits total?
- 5) Estimar cuántos megabytes ocupa una canción de 4 minutos transmitida en estéreo, sin compresión. Comparar con el tamaño habitual de un archivo MP3 de la misma duración y explicar brevemente la diferencia.

Datos útiles: 1 byte = 8 bits; 1 MB = 1.024 KB; 1 KB = 1.024 bytes.

Ejercicio 2 — Modulación Digital por Portadora

Una empresa proveedora de Internet debe diseñar el enlace de bajada hacia los hogares de sus clientes mediante un sistema con portadora. Dispone de un canal con un ancho de banda $B = 6$ MHz y debe alcanzar la mayor tasa de transferencia posible. Se evalúan tres alternativas de modulación: QPSK, QAM-16 y QAM-64. Para simplificar, asumimos que la tasa de símbolos es igual al ancho de banda disponible (1 símbolo/Hz).

Se pide:

- b.1) Calcular la tasa de bits teórica (en Mbps) que se obtendría con cada una de las tres modulaciones propuestas.
- b.2) Confeccionar un cuadro comparativo de las tres alternativas indicando: bits por símbolo, tasa de bits, robustez frente al ruido (cualitativa) y SNR requerida (cualitativa).
- b.3) Si los clientes del área se encuentran a una distancia considerable del nodo y la SNR medida en sus módems es baja, ¿cuál de las tres modulaciones recomendaría? Justificar la respuesta.
- b.4) Si, en cambio, los clientes están muy próximos al nodo y la SNR es excelente, ¿cuál convendría utilizar y por qué? Explicar qué relación existe entre eficiencia espectral y calidad del canal.