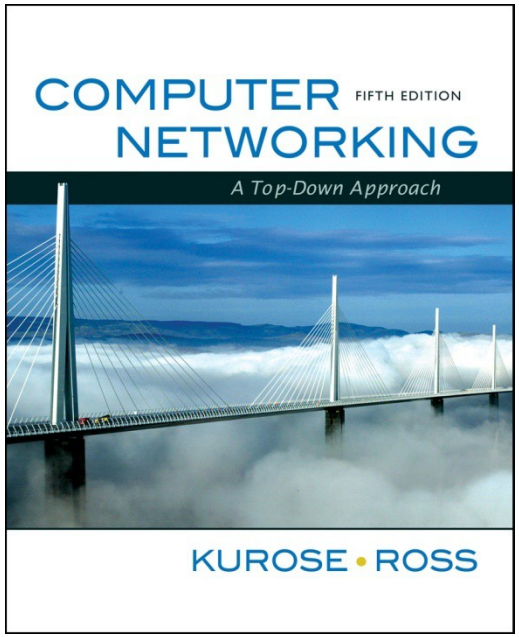
Capítulo 5
Camada de Enlace (Link Layer) & Redes Locais (LANs)



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 1996-2007
J.F Kurose and K.W. Ross, All Rights Reserved

Computer Networking: A Top Down Approach, 5th edition.
Jim Kurose, Keith Ross
Addison-Wesley, April 2009.

Capítulo 5: A Camada de Enlaced de Dados

Objetivos do capítulo:

- Entender os princípios associados aos serviços da camada de enlace de dados:
  - Deteção de erros, correção
  - Compartilhamento do canal de broadcast: acesso múltiplo
  - Endereçamento na camada de enlace
  - Transferência confiável de dados, controle de fluxo: *semelhante aos conceitos discutidos na camada de transporte!*
- Instanciação e implementação de tecnologias diversas para a camada de enlace

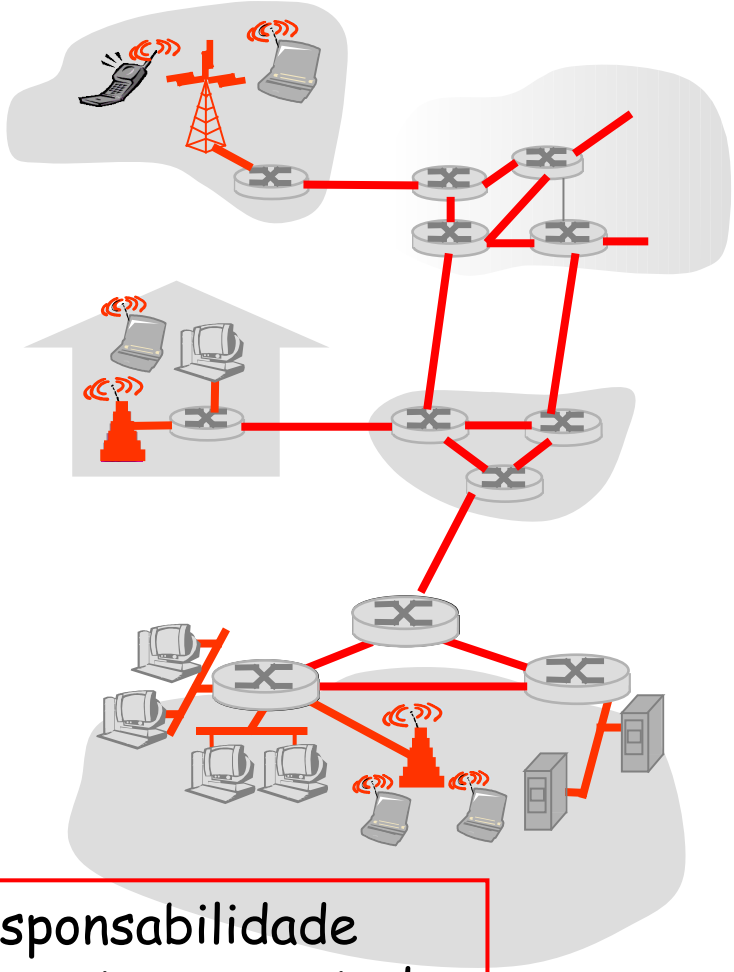
Camada de Enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Deteção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches de camada de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização na camada de enlace: ATM, MPLS

Camada de Enlace: Introdução

Terminologia:

- hosts e roteadores são **nós**
- Canais de comunicação que conectam nós adjacentes em um caminho de comunicação são denominados **enlaces**
  - Enlaces com fio (wired links)
  - Enlaces sem fio (wireless links)
  - LANs
- Pacote de camada 2 denomina-se **frame** e encapsula datagramas



A camada de enlace de dados tem a responsabilidade de transferir datagramas entre nós adjacentes conectados através de um enlace.

Camada de Enlace: contexto

- Datagrama transferido por protocolos de enlace diferentes sobre enlaces diferentes:
  - e.x., Ethernet no primeiro enlace, frame relay nos enlaces intermediários e 802.11 no último enlace
- Cada protocolo de enlace fornece serviços diferentes
  - e.x., pode ou não prover transferência confiável no enlace

Analogia com o transporte

- Viagem de Princeton a Lausanne
  - limo: Princeton a JFK
  - avião: JFK a Geneva
  - trem: Geneva a Lausanne
- turista = datagrama
- Segmento de transporte = enlace de comunicação
- Modo de transporte = protocolo de camada de enlace
- Agente de viagem = algoritmo de roteamento

Serviços da Camada de Enlace

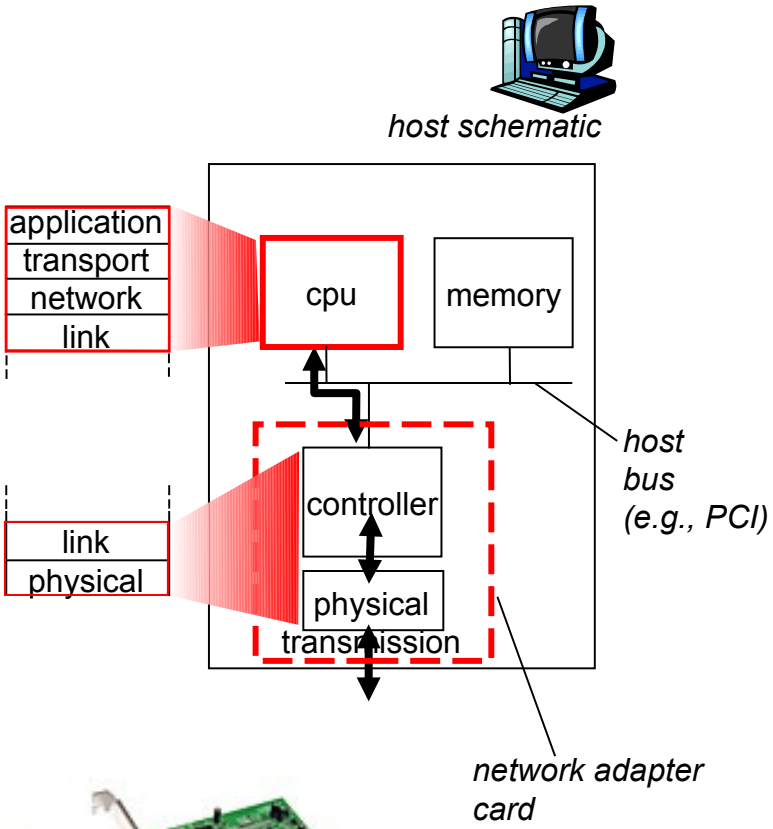
- *enquadramento, acesso ao enlace:*
  - encapsula datagrama no quadro, adiciona cabeçalho e *trailer (cauda)*
  - Acesso ao canal se o meio é compartilhado
  - Endereços "MAC" usados nos cabeçalhos dos quadros (frames) para identificar a fonte e o destino
    - Diferentes do endereço IP!
- *Entrega confiável de dados entre nós adjacentes*
  - Já vimos antes (capítulo 3)!
  - Raramente usado nos enlaces com baixa taxa de erro de bit (fibra, alguns tipos de pares trançados)
  - Enlaces sem-fio (wireless): alta taxa de erro
    - Q: Porquê confiabilidade no nível do enlace e no fim-a-fim?

Serviços da Camada de Enlace (cont.)

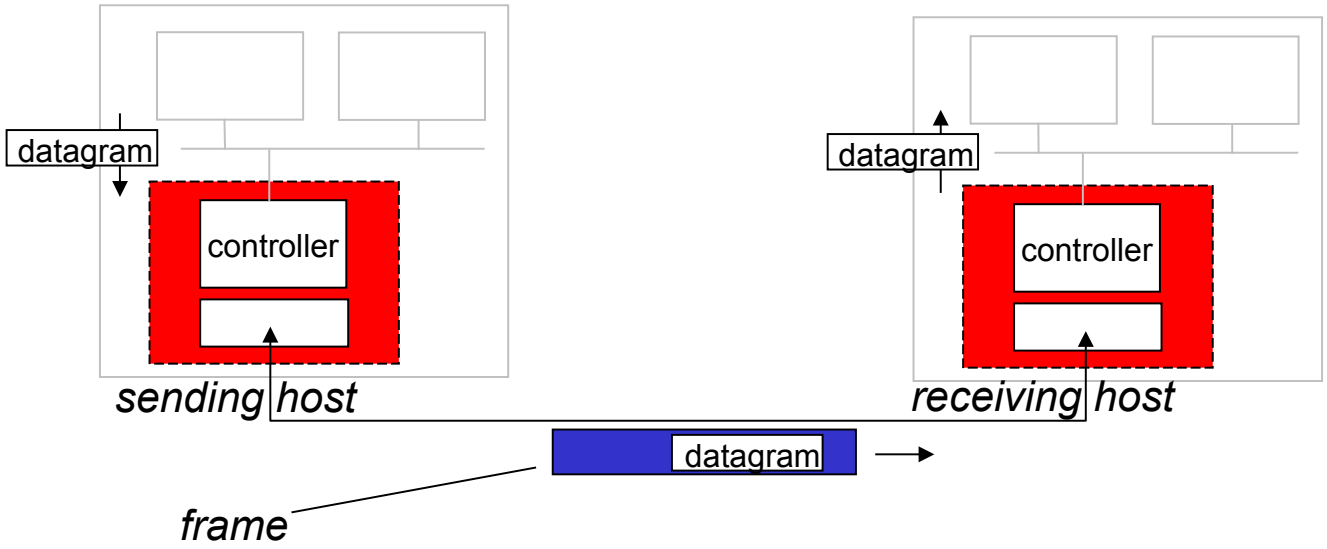
- *Controle de fluxo:*
  - Regulação entre os nós emissor e receptor adjacentes
- *Deteção de erro*:
  - erros causados pela atenuação do sinal e ruído.
  - Receptor deteta a presença de erros:
    - Sinaliza o emissor para retransmissão do quadro
- Correção de erro:
  - Receptor identifica *e corrige* erro(s) de bit(s) sem necessidade de retransmissão
- *half-duplex e full-duplex*
  - No half duplex, os nós de ambos os lados podem transmitir mas não ao mesmo tempo

Onde a Camada de Enlace é implementada?

- Em todos os nós
- Implementada em um "adaptador" (*placa de rede (network interface card* - NIC)
  - placa PCMCI Ethernet, placa 802.11
  - Implementa as camadas física e de enlace
- Conectada ao barramento do sistema
- Combinação de hardware, software, firmware



Comunicação entre os adaptadores



- Lado emissor:
  - Encapsula o datagrama no quadro
  - Adiciona os bits para deteção de erro, rdt, controle de fluxo, etc.
- Lado receptor
  - Busca por erros, rdt, controle de fluxo, etc
  - extrai o datagrama e passa-o para a camada superior no lado receptor

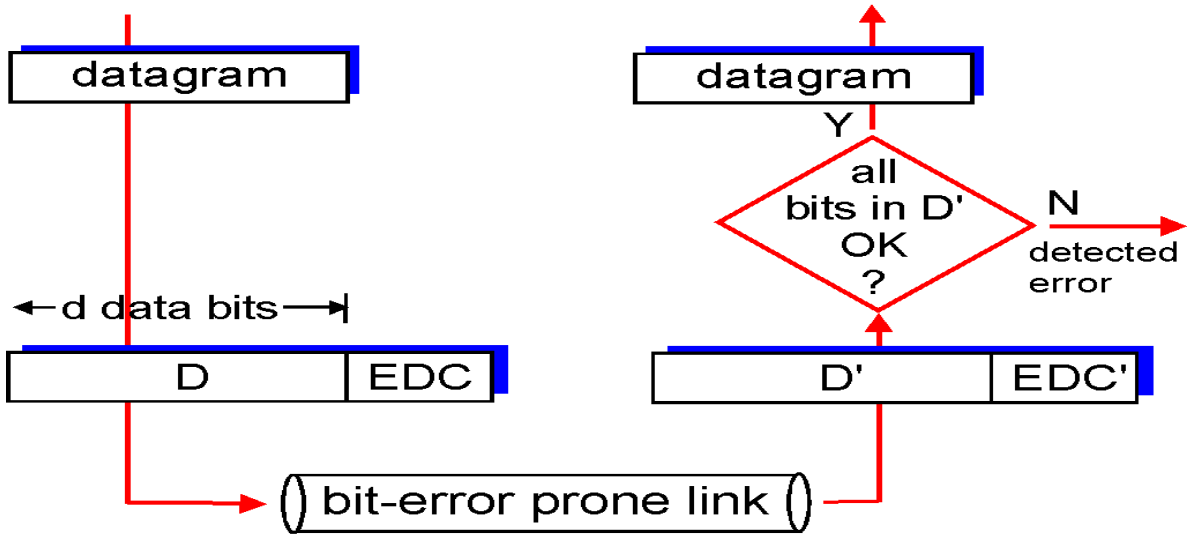
Camada de Enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Deteção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches de camada de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização na camada de enlace: ATM, MPLS

Deteção de Erro

EDC= Error Detection and Correction bits (redundância)
D = Dado protegido pelo algoritmo de deteção de erro podendo incluir os campos do cabeçalho

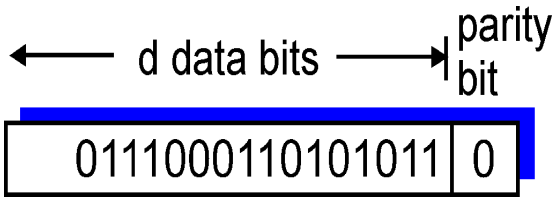
- a deteção de erros não é 100% confiável!
  - protocolo pode falhar na deteção de alguns erros, entretanto isto raramente acontece
  - campo de EDC grande propicia melhor deteção e correção



Check de Paridade

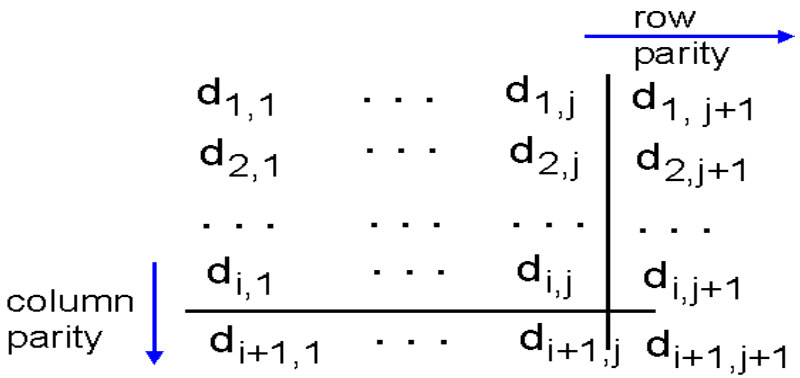
Bit de Paridade:

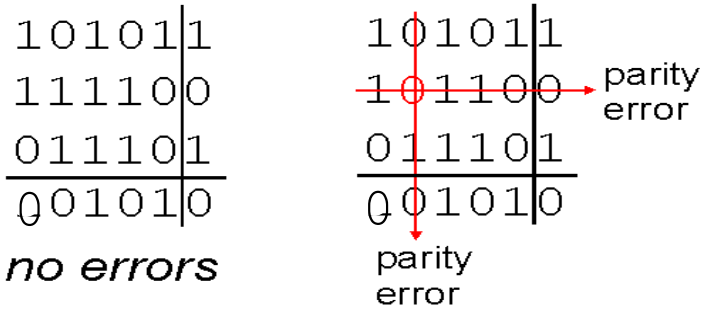
Deteta erros de bit único



Bit de Paridade bi-dimensional:

Deteta e corrige erros de bit único





Checksum (revisão)

Objetivo: detetar "erros" no pacote transmitido

- É usado nos cabeçalhos de IP e TCP

Emissor:

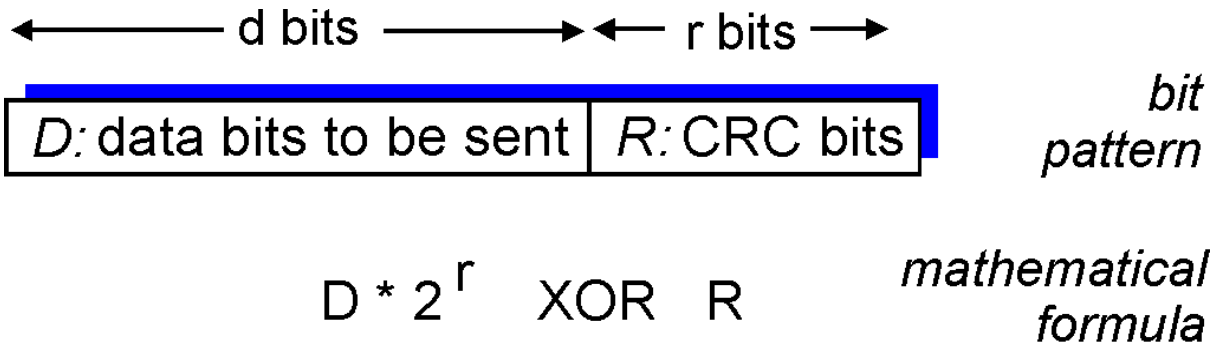
- Trata o conteúdo dos segmentos como sequências de inteiros de 16 bits
- checksum: adição (soma dos complementos de 1) do conteúdo do segmento
- Emissor coloca o valor do checksum no campo correspondente

Receptor:

- Computa o checksum do segmento recebido
- Examina se o checksum determinado é igual ao valor do campo correspondente:
  - Não – erro detetado
  - Sim – erro não detetado. *entretanto, pode haver erro?*

Checksumming: Cyclic Redundancy Check

- Enxerga os bits do dado, D, como um número binário
- Escolhe padrão formado por r+1 bits (gerador), G
- objetivo: escolher r CRC bits, R, tal que
  - <D,R> seja divisível por G (módulo 2)
  - Receptor conhece G; divide <D,R> por G. Caso a divisão possua resto diferente de zero: erro detetado!
  - Permite detetar todos os erros em rajada menores do que r+1 bits
- Bastante utilizado na prática (Ethernet, 802.11 WiFi, ATM)



Exemplo CRC

Deseja-se:

$$D \cdot 2^r + R = nG$$

equivalentemente:

$$D \cdot 2^r = nG + R$$

equivalentemente:

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

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

```
                101011
      1001 ) 101110000
G                1001          D
                  101
                  000
                 1010
                 1001
                   110
                   000
                  1100
                  1001
                   1010
                   1001
                    011
R
```

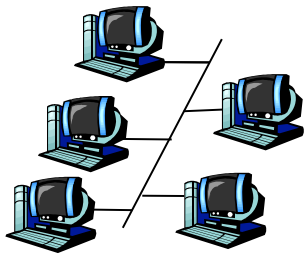
Camada de Enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Deteção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches de camada de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização na camada de enlace: ATM, MPLS

Enlaces de Acesso Múltiplo e Protocolos

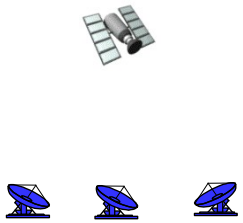
Dois tipos de enlaces:

- Ponto-a-ponto
  - PPP para acesso discado
  - Enlace ponto-a-ponto entre switch Ethernet e host
- broadcast (barramento compartilhado ou meio aéreo)
  - Ethernet antigo
  - 802.11 wireless LAN



shared wire (e.g., cabled Ethernet)

shared RF (e.g., 802.11 WiFi)



shared RF (satellite)

humans at a cocktail party (shared air, acoustical)

Protocolos de Acesso Múltiplo

- Canal de broadcast único compartilhado
- Duas ou mais transmissões simultâneas: interferência
  - Colisão se dois ou mais sinais são enviados ao mesmo tempo

Protocolo de acesso múltiplo

- Algoritmo distribuído que determina como os nós compartilham o canal, isto é, determina quando o nó pode transmitir
- A comunicação sobre o compartilhamento do canal utiliza o próprio canal!
  - Não existe um canal fora da banda para fins de coordenação

Protocolo de Acesso Múltiplo Ideal

Canal de Broadcast com taxa de R bps

1. Quando um nó deseja transmitir, ele o faz à taxa de R bps.
2. Quando M nós desejam transmitir, cada um deles transmite a uma taxa de R/M bps
3. Completamente descentralizado:
   - Não existe um nó especial para coordenar as transmissões
   - Não existe sincronização de relógios e slots
4. Deve ser simples

Protocolos MAC: taxonomia

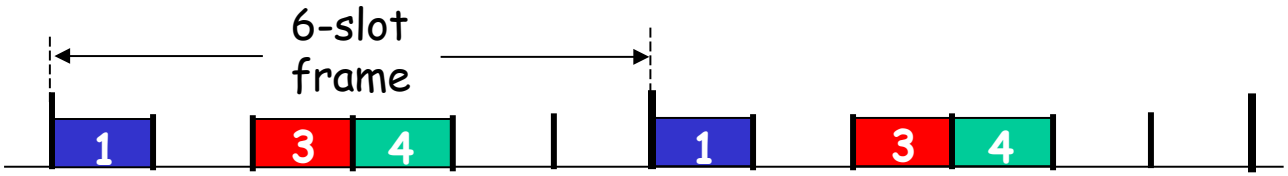
Três grandes classes:

- Particionamento de canal
  - Divide o canal em pedaços menores(slots de tempo, frequência, código)
  - Aloca o pedaço ao nó para uso exclusivo
- Acesso aleatório
  - O canal não é dividido; possibilita ocorrência de colisão
  - Recuperação quando da ocorrência de colisões
- Passagem de permissão
  - Nós transmitem nos seus turnos

Protocolos MAC baseados no particionamento do canal: TDMA

TDMA: time division multiple access

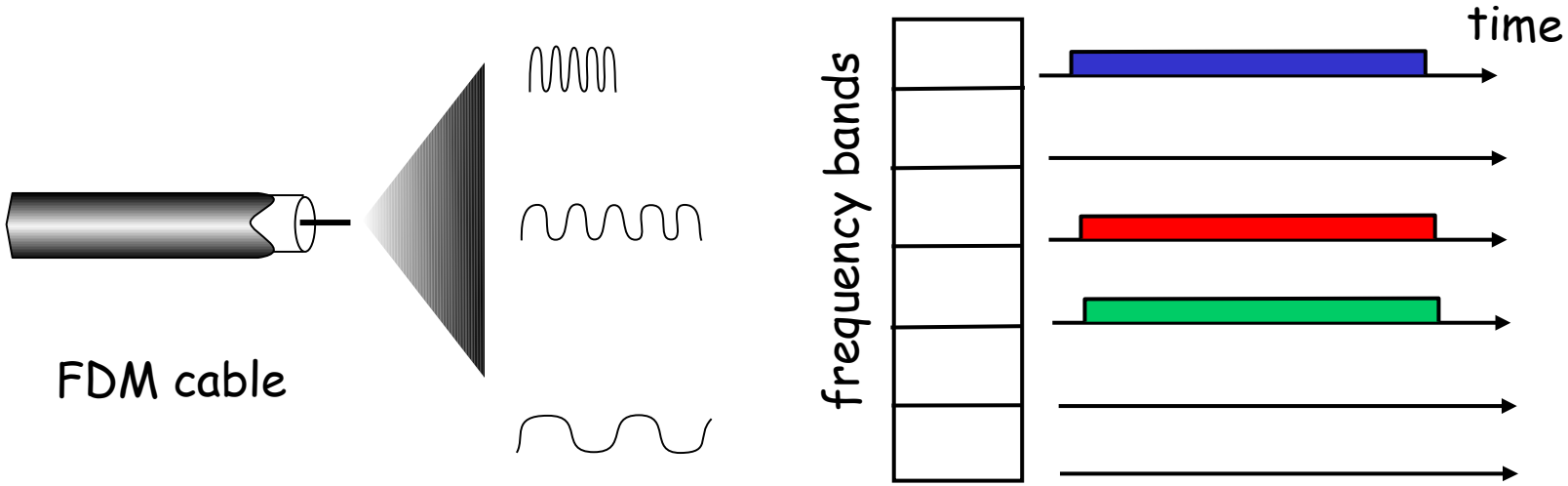
- O acesso ao canal se dá somente via seu slot de tempo
- Cada estação recebe um slot de tamanho fixo (tamanho = tempo de transmissão de um quadro)
- Slots não utilizados são perdidos
- exemplo: 6 estações na LAN: 1,3,4 têm quadros para transmitir; slots 2,5,6 são desperdiçados



Protocolos de particionamento do canal: FDMA

FDMA: frequency division multiple access

- O espectro do canal é dividido em bandas de frequência
- Cada estação recebe uma banda de frequência fixa
- Tempo de transmissão desperdiçado nas bandas de frequência não utilizadas
- exemplo: 6 estações na LAN: 1,3,4 têm pacotes para transmitir; faixas de frequência 2, 5 e 6 desperdiçadas



Protocolos de Acesso Aleatório

- Quando o nó tem pacote para enviar
  - Transmite na taxa máxima do canal (R).
  - Não existe qualquer coordenação a priori entre os nós
- Dois ou mais nós transmitindo → "colisão",
- Protocolo MAC de acesso aleatório especifica:
  - Como detetar colisões
  - Como recuperar após a ocorrência de colisões (e.x., via retransmissões)
- Exemplos de protocolos de acesso ao meio aleatórios:
  - slotted ALOHA
  - ALOHA
  - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

Slotted ALOHA (ALOHA compartimentado)

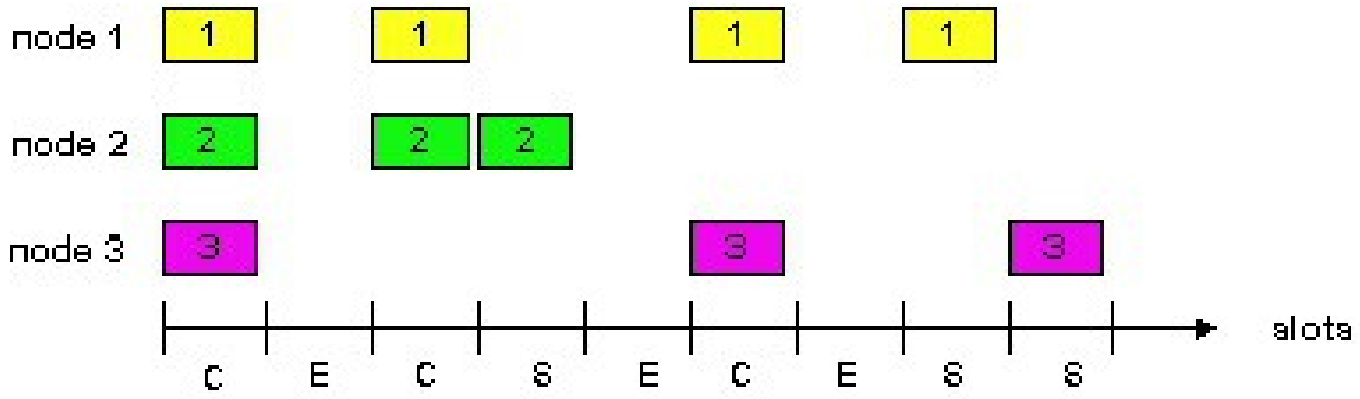
Hipóteses:

- Todos os quadros possuem o mesmo tamanho
- O tempo é dividido em slots de mesmo tamanho (tempo para transmitir 1 quadro)
- Os nós transmitem somente no início de cada slot
- Os nós são sincrozinados
- Se 2 ou mais nós transmitem no mesmo slot, todos os nós detetam a colisão

Operação:

- Quando um nó tem um novo quadro para enviar, transmite no próximo slot
  - Se não tiver colisão: o nó pode enviar um novo quadro no próximo slot
  - *Se tiver colisão:* o nó retransmite o quadro em cada slot subsequente com probabilidade p até obter sucesso

Slotted ALOHA



Prós

- Quando um único encontra-se ativo, ele pode transmitir continuamente na taxa plena do canal
- Altamente descentralizado: somente os slots precisam ser sincronizados nos nós
- simples

Contra

- Colisões, slots desperdiçados
- Clock de sincronização

Eficiência do Slotted Aloha

Eficiência: fração de longo prazo dos slots transmitidos com sucesso (supor muitos nós e todos com muitos pacotes para transmitir

- *supor:* N nós com muitos quadros para transmitir; cada nó transmite no slot com probabilidade *p*
- Probabilidade que um nó tenha sucesso em um slot = $p(1-p)^{N-1}$
- Probabilidade que qualquer nó tenha sucesso = $Np(1-p)^{N-1}$

- Eficiência máxima: encontre p* que maximize $Np(1-p)^{N-1}$
- No caso de muitos nós, obter o limite de $Np^*(1-p^*)^{N-1}$ à medida que N converge para o infinito:

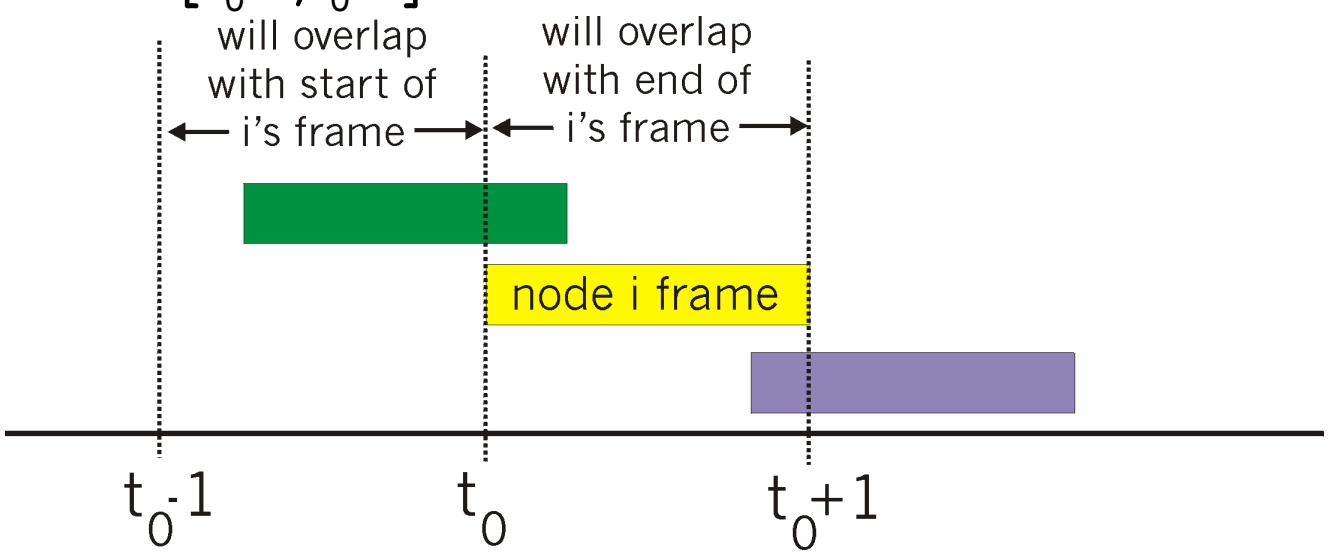
Max efficiency = 1/e = .37

desempenho: canal usado para transmissões úteis em 37% do tempo

!

ALOHA Puro (não-particionado)

- Aloha puro: simples, sem sincronização
- Quando um quadro é obtido para transmissão
  - transmite imediatamente
- Probabilidade de colisão aumenta:
  - Quadro enviado em t_0 colide com outras quadros enviados em $[t_0-1,t_0+1]$



Eficiência do Aloha Puro

P(successo) = P(transmissão do nó) ·

P(nenhum nó transmite em $[t_0-1,t_0]$ ·

P(nenhum outro nó transmite em $[t_0,t_0+1]$

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

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

... determinando a probabilidade *p* ótima e fazendo *n* tender para o infinito, temos: P(successo) = 1/(2e) = .18

Pior do que o slotted Aloha!

CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

CSMA: escuta antes de transmitir:

- Se o canal é percebido inativo: transmite o quadro completamente
- Se o canal é percebido ocupado, adia a transmissão

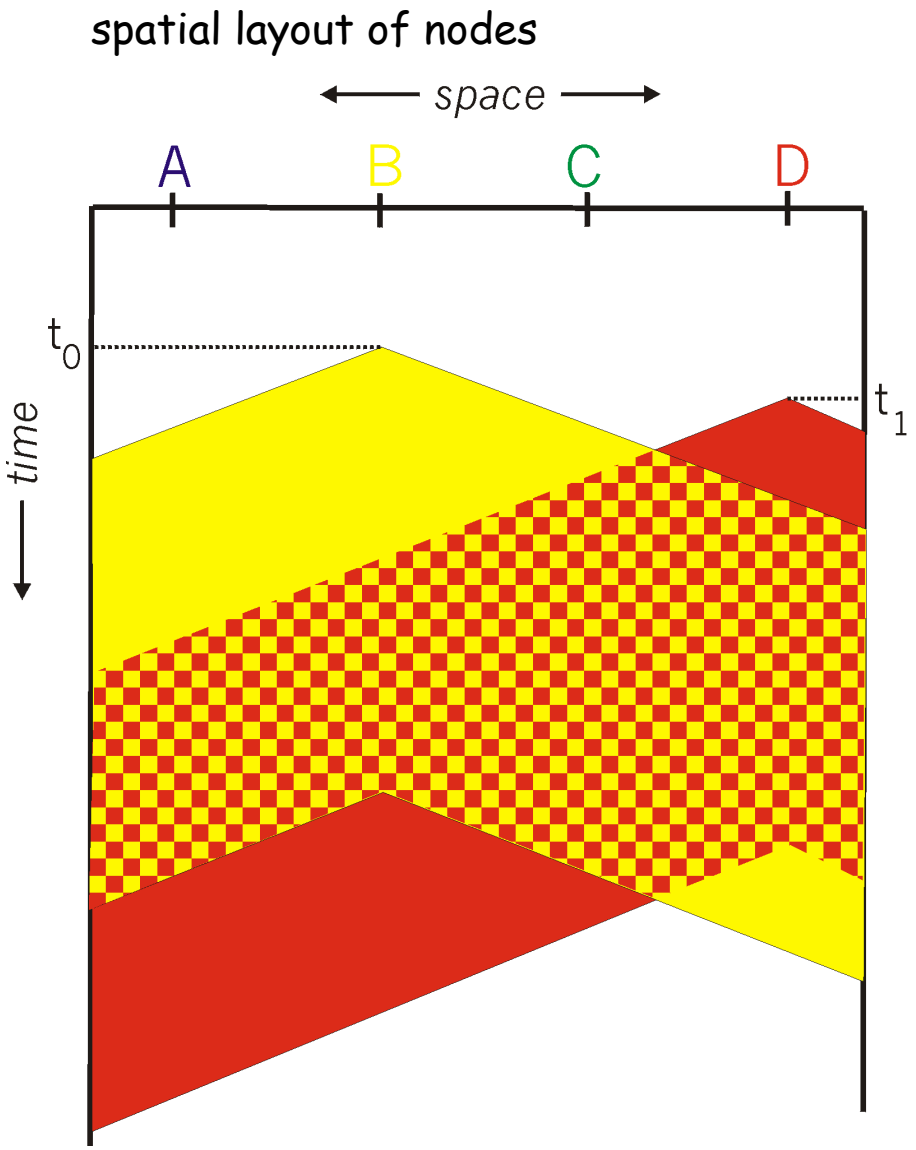
Colisões CSMA

As colisões ainda podem ocorrer:

Atraso de propagação pode fazer com que os nós não percebam que o outro está transmitindo -> perda de tempo

Colisão:

todo o tempo de transmissão do pacote é desperdiçado

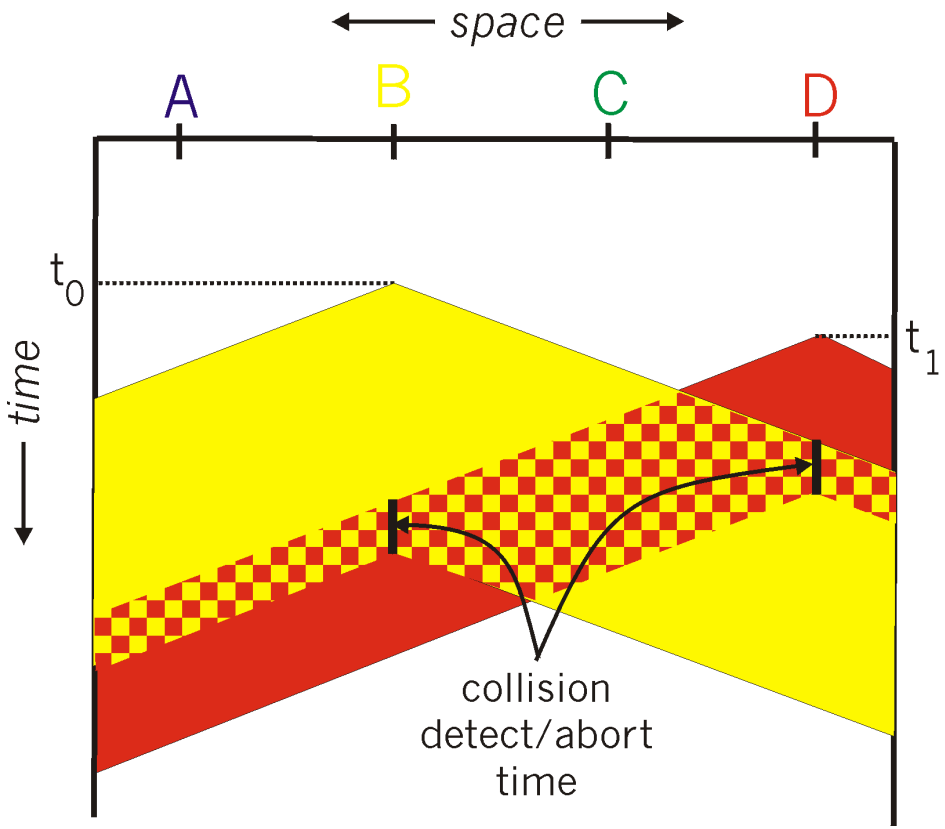


CSMA/CD (Collision Detection)

CSMA/CD: deteção de portadora, deferência como no CSMA

- Colisões **detetadas** num tempo mais curto
- Transmissões com colisões são interrompidas, reduzindo o desperdício do canal
- Detecção de colisão:
- Fácil em LANs cabeadas: medição da intensidade do sinal, comparação dos sinais transmitidos e recebidos
- Difícil em LANs sem fio: receptor desligado enquanto transmitindo

CSMA/CD (Collision Detection)



Protocolos MAC

Protocolos MAC com particionamento de canais:

- Compartilham o canal eficientemente quando a carga é alta e bem distribuída
- Ineficiente nas cargas baixas: atraso no acesso ao canal. A estação consegue uma banda de 1/N da capacidade do canal, mesmo que haja apenas 1 nó ativo!

Protocolos MAC de acesso aleatório

- Eficiente nas cargas baixas: um único nó pode usar todo o canal
- Cargas altas: excesso de colisões

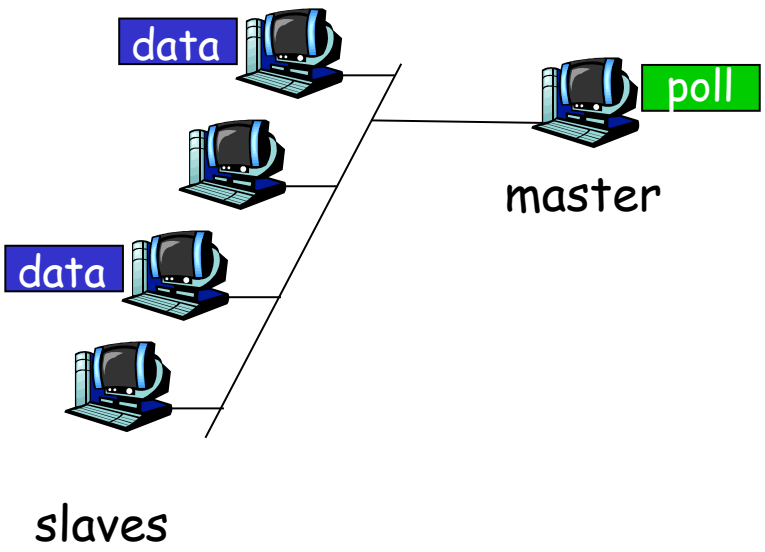
Protocolos de passagem de permissão

Buscam o melhor dos dois mundos!

Protocolos MAC com passagem de permissão

Polling:

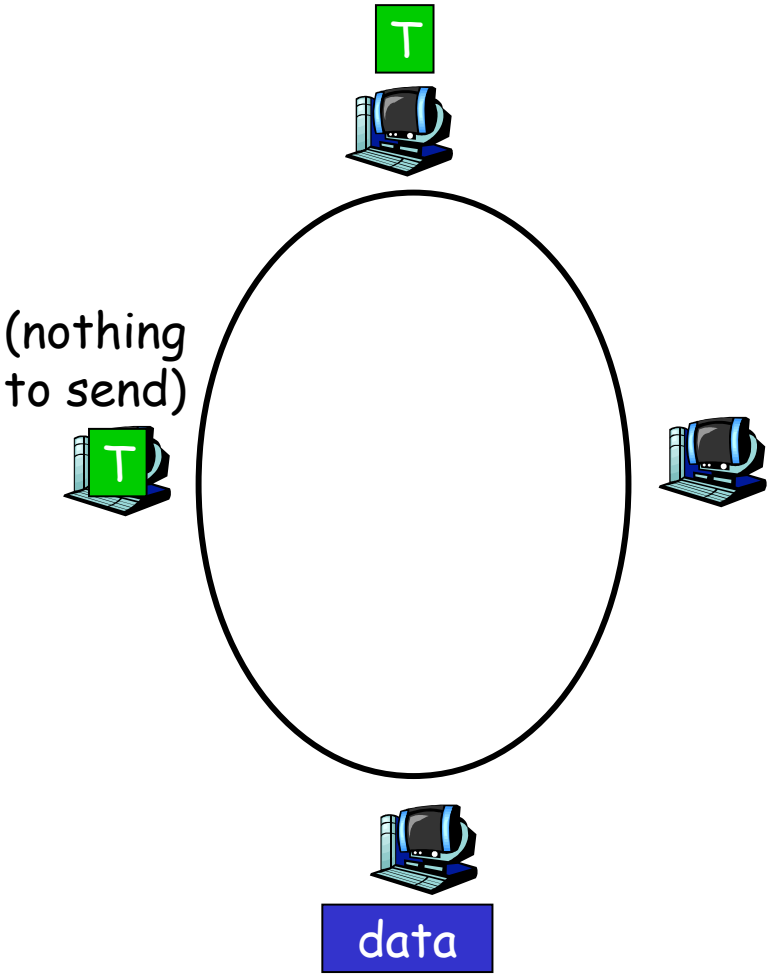
- Nó mestre "convida" os escravos a transmitirem um de cada vez
- Problemas:
  - Polling overhead
  - Latência
  - Ponto único de falha (mestre)



Protocolos MAC com passagem de permissao (cont.)

Token passing:

- Controla um **token** passado de um nó a outro seqüencialmente.
- Mensagem token
- Problemas:
  - Token overhead
  - Latência
  - Ponto único de falha (token)



Sumário dos Protocolos MAC

- Como se faz com um canal compartilhado?
  - Particionamento de canal, no tempo, por freqüência ou por código
    - Divisão temporal, divisão por código, divisão por freqüência
  - Particionamento aleatório (dinâmico),
    - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
    - Detecção de portadora: fácil em alguns meios físicos (cabos) e difícil em outros (wireless)
    - CSMA/CD usado na rede Ethernet
    - CSMA/CA usado em 802.11
  - Passagem de permissão
    - Polling a partir de um site central, passagem de token

Camada de Enlace

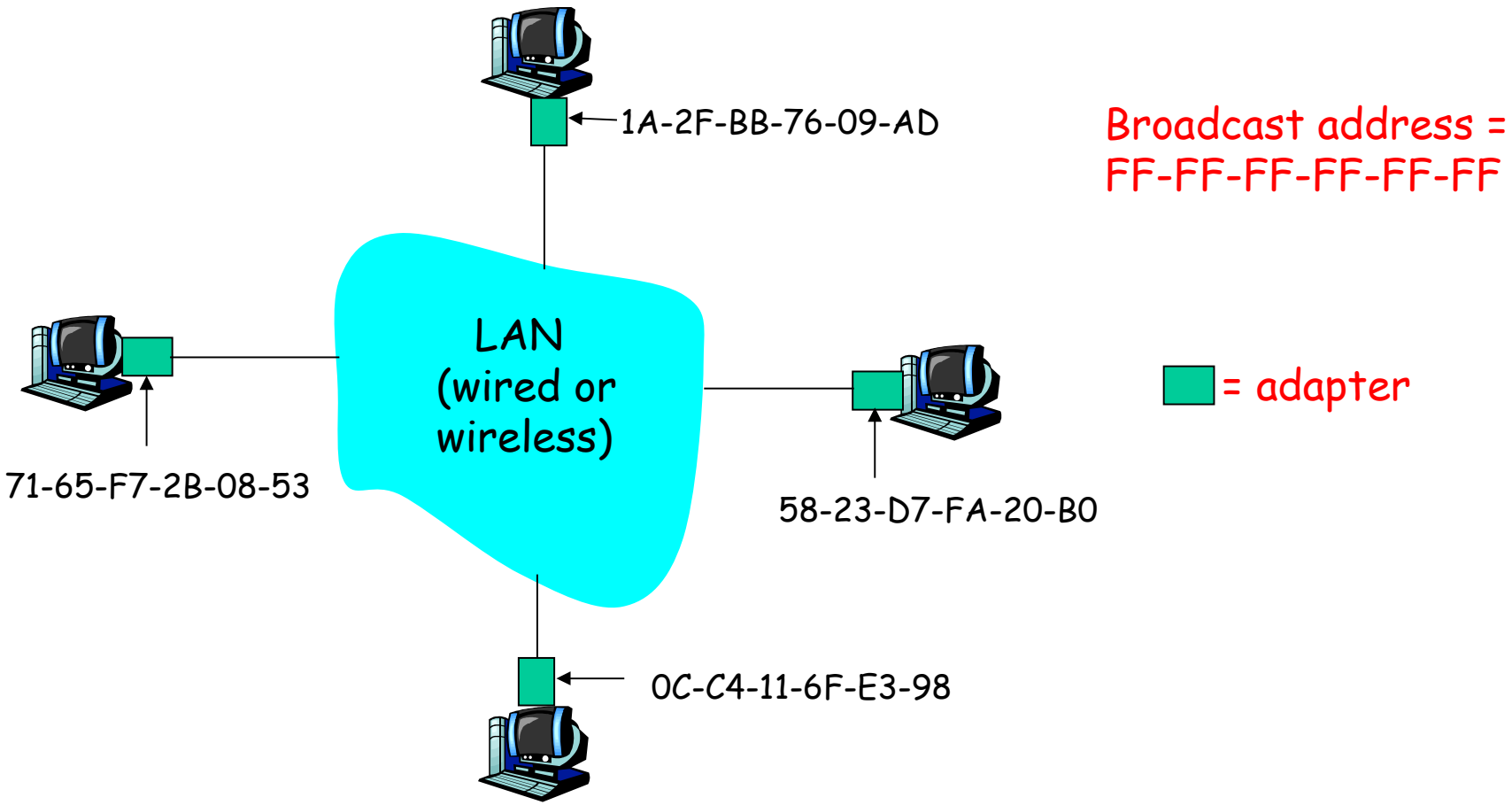
- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Deteção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches de camada de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização na camada de enlace: ATM, MPLS

Endereços MAC e ARP

- Endereço IP de 32 bits:
  - *Endereço de camada de rede*
  - Usado para encaminhar o datagrama à subrede IP de destino
- Endereço MAC (ou rede ou físico ou Ethernet):
  - função: *encaminhar o quadro de uma interface a outra interface fisicamente conectada, isto é, na mesma rede (subrede)*
  - Endereço MAC de 48 bits (maior parte das LANs)
    - gravado na ROM da placa (NIC); em alguns casos pode ser configurado via software.

Endereços de LAN e ARP

Cada adaptador de rede possui um único endereço MAC



Endereço de LAN (cont.)

- Alocação do endereço MAC é administrada pelo IEEE
- O fabricante compra porções do espaço de endereço MAC (para assegurar a unicidade)
- Analogia:

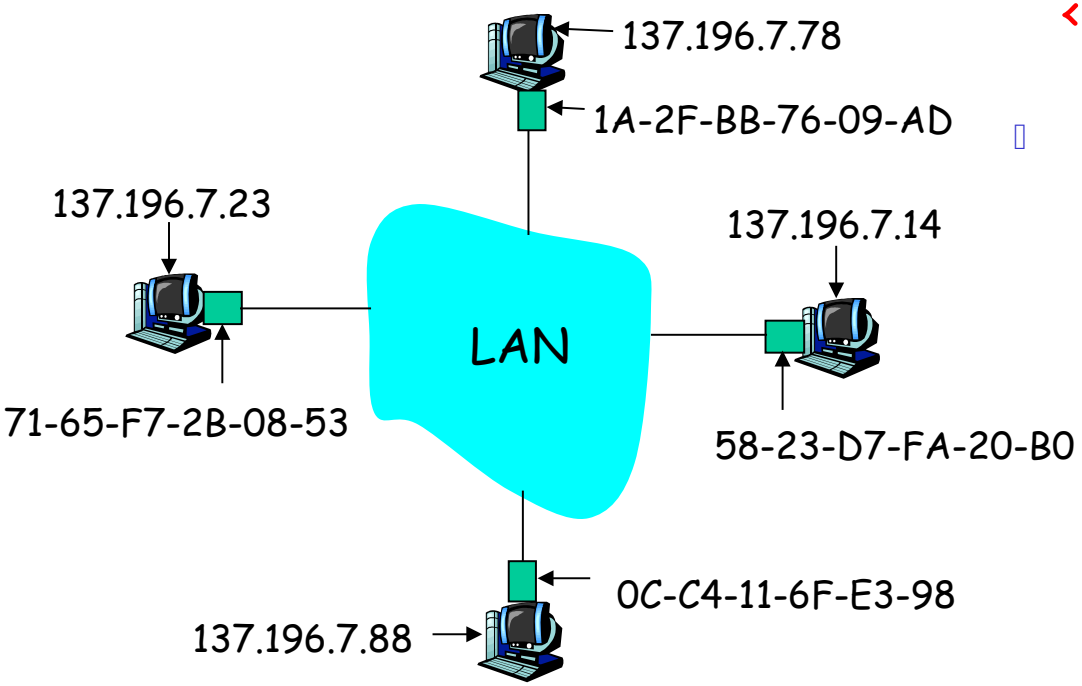
(a) endereço MAC: semelhante ao número do RG

(b) endereço IP: semelhante a um endereço postal

- Endereçamento MAC é "flat" => portabilidade
  - É possível mover uma placa de LAN de uma rede para outra sem reconfiguração de endereço MAC
- Endereçamento IP "hierárquico" => NÃO portável
  - Depende da rede na qual se está ligado

ARP: Protocolo de Resolução de Endereços

Questão: como determinar o endereço MAC de B dado o endereço IP de B?



- Cada nó IP (host, roteador) numa LAN tem um módulo e uma tabela ARP
- Tabela ARP: mapeamento de endereços IP/MAC para alguns nós da LAN

  < endereço IP; endereço MAC; TTL>
- TTL (Time To Live): tempo depois do qual o mapeamento de endereços será esquecido (tipicamente 20 min)

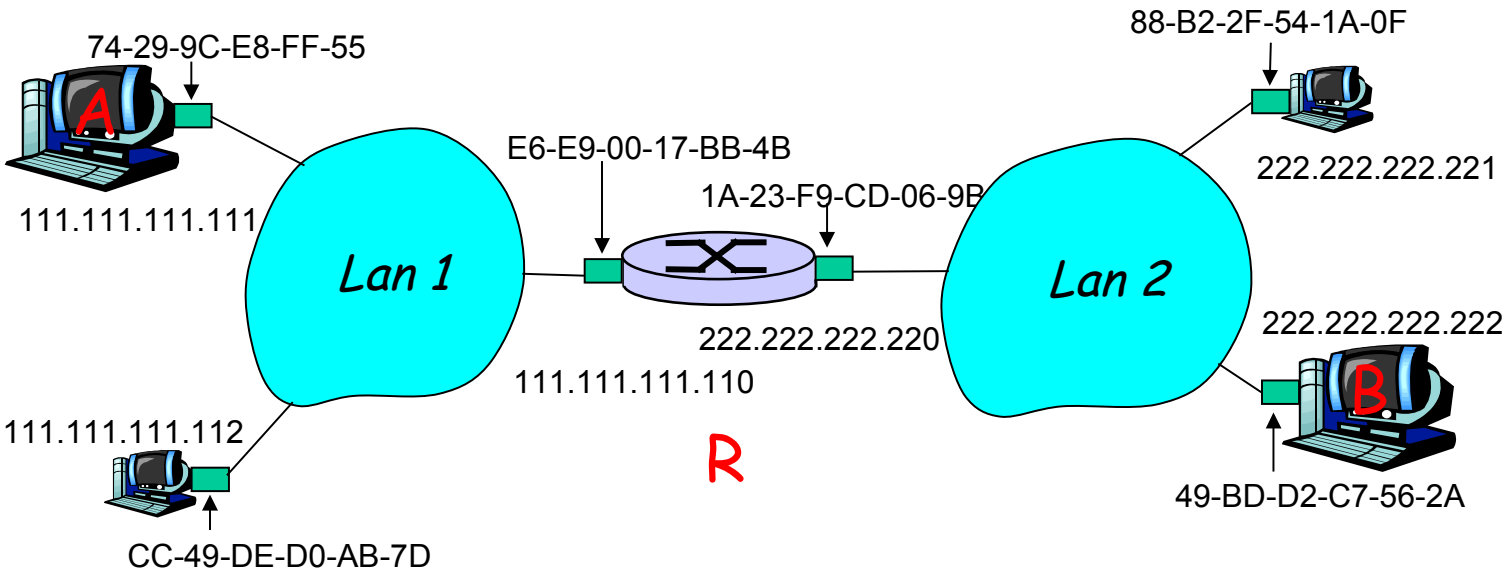
ARP protocol: mesma LAN

- A quer enviar um datagrama para B e o endereço MAC de B não está na tabela ARP de A
- A faz broadcast de pacote de consulta ARP, contendo o endereço IP de B
  - end. MAC de destino = FF-FF-FF-FF-FF-FF
  - todas as máquinas na LAN recebem a consulta ARP
- B recebe o pacote ARP, responde para A com seu endereço MAC (de B).
  - Quadro enviado para o end. MAC de A (unicast)
- A faz um cache (salva) o par de endereços IP e MAC em sua tabela ARP até que a informação se torne antiga (time-out)
  - soft state: informação que expira (é descartada) sem atualização
- ARP é "plug-and-play":
  - Nós criam suas tabelas ARP sem intervenção do administrador da rede

Roteamento para outra LAN

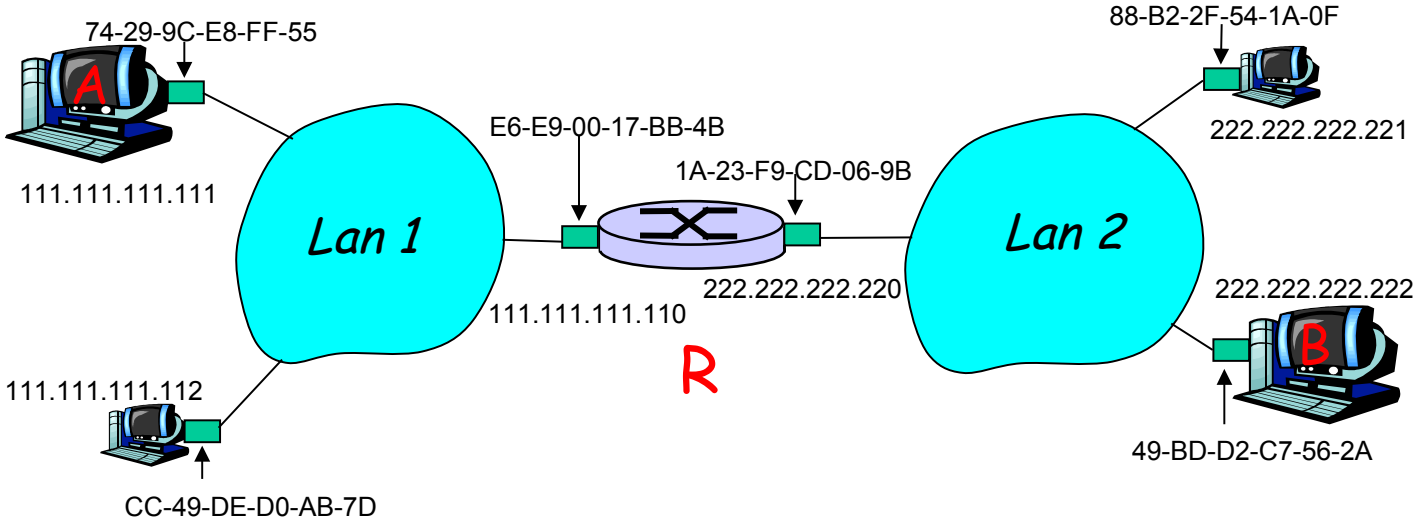
objetivo: enviar datagrama de A para B via R

supõe que A conhece o endereço IP de B



- Duas tabelas ARP no roteador R, uma para cada subrede IP (LAN)

- A cria o pacote IP com origem A, destino B
- A usa ARP para obter o endereço de camada física de R correspondente ao endereço IP 111.111.111.110
- A cria um quadro Ethernet com o endereço físico de R como destino e contendo o datagrama IP de A para B
- A camada de enlace de A envia o quadroEthernet
- A camada de enlace de R recebe o quadro Ethernet
- R remove o datagrama IP do quadro Ethernet, verifica que ele se destina a B
- R usa ARP para obter o endereço físico de B
- R cria quadro contendo o datagrama de A para B e o envia para B



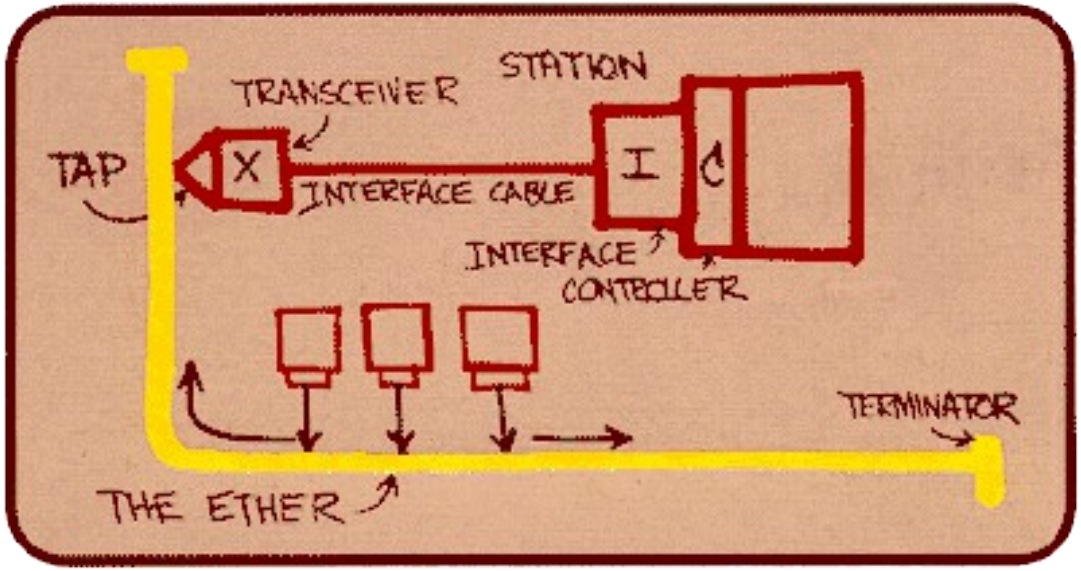
Camada de Enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Deteção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches de camada de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização na camada de enlace: ATM, MPLS

Ethernet

Tecnologia de rede local "dominante" :

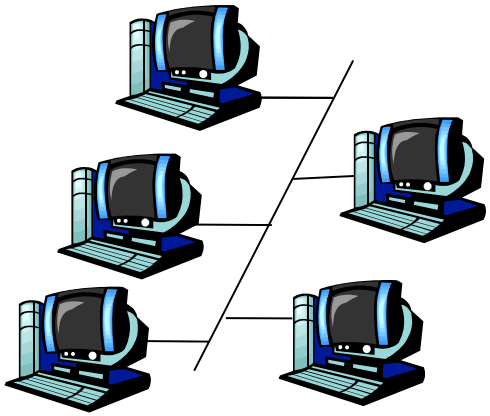
- Barata: $20 por NIC
- Primeira tecnologia de LAN largamente usada
- Mais simples e mais barata que LANs com token e ATM
- Velocidade crescente: 10Mbps → 100 Mbps → 1Gbps → 10Gbps → 100 Gbps



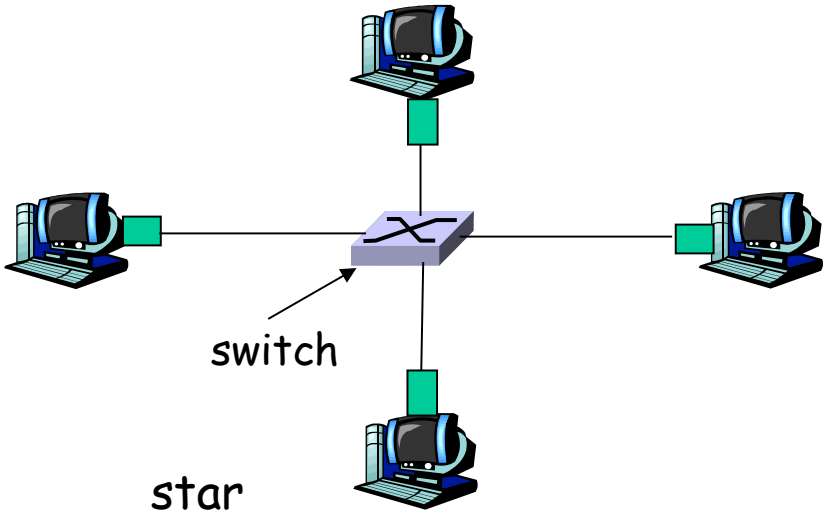
Metcalfe's Ethernet sketch

Topologia em Estrela

- Topologia de bus popular em meados dos anos 90
  - Todos os nós encontram-se no mesmo domínio de colisão (podem colidir entre si)
- Atualmente: a topologia em estrela prevalece
  - *switch* encontra-se no centro
  - Os nós não colidem mais entre si



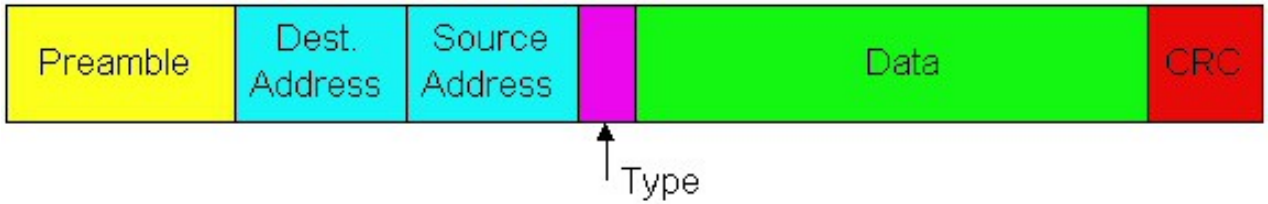
bus: coaxial cable



star

Estrutura dos Quadros Ethernet

Adaptador do transmissor encapsula o datagrama IP (ou outro pacote de protocolo da camada de rede) num quadro Ethernet

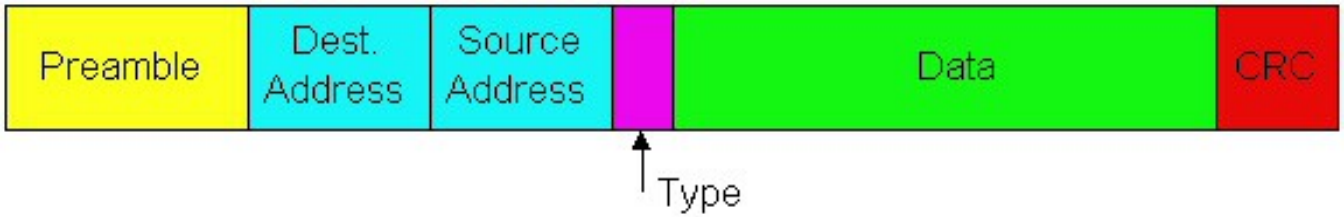


Preâmbulo:

- 7 bytes com padrão 10101010 seguido por um byte com padrão 10101011
- usado para sincronizar as taxas de relógio do transmissor e do receptor

Estrutura dos Quadros Ethernet (cont.)

- Endereços: 6 bytes
  - Se o adaptador recebe um quadro com endereço de destino coincidente, ou com endereço de broadcast (ex., pacote ARP), ele passa o dado no quadro para o protocolo da camada de rede.
  - Caso contrário, o adaptador descarta o quadro.
- Tipo: indica o protocolo da camada superior; geralmente é o protocolo IP, mas outros podem ser suportados, tais como Novell IPX e AppleTalk)
- CRC: verificado no receptor; se um erro é detectado, o quadro é simplesmente descartado



Ethernet: serviço não-confiável, sem conexão

- Sem conexão: não há estabelecimento de conexão entre os adaptadores do transmissor e do receptor
- Não confiável: adaptador do receptor não envia ACKs ou NACKs para o adaptador do transmissor
  - O fluxo de datagramas que passa para a camada de rede pode ter lacunas (falta de datagramas)
  - Lacunas serão preenchidas se a aplicação estiver usando TCP
  - Se não for TCP, a aplicação deverá detetar e corrigir lacunas
- Protocolo MAC Ethernet: unslotted CSMA/CD

Algoritmo CSMA/CD Ethernet

1. Adaptador recebe datagrama da camada de rede; cria quadro.
2. Se o adaptador sente o canal inativo, inicia a transmissão.

   Se o adaptador sente o canal ocupado, espera até o canal ficar inativo; então transmite.
3. Se o adaptador transmite completamente o quadro sem detetar uma outra transmissão, a transmissão ocorreu com sucesso!
4. Se o adaptador deteta uma outra transmissão enquanto está transmitindo, aborta e envia um sinal de reforço (jamming).
5. Após abortar a transmissão, o adaptador inicia o processo de **exponential backoff**: após a n-ésima colisão, o adaptador escolhe k aleatoriamente dentre $\{0,1,2,4,8,\ldots,2^n - 1\}$, espera k x 512 bit-times e retorna ao passo 2.

Algoritmo CSMA/CD Ethernet (cont.)

Sinal de Jamming: garante que todos os outros transmissores tomem conhecimento da colisão; 48 bits

Bit time: .1 microseg para Ethernet a 10 Mbps; para k=1023, tempo de espera é da ordem de 50 msec

Veja applet Java que simula o CSMA/CD.

Exponential Backoff:

- **Objetivo**: adaptar tentativas de retransmissão para carga atual da rede
  - Carga pesada: espera aleatória será mais longa
- Primeira colisão: escolhe k dentre {0,1}; espera é k x 512 tempos de transmissão de bit.
- Após a segunda colisão: escolhe k entre 0 e 2^2-1: {0, 1, 2, 3}.
- Após 10 ou mais colisões, escolhe k entre 0 e 2^{10}-1: {0, 1, 2, 3, 4, …, 1023}.

Eficiência de CSMA/CD

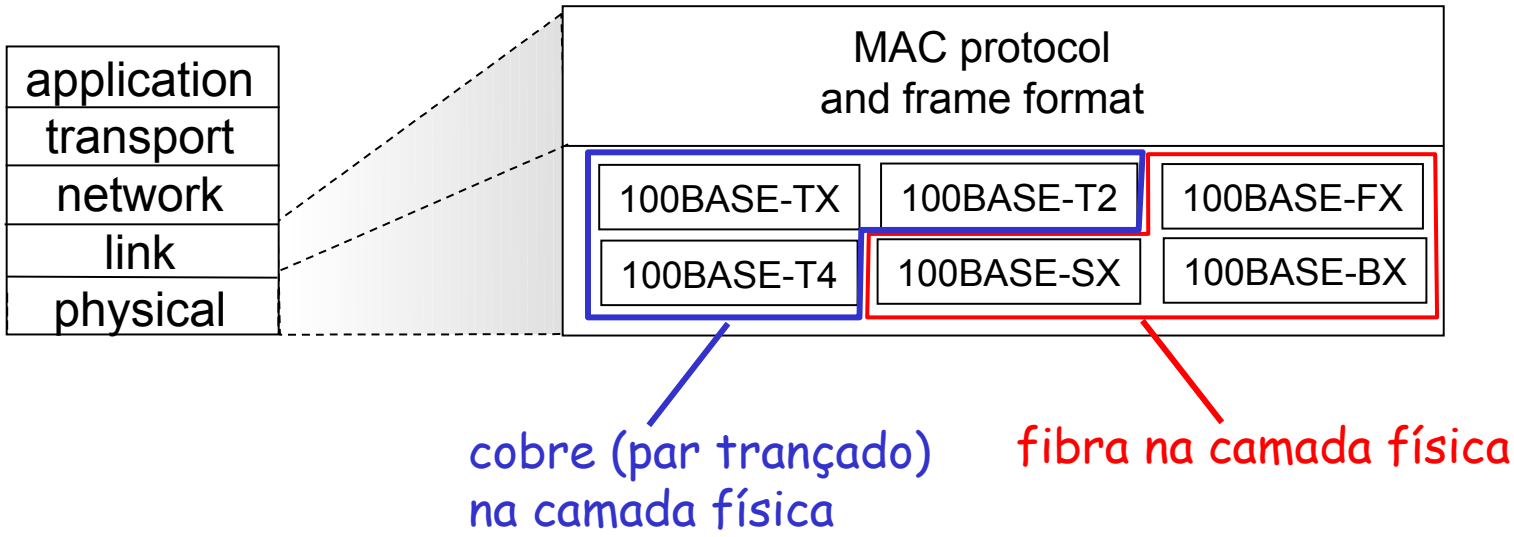
- T_{prop} = atraso máximo de propagação entre 2 nós na LAN
- t_{trans} = tempo de transmissão do quadro de tamanho máximo

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

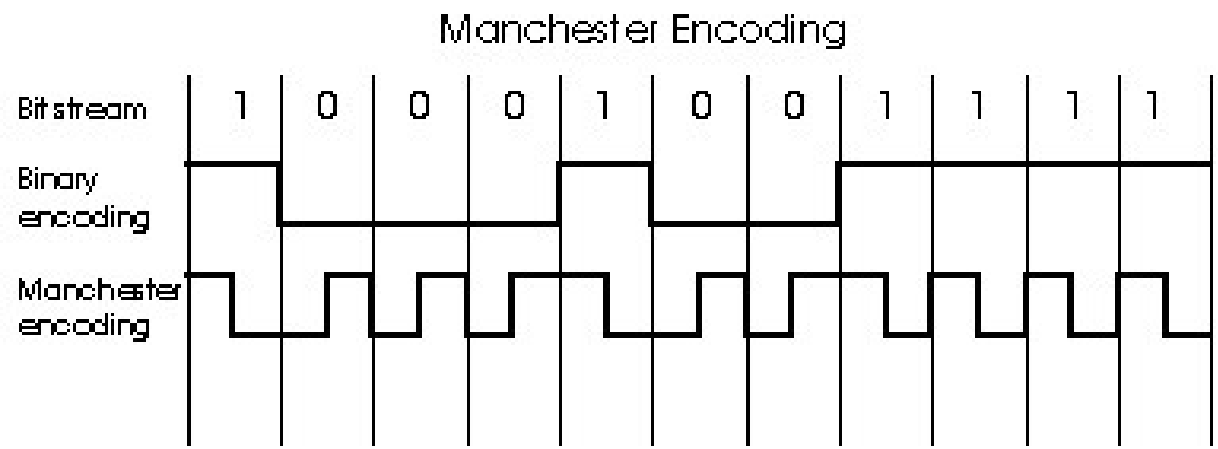
- Eficiência converge para 1
  - à medida que t_{prop} tende a 0
  - à medida que t_{trans} tende a infinito
- Desempenho melhor do que o ALOHA e ainda com as propriedades de ser simples, barato e descentralizado

Padrões Ethernet 802.3: Camadas de Enlace & Física

- *vários* padrões Ethernet diferentes
  - Protocolo MAC e formato de quadro comuns
  - Velocidades diferentes: 2 Mbps, 10 Mbps, 100 Mbps, 1Gbps, 10G bps
  - Meios físicos diversos: fibra, cabo



Codificação Manchester



- Usado no 10BaseT
- Cada bit possui uma transição
- Permite que os relógios no emissor e no receptor se sincronizem
  - elimina a necessidade de um relógio central global!
- Discussão relativa à camada física

Gigabit Ethernet

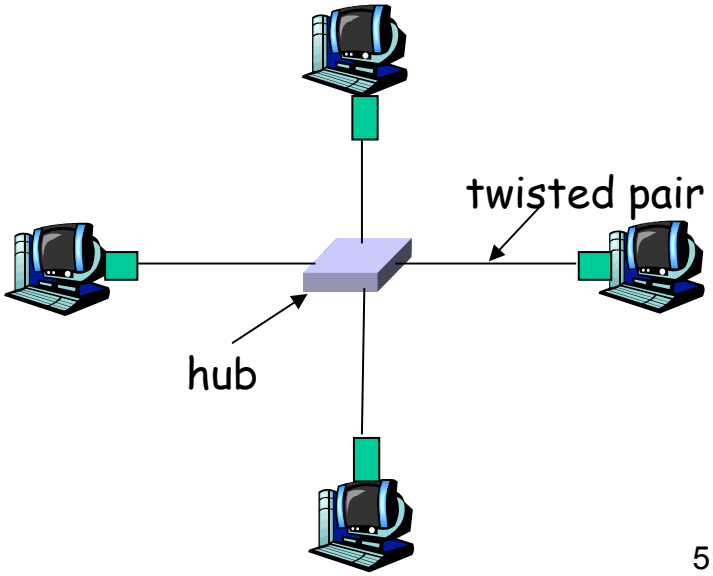
- Usa o formato do quadro do Ethernet padrão
- Permite enlaces ponto-a-ponto e canais de múltiplo acesso compartilhados
- No modo compartilhado, o CSMA/CD é usado; exige pequenas distâncias entre os nós para ser eficiente
- Full-Duplex a 1 Gbps para enlaces ponto-a-ponto
- 10 Gbps já disponível
- 100 Gbps em breve . . .

Camada de Enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Deteção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches de camada de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização na camada de enlace: ATM, MPLS

Hubs

- Repetidores de camada física ("dumb")
- Bits recebidos em um enlace são encaminhados em *todos* os outros enlaces na mesma taxa
- Os nós conectados ao hub podem colidir entre si
- Não há bufferização do quadro
- CSMA/CD no hub: os adaptadores nos hots detetam as colisões

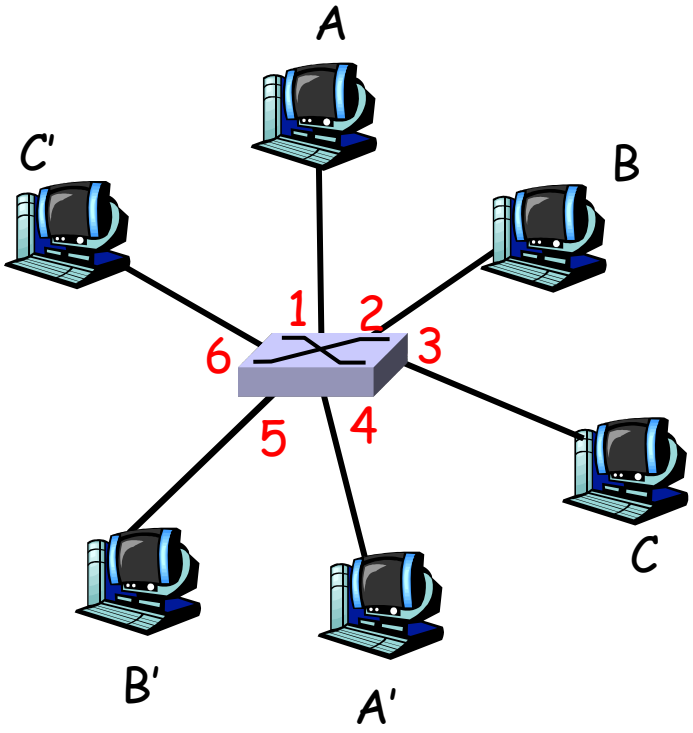


Switch

- Dispositivo de camada de enlace: mais inteligente que os hubs – papel ativo
  - Armazena e encaminha quadros Ethernet
  - Examina o cabeçalho do quadro e seletivamente encaminha o quadro baseado no endereço MAC de destino
  - Quando um quadro está para ser encaminhado no segmento, usa CSMA/CD para acessar o segmento
- *Transparente*
  - Os hosts não têm conhecimento da presença dos switches
- *Plug-and-play, self-learning*
  - Os switches não necessitam de configuração

Switch: permite múltiplas transmissões simultâneas

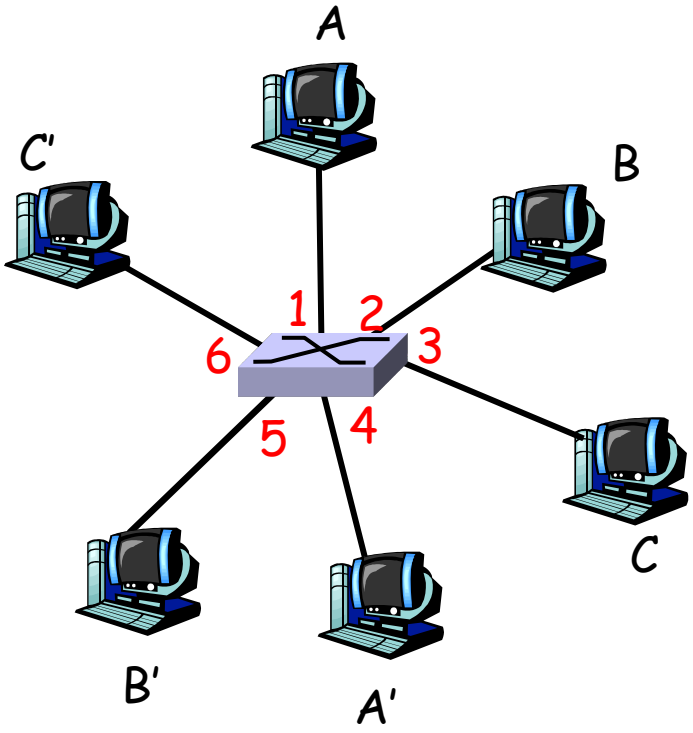
- hosts têm conexão dedicada e direta com o switch
- switches bufferizam pacotes
- Protocolo Ethernet é usado em cada enlace entretanto não há colisão; full duplex
- *switching:* A-to-A' e B-to-B' simultaneamente, sem colisões
  - não é possível no caso do hub



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

Tabela de Comutação

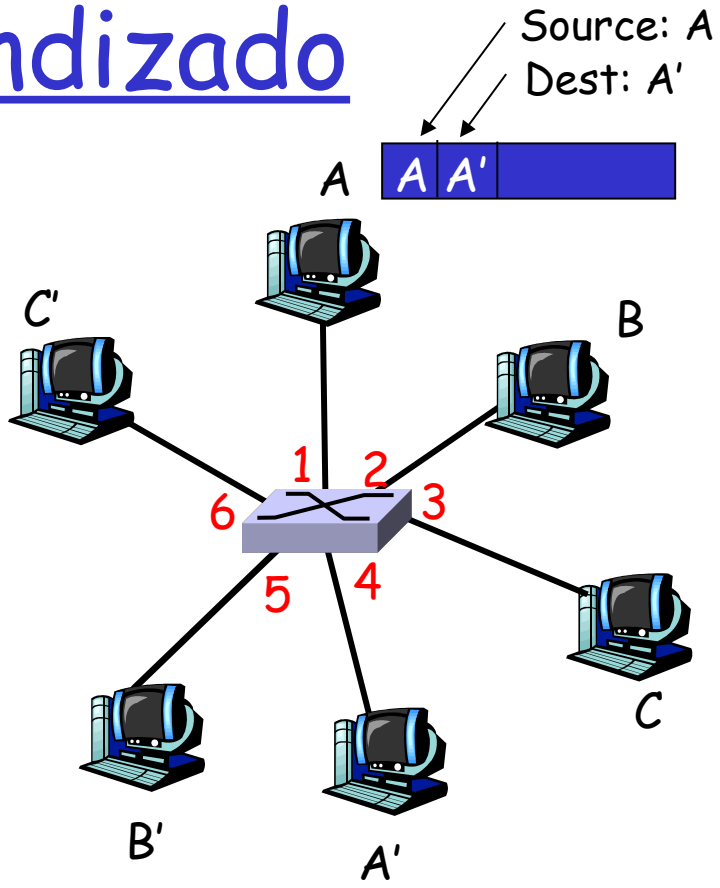
- *P:* como o switch conhece que A' é alcançável através da interface 4 e que B' é alcançável via interface 5?
- *R:* cada switch possui uma tabela de comutação; cada entrada possui:
  - (endereço MAC do host, interface para alcançar o host, time stamp)
- Parece uma tabela de roteamento!
- *P:* como as entradas são criadas e mantidas na tabela de comutação?
  - Existe alguma coisa como um protocolo de roteamento?



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

Switch: auto-aprendizado

- switch *aprende* quais hosts podem ser alcançados a partir das interfaces do switch
  - Quando o quadro é recebido, o switch "aprende" a locação do emissor
  - Armazena o par emissor/endereço na tabela de comutação



MAC addr	interface	TTL
A	1	60

Tabela de Comutação (inicialmente vazia!)

Switch: filtragem/encaminhamento do quadro

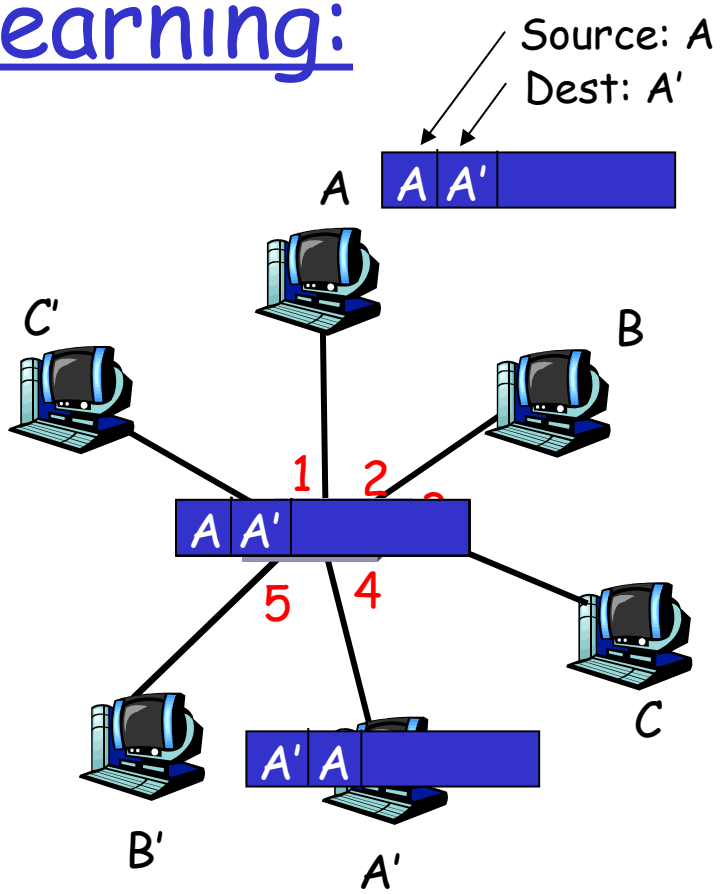
Quando um quadro é recebido:

1. Registra o enlace associado ao host emissor
2. Indexa a tabela de comutação com o endereço MAC de destino
3. **if** uma entrada para o destino é encontrada
   then {
   if destino encontra-se no mesmo segmento onde o quadro foi recebido
   then descarte o quadro
   else encaminhe o quadro na direção da interface indicada
   }
   else inunde (flood).

Encaminhar em todas as interfaces exceto na interface onde o quadro foi recebido.

Encaminhamento Self-learning: exemplo

- Destino do quadro desconhecido: *flood*
- Destino do endereço a é conhecido: *send seletivo*

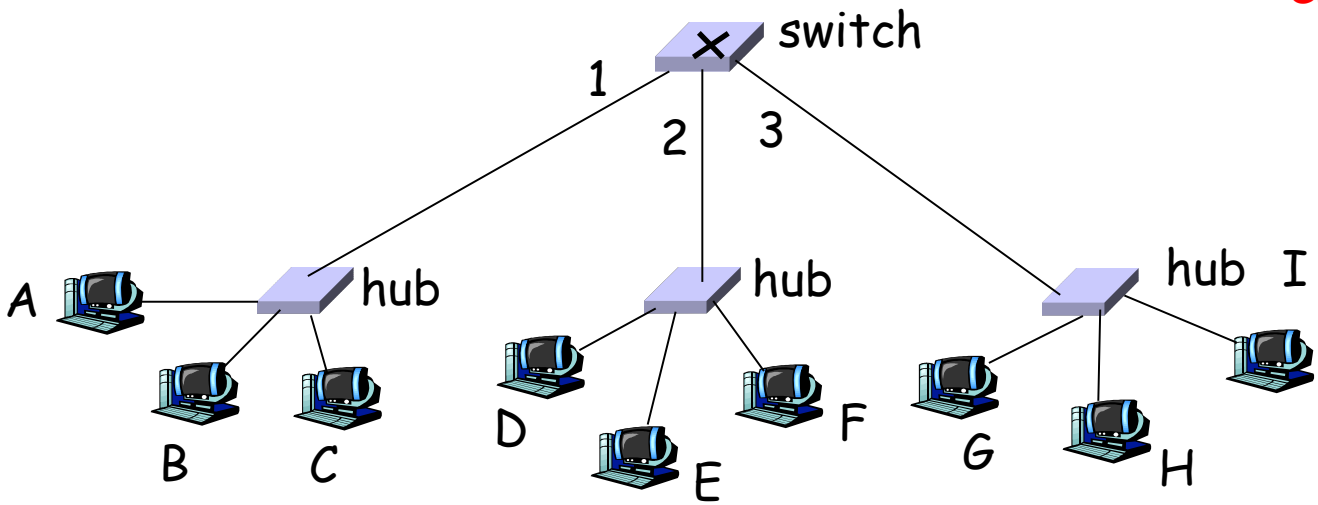


MAC addr	interface	TTL
A	1	60
A'	4	60

Tabela de Comutação (inicialmente vazia)

Interconexão de Switches

Suponha que C envia um quadro para D

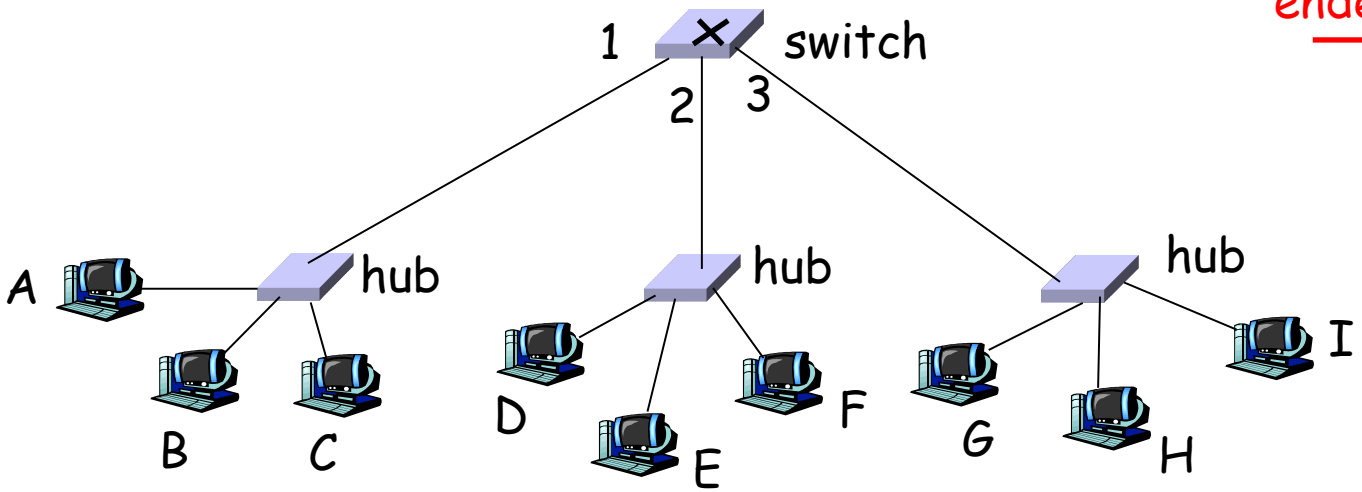


endereço	interface
A	1
B	1
E	2
G	3
C	1

- Switch recebe o quadro de C
  - Anota na tabela que C está na interface 1
  - Como D não está na tabela, o switch encaminha o quadro para as interfaces 2 e 3
- Quadro recebido por D

Self-learning multi-switch example

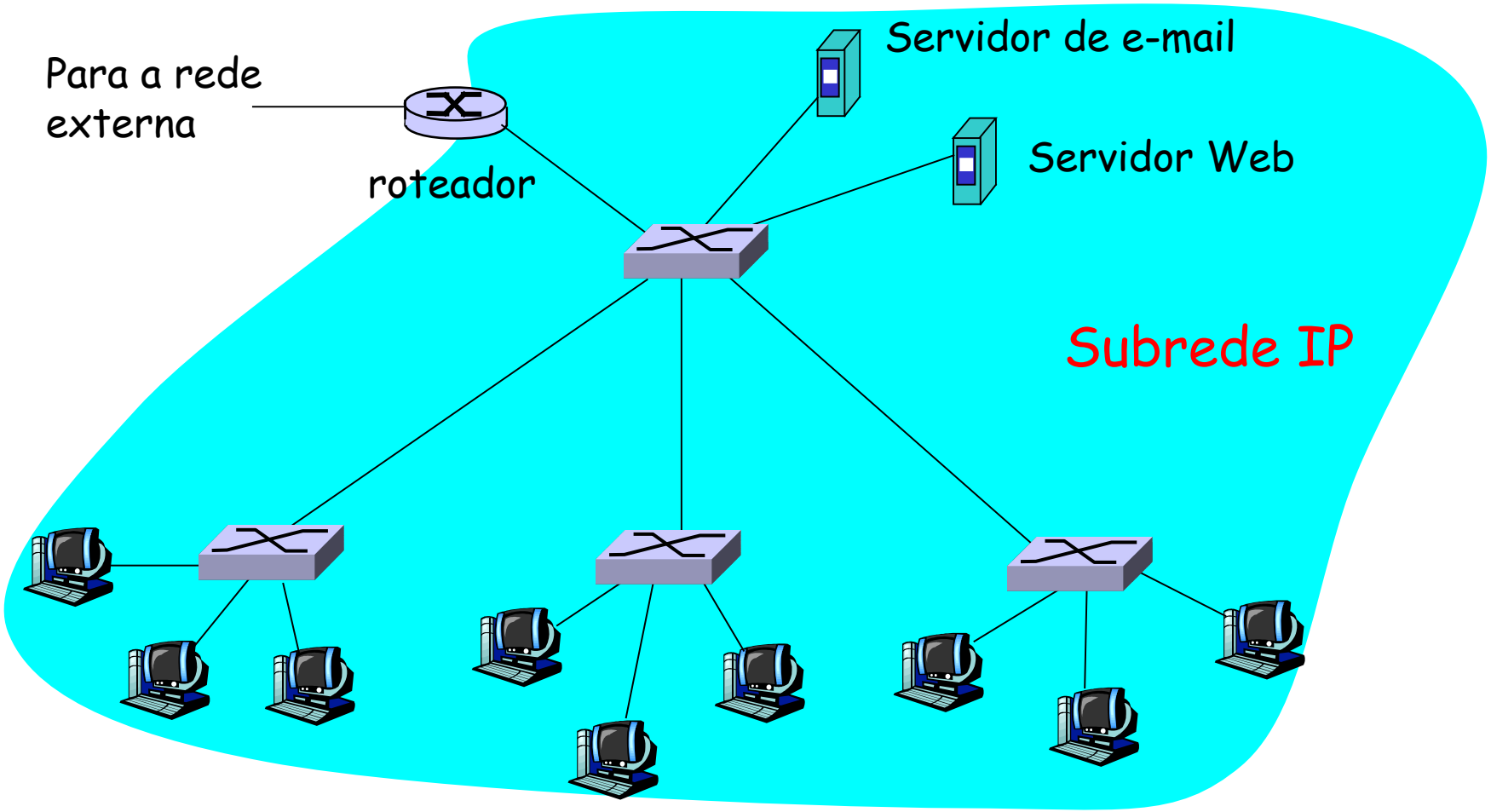
Suponha que D responde com um quadro para C.



endereço	interface
A	1
B	1
E	2
G	3
C	1
D	2

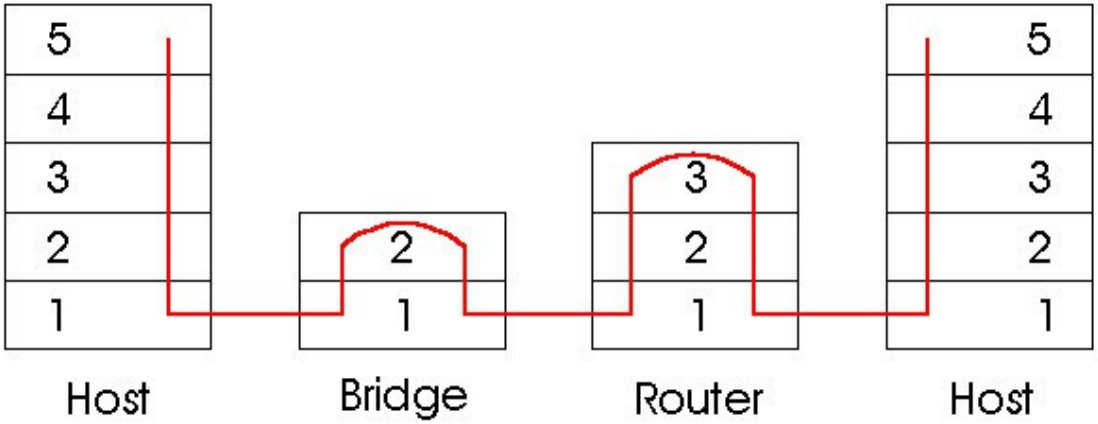
- Switch recebe o quadro de D
  - Anota na tabela que D está na interface 2
  - Como C está na tabela, o switch encaminha o quadro apenas para a interface 1
- Quadro recebido por C

Rede Institucional



Switches vs. Roteadores

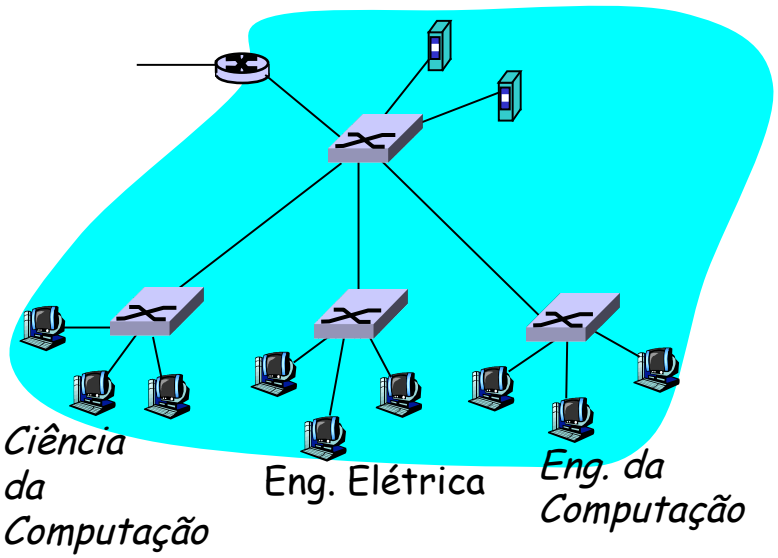
- Ambos são dispositivo store-and-forward
  - roteadores: dispositivos de camada de rede (examina os cabeçalhos da camada de rede)
  - switches são dispositivos de camada de enlace
- Roteadores mantêm tabelas de roteamento, implementam algoritmos de roteamento
- Switches mantêm tabelas de comutação, implementam filtros e algoritmos de aprendizagem



Resumo: Comparação

	hubs	roteadores	switches
isolação de tráfego	não	sim	sim
plug & play	sim	não	sim
roteamento ótimo	não	sim	não
cut through	sim	não	sim

VLANs: motivação



O quê acontece se:

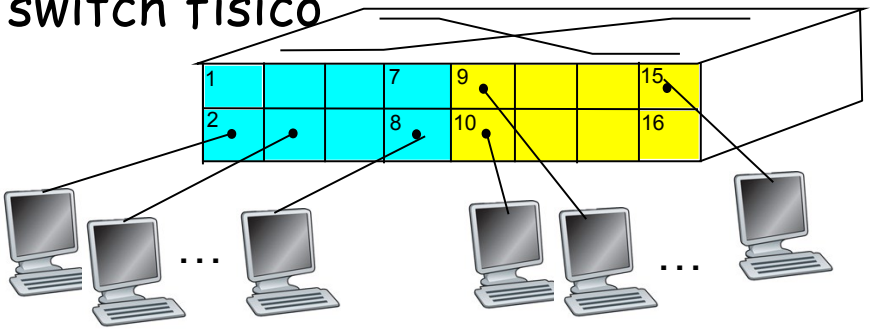
- Usuário da CS move-se para o prédio da EE mas deseja continuar conectado ao switch do CS?
- Domínio de broadcast único:
  - Todo o tráfego nível 2 de broadcast (ARP, DHCP) atravessa a LAN inteira (segurança/privacidade, questões de eficiência)
- Cada switch do nível inferior possui poucas portas utilizadas

VLANs

Virtual Local Area Network

Switch(es) que suportam VLAN podem ser configurados para definir múltiplas LANs virtuais sobre uma mesma LAN física

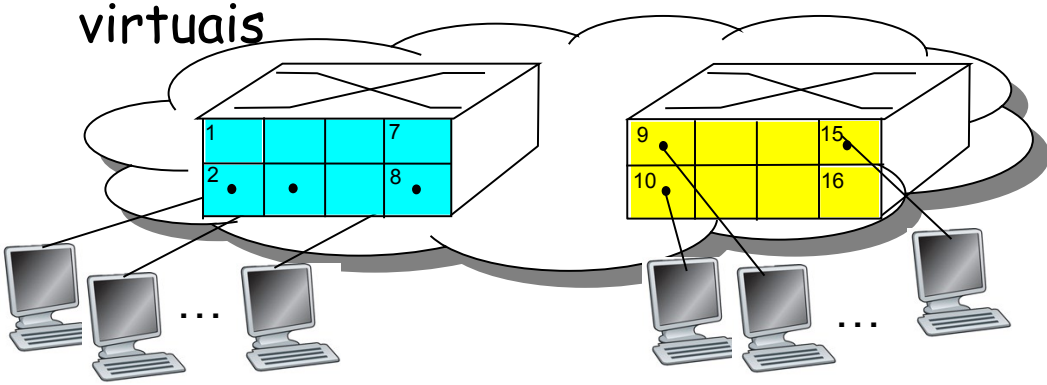
VLAN baseada na porta: portas do switch são agrupadas (software de gerência) de modo que um único switch físico



Electrical Engineering (VLAN ports 1-8)

Computer Science (VLAN ports 9-15)

... opera como múltiplos switches virtuais

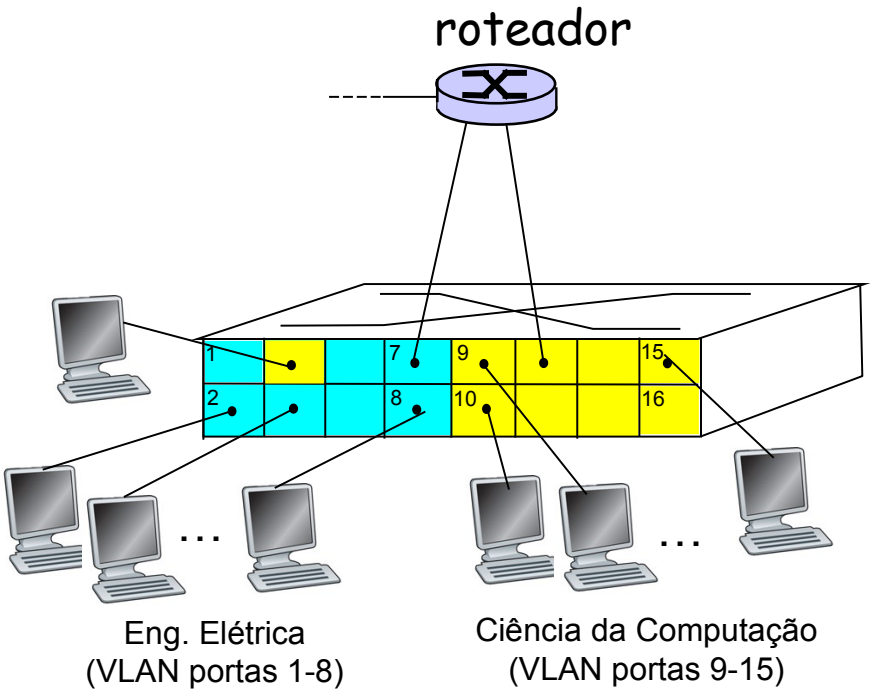


Electrical Engineering (VLAN ports 1-8)

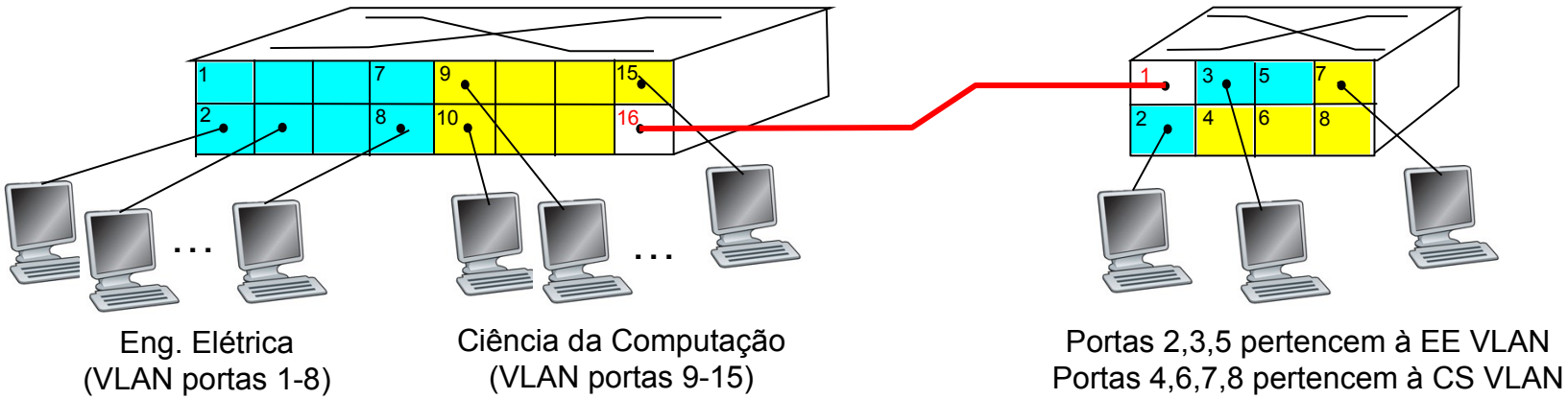
Computer Science (VLAN ports 9-16)

VLAN baseado nas portas

- *Isolamento do tráfego:* quadros da/para as portas 1-8 podem alcançar somente as portas 1-8
  - Possível também definir VLANs baseado nos endereços MAC ao invés das portas
- *Alocação dinâmica:* portas podem ser dinamicamente alocadas às VLANs
- *Encaminhamento entre VLANS:* geralmente via roteamento (como no caso de switches separados)

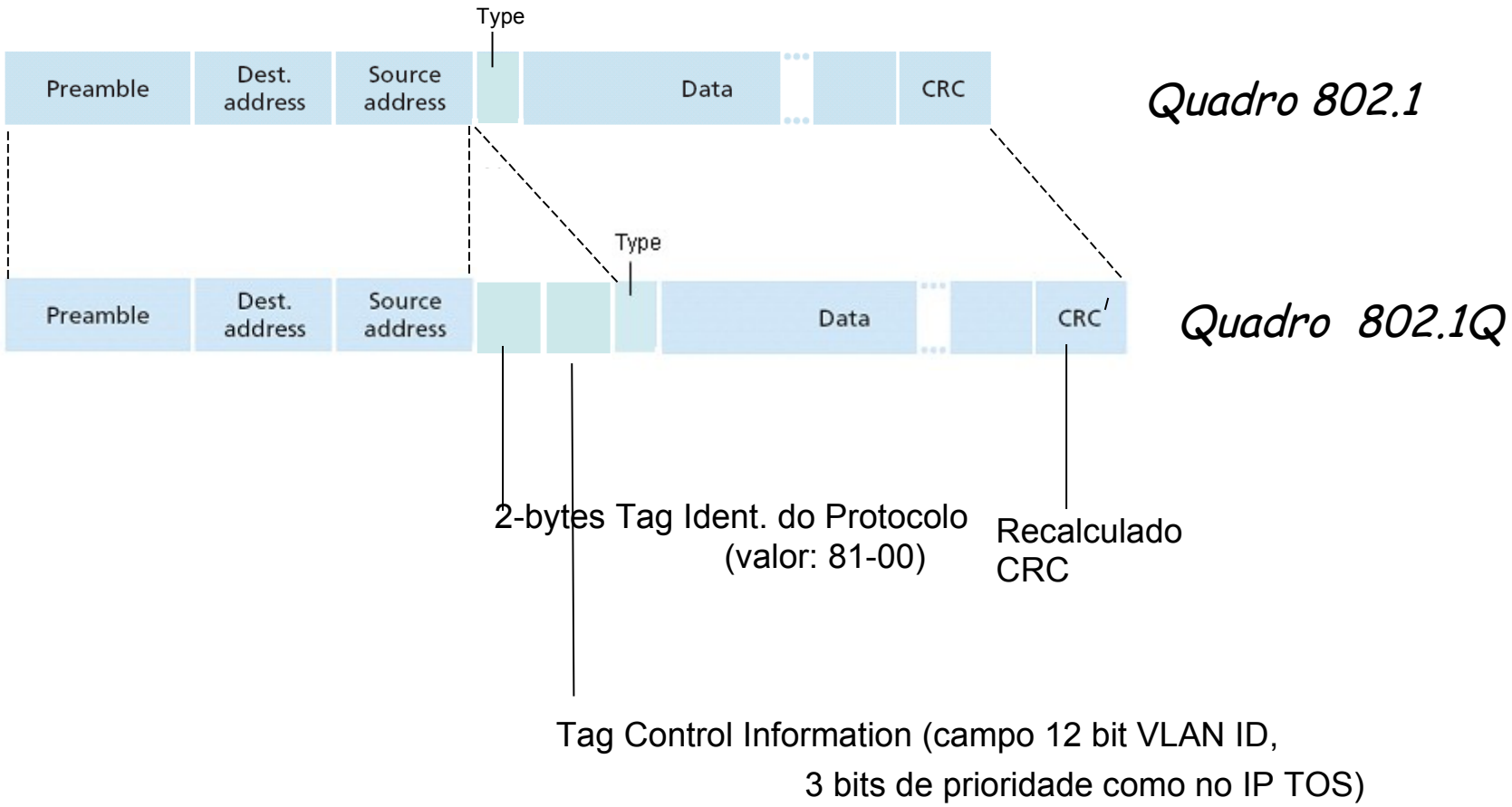


VLANS entre vários switches



- *trunk port:* transporta quadros entre VLANs definidas entre múltiplos switches físicos
  - Quadros encaminhados na VLAN entre os switches devem possuir um identificador de VLAN
  - O protocolo 802.1q adiciona/remove campos adicionais nos quadros transportados nas portas trunk

802.1Q VLAN frame format



Camada de Enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Deteção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches de camada de enlace
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização na camada de enlace: ATM, MPLS

Controle do Enlace de Dados Ponto-a-Ponto

- Um transmissor, um receptor, um enlace: mais fácil do que enlace de broadcast:
  - Sem Media Access Control
  - Não necessita de endereçamento MAC explícito
  - Ex.: dialup link, linha ISDN
- Protocolos ponto-a-ponto DLC populares:
  - PPP (point-to-point protocol)
  - HDLC: High level data link control (camada de enlace costumava ser considerada "camada alta" na pilha de protocolos!)

PPP: Requisitos de Projeto [RFC 1557]

- Enquadramento de pacote: encapsulamento do datagrama da camada de rede no quadro da camada de enlace
  - Transporta dados da camada de rede de qualquer protocolo de rede (não apenas o IP)
  - Capacidade de separar os protocolos na recepção
- Transparência de bits: deve transportar qualquer padrão de bit no campo de dados
- Detecção de erros (mas não correção)
- Gerenciamento da conexão: detecta e informa falhas do enlace para a camada de rede
- Negociação de endereço da camada de rede: os pontos terminais do enlace podem aprender e configurar o endereço de rede um do outro

PPP: Não suportado

- Não há correção nem recuperação de erros
- Não há controle de fluxo
- Aceita entregas fora de ordem
- Não há necessidade de suportar enlaces multiponto (ex., polling)

Recuperação de erros, controle de fluxo, reordenação dos dados são todos relegados para as camadas mais altas!

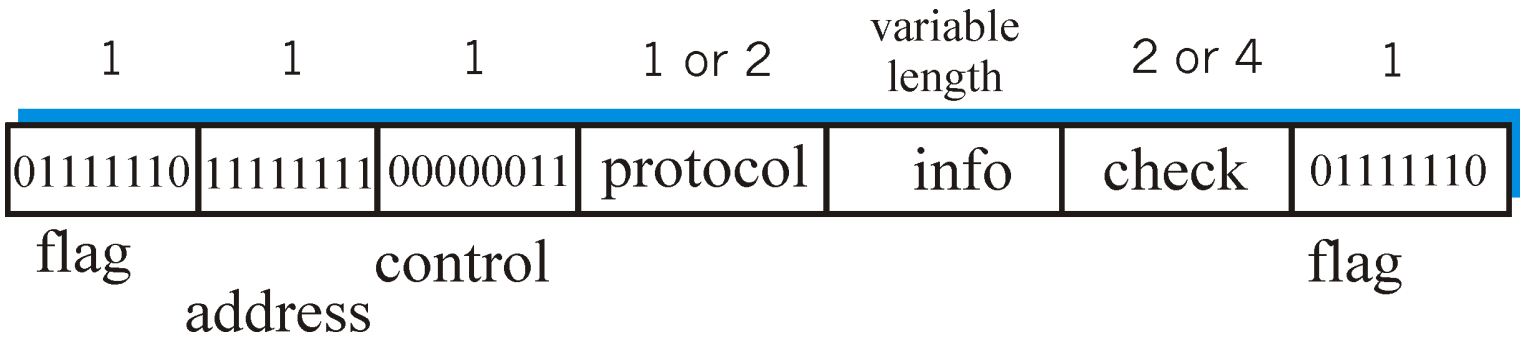
PPP: Quadro

- Flag: delimitador (enquandramento)
- Endereço: não tem função (apenas uma opção futura)
- Controle: não tem função; no futuro, é possível ter múltiplos campos de controle
- Protocol: indica o protocolo da camada superior ao qual o conteúdo do quadro deve ser entregue (ex.: PPP-LCP, IP, IPCP etc.)

1	1	1	1 or 2	variable length	2 or 4	1
01111110	11111111	00000011	protocol	info	check	01111110
flag	address	control				flag

PPP: Quadro (cont.)

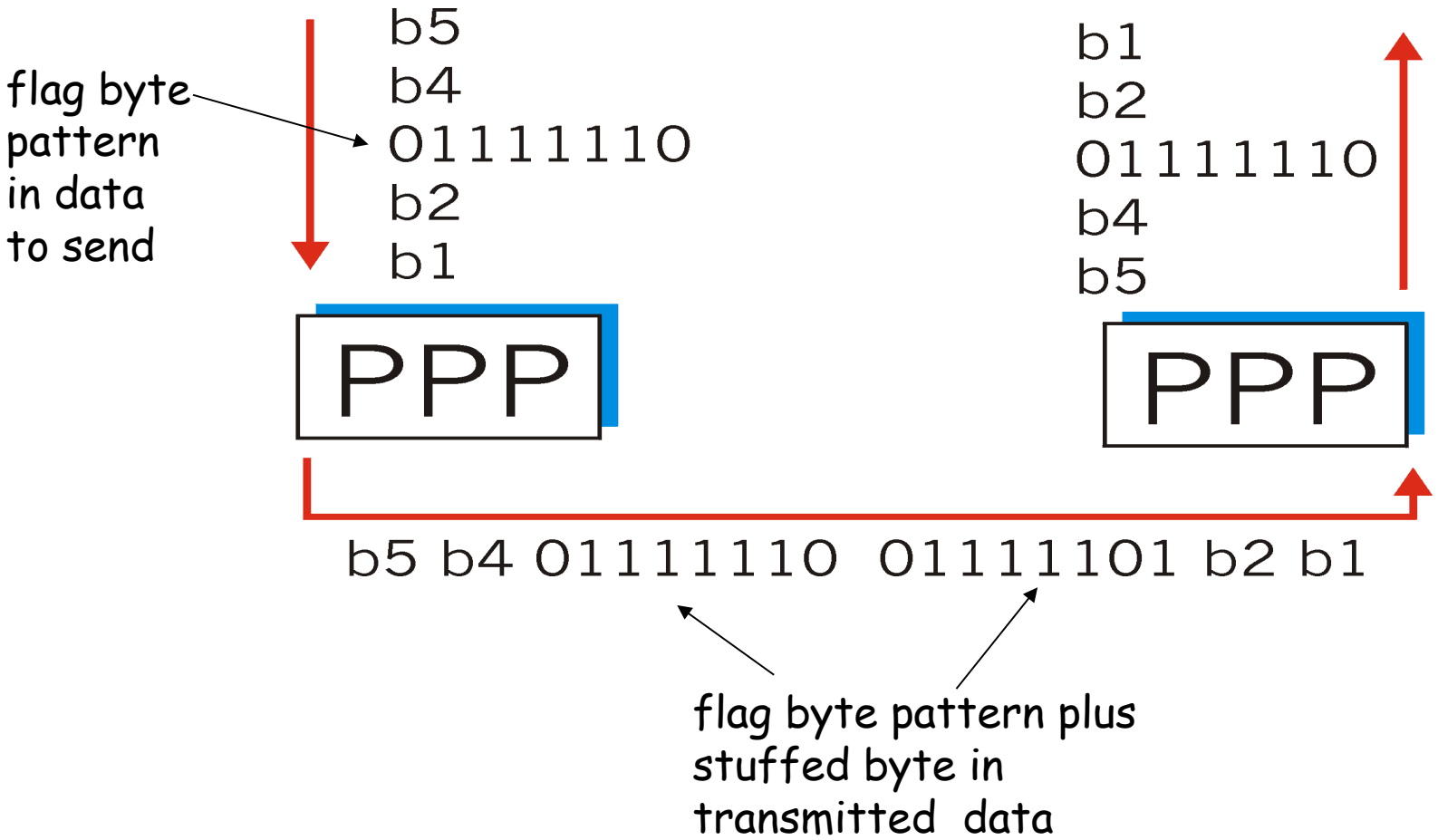
- info: dados transportados da camada superior
- check: verificação de redundância cíclica para detecção de erros



Byte Stuffing

- Requisito de "transparência de dados": o campo de dados deve poder incluir o padrão correspondente ao flag <01111110>
  - P: Se for recebido o padrão <01111110> é dado ou é flag?
- Transmissor: acrescenta ("stuffs") um byte extra com o padrão < 01111101> (escape) antes de cada byte com o padrão de flag < 01111110> nos *dados*
- Receptor:
  - Um byte 01111101 seguido de 01111110: descarta o primeiro e continua a recepção de dados
  - Dois bytes 01111101 em sequência: descarta o primeiro byte; o segundo é dado
  - Único byte 01111110: então é um flag

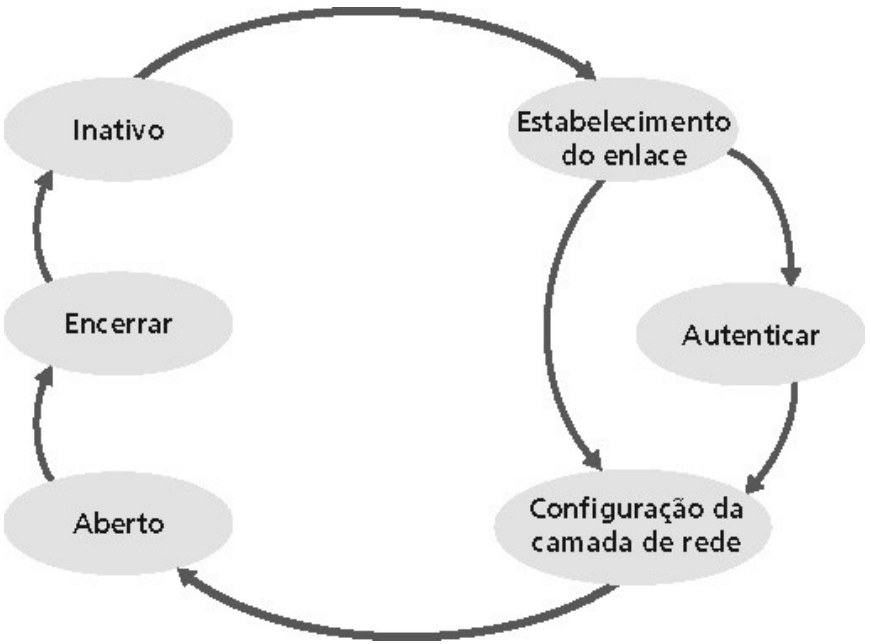
Byte Stuffing



PPP: Protocolo de Controle de Dados

Antes de trocar dados da camada de rede, os parceiros da camada de enlace devem

- configurar o enlace PPP (tamanho máximo do quadro, autenticação)
- Aprender/configurar as informações da camada de rede
  - Para o IP: transportar mensagens do protocolo de controle IP (IPCP) (campo de protocolo: 8021) para configurar/aprender os endereços IP



Camada de Enlace

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

Virtualização de Redes

Virtualização de recursos: abstração poderosa usada na engenharia de sistemas:

- Exemplos computacionais: memória virtual, dispositivos virtuais
  - Máquinas virtuais: e.x., java
  - O.S. IBM VM nos anos 1960's/70's
- Camada de abstrações: não entra nos detalhes da camada inferior, tratando somente as camadas abaixo de forma abstrata.

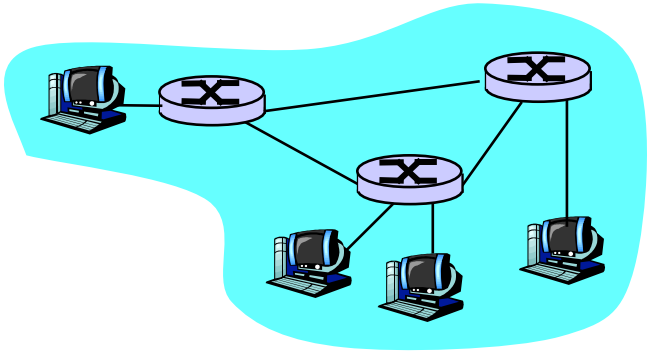
A Internet: Virtualização de redes

1974: múltiplas redes desconectadas

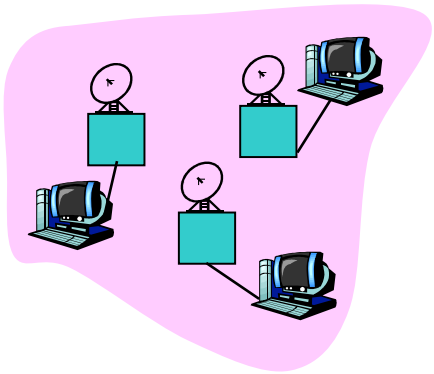
- ARPAnet
- Redes de dado sobre cabos
- Rede de pacotes via satélite (Aloha)
- Rede de pacotes via rádio

… diferindo em:

- endereçamento
- Formato dos pacotes
- Recuperação de erro
- roteamento



ARPAnet



Rede de satélite

"A Protocol for Packet Network Intercommunication", V. Cerf, R. Kahn, IEEE Transactions on Communications, May, 1974, pp. 637-648.

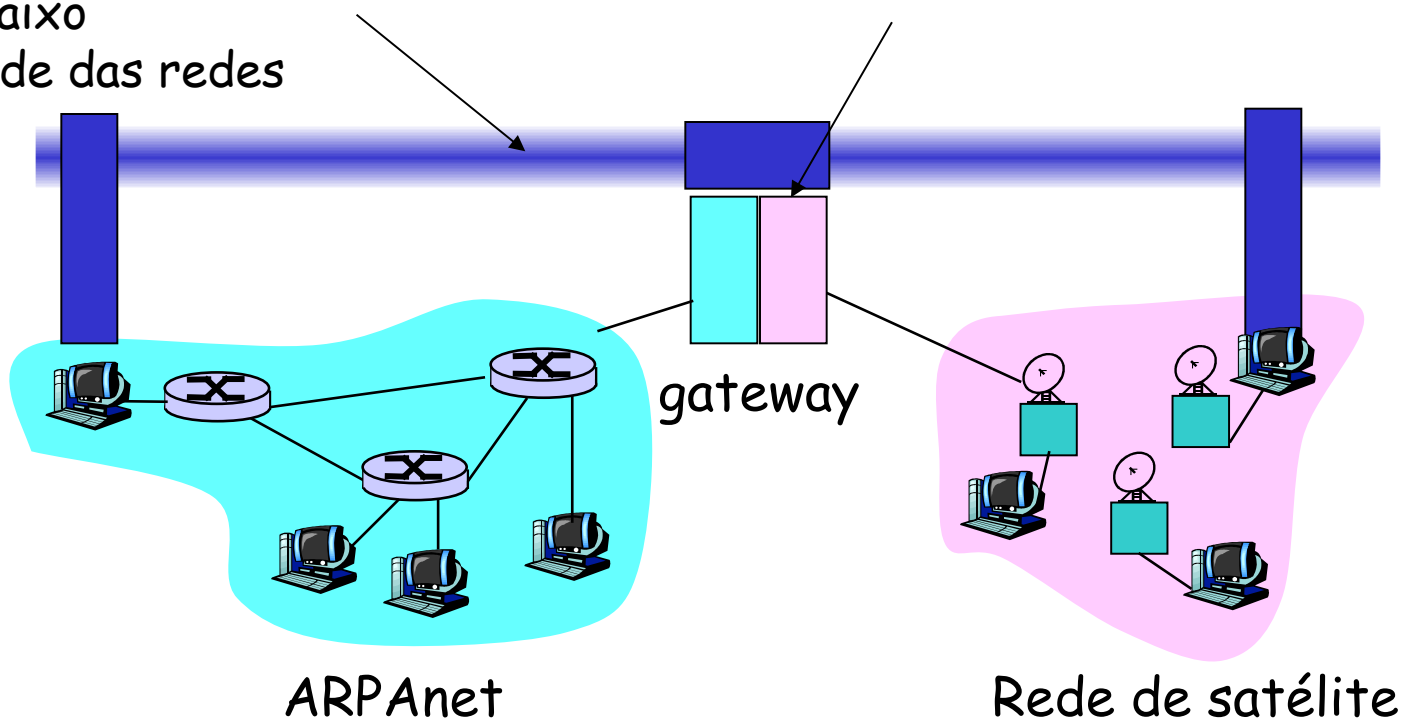
A Internet: virtualização de redes (cont.)

Camada de Rede (IP):

- endereçamento: a camada de rede (internetwork) aparece como uma entidade única e uniforme, independetemente da heterogeneidade da rede física abaixo
- Rede das redes

Gateway:

- "empacota os pacotes no formato local ou desempacota-os"
- roteia (no nível de interconexão) para o próximo gateway



Arquitetura de Interconexão proposta por Cerf & Kahn's

O que é virtualizado?

- Duas camadas de endereçamento: internetwork e rede local
- Nova camada (IP) torna tudo homogêneo através da camada de rede
- Tecnologia de rede local
  - Cabo
  - Satélite
  - Modem telefônico de 56 K
  - Hoje: ATM, MPLS

… "inivisível no nível da camada de interconexão". Para o IP aparece como uma tecnologia de enlace!

ATM and MPLS

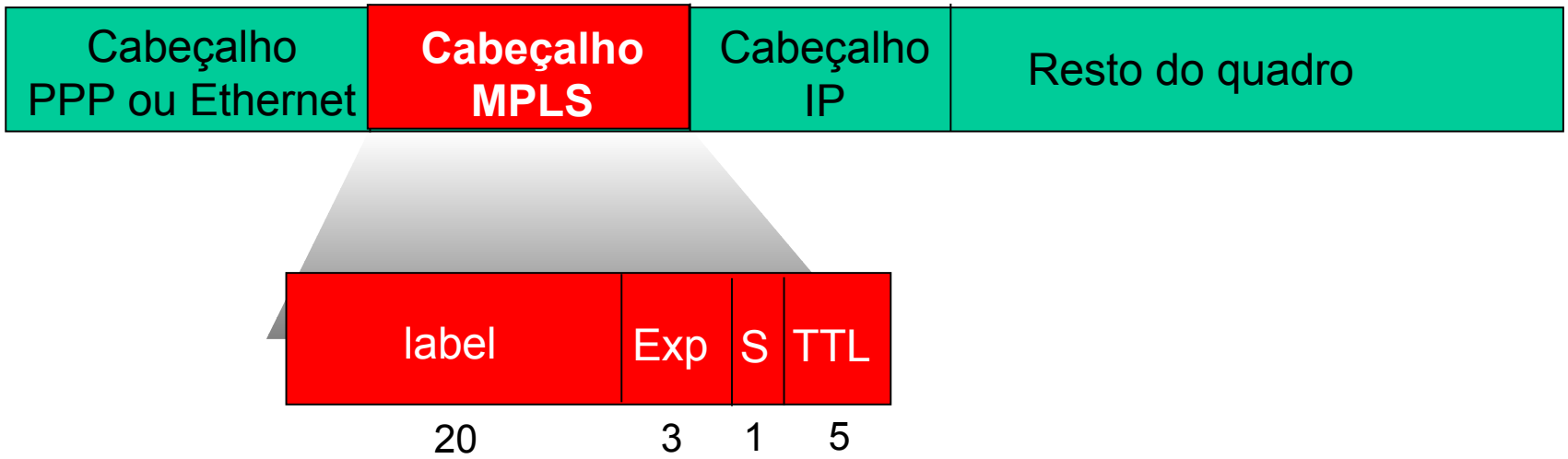
- ATM, MPLS
  - modelos de serviço, endereçamento e roteamento diferentes da Internet
- Vistos pela Internet como um enlace lógico conectando roteadores IP
  - Semelhante a um enlace dial-up que é parte de uma rede separada (rede telefônica)
- ATM, MPLS: interesses específicos

Asynchronous Transfer Mode: ATM

- **Padrão nos anos 1990's/00 para alta velocidade** (155Mbps a 622 Mbps ou mais) arquitetura *Broadband Integrated Service Digital Network* (B-ISDN)
- Objetivo: *transporte integrado de voz, vídeo e dado*
  - Procura atender os requisitos temporais/QoS da transmissão de voz e vídeo (contrariamente ao modelo melhor-esforço utilizado na Internet)
  - Telefonia "de próxima geração": raízes técnicas no mundo dos telefones
  - Comutação de pacotes (células de tamanho fixo denominadas "células") através de circuitos virtuais

Multiprotocol label switching (MPLS)

- Objetivo inicial: agilizar o encaminhamento IP usando um "label" fixo para o encaminhamento ao invés do endereço IP
  - Baseado na abordagem de circuitos virtuais (VC)
  - O datagrama IP continua mantendo o endereço IP!



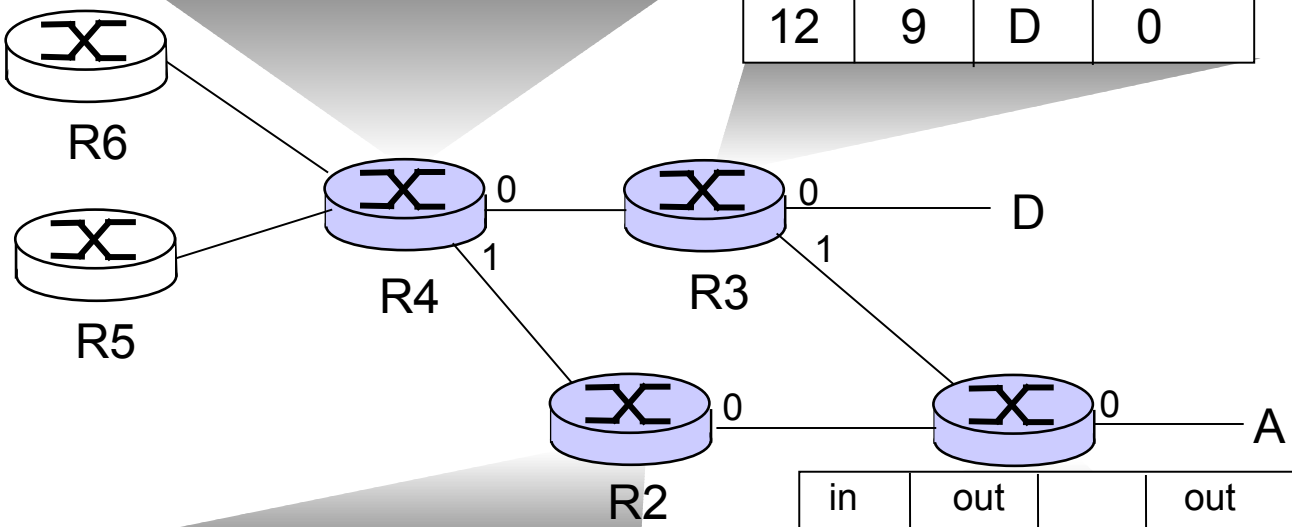
Roteadores MPLS

- Conhecidos como LSRs (label-switched routers)
- Encaminham os pacotes para a interface de saída baseados somente no valor do "label" (não inspencionam o endereço IP)
  - A tabela de encaminhamento MPLS é distinta da tabela de encaminhamento IP
- Necessidade de um protocolo de sinalização para estabelecer o encaminhamento
  - RSVP-TE
  - Encaminhamento por caminhos que o IP não permitiria (e.x., roteamento com rota na origem) !!
  - Uso do MPLS para engenharia de tráfego
- Co-existe com roteadores IP puros

Tabelas de Encaminhamento MPLS

in label	out label	dest	out interface
10	A	0	
12	D	0	
8	A	1	

in label	out label	dest	out interface
10	6	A	1
12	9	D	0



in label	out label	dest	out interface
8	6	A	0

in label	out label	dest	out interface
6	-	A	0

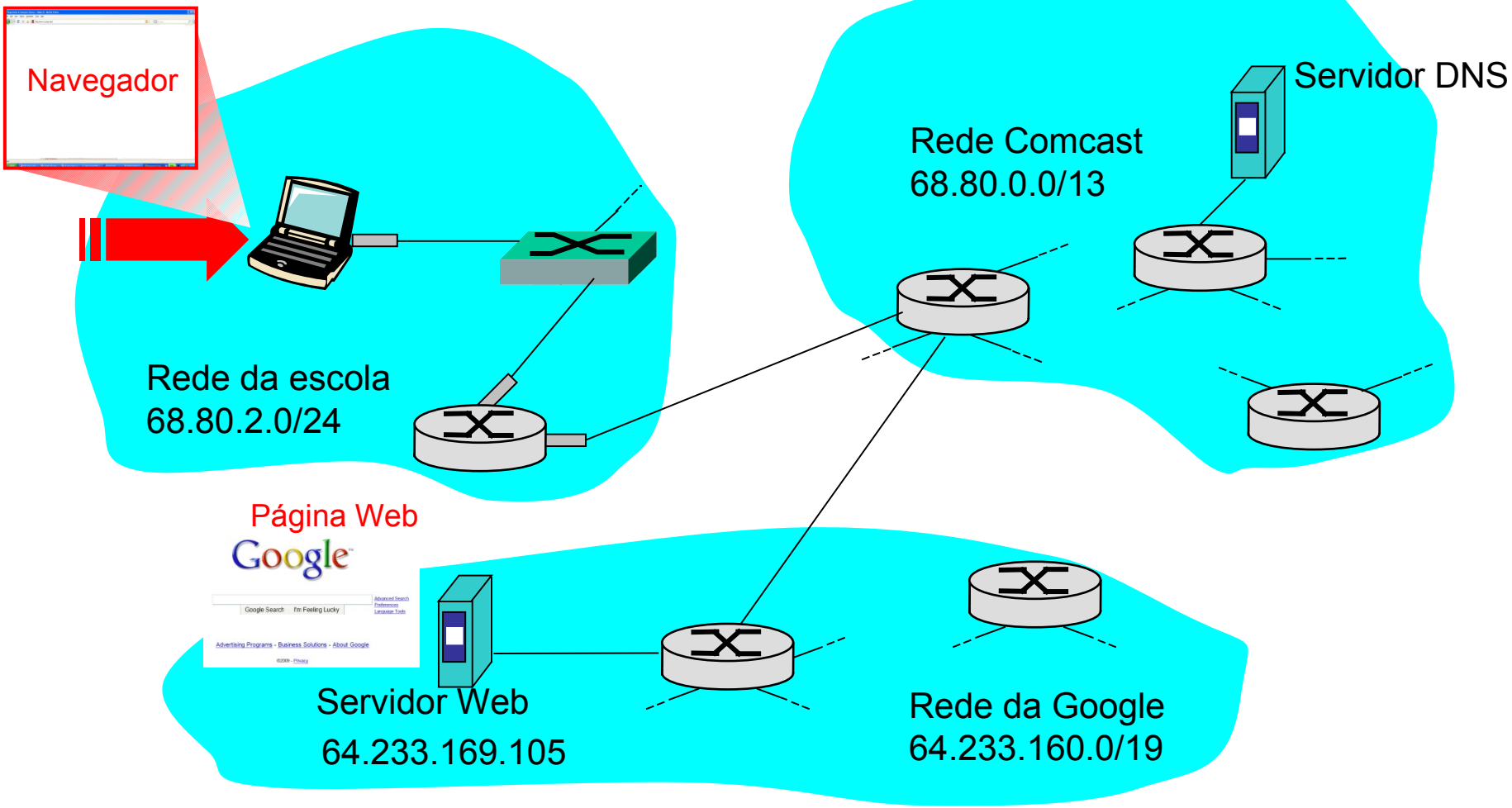
Camada de Enlace

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

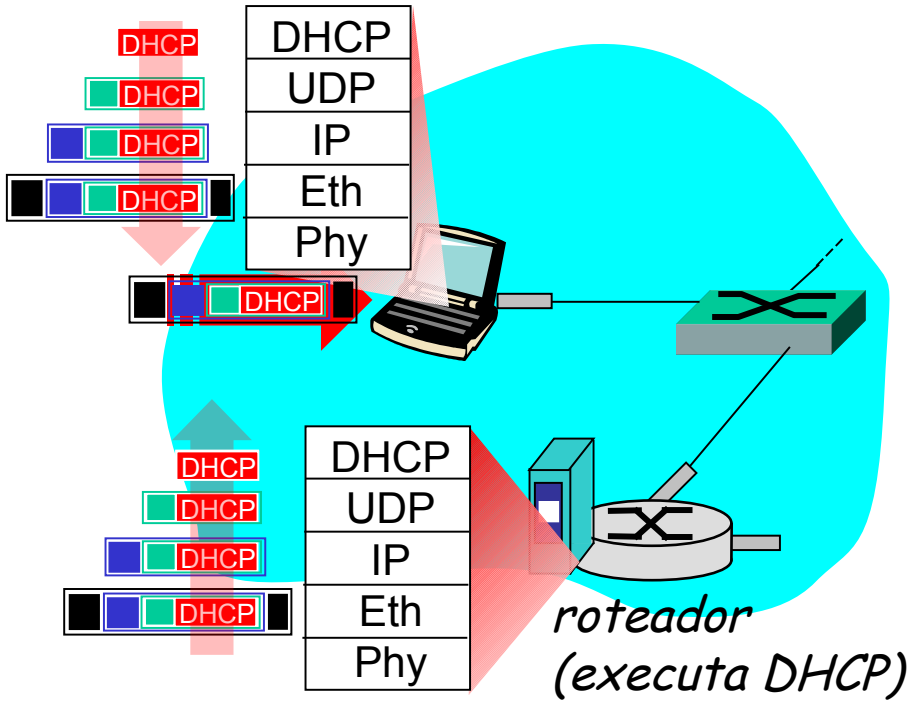
Síntese: Um dia na vida de uma requisição Web

- Jornada através da pilha de protocolos completa!
  - aplicação, transporte, rede, enlace
- Juntando tudo: síntese!
  - *objetivo:* identificar, revisar e entender o papel dos protocolos de todos os níveis envolvidos em um cenário simples: requisição de uma página Web
  - *Cenário:* um estudante conecta o seu laptop à rede do campus e requisita/recebe acesso ao www.google.com

Cenário

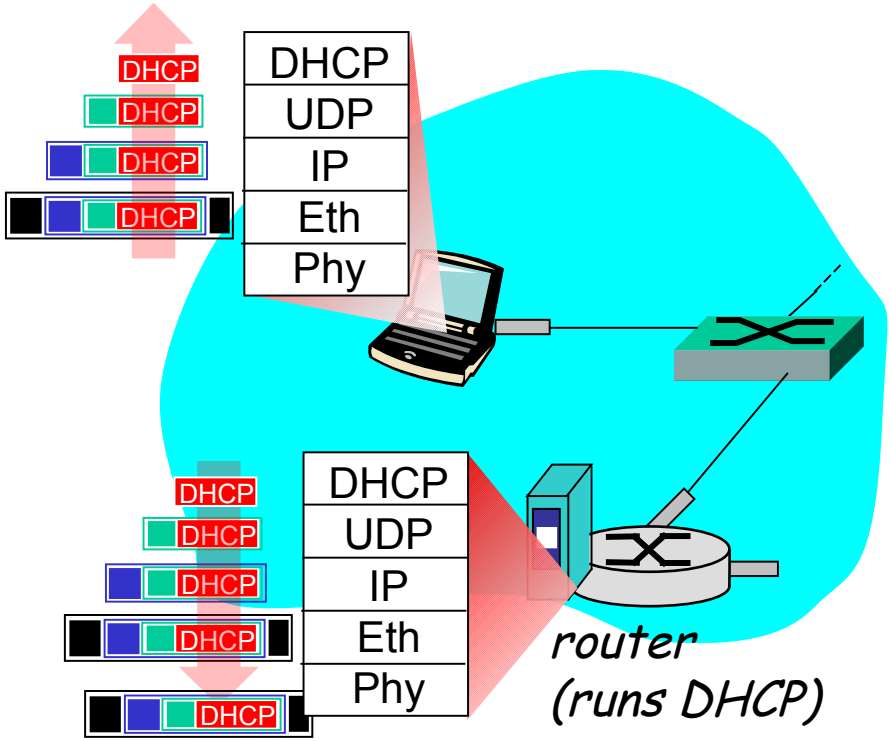

Navegador
Servidor DNS
Rede Comcast
68.80.0.0/13
Rede da escola
68.80.2.0/24
Página Web
Google
Servidor Web
64.233.169.105
Rede da Google
64.233.160.0/19

Um dia na vida… conectando-se à Internet



- Obtenção do endereço IP, addr do primeiro roteador, addr do servidor DNS: uso do *DHCP*
- Requisição DHCP *encapsulada* no *UDP*, encapsulada no *IP*, encapsulada no Ethernet *802.1*
- Quadro Ethernet *broadcast* (dest: FFFFFFFFFFFF) na LAN, recebido no roteadodr onde executa o servidor *DHCP*
- Ethernet *demultiplexado* no IP, demultiplexado no UDP, demultiplexado no DHCP

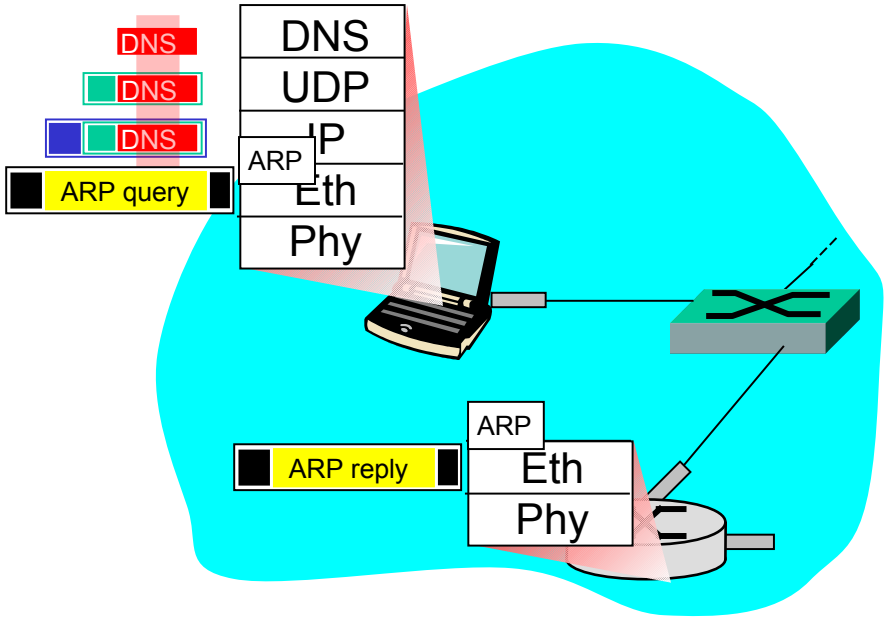
Um dia na vida… conectando-se à Internet



- Servidor DHCP prepara ***DHCP ACK*** contendo o IP do cliente, o IP do roteador default do cliente, nome e IP do servidor DNS
- Encapsulamento no servidor DHCP, quadro encaminhado (***aprendizado do switch***) via LAN, demultiplexado no Cliente
- Cliente DHCP recebe o DHCP ACK

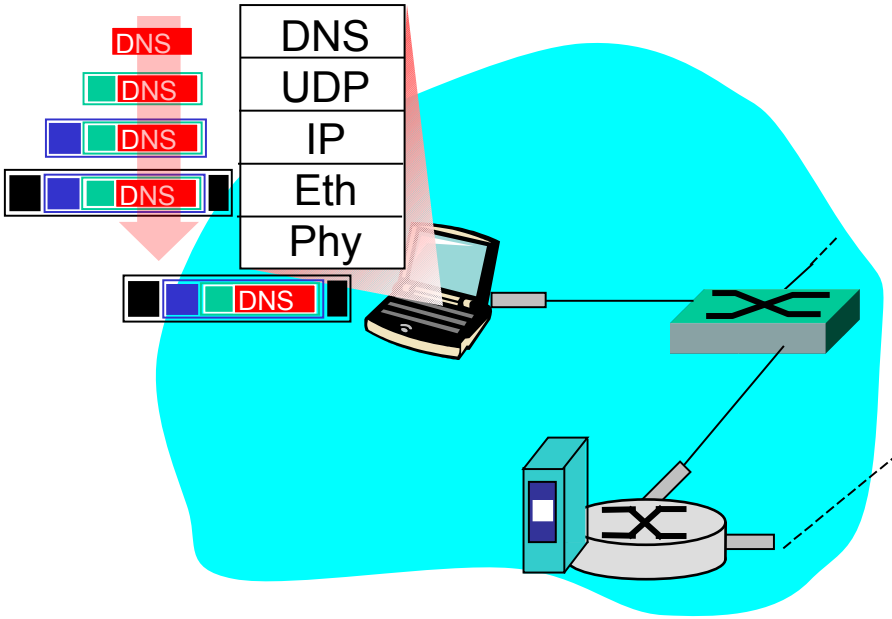
O cliente possui agora um endereço IP, conhece o nome e o endereço do servidor DNS, e o endereço do seu roteador default

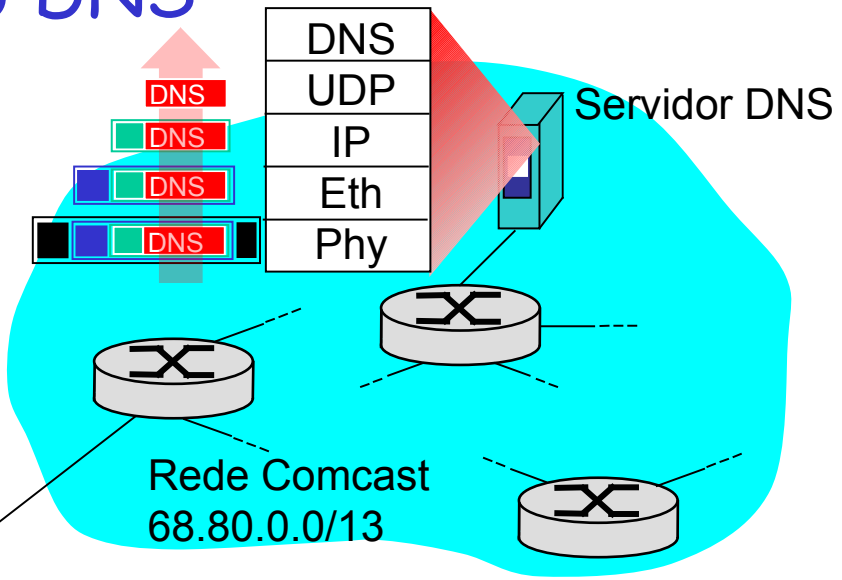
Um dia na vida… ARP (antes do DNS e do HTTP)



- Antes do envio da requisição ***HTTP***, é necessário o endereço IP de www.google.com: ***DNS***
- Criação da consulta DNS, encapsulada no UDP, encapsulada no IP, encasulada no Eth. Para enviar o quadro é necessário o endereço MAC da interface do roteador: ***ARP***
- broadcast da ***consulta ARP***, recebida pelo roteador, o qual responde com o ***ARP reply*** fornecendo o endereço MAC da interface
- o cliente conhece agora o endereço MaC do roteador default; é possível enviar um quadro contendo a consulta DNS

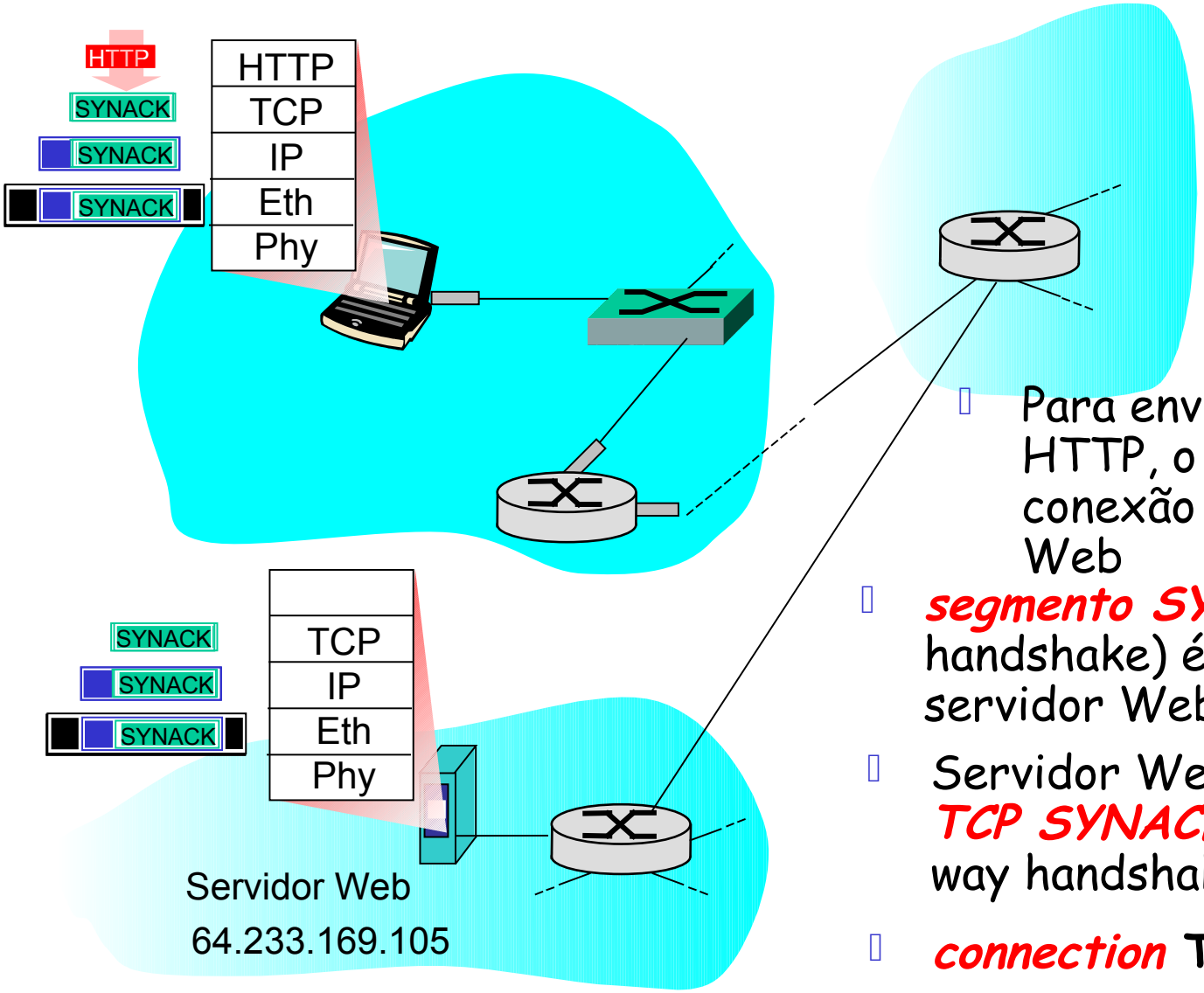
Um dia na vida… acessando o DNS





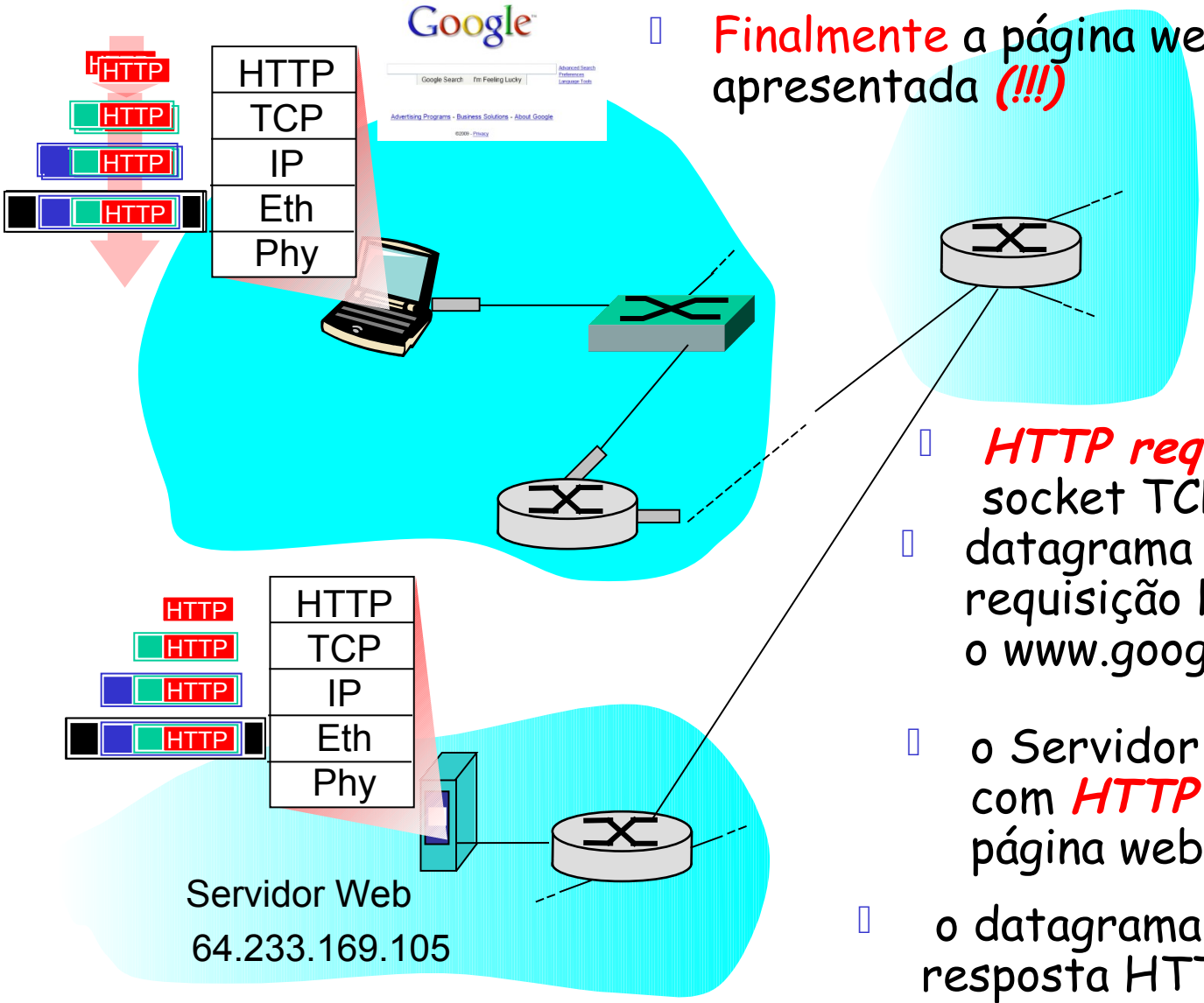
- datagrama IP contendo consulta DNS é encaminhada do cliente ao roteador default via switch
- O datagrama IP é encaminhado da rede do campus à rede Comcast, roteado (tabelas criadas pelos protocolos de roteamento ***RIP, OSPF, IS-IS*** e/ou ***BGP***) ao servidor DNS
- Demultiplexada no servidor DNS
- Servidor DNS responde ao cliente com o endereço IP de www.google.com

Um dia na vida… conexão TCP para carregar HTTP



- Para enviar a requisição HTTP, o cliente abre uma conexão *TCP* com o servidor Web
- *segmento SYN* (passo 1 do 3-way handshake) é roteado até o servidor Web
- Servidor Web responde com o *TCP SYNACK* (passo 2 do 3-way handshake)
- *connection* **TCP** *estabelecida!*

Um dia na vida… HTTP request/reply



- Finalmente a página web é apresentada *(!!!)*

- *HTTP request* enviado no socket TCP
- datagrama IP contendo a requisição HTTP é roteada até o www.google.com
- o Servidor Web responde com *HTTP reply* (contendo a página web)
- o datagrama IP contendo a resposta HTTP é roteada até o cliente

Capítulo 5: Resumo

- princípios associados aos serviços da camada de enlace:
  - Deteção de erro, correção
  - Compartilhamento de canal de broadcast: acessos múltiplos
  - Endereçamento de enlace (endereço MAC/endereço físico)
- Instanciação e implementação de várias tecnologias de enlace
  - Ethernet
  - LANS comutadas (switched), VLANs
  - PPP
  - Redes virtualizadas como enlace de comunicação: MPLS
- síntese: um dia na vida de uma requisição web

Chapter 5: parte I

- Jornada completa através da pilha de protocolo (exceto camada física)
- Compreensão dos princípios das redes de computadores
- …. Ainda restam tópicos relevantes!
  - wireless
  - multimidia
  - segurança
  - gerência de redes