

Capítulo 5: A Camada de Enlace e Redes Locais

Nossos objetivos:

- Entender os princípios por trás dos serviços da camada de enlace de dados:
 - detecção e correção de erros
 - compartilhamento de canal de *broadcast*: acesso múltiplo
 - endereçamento da camada de enlace
 - transferência confiável de dados, controle de fluxo: *feito!*
- instanciação e implementação de diversas tecnologias de camada de enlace

Camada de Enlace

5.1 Introdução e serviços

5.2 Técnicas de 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: o protocolo ponto-a-ponto

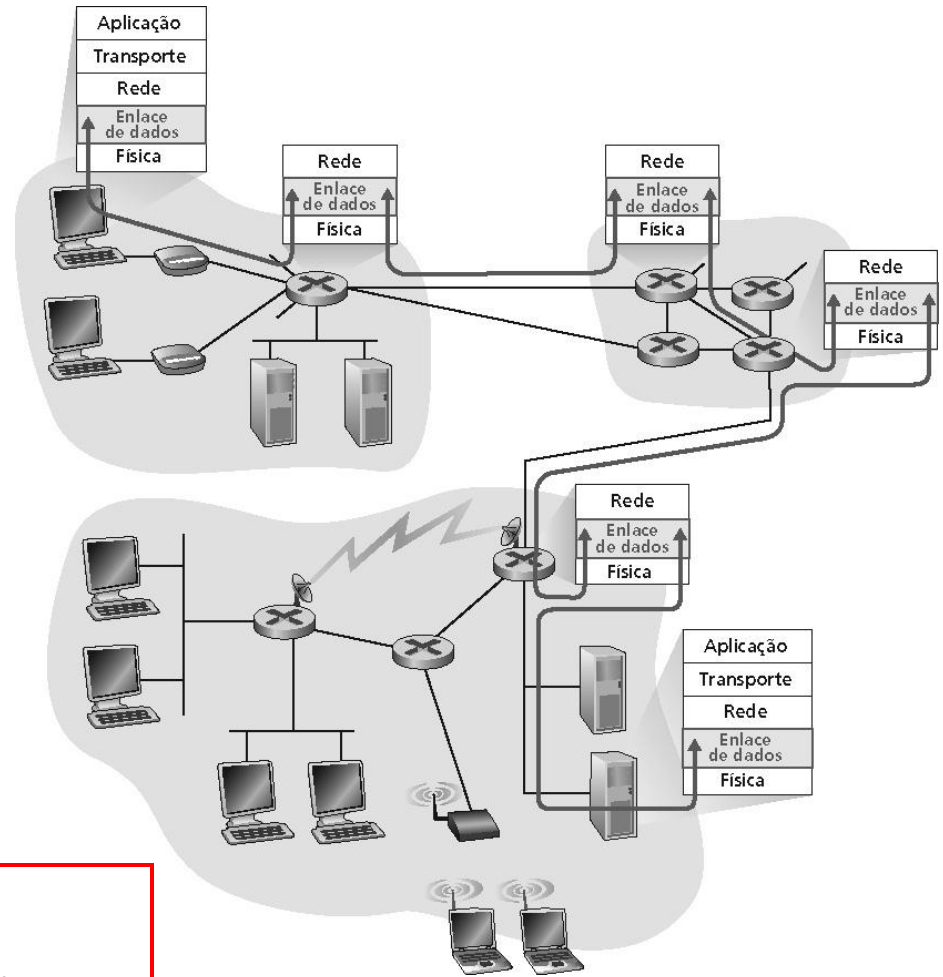
5.8 Virtualização de enlace: uma rede como camada de enlace

5.9 Um dia na vida de uma solicitação de página Web

Camada de Enlace: Introdução

Terminologia:

- hospedeiros e roteadores são **nós**
- canais de comunicação que conectam nós adjacentes ao longo de um caminho de comunicação são **enlaces** (*links*)
 - enlaces com fio (cabeados)
 - enlaces sem fio (não cabeados)
 - LANs
- Pacote da camada 2 é um **quadro** (*frame*), encapsula o datagrama



a camada de enlace é responsável por transferir os datagramas entre nós adjacentes através de um enlace

Camada de Enlace: Contexto

- Datagrama é transferido por diferentes protocolos de enlace em diferentes enlaces:
 - Ex.: Ethernet no primeiro enlace, frame relay em enlaces intermediários e 802.11 no último enlace
- Cada protocolo de enlace provê diferentes serviços
 - ex.: pode ou não prover transporte confiável de dados através do enlace

Analogia com um sistema de transporte

- Viagem de Princeton até Lausanne
 - taxi: Princeton até JFK
 - avião: JFK até Genebra
 - Trem: Genebra até Lausanne
- turista = datagrama
- segmento de transporte = enlace de comunicação
- meio de transporte = protocolo da camada de enlace
- agente de viagens = algoritmo/protocolo de roteamento

Serviços da Camada de Enlace

□ Enquadramento (Delimitação do quadro):

- encapsula datagrama num quadro adicionando cabeçalho e cauda (*trailer*).

□ Acesso ao enlace:

- implementa acesso ao canal se meio for compartilhado,
- 'endereços físicos (MAC)' são usados nos cabeçalhos dos quadros para identificar origem e destino de quadros em enlaces multiponto
 - Diferente do endereço IP!

□ Entrega confiável entre nós adjacentes:

- Já aprendemos como fazer isto (Capítulo 3)
- raramente usada em canais com baixas taxas de erro (fibra óptica, alguns tipos de pares trançados)
- Canais sem fio: altas taxas de erros
 - P: para que confiabilidade na camada de enlace e fim-a-fim?

Serviços da Camada de Enlace (mais)

□ *Controle de Fluxo:*

- compatibilizar taxas de produção e consumo de quadros entre remetentes e receptores

□ *Detecção de Erros:*

- erros são causados por atenuação do sinal e por ruído
- receptor detecta presença de erros
 - receptor sinaliza ao remetente para retransmissão, ou simplesmente descarta o quadro em erro

□ *Correção de Erros:*

- mecanismo que permite que o receptor localize *e corrija* o(s) erro(s) sem precisar da retransmissão

□ *Half-duplex e full-duplex*

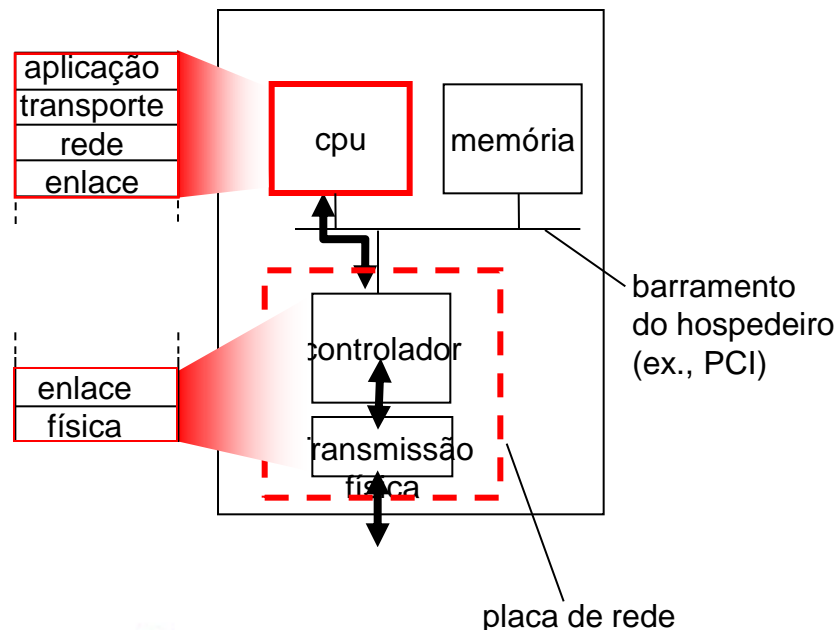
- com half duplex um nó não pode transmitir e receber pacotes ao mesmo tempo

Onde a camada de enlace é implementada?

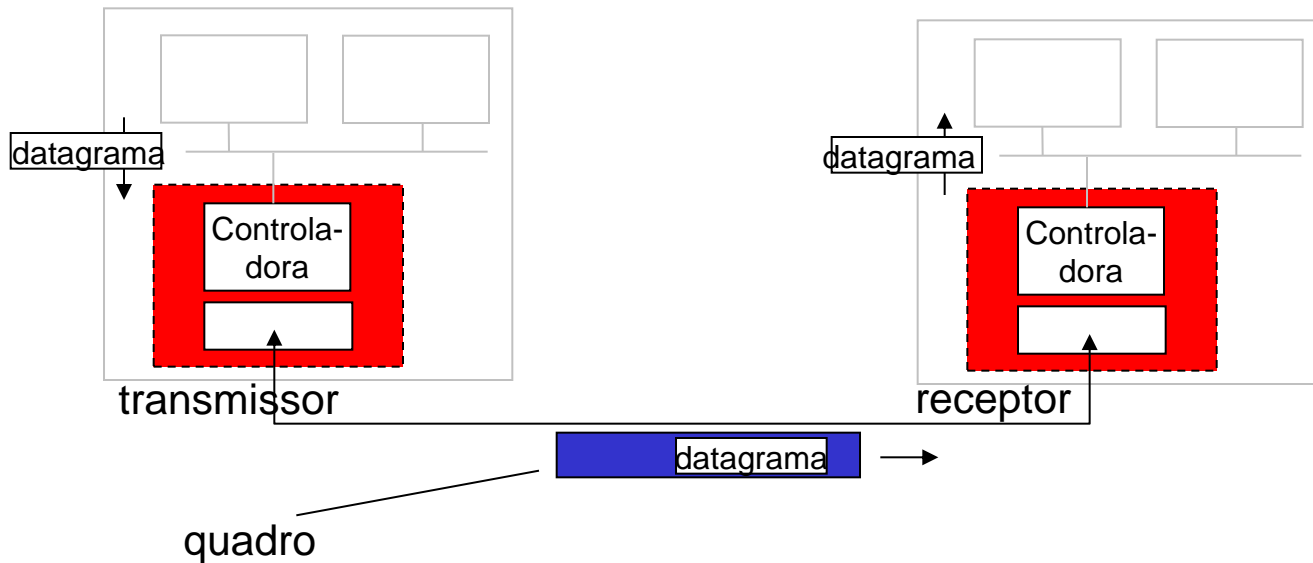
- em cada um dos hospedeiros
- camada de enlace implementada no "adaptador" (NIC - *Network Interface Card*)
 - placa Ethernet, cartão PCMCIA, cartão 802.11
 - implementa as camadas de enlace e física
- conecta ao barramento de sistema do hospedeiro
- combinação de hardware, software e firmware



Diagrama de blocos do hospedeiro



Comunicação entre Adaptadores



□ lado transmissor:

- Encapsula o datagrama em um quadro
- Adiciona bits de verificação de erro, transferência confiável de dados, controle de fluxo, etc.

□ lado receptor

- verifica erros, transporte confiável, controle de fluxo, etc.
- extrai o datagrama, passa-o para o nó receptor

Camada de Enlace

5.1 Introdução e serviços

5.2 Técnicas de detecção e correção de erros

5.3 Protocolos de acesso múltiplo

5.4 Endereçamento na Camada de Enlace

5.5 Ethernet

5.6 Comutadores da camada de enlace

5.7 PPP: o protocolo ponto-a-ponto

5.8 Virtualização de enlace: uma rede como camada de enlace

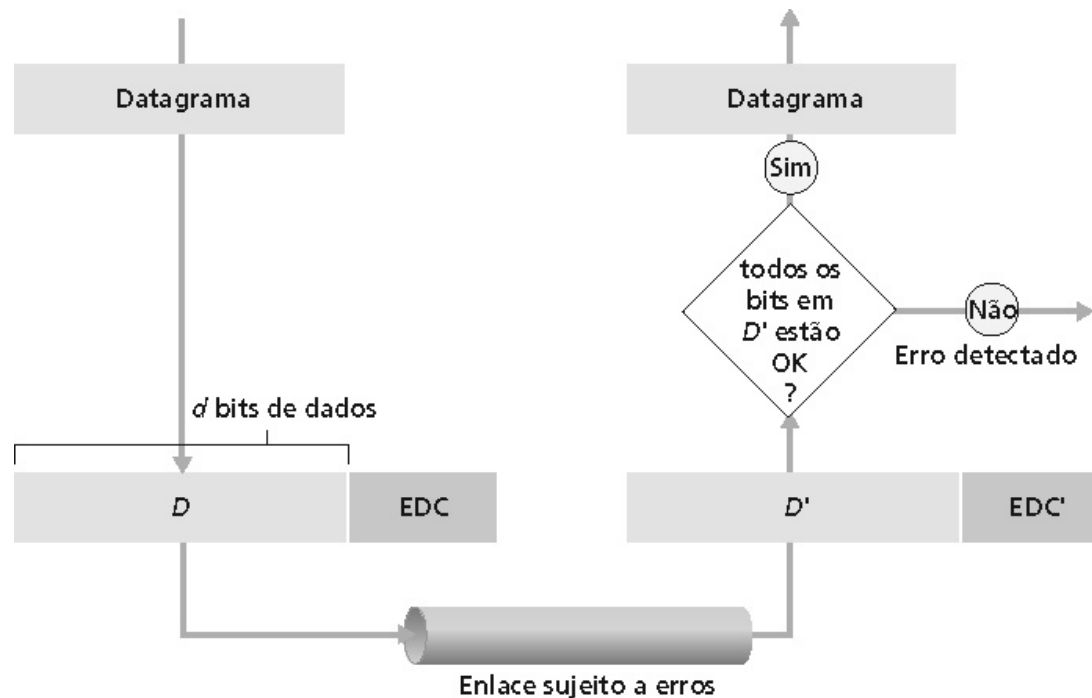
5.9 Um dia na vida de uma solicitação de página Web

Detecção de Erros

EDC= bits de Detecção e Correção de Erros (redundância)

D = Dados protegidos por verificação de erros, podem incluir alguns campos do cabeçalho

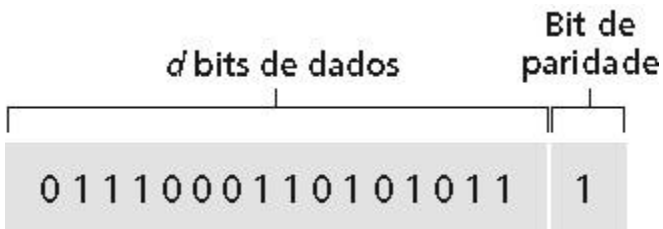
- detecção de erros não é 100% confiável;
 - protocolos podem deixar passar alguns erros, mas é raro
 - quanto maior o campo EDC melhor será a capacidade de detecção e correção de erros



Verificações de Paridade

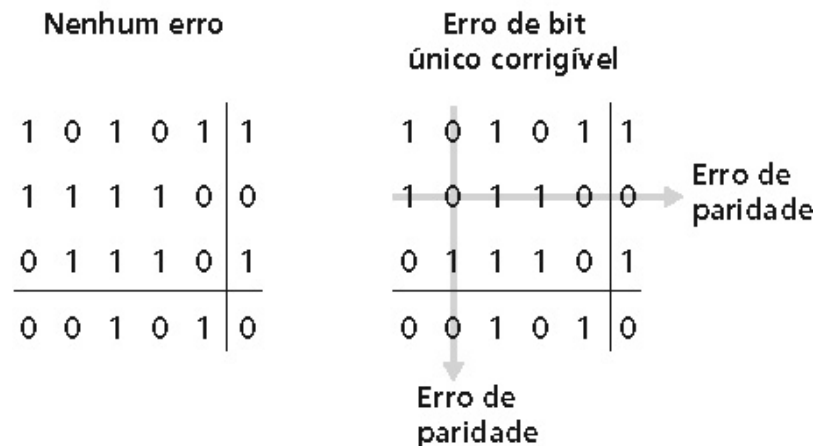
Paridade de 1 Bit:

Detecta erros em um único bit



Paridade Bidimensional:

Detecta e corrige erro em um único bit



Soma de verificação da Internet

Objetivo: detectar "erros" (ex., bits trocados) no segmento transmitido (nota: usado *apenas* na camada de transporte)

Transmissor:

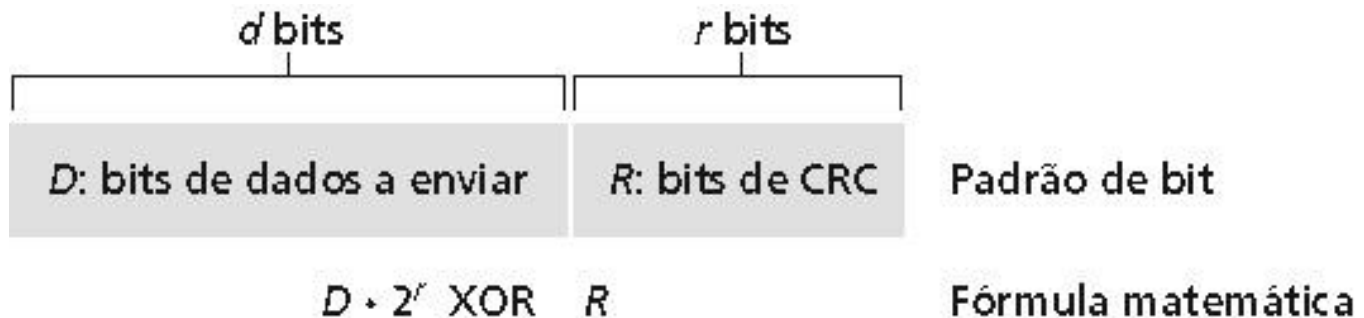
- trata o conteúdo do segmento como uma seqüência de inteiros de 16 bits
- Soma de verificação: adição (complemento de 1 da soma) do conteúdo do segmento
- transmissor coloca o valor do checksum no campo de checksum UDP

Receptor:

- calcula a soma de verificação do segmento recebido
- verifica se o resultado é igual ao valor do campo da soma de verificação:
 - NÃO - erro detectado
 - SIM - nenhum erro foi detectado. *Mas pode conter erros? Mais sobre isto posteriormente*

Verificação de redundância cíclica (CRC)

- Dados considerados como a seqüência de coeficientes de um polinômio (**D**)
- É escolhido um polinômio *Gerador*, (**G**), ($\Rightarrow r+1$ bits)
 - Divide-se (módulo 2) o polinômio $D \cdot 2^r$ por G . Acrescenta-se o resto (**R**) a D . Observa-se que, por construção, a nova seqüência $\langle D, R \rangle$ agora é exatamente divisível por G
 - Receptor conhece G , divide $\langle D, R \rangle$ por G . Caso o resto seja diferente de zero: detectado erro!
 - Pode detectar todos os erros em rajadas menores do que $r+1$ bits
- Largamente usado na prática (Ethernet, 802.11 WiFi, ATM)



Exemplo de CRC

Queremos:

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

de forma equivalente:

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

de forma equivalente :

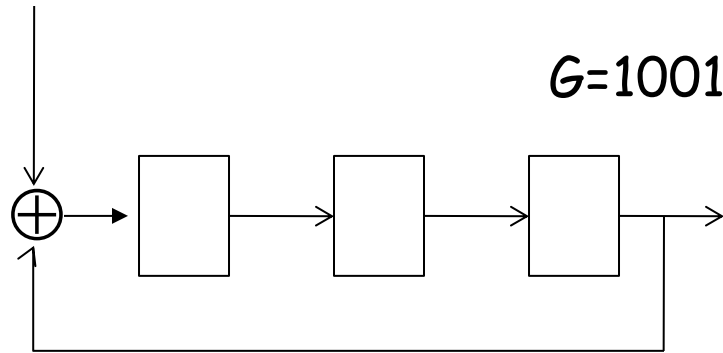
se dividirmos $D \cdot 2^r$ por G , queremos o resto R

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

<u>D</u>		<u>G</u>
101110000		1001
<u>1001</u>		<u>101011</u>
1010		
<u>1001</u>		
1100		
<u>1001</u>		
1010		
<u>1001</u>		
011		
		<u>R</u>

Implementação em Hardware

$D \cdot 2^r = 101110000$



Camada de Enlace

5.1 Introdução e serviços

5.2 Técnicas de detecção e correção de erros

5.3 Protocolos de acesso múltiplo

5.4 Endereçamento na Camada de Enlace

5.5 Ethernet

5.6 Comutadores da camada de enlace

5.7 PPP: o protocolo ponto-a-ponto

5.8 Virtualização de enlace: uma rede como camada de enlace

5.9 Um dia na vida de uma solicitação de página Web

Enlaces e Protocolos de Acesso Múltiplo

Dois tipos de enlaces:

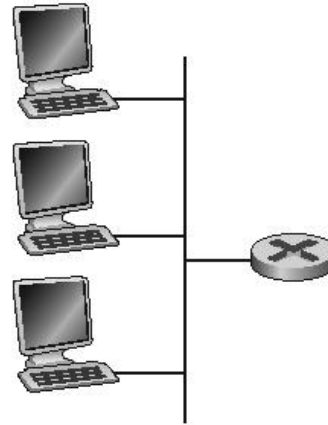
□ **Ponto-a-ponto:**

- PPP para acesso discado
- Conexão entre switch Ethernet e hospedeiro

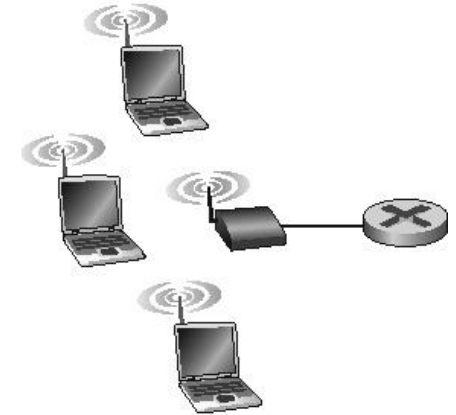
□ **broadcast** (cabo ou meio compartilhado):

- Ethernet tradicional
- Upstream HFC
- 802.11 LAN sem fio
- Satélite
- Etc.

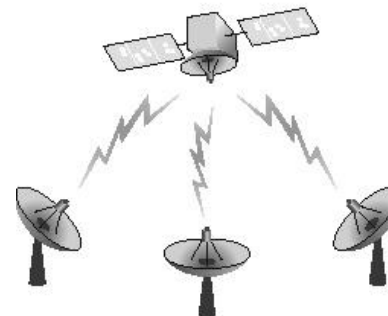
Compartilhado com fio
(por exemplo, Ethernet)



Compartilhado sem fio
(por exemplo, Wi-Fi)



Satélite



Coquetel



Protocolos de Acesso Múltiplo

- canal de comunicação único de *broadcast*
- interferência: quando dois ou mais nós transmitem simultaneamente
 - **colisão** se um nó receber dois ou mais sinais ao mesmo tempo

Protocolo de acesso múltiplo

- algoritmo distribuído que determina como os nós compartilham o canal, isto é, determina quando um nó pode transmitir
- comunicação sobre o compartilhamento do canal deve usar o próprio canal!
 - não há canal fora da faixa para coordenar a transmissão

Protocolo Ideal de Acesso Múltiplo

Para um canal de *broadcast* com taxa de R bps:

1. Quando apenas um nó tem dados para enviar, esse nó obtém uma vazão de R bps.
2. Quando M nós têm dados para enviar, cada um desses nós poderá transmitir em média a uma taxa de R/M bps.
3. Completamente descentralizado
 - nenhum nó especial (mestre) para coordenar as transmissões
 - nenhuma sincronização de relógios ou slots
4. Simples para que sua implementação seja barata

Taxonomia dos Protocolos MAC

Três categorias gerais:

□ **Divisão de Canal**

- divide o canal em pequenos "pedaços"
(*slots*/compartimentos de tempo, frequência, código)
- aloca pedaço a um dado nó para uso exclusivo deste

□ **Acesso Aleatório**

- canal não é dividido, podem ocorrer colisões
- "recuperação" das colisões

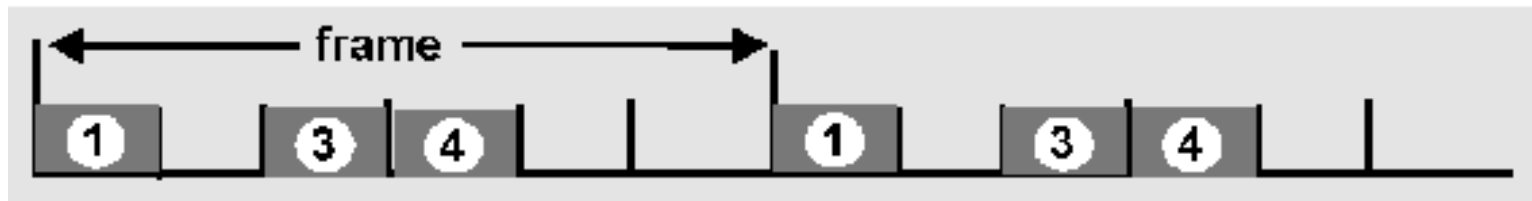
□ **Revezamento**

- Nós se alternam em revezamento, mas nós que possuem mais dados a transmitir podem demorar mais quando chegar a sua vez

Protocolos MAC de divisão de canal: TDMA

TDMA: Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo

- acesso ao canal em "turnos"
- cada estação recebe um comprimento fixo de compartimento (comprimento = tempo de tx do pacote) em cada turno
- compartimentos não usados permanecem ociosos
- Exemplo: LAN com 6 estações: compartimentos 1, 3 e 4 com pacotes, compartimentos 2, 5 e 6 ociosos



Protocolos de Acesso Aleatório

- Quando nó tem um pacote para transmitir
 - transmite na taxa máxima R .
 - nenhuma coordenação *a priori* entre os nós
- dois ou mais nós transmitindo → "colisão",
- O **protocolo MAC de acesso aleatório** especifica:
 - como detectar colisões
 - como se recuperar delas (através de retransmissões retardadas, por exemplo)
- Exemplos de protocolos MAC de acesso aleatório:
 - slotted ALOHA
 - ALOHA
 - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

CSMA (Acesso múltiplo com detecção de portadora)

CSMA (Carrier Sense Multiple Access):

Escuta antes de transmitir (detecção de portadora):

- Se o canal estiver livre: transmite todo o quadro
 - Se o canal estiver ocupado, adia a transmissão
- Analogia humana: não interrompa outros!

Colisões no CSMA

colisões ainda *podem* acontecer:

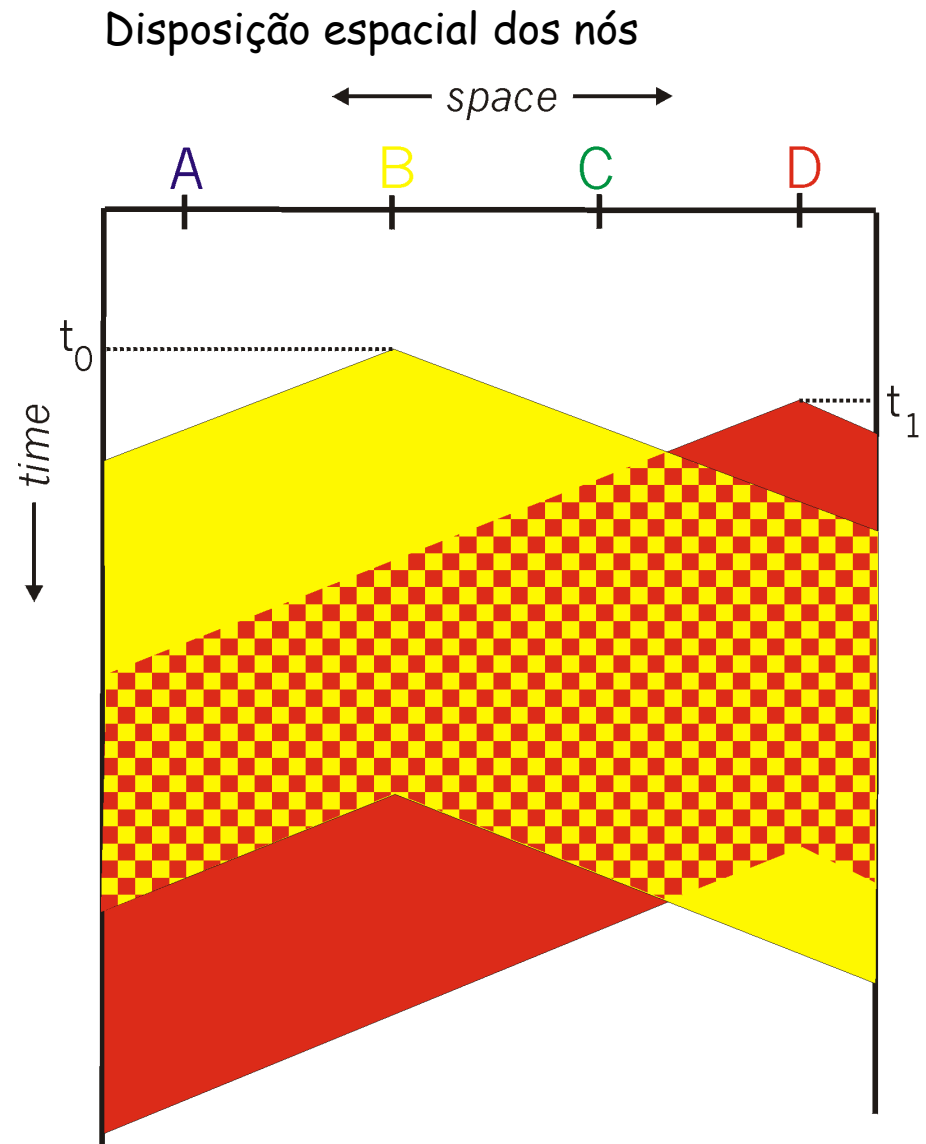
atraso de propagação significa que dois nós podem não ouvir a transmissão do outro

colisão:

todo o tempo de transmissão é desperdiçado

nota:

papel da distância e atraso de propagação na determinação da probabilidade de colisão

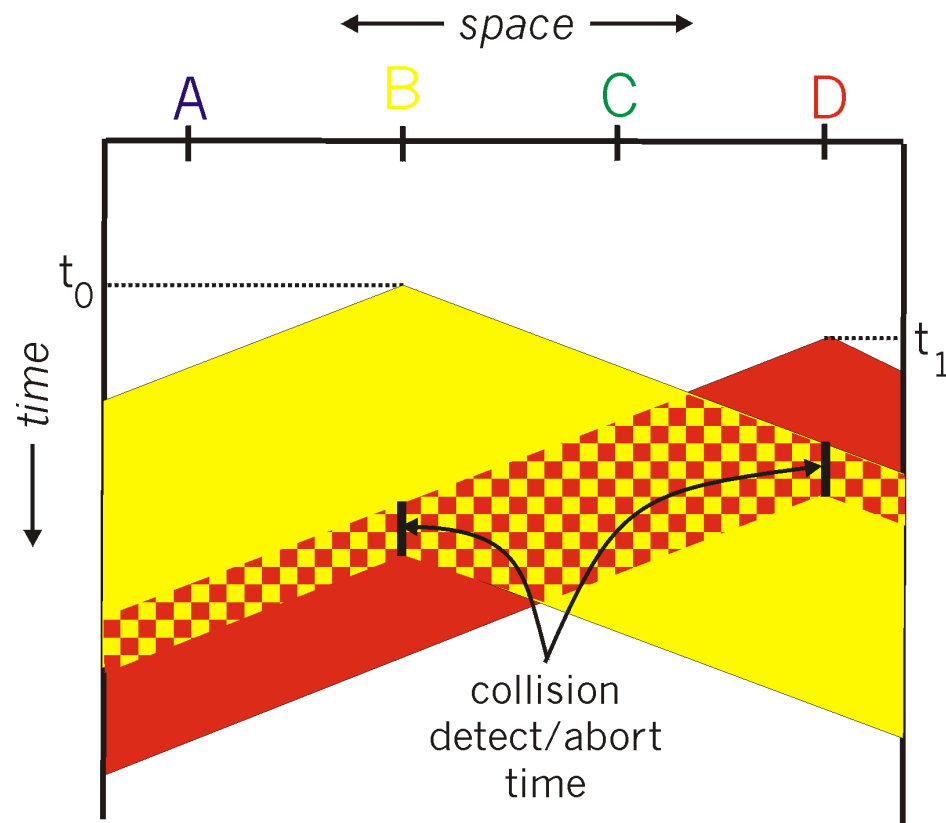


CSMA/CD (Detecção de Colisões)

CSMA/CD: detecção da portadora, adia a transmissão como no CSMA

- As colisões são *detectadas* em pouco tempo
- Transmissões que sofreram colisões são abortadas, reduzindo o desperdício do canal
- Detecção de colisões:
 - Fácil em LANs cabeadas: mede a potência do sinal, compara o sinal recebido com o transmitido
 - Difícil em LANs sem fio: o receptor é desligado durante a transmissão
- Analogia humana: bate papo educado!

Detecção de colisões em CSMA/CD



Protocolos MAC de "revezamento"

Protocolos MAC de divisão de canal:

- Compartilha o canal eficientemente e de forma justa em altas cargas
- Ineficiente em baixas cargas: atraso no canal de acesso, alocação de $1/N$ da largura de banda mesmo com apenas 1 nó ativo!

Protocolos MAC de acesso aleatório:

- eficiente em baixas cargas: um único nó pode utilizar completamente o canal
- Altas cargas: overhead com colisões

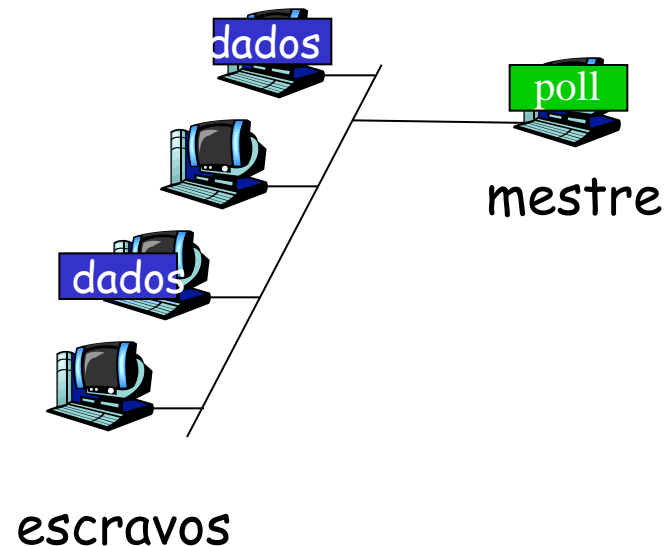
Protocolos de revezamento:

Procura oferecer o melhor dos dois mundos!

Protocolos MAC de "revezamento"

Seleção (*Polling*):

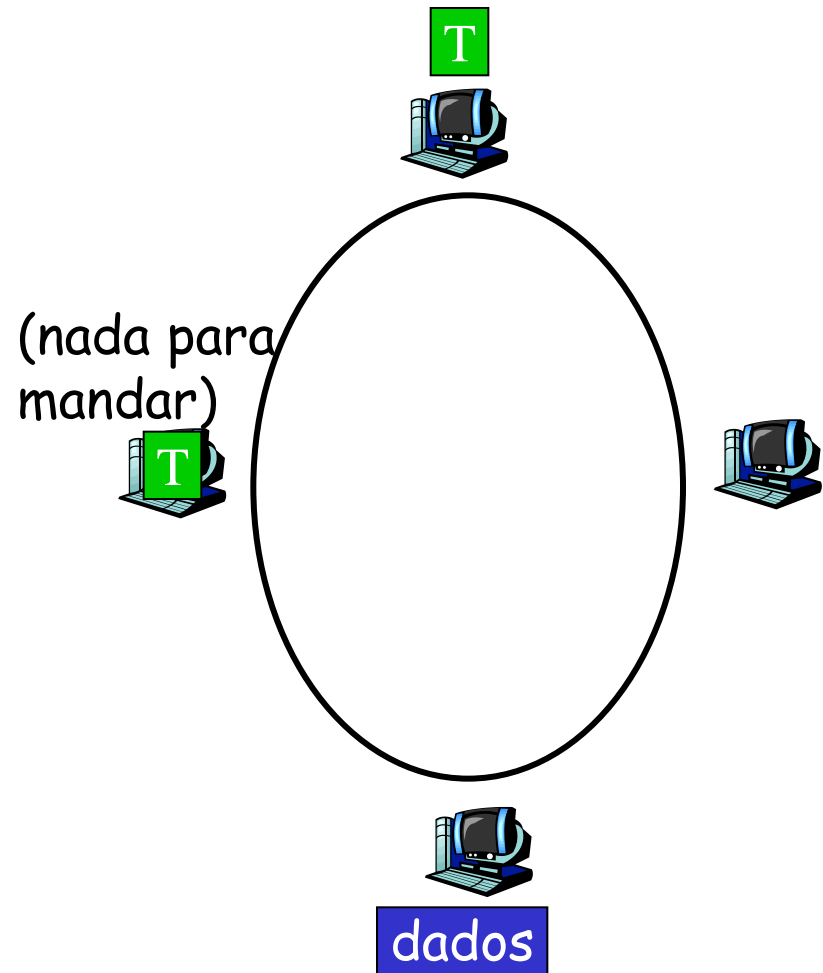
- ❑ Nó mestre "convida" nós escravos a transmitir em revezamento
- ❑ Usado tipicamente com dispositivos escravo burros.
- ❑ Preocupações:
 - Overhead com as consultas (*polling*)
 - Latência
 - Ponto único de falha (mestre)



Protocolos MAC de "revezamento"

Passagem de permissão (*token*):

- controla **permissão** passada de um nó para o próximo de forma sequencial.
- mensagem de passagem da permissão
- preocupações:
 - overhead com a passagem de permissão
 - latência
 - Ponto único de falha (permissão)



Resumo dos protocolos MAC

- **Divisão do canal** por tempo, frequência ou código
 - Divisão de Tempo, Divisão de Frequência
- **Particionamento Aleatório** (dinâmico):
 - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
 - Escutar a portadora: fácil em algumas tecnologias (cabeadas), difícil em outras (sem fio)
 - CSMA/CD usado na Ethernet
 - CSMA/CA usado no 802.11
- **Revezamento**
 - Seleção (*polling*) a partir de um ponto central, passagem de permissões
 - Bluetooth, FDDI, Token Ring (IBM)

Camada de Enlace

5.1 Introdução e serviços

5.2 Técnicas de detecção e correção de erros

5.3 Protocolos de acesso múltiplo

5.4 Endereçamento na Camada de Enlace

5.5 Ethernet

5.6 Comutadores da camada de enlace

5.7 PPP: o protocolo ponto-a-ponto

5.8 Virtualização de enlace: uma rede como camada de enlace

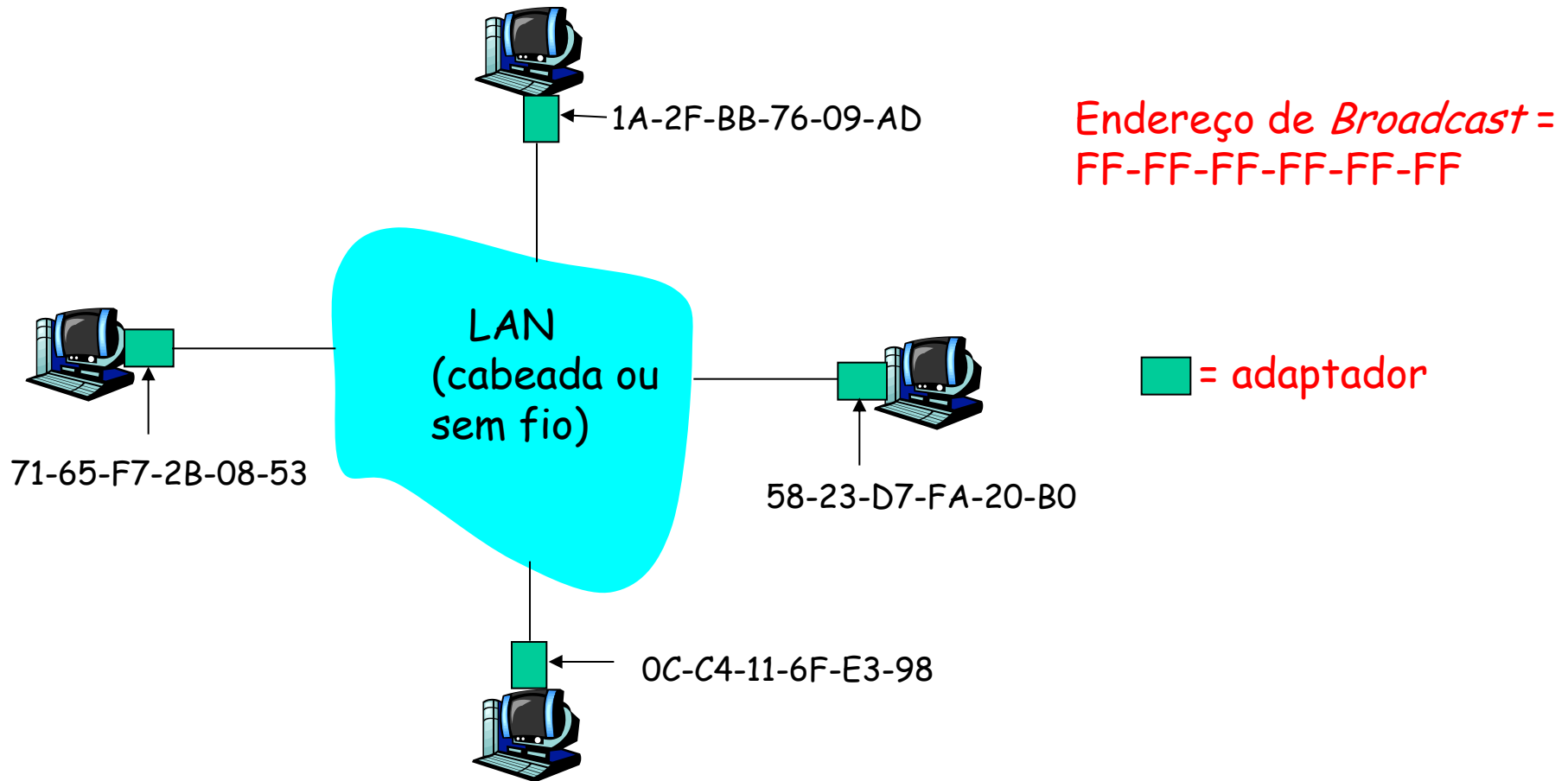
5.9 Um dia na vida de uma solicitação de página Web

Endereços MAC

- Endereço IP de 32 bits:
 - Endereços da camada de rede
 - Usado para levar o datagrama à subrede IP destino
- Endereço MAC (ou LAN, ou físico, ou Ethernet):
 - levar o datagrama de uma interface até outra interface conectada fisicamente (na mesma rede)
 - Endereço MAC de 48 bits (para a maioria das redes):
 - gravado na ROM do adaptador, ou configurado por software

Endereços MAC

Cada adaptador na LAN possui um endereço MAC único



Endereço MAC (cont)

- Alocação de endereços MAC gerenciada pelo IEEE
- Um fabricante compra uma parte do espaço de endereços (para garantir unicidade)
- Analogia:
 - (a) endereço MAC: como número do CPF
 - (b) endereço IP: como endereço postal (CEP)
- endereço MAC tem estrutura linear => portabilidade
 - Pode mover um cartão LAN de uma LAN para outra
- endereço IP hierárquico NÃO é portátil (requer IP móvel)
 - Depende da subrede IP à qual o nó está conectado

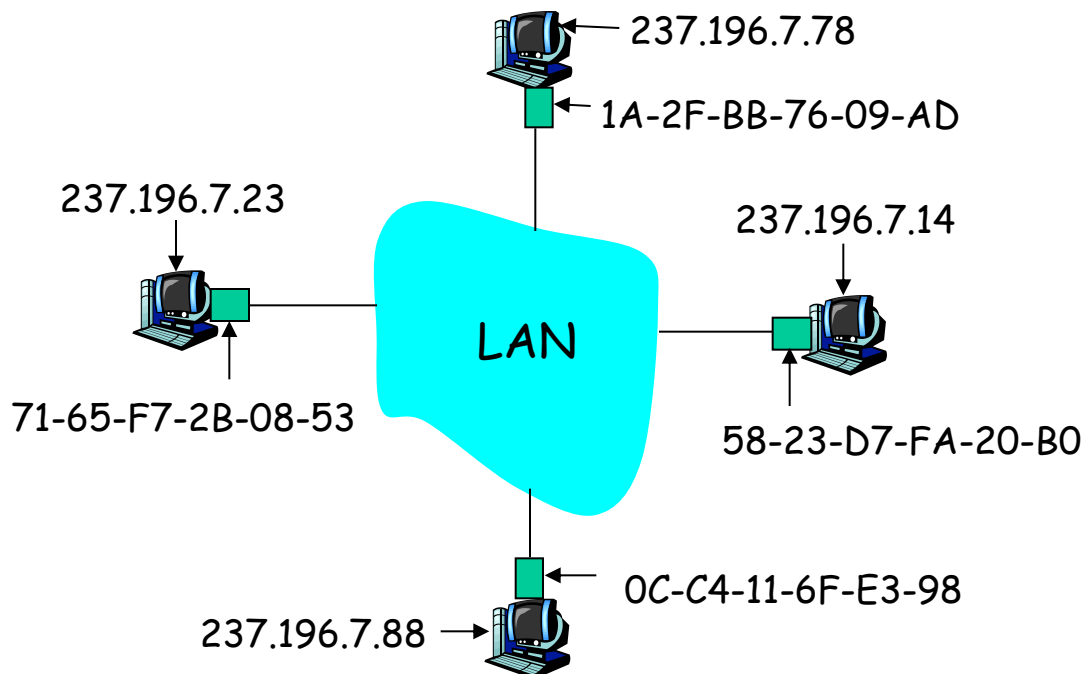
ARP: Address Resolution Protocol (Protocolo de Resolução de Endereços)

Pergunta: como obter o endereço MAC de B a partir do endereço IP de B?

- Cada nó IP (Host, Roteador) de uma LAN possui tabela **ARP**
- Tabela ARP: mapeamento de endereços IP/MAC para alguns nós da LAN

< endereço IP; endereço MAC; TTL >

- TTL (*Time To Live*): tempo a partir do qual o mapeamento de endereços será esquecido (valor típico de 20 min)



Camada de Enlace

5.1 Introdução e serviços

5.2 Técnicas de detecção e correção de erros

5.3 Protocolos de acesso múltiplo

5.4 Endereçamento na Camada de Enlace

5.5 Ethernet

5.6 Comutadores da camada de enlace

5.7 PPP: o protocolo ponto-a-ponto

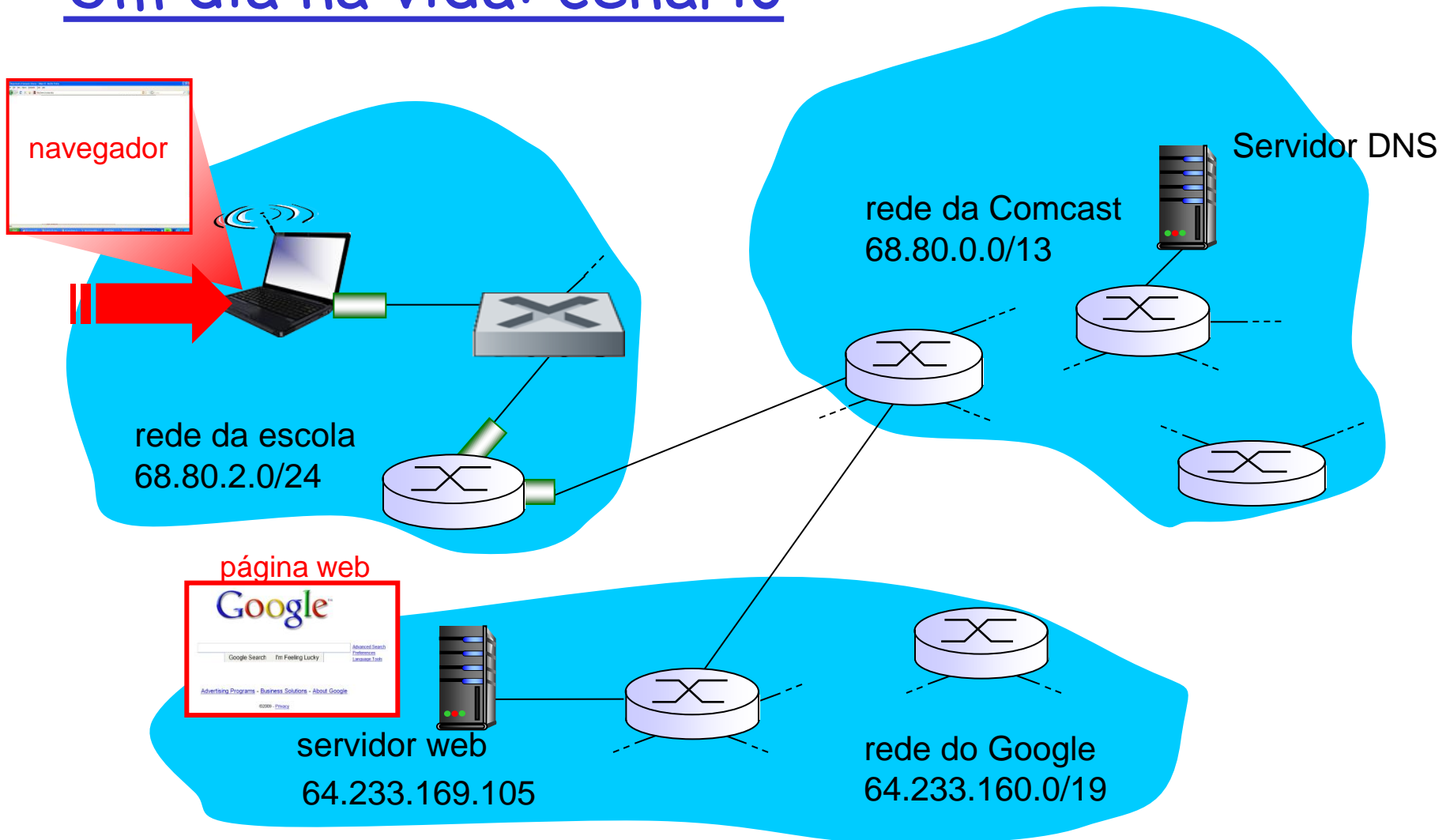
5.8 Virtualização de enlace: uma rede como camada de enlace

5.9 Um dia na vida de uma solicitação de página Web

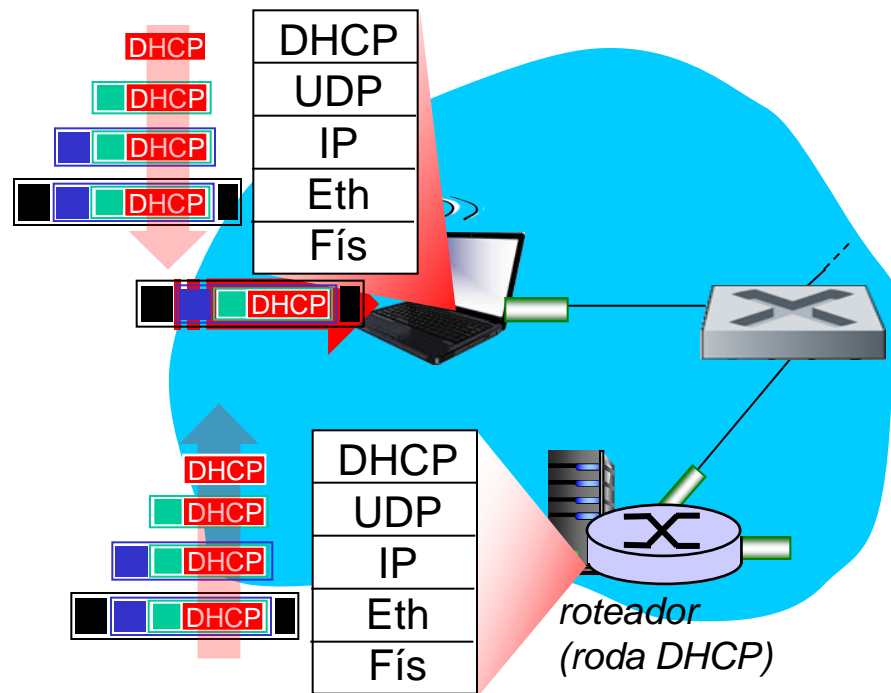
Síntese: um dia na vida de um pedido web

- ❖ jornada completa atravessando toda a pilha de protocolos!
 - aplicação, transporte, rede, enlace
- ❖ colocando tudo junto: síntese!
 - *objetivo:* identificar, revisar, entender os protocolos (em todas as camadas) envolvidos em um cenário aparentemente simples: solicitação de uma página web
 - *cenário:* estudante conecta laptop à rede do campus, solicita/recebe www.google.com

Um dia na vida: cenário

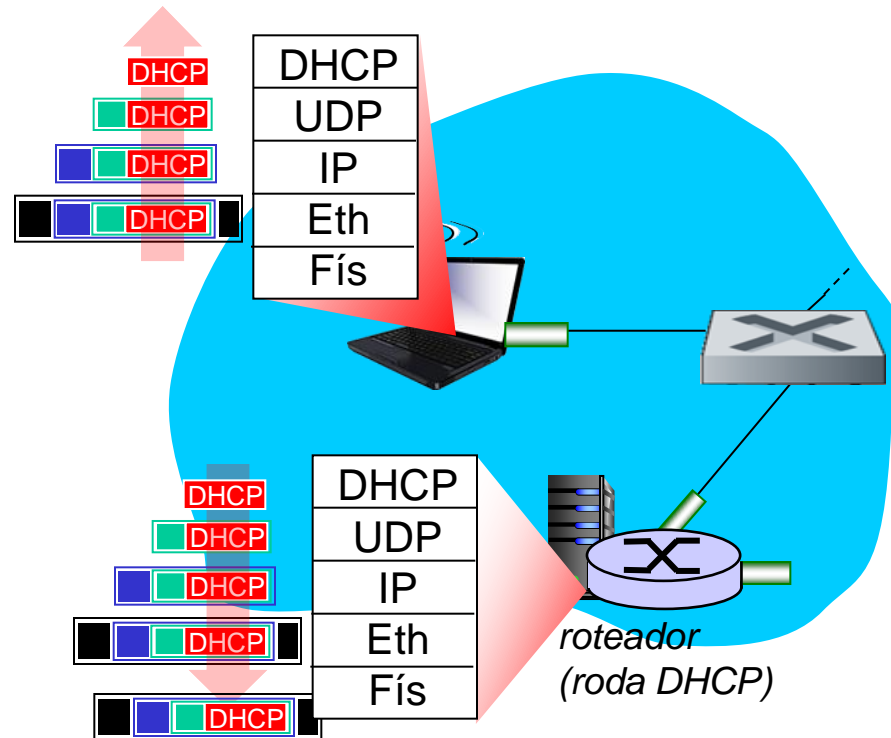


Um dia na vida... conectando à Internet



- ❖ o laptop necessita obter o seu endereço IP, o endereço do primeiro roteador e endereço do servidor DNS: usa o **DHCP**.
- ❖ Solicitação DHCP **encapsulada** em **UDP**, encapsulada no **IP**, encapsulada no **802.3 Ethernet**
- ❖ quadro Ethernet **difundido** (dest: FFFFFFFFFFFFFF) na LAN, é recebido pelo roteador que executa o servidor **DHCP**
- ❖ Ethernet **demultiplexado** para IP, demultiplexado para UDP e demultiplexado para DHCP

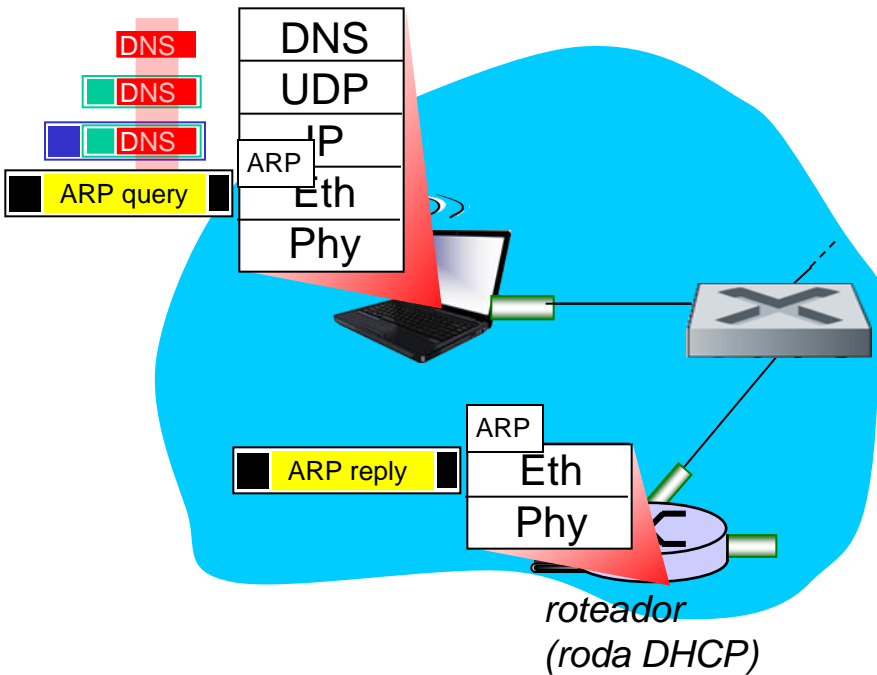
Um dia na vida... conectando à Internet



- servidor DHCP prepara **ACK DHCP** contendo endereço IP do cliente, endereço IP do primeiro roteador, nome e endereço IP do servidor DNS
- ❖ encapsulamento no servidor DHCP, quadro repassado (**aprendizado do switch**) através da LAN, demultiplexação no cliente
- ❖ cliente DHCP recebe a resposta ACK DHCP

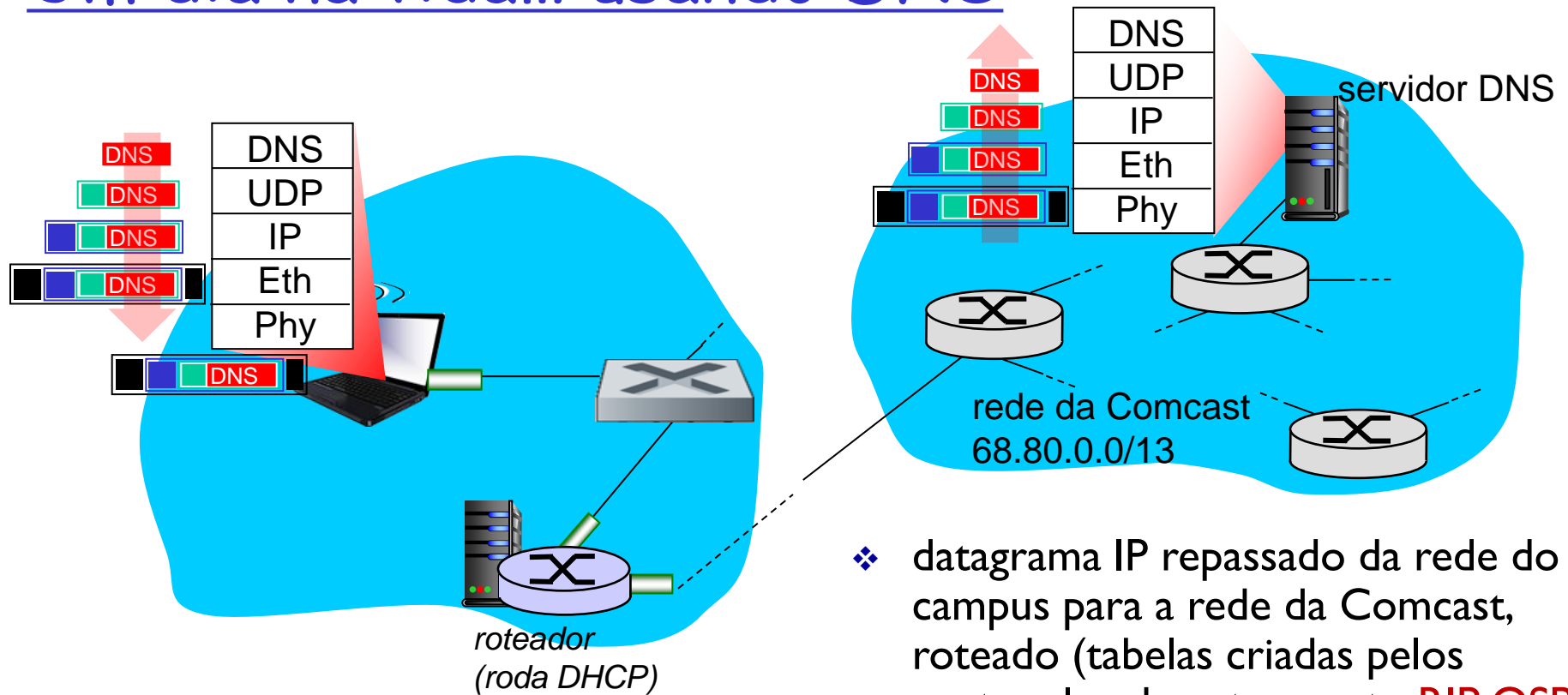
Cliente agora possui um endereço IP, conhece o nome e end. do servidor DNS, e o endereço IP do seu primeiro roteador

Um dia na vida... ARP (antes do DNS, antes do HTTP)



- ❖ antes de enviar pedido **HTTP**, necessita o endereço IP de **www.google.com**: **DNS**
- ❖ consulta **DNS** criada, encapsulada no **UDP**, encapsulada no **IP**, encapsulada no **Eth**. Para enviar quadro ao roteador, necessita o endereço **MAC** da interface do roteador: **ARP**
- ❖ **consulta ARP** difundida, recebida pelo roteador, que responde com uma **ARP reply** dando o endereço **MAC** da interface do roteador
- ❖ o cliente agora conhece o endereço **MAC** do primeiro roteador; podendo agora enviar o quadro contendo a consulta **DNS**

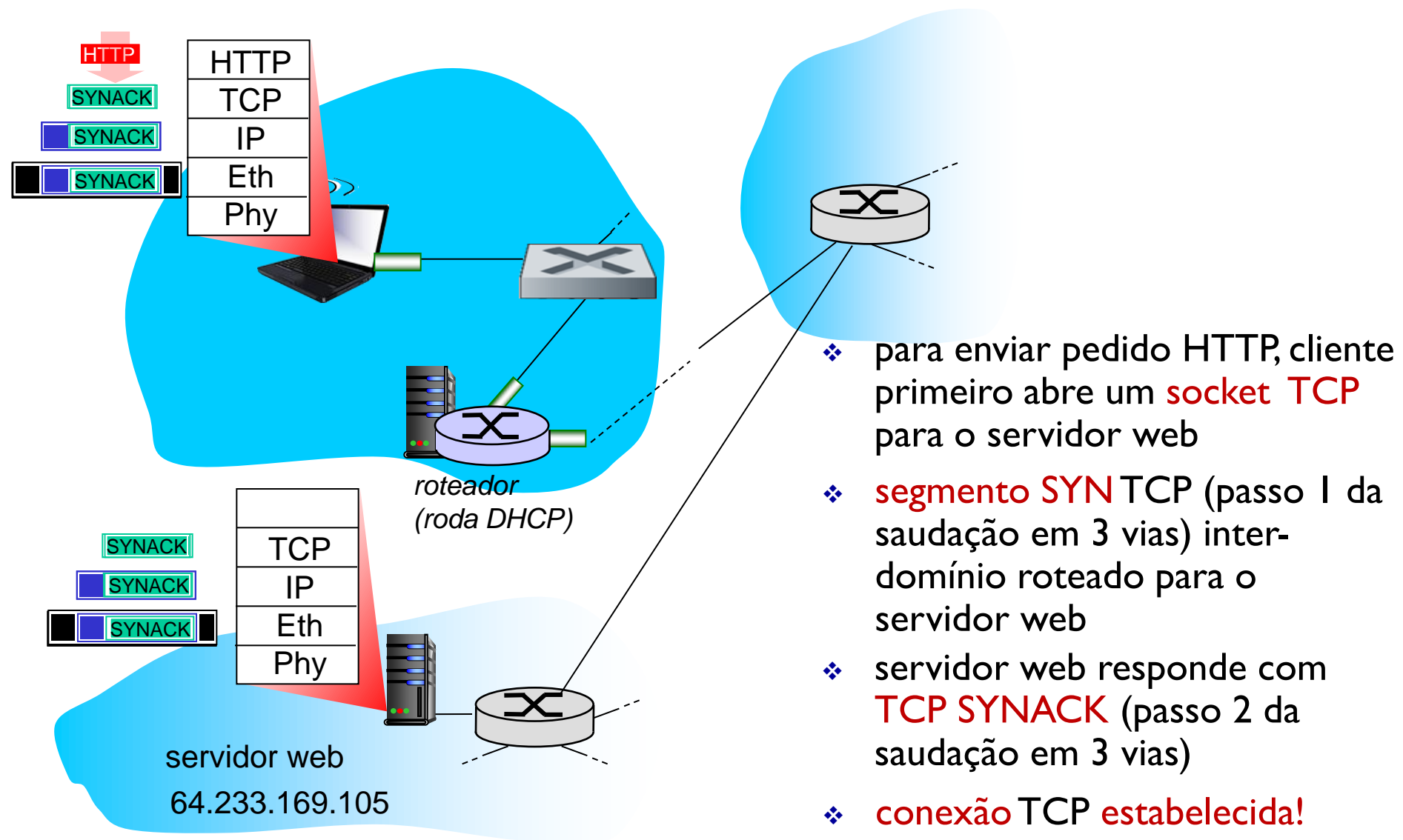
Um dia na vida... usando DNS



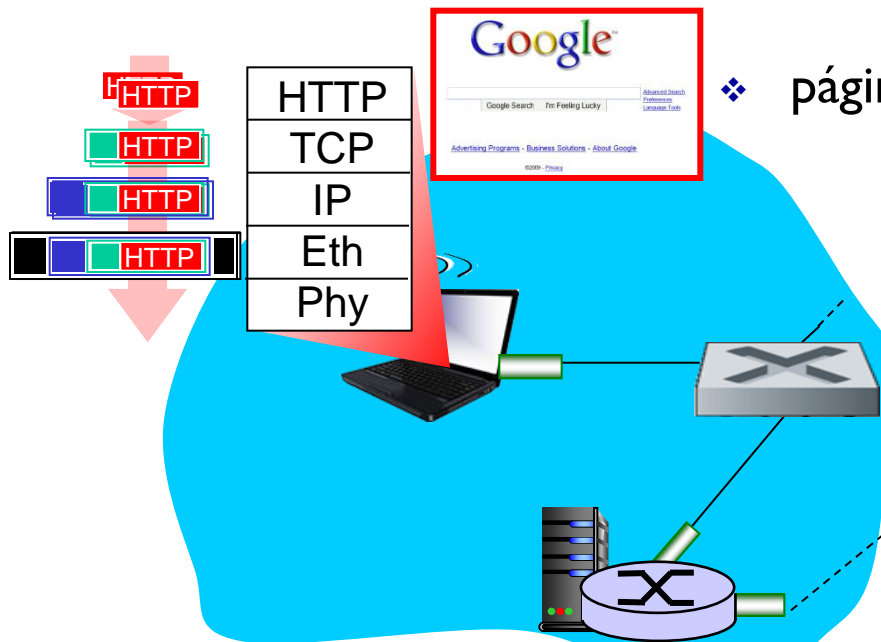
- ❖ datagrama IP contém consulta DNS encaminhada através do switch LAN do cliente até o primeiro roteador

- ❖ datagrama IP repassado da rede do campus para a rede da Comcast, roteado (tabelas criadas pelos protocolos de roteamento **RIP**, **OSPF**, **IS-IS** e/ou **BGP**) para o servidor DNS
- ❖ demultiplexado pelo servidor DNS
- ❖ servidor DNS responde ao cliente com o endereço IP de www.google.com

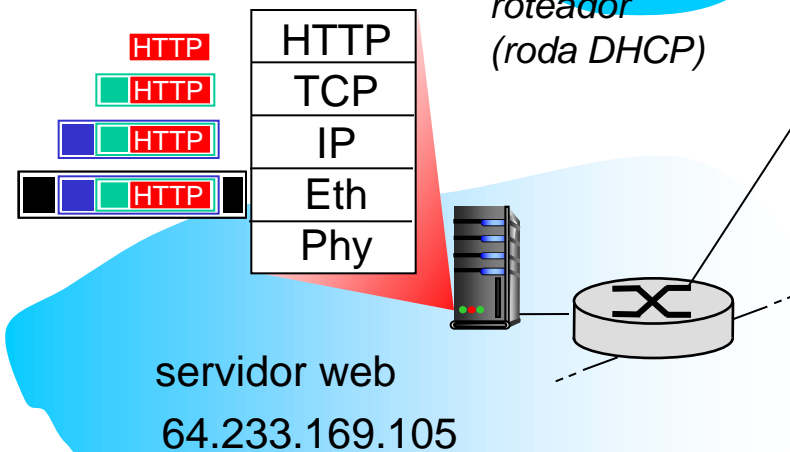
Um dia na vida... conexão TCP transportando HTTP



Um dia na vida... solicitação/resposta HTTP



❖ página web **finalmente(!!!)** apresentada



- ❖ **solicitação HTTP** enviada para o socket TCP
- ❖ datagrama IP que contém a solicitação HTTP é encaminhado para `www.google.com`
- ❖ servidor web responde com **resposta HTTP** (contendo a página web)
- ❖ datagrama IP com a resposta HTTP é encaminhado de volta para o cliente

Capítulo 5: Resumo

- princípios por trás dos serviços da camada de enlace de dados:
 - detecção, correção de erros
 - compartilhamento de canal de difusão: acesso múltiplo
 - endereçamento da camada de enlace
- instanciação e implementação de diversas tecnologias de camada de enlace
 - Ethernet
 - LANs comutadas
 - redes virtualizadas como camada de enlace: MPLS
- síntese: um dia na vida de uma solicitação web