Capítulo 5: Capa Enlace de Datos - I

ELO322: Redes de Computadores

Agustín J. González

Este material está basado en:

- Material de apoyo al texto *Computer Networking: A Top Down Approach Featuring the Internet 3rd* edition. Jim Kurose, Keith Ross Addison-Wesley, 2004.

Capítulo 5: La Capa Enlace de Datos

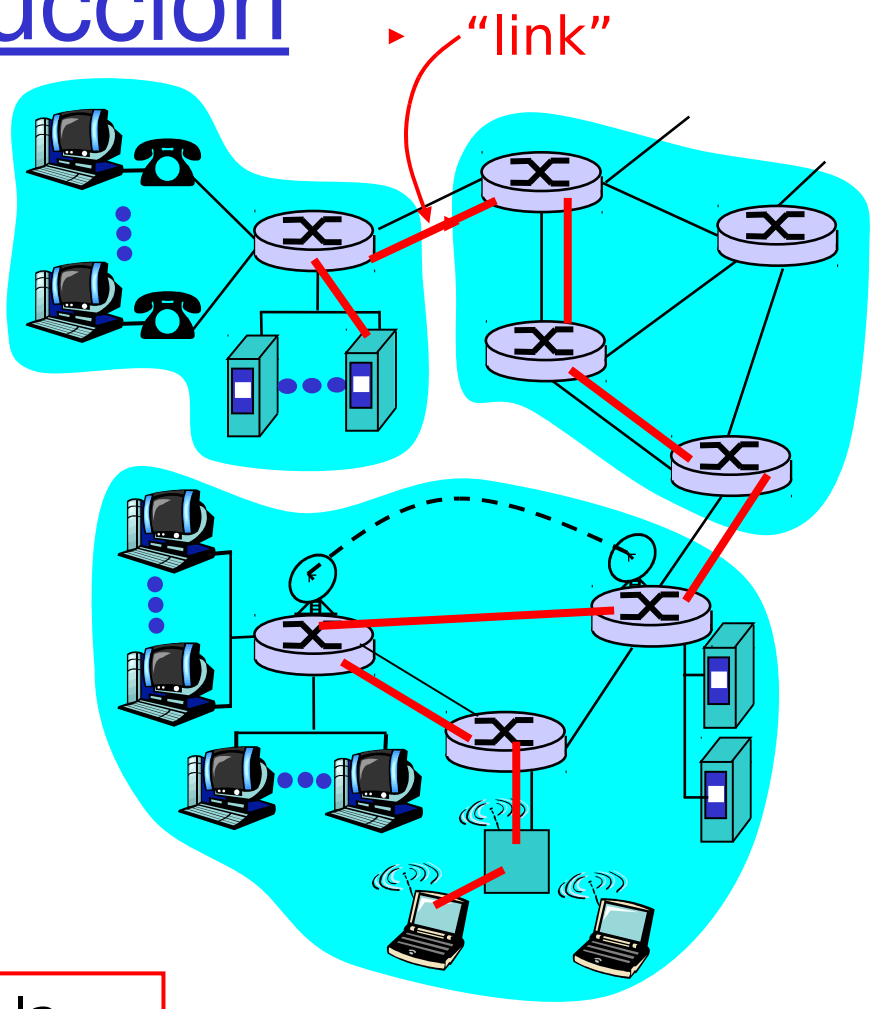
Nuestros objetivos:

- Entender los principios detrás de los servicios de la capa enlace de datos:
  - Detección y corrección de errores
  - Compartición de canales broadcast: acceso múltiple
  - Direccionamiento de la capa enlace
  - Transferencia de datos confiable y control de flujo: *ya lo hicimos!*
- Descripción e implementación de varias tecnologías de enlace

Capa Enlace de Datos

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Detección y corrección de errores
- 5.3 protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de capa enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Hubs y switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Enlaces Virtuales: ATM y MPLS

Capa Enlace: Introducción



Algo de terminología:

- Hosts y routers son **nodos**
- Canales de comunicación que conectan nodos adyacentes a lo largo de un camino de comunicación son **enlaces**
  - Enlaces cableados
  - Enlaces inalámbricos
  - LANs
- El paquete de capa 2 es la **trama (o frame),** encapsula a un datagrama

La capa de enlace de datos tiene la responsabilidad de transferir datagramas desde un nodo al nodo adyacente a través de un enlace

Capa Enlace: contexto

- Los datagramas son transferidos por diferentes protocolos de enlace en diferentes enlaces:
  - e.g., Ethernet en primer enlace, Frame Relay en enlaces intermedios, 802.11 en último enlace.
- Cada protocolo de enlace provee servicios diferentes
  - e.g., puede o no proveer transferencia confiable sobre el enlace

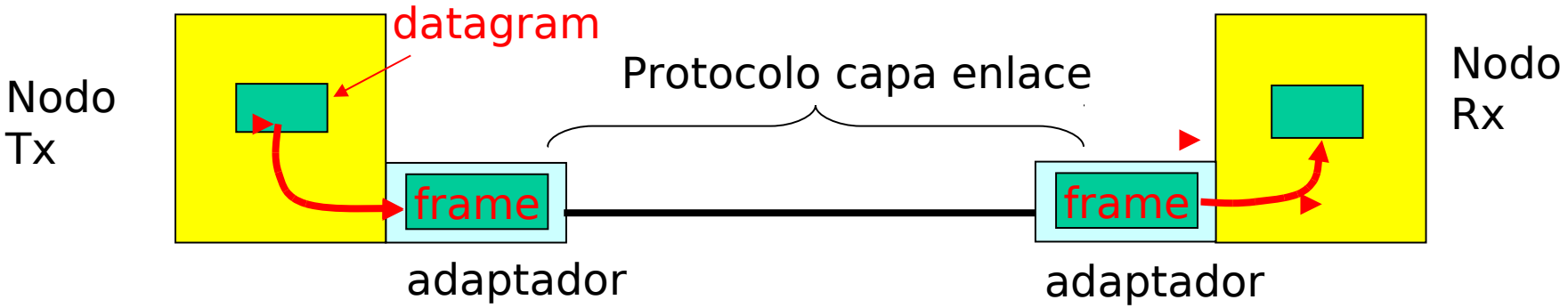
Servicios de Capa Enlace

- Construcción de tramas, acceso al enlace:
  - Encapsula un datagrama en una trama, agregando encabezados y acoplados (header & trailer)
  - Acceso al medio si se trata de un acceso compartido
  - Dirección “MAC” usada en encabezados de tramas para identificar fuente y destino
    - Diferente de dirección IP!
- Entrega confiable entre nodos adyacentes
  - Ya vimos cómo hacer esto (capa transporte)!
  - Raramente usado en enlaces de bajo error de bits (como fibra, algunos pares de cobre trenzados)
  - Enlaces inalámbricos: alta tasa de errores
    - Q: ¿por qué tener confiabilidad a nivel de enlace y extremo a extremo?

Servicios de Capa Enlace (más)

- Control de Flujo:
  - Paso entre nodos transmisor y receptor adyacentes
- Detección de Errores:
  - Errores causados por atenuación de señal y ruido.
  - Receptor detecta presencia de errores:
    - Pide al transmisor retransmisión o descartar la trama
- Corrección de Errores (Forward error correction):
  - Receptor identifica y corrige error(es) de bit(s) sin solicitar retransmisión
- Half-duplex and full-duplex
  - Con half duplex, los nodos de ambos extremos pueden transmitir pero no al mismo tiempo

Adaptadores de comunicación



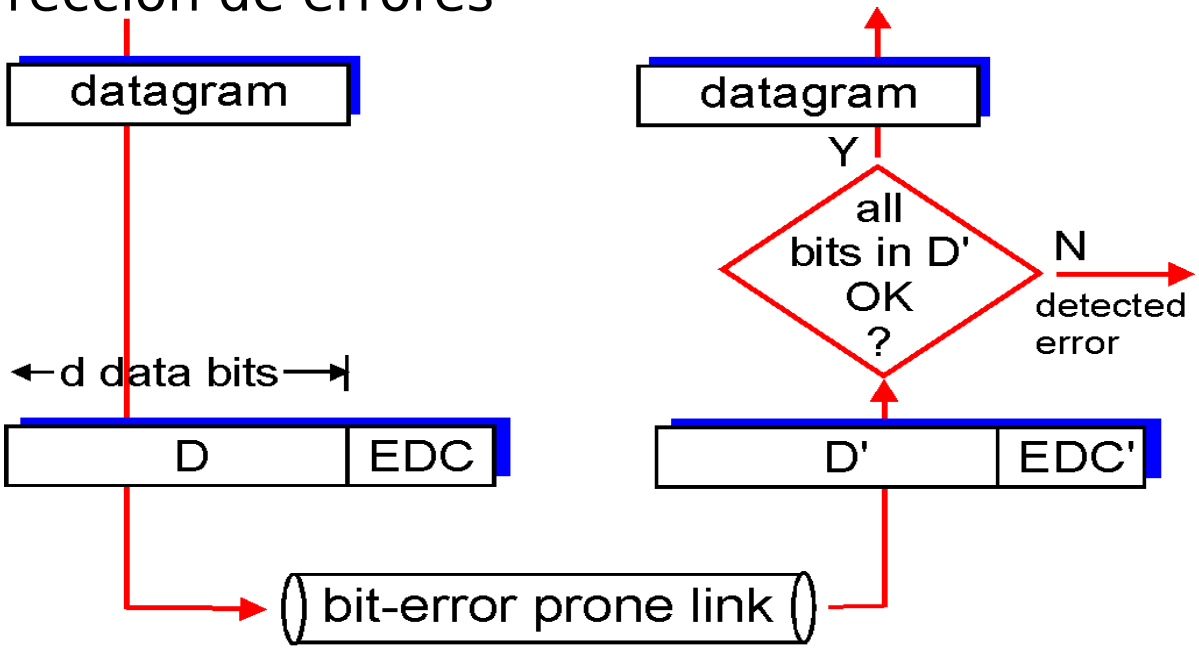
- La capa de enlace es implementada en un “adaptador” (NIC)
  - Tarjetas Ethernet, PCMCI, ó 802.11
- Lado transmisor:
  - Encapsula el datagrama en una trama o frame
  - Agrega bits de chequeo de errores, control de flujo, etc.
- Lado receptor
  - Busca errores, control de flujo, etc
  - Extrae datagrama y lo pasa al nodo receptor
- El adaptador es semi-autónomo
- Capa enlace & capa física

Capa Enlace de Datos

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Detección y corrección de errores (saltado)
- 5.3 protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de capa enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Hubs y switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Enlaces Virtuales: ATM y MPLS

Detección de Errores

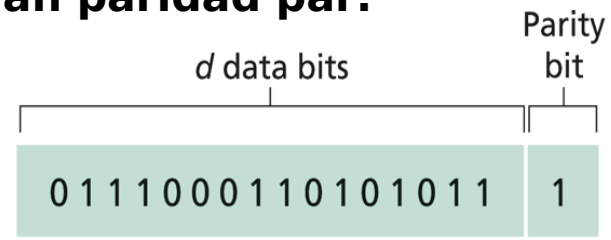
- EDC= Error Detection and Correction bits (redundancia)
- D = Datos protegidos por chequeo de errores podría incluir campos de encabezado
- La detección de errores no es 100% confiable!
  - el protocolo puede saltar algunos errores, pero es raro
  - Campos EDC grandes conducen a mejor detección y corrección de errores



Chequeo de paridad

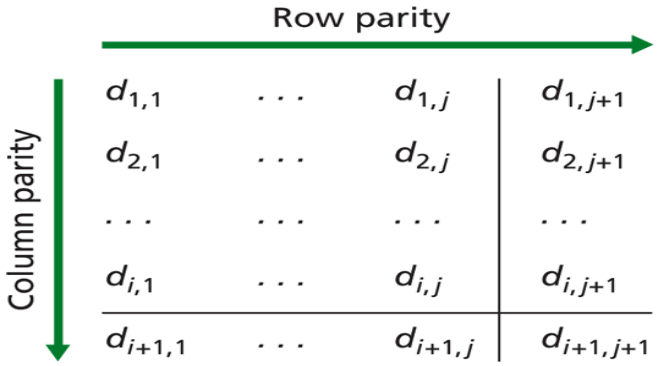
Bit de Paridad Simple:

Detecta errores simples
El bit de paridad es tal para completar un número par o impar de bits en uno.
Decimos que usamos paridad par o impar respectivamente.
Los ejemplos mostrados dan paridad par.



Bit de paridad de dos dimensiones:

Detecta y *corrige* errores simples



No errors

1	0	1	0	1	1
1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0

Correctable single-bit error

1	0	1	0	1	1
1	0	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0

Parity error

Parity error

Cheksum de Internet

Objetivo: detectar “errores” (e.g., bit invertidos) en segmentos transmitidos (nota: típicamente usado en capa transporte)

Transmisor:

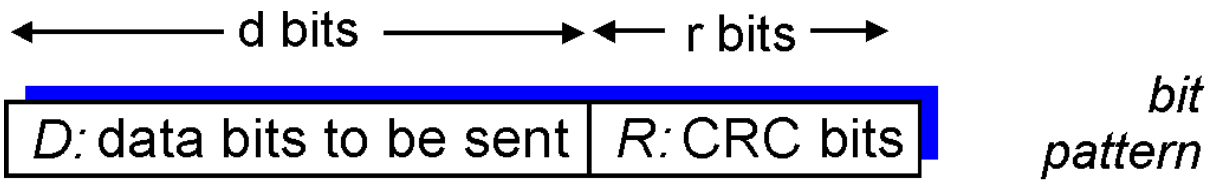
- Trata el contenido de los segmentos como una secuencia de enteros de 16 bits
- checksum: suma del contenido del segmento (complemento 1 de la suma)
- Tx pone el valor del checksum en el campo correspondiente de UDP o TCP

Receptor:

- Calcula el checksum del segmento recibido
- Chequea si este checksum es igual al campo recibido:
  - NO - error detectado
  - SI - no hay error. *Pero podría haberlo?* Más luego ….

Sumas de chequeo: Chequeo de redundancia cíclica (CRC)

- Ve bits de datos, D, como números binarios
- Se elige un patrón (generador) de r+1 bits, G
- Objetivo: Elegir r bits de CRC, R, tal que:
  - <D,R> sea exactamente divisible por G (en aritmética módulo 2)
  - Rx conoce G, divide <D,R> por G. Si resto es no cero: hay error detectado!
  - Puede detectar secuencias de errores menores que r+1 bits
- Ampliamente usado en la práctica en capa enlace (e.g ATM, HDCL)



$D * 2^r$ XOR R — *mathematical formula*

CRC: Ejemplo

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

Queremos:

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

equivalentemente:

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

equivalentemente:

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

Todas las sumas y restas se hacen dígito por dígito sin carry en aritmética Módulo 2:

(A + B = A – B = A XOR B)

```
101110000 : 1001 = 101011
1001
  101
  000
  1010
  1001
    110
    000
    1100
    1001
     1010
     1001
      011
```

D

G

R

CRC: Ejemplo (cont)

Queremos:

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

```
101110000:1001=101011
1001
  101
  000
  1010
  1001
    110
    000
    1100
    1001
     1010
     1001
      011
```

D

G

R

Verificación:

```
101110011:1001=101011
1001
 0101
 0000
  1010
  1001
   0110
   0000
    1101
    1001
     1001
     1001
      000 = Resto
```

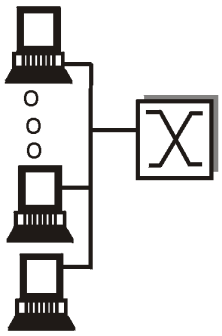
Capa Enlace de Datos

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Detección y corrección de errores
- 5.3 protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de capa enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Hubs y switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Enlaces Virtuales: ATM y MPLS

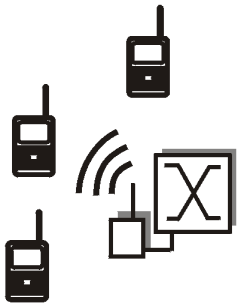
Enlaces y Protocolos de Acceso Múltiple

Dos tipos de “enlaces” :

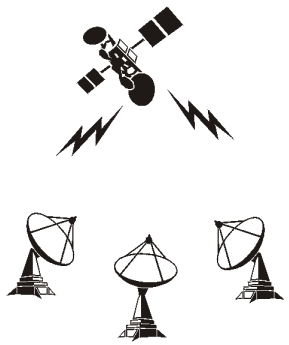
- Punto-a-apunto
  - PPP para acceso discado
  - Enlaces punto-a-punto entre switch Ethernet y host (computador)
- broadcast (cable o medio compartido)
  - Ethernet tradicional
  - Flujo de subida en HFC (***H**ybrid **F**iber **C**oax)*
  - 802.11 LAN inalámbrica



shared wire (e.g. Ethernet)



shared wireless (e.g. Wavelan)



satellite

cocktail party

Protocolos de acceso múltiple

- Usan un canal simple de difusión compartida
- Puede haber dos o más transmisiones simultáneas por nodos: => Interferencia
  - colisión si un nodo recibe dos o más señales al mismo tiempo

Protocolos de acceso múltiple

- Algoritmo distribuido que determinan cómo los nodos comparten el canal, i.e., determina cuándo un nodo puede transmitir
- Son los mensajes para ponerse de acuerdo sobre cómo compartir el mismo canal!
  - no hay canal “fuera de banda” para coordinación

Protocolo de Acceso Múltiple Ideal

Supongamos un canal para broadcast de tasa R bps, Lo IDEAL sería:

1. Cuando un nodo quiere transmitir, éste puede enviar a tasa R.
2. Cuando M nodos quieren transmitir, cada uno puede enviar en promedio a una tasa R/M
3. Completamente descentralizado:
   - No hay nodo especial para coordinar transmisiones
   - No hay sincronización de reloj o ranuras
4. Es simple desearlo, este ideal no existe, pero define el máximo teórico.

Taxonomía de protocolos MAC (Media Access Control)

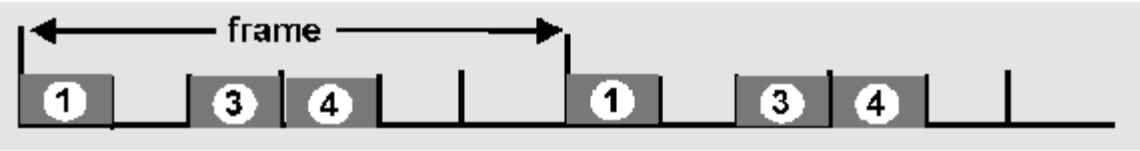
Tres clases amplias:

- Canal Subdividido (“particionado”)
  - Divide el canal en pequeños “pedazos” (ranuras de tiempo, frecuencia, código)
  - Asigna pedazos a un nodo para su uso exclusivo
- Acceso Aleatorio
  - Canal no es dividido, permite colisiones
  - Hay que “recuperarse” de las colisiones
- “Tomando turnos”
  - Los nodos toman turnos, pero nodos con más por enviar pueden tomar turnos más largos

Protocolo MAC en canal subdividido: TDMA

TDMA: time division multiple access

- Acceso a canales es en “rondas"
- Cada estación obtiene una ranura de largo fijo (largo= tiempo transmisión del paquete) en cada ronda
- Ranuras no usadas no se aprovechan
- ejemplo: LAN con 6 estaciones, 1,3,4 tienen paquetes, ranuras 2,5,6 no usadas



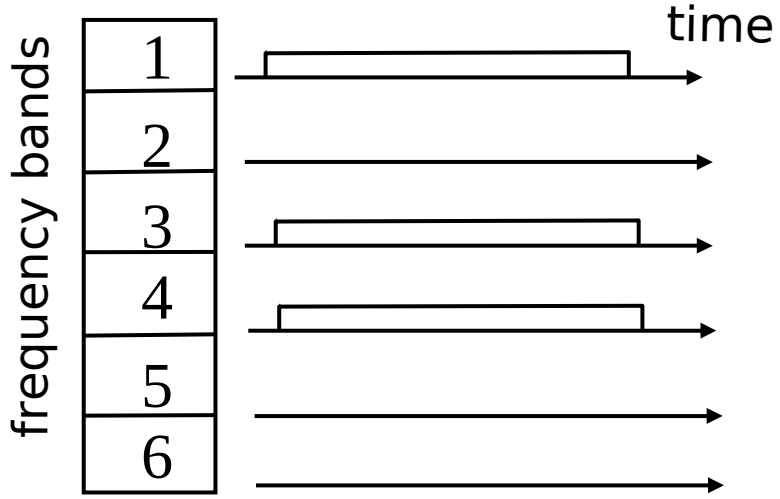
Eje. Reserva de esta sala para clases

Protocolos MAC en canal Subdividido: FDMA

FDMA: frequency division multiple access

- Espectro del canal es dividido en bandas de frecuencia
- Cada estación obtiene una banda de frecuencia fija
- Tiempo de transmisión no usado no es aprovechado
- Ejemplo: LAN de 6 estaciones, 1,3,4 tiene paquetes, bandas de frecuencias 2,5,6 no se aprovechan

Ej: Canales de televisión



Protocolos de Acceso Aleatorio

- Cuando un nodo tiene paquetes que enviar
  - Transmite a la tasa máxima del canal R.
  - No hay coordinación entre nodos
- Si dos o más nodos transmiten se produce “colisión”
- Protocolos de acceso aleatorio especifican:
  - Cómo detectar colisiones
  - Cómo recuperarse de una colisión (e.g., vía retransmisiones retardadas)
- Ejemplos de protocolos MAC de acceso aleatorio:
  - ALOHA ranurado
  - ALOHA
  - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA (CSMA: Carrier Sense Multiple Access)

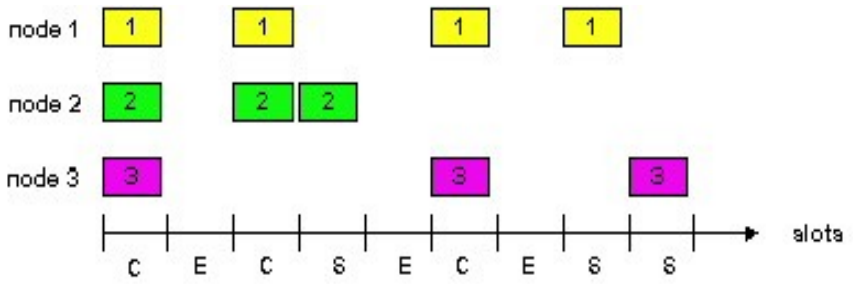
ALOHA ranurado

Suposiciones

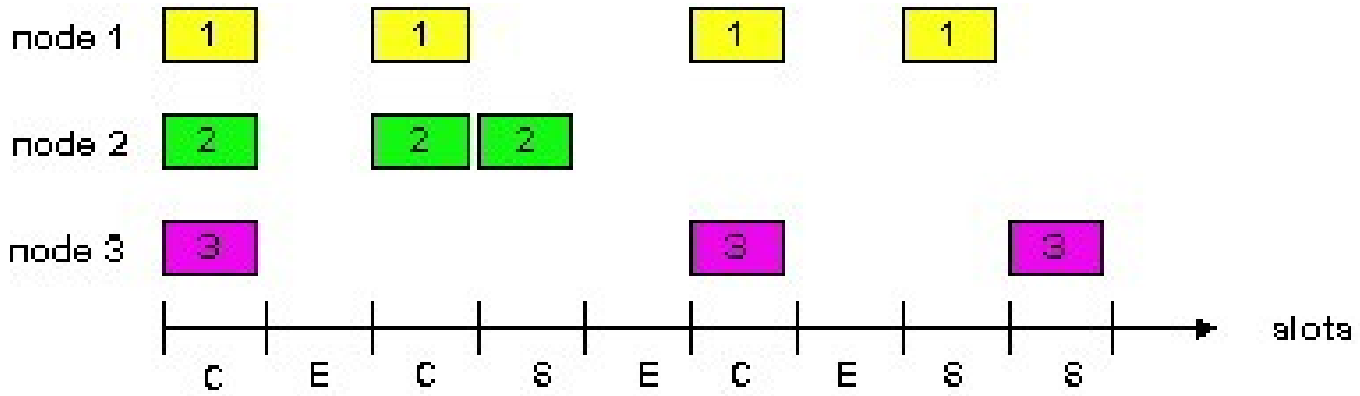
- Todos las tramas tienen igual tamaño
- Tiempo es dividido en ranuras de igual tamaño = tiempo para enviar una trama
- Nodos comienzan a transmitir sólo al inicio de cada ranura
- **Nodos están sincronizados**
- Si 2 ó más nodos transmiten en una ranura, todos los nodos detectan la colisión

Operación

- Cuando un nodo obtiene una trama nueva a enviar, éste transmite en próxima ranura
- Si no hay colisión, el nodo puede enviar una nueva trama en próxima ranura
- Si hay colisión, el nodo retransmite la trama en cada ranura subsiguiente con probabilidad p hasta transmisión exitosa



ALOHA ranurado



Ventajas

- Un único nodo activo puede transmitir continuamente a tasa máxima del canal
- Altamente descentralizado: pero cada nodo requiere sincronización en ranuras
- Simple

Desventajas

- Colisiones, la ranuras se desperdicia
- Ranuras no ocupadas
- Nodos podrían detectar la colisión en menor tiempo que el de transmitir un paquete
- Sincronización de relojes

Eficiencia de Aloha ranurado (Slotted Aloha)

Eficiencia fracción a largo plazo de uso exitoso de ranuras cuando hay muchos nodos y cada uno tiene muchas tramas para enviar

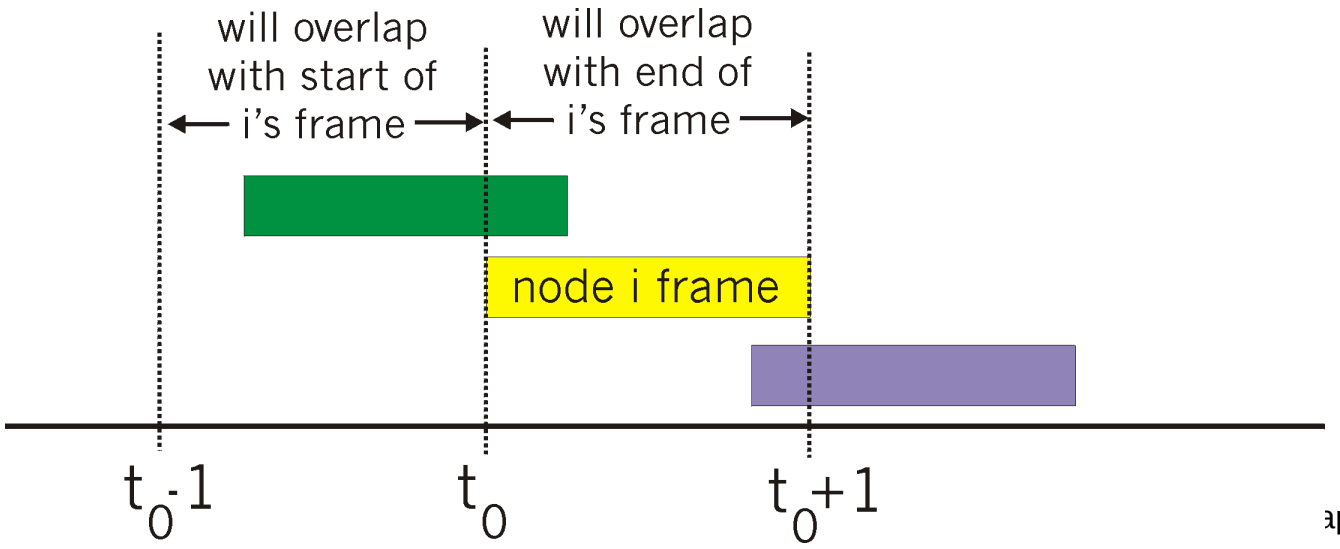
- Supongamos N nodos con muchas tramas a enviar, cada una transmite con probabilidad *p*
- Simplificación para el cálculo
- Prob que el nodo 1 tenga éxito en un slot = $p(1-p)^{N-1}$
- Prob que cualquier nodo tenga éxito = $Np(1-p)^{N-1}$
- Con N nodos activos la Eficiencia es: $E(p)= Np(1-p)^{N-1}$
- Para encontrar la máxima Eficiencia se debe encontrar p* que maximiza E(p). Ejercicio en guía.
- Para muchos nodos, tomar límite de $Np^*(1-p^*)^{N-1}$ cuando N va a infinito, da

  $1/e = .37$

Mejor caso: canal usado para transmisiones útiles 37% del tiempo!

ALOHA Puro (no ranurado)

- Aloha no ranurado: más simple, no hay sincronización
- Cuando una trama debe ser enviada
  - transmitir inmediatamente
- Probabilidad de colisión aumenta:
  - Trama enviada en t_0 colisiona con otras tramas enviadas en $[t_0-1,t_0+1]$



Eficiencia de Aloha puro

P(éxito transmisión de un frame en nodo) =

P(nodo transmita) *

P(ningún otro nodo transmita en $[t_0-1,t_0]$) *

P(ningún otro nodo transmita en $[t_0,t_0+1]$)

$= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1}$

$= p \cdot (1-p)^{2(N-1)}$

... elegir p óptimo y dejar que N -> infinito ...

$= 1/(2e) = .18$

Incluso peor!

CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

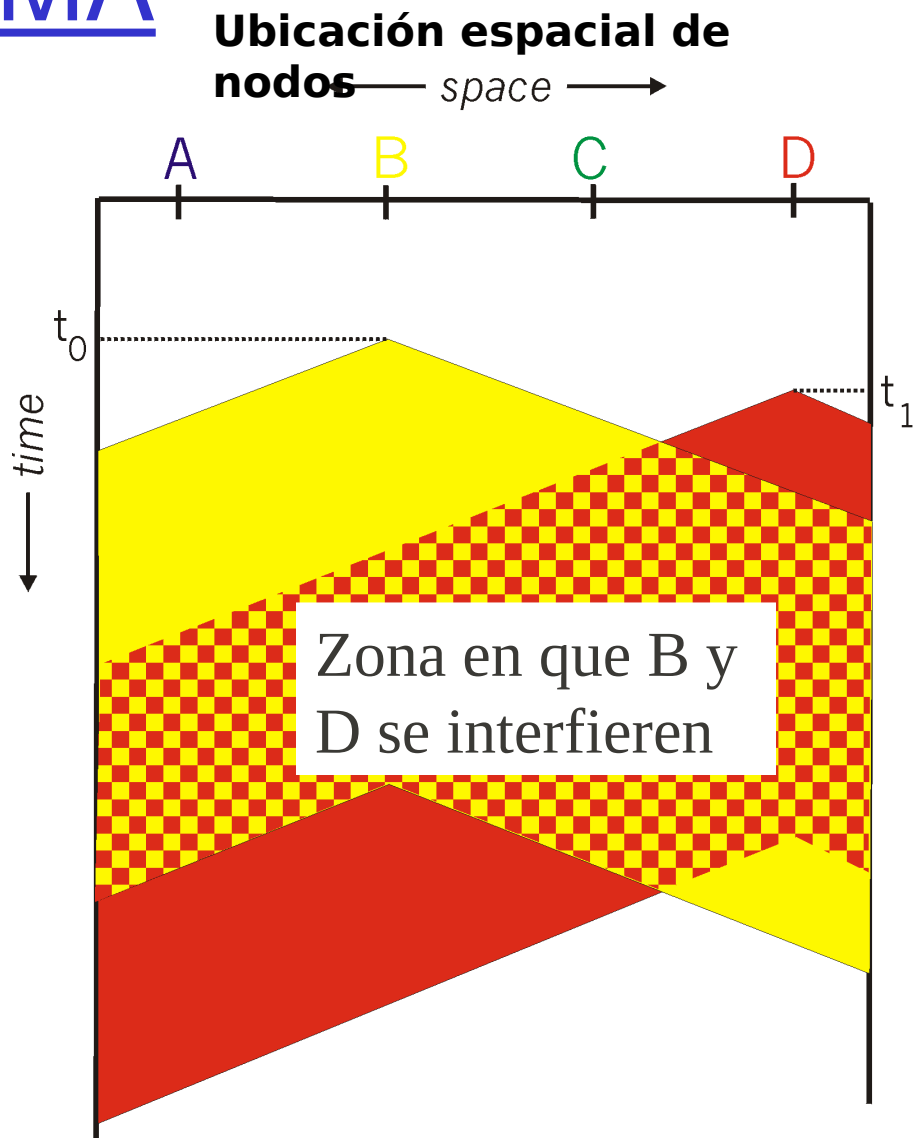
CSMA: Sensa señal portadora antes de transmitir:

- Si el canal se sensa libre, se transmite la trama entera
- Si el canal se detecta ocupado, postergar transmisión

- Analogía humana: no interrumpir mientras otros hablan!

Colisiones en CSMA

- Colisiones pueden ocurrir aún:
  Retardo de propagación hace que dos nodos podrían no escuchar sus transmisiones
- Colisión:
  El tiempo de transmisión del paquete entero es desaprovechado
- Notar:
  El rol de la distancia y el retardo de propagación en la determinación de la probabilidad de colisión



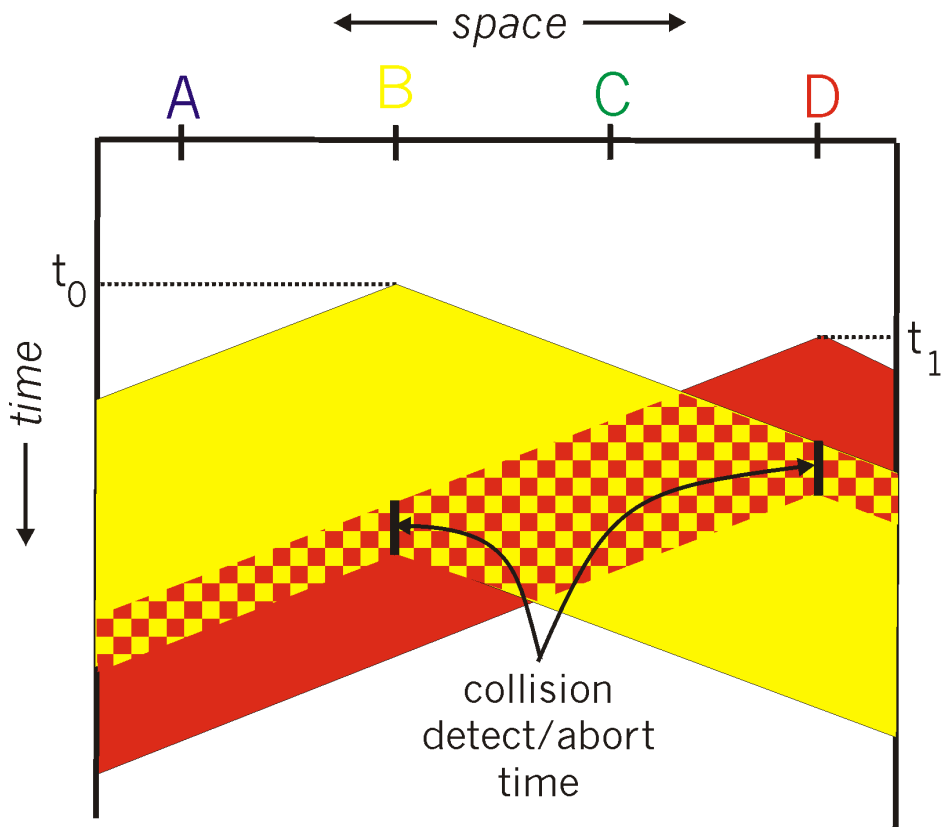
CSMA/CD (Detección de Colisiones)

CSMA/CD: carrier sensing, similar a CSMA

- colisiones son *detectadas* en corto tiempo
- Transmisiones en colisión son abortadas, reduciendo el mal uso del canal

- Detección de colisiones:
  - Fácil en LANs cableadas: se mide la potencia de la señal, se compara señales transmitidas con recibidas
  - Difícil LANs inalámbricas: receptor es apagado mientras se transmite
- Analogía humana: Conversadores respetuosos

CSMA/CD detección de colisiones



Protocolos MAC de “toma de turnos”

Vimos: Protocolos MAC que particionan el canal:

- Se comparte el canal eficientemente y equitativamente en alta carga
- Son ineficiente a baja carga: Hay retardo en acceso al canal, 1/N del ancho de banda es asignado aún si hay sólo un nodo activo!

Vimos: Protocolos de acceso aleatorio

- Son eficientes a baja carga: un único canal puede utilizar completamente el canal
- Alta carga: ineficiencias por colisiones

Idea: Protocolos de “toma de turnos”

- Buscan lo mejor de ambos mundos!

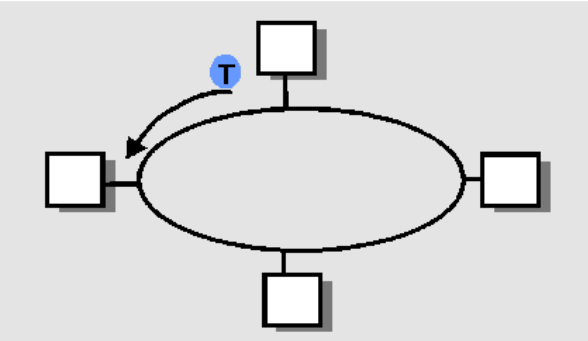
Protocolos MAC de “Toma de turnos”

Consulta:

- Nodo maestro “invita” a nodos esclavos a transmitir en turnos
- preocupaciones:
  - Overhead de la consulta
  - Latencia
  - Punto único de falla (maestro)

Paso de Token (Testimonio):

- **Token** (objeto) de control es pasado de nodo en nodo secuencialmente.
- Hay un mensaje con el token
- Preocupaciones:
  - Overhead del token
  - Latencia
  - Punto único de falla (el token)



Resumen de protocolos MAC

- ¿Qué hacemos en un medio compartido?
  - Subdivisión del canal: por tiempo, frecuencia, o código
  - Subdivisión aleatoria (dinámica),
    - ALOHA, ALOHA-R, CSMA, CSMA/CD
    - Sensado de portadora: fácil en algunas tecnologías (cable), difícil en otras (inalámbricas)
    - CSMA/CD (collision detection) es usado en Ethernet
    - CSMA/CA (collision avoidance) es usado en 802.11
  - Toma de turnos
    - Consultas desde un sitio central, o pasando un token

Capa Enlace de Datos

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Detección y corrección de errores
- 5.3 Protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de capa enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Hubs y switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Enlaces Virtuales: ATM y MPLS

Direcciones MAC y ARP

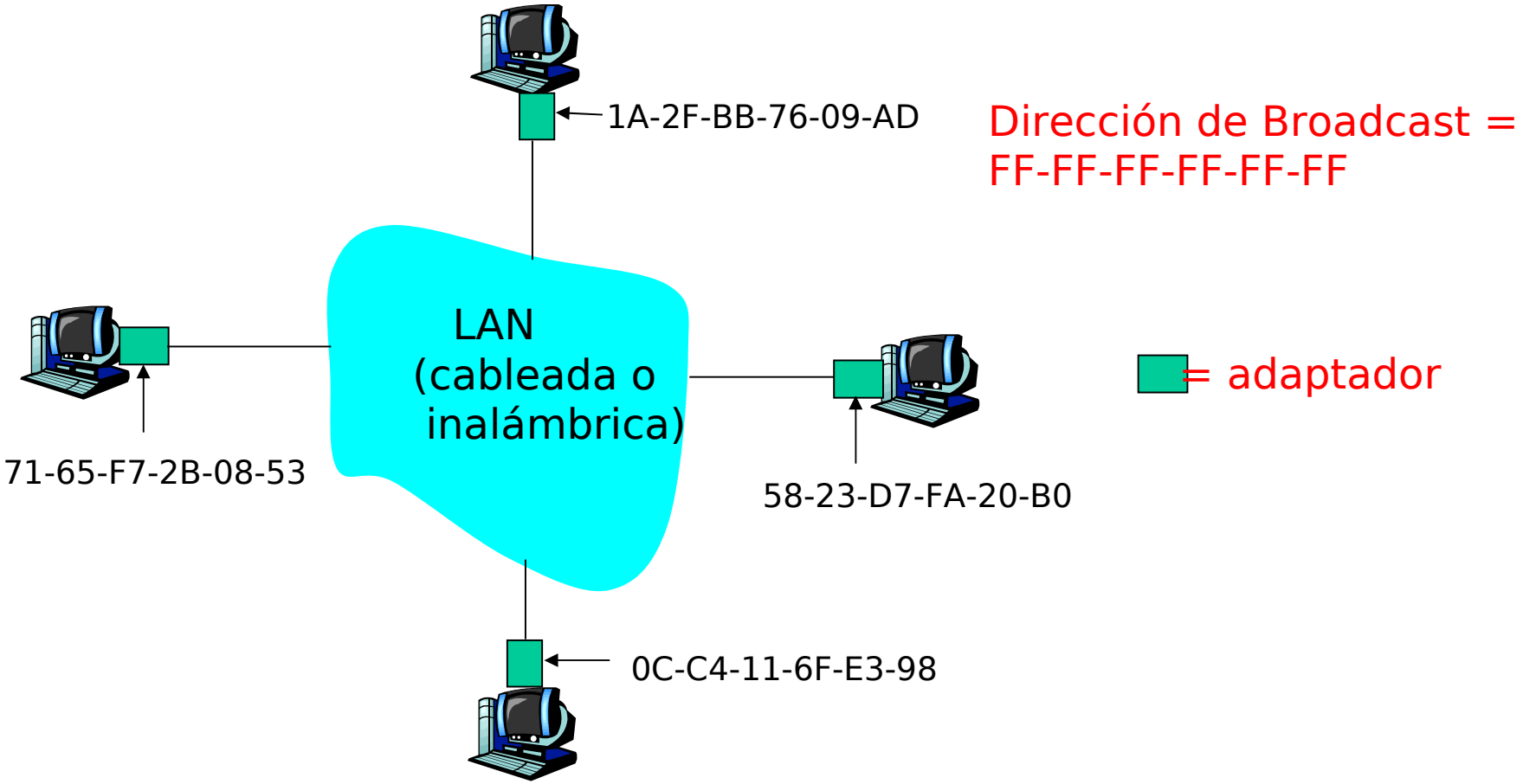
- Direcciones IP son de 32-bit:
  - Son direcciones de la capa de red
  - Son usada para conducir un datagrama a la subred (subnet) destino
  - IP es jerárquico y no es portátil (depende de su subnet)
    - asignado por administrador de subnet

Direcciones MAC y ARP

- Dirección MAC (usado en Ethernet):
  - Son usadas para conducir un datagrama de un interfaz a otra interfaz físicamente conectadas (en la misma red)
  - Son de 48 bits (en mayoría de LANs) están grabadas en una ROM de la tarjeta adaptadora
  - Direcciones MAC administradas por IEEE
  - Compañías compran porciones del espacio de direcciones disponibles
  - MAC no es jerárquico, es portátil
    - Se puede mover una tarjeta de una LAN a otra

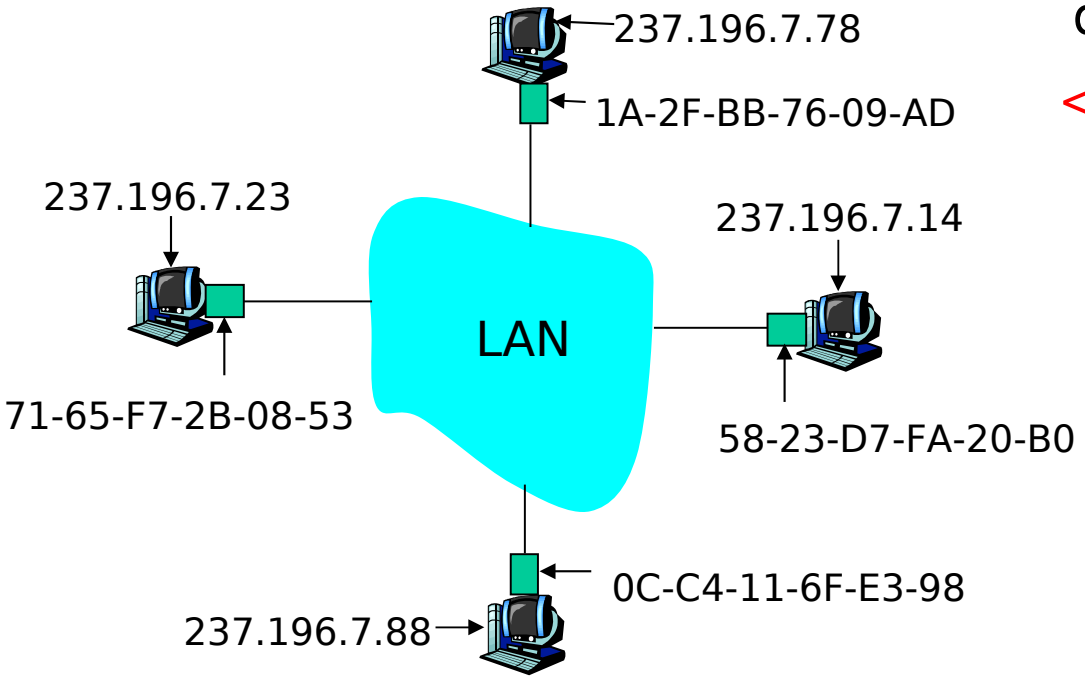
Direcciones LANs y ARP

Cada adaptador (tarjeta) en la LAN tiene una dirección única



ARP: Address Resolution Protocol

Pregunta: cómo determinar la dirección MAC sabiendo la dirección IP?



- Cada nodo IP (Host o Router) de la LAN tiene una tabla ARP
- Tabla ARP: mapea direcciones IP -> MAC para algunos nodos de la LAN

< IP address; MAC address; TTL>

  - TTL (Time To Live): tiempo de expiración para el mapeo (típicamente 20 min)
  - Mismo nombre pero no confundir con TTL en encabezado IP.

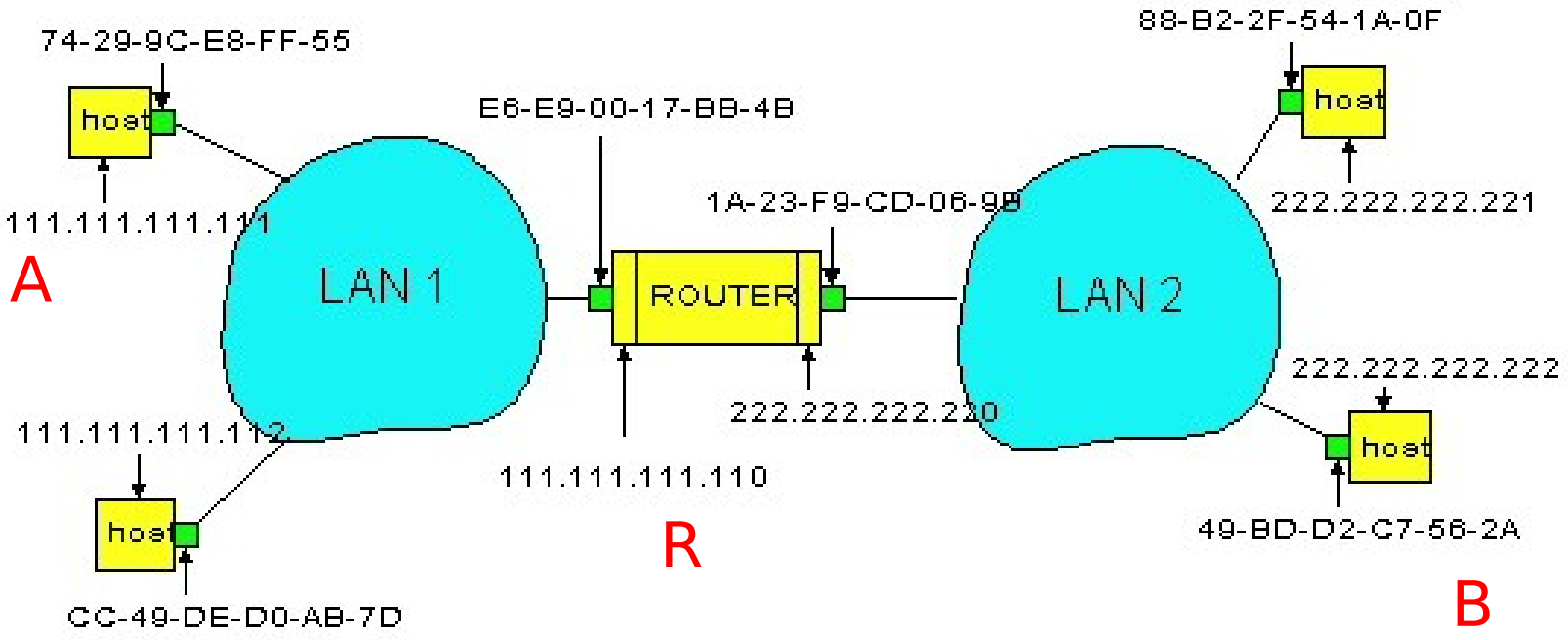
Protocolo ARP: Dentro de la misma LAN (network)

- A quiere enviar un datagrama a B, y la dirección MAC de B no está en tabla ARP de A.
- A difunde (broadcasts) un paquete consulta ARP, conteniendo la IP de B
  - Dirección destino MAC = FF-FF-FF-FF-FF-FF
  - Todas las máquinas de la LAN reciben la consulta ARP
- B recibe paquete ARP, y responde a A con su dirección MAC
  - La respuesta es enviada a la MAC de A (unicast)
- A guarda el par IP-a-MAC en su tabla ARP hasta que la información envejece (times out)
  - La información expira a menos que sea refrescada
- ARP es “plug-and-play”:
  - Los nodos crean sus tablas de ARP sin intervención de la administradores

Ruteo a otra LAN

Seguimiento: envío de datagrama desde A a B vía R

asume que A conoce dirección IP de B



- En router R hay dos tablas ARP, una por cada interfaz (o por cada red LAN del router R)

- A crea datagrama con fuente A y destino B
- A usa ARP para obtener la MAC de R para la interfaz 111.111.111.110
- A crea una trama (frame) con dirección MAC de R como destino, los datos de la trama contienen el datagrama IP de A a B
- El adaptador de A envía la trama
- El adaptador de R recibe la trama
- R saca el datagrama IP de la trama Ethernet, y ve que el destino es B
- R usa ARP para obtener la dirección MAC de B
- R crea la trama con el datagrama IP de A para B y lo envía a B