

# Capítulo 5: A camada de enlace

## Objetivos do capítulo:

- ❑ entender os princípios por trás dos serviços da camada de enlace de dados:
  - Compartilhamento de um canal de broadcast: acesso múltiplo
  - endereçamento da camada de enlace
- ❑ instanciação e implementação de várias tecnologias da camada de enlace

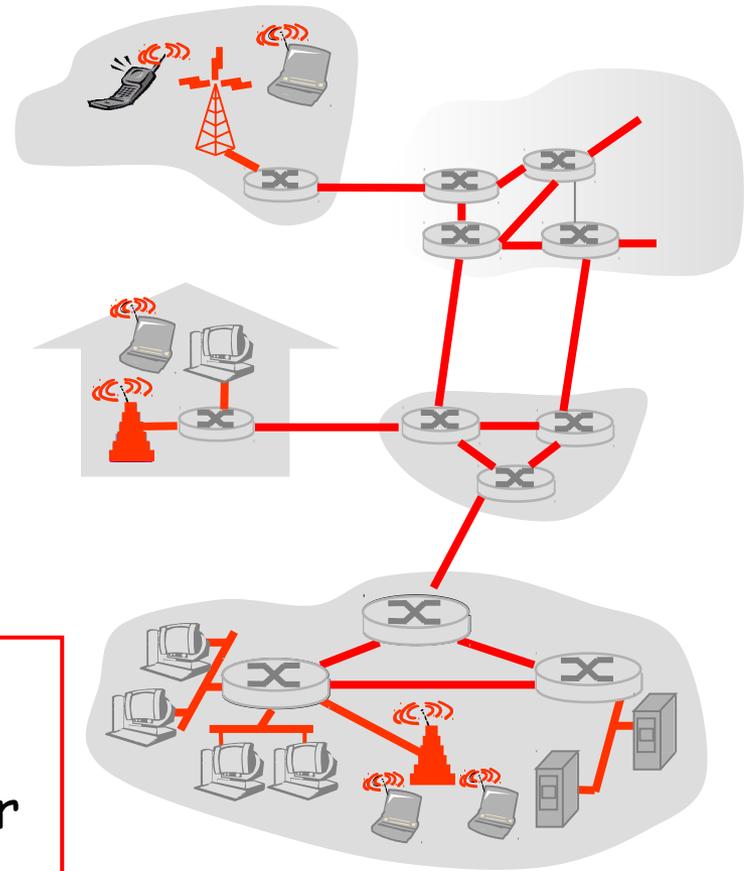
# Camada de enlace

- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Detecção e correção de erros
- ❑ 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.5 Ethernet
- ❑ 5.6 Comutadores de camada de enlace
- ❑ 5.7 PPP
- ❑ 5.8 Virtualização de enlace: MPLS
- ❑ 5.9 Um dia na vida de uma solicitação de página Web

# Camada de enlace: introdução

## Alguma terminologia:

- hospedeiros e roteadores são **nós**
- canais de comunicação que se conectam a nós adjacentes pelo caminho de comunicação são **enlaces**
  - enlaces com fio
  - enlaces sem fio
- pacote na camada-2 é um **quadro**, encapsula datagrama



**Camada de enlace de dados** tem a responsabilidade de transferir um datagrama de um nó ao nó adjacente por um enlace e de controlar o compartilhamento de um canal de broadcast.

# Serviços da camada de enlace

- *enquadramento, acesso ao enlace:*
  - encapsula datagrama no quadro, incluindo cabeçalho, trailer
  - acesso ao canal de meio compartilhado
  - endereços "MAC" usados nos cabeçalhos de quadro para identificar origem, destino
    - diferente do endereço IP!
- *entrega confiável entre nós adjacentes*
  - raramente usado em enlace com pouco erro de bit (fibra, alguns pares trançados)
  - enlaces sem fio: altas taxas de erro

❑ *detecção de erro:*

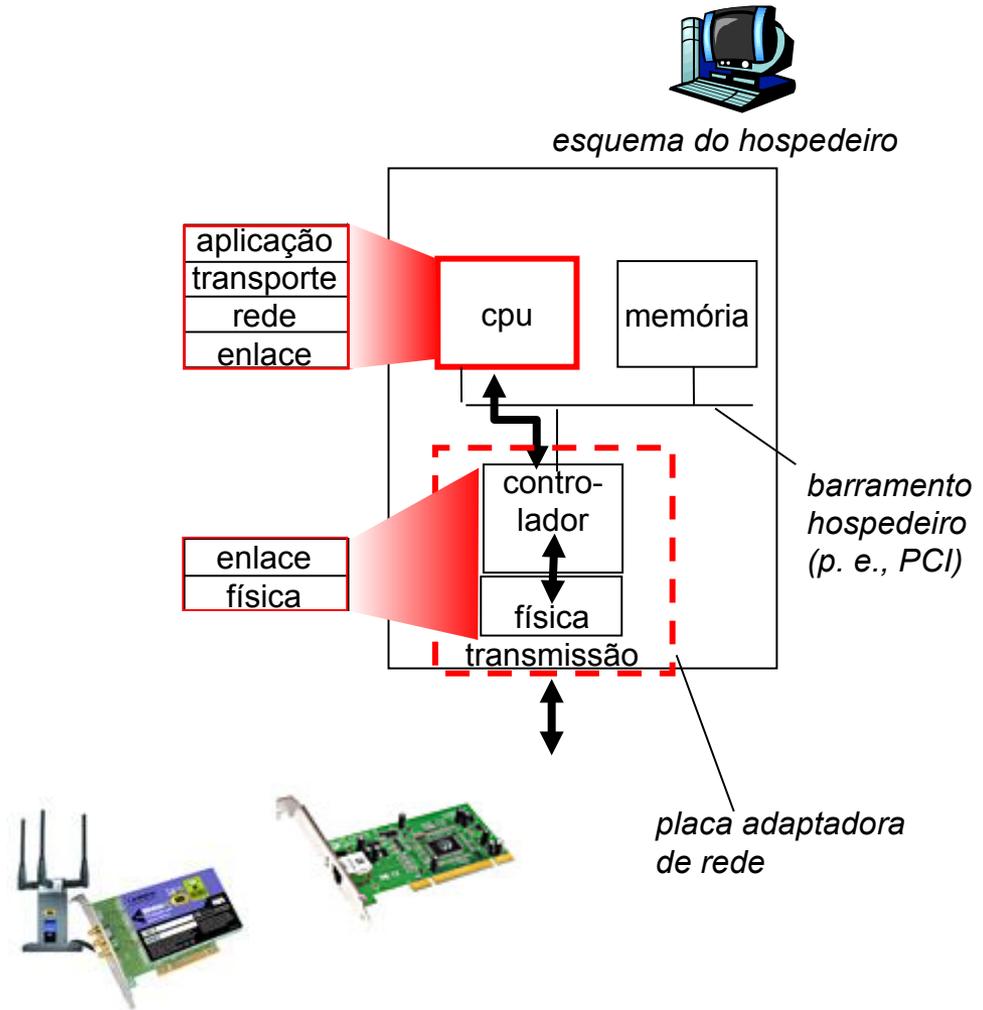
- erros causados por atenuação de sinal, ruído.
- receptor detecta presença de erros: descarta quadro

❑ *half-duplex e full-duplex*

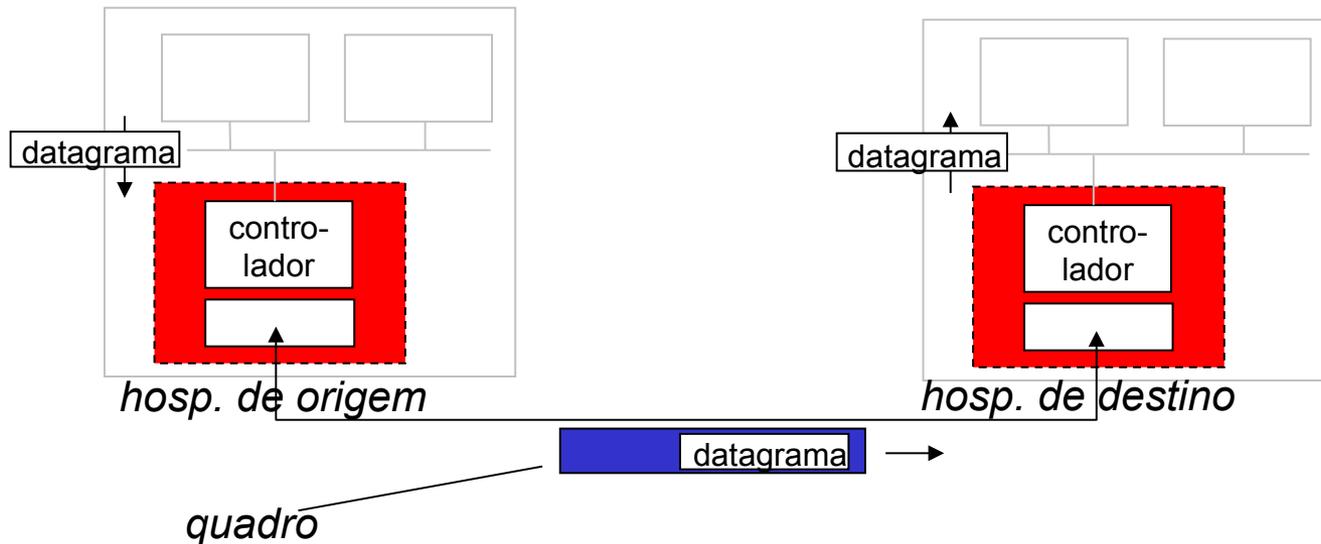
- com *half-duplex*, os nós nas duas extremidades do enlace podem transmitir, mas não ao mesmo tempo

# Onde é implementada a camada de enlace?

- ❑ em todo e qualquer hosp.
- ❑ camada de enlace implementada no "adaptador" (ou *placa de interface de rede, NIC*)
  - placa Ethernet (cobre), placa 802.11 (wi-fi)
  - implementa camada de enlace, física
- ❑ conecta aos barramentos de sistema do hospedeiro
- ❑ combinação de hardware e software



# Comunicação entre adaptadores



## ❑ lado emissor:

- encapsula datagrama no quadro
- inclui bits de verificação de erro, controle de fluxo, endereços, etc.

## ❑ lado receptor

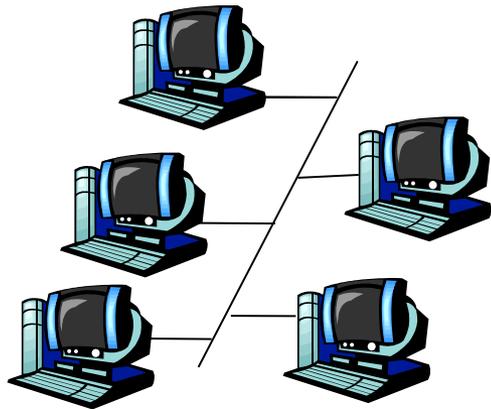
- procura erros, controle de fluxo, verifica endereço, etc.
- extrai datagrama, passa para camada superior no lado receptor

# Camada de enlace

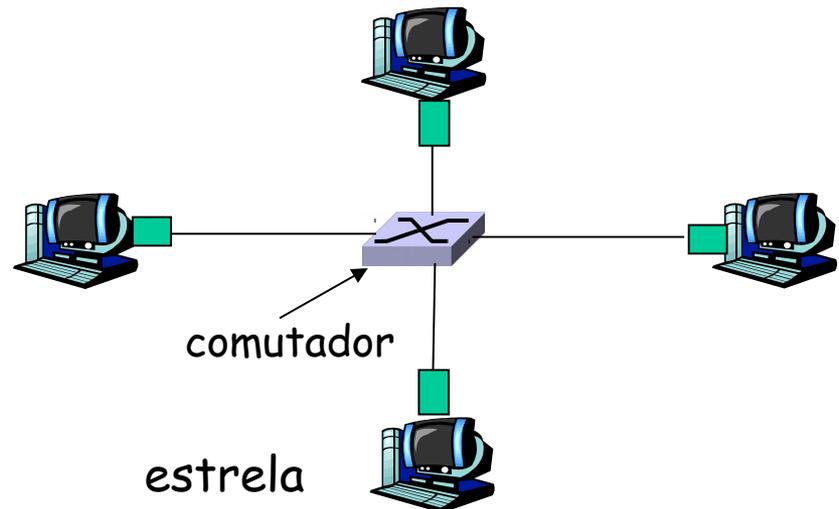
- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Detecção e correção de erros
- ❑ 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.5 Ethernet
- ❑ 5.6 Comutadores de camada de enlace
- ❑ 5.7 PPP
- ❑ 5.8 Virtualização de enlace: MPLS
- ❑ 5.9 Um dia na vida de uma solicitação de página Web

# Topologia de estrela

- ❑ topologia de barramento popular até meados dos anos 90
  - todos os nós no mesmo domínio de colisão (podem colidir uns com os outros)
- ❑ hoje: topologia de estrela prevalece
  - *comutador* ativo no centro
  - cada "ponta" roda um protocolo Ethernet (separado) - nós não colidem uns com os outros



barramento: cabo coaxial



estrela

# Estrutura do quadro Ethernet

Adaptador enviando encapsula datagrama IP (ou outro pacote de protocolo da camada de rede) no **quadro Ethernet**



## Preâmbulo:

- ❑ 7 bytes com padrão 10101010 seguido por um byte com padrão 10101011
- ❑ usado para sincronizar taxas de clock do receptor e emissor

- ❑ **Endereços:** 6 bytes
  - se adaptador recebe quadro com endereço de destino combinando, ou com endereço de broadcast, passa dados do quadro ao protocolo da camada de rede
  - caso contrário, adaptador descarta quadro
- ❑ **Tipo:** indica protocolo da camada mais alta (principalmente IP, mas outros são possíveis, p. e., Novell IPX, AppleTalk)
- ❑ **Dados:** mínimo 46 bytes, máximo 1500
- ❑ **CRC:** verificado no receptor; se detectar erro, quadro é descartado

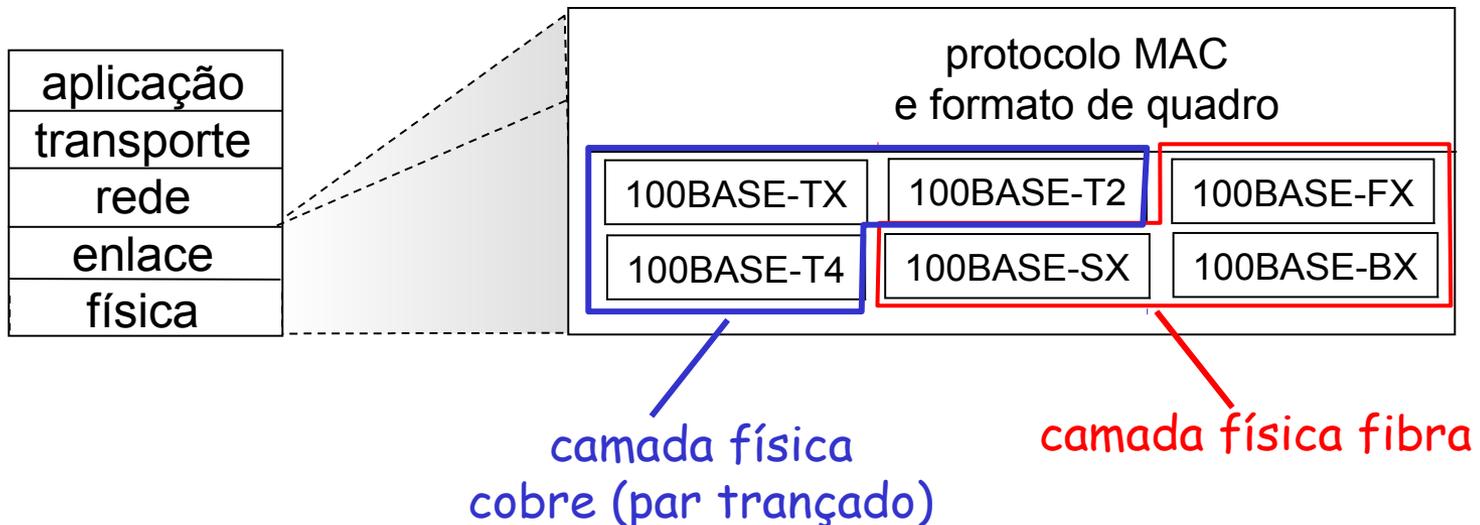


# Ethernet: não confiável, sem conexão

- ❑ **sem conexão:** sem apresentação entre NICs de origem e destino
- ❑ **não confiável:** NIC de destino não envia confirmações ou não confirmações à NIC de origem
  - fluxo de datagramas passados à camada de rede pode ter lacunas (datagramas faltando)
  - lacunas serão preenchidas se aplicação estiver usando TCP
  - caso contrário, aplicação verá lacunas
- ❑ Protocolo MAC da Ethernet: **CSMA/CD**

# Padrões Ethernet 802.3: camadas de enlace e física

- *muitos* padrões Ethernet diferentes
  - protocolo MAC e formato de quadro comuns
  - diferentes velocidades: 2 Mbps, 10 Mbps, 100 Mbps, 1Gbps, 10G bps
  - diferentes meios da camada física: fibra, cabo



# Capítulo 6: Esboço

## □ 6.1 Introdução

### Redes sem fio

## □ 6.2 Características de enlaces e redes sem fio

- CDMA

## □ 6.3 LANs sem fio 802.11 ("wi-fi")

## □ 6.4 Acesso celular à Internet

- arquitetura
- padrões (p. e., GSM)

## Mobilidade

## □ 6.5 Gerenciamento da mobilidade: princípios

## □ 6.6 IP móvel

## □ 6.7 Gerenciamento de mobilidade em redes celulares

## □ 6.8 Mobilidade e protocolos de camadas superiores

## □ 6.9 Resumo

# Características do enlace sem fio

Diferenças do enlace com fio...

- **Redução fora do sinal:** sinal de rádio se atenua enquanto se propaga pela matéria (perda do caminho)
- **interferência de outras fontes:** frequências padrão de rede sem fio (p. e., 2,4 GHz) compartilhadas por outros dispositivos (p. e., telefone); dispositivos (motores) também interferem
- **propagação multivias:** sinal de rádio reflete-se em objetos e no solo, chegando ao destino em momentos ligeiramente diferentes

... tornam a comunicação por enlace sem fio muito mais  
"difícil"

# LAN sem fio IEEE 802.11

## □ 802.11b

- espectro não licenciado de 2,4-5 GHz
- até 11 Mbps
- Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) na camada física
  - todos os hospedeiros usam o mesmo código de chipping

## □ 802.11a

- intervalo 5-6 GHz
- até 54 Mbps

## □ 802.11g

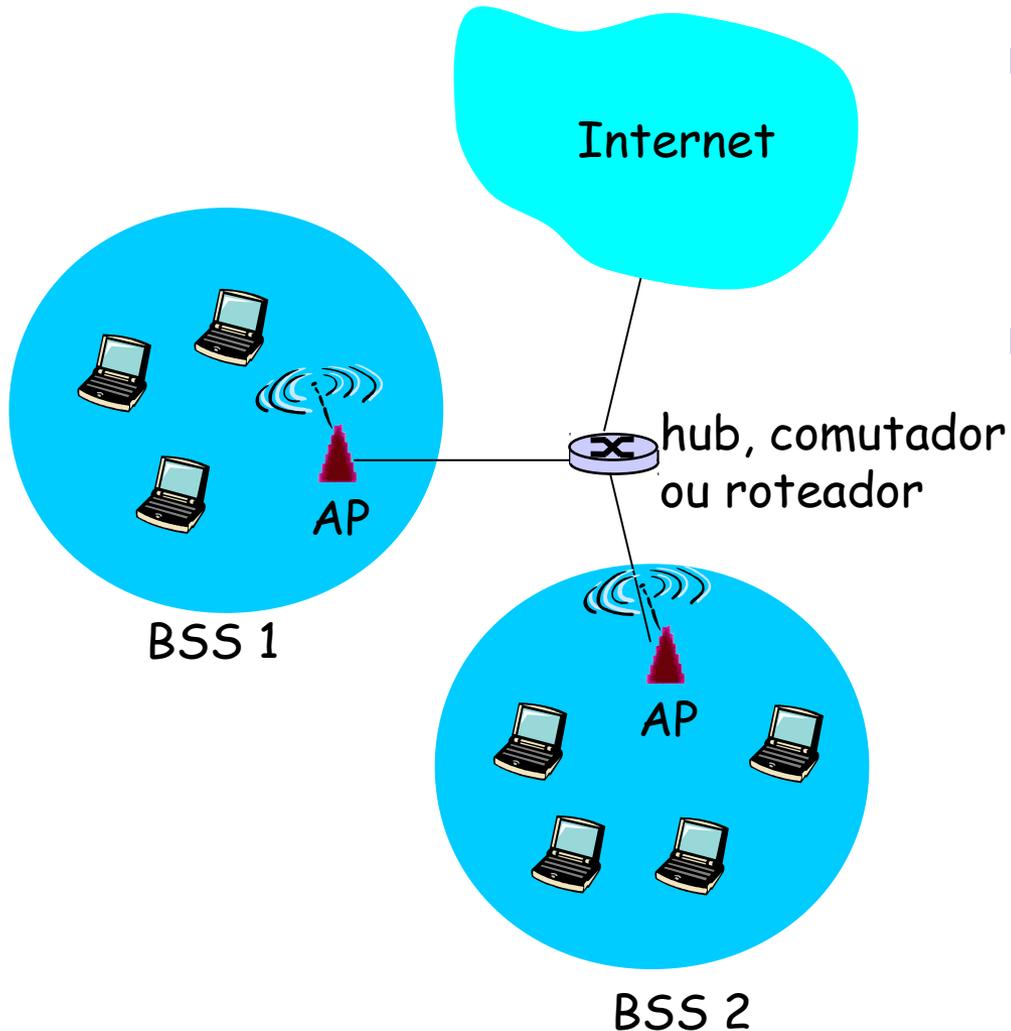
- intervalo 2,4-5 GHz
- até 54 Mbps

## □ 802.11n: múltiplas antenas

- intervalo 2,4-5 GHz
- até 200 Mbps

- todos usam CSMA/CA para acesso múltiplo
- todos têm versões de estação-base e rede ad-hoc

# Arquitetura de LAN 802.11

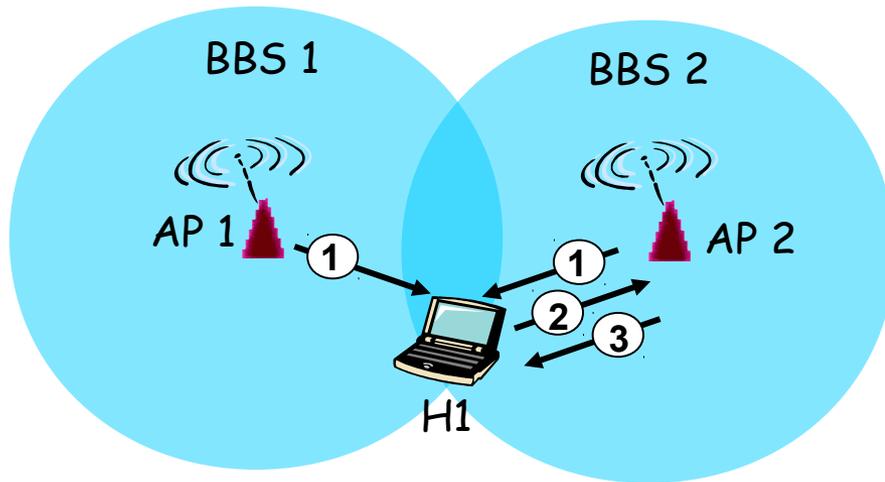


- hospedeiro sem fio se comunica com estação-base
  - estação-base = ponto de acesso (AP)
- **Basic Service Set (BSS)** (ou "célula") no modo de infraestrutura contém:
  - hospedeiros sem fio
  - ponto de acesso (AP): estação-base
  - modo ad hoc: apenas hosts

# 802.11: Canais, associação

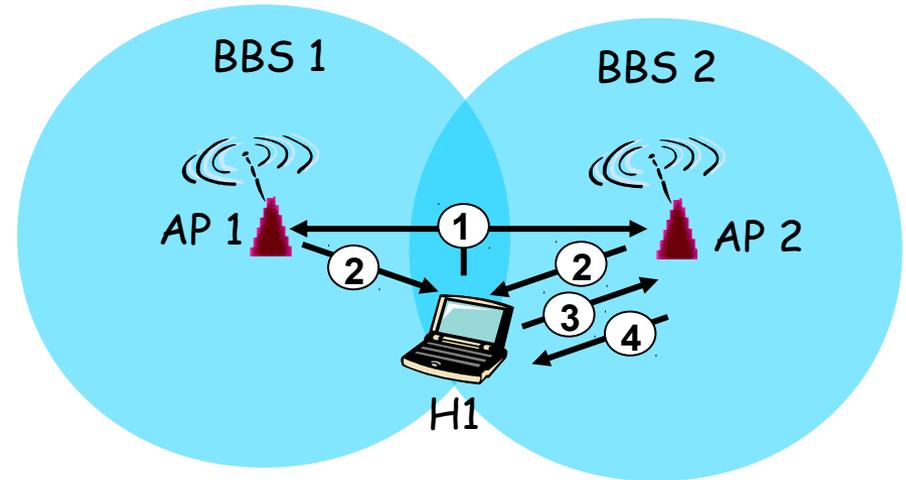
- ❑ 802.11b: espectro de 2,4 GHz-2,485 GHz dividido em 11 canais em diferentes frequências
  - Admin. do AP escolhe frequência para AP
  - possível interferência: canal pode ser o mesmo daquele escolhido pelo AP vizinho!
- ❑ hospedeiro: precisa *associar-se* a um AP
  - varre canais, escutando *quadros de sinalização* contendo nome do AP (SSID) e endereço MAC
  - seleciona AP para associar-se
  - pode realizar autenticação [Capítulo 8]
  - normalmente rodará DHCP [Capítulo 4] para obter endereço IP na sub-rede do AP

# 802.11: varredura passiva/ativa



## Varredura passiva:

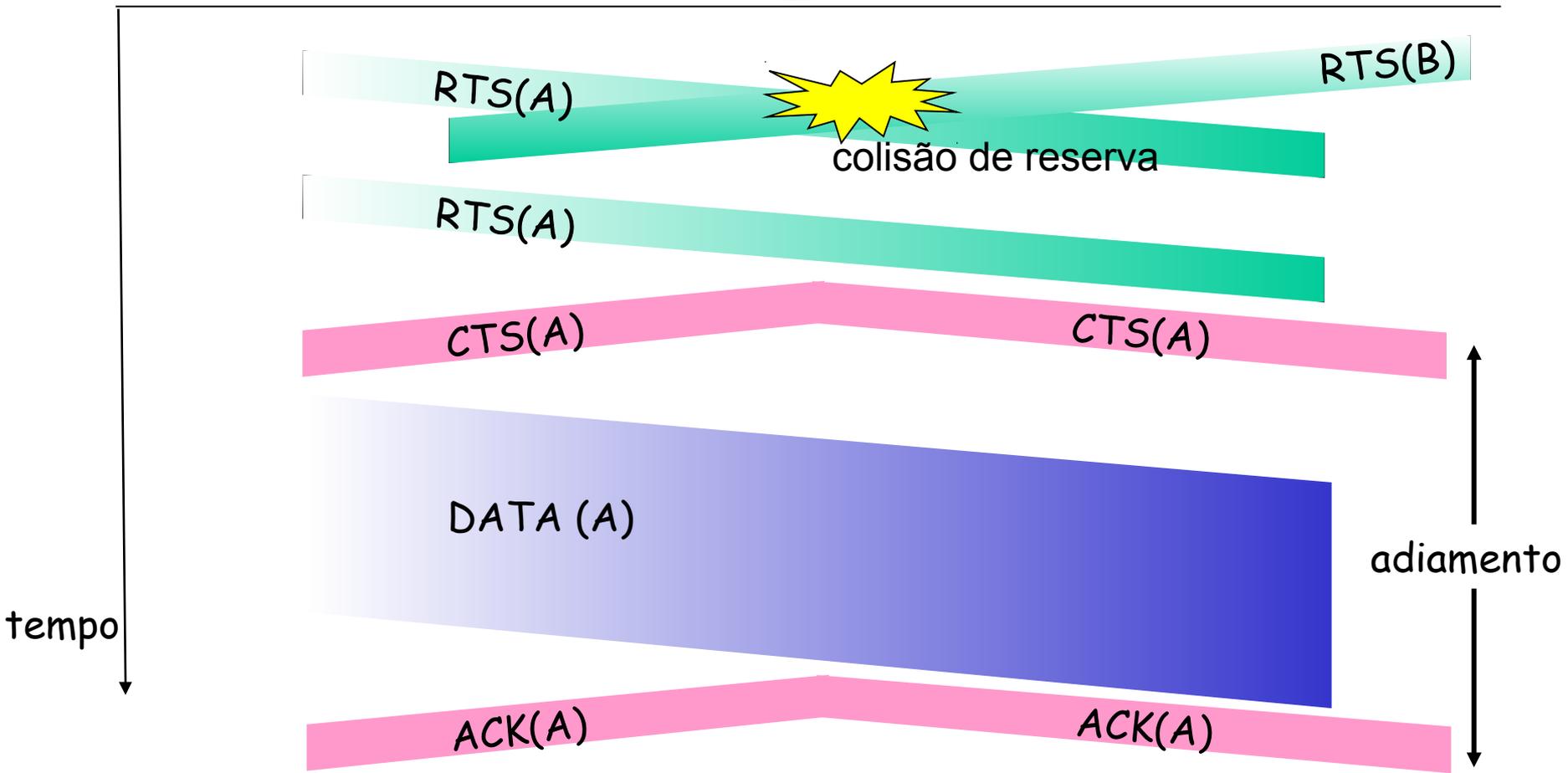
- (1) quadros de sinalização enviados dos APs
- (2) quadro de solicitação de associação enviado: H1 para AP selecionado
- (3) quadro de resposta de associação enviado: H1 para AP selecionado



## Varredura ativa:

- (1) Broadcast de quadro de solicitação de investigação de H1
- (2) Quadro de resposta de investigações enviado de APs
- (3) Quadro de resposta de associação enviado: H1 para AP selecionado
- (4) Quadro de resposta de associação enviado: AP selecionado para H1

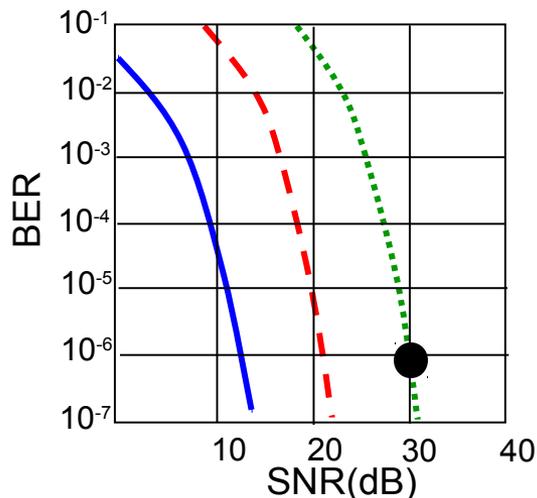
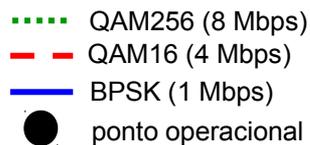
# Prevenção de colisão: troca RTS-CTS



# 802.11: capacidades avançadas

## *Adaptação de taxa*

- estação-base, disp. móvel muda taxa de transmissão dinamicamente (técnica de modulação da camada física) enquanto móvel se move, SNR varia



1. SNR diminui, BER aumenta quando nó se afasta da estação-base
2. Quando BER se torna muito alto, passa para taxa de transmissão inferior, mas com BER mais baixo

# Camada de enlace

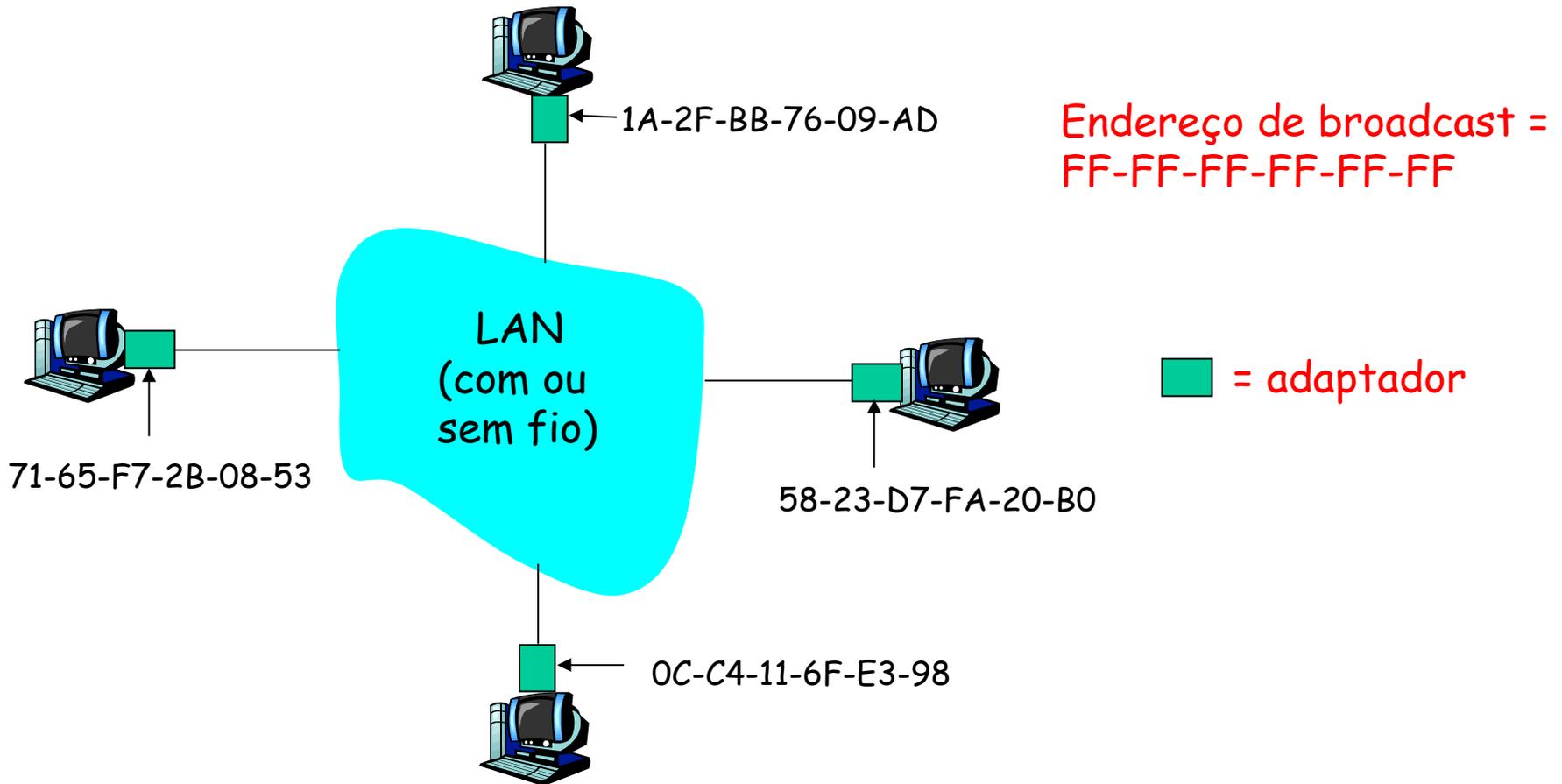
- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Comutadores de camada de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização de enlace: MPLS
- 5.9 Um dia na vida de uma solicitação de página Web

# Endereçamento MAC e ARP

- Endereço IP de 32 bits:
  - endereço da *camada de rede*
  - usado para obter datagrama até sub-rede IP de destino
- Endereço MAC (ou LAN ou físico ou Ethernet) :
  - função: *levar quadro de uma interface para outra interface conectada fisicamente (na mesma rede)*
  - Endereço MAC de 48 bits (para maioria das LANs)
    - queimado na ROM da NIC, às vezes também configurável por software

# Endereços de LAN e ARP

Cada adaptador na LAN tem endereço de LAN exclusivo



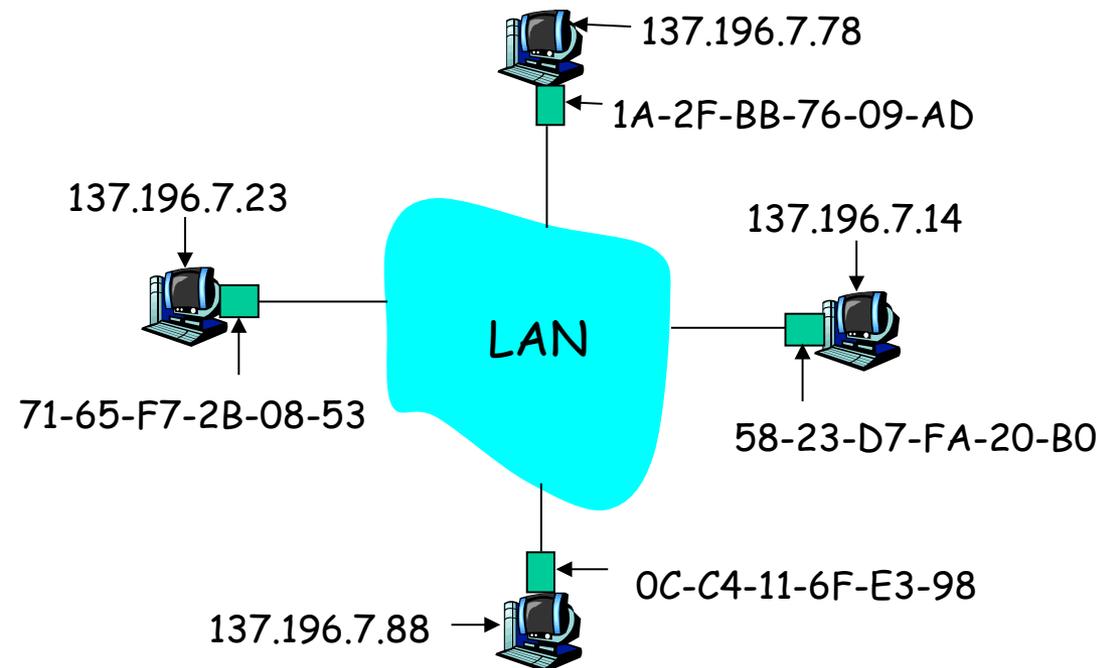
# Endereços de LAN (mais)

- ❑ alocação de endereço MAC administrada pelo IEEE
- ❑ fabricante compra parte do espaço de endereços MAC (para garantir exclusividade)
- ❑ analogia:
  - (a) Endereço MAC: como o CPF
  - (b) Endereço IP: como o endereço postal
- ❑ endereço MAC plano → portabilidade
  - pode mover placa de LAN de uma LAN para outra
- ❑ endereço IP hierárquico NÃO portátil
  - endereço depende da sub-rede IP à qual o nó está conectado

# ARP: Address Resolution Protocol

Pergunta: Como determinar endereço MAC de B sabendo o endereço IP de B?

- ❑ Cada nó IP (hosp., roteador) na LAN tem tabela **ARP**
- ❑ Tabela ARP: mapeamentos de endereço IP/MAC para alguns nós da LAN  
<endereço IP; endereço MAC; TTL>
  - TTL (Time To Live): tempo após o qual o mapeamento de endereço será esquecido (normalmente, 20 min)

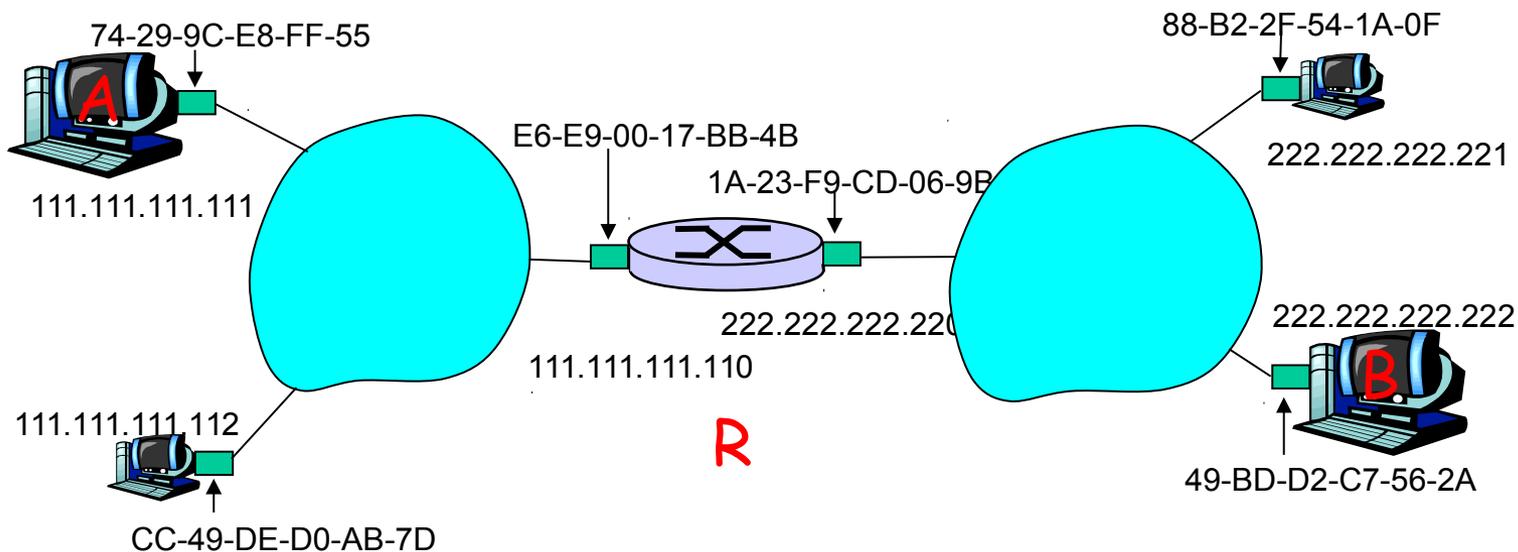


# Protocolo ARP: mesma LAN (rede)

- A quer enviar datagrama a B, e endereço MAC de B não está na tabela ARP de A.
- A envia por **broadcast** pacote de consulta ARP, contendo endereço IP de B
  - endereço MAC de destino = FF-FF-FF-FF-FF-FF
  - todas as máquinas na LAN recebem consulta ARP
- B recebe pacote ARP, responde para A com seu endereço MAC (de B)
  - quadro enviado ao endereço MAC de A (unicast)
- A salva em cache par de endereços IP-para-MAC em sua tabela ARP até a informação expirar
  - estado soft: informação que expira (desaparece) se não for renovada
- ARP é "plug-and-play":
  - nós criam suas tabelas ARP *sem intervenção do administrador de rede*

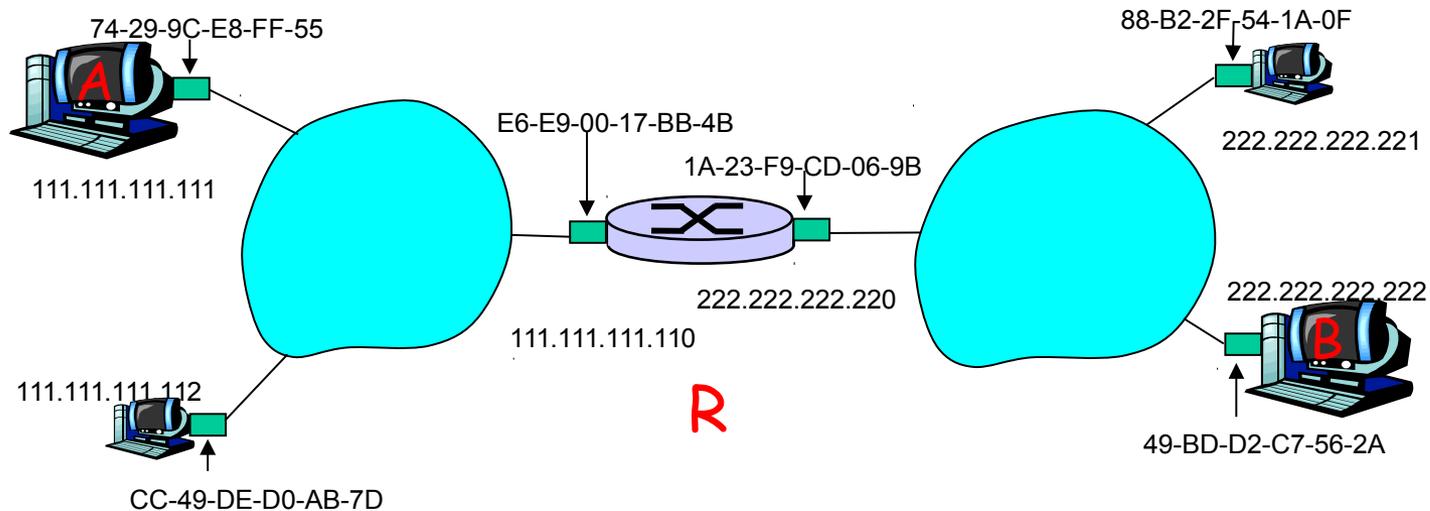
# Endereçamento: roteando para outra LAN

acompanhamento: **enviar datagrama de A para B via R**  
suponha que A saiba o endereço IP de B



- duas tabelas ARP no roteador R, uma para cada rede IP (LAN)

- ❑ A cria datagrama IP com origem A, destino B
- ❑ A usa ARP para obter endereço MAC de R para 111.111.111.110
- ❑ A cria quadro da camada de enlace com endereço MAC de R como destino, quadro contém datagrama IP A-para-B
- ❑ NIC de A envia quadro
- ❑ NIC de R recebe quadro
- ❑ R remove datagrama IP do quadro Ethernet, vê o seu destinado a B
- ❑ R usa ARP para obter endereço MAC de B
- ❑ R cria quadro contendo datagrama IP A-para-B e envia para B



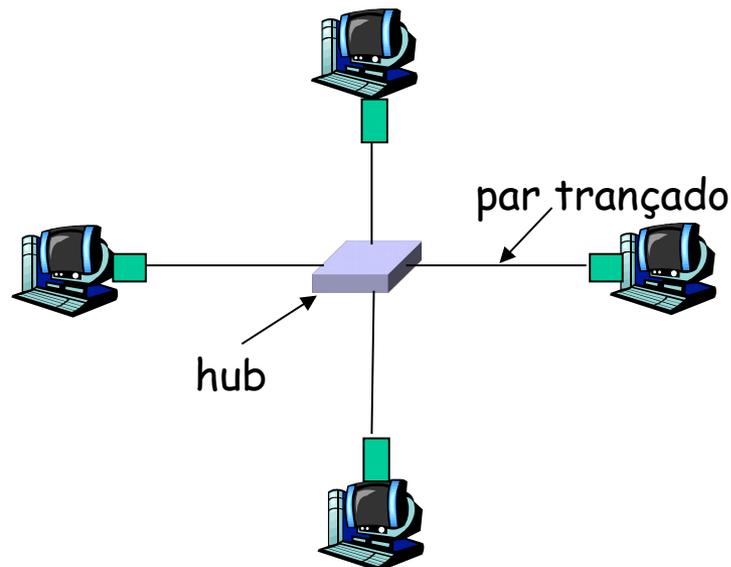
# Camada de enlace

- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Detecção e correção de erros
- ❑ 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.5 Ethernet
- ❑ 5.6 Comutadores de camada de enlace
- ❑ 5.7 PPP
- ❑ 5.8 Virtualização de enlace: MPLS
- ❑ 5.9 Um dia na vida de uma solicitação de página Web

# Hubs

... repetidores da camada física ("burros") :

- todos os nós conectados ao hub podem colidir uns com os outros
- sem buffering de quadros
- sem CSMA/CD no hub: NICs do hospedeiro detectam colisões
- bits chegando a um enlace saem em *todos* os outros enlaces na mesma velocidade

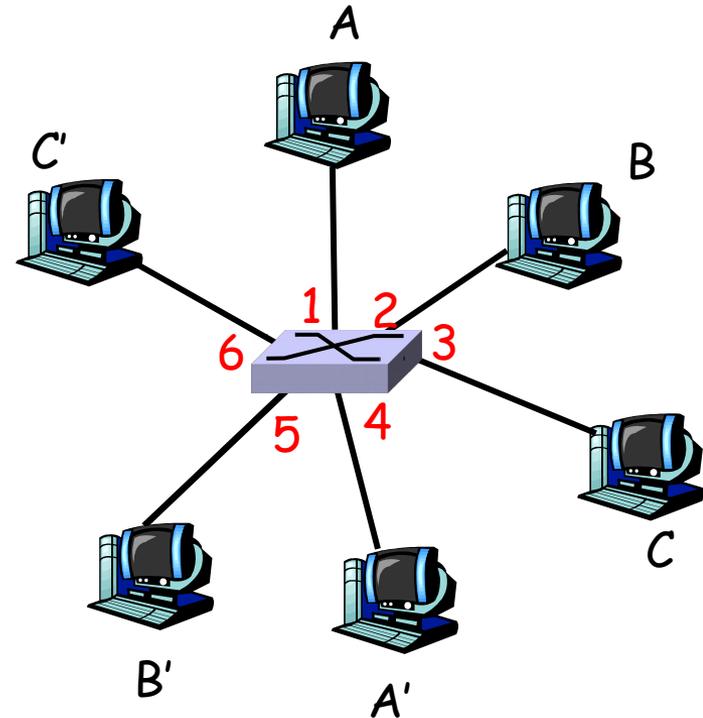


# Comutador (switch)

- ❑ dispositivo da camada de enlace: mais inteligente que os hubs, têm papel *ativo*
  - armazenam e repassam quadros Ethernet
  - examinam endereço MAC do quadro que chega, repassam *seletivamente* o quadro para um ou mais enlaces de saída quando o quadro deve ser repassado no segmento, usa CSMA/CD para acessar segmento
- ❑ *transparente*
  - hospds. não sabem da presença de comutadores
- ❑ *plug-and-play*
  - comutadores não precisam ser configurados

# Switch: permite múltiplas transmissões simultâneas

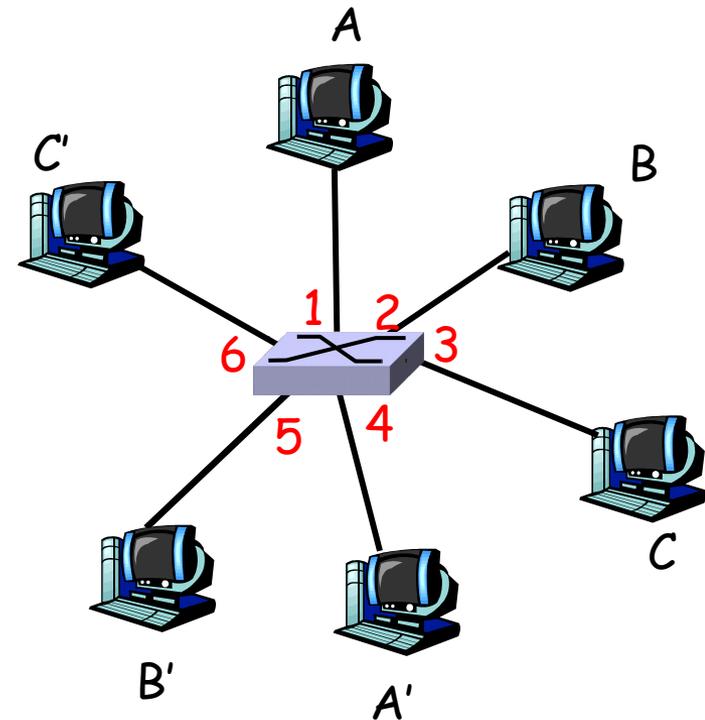
- hosps. têm conexão dedicada, direta com comutador
- comutadores mantêm pacotes
- Protocolo Ethernet usado em cada enlace de chegada, mas sem colisões; full duplex
  - cada enlace é seu próprio domínio de colisão
- **comutação:** A-para-A' e B-para-B' simultaneamente, sem colisões
  - não é possível com hub burro



comutador com seis interfaces  
(1,2,3,4,5,6)

# Tabela de comutação

- **P:** Como o comutador sabe que A' se encontra na interface 4, B' se encontra na interface 5?
- **R:** Cada comutador tem uma **tabela de comutação**, cada entrada:
  - (endereço MAC do nó, interface para alcançar nó, horário)
- **P:** Como as entradas são criadas, mantidas na tabela de comutação?

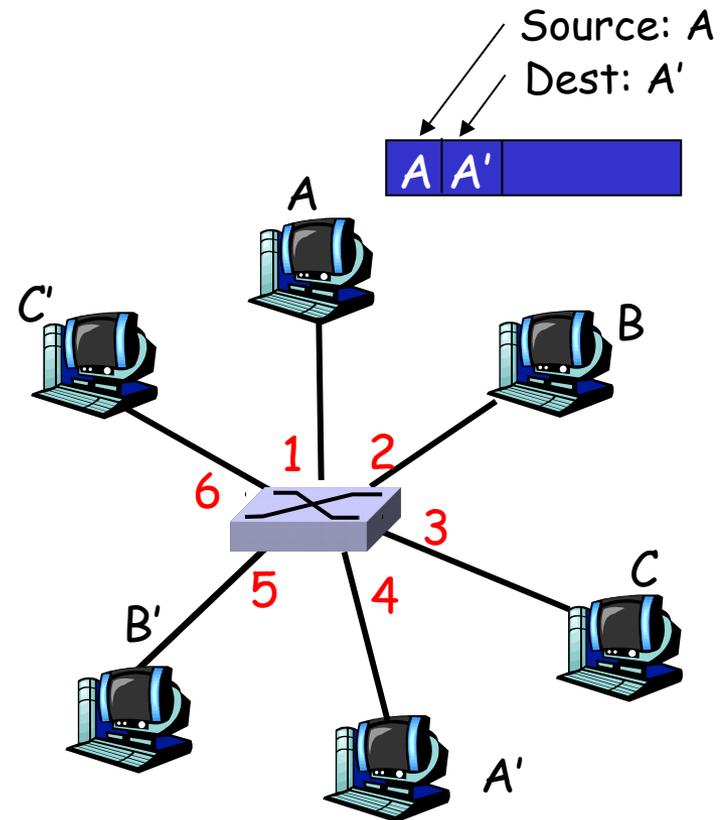


*comutador com 6 interfaces  
(1,2,3,4,5,6)*

# Comutador: autodidata

- ❑ comutador *descobre* quais nós podem ser alcançados por quais interfaces
  - quando quadro recebido, comutador "aprende" local do emissor: segmento de LAN de chegada
  - registra par emissor/local na tabela de comutação

end. MAC	interface	TTL
A	1	60

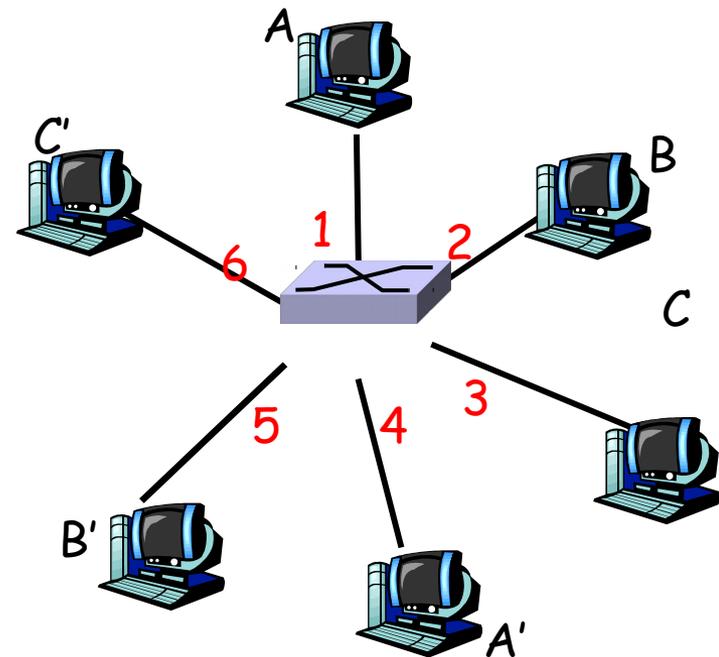


*Tabela comutação  
(inicialmente vazia)*

# Autoaprendizagem, repasse: exemplo

- Pacote de A para A'
  - destino do quadro desconhecido: *inunda*
- Pacote de A' para A
  - local de destino A conhecido: *envio seletivo*

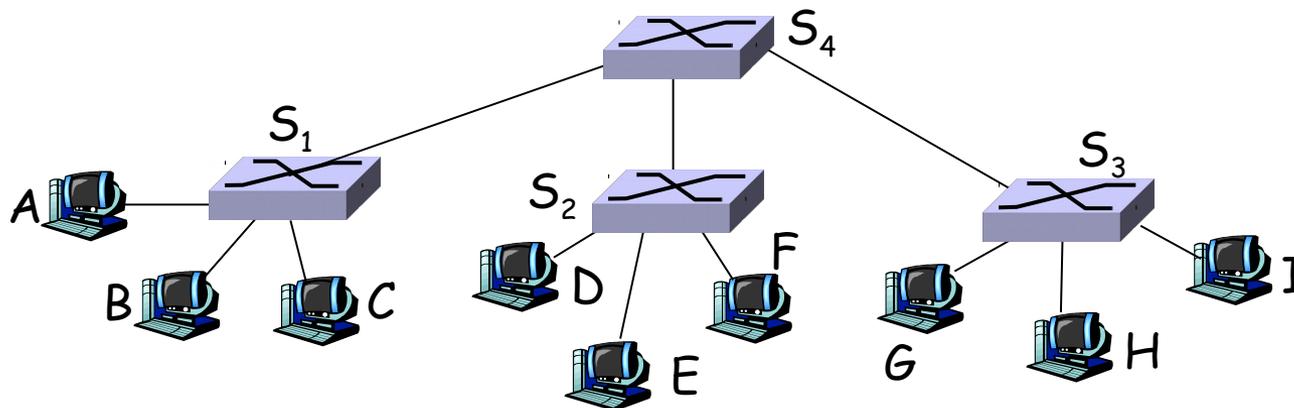
end. MAC	interface	TTL
A	1	60
A'	4	60



*Tabela comutação  
(inicialmente vazia)*

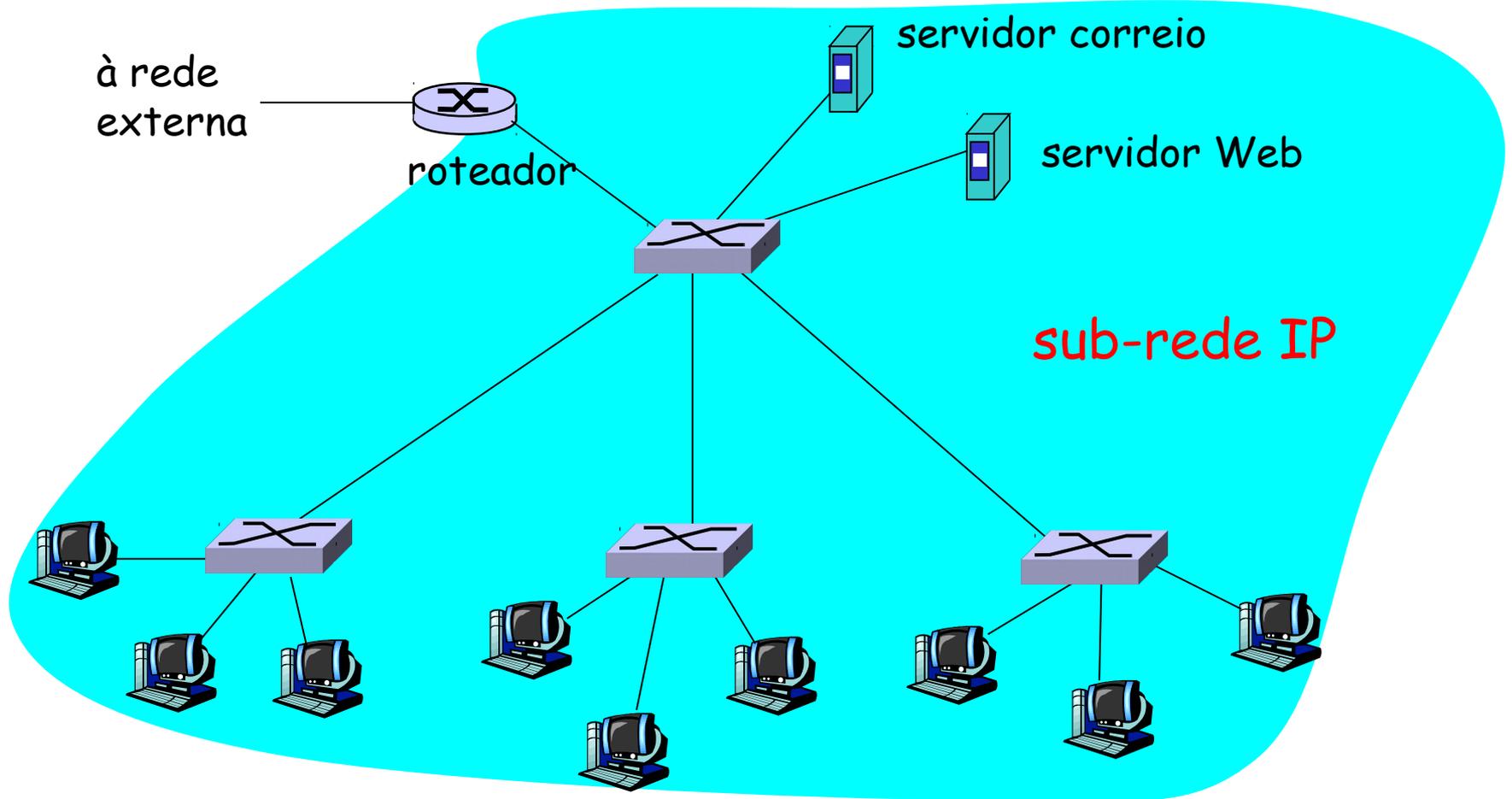
# Interconectando comutadores

- comutadores podem ser conectados



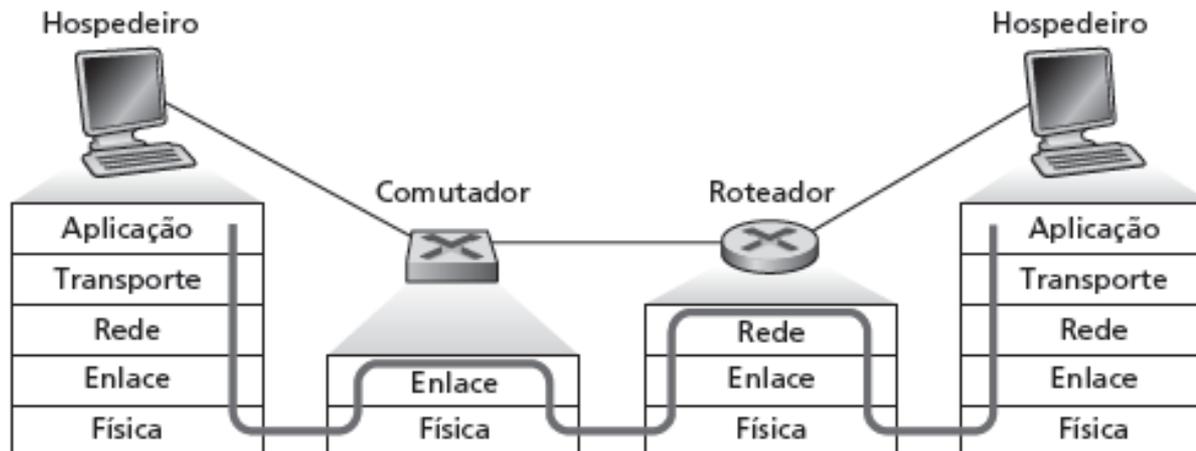
- **P:** Enviando de A p/ G - como S<sub>1</sub> sabe repassar quadro destinado a G por S<sub>4</sub> e S<sub>3</sub>?
- **R:** Autoaprendizagem! (funciona da mesma forma que no caso do único comutador!)

# Rede institucional



# Comutadores versus roteadores

- ambos dispositivos de armazenamento e repasse
  - roteadores: dispositivos da camada de rede (examinam cabeçalhos da camada de rede)
  - comutadores são dispositivos da camada de enlace
- roteadores mantêm tabelas de roteamento, implementam algoritmos de roteamento
- switches mantêm tabelas de comutação, implementam filtragem, algoritmos de aprendizagem



# Capítulo 5: Resumo

- princípios por trás dos serviços da camada de enlace de dados:
  - detecção e correção de erro
  - compartilhamento de canal de broadcast: acesso múltiplo
  - endereçamento da camada de enlace
- instanciação e implementação de várias tecnologias da camada de enlace
  - Ethernet
  - LANS comutadas
  - WiFi