



---

# Bloque V: El nivel de enlace

## Tema 15: Tecnologías de enlace

---

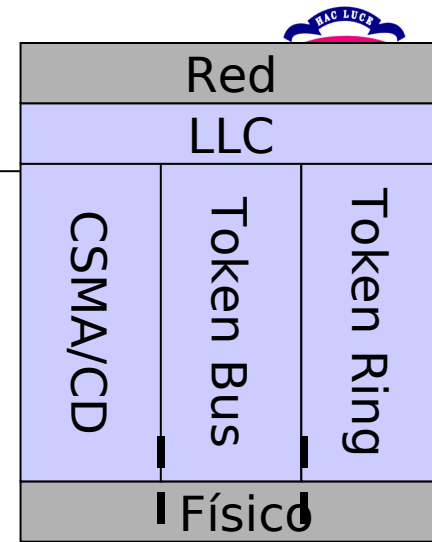


# Índice

---

- Bloque V: El nivel de enlace
  - Tema 15: Tecnologías de enlace
    - Introducción
    - SLIP y PPP
    - Ethernet
      - CSMA/CD
      - IEEE 802.3
      - Ethernet y TCP/IP
    - WiFi
      - Introducción
      - Capa física y MAC
      - Seguridad
- **Referencias**
  - Capítulo 5 de “Redes de Computadores: Un enfoque descendente basado en Internet”. James F. Kurose, Keith W. Ross. Addison Wesley, 2ª edición. 2003.
  - Capítulo 2 de “TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols”, W. Richard Stevens, Addison Wesley, 1994.

# Introducción

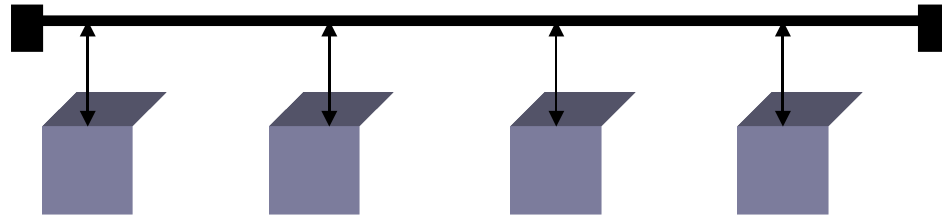


- Funciones principales del nivel de enlace:
  - Control de errores.
  - Sincronización de las tramas de bits
  - Control de flujo
  - Control de acceso a medios compartidos.
- El nivel de enlace estándar se divide en dos subcapas:
  - LLC (Logical Link Control): Ofrece una interfaz uniforme al nivel de red independientemente de que MAC se esté empleando.
  - MAC (Medium Access Control): Estandariza los protocolos típicos empleados en las redes LAN.
- Tecnologías punto a punto: dos máquinas están directamente conectadas mediante un medio físico dedicado en exclusiva para ellas.
- Tecnologías multipunto: múltiples máquinas están conectadas entre sí mediante un medio de transmisión compartido.

# Introducción

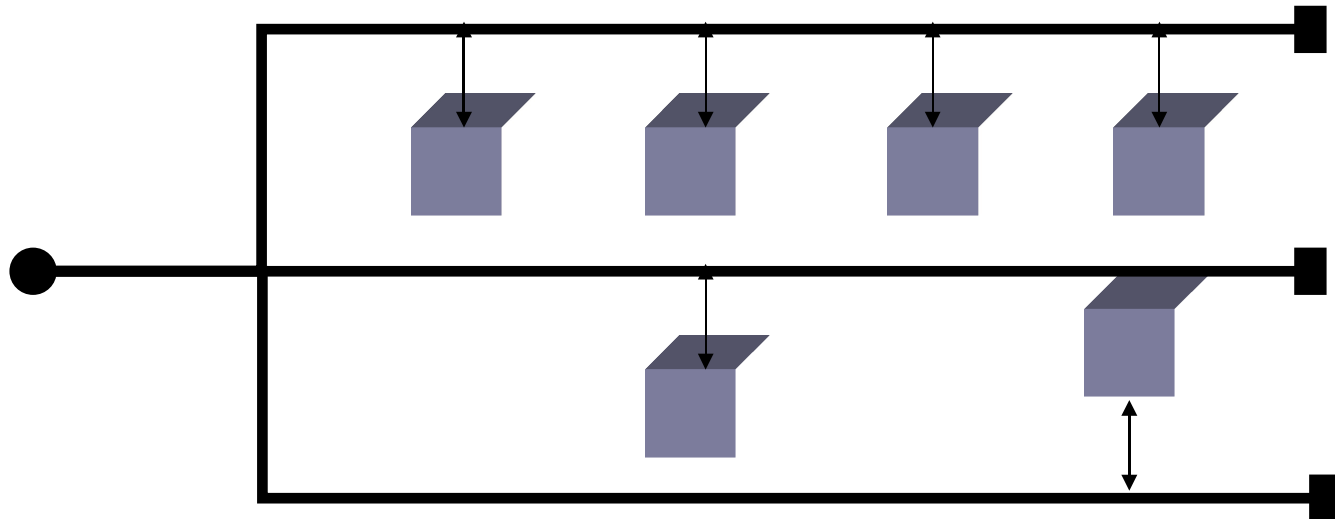
- Topologías multidifusión:

- Bus



- Árbol

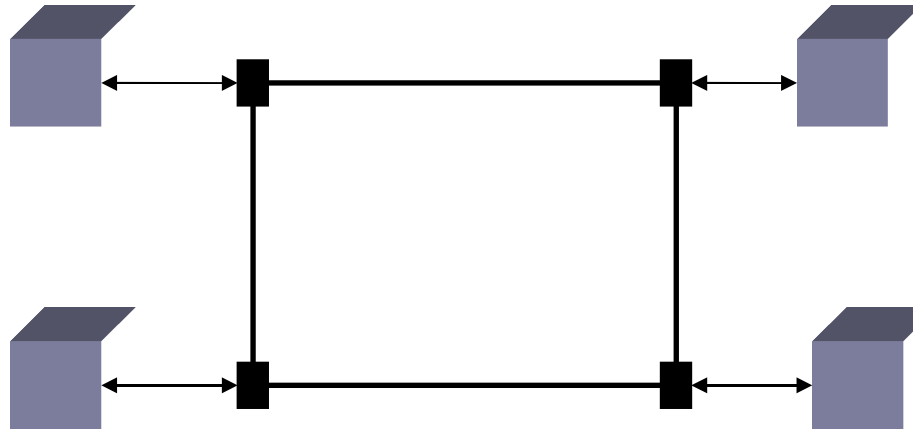
Raíz o  
cabecera  
a



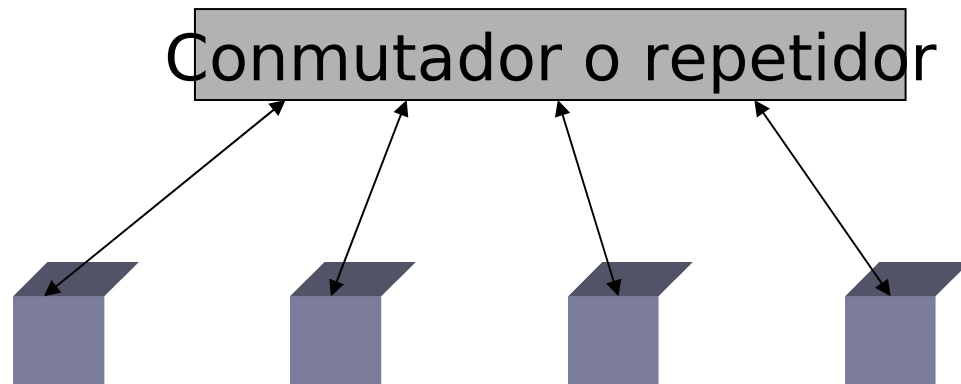
# Introducción

- Topologías multidifusión :

- Anillo



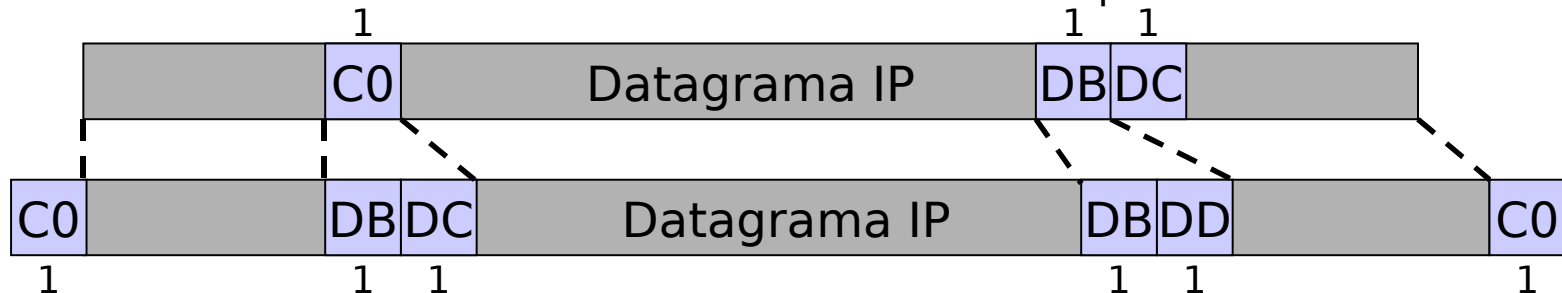
- Estrella





# SLIP

- Serial Line IP – Especificado en RFC 1055.
- Protocolo para conexiones punto a punto, p.e. para interconectar ordenadores personales en dominios particulares a Internet, por medio de módems de alta velocidad y haciendo uso del puerto serie del ordenador (RS-232).
- Reglas:
  - El datagrama IP se termina con un carácter especial llamado END (0xc0). Muchas implementaciones incluyen también un END al principio para evitar que ruido de la línea pueda ser interpretado como parte del datagrama.
    - Si un byte del datagrama IP equivale a un END, se transmite en su lugar la secuencia 0xdb, 0xdc.
    - Si un byte del datagrama IP equivale al SLIP ESC, se transmite en su lugar la secuencia 0xdb,0xdd.
- Inconvenientes de SLIP:
  - Cada extremo debe conocer la dirección IP del otro extremo.
    - No hay campo de tipo. La línea serie sólo se puede utilizar para un determinado protocolo en cada momento.
    - Errores de transmisión deben ser detectados por los niveles más altos.





# CSLIP – Compressed SLIP

---

- SLIP se utiliza en líneas lentas (19,200 bits/segundo) y frecuentemente en tráfico interactivo (telnet y rlogin) → Se generan un gran número de paquetes de pequeño tamaño:
  - 1 byte de datos + 20 bytes de cabecera TCP + 20 bytes de cabecera IP
- Esto introduce una gran sobrecarga (40 bytes) para enviar 1 único byte de datos.
- Para resolver este problema se ha propuesto CSLIP (RFC 1144):
  - Reduce las dos cabeceras de 20 bytes a 3 o 5 bytes → Aumenta el rendimiento (tiempo de respuesta).
  - Mantiene el estado de hasta 16 conexiones en cada extremo.
  - Se basa en que normalmente, algunos campos de las cabeceras no van a variar durante la conexión.
  - Además, la mayoría de los que cambian lo hacen en una reducida cantidad positiva



# PPP

- Point to Point Protocol – Especificado en el RFC 1661
- Tres componentes:
  - Una forma de encapsular datagramas IP en una línea serie. Soporta enlaces asíncronos con 8 bits de datos sin paridad o enlaces síncronos orientados a bit.
  - Un protocolo de control de enlace (LCP) para establecer, configurar y probar la conexión de enlace de datos. Permite negociar varias opciones.
  - Una familia de protocolos de control de red (NCPs), específicos para diferentes protocolos de la capa de red. Existen versiones para AppleTalk, DECnet, OSI, IP, etc.
- Documentación:
  - RFC 1548: Especifica el método de encapsulación y el LCP.
  - RFC 1332: Especifica el NCP para IP.
- Formato de trama:

1	1	1	2	hasta 1500 bytes	2	1
Flag (7E)	dir (FF)	Cont (03)	Protocolo	Datos	CRC	Flag (7E)
			Protocolo (0021)	Datagrama IP		
			Protocolo (C021)	Datos control enlace		
			Protocolo (8021)	Datos control red		





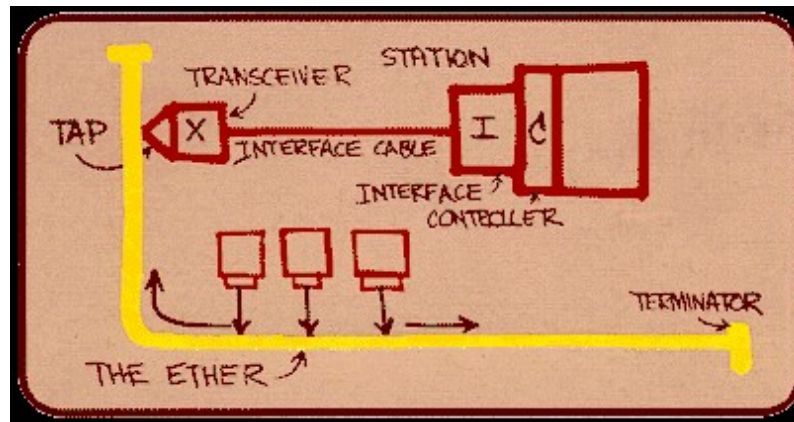
# PPP

---

- Carácter de escape: 0x7E
  - Si la línea es síncrona: se escapa por medios HW
  - Si la línea es asíncrona:
    - Si aparece 0x7E, se transmite 0x7D, 0x5E
    - Si aparece 0x7D, se transmite 0x7D, 0x5D
  - También se escapan los caracteres con códigos menores de 20 para evitar posibles problemas con los modems.
- Ventajas:
  - Permite múltiples protocolos (no sólo IP).
  - Permite detectar errores.
  - Puede negociar las direcciones IP, usando el protocolo de control de red para IP.
  - Puede usar compresión.
- Desventajas:
  - Tiene una sobrecarga de 3 bytes por frame que se envía (por que negocian para no enviar los bytes dir y control, y reducir a un byte el campo de protocolo).
  - También envía algunos frames extras para determinadas negociaciones.

# Ethernet

- Basado en la idea de comunicar ordenadores a través de un cable coaxial compartido y que actuaba como medio de transmisión de broadcast.
- Más utilizada en topologías en bus y estrella.
- Técnica de acceso aleatorio y de contención.
- Cada estación Ethernet tiene asignada una dirección MAC de 48 bits (físicamente grabada en la tarjeta de red Ethernet)
  - Por ejemplo: 0b:83:12:8a:cf:82
- Va desde 10 Mbps hasta más de 1Gbps hoy en día, todo sobre la misma trama Ethernet → Facilita la interconexión.



- Precursoras: ALOHA y ALOHA ranurado
- CSMA y CSMA/CD



# ALOHA y ALOHA ranurado

---

- Propuestas en los 70 en la Universidad de Hawaii como solución para un sistema de radio difusión.
  - Puede ser aplicado a cualquier sistema donde se acceda de forma no coordinada a un medio de comunicación compartido.
- ALOHA:
  - Cuando una estación tiene que transmitir → Transmite.
    - Después, escucha el medio durante el máximo retardo de propagación posible de ida y vuelta.
    - Si en este tiempo se recibe una confirmación → OK
    - Sino, retransmite la trama (tiempo aleatorio).
    - Sino recibe confirmación después de varios intentos, desiste.
  - Si dos estaciones transmiten al mismo tiempo → COLISIÓN.
  - Muy sencillo y bajo rendimiento (máxima utilización del canal: 18%).
- ALOHA ranurado:
  - El tiempo del canal se hace discreto → Ranuras uniformes de duración el tiempo de transmisión de una trama.
  - Reloj central para sincronización.
  - Sólo se puede transmitir al principio de la ranura → Solape completo de las tramas colisionadas.
  - Utilización máxima hasta un 37% del canal.



# CSMA

---

- En las redes LAN (y de radio) el retardo de propagación entre las estaciones es mucho más pequeño que el tiempo de transmisión de las tramas.
  - Cuando estación transmite una trama → El resto lo saben casi instantáneamente.
  - Si las estaciones pueden saber que otra estación está transmitiendo → Esperan para evitar la colisión.
  - Sólo habrá colisiones cuando dos estaciones empiecen a transmitir casi simultáneamente.
- Técnica de acceso múltiple sensible a la portadora (Carrier Sense Multiple Access)
- Una estación antes de transmitir primero escucha el medio (CS):
  - Si está ocupado → Espera
  - Si está libre → Transmite
- Si dos estaciones intentan transmitir casi al mismo tiempo → Colisión
  - Al transmitir hay que esperar por una confirmación (la receptora también debe competir por el canal).



# CSMA

---

- ¿Cuánto esperar si el medio está ocupado?
- CSMA 1-persistente:
  - Si está libre → Transmite
  - Si está ocupado → continua escuchando hasta que esté libre → Transmite.
  - Problema: habrá una colisión siempre que hay dos o más estaciones esperando para transmitir.
- CSMA no persistente:
  - Se espera un tiempo aleatorio, en vez de escuchar hasta que esté libre.
- CSMA p-persistente:
  - Si está ocupado, escucho hasta que esté libre y después transmito con probabilidad  $p$  (o con probabilidad  $1-p$  espero un tiempo aleatorio).



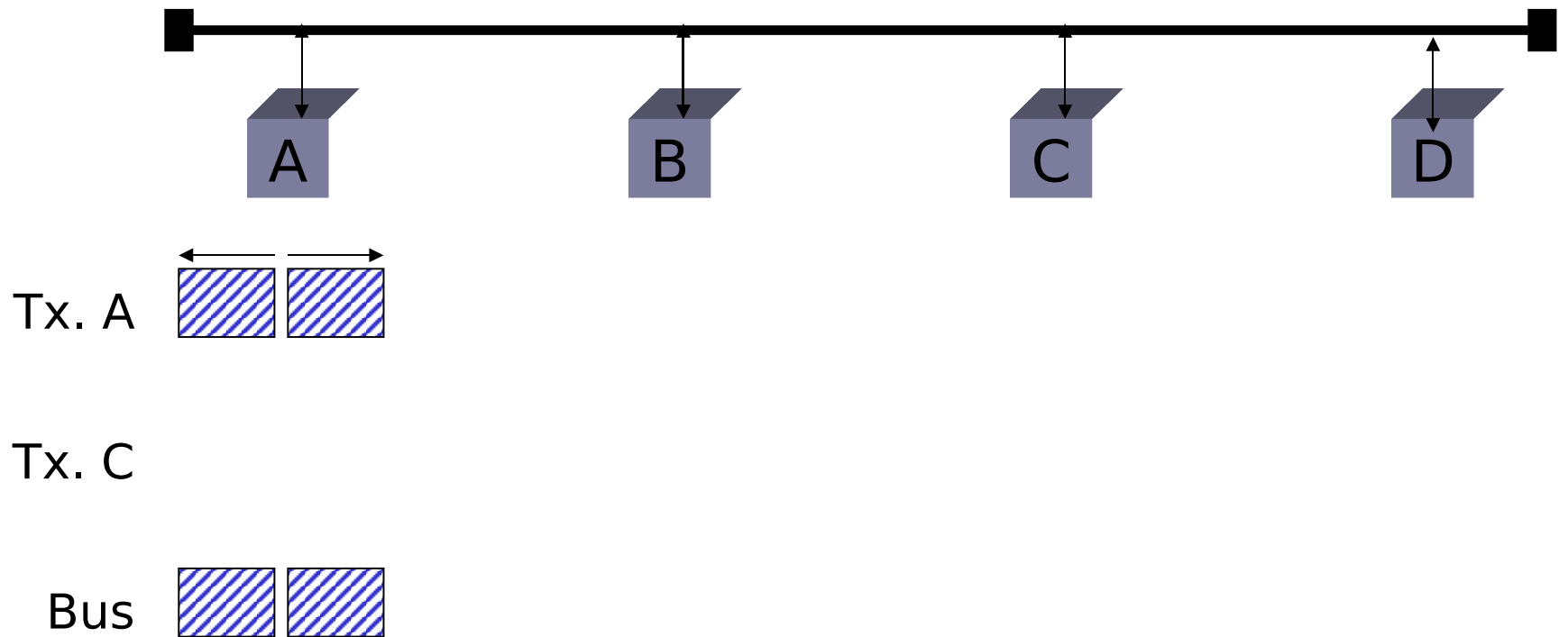
# CSMA/CD

---

- En CSMA, si colisionan dos tramas → el medio está inutilizado durante la transmisión de esas tramas.
- Mejora: continuar escuchando el canal mientras dura la transmisión (Collision Detection).
- Si el medio está libre → Transmite.
- Sino, continua escuchando hasta que esté libre → Transmite.
- Si se detecta una colisión durante la transmisión → Se transmite una señal corta de alerta.
- Se espera un tiempo aleatorio, y después se intenta transmitir de nuevo.

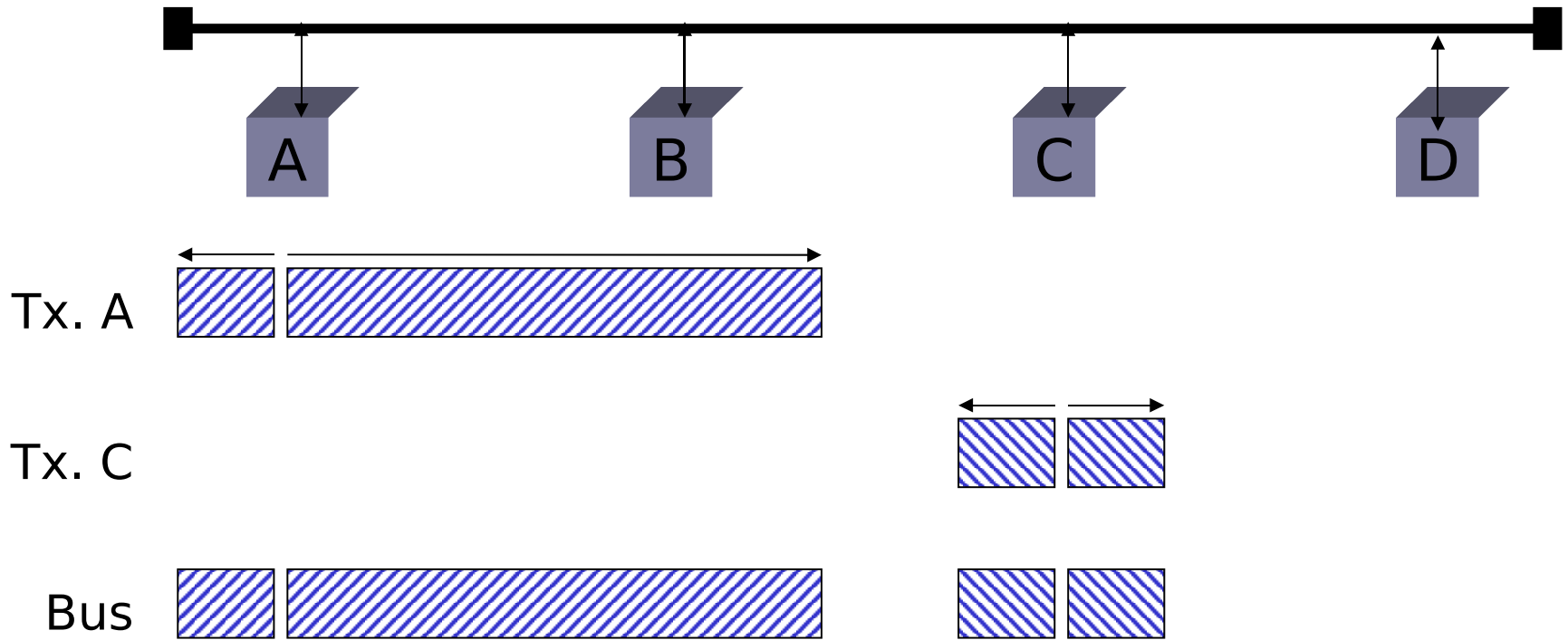


# CSMA/CD



Tiempo:  $t_0$

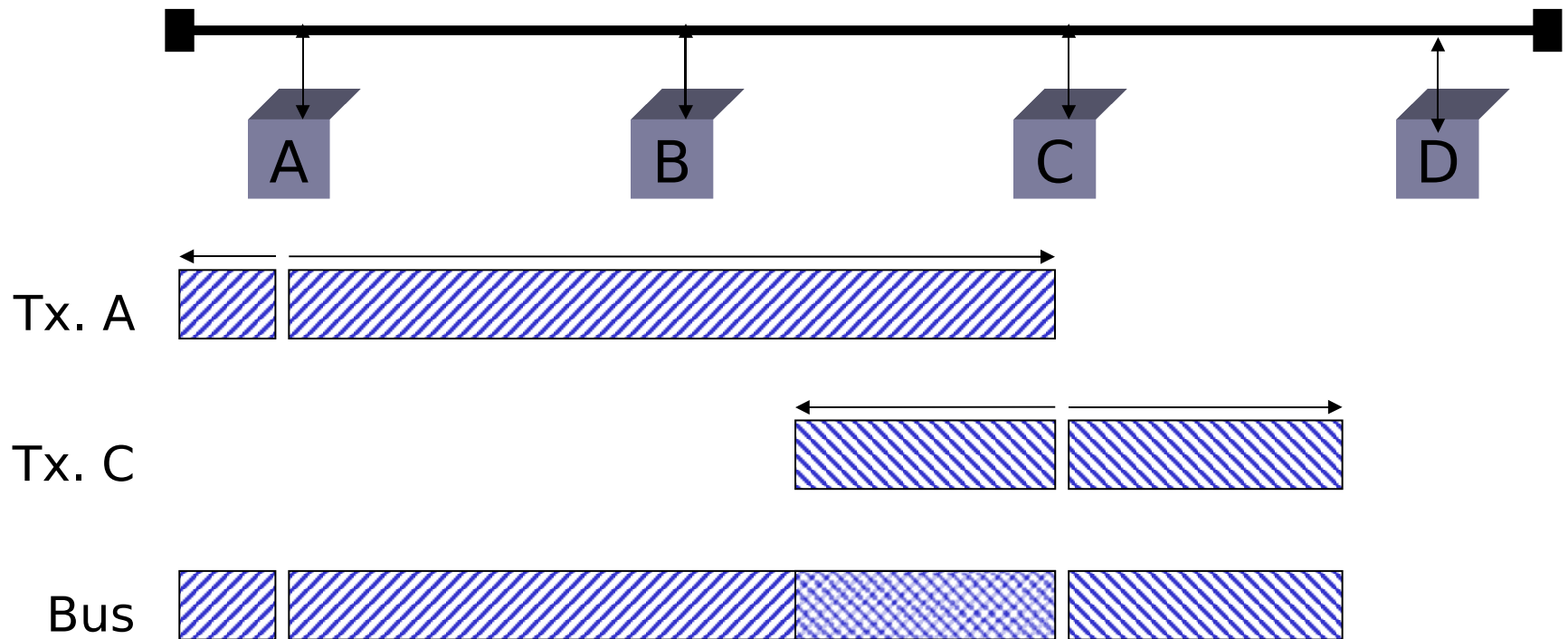
# CSMA/CD



Tiempo:  $t_1$



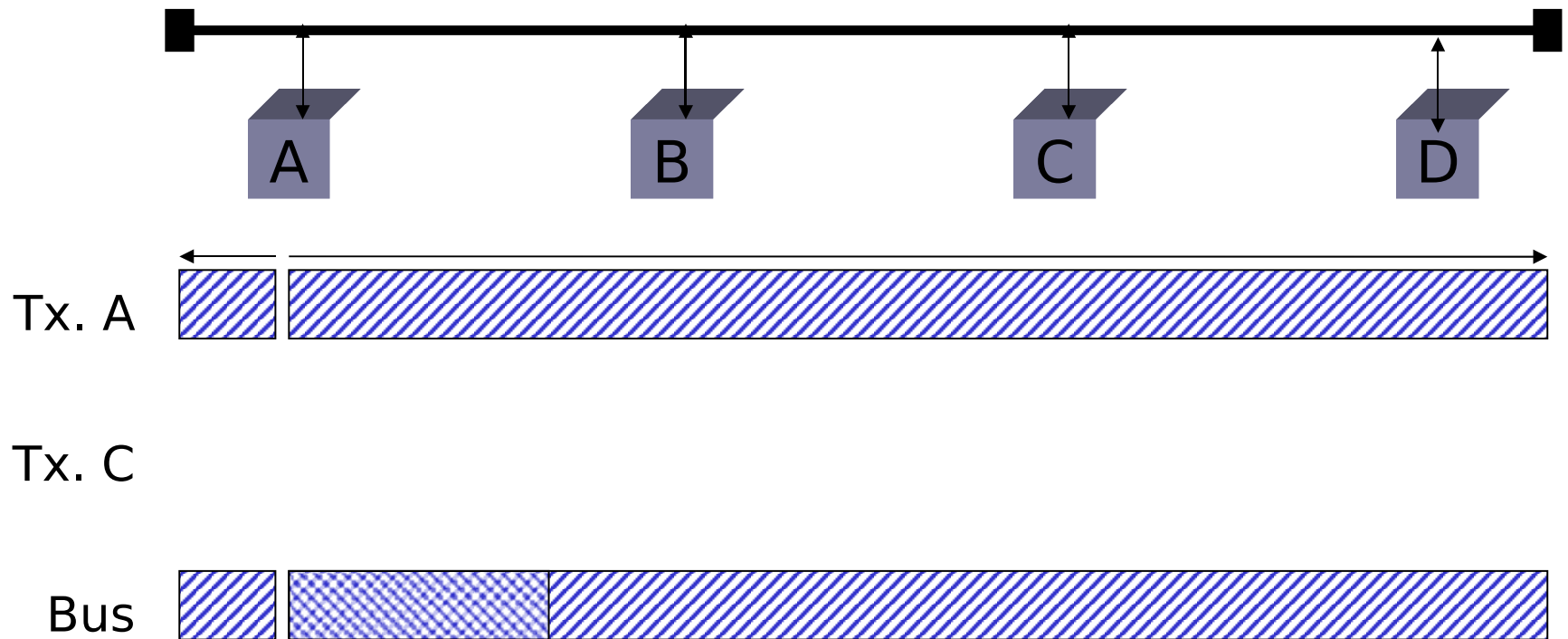
# CSMA/CD



Tiempo:  $t_2$



# CSMA/CD



Tiempo:  $t_3$



# CSMA/CD

---

- ¿Cuánto tiempo se tarda en detectar la colisión?
  - A transmite.
  - Justo antes de que llegue a D, D empieza a transmitir.
  - Casi inmediatamente → Colisión y D lo detecta.
  - Pero la colisión se debe propagar hasta volver a A.
- El tiempo en detectar una colisión es  $\leq$  dos veces el retardo de propagación extremo a extremo.
- → Una trama debe ser suficientemente larga para detectar la colisión antes de que acabe su transmisión.
- Espera aleatoria (paso 4)
  - Exponencial binaria (exponential backoff)
  - Tras cada colisión (sobre la misma trama) el tiempo de espera se duplica (1 seg, 2, 4, 8, 16, 32, ...)
  - Tras N intentos, no se retransmite más y se genera un mensaje de error.
  - Si se congestiona el sistema → Las estaciones deben esperar más y más para liberar al medio.



# CSMA/CD

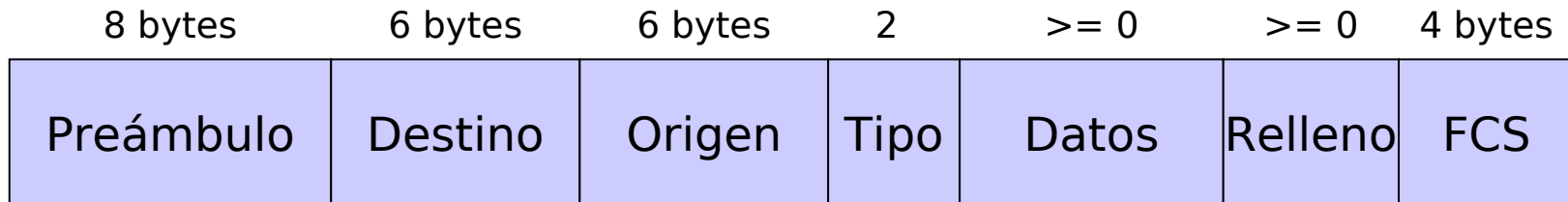
---

- Topología en bus: una colisión se detecta porque el nivel de tensión es superior al esperado para una única transmisión.
- Problema: la señal se atenúa con la distancia.
  - Si transmiten dos estaciones muy distantes, la señal recibida puede estar tan atenuada, que al sumarla con una transmisión no se detecte la colisión.
- Solución: Se restringe la longitud máxima del cable coaxial: 500m en 10BASE5 y 200m en 10BASE2.
- Topología en estrella: el concentrador detecta señal en más de una entrada → Colisión y envía una señal de presencia de colisión (hasta que paran las señales de entrada).

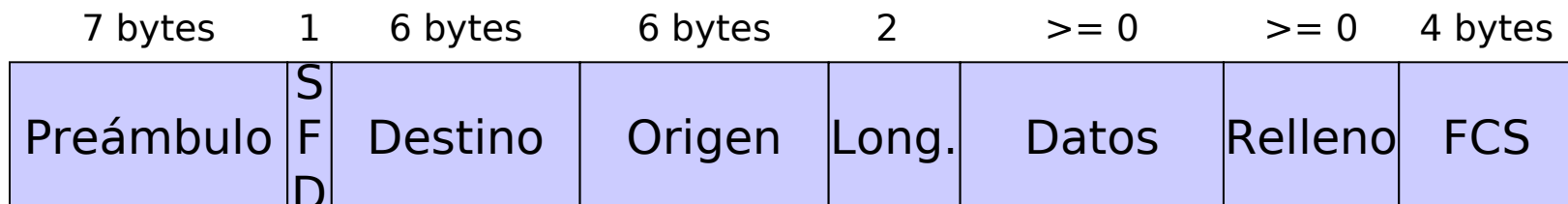


# Ethernet e IEEE 802.3

- Ethernet:
  - Estándar definido por Xerox en 1982:
  - Método de acceso: CSMA/CD 1-persistente
  - 10 Mbps



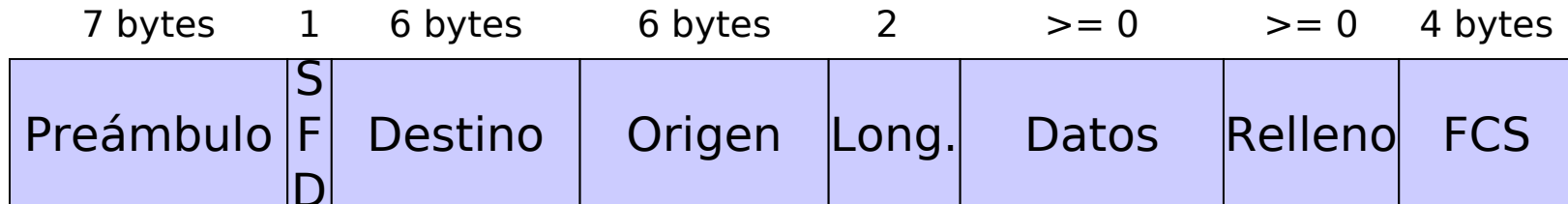
- IEEE 802.3
  - Estándar propuesto por la IEEE sobre el estándar Ethernet.





# IEEE 802.3

- Formato de trama IEEE 802.3



- Preámbulo: patrón de 7 bytes, con 0's y 1's alternados, para sincronizar el emisor y el receptor.
- SFD (Start Frame Delimiter): es la secuencia 10101011, e identifica el comienzo real de la trama.
  - El receptor puede localizar el primer bit del resto de la trama.
- Dirección destino: puede ser una dirección única, de grupo o global.
- Dirección origen
- Longitud: si  $\leq 1500$  → Indica la longitud del campo de datos, sino indica el tipo de protocolo utilizado en el campo de datos (compatibilidad con Ethernet)
- Datos: máximo 1500 bytes
- Relleno: bytes añadidos para garantizar que la técnica de detección de colisiones pueda operar correctamente (mínimo 46 bytes)
- FCS (Frame Check Sequence): código CRC de detección de errores (incluye todos los campos, excepto el preámbulo, el SFD y el FCS).



# IEEE 802.3 a 10 Mbps

---

- Existen varias implementaciones que se distinguen por su notación: <velocidad de transmisión en Mbps><Método de señalización><longitud máxima del segmento en centenas de metros>
- **10BASE5:**
  - Cable coaxial de 50 ohmios
  - Máximo 100 nodos por segmento y longitud máxima de segmento: 500 m.
    - Se pueden usar repetidores, máximo 4 repetidores → 2.5 km.
- **10BASE2:**
  - Más barato que 10BASE5
  - Cable más fino → Menor distancia: 185 m y máximo 30 nodos por segmento.
- **10BASE-T:**
  - Par trenzado no apantallado
  - Topología en estrella: hub como punto central
    - Las estaciones se conectan al hub mediante un enlace punto a punto.  
Longitud máxima segmento: 100 m.
- **10BASE-F**
  - Fibra óptica
  - Longitud máxima de segmento: 500 m.



# IEEE 802.3 a 100 Mbps

---

- 100BASE-X
  - 100 Mbps en un sentido usando un solo enlace (fibra o par trenzado).
  - Codificación basada en 4B/5B-NRZI (adaptada a cada opción).
  - 100BASE-TX
    - Par trenzado
    - Dos pares (uno para tx. y otro para rx.)
    - Codificación MLT-3
  - 100BASE-FX
    - Dos fibras ópticas (una para tx. y otra para rx.)
    - Codificación 4B/5B-NRZI adaptado a señales ópticas (1=luz, 0=sin luz o baja intensidad)
- 100BASE-T4
  - Para la reutilización de instalaciones existentes de UTP clase 3.
  - 4 pares UTP clase 3 (uso opcional de clase 5).
  - Para transmisión se usan 3 pares → Se dividen los datos en 3 secuencias, que se transmitirán a 33.3 Mbps cada una.
  - Recepción usando 3 pares → 2 pares se configuran para transmisión bidireccional.
  - Codificación ternario 8B6T.





# IEEE 802.3 a 1 Gbps

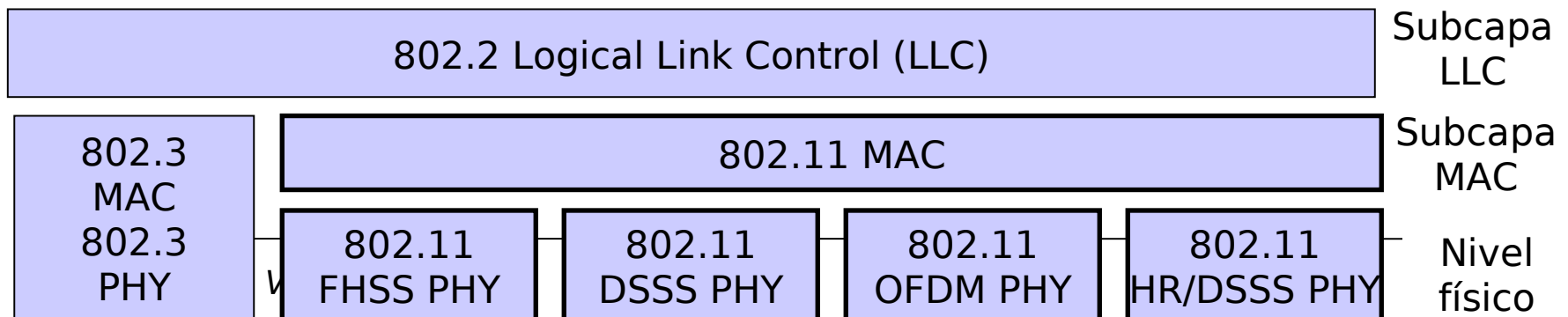
---

- Denominado Gigabit Ethernet, IEEE 802.3z
- Compatible con 10BASE-T y 100BASE-T
- Permite enlaces punto a punto y redes multidifusión
- Basado en CSMA/CD, con la distancia del medio de transmisión muy restringida (100 m)
  - Cables UTP categoría 5 ó 6 – 1000BASE-T: utiliza los 4 pares con cancelación de eco para full-duplex
  - Fibra óptica: 1000BASE-X



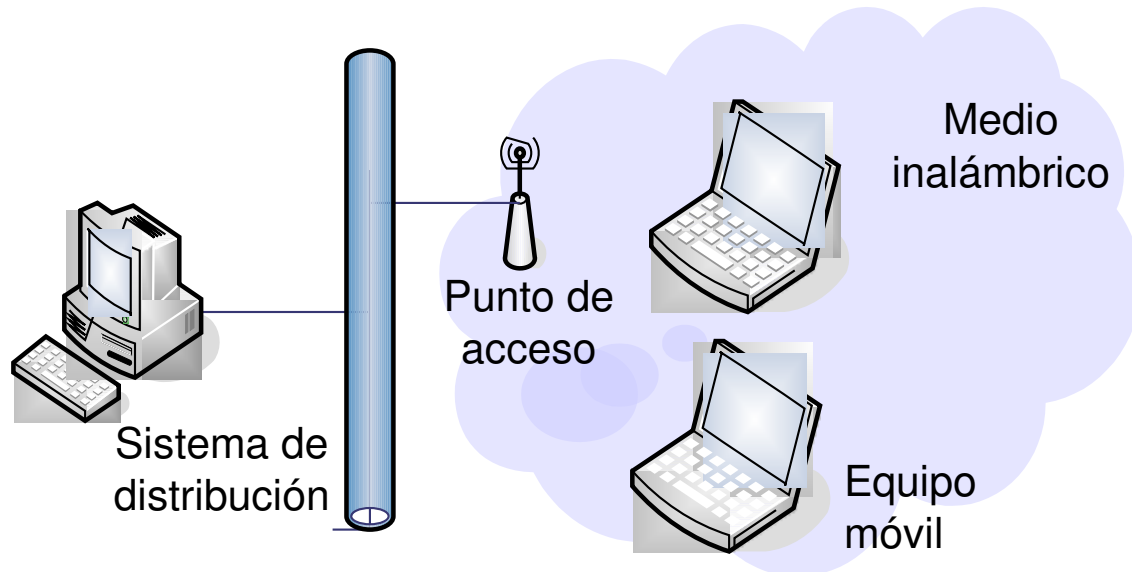
# WiFi: Introducción

- Características de los sistemas de transmisión inalámbrica: Movilidad y flexibilidad.
- No son un sustituto de las redes “tradicionales”:
  - Muchos equipos son estáticos (servidores).
  - Velocidad limitada por el ancho de banda.
  - Seguridad
- Sistemas de transmisión inalámbrica:
  - Satélites (a distintas órbitas)
  - Telefonía móvil: GSM, GPRS, UMTS
  - Bluetooth
  - WiFi (Wireless Fidelity) o WLAN (Wireless LAN)
- Estándares para WiFi:
  - IEEE 802.11: Especificaciones para 1-2 Mbps en la banda de los 2,4 GHz usando salto de frecuencias (FHSS) o secuencia directa (DSSS).
  - IEEE 802.11.b: Extensión de 802.11 para proporcionar 11 Mbps usando DSSS.
  - IEEE 802.11.a: Extensión de 802.11 para proporcionar 54 Mbps usando OFDM.
  - IEEE 802.11g: Extensión de 802.11 para proporcionar 20-54 Mbps usando DSSS y OFDM. Tiene mayor alcance y menor consumo de potencia que 802.11a.



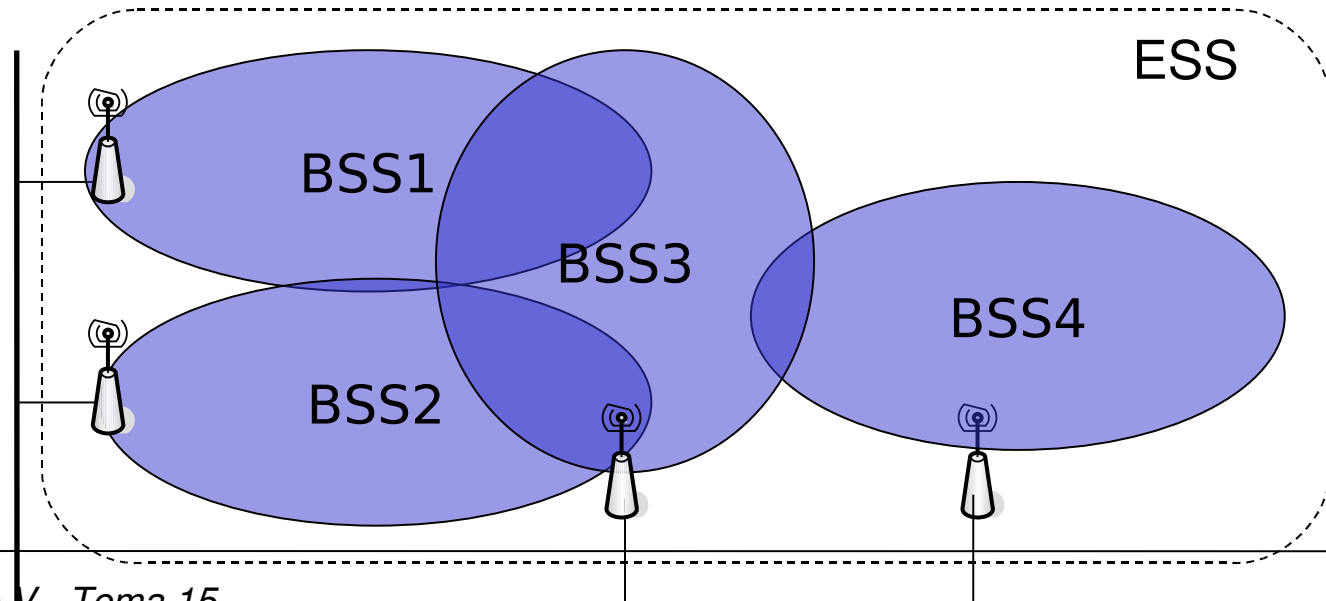
# WiFi: Introducción

- Sistema de distribución: componente lógico de 802.11 para enviar las tramas a su destino (no se especifica una tecnología particular). Se suele usar Ethernet.
- Punto de acceso: convierten las tramas inalámbricas a tramas “alámbricas” (bridge wireless-to-wired).
- Medio inalámbrico: radio frecuencia o infrarrojos.
- Estaciones: dispositivos con una interfaz de red inalámbrica (normalmente, ordenadores portátiles).



# WiFi: Introducción

- Basic Service Set (BSS): grupo de estaciones que se comunican entre sí.
  - BSS independiente: se comunican directamente.
    - Grupo reducido
    - Carácter temporal (p.e. reunión)
  - BSS infraestructura: usan un punto de acceso.
    - Comunicaciones entre estaciones móviles pasan por el punto de acceso → Una estación se ASOCIA a un punto de acceso.
    - Los puntos de acceso envían periódicamente una señal baliza.
    - Distancia de las estaciones al punto de acceso (no entre estaciones).
- Extended Service Set (ESS): asociación de BSSs. Se encadenan varias BSSs usando un backbone.





# WiFi: Introducción

---

- Soporte de movilidad:
  - Sin transición: la estación permanece estable respecto al punto de acceso.
  - Transición BSS: la estación se mueve de una BSS a otra, dentro de un mismo ESS.
  - Transición ESS: hay una transición entre ESSs.  
No soportado por 802.11 → IP Móvil



# WiFi: Capa física

---

- Espectro expandido (Spread Spectrum): transmitir ocupando una banda de frecuencias mayor de la requerida.
- Desarrollado originalmente con fines militares, para evitar ataques/escuchas. Patente de Lamarr/Antheils, en 1942. Usada por primera vez en un sistema de guiado de torpedos de la armada americana en 1962.
- Dos tipos: salto de frecuencias y secuencia directa
- Espectro expandido salto de frecuencias (FHSS):
  - Se transmite en diferentes bandas de frecuencias, saltando de una a otra en forma aleatoria pero predecible.
  - Emisor y receptor deben compartir generador de números aleatorios y semilla.
  - 802.11 establece 75 bandas de 1 MHz.
- Espectro expandido de secuencia directa (DSSS):
  - El “espectro se expande” al transmitir varios bits por cada bit de información real.
  - Para cada bit, enviamos el XOR de él y de n bits aleatorios (chipping code):
    - para enviar un 0: 00100100010
    - para enviar un 1: 10010100110
  - 802.11: Código chipping de 11 bits, permitiendo 2 Mbps (cayendo a 1 Mbps en entornos ruidosos).
  - 802.11b: Utiliza una nueva forma de modulación, CCK (Complementary Code Keying), para proporcionar 11 Mbps (con caídas a 5,5 Mbps, 2 Mbps y 1 Mbps).

# WiFi: MAC

- Acceso al medio: CSMA/CA
  - Las interfaces inalámbricas normalmente son half-duplex → no se puede escuchar a la vez que se transmite → no se pueden detectar colisiones.
  - Solución: intentar evitarlas → CSMA with Collision Avoidance:
    - Si el canal está ocupado se espera a que esté libre.
    - Si está libre, se espera un tiempo, y si sigue libre, se transmite.
- Enlaces de radio: Sujetos a ruidos e interferencias → Se incorpora un ACK para cada trama transmitida.
- El problema del nodo oculto:
  - El nodo 2 se puede comunicar con los nodos 1 y 3.
  - Pero los nodos 1 y 3 no se ven entre sí → Si transmiten simultáneamente se interfieren.



Nodo 1



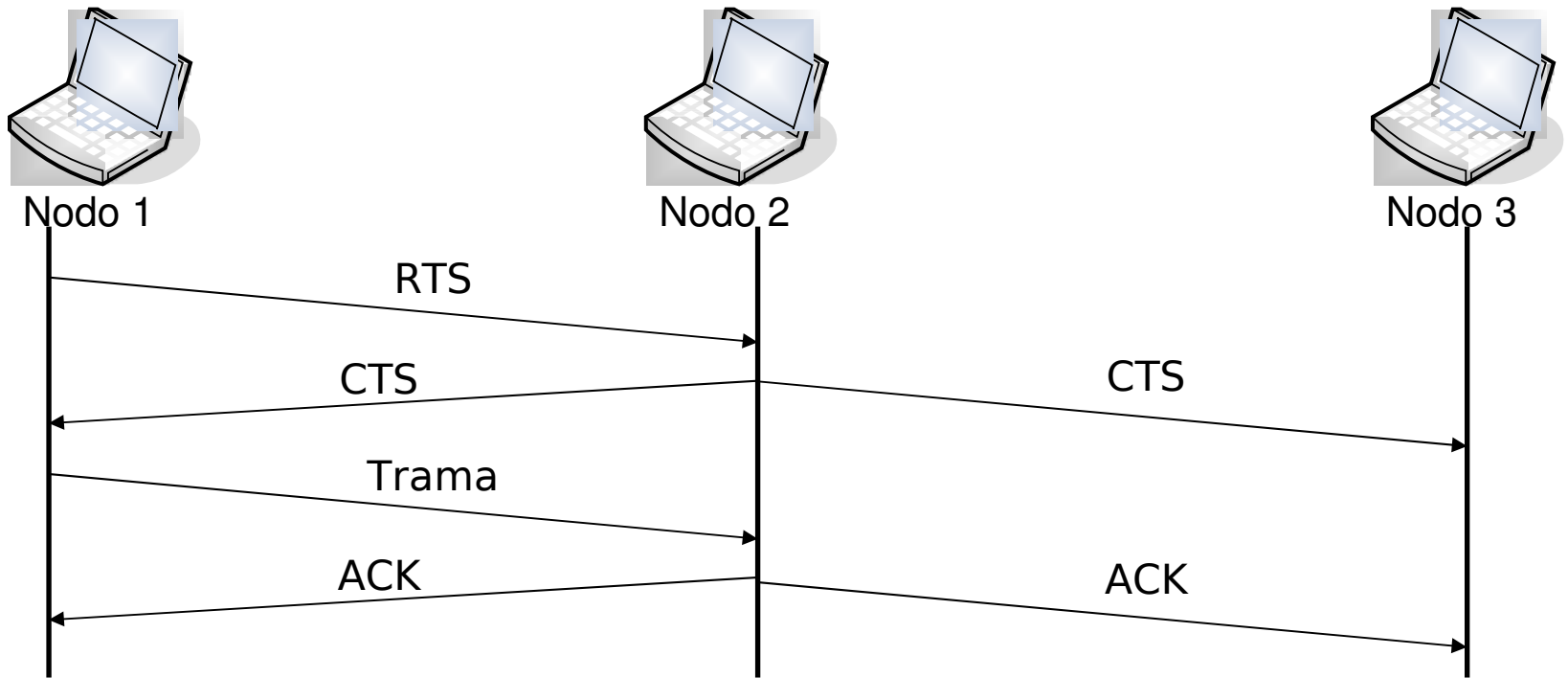
Nodo 2



Nodo 3

# WiFi: MAC

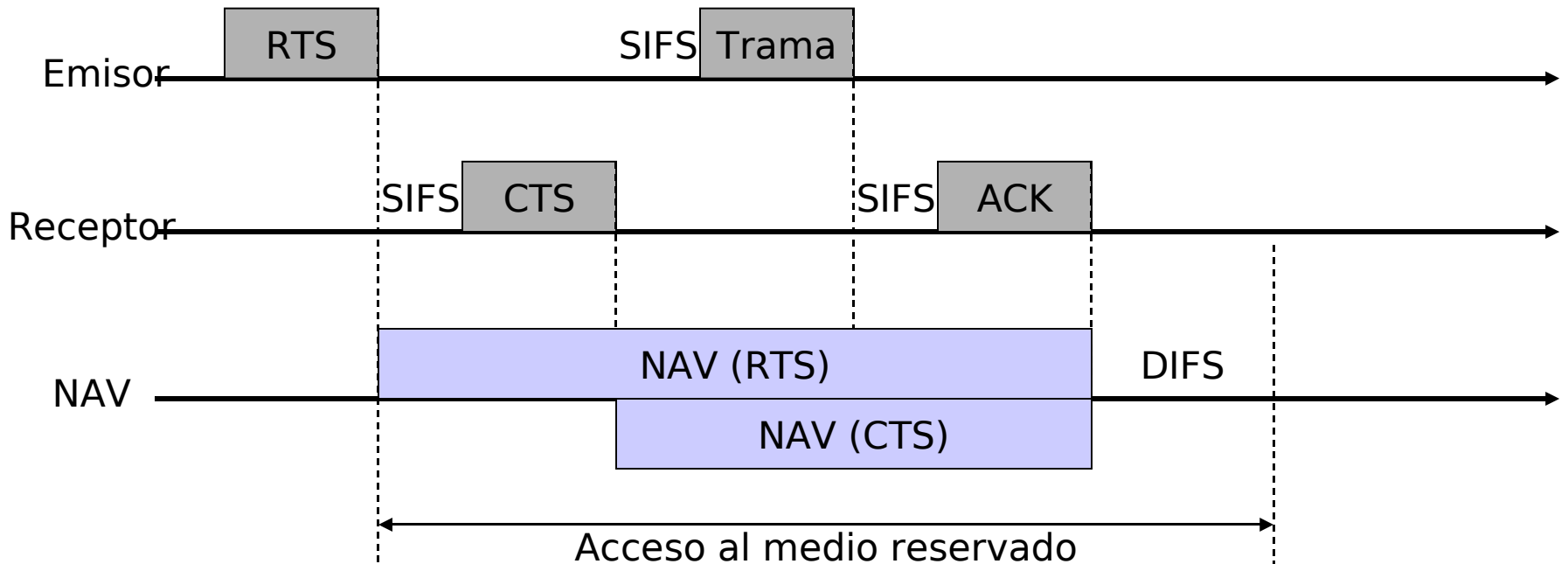
- Solución: MACA (Multi Access Collision Avoidance) → RTS/CTS
- RTS: Request To Send
  - Reserva el medio para transmitir
  - Silencia a las estaciones que lo oyen
- CTS: Clear To Send
  - Silencia a las estaciones que lo oyen





# WiFi: MAC

- Detección de la portadora virtual (evitación de la colisión) → NAV (Network Allocation Vector).
- NAV: campo de duración que reserva el medio por un período fijo de tiempo.
  - Un transmisor establece el NAV al tiempo que espera tarde en completar su operación.
  - El resto de estaciones hace una cuenta atrás.
    - Si NAV = 0 → El medio está libre
    - Sino → El medio está ocupado





# WiFi: MAC

---

- Se define 4 tiempos entre tramas:
  - SIFS (Short Interframe Space): tiempo para transmisiones de mayor prioridad (RTS, CTS y ACK).
  - PIFS (PCF Interframe Space): utilizado para tráfico prioritario.
  - DIFS (DCF Interframe Space): las estaciones tienen acceso al medio inmediato si ha estado libre más de DIFS.
  - EIFS (Extended Interframe Space): se usa sólo cuando ha habido un error en la transmisión de una trama.
  - $SIFS < PIFS < DIFS$  y EIFS es variable.
- Modos de acceso:
  - DCF (Distributed Coordination Function): base del estándar CSMA/CA
    - Primero se comprueba si el medio está libre antes de transmitir.
    - Se usa un backoff aleatorio después de cada trama.
    - Se usa la técnica RTS/CTS para reducir más las posibles colisiones.
  - PCF (Point Coordination Function): servicio para tráfico prioritario
    - Los “coordinadores de puntos” garantizan el acceso al medio sin negociación.
    - Se implementa sobre DCF.



# WiFi: Seguridad

---

- El aire es un medio compartido → Muy sensible a escuchas.
  - No es muy distinto al cable → hay que alcanzar la misma seguridad.
  - Sin embargo se usan mecanismos adicionales.
- WEP (Wired Equivalent Privacy):
  - Razonablemente fuerte: pensando para ataques esporádicos y débiles
  - Computacionalmente eficiente (clave de 64-128 bits)
  - Exportable internacionalmente
  - Opcional
- Mejor WPA (WiFi Protected Access):
  - Implementa TKIP (Temporal Key Integrity Protocol): cambia dinámicamente las claves según se utiliza el sistema.