

Capítulo 5

Capa de enlace y LANs

*Redes de computadores
Bloque 2*

A note on the use of these ppt slides:

We're making these slides freely available to all (faculty, students, readers). They're in PowerPoint form so you can add, modify, and delete slides (including this one) and slide content to suit your needs. They obviously represent a *lot* of work on our part. In return for use, we only ask the following:

- ❖ If you use these slides (e.g., in a class) in substantially unaltered form, that you mention their source (after all, we'd like people to use our book!)
- ❖ If you post any slides in substantially unaltered form on a www site, that you note that they are adapted from (or perhaps identical to) our slides, and note our copyright of this material.

Thanks and enjoy! JFK/KWR

All material copyright 1996-2010
J.F Kurose and K.W. Ross, All Rights Reserved

V2.0



*Redes de
computadoras: Un
enfoque descendente,
5ª edición.*
Jim Kurose, Keith Ross
Pearson Educación,
2010.

Capa de enlace 5-1

Capítulo 5: La capa de enlace

Objetivos:

- ❖ Comprender los principios que existen bajo los servicios de la capa de enlace:
 - Corrección y detección de errores
 - Compartir un canal de multidifusión: acceso múltiple
 - Direccionamiento de la capa de enlace
 - Transferencias de datos fiables, control de flujo
- ❖ Instanciación e implementación de varias tecnologías de la capa de enlace.

V2.0

Capa de enlace 5-2

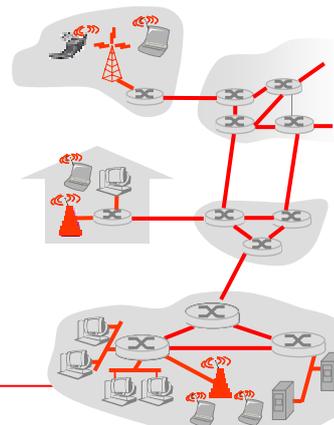
Índice

- 5.1 **Introducción y servicios**
- 5.2 Corrección y detección de errores
- 5.3 Protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de la capa de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Conmutadores de la capa de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Enlaces virtuales: MPLS
- 5.9 Un día en la vida de una solicitud Web

Capa de enlace: Introducción

Terminología:

- ❖ hosts y routers son **nodos**
- ❖ Los canales de comunicación que conectan nodos adyacentes a través de la ruta de comunicaciones son **enlaces**
 - Enlaces cableados
 - Enlaces inalámbricos
 - LANs
- ❖ Un paquete del nivel 2 es una **trama**, encapsula datagramas



La **capa de enlace** tiene la responsabilidad de transferir datagramas de un nodo al nodo **físicamente adyacente** a través de un enlace

La capa de enlace: contexto

- ❖ Los datagramas son transferidos por diferentes protocolos de enlace sobre distintos enlaces:
 - Ethernet como primer enlace, frame relay como enlace intermedio y 802.11 como último enlace
 - ❖ Cada protocolo de enlace proporciona diferentes servicios
 - Puede o no proporcionar retransmisión sobre el enlace
- Analogía con los transportes**
- ❖ Viaje de Princeton a Lausana
 - Coche: Princeton a JFK
 - Avión : JFK a Ginebra
 - Tren: Ginebra a Lausana
 - ❖ turista = **datagrama**
 - ❖ Segmento de transporte = **enlace de comunicación**
 - ❖ Modo de transporte = **protocolo de la capa de enlace**
 - ❖ Agencia de viajes = **algoritmo de enrutado**

V2.0

Capa de enlace

5-5

Servicios de la capa de enlace (I)

- ❖ **Entramado, acceso al enlace:**
 - encapsula datagramas en una trama, añade cabecera y cola.
 - Accede al canal si el medio es compartido
 - Direcciones "MAC" se emplean en la cabecera de las tramas para identificar origen y destino
 - ¡Diferentes de las direcciones IP!
- ❖ **Entrega fiable entre nodos adyacentes**
 - Rara vez se usan en canales con pocos errores (fibra óptica, coaxial, par trenzado)
 - Enlaces inalámbricos: alta tasa de error

V2.0

Capa de enlace

5-6

Servicios de la capa de enlace (II)

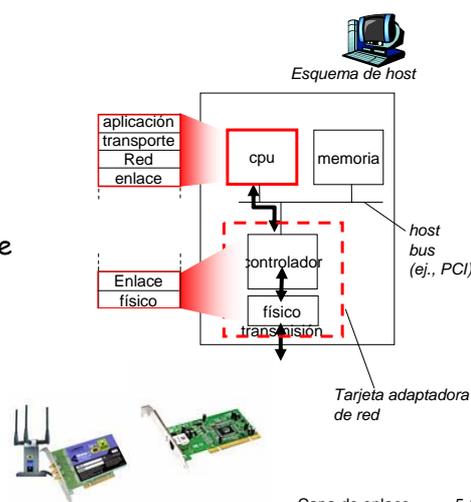
- ❖ **Control de flujo:**
 - Adecuar la velocidad entre los nodos adyacentes origen y destino
- ❖ **Detección de errores:**
 - Errores causados por la atenuación de la señal, ruido.
 - El receptor detecta la presencia de errores, avisa al emisor para que retransmita o descarte la trama
- ❖ **Corrección de errores:**
 - El receptor identifica *y corrige* error(es) de bit sin necesidad de retransmisión
- ❖ **Half-duplex y full-duplex**
 - Con *half duplex*, ambos nodos de los extremos del enlace pueden transmitir pero no a la vez

V2.0

Capa de enlace 5-7

¿Dónde se implementa la capa de enlace?

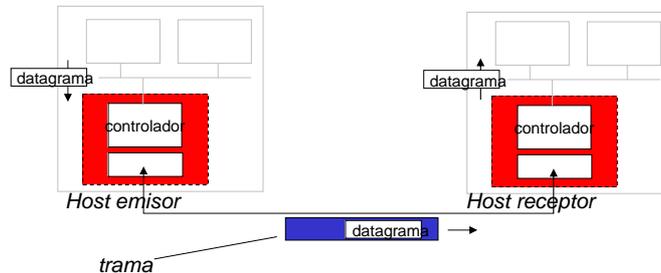
- ❖ En todos los HOSTs
- ❖ La capa de enlace se implementa en el "adaptador" (*network interface card* NIC)
 - Tarjetas: Ethernet, PCMCIA, 802.11
 - Implementa los enlaces de la capa física
- ❖ Conectado a los buses del hosts
- ❖ Combina: hardware, software, firmware



V2.0

Capa de enlace 5-8

Comunicación entre adaptadores



❖ Emisor:

- Encapsula el datagrama en una trama
- Añade bits para el control de errores, control de flujo, etc.

❖ Receptor

- Busca errores, control de flujo, etc
- Extrae el datagrama, y lo pasa a niveles superiores

V2.0

Capa de enlace

5-9

Capa de enlace

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 **Corrección y detección de errores**
- 5.3 Protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de la capa de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Conmutadores de la capa de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Enlaces virtuales: MPLS
- 5.9 Un día en la vida de una solicitud Web

V2.0

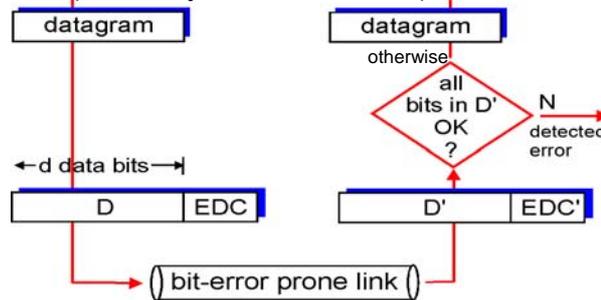
Capa de enlace

5-10

Detección de errores

EDC= Bits de detección y corrección de errores (redundancia)
 D = Los datos protegidos mediante corrección de errores pueden contener campos adicionales

- ¡La detección de errores no es 100% fiable!
- el protocolo puede perder algunos errores, aunque rara vez
- EDC mayores mejoran la detección y la corrección



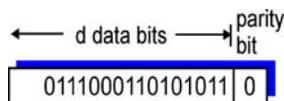
V2.0

Capa de enlace 5-11

Comprobación de la paridad

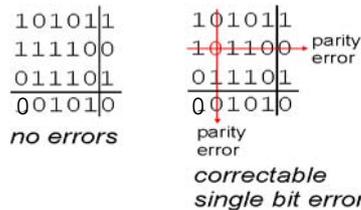
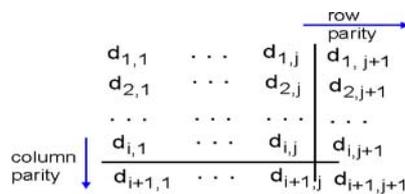
Paridad simple:

Detecta errores de bit simples



Bits de paridad bidimensionales:

Detectan y corrigen errores de bit simples



V2.0

Capa de enlace 5-12

Suma de comprobación de Internet

Objetivo: detectar "errores" (ej., bits cambiados) en los paquetes transmitidos (usado únicamente en el nivel de transporte)

Emisor:

- ❖ Los bytes de datos se tratan como enteros de 16 bits y se suman
- ❖ Se calcula el complemento a 1 de esta suma para formar la suma de comprobación
- ❖ El emisor coloca este valor en la cabecera del segmento

Receptor:

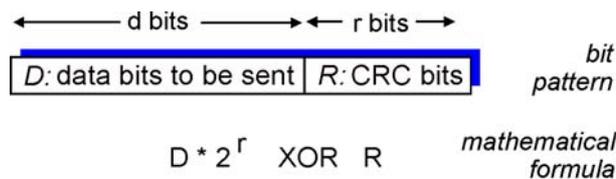
- ❖ Vuelve a realizar la suma de los datos
- ❖ Comprueba si el resultado obtenido es el mismo que el recibido:
 - NO - error detectado
 - SI - no se detecta error.

V2.0

Capa de enlace 5-13

Comprobación de la Redundancia Cíclica

- ❖ Ver los bits de datos, D , como un número binario
- ❖ Elegir un patrón de bits de $r+1$ (generador), G
- ❖ Objetivo: elegir r bits de CRC, R , tal que
 - $\langle D, R \rangle$ sea divisible exactamente por G (modulo 2)
 - El receptor conoce G , divide $\langle D, R \rangle$ por G . Si el resto no da cero se detecta el error.
 - Puede detectar ráfagas de error menores de $r+1$ bits
- ❖ Se emplea mucho en la práctica (Ethernet, 802.11 WiFi, ATM)



V2.0

Capa de enlace 5-14

Ejemplo de CRC

Se desea:

$$D \cdot 2^r \text{ XOR } R = nG$$

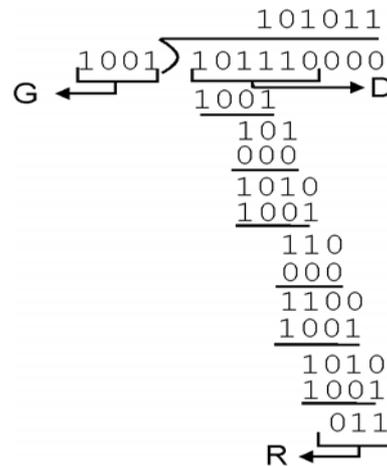
Es equivalente a:

$$D \cdot 2^r = nG \text{ XOR } R$$

Equivale a:

Si dividimos $D \cdot 2^r$ por G , obtendremos el resto R

$$R = \text{resto} \left[\frac{D \cdot 2^r}{G} \right]$$



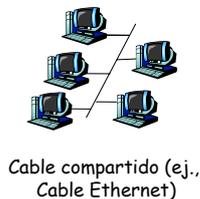
Capa de enlace

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Corrección y detección de errores
- 5.3 **Protocolos de acceso múltiple**
- 5.4 Direccionamiento de la capa de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Conmutadores de la capa de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Enlaces virtuales: MPLS
- 5.9 Un día en la vida de una solicitud Web

Protocolos de acceso múltiple (I)

Dos tipos de "enlaces":

- ❖ Punto-a-punto
 - PPP por red telefónicas
 - Enlace punto-a-punto entre el conmutador Ethernet y el Host
- ❖ **Difusión** (compartición de cable o medio)
 - Ethernet antigua
 - LAN 802.11 inalámbrica



V2.0

Capa de enlace 5-17

Protocolos de acceso múltiple (II)

- ❖ Canal único compartido para difusión
- ❖ Dos o más nodos transmiten simultáneamente: interferencia
 - **Colisión** si un nodo recibe dos o más señales a la vez

Protocolo de acceso múltiple

- ❖ Algoritmo distribuido que determina de qué modo los nodos comparten el canal; ej., determina cuándo un nodo puede transmitir
- ❖ La comunicación sobre cómo compartir el canal va sobre el mismo canal
 - No existe un canal separado para coordinación

V2.0

Capa de enlace 5-18

Protocolo de acceso múltiple ideal

Canal de difusión de R bps

1. Cuando quiere transmitir un nodo, puede hacerlo a una velocidad R.
2. Cuando M nodos quieren transmitir, cada uno puede transmitir a una velocidad media de R/M
3. Completamente descentralizado:
 - No existe un nodo especial para coordinar la transmisión
 - No hay ni turnos ni sincronización de relojes
4. Simple

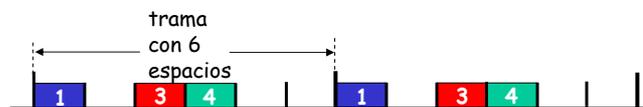
Protocolos de MAC: una clasificación

- ❖ **Reparto del canal**
 - Divide el canal en pequeños "trozos" (espacios de tiempo, frecuencia)
 - reserva un nodo para uso exclusivo
- ❖ **Acceso Aleatorio**
 - El canal no está dividido y permite colisiones
 - "Recuperarse" de las colisiones
- ❖ **"Toma de turnos"**
 - Los nodos toman turnos, pero los nodos con mucho que transmitir pueden tomar turnos más largos

Protocolos MAC de reparto del canal: TDMA

TDMA: acceso por multiplexación en el tiempo

- ❖ Acceso al canal en "rondas"
- ❖ Cada estación tiene espacios de tiempo fijo (longitud = tiempo de transmisión de un paquete) en cada ronda
- ❖ Los slots no usados quedan desocupados
- ❖ Ejemplo: 6-estaciones LAN, 1,3,4 tienen paquete, los slots 2,5 y 6 desocupados



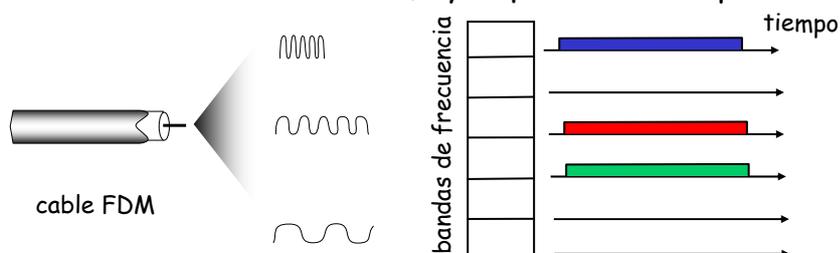
V2.0

Capa de enlace 5-21

Protocolos MAC de reparto del canal: FDMA

FDMA: acceso múltiple por división en frecuencia

- ❖ El espectro del canal se divide en bandas
- ❖ Cada estación tiene asignada una banda fija
- ❖ Cuando no transmite la banda queda desocupada
- ❖ Ejemplo: LAN de 6 nodos; el 1,3,4 tienen paquete, las bandas de frecuencia 2,5 y 6 quedan desocupadas



V2.0

Capa de enlace 5-22

Protocolos de acceso aleatorio

- ❖ Cuando un nodo tiene un paquete que enviar
 - Lo transmite a toda la tasa disponible R .
 - No existe una coordinación a priori entre los nodos
- ❖ Dos o más nodos transmitiendo → "colisión"
- ❖ **Protocolo MAC de acceso aleatorio** especifica:
 - Cómo detectar las colisiones
 - Cómo recuperarse de las colisiones (ej., retransmisión demorada)
- ❖ Ejemplos de protocolos MAC de acceso aleatorio:
 - ALOHA ranurado
 - ALOHA
 - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

ALOHA ranurado (I)

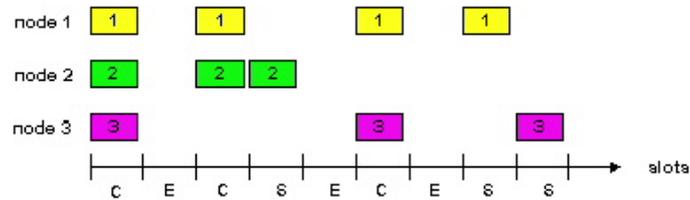
Suposiciones:

- ❖ Tramas del mismo tamaño
- ❖ Tiempo dividido en mismo tamaño (necesario para transmitir una trama)
- ❖ Los nodos comienzan a transmitir al comienzo del slot
- ❖ Nodos están sincronizados
- ❖ Si dos o más nodos transmiten en el mismo slot todos los demás se enteran de la colisión

Operación:

- ❖ Cuando los nodos obtienen una nueva trama transmiten en el siguiente slot.
 - *Si no hay colisión:* el nodo puede transmitir una nueva trama en el slot siguiente
 - *Si hay colisión:* el nodo retransmitirá la trama en cada slot subsiguiente con una probabilidad p hasta que transmita con éxito

ALOHA ranurado (II)



Pros

- ❖ Un nodo activo puede transmitir continuamente a velocidad máxima
- ❖ Altamente descentralizado
- ❖ Simple

Contras

- ❖ Colisiones gastan slots
- ❖ Existen slots desocupados
- ❖ Los nodos tienen que ser capaces de detectar colisión en menos que transmitir
- ❖ Reloj de sincronización

V2.0

Capa de enlace 5-25

Eficiencia del Aloha ranurado

Eficiencia: fracción más larga de slots exitosos (muchos nodos con muchas tramas que enviar)

- ❖ *suposición:* N nodos con muchas tramas que enviar. Cada uno transmite en un slot con probabilidad p
- ❖ La probabilidad de éxito de transmisión en un slot por un nodo es $\text{prob} = p(1-p)^{N-1}$
- ❖ La probabilidad de que algún nodo tenga éxito es $\text{prob} = Np(1-p)^{N-1}$

- ❖ Máxima eficiencia: encontrar un p^* que maximice $Np(1-p)^{N-1}$
- ❖ Para muchos nodos tomar el límite de $Np^*(1-p^*)^{N-1}$ cuando N tiende a infinito, da:

Eficiencia máxima = $1/e = 0.37$

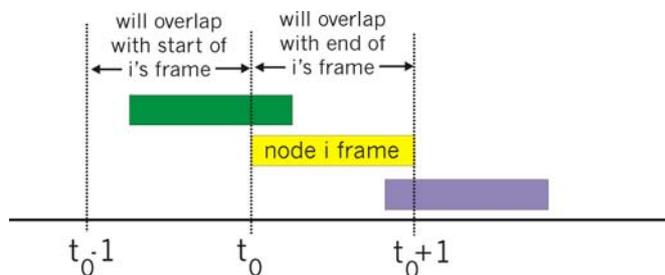
¡Como mucho: el canal se puede usar para transmisiones con éxito el 37% del tiempo!

V2.0

Capa de enlace 5-26

ALOHA puro (no ranurado)

- ❖ Aloha no ranurado: más simple, no requiere sincronización
- ❖ Cuando llega la trama
 - Se transmite inmediatamente
- ❖ La probabilidad de colisión aumenta:
 - La trama enviada en t_0 colisiona con otras enviadas en $[t_0-1, t_0+1]$



V2.0

Capa de enlace 5-27

Eficiencia del Aloha puro

$$\begin{aligned} P(\text{éxito para un nodo dado}) &= P(\text{que un nodo transmita}) \times \\ &P(\text{que otro nodo no transmita en } [t_0-1, t_0]) \times \\ &P(\text{que otro nodo no transmita en } [t_0, t_0+1]) \\ &= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1} \\ &= p \cdot (1-p)^{2(N-1)} \end{aligned}$$

... eligiendo un p óptimo y con N tendiendo a infinito...

$$= 1/(2e) = 0.18$$

¡ Peor incluso que con el Aloha ranurado !

V2.0

Capa de enlace 5-28

CSMA (Acceso múltiple con sondeo de portadora)

CSMA: escuchar antes de transmitir:

Si el canal está libre: transmitir la trama completa

- ❖ Si el canal está ocupado, diferir la transmisión

- ❖ Analogía entre seres humanos: no interrumpir a otros cuando hablan!

Colisiones en CSMA

Todavía puede haber colisiones:

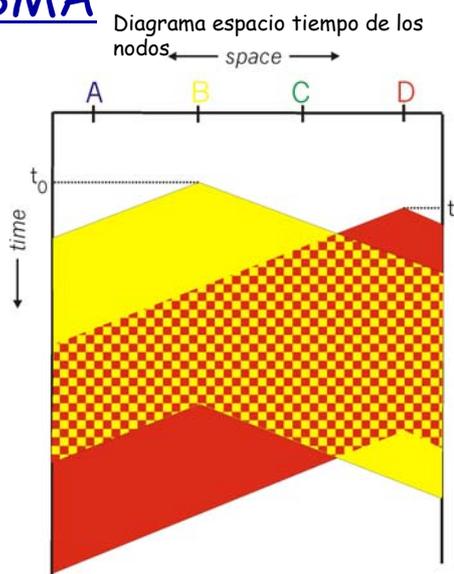
El retraso en la propagación puede hacer que un nodo no oiga a otro

Colisión:

Se malgasta el tiempo en enviar una trama completa

A tener en cuenta:

El papel que desempeñan la distancia y el retraso en la propagación para determinar la probabilidad de colisión



CSMA/CD (Detección de Colisión)

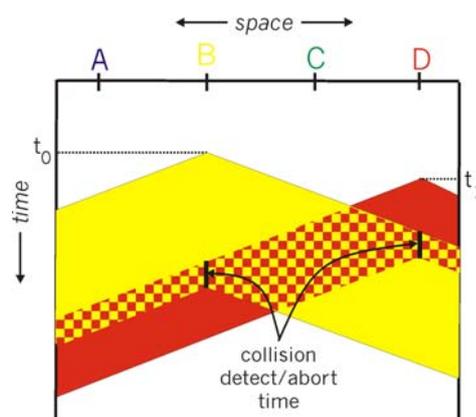
CSMA/CD: detección de portadora, diferida como en CSMA

- Las colisiones se detectan en menos tiempo
 - Se aborta la transmisión que causa la colisión con lo que se malgasta menos el canal.
- ❖ Detección de colisión:
- Sencillo en LANs cableadas: medir la potencia de la señal, comparar la transmitida, señales recibidas
 - Difícil en LANs inalámbricas: la potencia de la señal transmitida enmascarada por la potencia de la transmisión local
- ❖ Analogía: conversación educada

V2.0

Capa de enlace 5-31

CSMA/CD detección de colisión



V2.0

Capa de enlace 5-32

Protocolos MAC de toma de turnos

Protocolos MAC de reparto del canal:

- Comparten la eficiencia del canal cuando hay alta carga de transmisión
- Ineficientes cuando hay poca carga: retraso en el acceso al canal, $1/N$ ancho de banda incluso cuando solamente hay uno activo.

Protocolos MAC de acceso aleatorio

- Eficientes con baja carga: un único nodo puede usar todo el canal.
- Alta carga: muchas colisiones

Protocolos de toma de turnos

Toman lo mejor de las dos aproximaciones

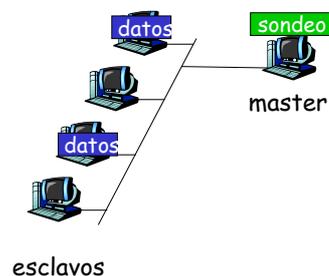
Capa de enlace 5-33

V2.0

Protocolos de toma de turnos (I)

Sondeo:

- ❖ El nodo maestro invita a transmitir a los nodos esclavos
- ❖ Se emplea típicamente con nodos tontos
- ❖ A tener en cuenta:
 - Tiempo que se tarda en sondear.
 - Latencia
 - Un único punto de fallo: el maestro



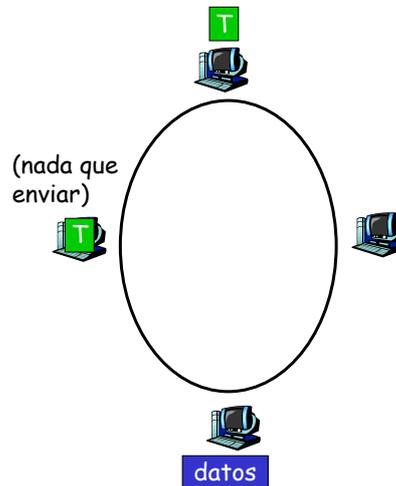
Capa de enlace 5-34

V2.0

Protocolos de toma de turnos (II)

Paso de testigo:

- ❖ Una trama especial "testigo" es intercambiada de un nodo al siguiente
- ❖ El "testigo" es un mensaje
- ❖ A tener en cuenta:
 - Tiempo de paso del "testigo"
 - Latencia
 - Único punto de fallo (el "testigo")



Resumen de los protocolos MAC

- ❖ **Reparto del canal**, por tiempo o frecuencia
 - División en el tiempo, división en frecuencia.
- ❖ **Acceso aleatorio** (dinámico),
 - ALOHA, ALOHA ranurado, CSMA, CSMA/CD
 - Sondeo de la portadora: sencillo en algunas tecnologías (redes cableadas), complicada en otras (inalámbricas)
 - CSMA/CD se emplea en Ethernet
 - CSMA/CA se usa en 802.11
- ❖ **Toma de turnos**
 - Sondeo desde un sitio central, paso de testigo
 - Bluetooth, FDDI, IBM Token Ring

Capa de enlace

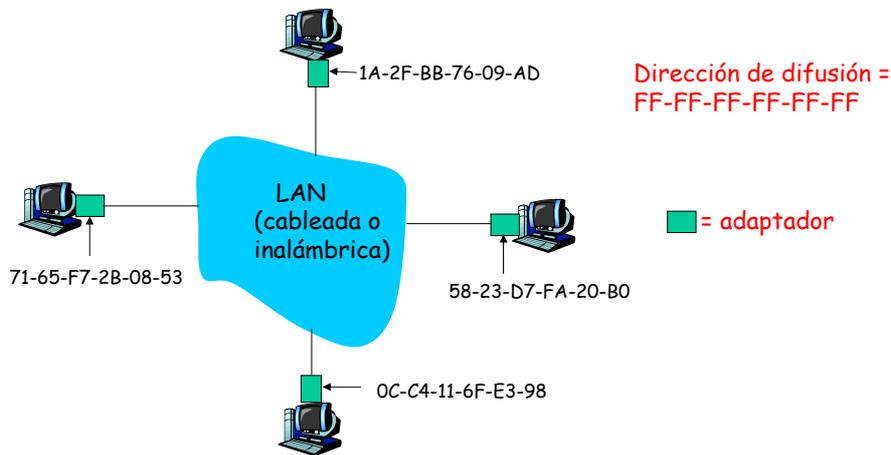
- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Corrección y detección de errores
- 5.3 Protocolos de acceso múltiple
- 5.4 **Direccionamiento de la capa de enlace**
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Conmutadores de la capa de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Enlaces virtuales: MPLS
- 5.9 Un día en la vida de una solicitud Web

Direcciones MAC y ARP (I)

- ❖ Dirección IP de 32 bits:
 - *Dirección de la capa de red*
 - Usada para hacer llegar el datagrama a la subred IP destino
- ❖ Dirección MAC (o LAN o física o Ethernet):
 - función: *llevar la trama de una interfaz a otra físicamente conectada (la misma red)*
 - Dirección MAC de 48 bits (para la mayoría de LANs)
 - Impresa en la ROM de la tarjeta de red; alguna vez puede ser configurada por software

Direcciones MAC y ARP (II)

Cada adaptador de una LAN tiene una única dirección LAN



V2.0

Capa de enlace 5-39

Dirección LAN (y más)

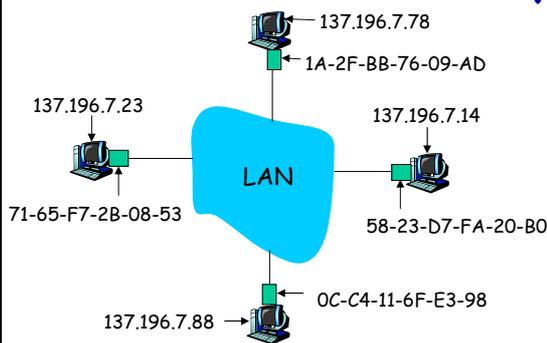
- ❖ IEEE administra la asignación de direcciones MAC
- ❖ Los fabricantes compran parte del espacio de direcciones MAC para asegurar que son únicas
- ❖ Analogía:
 - (a) Dirección MAC: Número de la Seguridad Social
 - (b) Dirección IP: Código postal
- ❖ Dirección MAC -> portabilidad
 - Se puede mover la tarjeta adaptadora de una LAN a otra
- ❖ La jerarquía de direcciones IP no es portátil
 - Las direcciones IP dependen de la subred en la que están conectados los equipos

V2.0

Capa de enlace 5-40

ARP: Protocolo de Resolución de Direcciones

¿Cómo determinar la dirección MAC de B a partir de la Dirección IP de B?



V2.0

Capa de enlace 5-41

- ❖ Cada nodo IP (host, router) de una LAN tiene una tabla **ARP**
- ❖ Tabla ARP: Asignación de direcciones IP/MAC de algunos nodos de la red

< Dirección IP; Dirección MAC; TTL >

- TTL (Time To Live): tiempo en el que olvidar esa asociación (normalmente 20 minutos)

Protocolo ARP: dentro de la misma LAN

- ❖ A quiere enviar un datagrama a B, y la dirección MAC de B no está en la tabla ARP de A.
- ❖ Se difunde un paquete de consulta ARP conteniendo la dirección IP de B
 - Dirección destino MAC = FF-FF-FF-FF-FF-FF
 - Todas las máquinas de la LAN reciben el paquete
- ❖ B recibe el paquete ARP, responde a A con su dirección MAC
 - La trama se envía únicamente a A
- ❖ A guarda la dirección IP de B en su tabla ARP hasta que no sea necesaria.
 - Información que se descartará salvo que sea refrescada.
- ❖ ARP es "plug-and-play":
 - Los nodos crean su tabla ARP sin intervención del administrador de red

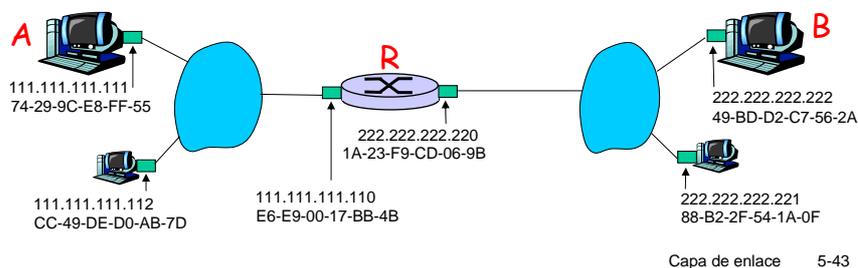
V2.0

Capa de enlace 5-42

Direccionamiento: enrutado a otra LAN

Enviar un datagrama de A a B a través de R

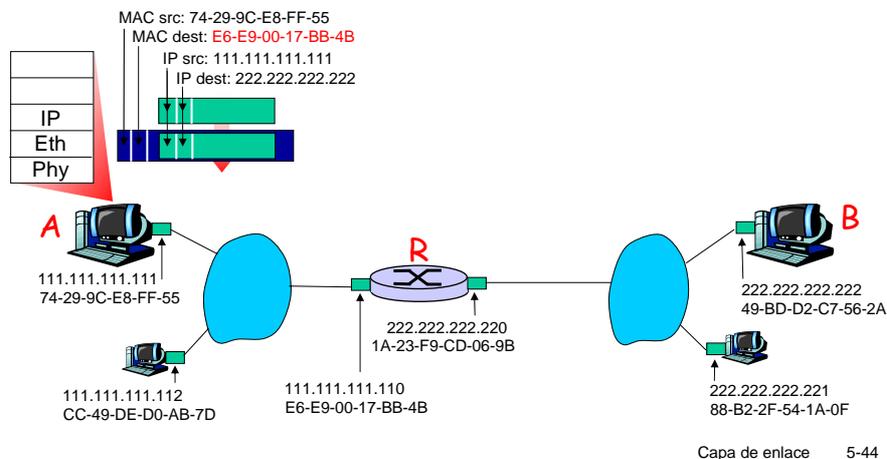
- Centrarse en el direccionamiento- ambos IP (datagrama) y capa MAC (trama)
- A conoce la dirección IP de B
- A conoce la dirección MAC de B
- A conoce la dirección del primer router del primer salto, R
- A conoce la dirección MAC del router del primer salto



V2.0

Direccionamiento: enrutado a otra LAN

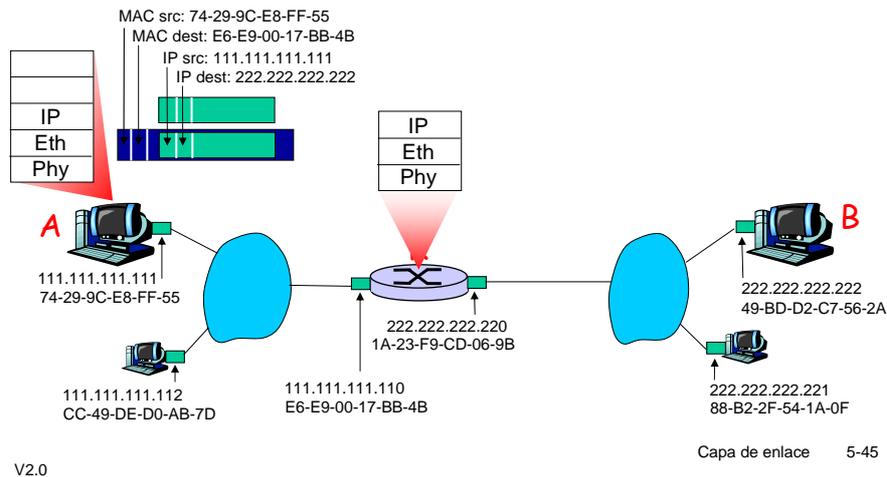
- ❖ A crea un datagrama IP con la dirección IP origen de A, destino B
- ❖ A crea una trama con la dirección MAC de R como destino, la trama contiene el datagrama IP de A a B



V2.0

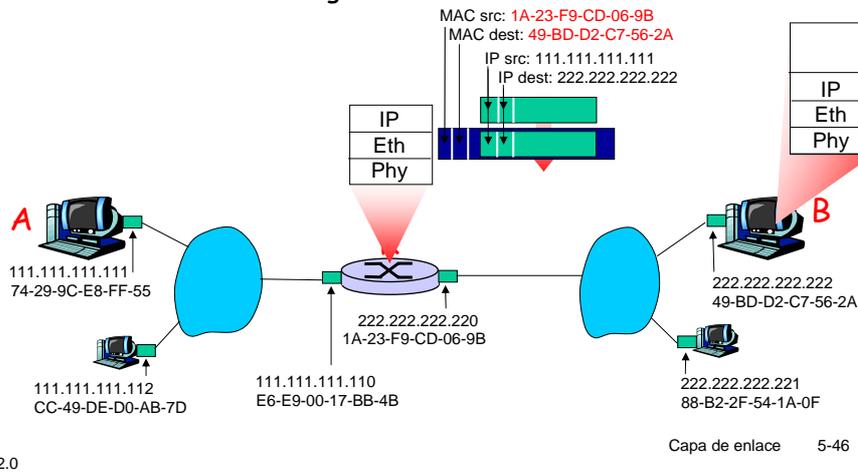
Direccionamiento: enrutado a otra LAN

- ❖ Trama enviada de A a R
- ❖ Trama recibida en R, se extrae el datagrama y se pasa a IP



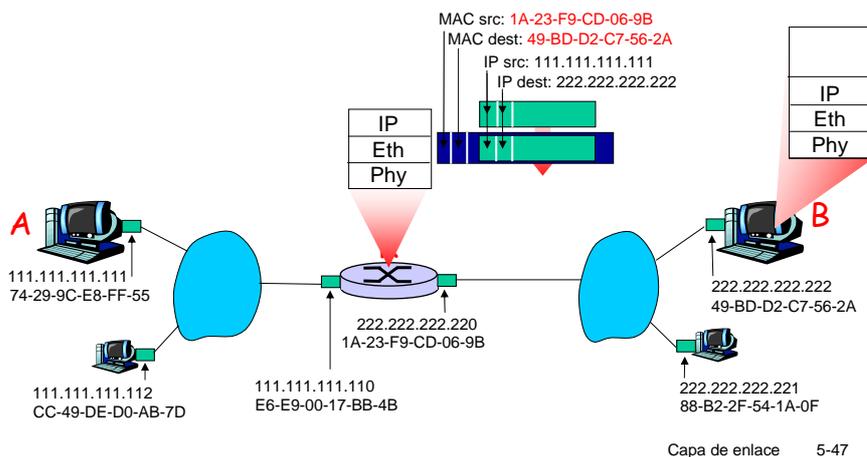
Direccionamiento: enrutado a otra LAN

- ❖ R reenvía el datagrama con dirección IP origen de A y destino B
- ❖ R crea una trama con la dirección MAC de B como destino, la trama contiene el datagrama IP de A a B



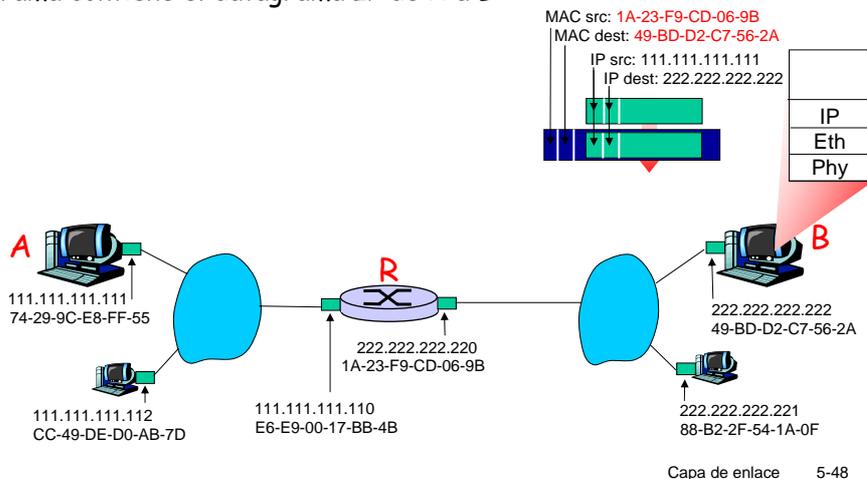
Direccionamiento: enrutado a otra LAN

- ❖ R reenvía el datagrama con dirección IP origen de A y destino B
- ❖ R crea una trama con la dirección MAC de B como destino, la trama contiene el datagrama IP de A a B



Direccionamiento: enrutado a otra LAN

- ❖ R reenvía el datagrama con dirección IP origen de A y destino B
- ❖ R crea una trama con la dirección MAC de B como destino, la trama contiene el datagrama IP de A a B



Capa de enlace

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Corrección y detección de errores
- 5.3 Protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de la capa de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Conmutadores de la capa de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Enlaces virtuales: MPLS
- 5.9 Un día en la vida de una solicitud Web

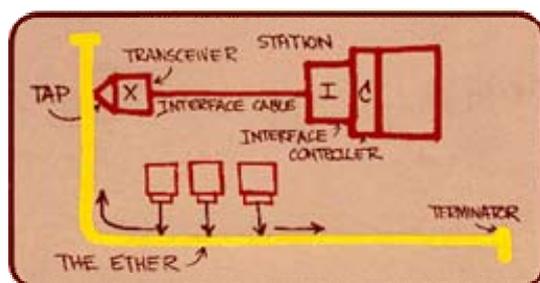
V2.0

Capa de enlace 5-49

Ethernet

Tecnología LAN cableada "dominante":

- ❖ Barata: 20 euros por tarjeta
- ❖ Primera tecnología LAN usada ampliamente
- ❖ Más simple y barata que las de "token-ring" o ATM
- ❖ Velocidades entre 10 Mbps y 10 Gbps



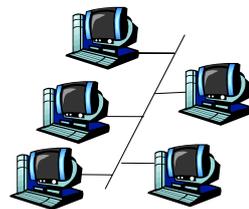
Esquema Ethernet de Metcalfe

V2.0

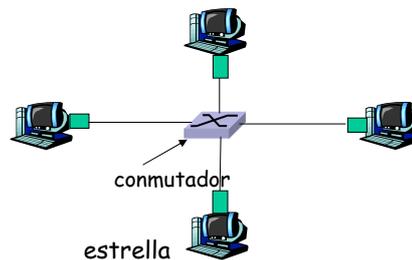
Capa de enlace 5-50

Topología en estrella

- ❖ La topología en bus fue popular en los 90
 - Todos los nodos en el mismo dominio de colisión (pueden colisionar con cualquier otro)
- ❖ Hoy: prevalece la topología en estrella
 - *Conmutador* activo en el centro
 - Cada rama ejecuta de manera separada un protocolo Ethernet (los nodos no colisionan con ningún otro)



bus: cable coaxial

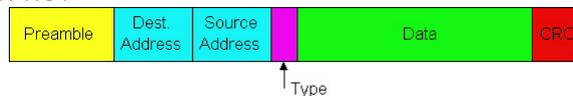


Capa de enlace 5-51

V2.0

Estructura de trama Ethernet (I)

El adaptador emisor encapsula el datagrama IP (u otro paquete del nivel de red) en una **trama Ethernet**



Preámbulo:

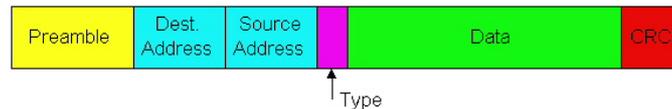
- ❖ 7 bytes con el patrón 10101010 seguido de un byte con el patrón 10101011
- ❖ se emplea para sincronizar los relojes del emisor y del receptor

Capa de enlace 5-52

V2.0

Estructura de trama Ethernet (II)

- ❖ **Direcciones:** 6 bytes
 - Si el adaptador recibe una trama con la dirección destino, o con una dirección de difusión (ej. Un paquete ARP) pasará los datos de la trama al protocolo de nivel de red.
 - En otro caso el adaptador descartará la trama
- ❖ **Tipo:** indica el protocolo de nivel de red (la mayoría IP pero otros como Novell IPX, AppleTalk también son posibles)
- ❖ **CRC:** se comprueba en recepción, si se detecta que hay error la trama se descarta.



V2.0

Capa de enlace 5-53

Ethernet: servicio sin conexión, no fiable

- ❖ **Servicio sin conexión:** No existe un protocolo de "handshaking" entre los NICs emisor y receptor.
- ❖ **No fiable:** el NIC receptor no envía ni acks ni nacks al NIC emisor.
 - Los datagramas que se pasan al nivel de red pueden tener huecos (datagramas que se pierden)
 - Los huecos se llenan si se emplea TCP y la aplicación no se entera de que se ha retransmitido
 - Si se usa otro protocolo, ej UDP, la aplicación ve los huecos
- ❖ Protocolo MAC de Ethernet: **CSMA/CD no ranurado**

V2.0

Capa de enlace 5-54

Algoritmo CSMA/CD de Ethernet (I)

1. NIC recibe el datagrama del nivel de red y crea la trama
2. Si el NIC ve el canal libre comienza la transmisión de la trama. Si ve que está ocupado espera hasta que el canal queda libre y entonces transmite.
3. Si el NIC transmite la trama completa sin detectar otra transmisión da por terminada la transmisión de la trama
4. Si el NIC detecta otra transmisión envía de dejar de enviar la trama y envía una señal de interferencia
5. Tras abortar el NIC entra en una **espera exponencial**: tras la n -ésima colisión, el NIC elige un k aleatorio del intervalo $\{0,1,2,\dots,2^m-1\}$, donde $m = \min(n, 10)$. El NIC esperará el tiempo de transmisión de $512 \cdot k$ bits y vuelve al paso 2.

V2.0

Capa de enlace 5-55

Algoritmo CSMA/CD de Ethernet(II)

Señal de interferencia: para garantizar que otros transmisores se enteran de la colisión; 48 bits

Tiempo de transmisión de bit
0,1 microsegundos en Ethernet de 10 Mbps; si $K=1023$, el tiempo de espera será de ≈ 52 microsegundos

Espera exponencial:

- ❖ **Objetivo:** adaptar los intentos de retransmisión a la carga actual de trabajo
 - Carga alta: el valor aleatorio será mayor
- ❖ Primera colisión: elige K entre $\{0,1\}$; espera $K \cdot 512$
- ❖ Después de la segunda colisión : elige K entre $\{0,1,2,3\}$...
- ❖ Después de 10 colisiones o más, escoge K entre $\{0,1,2,3,4,\dots,1023\}$

V2.0

Capa de enlace 5-56

Eficiencia del protocolo CSMA/CD

❖ T_{prop} = máximo tiempo de retardo entre dos nodos de la LAN

❖ t_{trans} = tiempo para transmitir una trama de tamaño máximo

$$efficiency = \frac{1}{1 + 5t_{prop}/t_{trans}}$$

❖ La eficiencia tiende a 1

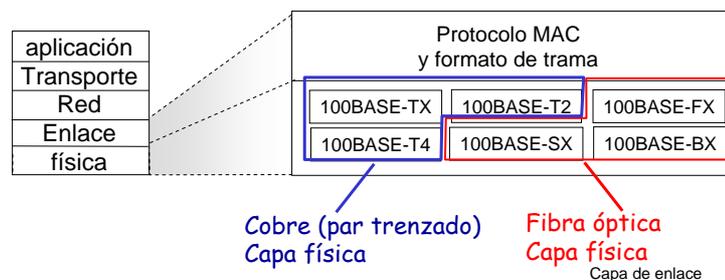
- Si t_{prop} tiende a 0
- Si t_{trans} tiende a infinito

❖ Mejor rendimiento que el ALOHA: además es simple, barato y descentralizado

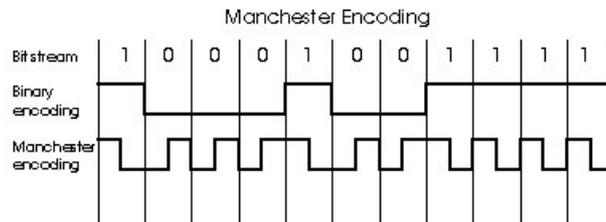
Estándares Ethernet 802.3 : capas física y de enlace

❖ Existen *muchos* estándares Ethernet diferentes

- El formato de trama y el protocolo MAC son comunes
- Diferentes velocidades: 2 Mbps, 10 Mbps, 100 Mbps, 1Gbps, 10G bps
- Diferente capa física: fibra óptica, cable



Codificación Manchester



- ❖ Empleada en 10BaseT
- ❖ Cada bit tiene una transición
- ❖ Permite la sincronización de los relojes en los nodos emisor y receptor
 - No requiere un reloj centralizado entre nodos

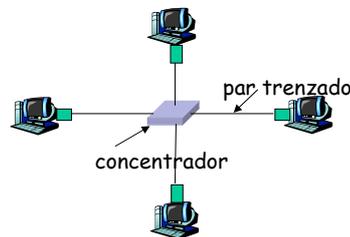
Capa de enlace

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Corrección y detección de errores
- 5.3 Protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de la capa de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Conmutadores de la capa de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Enlaces virtuales: MPLS
- 5.9 Un día en la vida de una solicitud Web

Concentradores

Actúan a nivel físico; solamente son repetidores:

- Los bits que llegan por un enlace se retransmiten por los otros a la misma velocidad
- Todos los nodos conectados al concentrador pueden colisionar entre ellos
- No tiene buffer de tramas
- No CSMA/CD en el concentrador: El NIC del nodo detecta las colisiones



V2.0

Capa de enlace 5-61

Conmutador

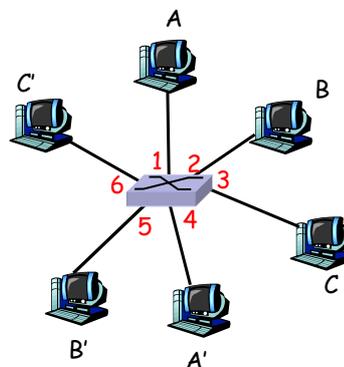
- ❖ **Dispositivo de la capa de enlace: tiene un papel activo, es más inteligente que el concentrador**
 - Almacena y reenvía tramas Ethernet
 - Examina las direcciones MAC que le llegan, reenvía **selectivamente** la trama por uno o más enlaces cuando esta debe ser reenviada, emplea CSMA/CD para acceder al segmento
- ❖ **Transparente**
 - Los hosts no se enteran de si hay conmutadores
- ❖ **Plug-and-play, autoaprendizaje**
 - Los conmutadores no requieren configuración

V2.0

Capa de enlace 5-62

Conmutador: permite transmisiones simultáneas múltiples

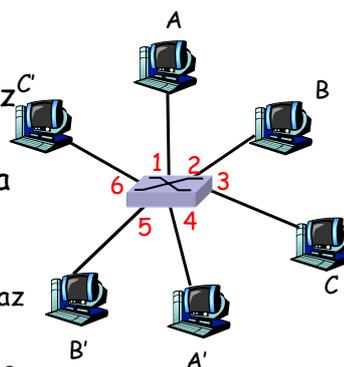
- ❖ Los hosts tienen una conexión directa dedicada con el conmutador
- ❖ Conmutador almacena paquetes
- ❖ Emplea protocolo Ethernet en cada enlace de llegada pero sin colisión; es full duplex
- ❖ **Conmutando:** De A-a-A' y de B-a-B' simultáneamente, sin colisiones
 - No es posible con concentradores



Conmutador con seis interfaces (1,2,3,4,5,6)

Tabla de conmutación

- ❖ **P:** ¿Cómo sabe el conmutador que a A' se llega por la interfaz 4 y a B' por la 5?
- ❖ **R:** Cada conmutador posee una **tabla de conmutación**, cada entrada de la tabla tiene:
 - (Dirección MAC del host, interfaz para llegar al host, hora actual)
- ❖ Similar a una tabla de enrutado
- ❖ **P:** ¿Cómo se crean y mantienen las entradas?

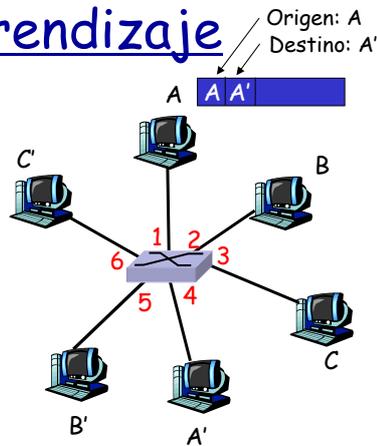


conmutador con seis interfaces (1,2,3,4,5,6)

Conmutador: autoaprendizaje

❖ El conmutador **aprende** a través de qué enlaces puede ser alcanzado el host.

- Cuando llega la trama el conmutador "aprende" la localización del emisor: segmento LAN de llegada
- Almacena la tupla emisor/localización en la tabla del conmutador



Dire. MAC	Interfaz	TTL
A	1	60

Tabla del conmutador (inicialmente vacía)

Conmutador: filtrado de tramas y reenvío

Cuando se recibe la trama:

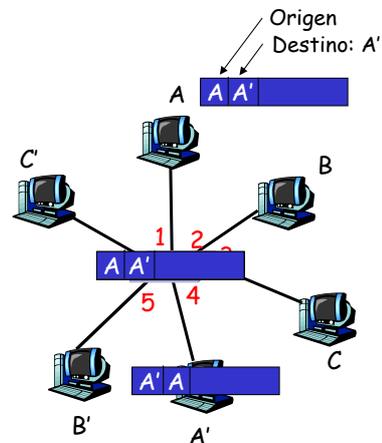
1. Almacena el enlace asociado al host emisor
 2. Ordena la tabla del conmutador empleando la dirección MAC destino
 3. **SI** se encuentra la entrada para el destino **ENTONCES** {
 - SI** destino pertenece al segmento de la trama que llega
 - ENTONCES** descartar la trama
 - SI NO**, reenviar la trama por la interfaz requerida
- } **SI NO**, difundir

Reenviar por todos menos por donde llega

Autoaprendizaje, Ejemplo de reenvío

- ❖ Destino de la trama
- ❖ desconocido: *difundir*
- ❖ Destino A conocido:

Envío selectivo



Dire. MAC	Interfaz	TTL
A	1	60
A'	4	60

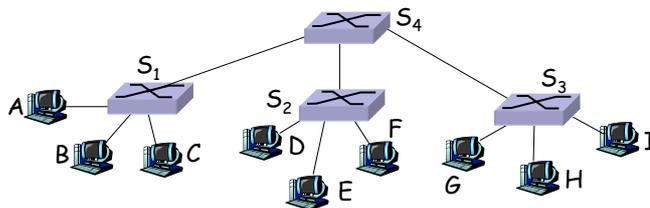
*Tabla del conmutador
(inicialmente vacía)*

Capa de enlace 5-67

V2.0

Interconectando conmutadores

- ❖ Los conmutadores pueden conectarse a otros



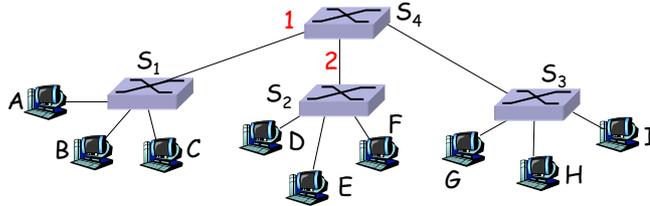
- ❖ *P:* para el envío de A a G - ¿cómo sabe S₁ que debe reenviar la trama destino a G via S₄ y S₃?
- ❖ *R:* Autoaprendizaje (funciona exactamente igual que para el caso de un único conmutador)

Capa de enlace 5-68

V2.0

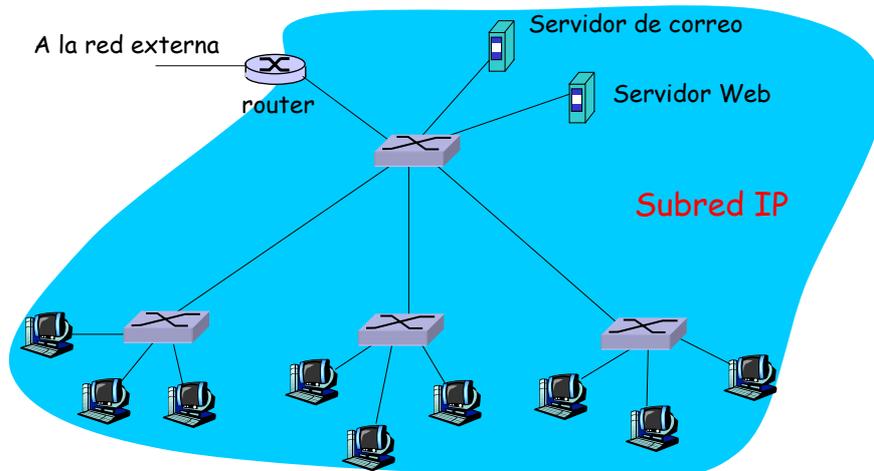
Ejemplo de autoaprendizaje multiconmutador

Supongamos que C envía una trama a I, e I responde a C



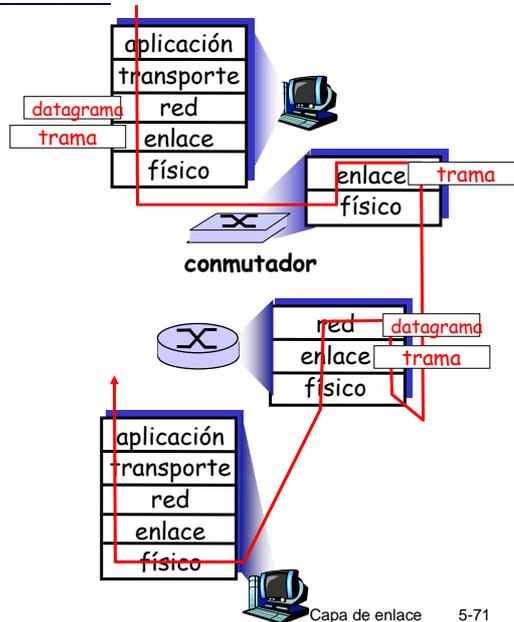
- ❖ **P:** mostrar las tablas del conmutador y el reenvío de paquetes para S₁, S₂, S₃, S₄

Red institucional



Conmutadores vs. Routers

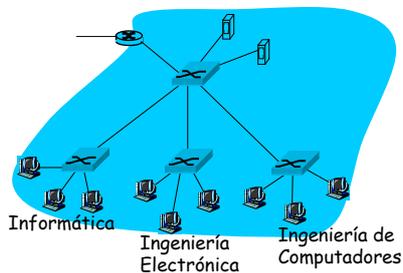
- ❖ Ambos almacenan y reenvían
 - routers: capa de red (examina cabeceras de la capa de red)
 - conmutadores capa de enlace (examina cabeceras de enlace)
- ❖ routers mantienen las tablas de reenvío e implementan algoritmos de enrutamiento
- ❖ conmutadores mantienen tablas de conmutación, implementan filtros y algoritmos de autoaprendizaje



V2.0

VLANs: motivación

¿Qué error hay en este esquema?



¿Qué ocurre si:

- ❖ Un usuario de Informática cambia el despacho a Electrónica pero quiere seguir conectado a Informática?
- ❖ Difusión en un dominio único:
 - Todo el tráfico de la capa 2 (ARP, DHCP) cruza la LAN entera (seguridad/privacidad, eficiencia)
- ❖ Cada conmutador de más bajo nivel tiene muy pocos puertos en uso

V2.0

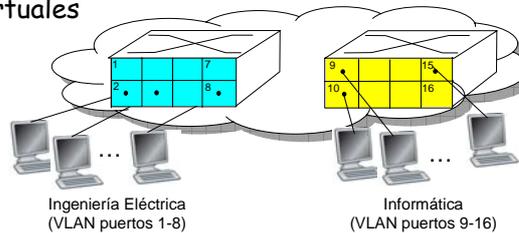
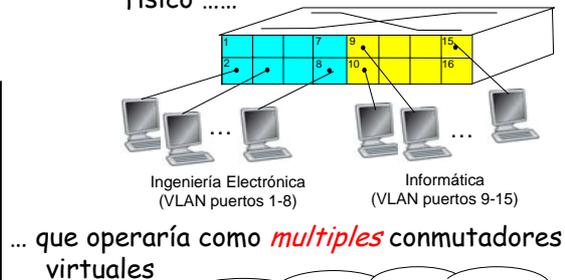
Capa de enlace 5-72

VLANs

Virtual Local Area Network

conmutador(es) que soportan capacidades VLAN pueden configurarse para definir múltiples LANS **virtuales** sobre una única estructura de LAN física

VLAN basada en puertos: puertos del conmutador agrupados (por el software del conmutador) tendríamos un único conmutador físico



Capa de enlace 5-73

V2.0

VLAN basada en puertos

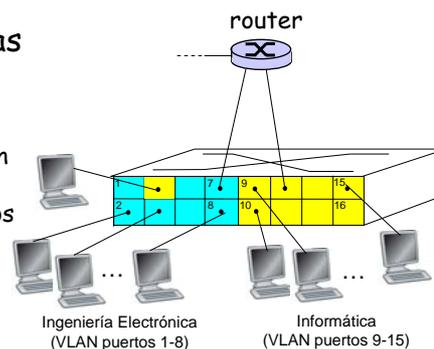
❖ **Aislamiento de tráfico:** tramas hacia/desde puertos 1-8 solo alcanzan puertos 1-8

- Se pueden definir VLAN basadas en las direcciones MAC de los puertos finales en vez de basarse en puertos

❖ **Pertenencia dinámica:** puertos pueden asignarse dinámicamente entre VLANs

❖ **Reenvío entre VLANs:** a través de routers como si se tratase de conmutadores separados

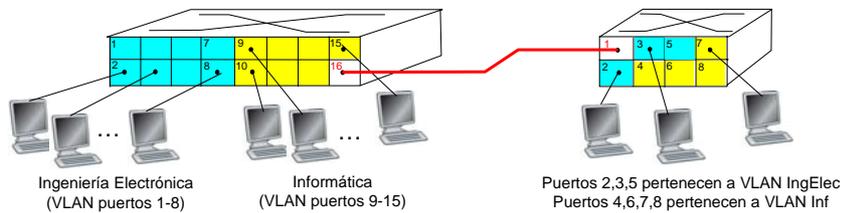
- En la práctica se venden dispositivos combinados de conmutación y de enrutado



Capa de enlace 5-74

V2.0

VLANS expandiendo múltiples conmutadores

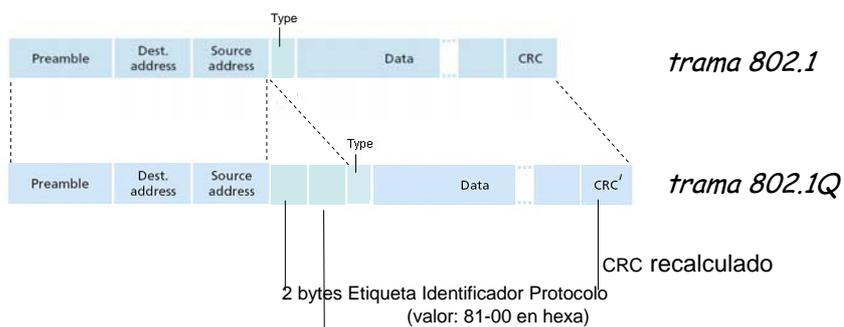


- ❖ **Troncalización de puertos:** las tramas se envían sobre VLANs definidas sobre múltiples conmutadores
 - Las tramas reenviadas dentro de la VLAN entre conmutadores no pueden ser tramas 802.1 (deben tener información de la identidad de la VLAN)
 - El protocolo 802.1Q añade/elimina añade cabeceras adicionales a las tramas enviadas a través de puertos troncales

V2.0

Capa de enlace 5-75

Formato de trama 802.1Q VLAN



Etiqueta Información de Control (campo de 12 bit VLAN ID, campo de prioridad de 3 bits similar a campo TOS de los datagramas IP y 1 bit que indica si la trama podría descartarse en caso de congestión)

V2.0

Capa de enlace 5-76

Capa de enlace

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Corrección y detección de errores
- 5.3 Protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de la capa de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Conmutadores de la capa de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Enlaces virtuales: MPLS
- 5.9 Un día en la vida de una solicitud Web

Control de enlace de datos punto a punto

- ❖ Un emisor, un receptor, un enlace: más sencillo que un enlace de difusión
 - Sin Control de Acceso al Medio
 - No requiere direccionamiento MAC explícito
 - ej., enlace telefónico, línea RDSI
- ❖ Protocolos PPP populares:
 - PPP (protocolo punto a punto)
 - HDLC: High level data link control (el enlace de datos se trata como una capa superior)

PPP Requisitos de diseño [RFC 1557]

- ❖ **Entramado de paquetes:** encapsulado del paquete de red en una trama de enlace
 - Puede llevar datos de red de cualquier protocolo de red, no necesariamente IP
 - Capacidad de desmultiplexación del protocolo
- ❖ **Transparencia:** no puede prohibir ningún patrón de bits en el campo de datos
- ❖ **Detección de errores** (pero no corrección)
- ❖ **Pervivencia de la conexión:** detecta fallo en la capa de enlace y avisa al de red
- ❖ **Negociación de la dirección de red:** los puntos finales deben aprender / configurar las otras direcciones de red

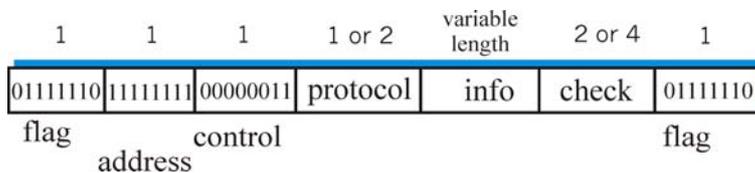
Requisitos no contemplados por PPP

- ❖ No tiene corrección / recuperación de errores
- ❖ No tiene control de flujo
- ❖ No requiere secuenciamiento. Las tramas pueden llegar en distinto orden
- ❖ No necesita soporte para enlace multipunto.

Recuperación de errores, control de flujo, reordenamiento de datos se relegan a capas superiores

Trama de datos PPP (I)

- ❖ **Campo indicador (flag):** delimitador
- ❖ **Dirección:** tiene un único valor posible
- ❖ **Control:** también tiene un único valor. Está presente para ampliaciones futuras
- ❖ **Protocolo:** a qué protocolo de la capa superior pertenece la trama entregada (ej., PPP-LCP, IP, IPCP, etc)

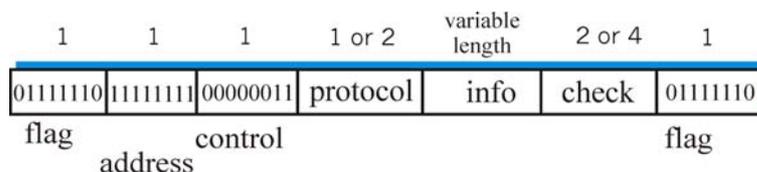


V2.0

Capa de enlace 5-81

Trama de datos PPP (II)

- ❖ **info:** el paquete de datos encapsulado
- ❖ **Suma de comprobación (check):** código de redundancia cíclica estándar para detección de errores



V2.0

Capa de enlace 5-82

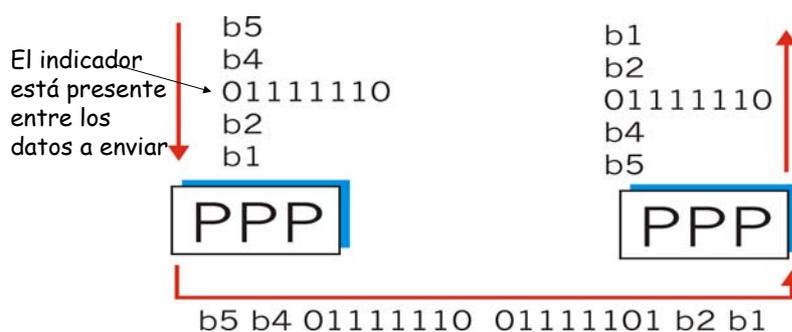
Rellenado de bytes (I)

- ❖ Requisito de transparencia de datos: el campo de datos debe permitir la inclusión del campo indicador (flag) <01111110>
 - **P:** ¿Qué se recibe <01111110>+ datos o indicador?
- ❖ **Emisor:** añade el byte extra < 01111101> de escape. Después de cada byte < 01111101> *data*
- ❖ **Receptor:**
 - Dos 01111101 bytes en una fila: descarta el primero (escape), se queda con el segundo y sigue admitiendo bytes de datos
 - Un único 01111110: se trata del campo indicador

V2.0

Capa de enlace 5-83

Rellenado de bytes (II)



Se añade el "escape" para que el receptor sepa que el byte que sigue no es "indicador", sino datos válidos

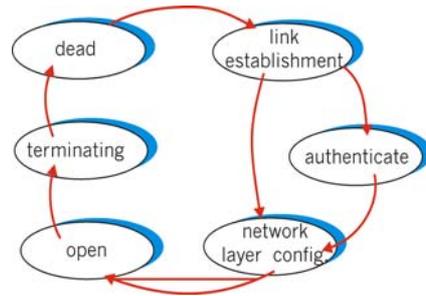
V2.0

Capa de enlace 5-84

Protocolo PPP de control de datos

Antes de intercambiar datos de red, la capa de enlace debe:

- ❖ **Configurar enlace PPP** (máx. longitud de trama, autenticación, prot. 0xc021)
- ❖ **Aprender / configurar red** información de capa
 - Para IP: usar mensajes del Protocolo de Control IP (IPCP) msgs (campo protocolo: 0x8021) para configurar / aprender direcciones IP



V2.0

Capa de enlace 5-85

Capa de enlace

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Corrección y detección de errores
- 5.3 Protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de la capa de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Conmutadores de la capa de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Enlaces virtuales: MPLS**
- 5.9 Un día en la vida de una solicitud Web

V2.0

Capa de enlace 5-86

Virtualización de redes

Virtualización de recursos: es una poderosa abstracción en ingeniería de sistemas:

- ❖ Ejemplos en computadores: memoria virtual, dispositivos virtuales, máquinas virtuales
 - Máquinas virtuales: ej., java
 - Sistema Operativo IBM VM desde 1960's/70's
- ❖ Abstracción en capas: no tratas en detalle con las capas inferiores, solamente te comunicas de manera abstracta con ellas

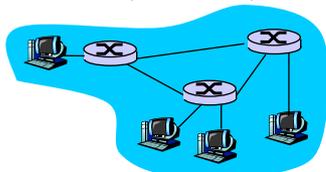
Internet: virtualizando redes (I)

1974: múltiples redes no conexas

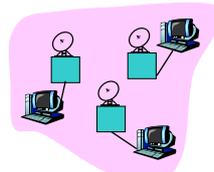
- ARPAnet
- Datos sobre redes cableadas
- Redes de paquetes por satélite (Aloha)
- Redes de paquetes por radio

... difieren en:

- Convenio para las direcciones
- Formato de paquetes
- Recuperación de redes
- enrutado



ARPAnet



Red por satélite

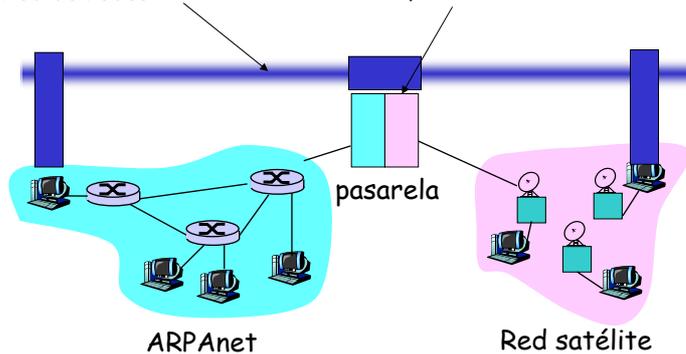
Internet: virtualizando redes (II)

Capa internet (IP):

- ❖ direccionamiento: aparece simple y única a pesar de la heterogeneidad de redes por debajo
- ❖ Red de redes

Pasarela:

- ❖ Encapsula o extrae paquetes de internet en el / al formato de paquetes locales
- ❖ Enruta el paquete a la siguiente pasarela



V2.0

Capa de enlace 5-89

Arquitectura Internet de Cerf y Kahn

¿Qué se virtualiza?

- ❖ Dos capas de direccionamiento: direccionamiento de internet y direccionamiento local
 - ❖ La nueva capa (IP) hace todo homogéneo en la capa de internet
 - ❖ Tecnología de red subyacente
 - cable
 - satélite
 - Modem telefónico a 56k
 - Hoy: ATM, MPLS
- ... Invisible a nivel Internet.

V2.0

Capa de enlace 5-90

ATM y MPLS

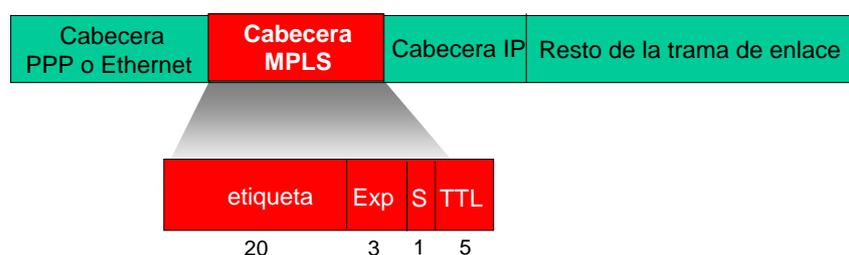
- ❖ ATM, MPLS redes separadas
 - diferentes modelos de servicio, direccionamientos, enrutados de internet
- ❖ Vistos por internet como enlaces lógicos que conectan routers IP
- ❖ ATM, MPLS: presentan interés técnico por sí mismas

Asynchronous Transfer Mode: ATM

- ❖ 1990's/00 estándar para alta velocidad (155Mbps a 622 Mbps y más) arquitectura de *Red Digital de Servicios Integrados de Banda Ancha*
- ❖ **Objetivo: integrar transporte entre extremos de voz, video, datos**
 - temporización/QoS requisitos de voz, video (vs. Internet)
 - Telefonía de próxima generación: nuevos cimientos técnicos en telefonía
 - Conmutación de paquetes (paquetes de longitud fija, llamados "celdas") empleando circuitos virtuales

Conmutación de etiquetas multiprotocolo (MPLS)

- ❖ Objetivo inicial: acelerar envíos IP empleando etiquetas de longitud fija (en lugar de direcciones IP) para realizar el envío
 - Copia ideas de los Circuitos Virtuales (VC)
 - Pero los datagramas IP todavía contienen las direcciones IP



V2.0

Capa de enlace 5-93

MPLS: compatibilidad de routers

- ❖ Se les llama routers de conmutación de etiquetas
- ❖ Envían los paquetes a la interfaz de salida basándose sólo en el valor de la etiqueta (no inspeccionan la dirección IP)
 - La tabla MPLS es diferente a la tabla IP.
- ❖ Se necesita un protocolo de señalización
- ❖ Deben coexistir con routers que solamente tengan compatibilidad IP

V2.0

Capa de enlace 5-94

Tablas MPLS

