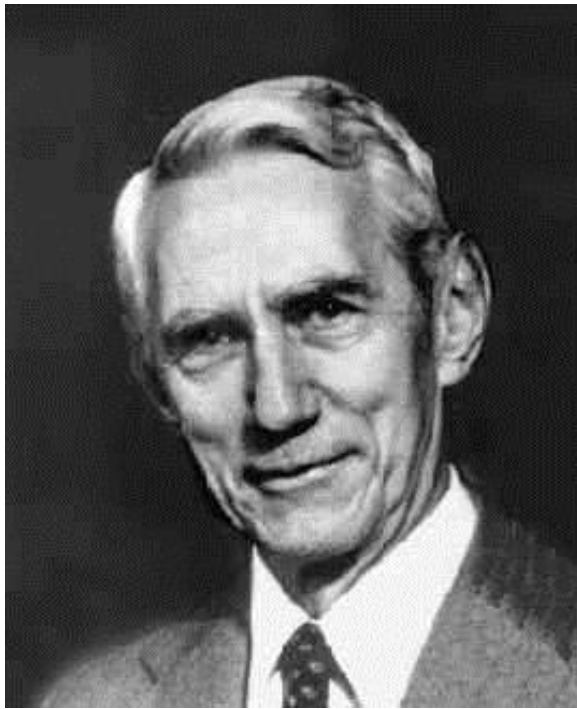


Teoría de las Comunicaciones

Claudio Enrique Righetti – Rodrigo Castro

Primer Cuatrimestre de 2017

**Departamento de Computación
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires
Argentina**



Teoría de la Información y Codificación

Codificación

Claude Shannon

Consideremos un código instantáneo con un alfabeto fuente

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_q\}$$

y un alfabeto código $X = \{x_1, x_2, \dots, x_r\}$. Sean X_1, X_2, \dots, X_q las palabras del código y, por definición, l_i la longitud (es decir, el número de símbolos del código) de la palabra X_i . Normalmente es interesante que las longitudes de las palabras del código sean lo más cortas posible. La condición necesaria y suficiente para que exista un código instantáneo con palabras de longitud l_1, l_2, \dots, l_q , viene definida por la *inecuación de Kraft* (Kraft, 1949).

La condición necesaria y suficiente para la existencia de un código instantáneo de longitudes l_1, l_2, \dots, l_q es que

$$\sum_{i=1}^q r^{-l_i} \leq 1$$

donde r es el número de símbolos diferentes que constituyen el alfabeto código.

En el caso de alfabeto binario, la inecuación de Kraft se transforma en

$$\sum_{i=1}^q 2^{-l_i} \leq 1 \quad (3-3)$$

donde la suma se extiende a todas las palabras del código bloque. Antes de probar esta inecuación, es interesante ver en qué forma puede

Codificación

- ▶ Establecer una correspondencia entre los símbolos de una fuente y los símbolos del alfabeto de un código.
- ▶ Proceso mediante el cual también podemos lograr una **representación eficiente de la información** (eliminar redundancia).

Codificación: condiciones

- ▶ Bloque
- ▶ Singular
- ▶ Separable (unívocamente decodificable)

Condición de los prefijos

- ▶ La condición *necesaria y suficiente* para que un código sea *instantáneo* es que sus palabras cumplan la condición de los prefijos:
- ▶ No exista palabra que sea prefijo de otra palabra de longitud mayor.

Códigos eficientes

- ▶ Asignar palabras más cortas a símbolos más probables
 - ▶ l_i : longitud de la palabra codificada del mensaje m_i
 - ▶ r : # de símbolos del alfabeto del código
- ▶ $L = \sum p_i l_i$: Longitud media de un código
- ▶ $L \log r \geq H(s)$
- ▶ $\log r$: Cantidad promedio máxima de información de un símbolo del código
- ▶ $h = H(S) / (L \log r)$ Eficiencia del código

Si exigimos que el código sea instantáneo, la inecuación de Kraft impone que el argumento del segundo logaritmo del segundo miembro de (4-6) sea igual o menor que la unidad. Por lo tanto, su logaritmo deberá ser igual o menor que cero, y

$$H(S) \leq L \log r \quad (4-7a)$$

o bien

$$\frac{H(S)}{\log r} \leq L \quad (4-7b)$$

$H(S)$ viene medida en bits en la ecuación (4-7b). Recordemos que L es el número medio de símbolos utilizados para codificar S . Expresando la entropía asimismo en unidades r -arias, como en (2-5c), la relación (4-7b) podría escribirse en la forma

$$H_r(S) \leq L \quad (4-7c)$$

Ejemplo 2-1. Consideremos la fuente $S = \{s_1, s_2, s_3\}$ con $P(s_1) = 1/2$ y $P(s_2) = P(s_3) = 1/4$. Entonces

$$\begin{aligned} H(S) &= 1/2 \log 2 + 1/4 \log 4 + 1/4 \log 4 \\ &= 3/2 \text{ bits} \end{aligned}$$

De la ecuación (2-2) se deduce

$$H_r(S) = \frac{H(S)}{\log r} \quad (2-5c)$$

Si medimos $I(s_i)$ en unidades de orden r , $H(S)$ vendrá dada en la misma unidad, y tendremos

$$H_r(S) = \sum_i P(s_i) \log_r \frac{1}{P(s_i)} \text{ unidades de orden } r \quad (2-5b)$$

$$\log_a x = \frac{1}{\log_b a} \log_b x \quad (2-2)$$

Codificador óptimo

Nos falta encontrar el segundo término pendiente en la definición de cantidad de información: *codificador óptimo*.

Introduciendo el signo negativo dentro del logaritmo en la expresión de la entropía, ésta nos quedará como:

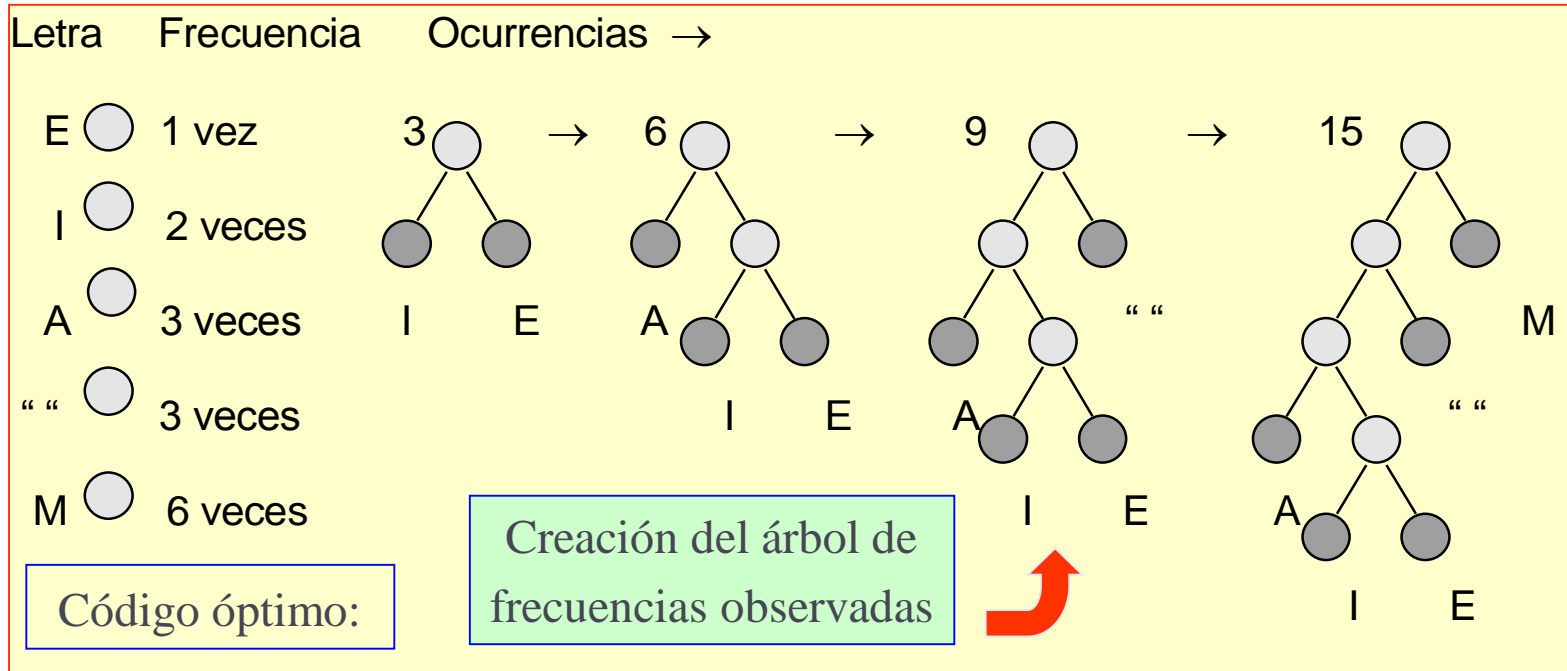
$$H(X) = \sum p(x) \log_2 [1/p(x)]$$

La expresión $\log_2 [1/p(x)]$ representa el número de bits necesario para codificar el mensaje X en un codificador óptimo.

Codificador óptimo es aquel que para codificar un mensaje X usa el **menor número posible** de bits.

Codificación de Huffman

Mensaje: MI MAMA ME MIMA



M = 1 " " = 01 A = 000 I = 0010 E = 0011

Mensaje: 1 0010 01 1 000 1 000 01 1 0011 01 1 0010 1 000 (33 bits)

Pregunta: ¿Con cuántos bits se codificaría si se usara ASCII? Saque conclusiones.



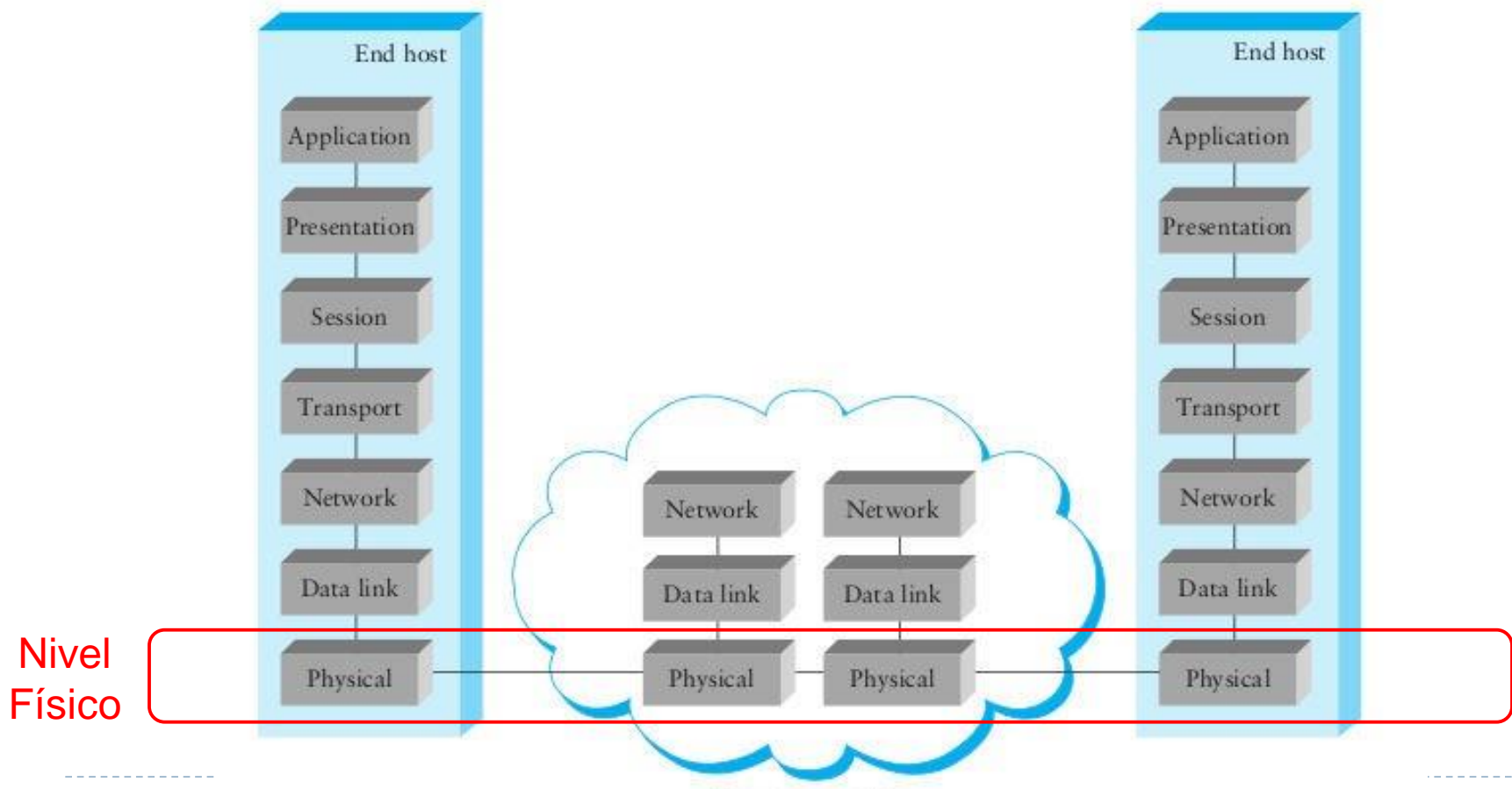
Nivel Físico

Fundamentos

<http://www.sciencephoto.com/media/225137/view>

Paradigma de capas

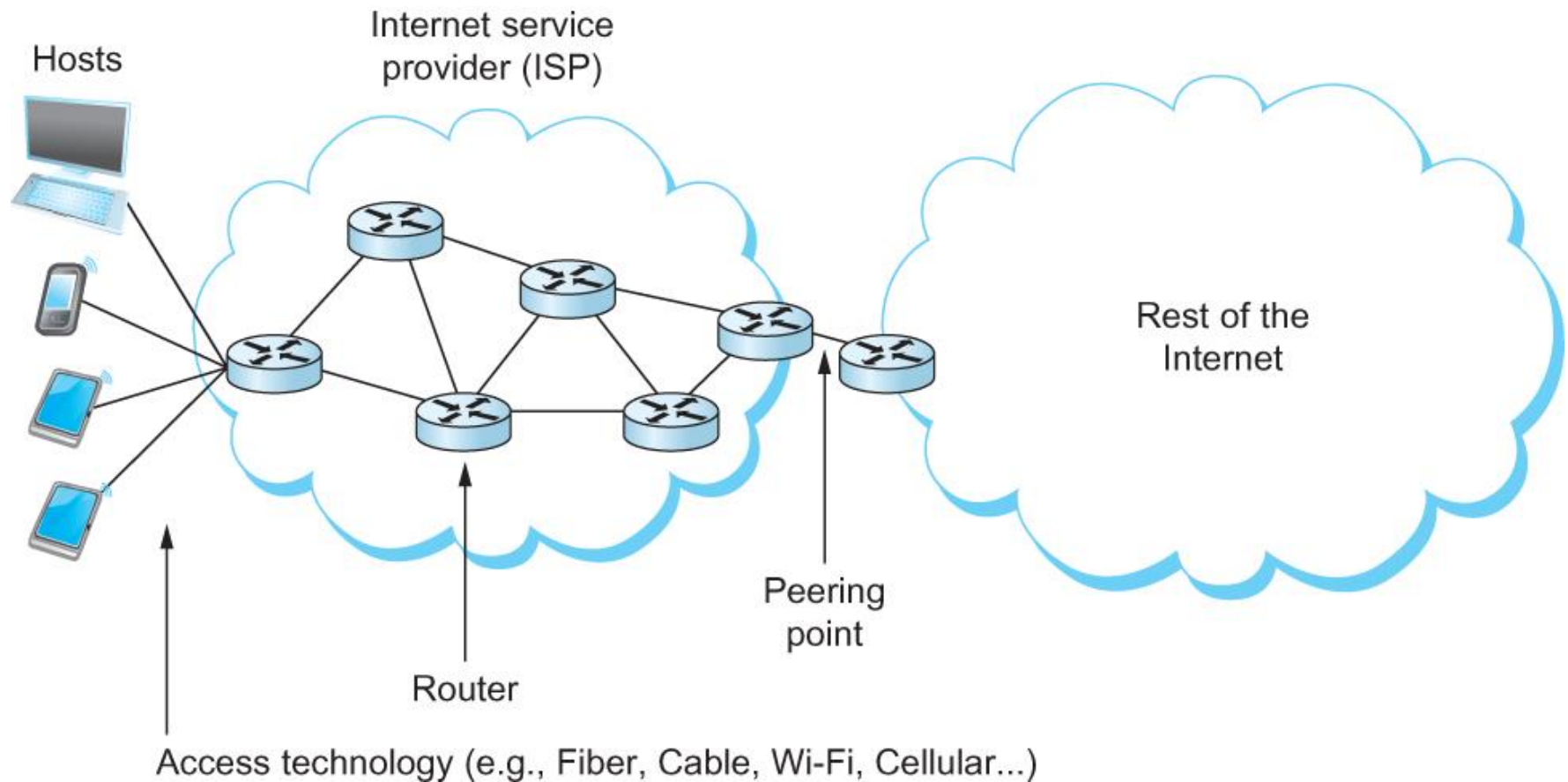
- Las comunicaciones se dan en capas que se brindan servicios entre sí



Agenda

- ▶ Medios de Transmisión: guiados y no guiados
- ▶ El dominio de la frecuencia
- ▶ La red telefónica
- ▶ Conversión analógico - digital
- ▶ Modulación (“Modulación” Digital / Portadora Analógica)
- ▶ Codificación (“Codificación” Digital / Portadora Digital)

Para “conectarnos”: Medios de transmisión



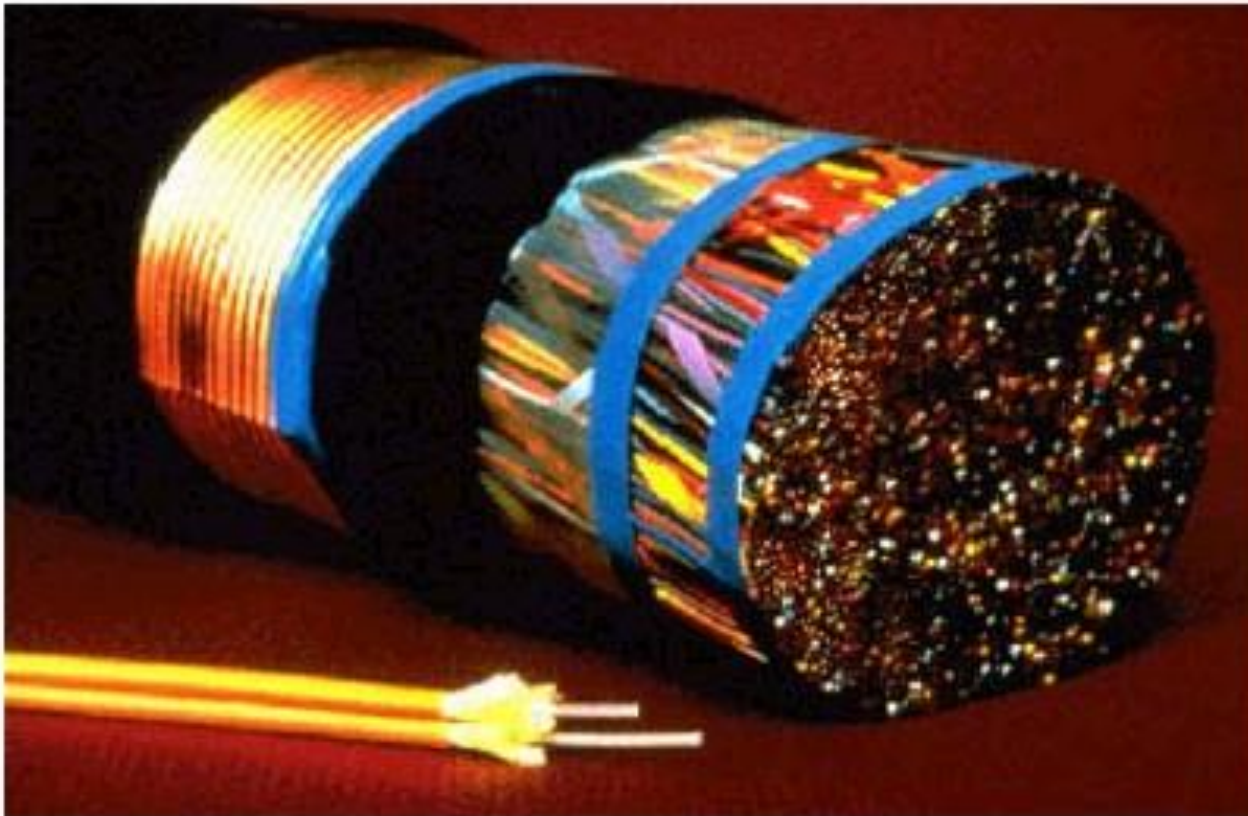
Los medios de transmisión

Guiados y no guiados

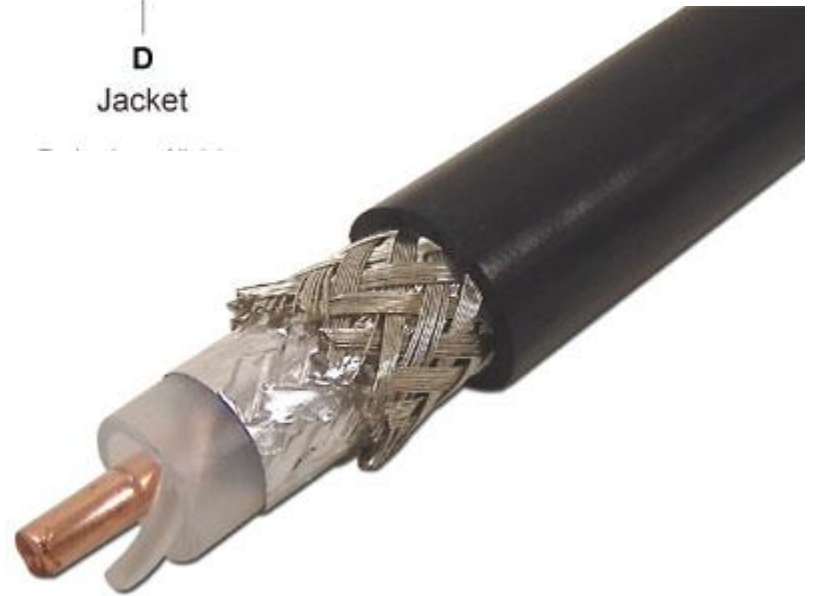
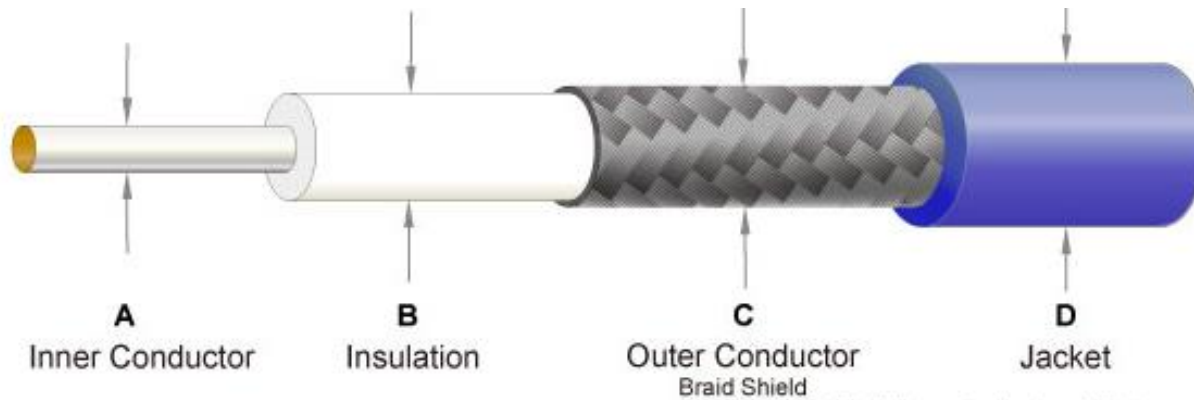
Medios de transmisión por guía de onda

- Par trenzado de cobre
- Coaxial
- Red Eléctrica (Power Line)
- Fibra óptica
 - Monomodo
 - Multimodo

Par de cobre



Cable coaxial



Coaxial: Redes CATV

► Historia:

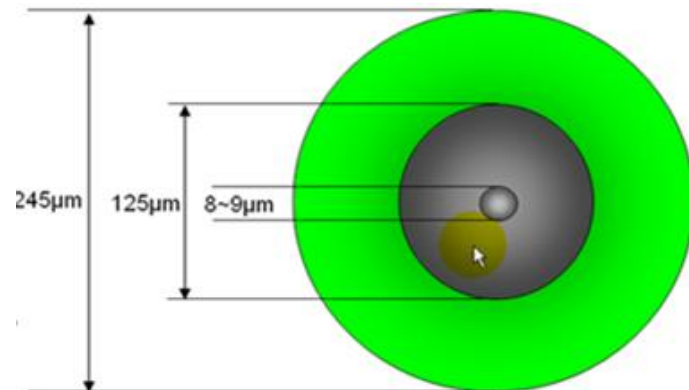
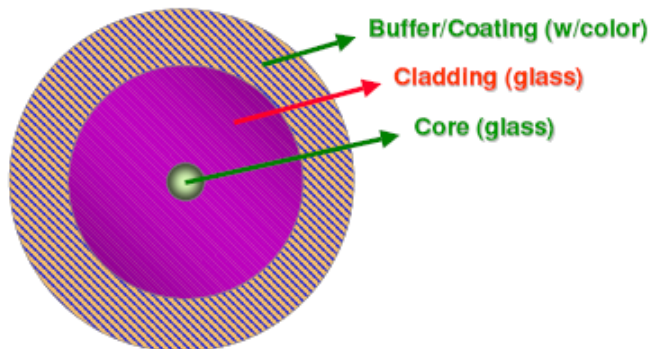
- Las redes CATV (Community Antenna TeleVision) nacieron (1949) para resolver problemas de recepción en zonas de mala cobertura.
- La antena (centro emisor) se ubicaba en sitio elevado con buena recepción. La señal se enviaba a los usuarios hacia abajo (downstream).

► Actualmente:

- **CATV = Cable TV**
- Cable coaxial de 75 Ω
- Amplificadores cada 0,5-1 Km. Hasta 50 en cascada.

Fibra Óptica

- ▶ La función principal de las fibras ópticas (FO) es la de **guiar las ondas de luz** con un mínimo de atenuación y distorsión.
- ▶ Las FO están compuestas de vidrio solidificado con un alto grado de pureza en capas llamadas núcleo (*core*), revestimiento (*cladding*) y cubierta (*buffer*).
- ▶ La luz se propaga únicamente por el núcleo, con una velocidad de propagación de aproximadamente hasta **2/3 de la velocidad de la luz en el vacío**.
- ▶ $c \approx 2/3 \times c_0$



Fibra óptica: Reflexión total interna

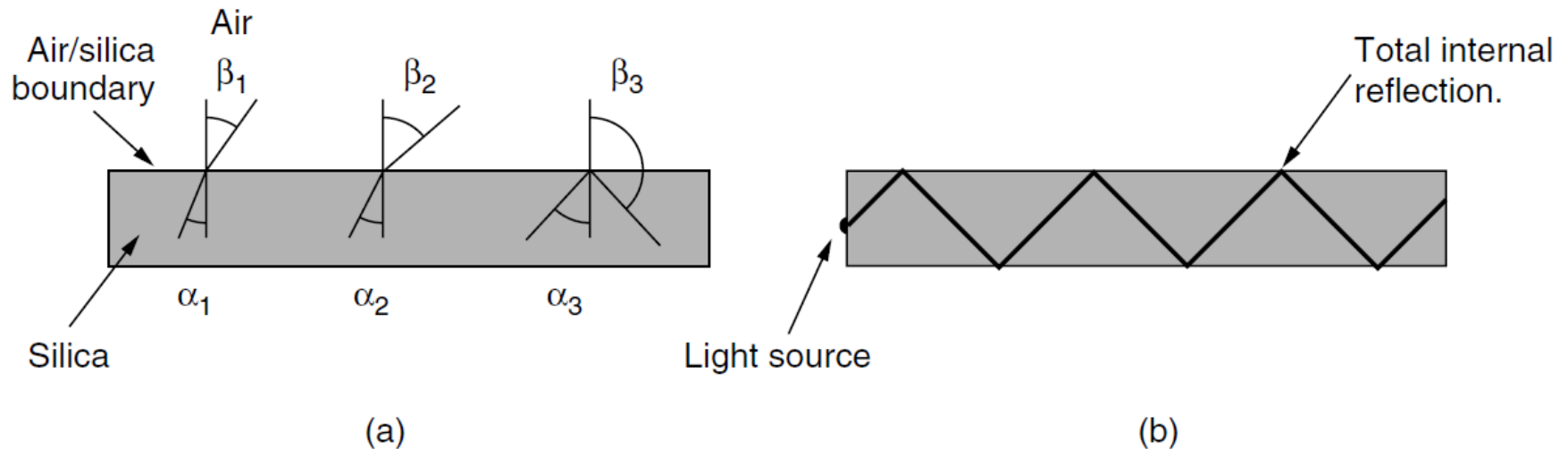


Figure 2-6. (a) Three examples of a light ray from inside a silica fiber impinging on the air/silica boundary at different angles. (b) Light trapped by total internal reflection.

Medios de transmisión sin guía de onda (“Wireless”)

El espectro electromagnético

- ▶ Transmisión por radio.
- ▶ Transmisión por microondas.
- ▶ Transmisión por ondas infrarrojas.
- ▶ Transmisión por láser
- ▶ Li-Fi

El espectro electromagnético

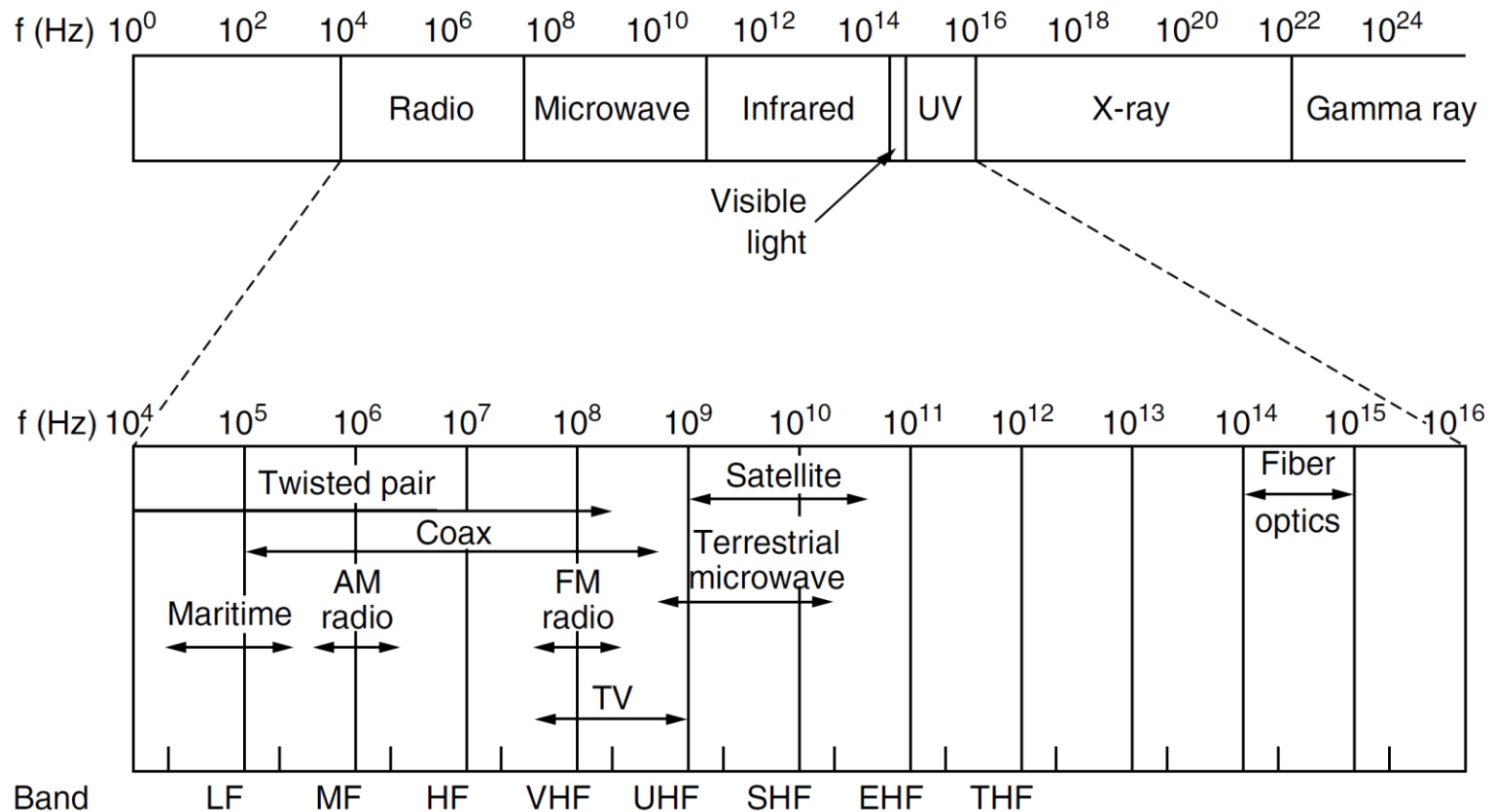


Figure 2-10. The electromagnetic spectrum and its uses for communication.

Radio

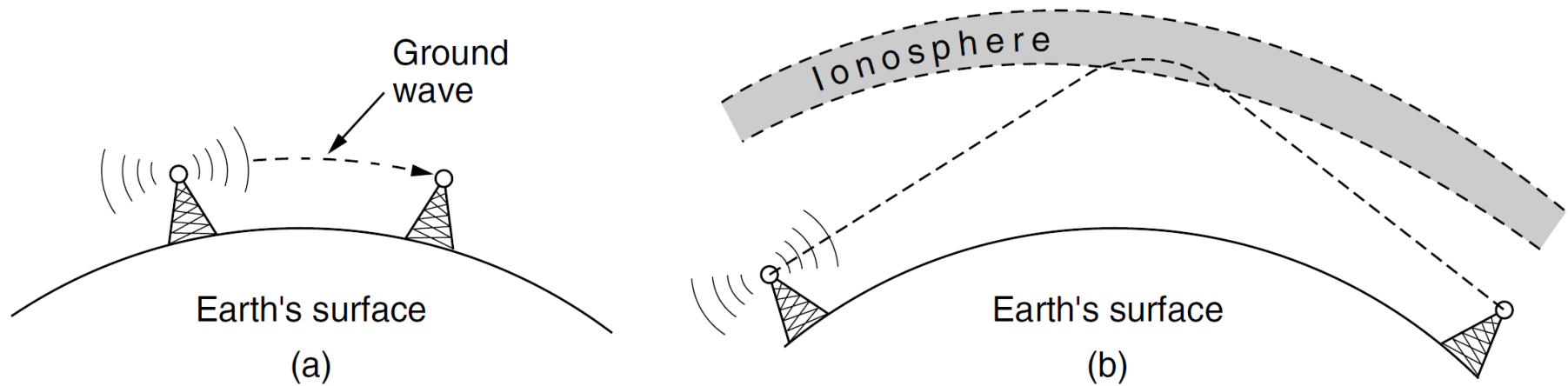


Figure 2-12. (a) In the VLF, LF, and MF bands, radio waves follow the curvature of the earth. (b) In the HF band, they bounce off the ionosphere.

Láser

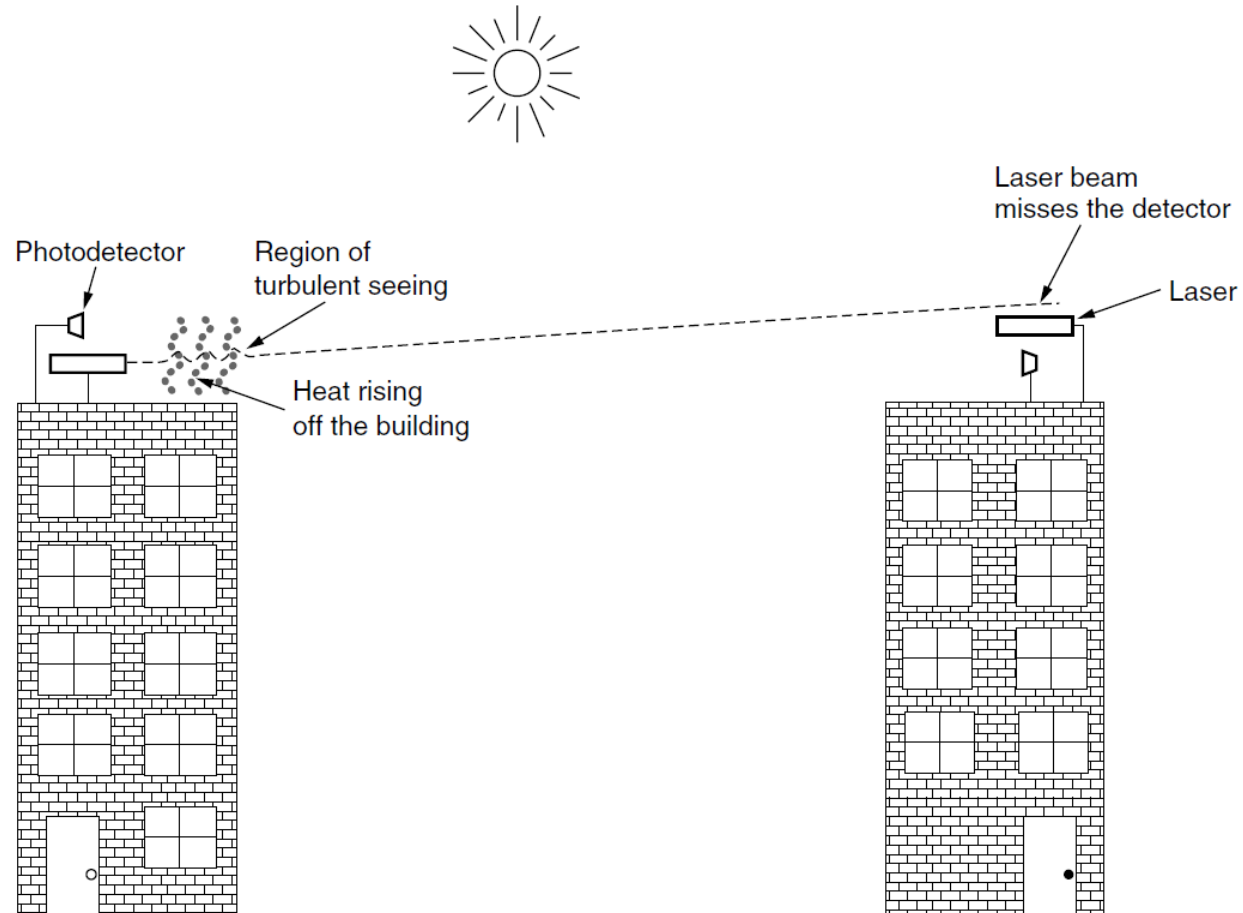


Figure 2-14. Convection currents can interfere with laser communication systems. A bidirectional system with two lasers is pictured here.

Li-Fi

Quisiera demostrar por primera vez en público que es posible transmitir un vídeo desde una bombilla LED comercial estándar a un panel solar con una computadora portátil que actúa como receptor. No hay Wi-Fi involucrado, es solo luz. Y pueden preguntarse, ¿cuál es la razón? Y la razón es que habrá una extensión masiva de Internet para cerrar la brecha digital, y para permitir lo que llamamos "El Internet de las cosas" --decenas de miles de millones de dispositivos conectados a Internet--. En mi opinión, una extensión de Internet solo puede funcionar si es casi energéticamente neutral. Lo que significa usar la infraestructura existente tanto como sea posible. Y aquí es donde la célula solar y el LED intervienen. Demostré por primera vez, en TED en 2011, la Li-Fi o fidelidad de luz. La Li-Fi utiliza LEDs comerciales para transmitir datos increíblemente rápido, y también en una manera segura y protegida. Los datos se transportan por la luz, codificados en cambios sutiles del brillo. Si miramos a nuestro alrededor, tenemos muchos LEDs que nos rodean, así que hay una rica infraestructura de transmisores Li-Fi que nos rodea.....

https://www.ted.com/talks/harald_haas_a_breakthrough_new_kind_of_wireless_internet?language=es



Principles of LED Light Communications

Harald Haas
Cambridge University
Press
2015

Red Telefónica

Fundamentos de las red de telefonía fija por
conmutación de circuitos

Estructura del sistema telefónico

- ▶ **PSTN** (Public Switched Telephone Network)
- ▶ **Objetivo:** Transmitir la **voz humana** en una forma **más o menos reconocible**.
- ▶ El sistema telefónico tradicional se encuentra organizado en una jerarquía multinivel altamente redundante
- ▶ Componentes:
 - ▶ Local loops (pares trenzados, señalización analógica)
 - ▶ Troncales (fibra óptica o microondas, digital)
 - ▶ Oficinas de conmutación

Red telefónica

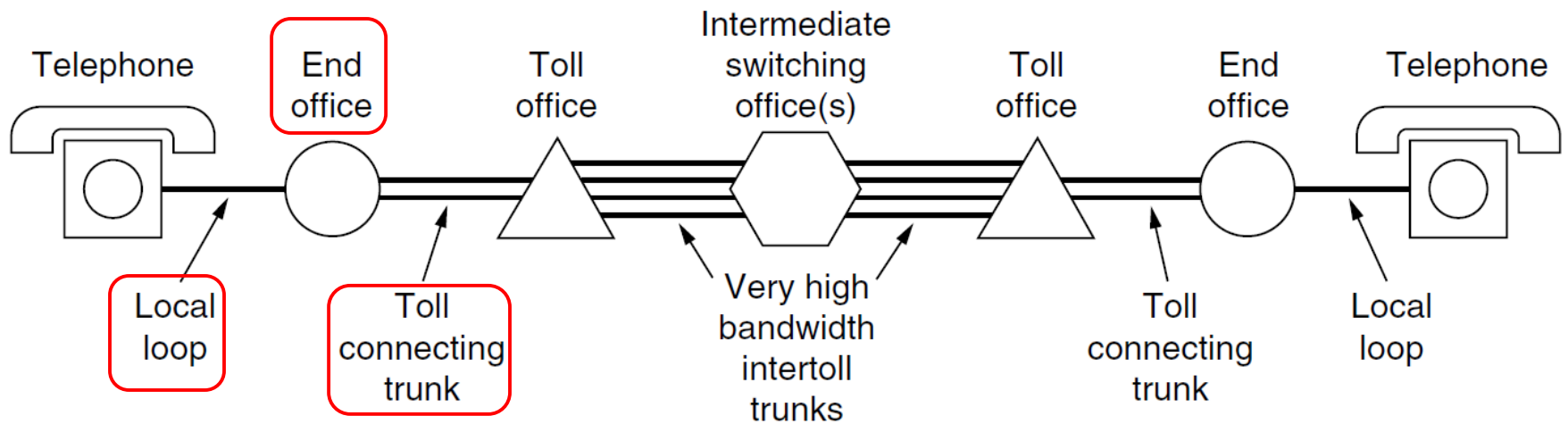
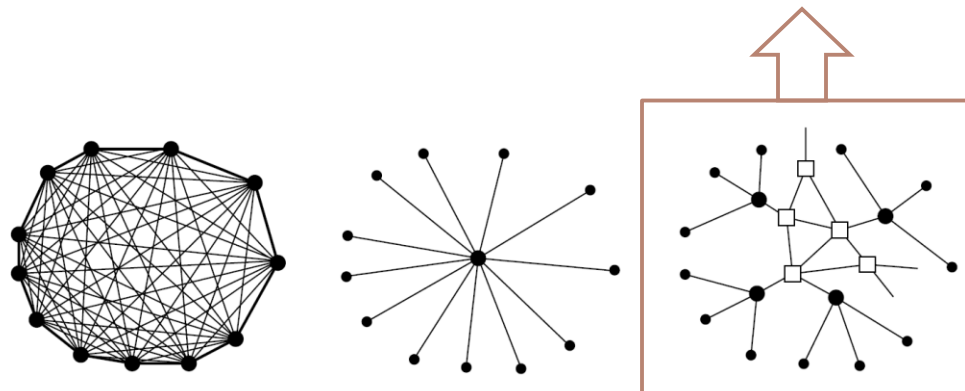
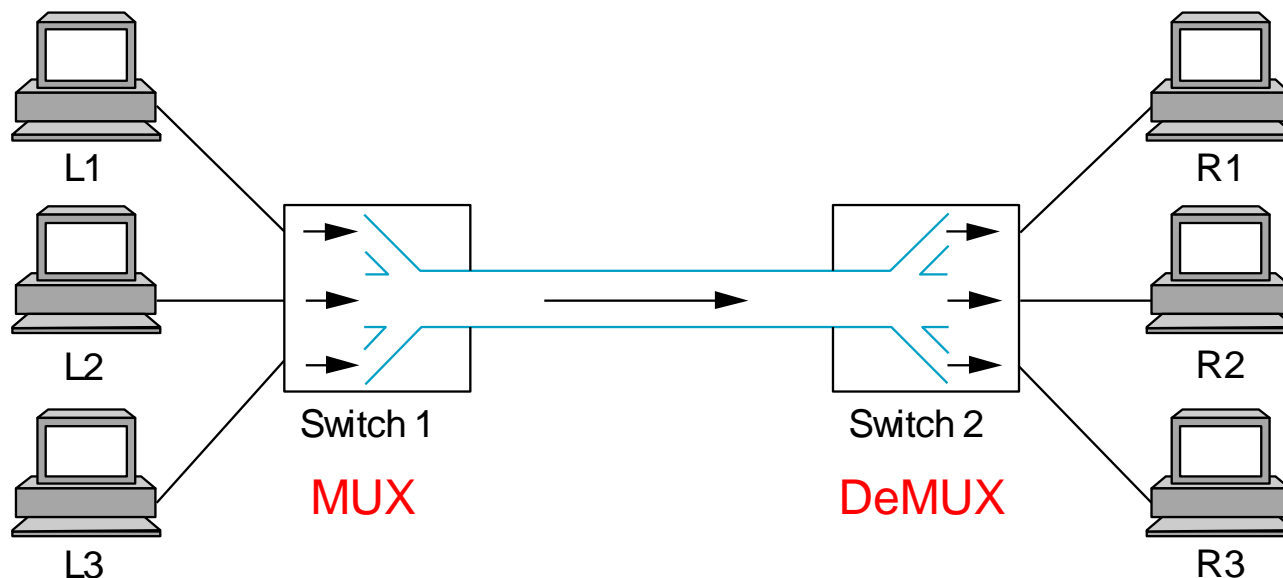


Figure 2-30. A typical circuit route for a long-distance call.



Multiplexación

- ▶ Debido a consideraciones económicas, las compañías telefónicas han desarrollado políticas elaboradas para **multiplexar** varias conversaciones sobre un único troncal físico.



Troncales y multiplexación

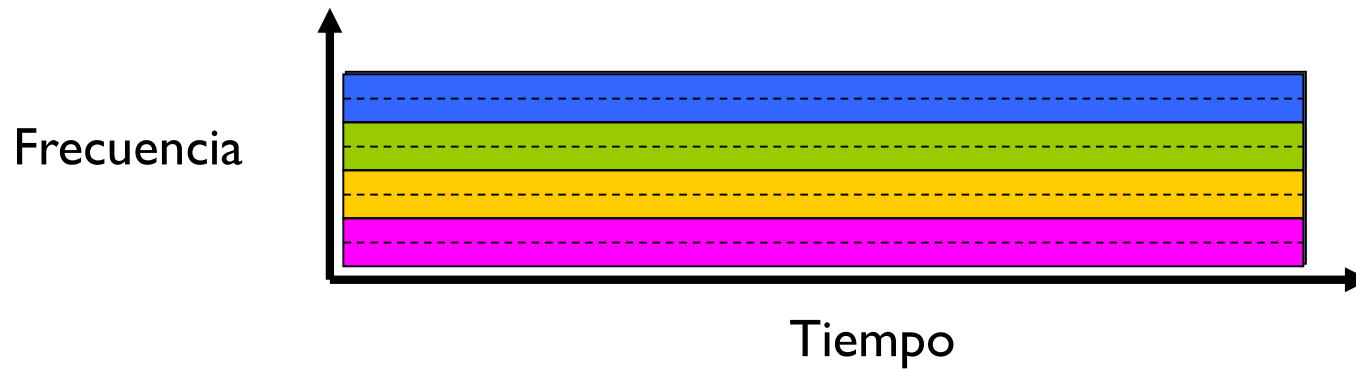
- ▶ **TDM** (Time Division Multiplexing)
 - ▶ Los usuarios toman turnos (en “round robin”) obteniendo periódicamente cada uno el **ancho de banda completo** por un **período de tiempo acotado**
- ▶ **FDM** (Frequency Division Multiplexing)
 - ▶ El espectro de frecuencias es subdividido en canales de **ancho de banda acotado**, que es usado a **tiempo completo y exclusivo** por cada usuario.

FDM y TDM

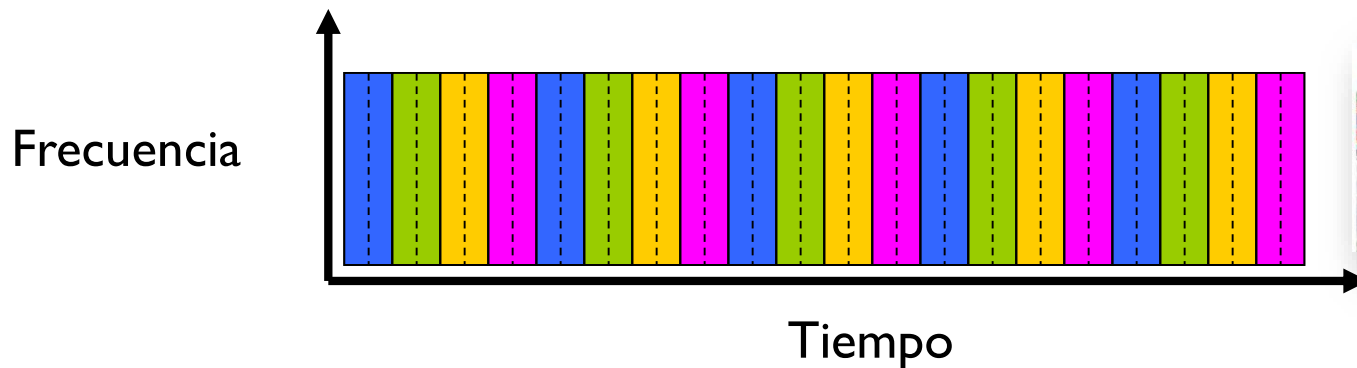
Ejemplo:

4 usuarios 

FDM



TDM



FDM y TDM

- ▶ Ejemplo: difusión de **radio AM**
- ▶ Espectro reservado ~ 1 Mhz (500-1500 kHz)
- ▶ Diferentes frecuencias reservadas a diferentes **canales lógicos (emisoras)**. Cada una opera en una porción del espectro => **FDM**
- ▶ Cada estación tiene dos subcanales lógicos: música y avisos comerciales.
- ▶ Los dos alternan en la misma frecuencia, primero una ráfaga de música y luego una ráfaga de avisos y así siguiendo => **TDM**

FDM

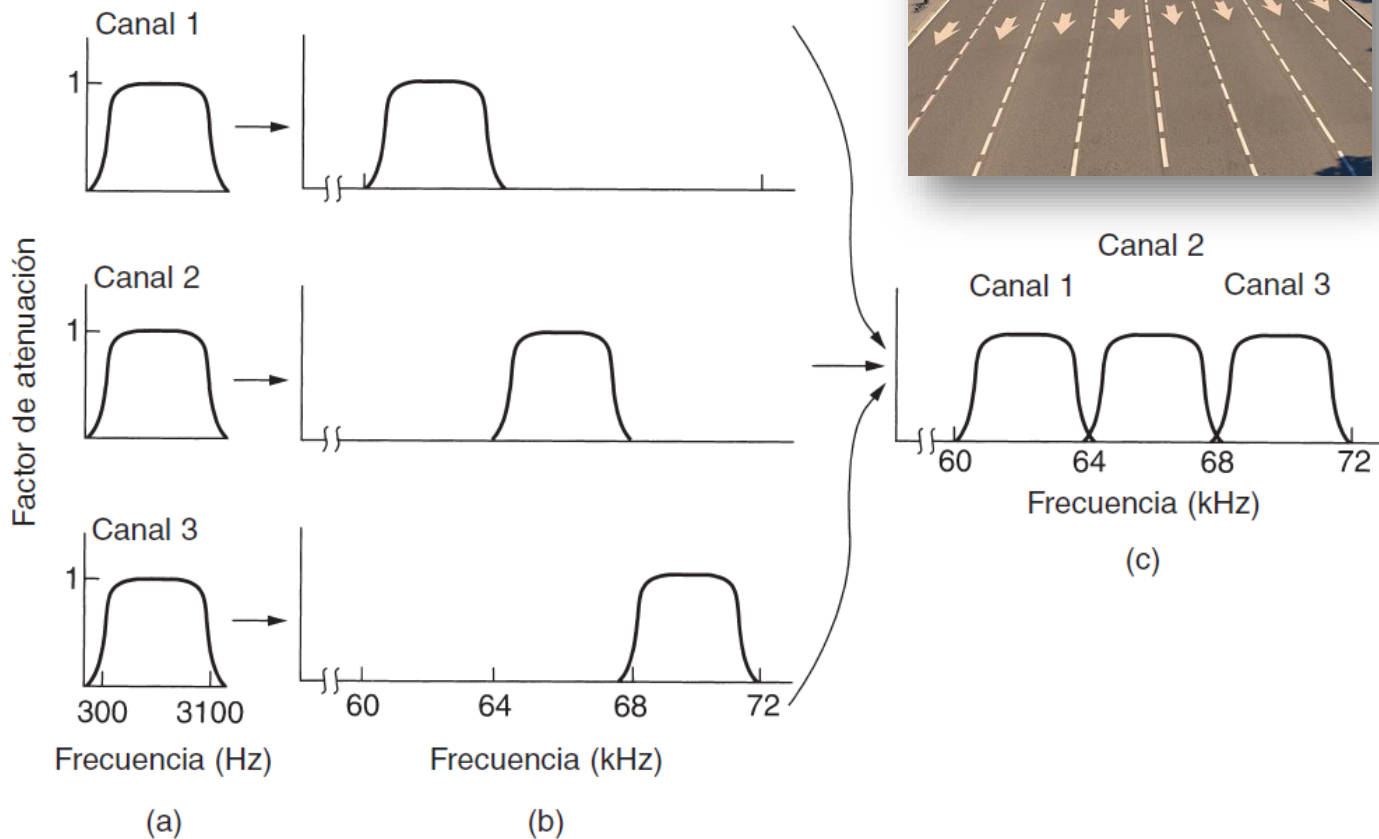
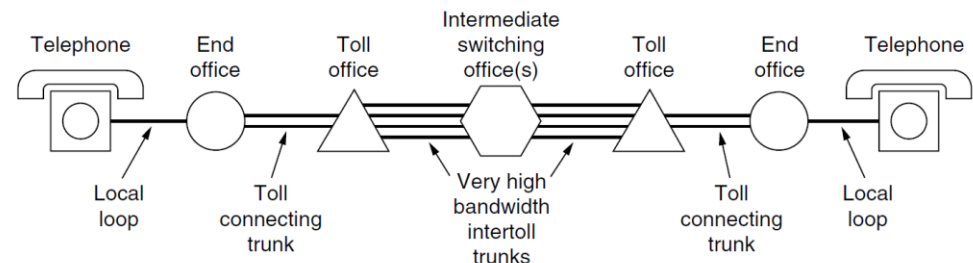


Figura 2-31. Multiplexión por división de frecuencia. (a) Los anchos de banda originales. (b) Incremento de frecuencia de los anchos de banda. (c) El canal multiplexado.

TDM

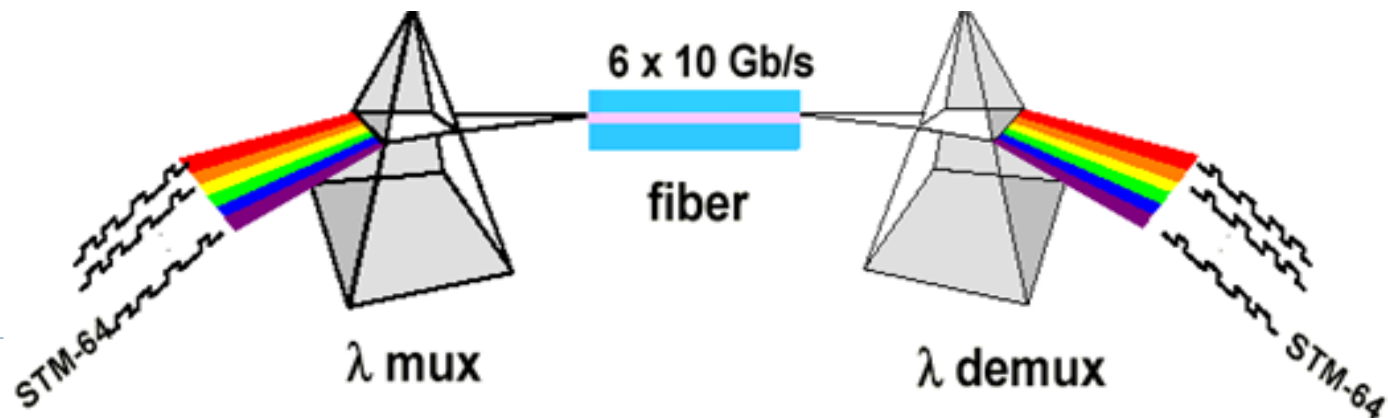


- ▶ Aunque **FDM** se utiliza todavía sobre cables de cobre o canales de microondas, requiere **circuitería analógica no trivial**.
- ▶ En contraste **TDM** puede ser manejado **enteramente por electrónica digital**, y se ha vuelto de más amplio uso en años recientes.
- ▶ **TDM** solo puede ser utilizado para datos digitales
- ▶ En telefonía:
 - ▶ Como el “local loop” produce señales analógicas, es necesario realizar una **conversión analógico/digital** en la “end office”, donde todos los “local loops” individuales se combinan sobre los “trunks” (troncales).
- ▶ **Cómo se digitalizan múltiples señales de voz analógicas y se combinan sobre un único troncal digital ?**
 - ▶ **Conversión Analógico-Digital**

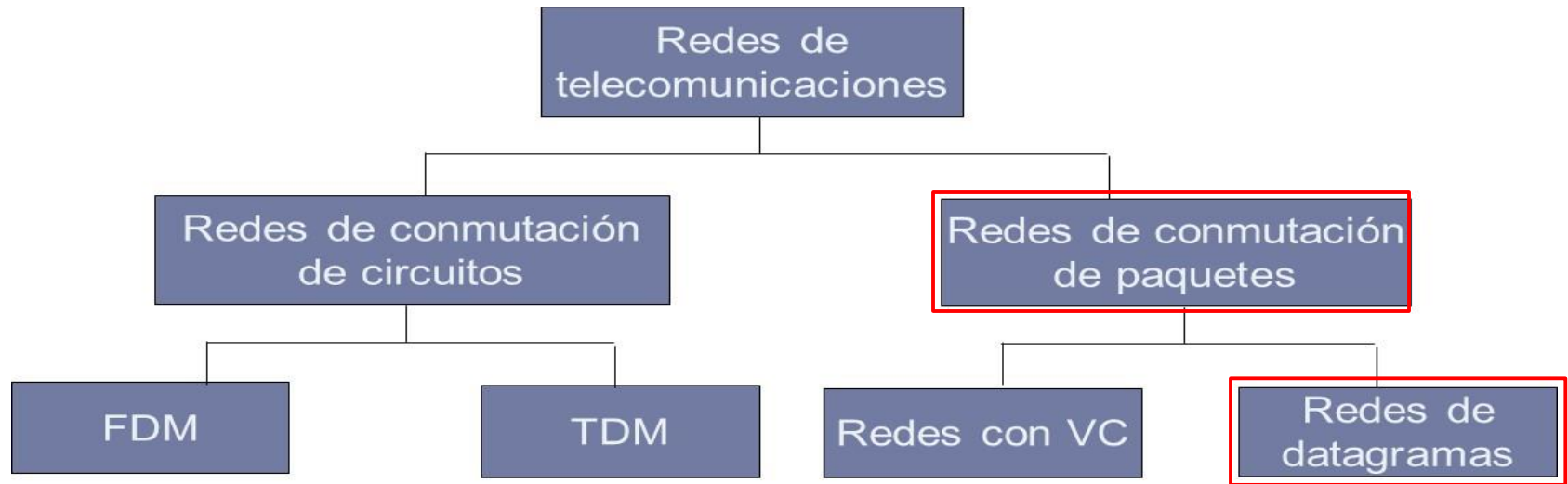


Multiplexación por Longitud de Onda (WDM)

- ▶ La capacidad de una FO se puede incrementar transmitiendo **diversas** longitudes de onda por una **única** fibra.
- ▶ Esta técnica bien conocida de Multiplexación por división de frecuencia (FDM - Frequency Division Multiplexing) aplicada en los sistemas ópticos se denomina **Multiplexación por División de Longitud de Onda**.
 - ▶ (WDM - Wavelength Division Multiplexing).



Taxonomía de la redes



► Redes de Circuitos Virtuales (VC)

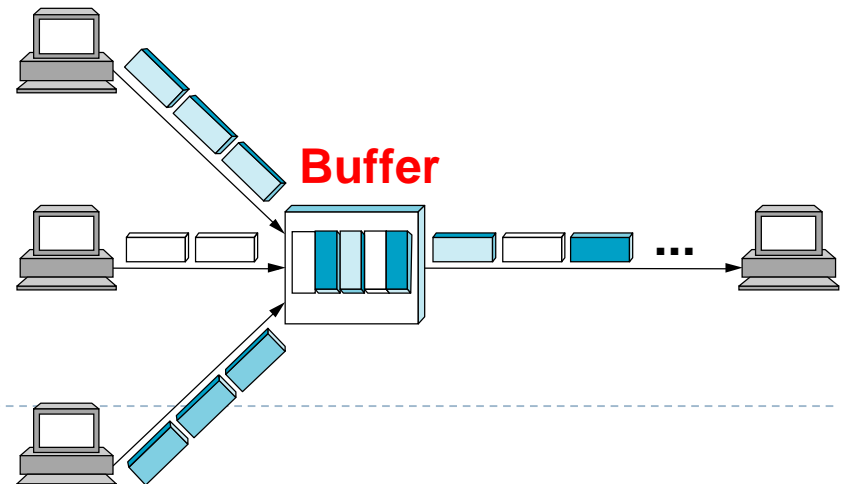
- Brindan un servicio orientado a conexión (ej. X.25, ATM, etc).

► Redes de Datagramas (Internet)

- Brinda un servicio sin conexión
- Sin embargo el **Nivel de Transporte** brinda tanto servicios **orientados a conexión** (TCP) como servicios **sin conexión** (UDP)
 - Lo que antes era una “conexión física” es ahora una “conexión lógica” (o “sesión”)

Multiplexación Estadística (redes de conmutación de paquetes)

- ▶ División del tiempo
"bajo demanda"
- ▶ Paquetes de diferentes fuentes "comparten" el enlace, a tiempos distintos
- ▶ Se "encolan" los paquetes que "compiten" por el enlace cuando el mismo no está disponible
- ▶ Cuando hay "overflow" decimos que tenemos *congestión*



Conversión Analógico - Digital

Teorema del Muestreo – Codificación
Modulación PCM

Conversión analógico/digital

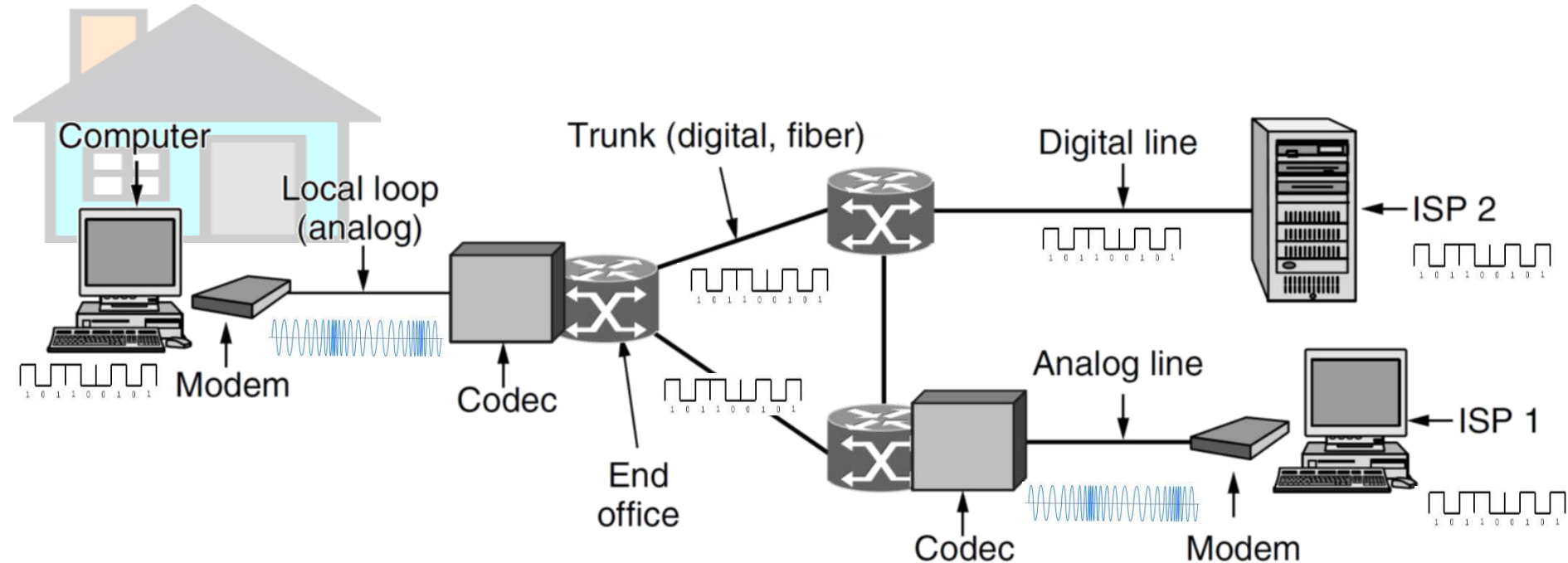


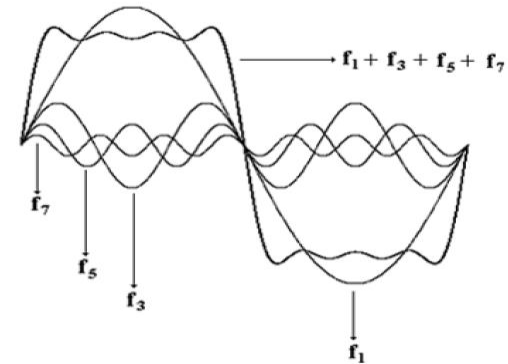
Figure 2-32. The use of both analog and digital transmission for a computer-to-computer call. Conversion is done by the modems and codecs.

Teorema de Muestreo

- ▶ Vimos que las señales periódicas se pueden descomponer como una **sumatoria de componentes en** senos y cosenos.
- ▶ Cada una de una amplitud, frecuencia y fase diferentes (Desarrollo de una señal periódica en su **Serie Infinita de Fourier**)

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)]$$

Ejemplo onda cuadrada, fundamental + 3 armónicas:



- ▶ Si a dichas sinusoides las “muestreamos”, el caso más crítico de muestreo será aquella de **mayor frecuencia** (frecuencia máxima f_{max} , corresponde al período mínimo $T_{min} = 1/f_{max}$), siendo la señal $f(t) = A \sin(2\pi f_{max} t + \phi)$

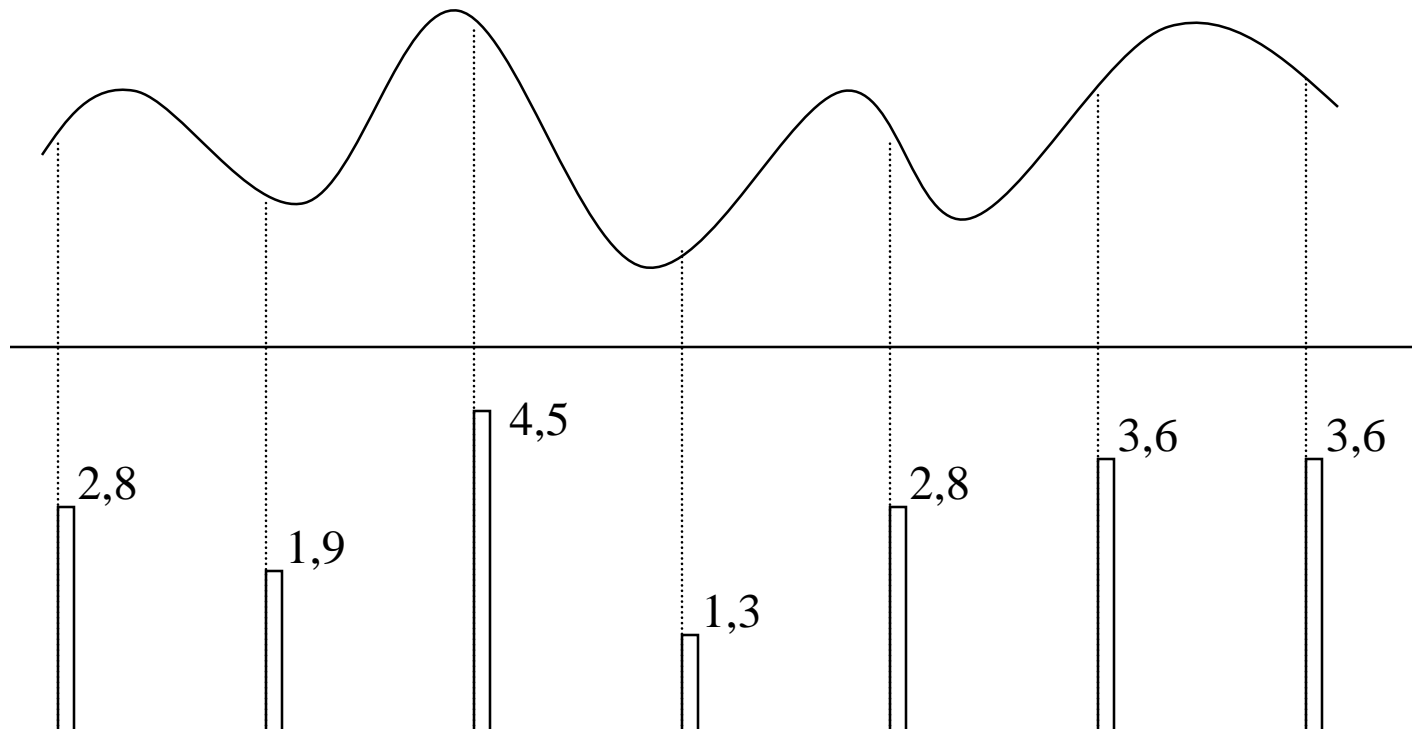
A: amplitud, t: tiempo y ϕ : fase

Muestreo

- ▶ **El Teorema de Muestreo formulado por Nyquist (1924) dice:**
 - ▶ Si queremos **reconstruir** una **señal de componente frecuencial máxima f_m** debemos muestrearla según **$f_s > 2 * f_m$** llamada **frecuencia de sampling** (también de “muestreo”, o de “modulación”)
 - ▶ **Ejemplo 1:** los CD de audio almacenan muestras producidas por muestreos a 44.100 veces por segundo. Por tanto pueden reproducir música conteniendo frecuencias de hasta ~22 KHz
 - ▶ **Ejemplo 2:** Si la voz humana con calidad **“suficiente para telefonía”** se estima en el espectro de 0 a 4 KHz, para poder muestrear y recuperar la señal requeriríamos 8000 muestras por segundo.
 - ▶ Cuantos dígitos binarios uso para codificar cada muestra ? 4 , 7, 8, 16 ...? Lo veremos luego en PCM.

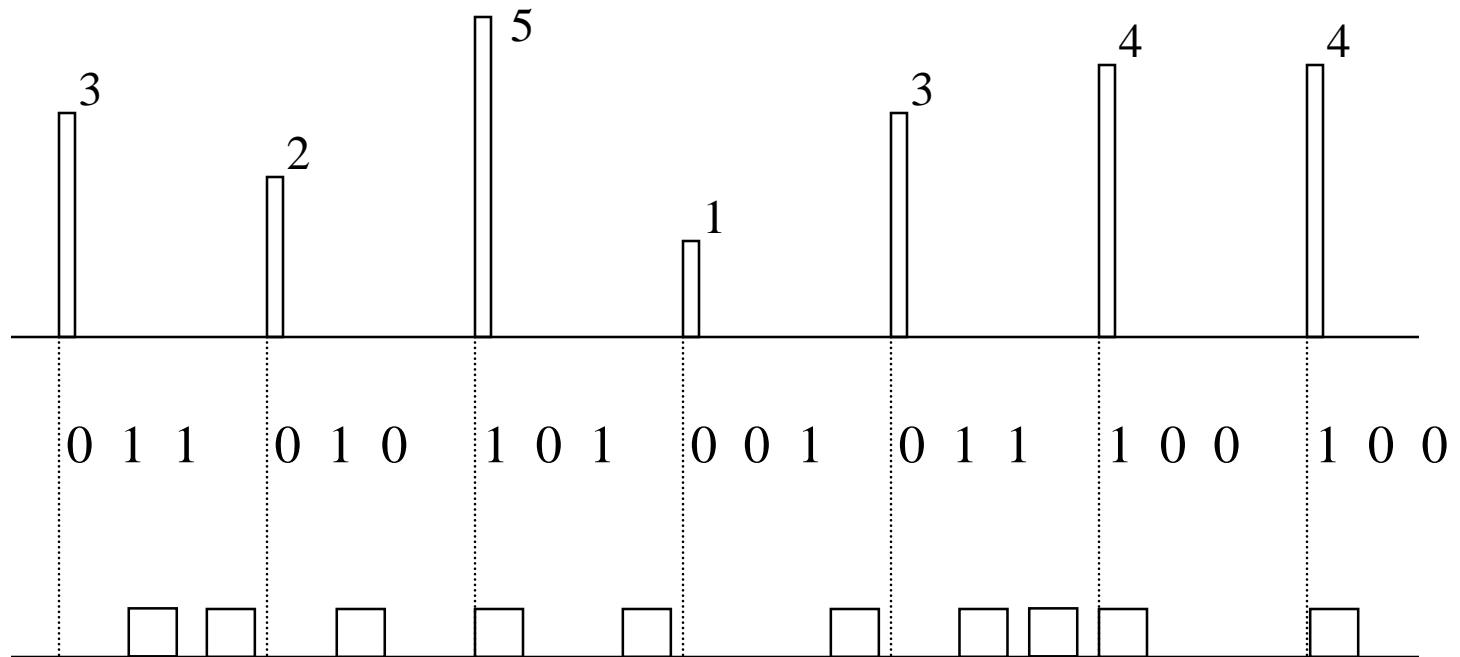
Conversión Analógico-Digital (CAD)

- ▶ Consta de dos etapas
 - ▶ Se muestrea la señal al doble del ancho de banda de la misma obteniendo un tren de **pulsos de amplitud variable (PAM)**



CAD

- ▶ Se cuantifican las muestras aproximándolas mediante un **número entero de n bits**
- ▶ Aparece el error de cuantificación



Canal PCM (Pulse Code Modulation)

- ▶ Las señales analógicas son digitalizadas por un dispositivo llamado **CODEC (COder-DECoder)**, produciendo símbolos de 8 bits por muestra (en realidad uno es para señalización).
- ▶ El CODEC toma 8000 muestras por segundo ($125 \mu\text{seg}/\text{muestra}$) debido a que el teorema de Nyquist establece que esto es suficiente para capturar toda la información “relevante” de un canal telefónico de **4 KHz de ancho de banda**
- ▶ Luego, “Ancho de banda del cada canal de voz” = **64 Kbps**.
- ▶ Como consecuencia, virtualmente todos los intervalos de tiempo en el sistema telefónico son múltiplos de $125 \mu\text{seg}$.

Transporte Multi-canal PCM

“Portadora” T1 (1.544 Mbps)

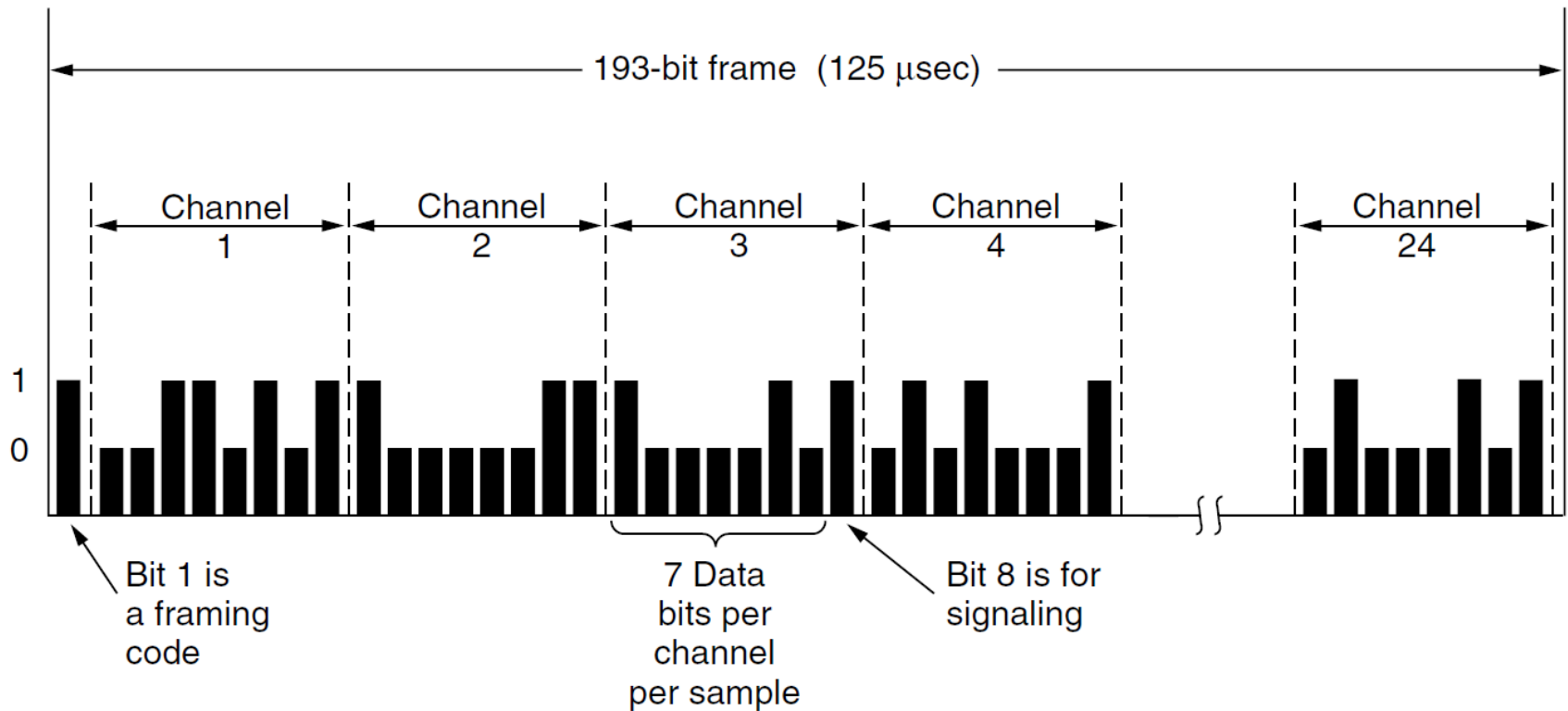


Figure 2-37. The T1 carrier (1.544 Mbps).

Enlaces de Transporte

► TI

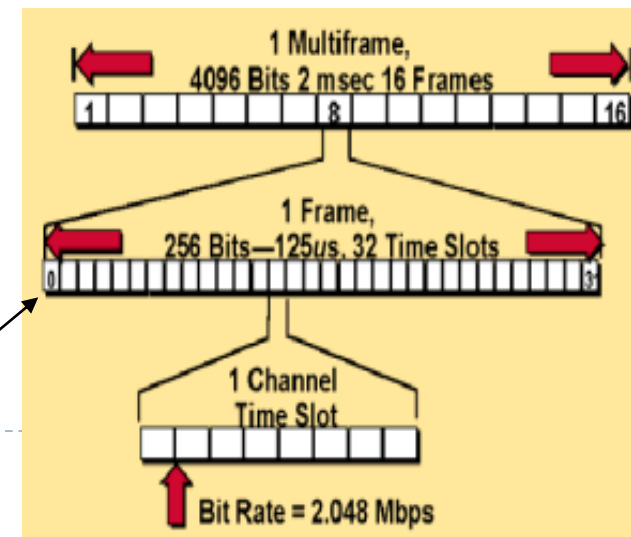
- Utilizado en **Norteamérica y Japón**.
- Consiste en **24 “canales de voz”** multiplexados.
- Un **Frame TI** transporta $24 \times 8 = 192$ bits, más un bit extra para framing, conduciendo a 193 bits cada 125 μ seg.
- $1 / 0.000125 \text{ seg} * 193 \text{ bits} = 1544000 \text{ bps}$

TI=1544 Mbps

► EI

- ITU tiene también una recomendación para un carrier PCM de **32 canales** (256 bits) a 2048 Mbps, llamado EI, usado en **Europa**

EI=2048 Mbps



Modulación

Modems

Recordando los Principios básicos :

▶ Señal analógica vs. señal digital

- ▶ La señal analógica utiliza una magnitud con una variación continua abarcando infinitos niveles posibles.
- ▶ La señal digital emplea un número finito de valores discretos posibles, predefinidos.

▶ Módem vs. Códec

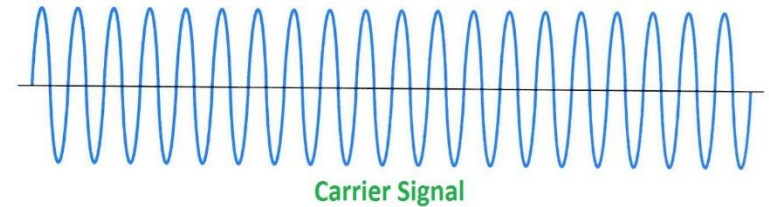
- ▶ **Módem** (**MOD**ulador-**DEM**odulador): convierte (“traduce”) de **digital a analógico** (y viceversa)
- ▶ **Códec** (**CO**dificador-**DEC**odificador): convierte (“traduce”) de **analógico a digital** (y viceversa)
- ▶ No son lo mismo !

Modulación

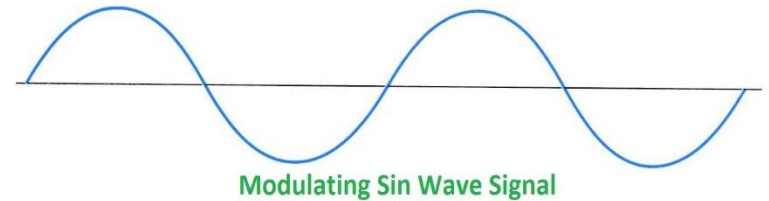
- ▶ Proceso de variación de **cierta característica** de una señal sin mensaje, llamada **portadora**, de acuerdo con una **señal mensaje**, llamada **moduladora**
- ▶ Tipos
 - ▶ Moduladora Analógica/Portadora Analógica
 - ▶ Moduladora Digital/Portadora Analógica
 - ▶ Moduladora Analógica/Portadora Digital
 - ▶ Moduladora Digital/Portadora Digital

M. Analógica/P. Analógica

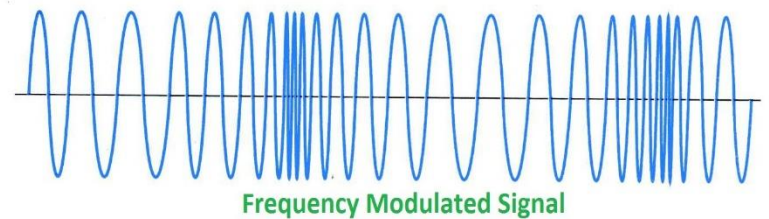
Portadora



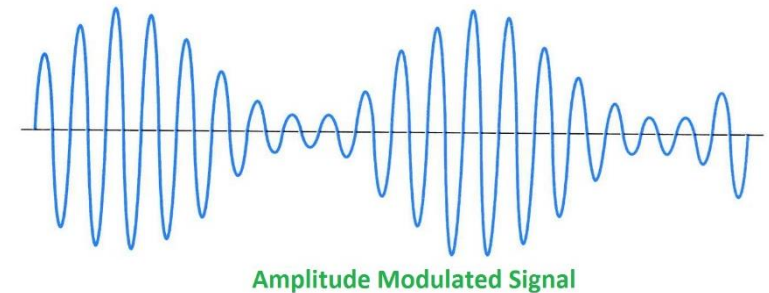
Señal modulante



Onda modulada en **frecuencia**



Onda modulada en **amplitud**



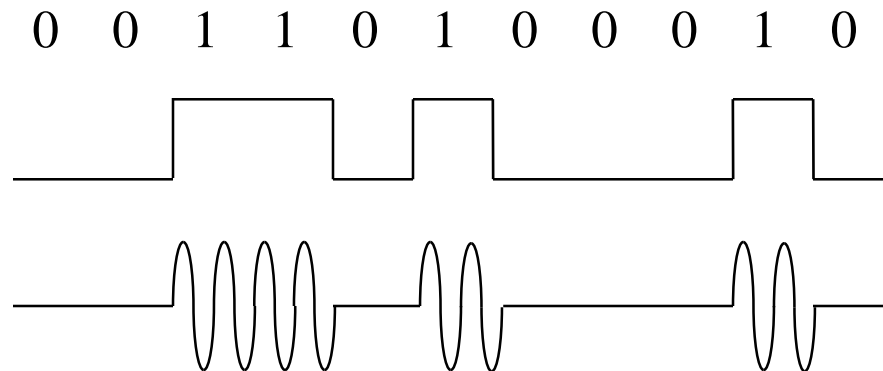
M. Digital/P. Analógica

- ▶ La situación más conocida es la transmisión de datos digitales a través de la red de telefonía
- ▶ Diseñada para transmitir señales analógicas en el rango de frecuencias de la voz (300-3400 Hz)
- ▶ Técnicas
 - ▶ Desplazamiento de Amplitud (ASK)
 - ▶ Desplazamiento de Frecuencia (FSK)
 - ▶ Desplazamiento de Fase (PSK)
 - ▶ Mixtas

M. Digital/P. Analógica

ASK, los valores binarios se representan mediante dos amplitudes diferentes de la portadora

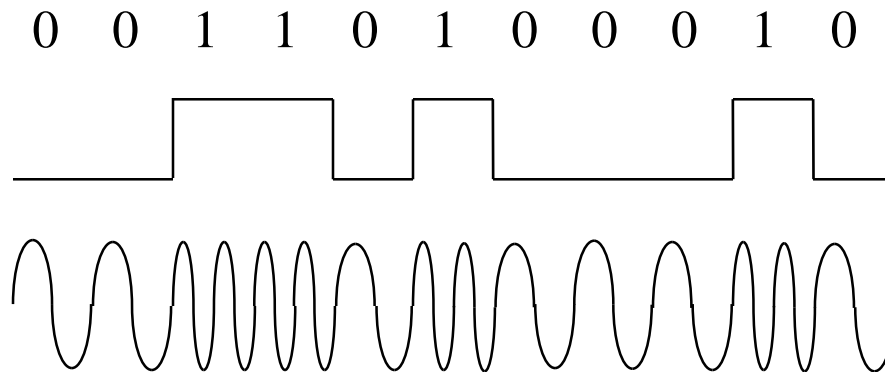
$$S(t) = \begin{cases} A \cdot \cos(2\pi f_c t) \\ 0 \end{cases}$$



M. Digital/P. Analógica

FSK, los valores binarios se representan mediante dos frecuencias diferentes de la portadora

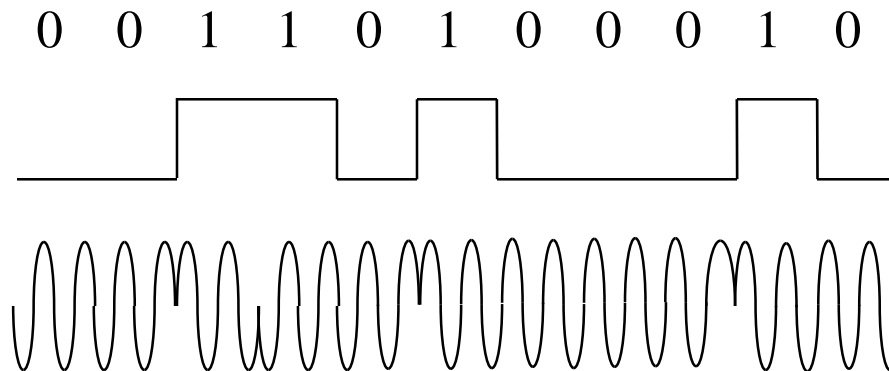
$$S(t) = \begin{cases} A.\cos(2\pi f_1 t) \\ A.\cos(2\pi f_2 t) \end{cases}$$



M. Digital/P. Analógica

PSK, los valores binarios se representan mediante dos fases diferentes de la portadora

$$S(t) = \begin{cases} A.\cos(2\pi f_c t + \pi) \\ A.\cos(2\pi f_c t + 0) \end{cases}$$



Velocidad de Modulación

- ▶ La **Velocidad de Modulación** se define como el número de cambios de señal por unidad de tiempo, y se expresa en **baudios (símbolos/segundo)**
- ▶ La **Velocidad de Transmisión** equivale a la velocidad de modulación multiplicado por el **número de bits representados por cada símbolo**, expresada en **bits/segundo**:

$$V_t = V_m \cdot N$$

M. Digital/P. Analógica (cont.)

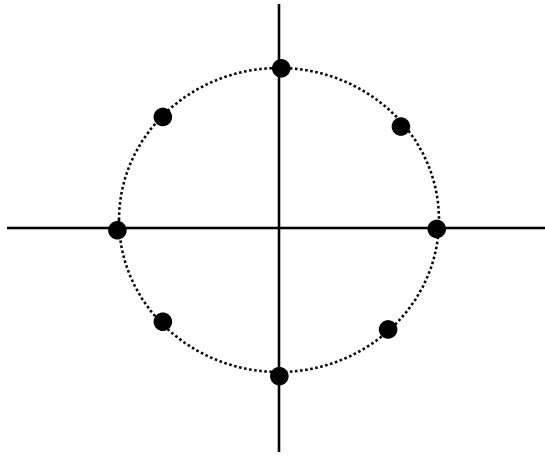
- ▶ Modulación **Multinivel**
- ▶ Se consigue una **utilización más eficaz del ancho de banda** si cada elemento de la señal transmitida representa **más de un bit**.

$$S(t) = \begin{cases} A.\cos(2\pi f_c t + 1/4 \pi) & 11 \\ A.\cos(2\pi f_c t + 3/4 \pi) & 10 \\ A.\cos(2\pi f_c t + 5/4 \pi) & 00 \\ A.\cos(2\pi f_c t + 7/4 \pi) & 01 \end{cases}$$

- ▶ Este esquema se puede ampliar, ya que se pueden transmitir 2, 3, 4, etc. bits por señal transmitida
 - ▶ Aumentando:
 - ▶ el número de fases distintas (PSK)
 - ▶ el número de amplitudes para cada fase (ASK-PSK)

M. Digital/P. Analógica

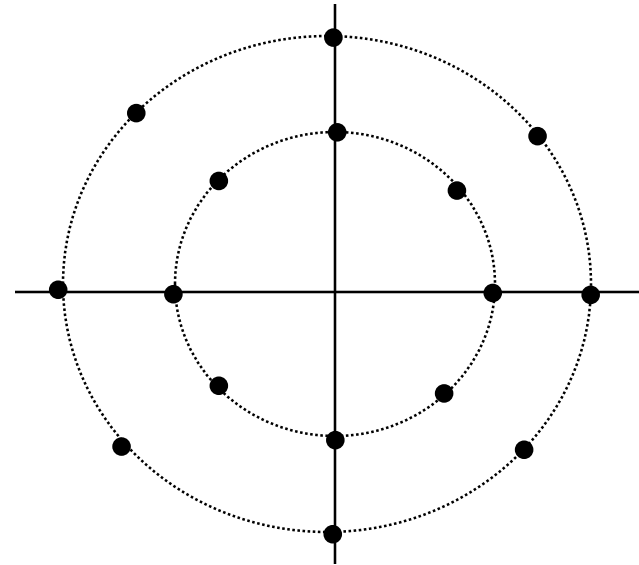
PSK



$N = 3$

ASK-PSK

$N = 4$



M. Analógica/P. Digital

- ▶ Vimos que el proceso de conversión de señales analógicas en digitales se denomina **digitalización**.
 - ▶ Los dispositivos que lo llevan a cabo se llaman CODECS
- ▶ Métodos
 - ▶ Modulación por Impulsos Codificados (MIC, o PCM)
 - ▶ Modulación Delta (DM)
 - ▶ Codifica sólo las diferencias. Para ciertas señales es más eficiente que PCM.

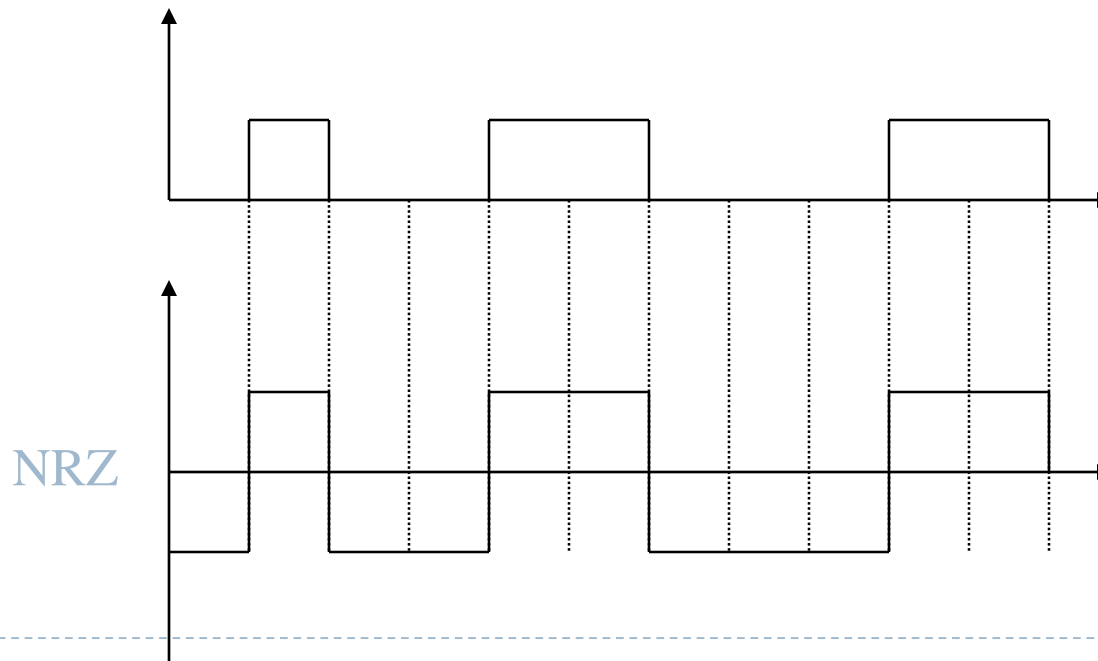
M. Digital/P. Digital

- ▶ Los datos binarios se transmiten codificando cada bit de datos en cada elemento de señal

NRZ

No retorno a cero (NRZ) Consiste en utilizar una tensión negativa para representar un 0 y una positiva para representar un 1

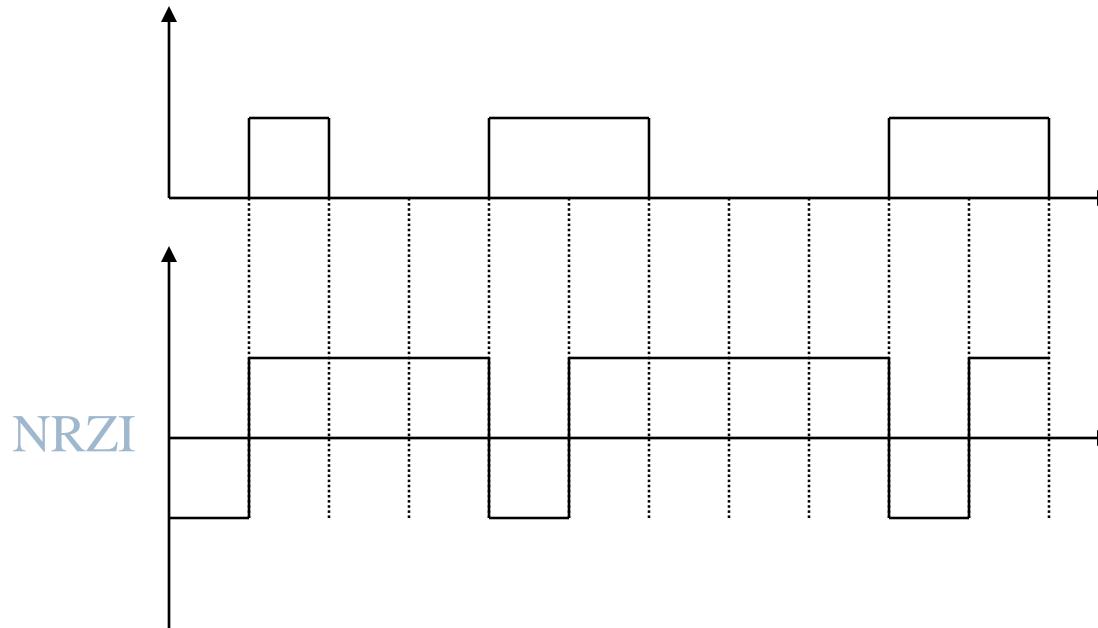
- Inconvenientes: para secuencias largas sin cambios se pierde el sincronismo (problemas de “clock recovery”)



NRZI

No retorno a cero con inversión de unos (NRZI) Los datos se codifican mediante la **presencia o ausencia de una transición** al principio del intervalo de un 1

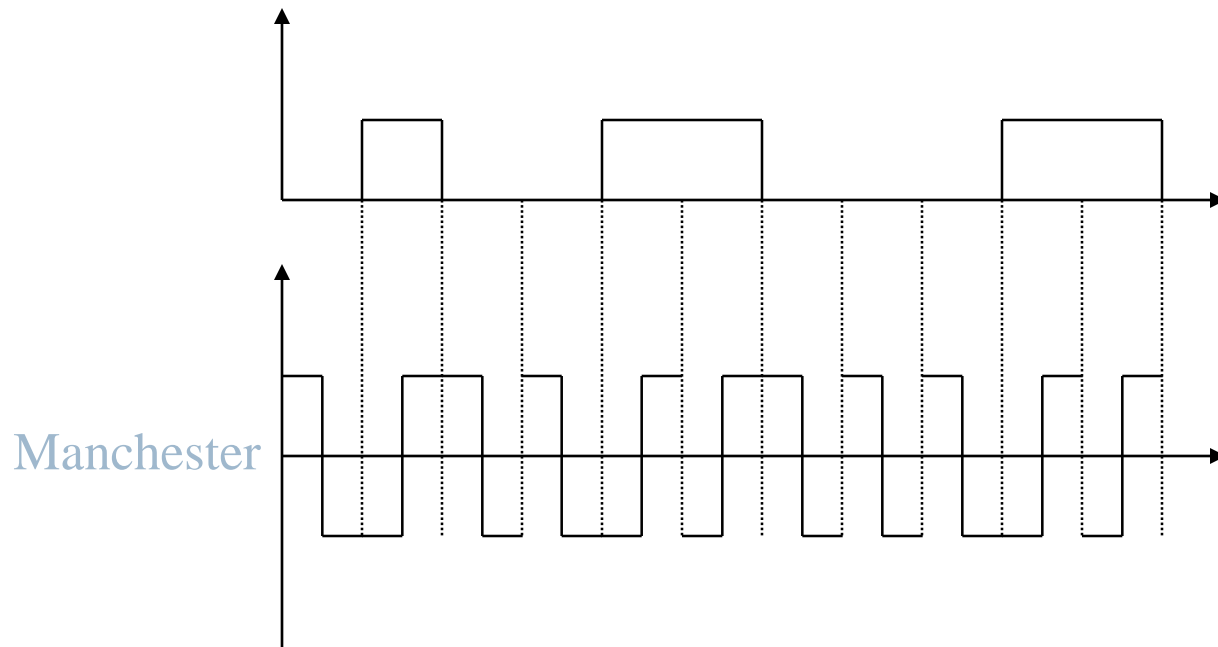
Soluciona el problema de muchos 1 consecutivos, pero no el de muchos 0 consecutivos.



Manchester (Bifase)

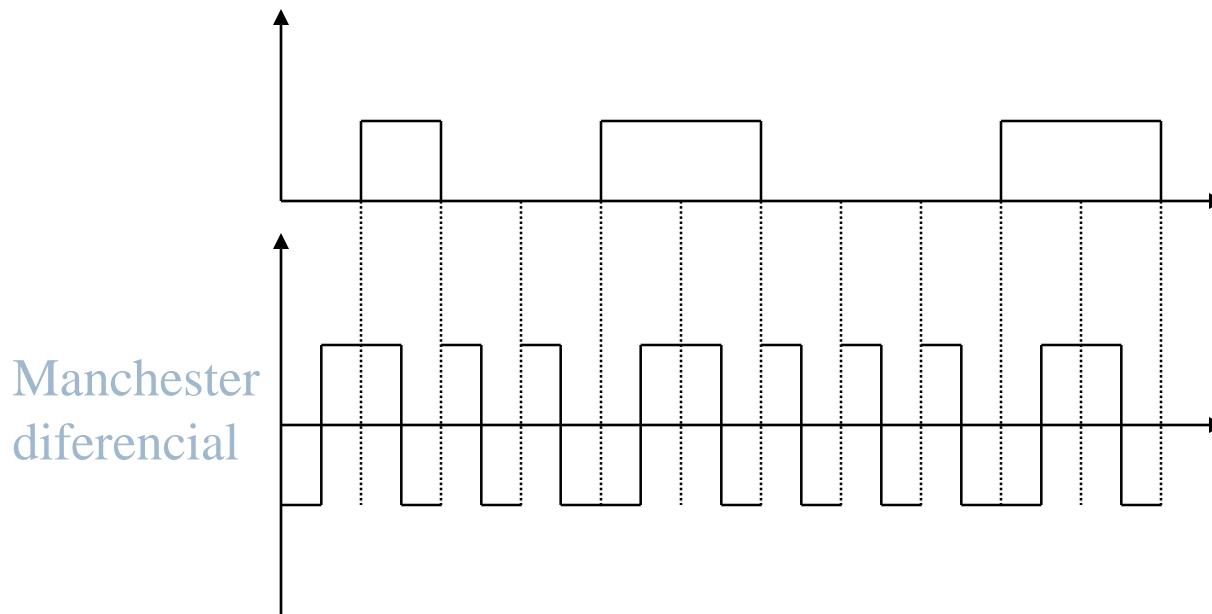
Manchester: Se codifica mediante una **transición en la mitad del intervalo** de duración del bit: **de bajo a alto** representa un 1 y **de alto a bajo** un 0

Baud Rate = 2 * Bit Rate

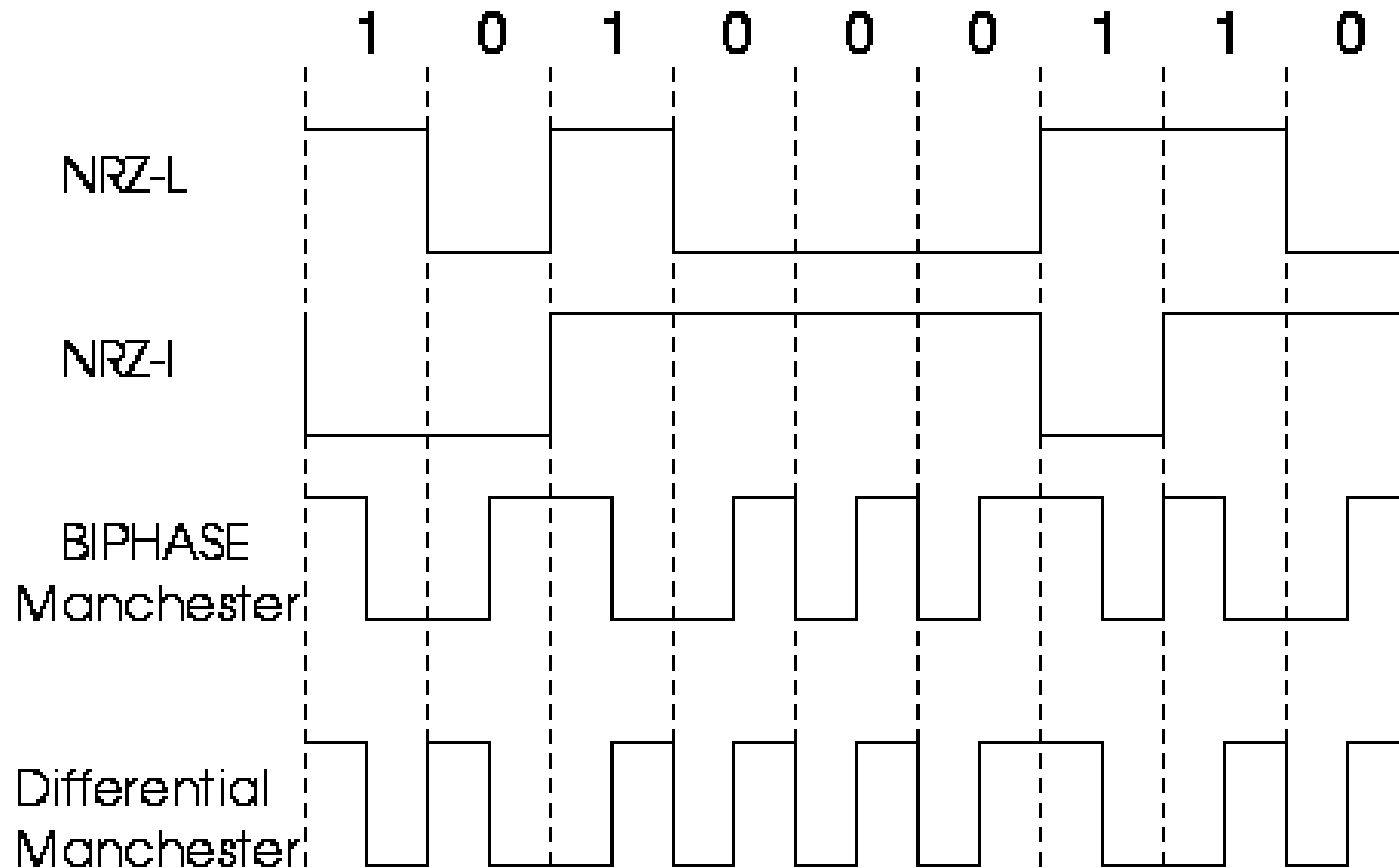


Manchester Diferencial

Bifase Diferencial (Manchester Diferencial) La codificación de un 0 se representa por la presencia de una transición al principio del intervalo del bit y un 1 mediante la ausencia de transición.



Manchester Diferencial

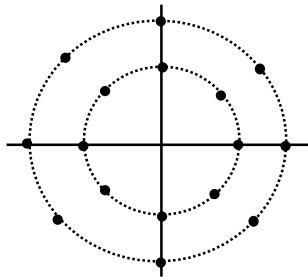


Códigos de alta densidad

- ▶ Los códigos Manchester tienen una eficiencia del 50%
- ▶ Alternativa:
 - ▶ Reemplazar secuencias de **varios bits iguales** (que dan lugar a niveles de tensión constante) por otra que proporcione transiciones para que emisor y receptor estén fielmente sincronizados (“preservar el clock”)
 - ▶ El receptor debe identificar la secuencia reemplazada y sustituirla por la original.
 - ▶ Ejemplo: 4B/5B (usado en Fast Ethernet 100Base-TX)

Velocidad de Modulación

- ▶ $V_t = V_m \cdot \log_2 S$ S : Símbolos posibles 2, 4, 16, 64, etc.
- ▶ $S = 2^N$ N : Bits por símbolo
- ▶ $V_t = V_m \cdot N$

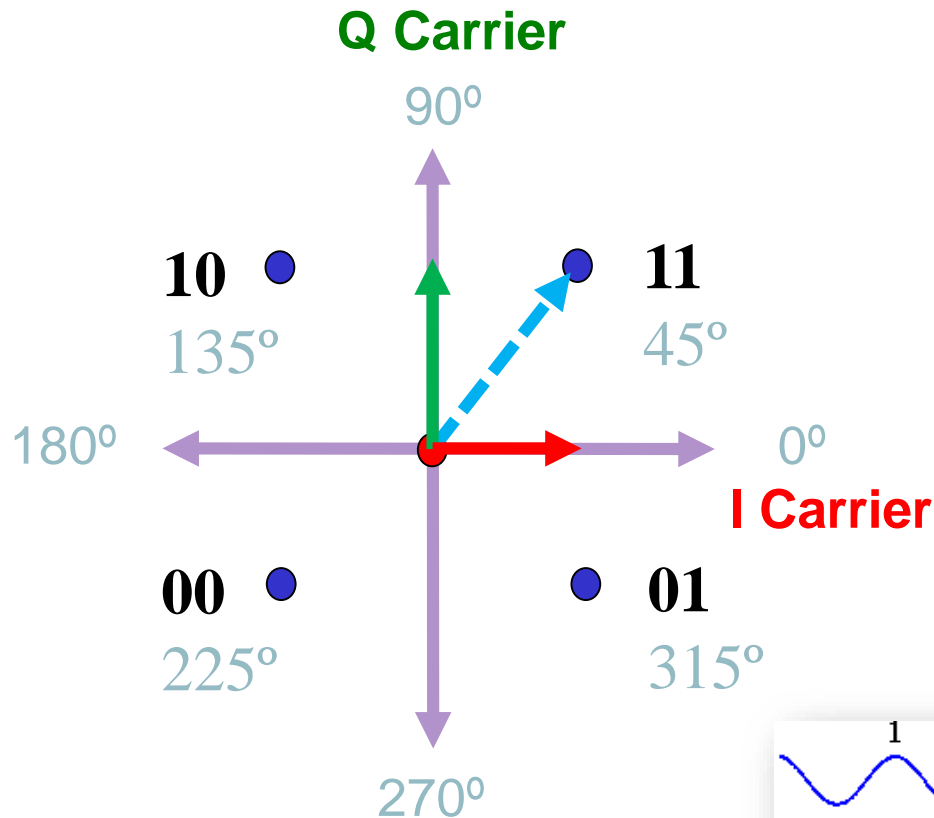


constellation \in {

<i>BPSK</i>	<i>1bit / symbol</i>
<i>QPSK</i>	<i>2bits / symbol</i>
<i>16 – QAM</i>	<i>4bits / symbol</i>
<i>64 – QAM</i>	<i>6bits / symbol</i>
<i>256 – QAM</i>	<i>8bits / symbol</i>
<i>1024 – QAM</i>	<i>10bits / symbol</i>
<i>...</i>	<i>...</i>

QAM
Quadrature
Amplitude
Modulation

Vectores y Modulación: QAM

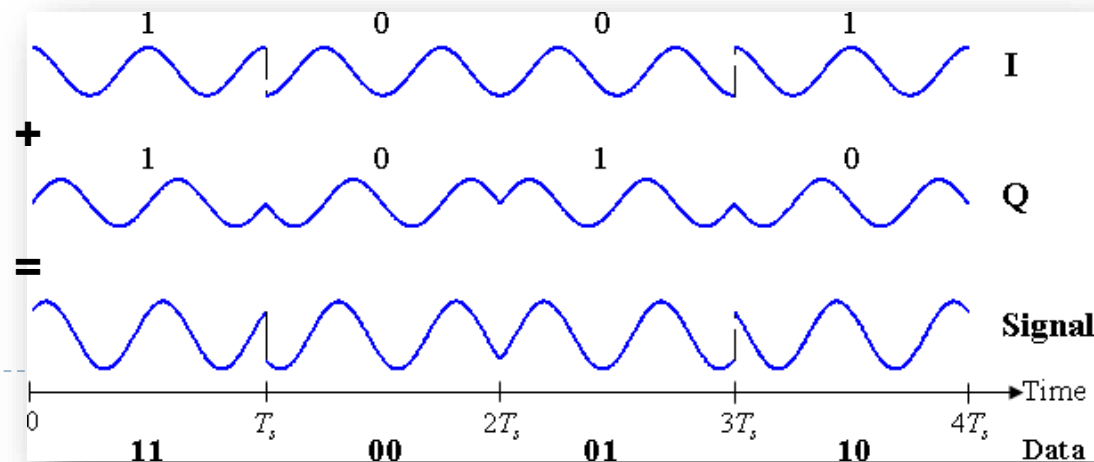


Una **portadora I** a 0°
Una **portadora Q** a 90°
El **vector resultante** tiene 45° y representa el símbolo **11**.

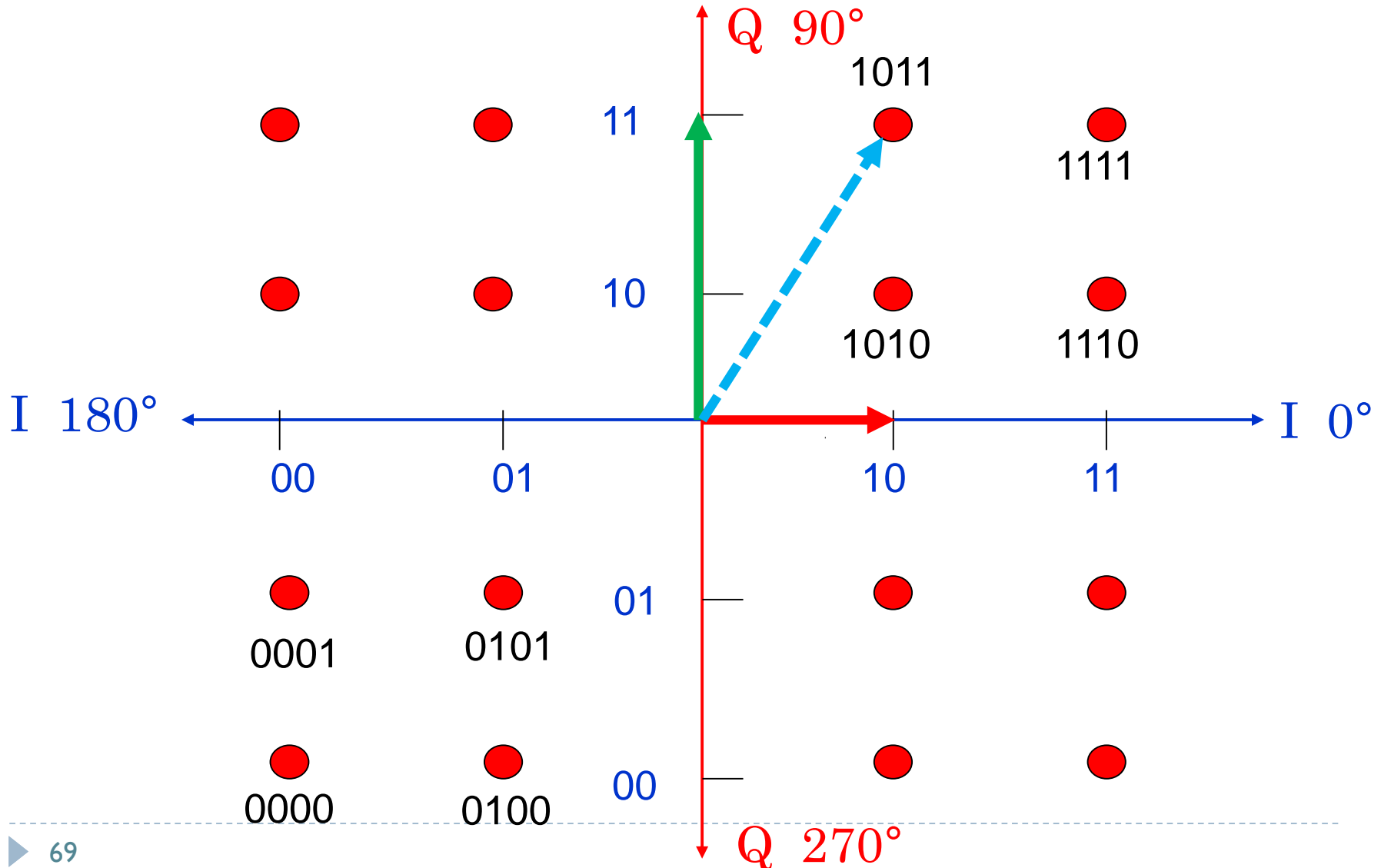
Si necesito modular **01** =>
portadora I a 0°
portadora Q a 270°

4 QAM

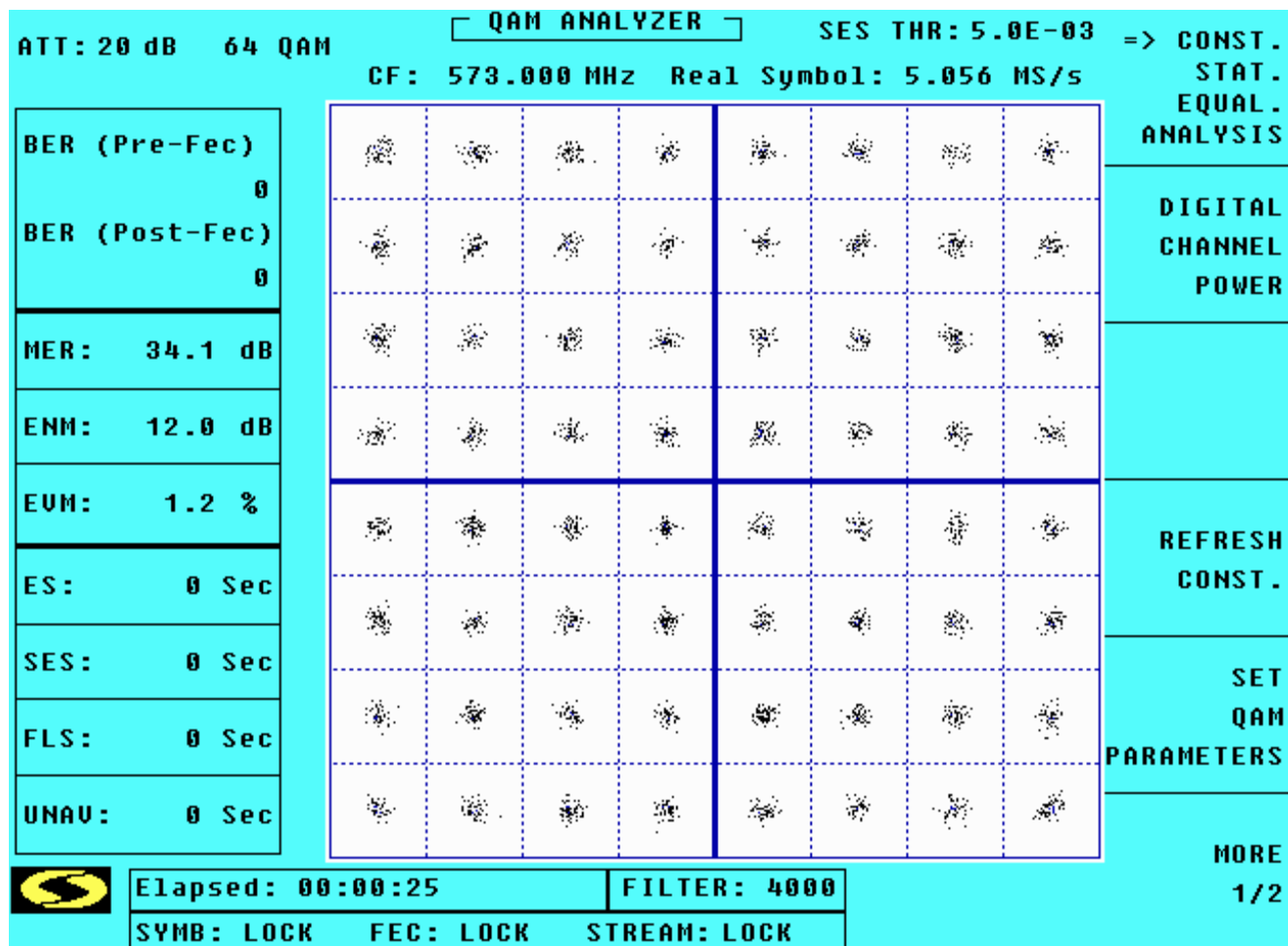
(equivale a QPSK: 2 bits/símbolo)



Vectores y Modulación: 16 QAM

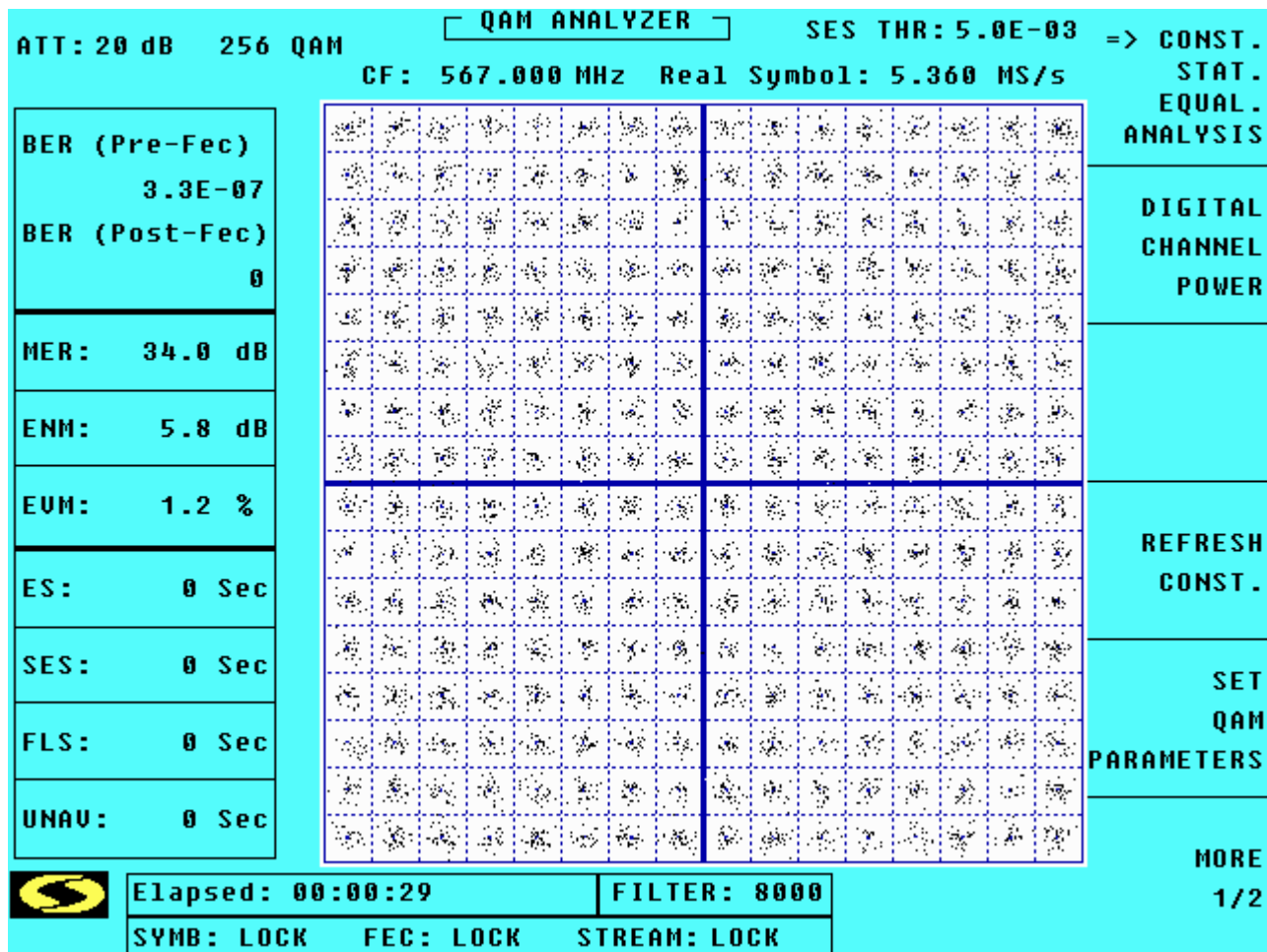


“Constelación” de modulación 64 QAM



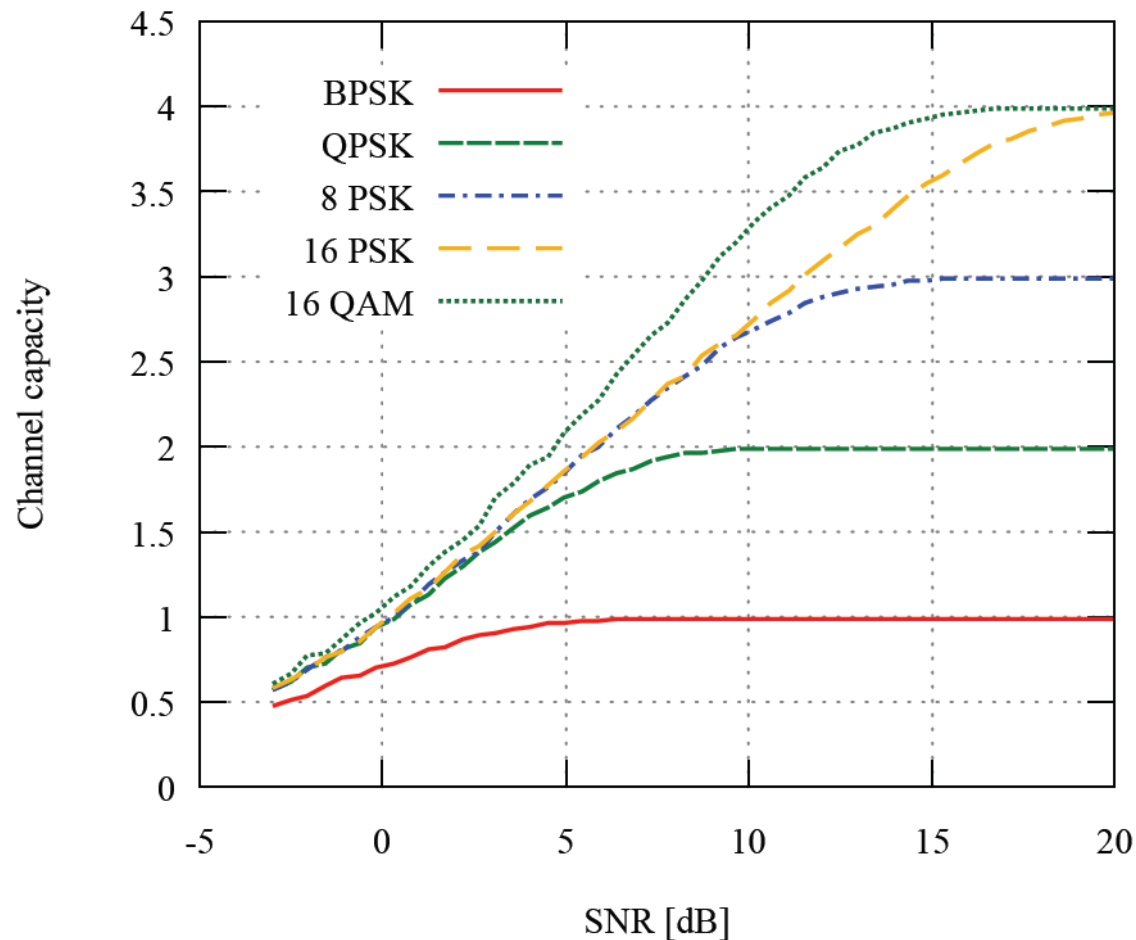
6 Bits por símbolo

Modulación 256 QAM

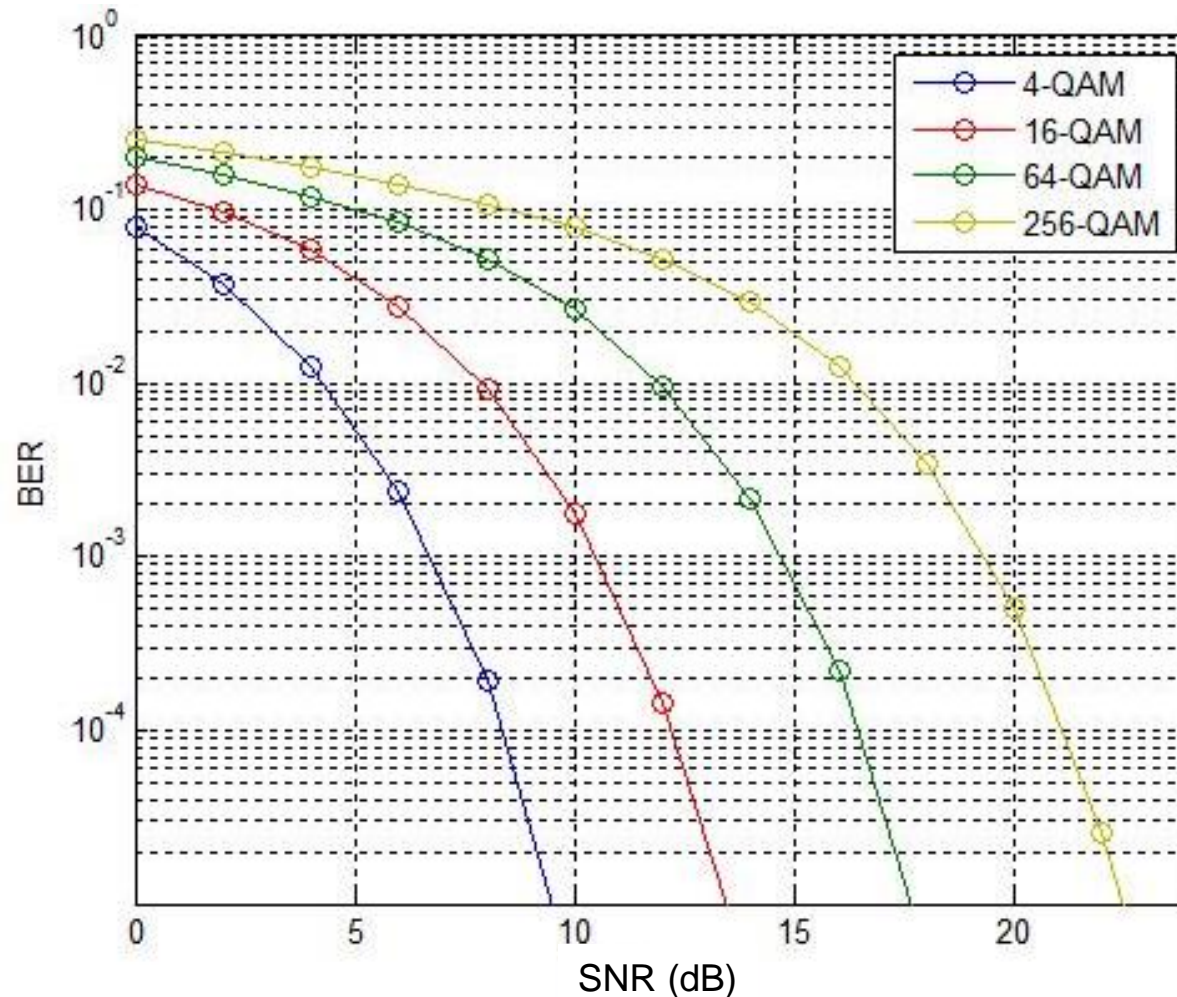


8 Bits por símbolo

Capacidad de Canal y Modulación



Bit Error Rate (BER) y Modulación



El precio a pagar en las modulaciones de orden superior por la mejora en la Velocidad de Transmisión es una mayor Tasa de Errores.

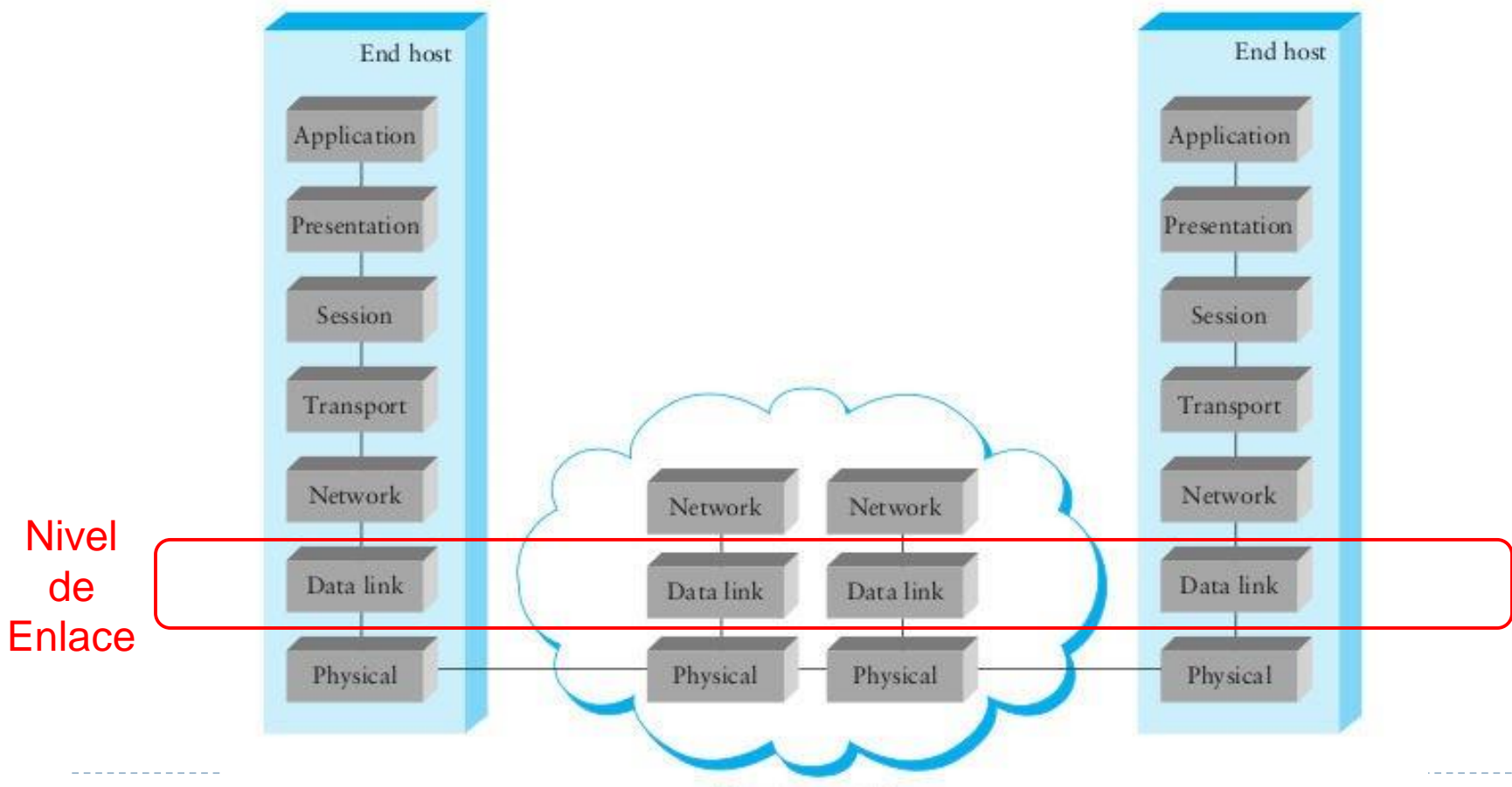


Enlaces punto a punto

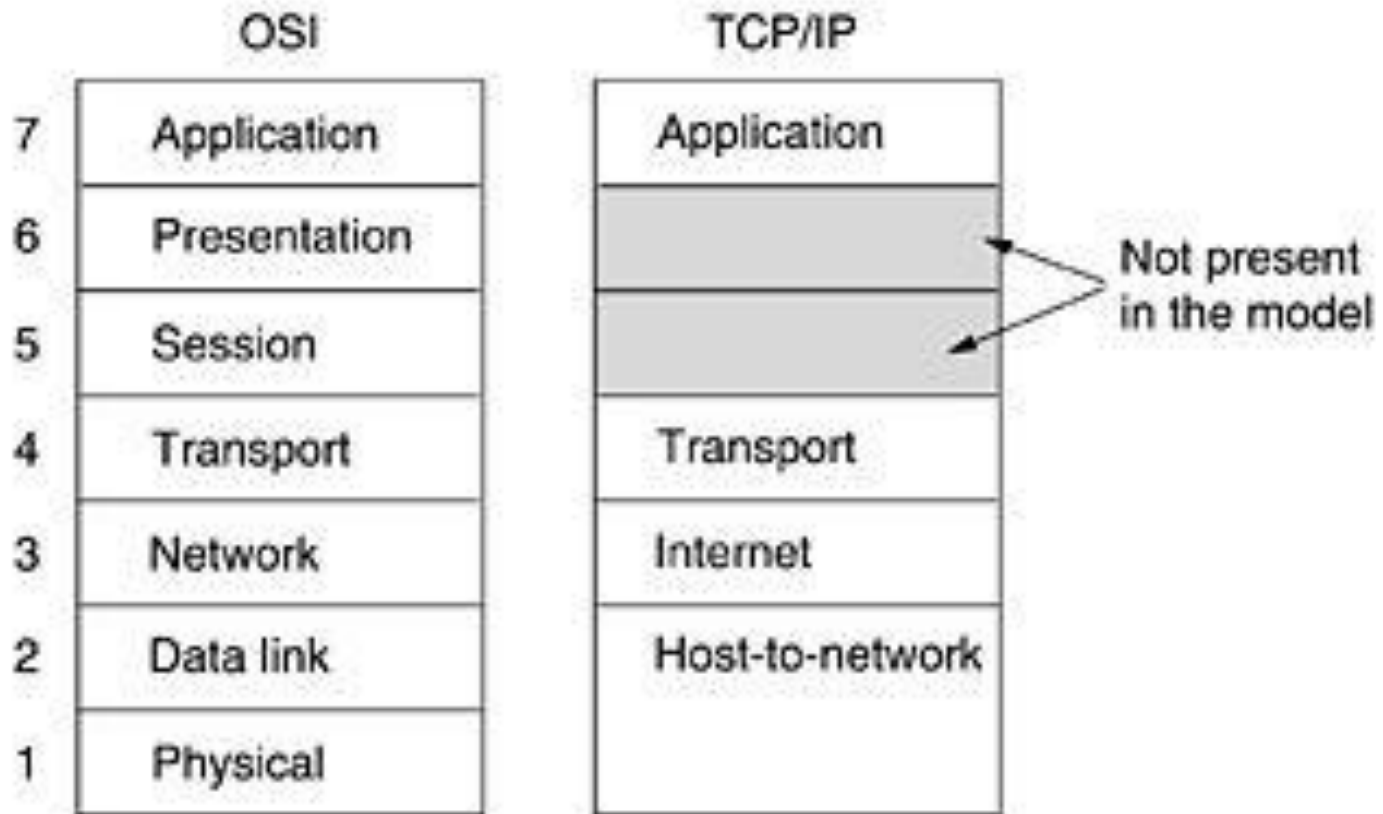


Paradigma de capas

- Las comunicaciones se dan en capas que se brindan servicios entre sí

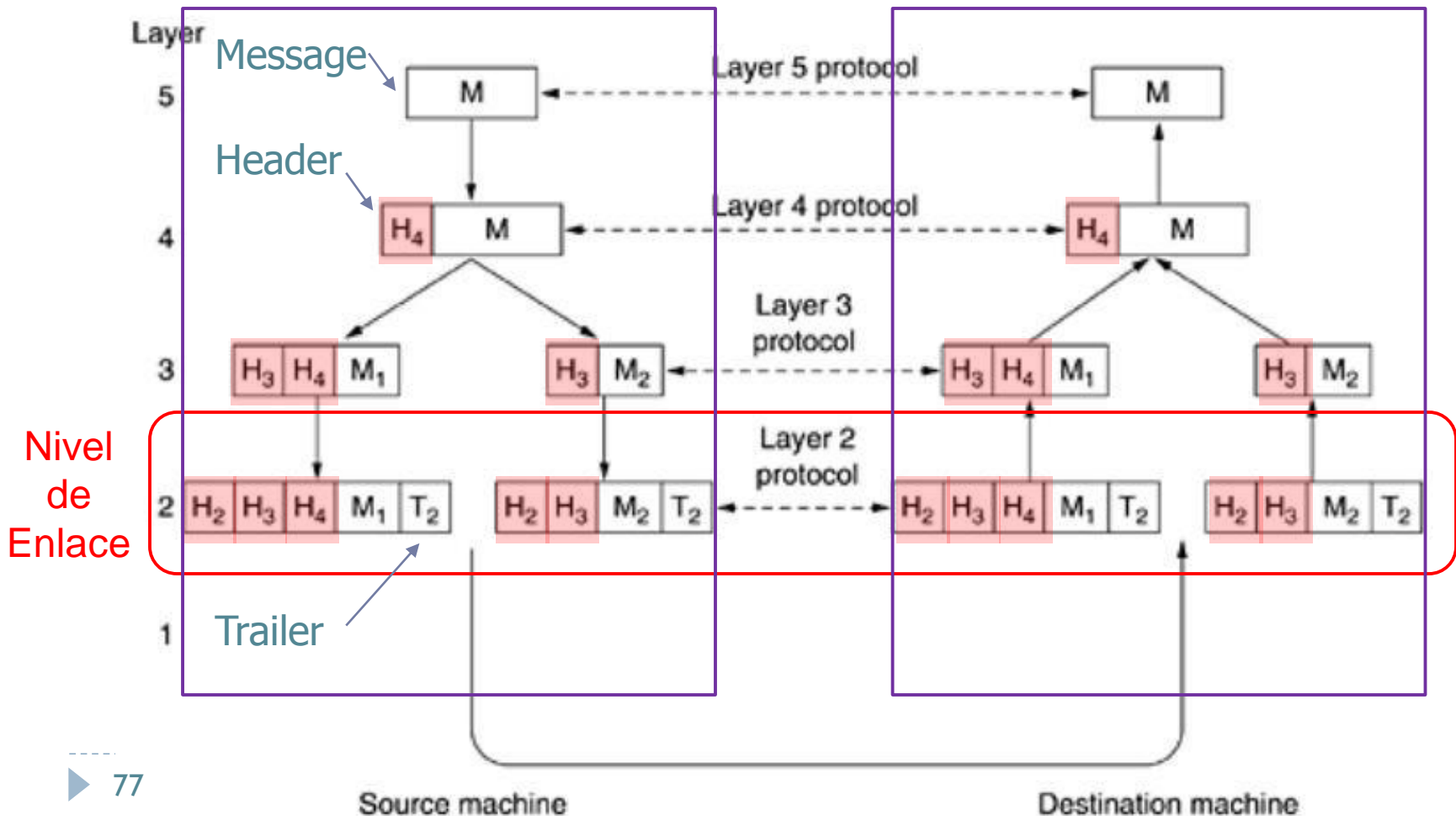


OSI-ISO vs Internet (TCP-IP)



Paradigma de capas

- Cada nueva capa implica el **agregado de información de control** en forma de **encabezados (Headers)**

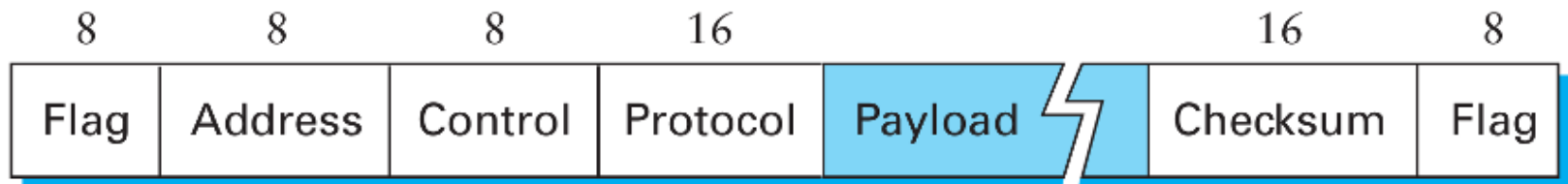


Conceptos de Nivel de Enlace

- ▶ Tenemos un “caño” serial (no hay desordenamiento)
- ▶ Pero: sujeto a **ruido y fallas**
 - ▶ Lo que se recibe puede no ser lo que se envió: “error de transmisión”
- ▶ Objetivos
 - ▶ Proveer servicio a la capa superior
 - ▶ **Confiabilidad.** ¿Confiable o no confiable?
 - ▶ **Control de Errores.** ¿Se produjo algún error? ¿Qué hacemos con los errores?
 - ▶ **Control de Flujo.** Más adelante: en Nivel de Transporte.
- ▶ Estrategia
 - ▶ Encapsulamiento o “Framing”
 - ▶ Encapsular los bits de Mensaje en Frames
 - ▶ agregando **información de control**

Encapsulamiento (Framing)

- ▶ ¿Cómo se separan los frames en un tren de bits?
 - ▶ Largo fijo
 - ▶ Largo especificado en el encabezado
 - ▶ Delimitadores de frame (con bit-stuffing)
- ▶ Ejemplo PPP:



Tipo de Servicio

- ▶ Sin conexión y sin reconocimiento
 - ▶ Los datos se envían sin necesidad de saber si llegan con errors o no.
- ▶ Sin conexión y con reconocimiento
 - ▶ Los datos se envían y se asegura la correcta recepción sin errores mediante el **aviso explícito** (ACKs).
- ▶ Orientado a conexión
 - ▶ Además de asegurar la ausencia de errores en la recepción de los datos, se mantiene un **estado de conexión** (una **sesión**).

Detección y Corrección de errores

- ▶ Redundancia:

- ▶ m bits (**datos**) + r bits (**redundancia**) = n bits (**codeword**)

- ▶ Definiendo:

- ▶ d la mínima Distancia de Hamming entre todas las **codewords** de un código.
 - ▶ e la cantidad de bits erróneos en una transmisión dada

- ▶ Necesitamos:

- ▶ $e + 1 \leq d$ para poder **detectar**
 - ▶ $2e + 1 \leq d$ para poder **corregir**

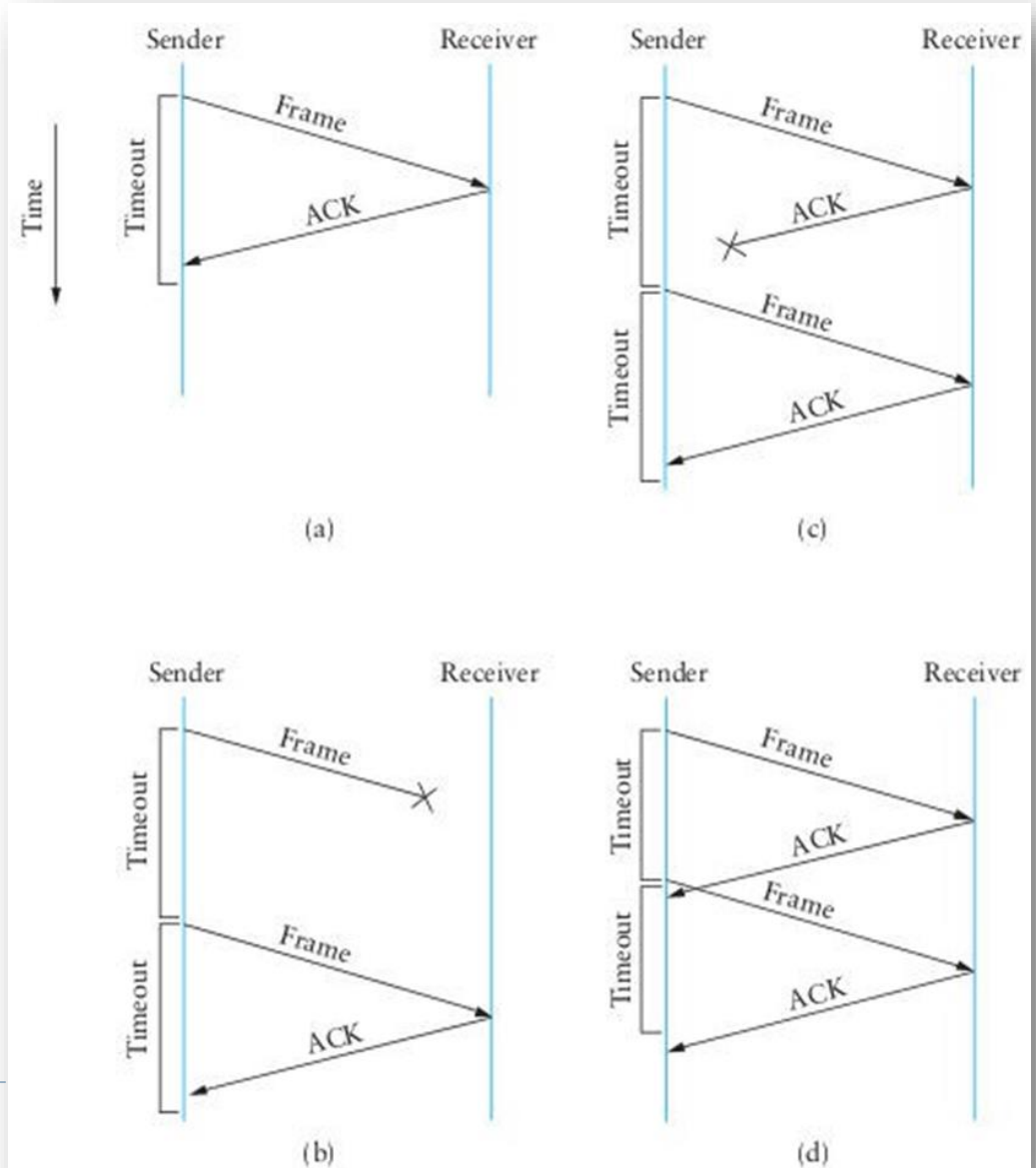
- ▶ Para la **confiabilidad**

- ▶ Surge la necesidad de poder efectuar **retransmisiones**

- ▶ **Implícitas** (cuando ocurre un **time-out** se asume que el dato se perdió)
 - ▶ **Explícitas** (**mensajes de control** específicos para pedir repetición de envío de datos)

Transmisión Confiable: Stop & Wait

- ▶ Cada **Frame** debe ser reconocido por el receptor.
- ▶ Problema de las **reencarnaciones**
 - ▶ Surge la necesidad de **secuenciar** (numerar unívocamente)
 - ▶ En Stop & Wait se necesita **secuenciar al menos 2 frames**.
- ▶ Existe un **tiempo de bloqueo** a la espera de confirmaciones.



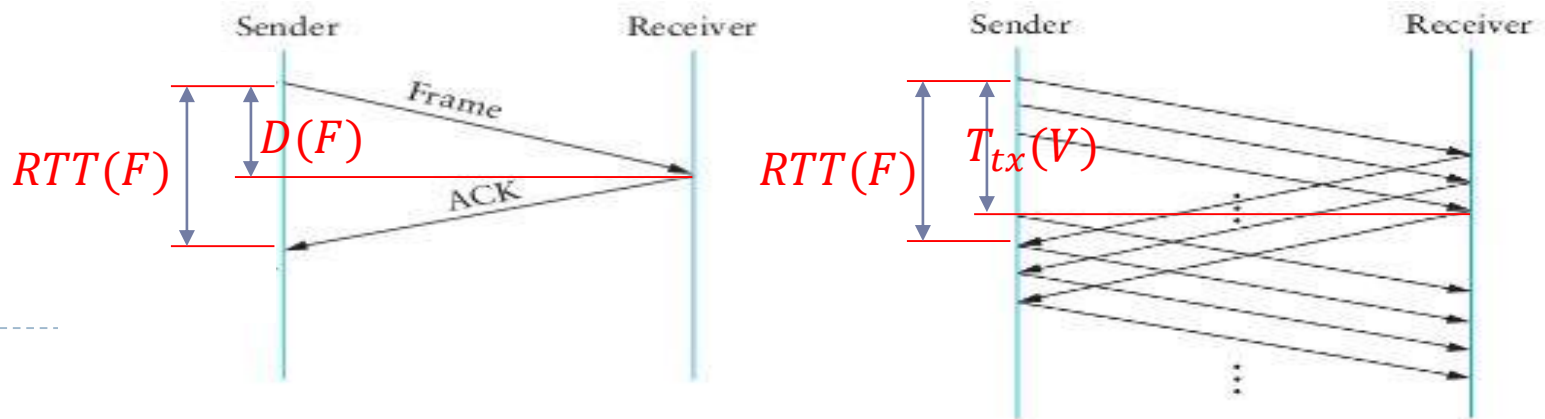
Eficiencia de protocolo

- ▶ ¿Cuánto *tiempo se está transmitiendo* con respecto al *tiempo que se está esperando* por las confirmaciones?

$$\eta_{proto} = \frac{T_{tx}}{RTT(F)}$$

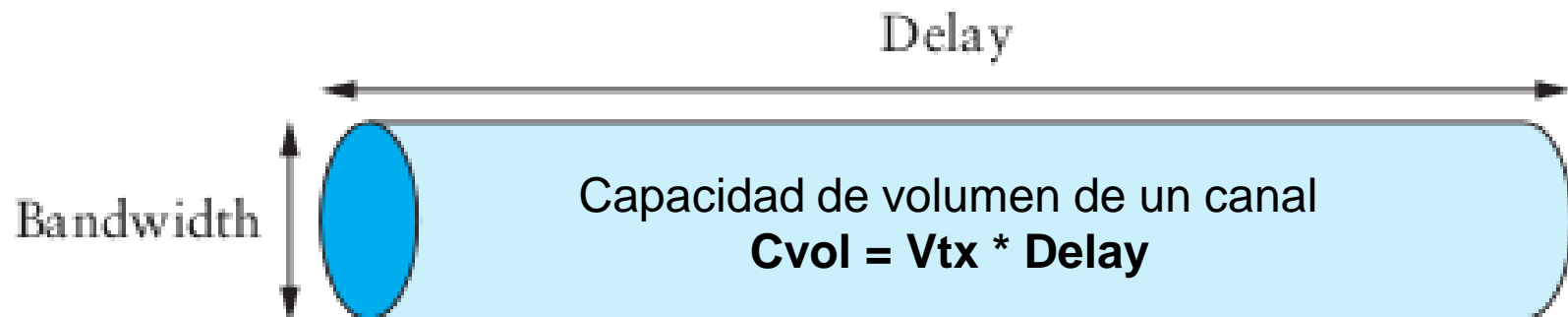
- ▶ Aumentar la eficiencia es estar **bloqueado esperando lo menos posible**
- ▶ Estrategia: Enviar "varios frames seguidos sin recibir ACKs"
 - ▶ Concepto de "Ventana de frames" =>

$$\eta_{proto} = \frac{T_{tx}(V)}{RTT(F)}$$



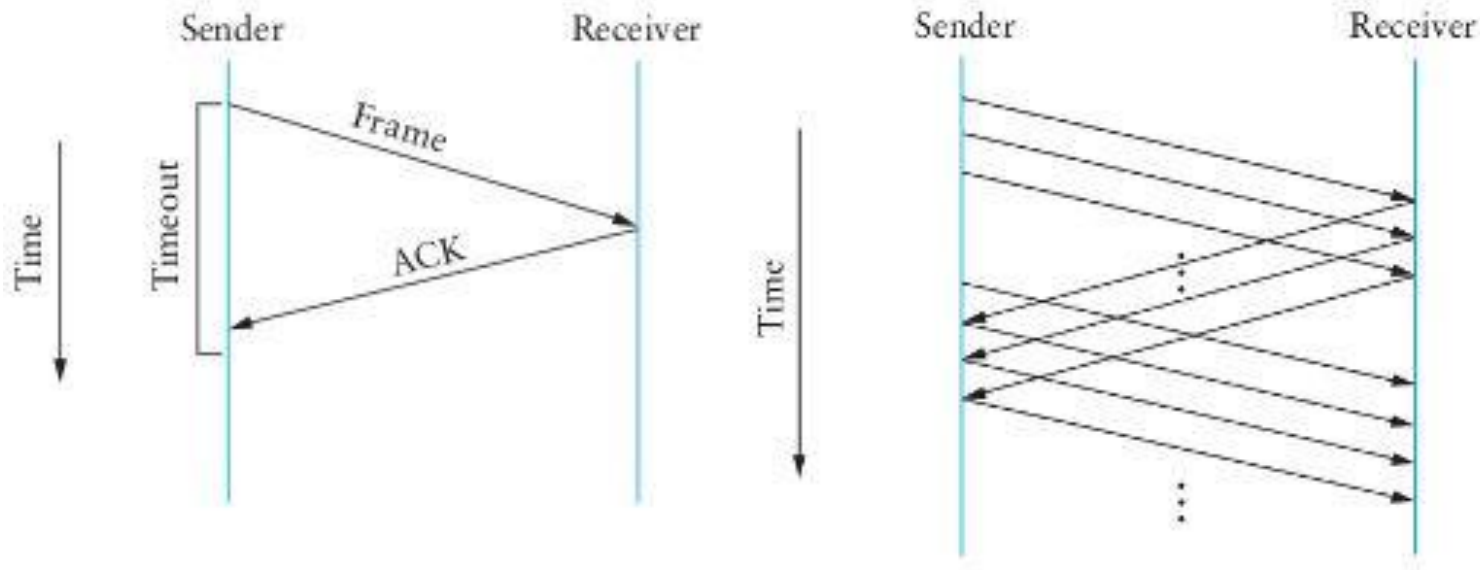
Capacidad de volumen de un canal

- ▶ Multiplicando la **Velocidad de Transmisión V_{tx}** por el **Delay** se obtiene la cantidad de bits que “entran” en un canal.
- ▶ Para aprovecharlo mejor, deberíamos calcular cuantos bits entran en el canal hasta que llega el primer ACK (es decir, usando **$2 * \text{Delay} = \text{RTT}$**)



Transmisión confiable: Sliding Window

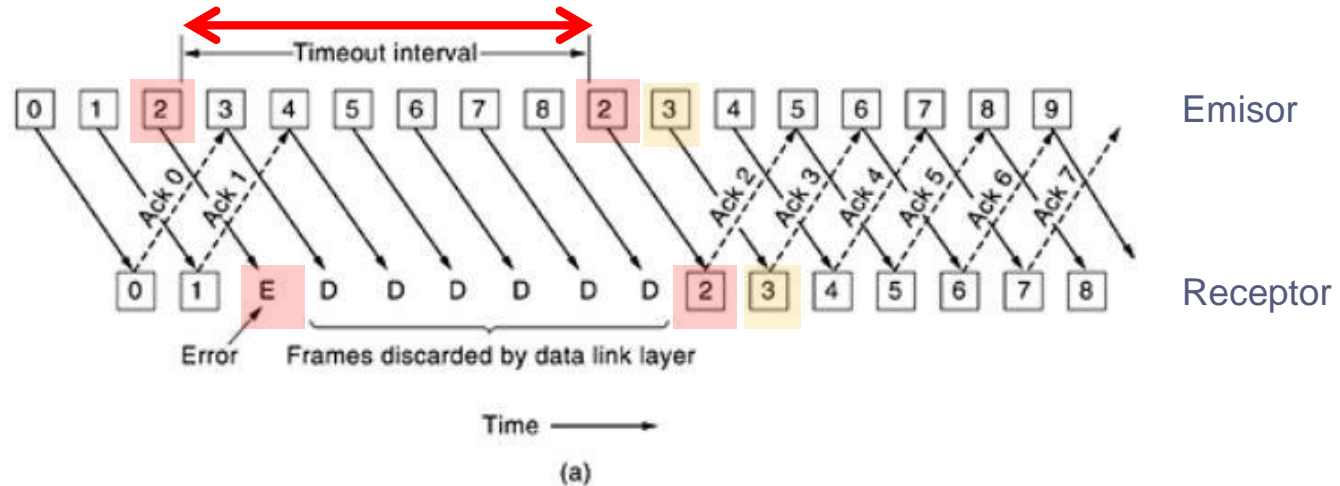
- Motivación: “mantener lleno el canal”



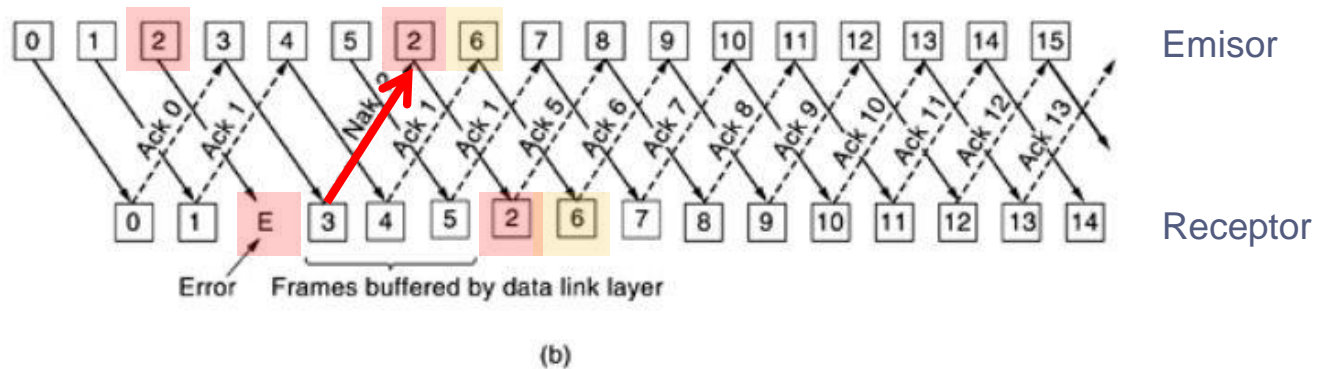
- Ventana de emisión: $SWS = \frac{V_{tx} \cdot RTT}{|Frame|}$
- Enviar según:
 $\text{ÚltimoFrameEnviado} \leq \text{ÚltimoFrameReconocido} + SWS$

Transmisión confiable: ACKs Selectivos

ACKs
acumulativos



ACKs
selectivos
(caso: **Negative ACK**)



$$\text{Ventana de recepción: } RWS = \begin{cases} SWS & \text{si hay Selective ACK} \\ 1 & \text{si no} \end{cases}$$

Transmisión confiable: Sliding Window

► Resumiendo:

- Debemos aumentar la ventana de emisión para aprovechar mejor el canal
- Ventana de emisión: $SWS = \frac{V_{tx} \cdot RTT}{|Frame|}$
- El receptor puede bufferear o no, dependiendo del esquema de ACKs

- Ventana de recepción: $RWS = \begin{cases} SWS & \text{si hay Selective ACK} \\ 1 & \text{si no} \end{cases}$

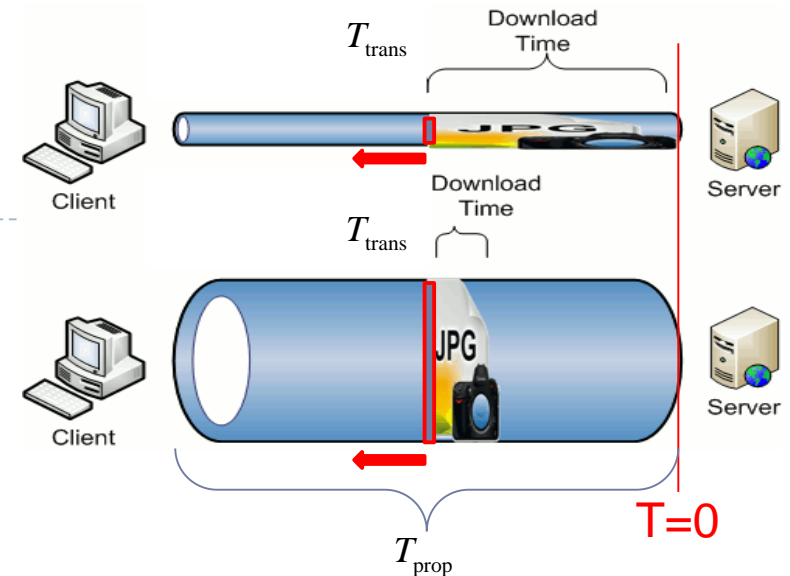
► Y para distinguir reencarnaciones:

#frames unívocamente identificables $\geq SWS + RWS$

Delay (retardo total)

- ▶ T_{prop} = retardo de propagación
 - ▶ Desde unos pocos microsegundos hasta a cientos de milisegundos.
Significativo para enlaces muy distantes.
- ▶ T_{trans} = retardo de transmisión
 - ▶ = **Tamaño Trama** / Velocidad de transmisión
Significativo para enlaces de baja velocidad (o tramas muy grandes)
- ▶ T_{encol} = retardo de encolamiento
 - ▶ Depende de la congestión. Desde nulo hasta gigante.
- ▶ T_{proc} = retardo de proceso
 - ▶ Normalmente unos pocos microsegundos o menos.

$$Delay = T_{\text{total}} = T_{\text{prop}} + T_{\text{trans}} + T_{\text{encol}} + T_{\text{proc}}$$



Extras



Retardo de Procesamiento

- Tiempo requerido en analizar el encabezado y decidir a dónde enviar el paquete (ej. decisión de enrutamiento)
 - En un enrutador, dependerá del número de entradas en la tabla de rutas, la implementación (estructuras de datos), el hardware, etc.
- Puede incluir la verificación de errores

Retardo de Colas

- Tiempo en que el paquete espera en un *búfer* hasta ser transmitido
- El número de paquetes esperando en cola dependerá de la intensidad y la naturaleza del tráfico
- Los algoritmos de colas en los enrutadores intentan adaptar estos retardos a ciertas preferencias, o imponer un uso equitativo

Retardo de Transmisión

- El tiempo requerido para *empujar* todos los bits de un paquete a través del medio de transmisión
- Para R =Tasa de bits, L =Longitud del paquete, d = delay o retardo:

$$d = L/R$$

- Por ejemplo, para transmitir 1024 bits utilizando Fast Ethernet (100 Mbps):

$$d = 1024 / 1 \times 10^8 = 10.24 \text{ micro segundos}$$

Retardo de Propagación

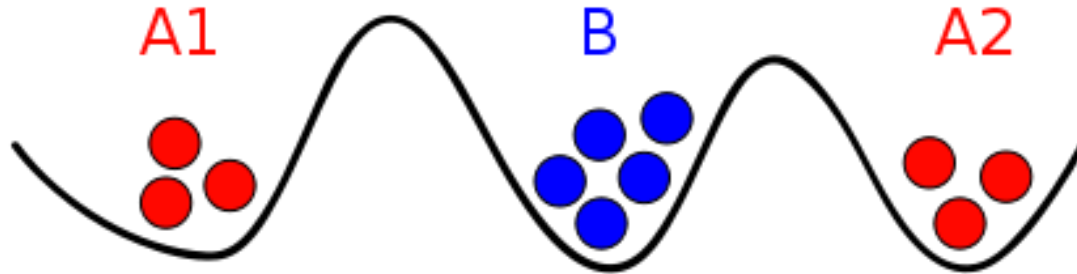
- Una vez que el bit es 'empujado' en el medio, el tiempo transcurrido en su propagación hasta el final del trayecto físico
- La velocidad de propagación del enlace depende más que nada de la distancia medio físico
 - Cercano a la velocidad de la luz en la mayoría de los casos
- Para d = distancia, s = velocidad de propagación
$$D_p = d/s$$

Transmisión vs. Propagación

- Puede ser confuso al principio
- Considerar un ejemplo:
 - Dos enlaces de 100 Mbps.
 - Fibra óptica de 1 Km
 - Via Satélite, con una distancia de 30Km entre base y satélite
 - Para dos paquetes del mismo tamaño, cuál tiene mayor Retardo de Transmisión? Y de Propagación?

Confiabilidad.

El problema de los dos generales (*)



- ▶ A1 a A2: "Atacaremos el 4 de agosto a las 09:00"
- ▶ A2 a A1: "Recibido: Atacaremos 4 de agosto a las 09:00"
- ▶ A1 a A2: "Recibido: Recibido: Atacaremos 4 de agosto a las 09:00"
- ▶ . . .
- ▶ No existe un algoritmo para la confiabilidad
- ▶ **Enviamos un único mensaje de reconocimiento (ACK)**

(*) Video de divulgación sobre este problema planteado desde la óptica de los "algoritmos distribuidos" (por Sebastián Uchitel) <https://vimeo.com/141434827>
