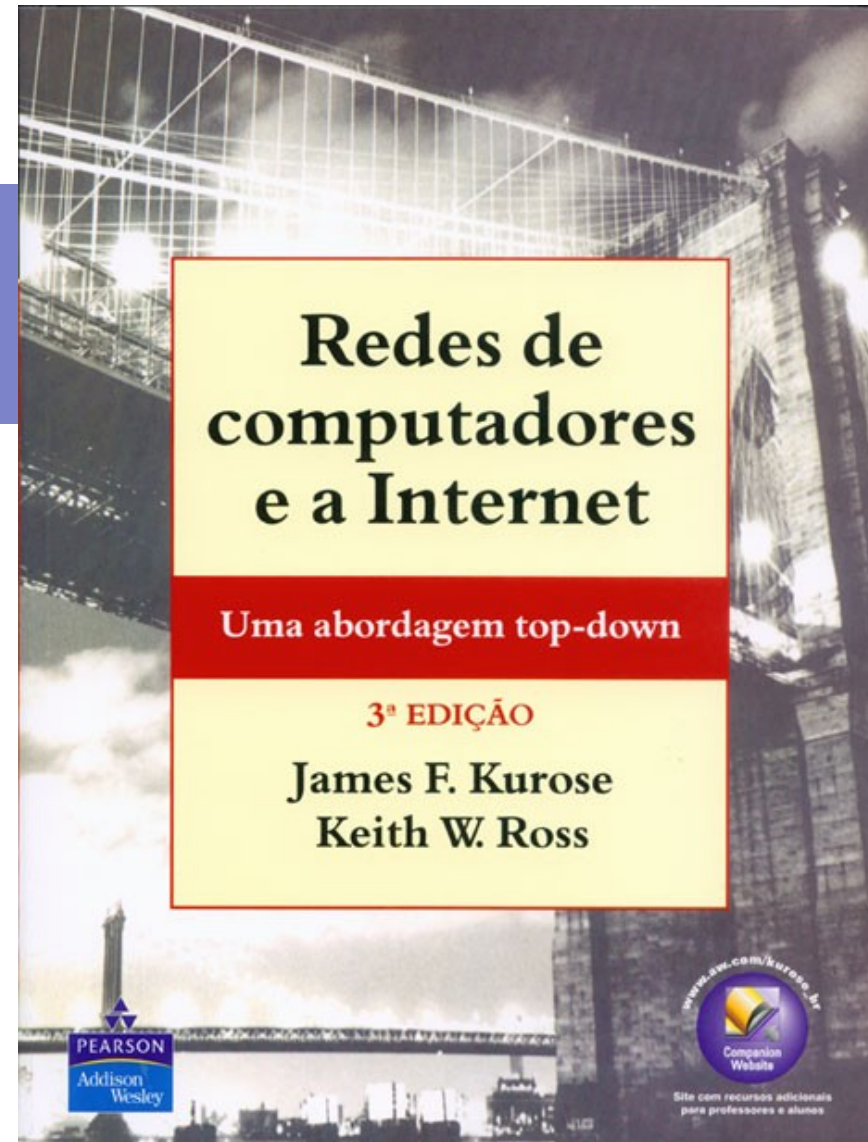


Redes de computadores e a Internet

Capítulo 5

A camada
de enlace e
redes locais



5 A camada de enlace

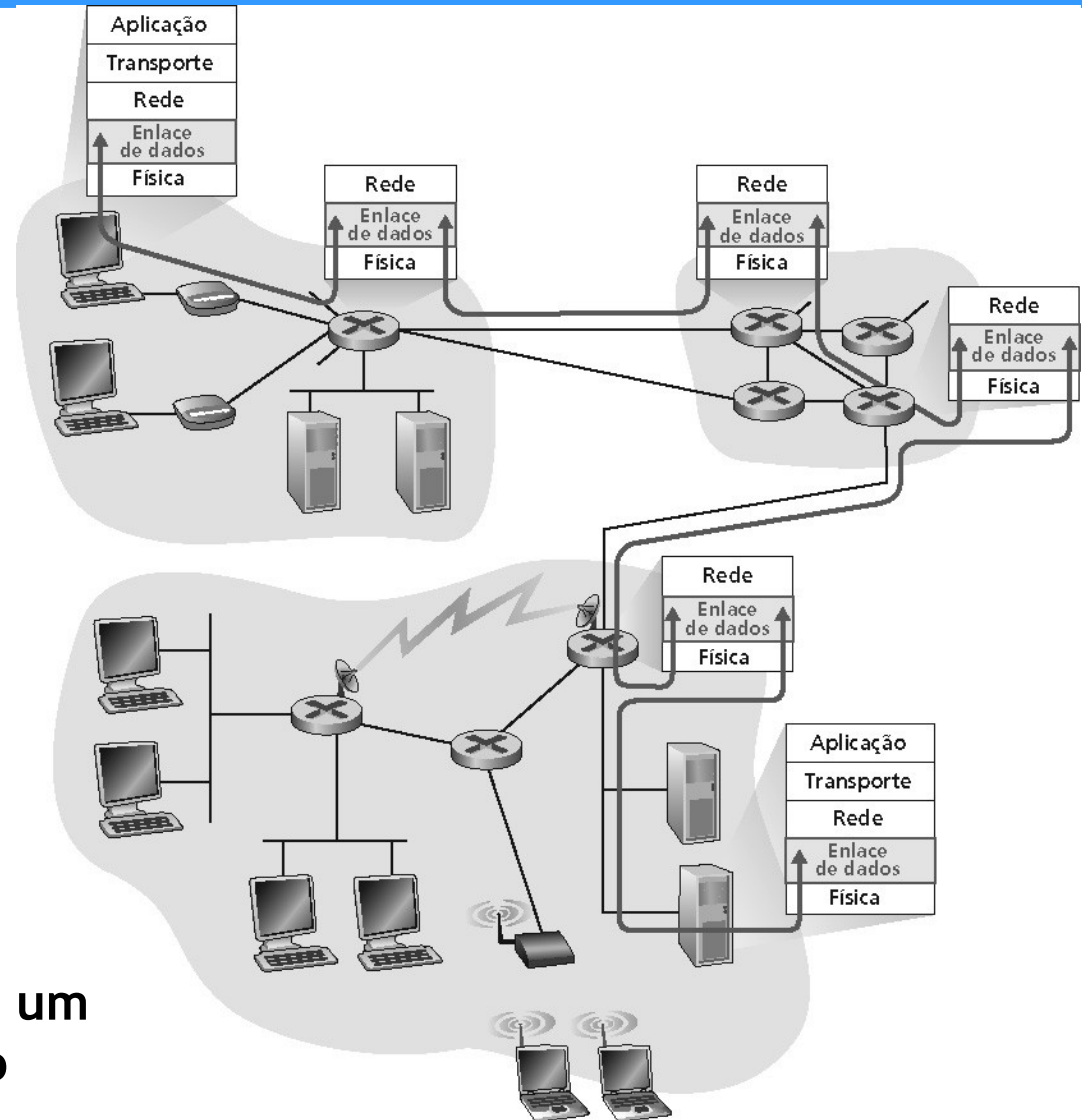
- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de múltiplo acesso
- 5.4 Endereçamento da camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Hubs e switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização de enlace: ATM e MPLS

5 Camada de enlace: introdução

Algumas terminologias:

- Hospedeiros e roteadores são **nós**
- Canais de comunicação que conectam nós adjacentes ao longo do caminho de comunicação são **enlaces**
 - Enlaces com fio
 - Enlaces sem fio
 - LANs
- Pacote de camada-2 é um quadro, encapsula o datagrama

A **camada de enlace** tem a responsabilidade de transferir um datagrama de um nó para o nó adjacente sobre um enlace.



5 A camada de enlace: contexto

- Datagrama transferido por protocolos de enlace diferentes sobre enlaces diferentes:
 - ex.: Ethernet no primeiro enlace, quadro relay nos enlaces intermediários, 802.11 no último enlace.
- Cada protocolo de enlace provê serviços diferentes
 - ex.: pode ou não prover transferência confiável sobre o enlace

Analogia do transporte

- Viagem de Princeton até Lausanne
 - Carro: Princeton até JFK
 - Avião: JFK até Geneva
 - Trem: Geneva até Lausanne
- Turista = datagrama
- Segmento de transporte = enlace de comunicação
- Modo de transporte = protocolo da camada de enlace
- Agente de viagem = algoritmo de roteamento

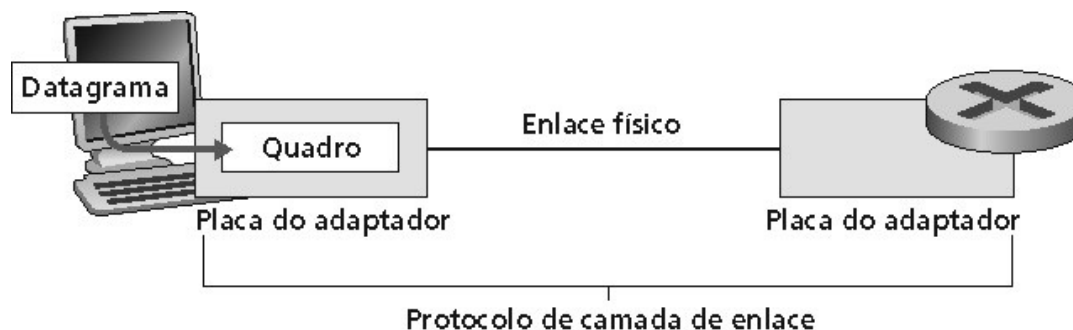
5 Serviços da camada de enlace

- **Enquadramento, acesso ao enlace:**
 - Encapsula datagramas em quadros acrescentando cabeçalhos e trailer
 - Implementa acesso ao canal se o meio é compartilhado
 - “Endereços físicos” usados nos cabeçalhos dos quadros para identificar a fonte e o destino dos quadros
 - Diferente do endereço IP!
- **Entrega confiável entre dois equipamentos fisicamente conectados:**
 - Já aprendemos como isso deve ser feito (Capítulo 3)!
 - Raramente usado em enlaces com baixa taxa de erro (fibra, alguns tipos de par de fios trançados de cobre)
 - Enlaces sem fio (wireless): altas taxas de erro
 - **P.:** por que prover confiabilidade fim-a-fim e na camada de enlace?

5 Serviços da camada de enlace

- **Controle de fluxo:**
 - Limitação da transmissão entre transmissor e receptor
- **Deteção de erros:**
 - Erros causados pela atenuação do sinal e por ruídos
 - O receptor detecta a presença de erros:
 - Avisa o transmissor para reenviar o quadro perdido
- **Correção de erros:**
 - O receptor identifica **e corrige** o bit com erro(s) sem recorrer à retransmissão
- **Half-duplex e full-duplex**
 - Com *half-duplex*, os nós em ambas as extremidades do enlace podem transmitir, mas não ao mesmo tempo

5 Comunicação de adaptadores



- Camada de rede implementada no “adaptador” (isto é, NIC)
 - Cartão Ethernet, cartão PCMCIA, cartão 802.11
- Lado transmissor:
 - Encapsula o datagrama em um quadro
 - Adiciona bits de verificação de erro, rdt, controle de fluxo etc.
- Lado receptor
 - Procura erros, rdt, controle de fluxo etc.
 - Extrai o datagrama, passa para o lado receptor
- Adaptador é semi-autônomo
- Camadas de enlace e física

5 A camada de enlace

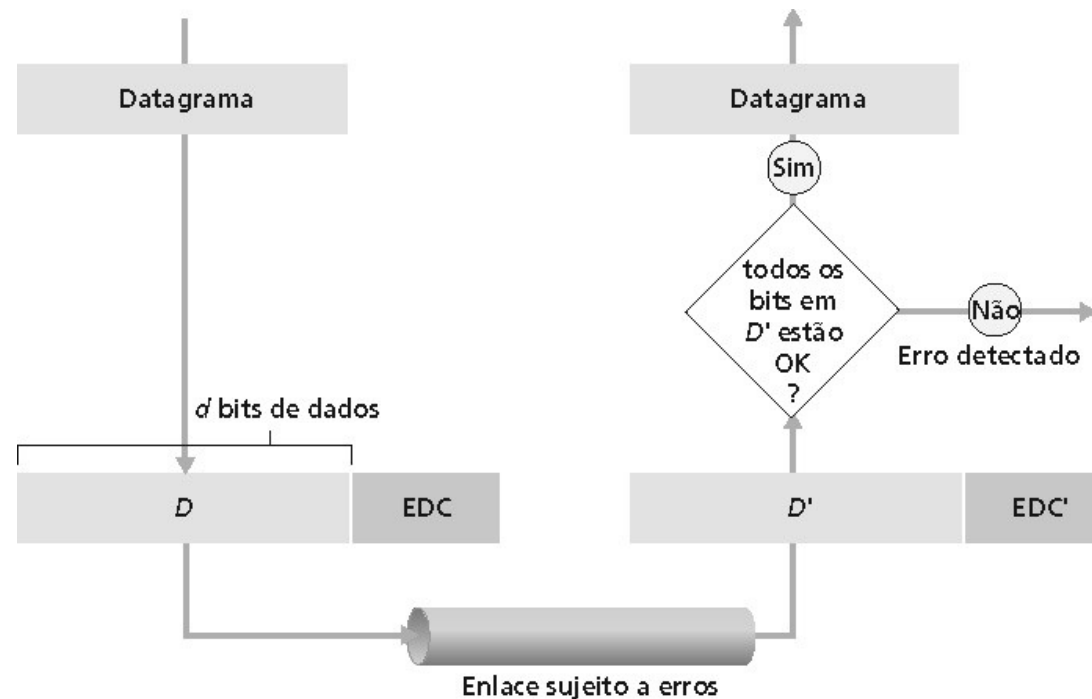
- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de múltiplo acesso
- 5.4 Endereçamento da camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Hubs e switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização de enlace: ATM e MPLS

5 Detecção de erros

EDC= Bits de detecção e correção de erros (redundância)

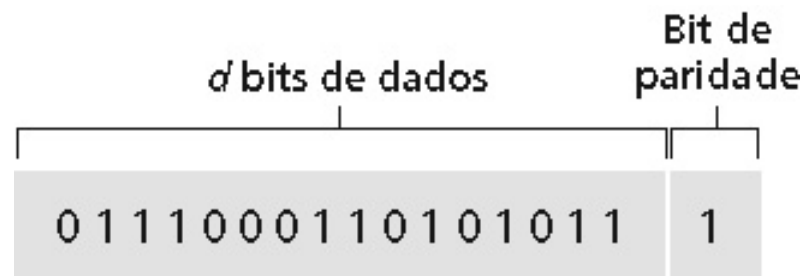
D = Dados protegidos pela verificação de erros; podem incluir os campos de cabeçalho

- A detecção de erros não é 100% confiável!
 - Protocolos podem deixar passar alguns erros, mas é raro
 - Quanto maior o campo EDC, melhor é a capacidade de detecção e correção de erros



5 Verificação de paridade

Paridade com bit único:
Detecta erro de um único bit



Nenhum erro

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

Erro de bit
único corrigível

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

Erro de
paridade

Erro de
paridade

5 Checksum da Internet

Objetivo: detectar “erros” (ex.: bits trocados) num segmento transmitido
(nota: usado *apenas* na camada de transporte)

Transmissor:

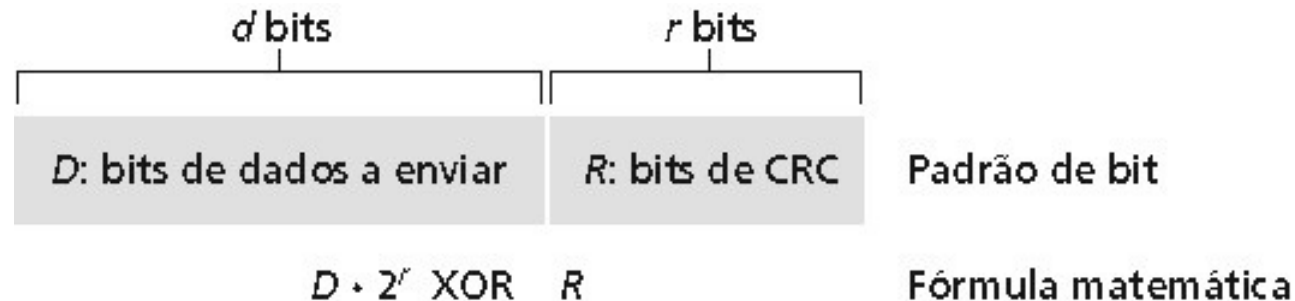
- Trata o conteúdo de segmentos como seqüências de números inteiros de 16 bits
- Checksum: adição (soma em complemento de um) do conteúdo do segmento
- Transmissor coloca o valor do checksum no campo checksum do UDP

Receptor:

- Computa o checksum do segmento recebido
- Verifica se o checksum calculado é igual ao valor do campo checksum:
 - NÃO — erro detectado
 - SIM — não detectou erro. **Mas talvez haja erros apesar disso? Depois....**

5 Verificação de redundância cíclica

- Encara os bits de dados, **D**, como um número binário
- Escolhe um padrão gerador de $r + 1$ bit, **G**
- Objetivo: escolhe r CRC bits, **R**, tal que
 - $\langle D, R \rangle$ é divisível de forma exata por G (módulo 2)
 - Receptor conhece G , divide $\langle D, R \rangle$ por G . Se o resto é diferente de zero, erro detectado!
 - Pode detectar todos os erros em sequência (burst errors) com comprimento menor que $r + 1$ bit
- Largamente usado na prática (ATM, HDCL)



5 Exemplo de CRC

desejado:

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

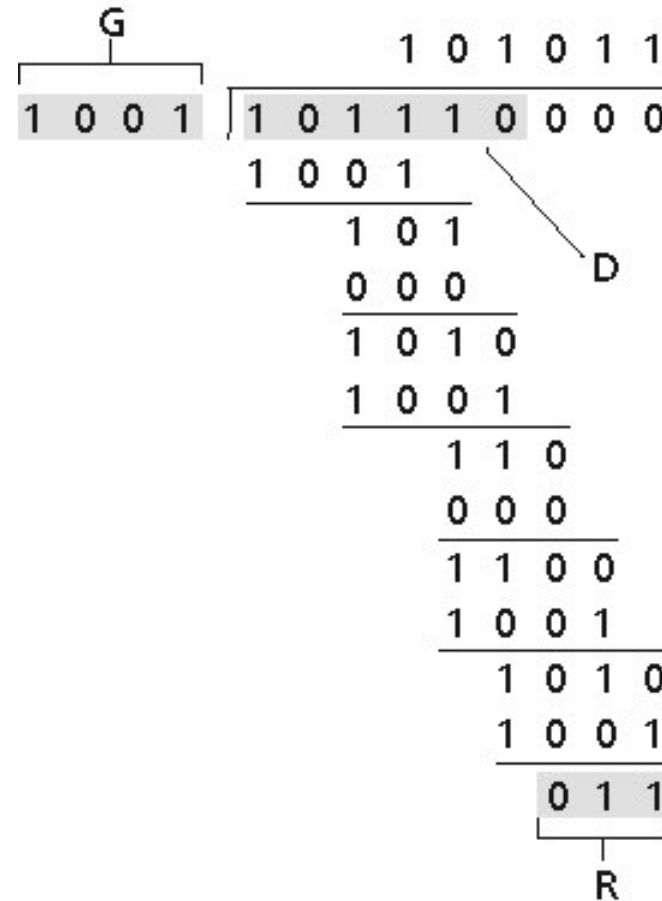
equivalente a:

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

equivalente a:

se nós dividimos $D \cdot 2^r$ por G ,
buscamos resto R

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



5 A camada de enlace

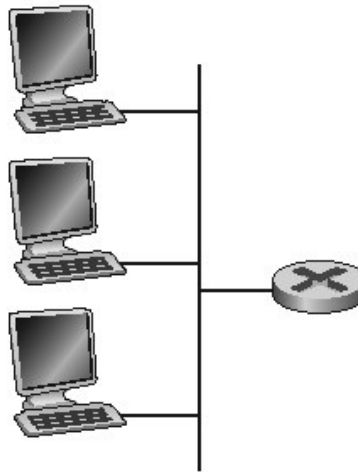
- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de múltiplo acesso
- 5.4 Endereçamento da camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Hubs e switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização de enlace: ATM e MPLS

5 Enlaces de acceso múltiplo e protocolos

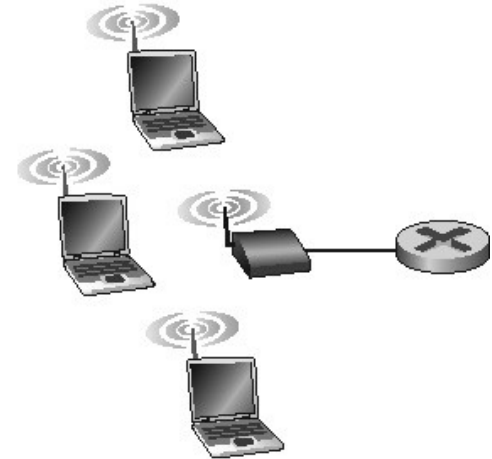
Dois tipos de enlaces:

- Ponto-a-ponto (fio único, ex.: PPP, SLIP)
- **Broadcast** (fio ou meio compartilhado);
 - Ethernet tradicional
 - Upstream HFC
 - 802.11 LAN sem fio

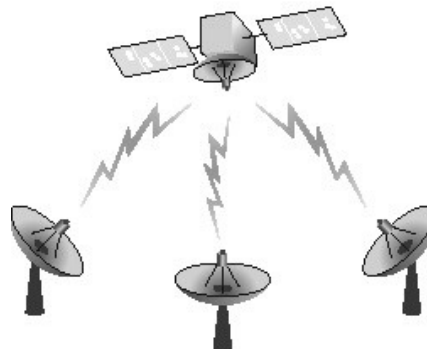
Compartilhado com fio
(por exemplo, Ethernet)



Compartilhado sem fio
(por exemplo, Wi-Fi)



Satélite



Coquetel



5 Protocolos de acesso múltiplo

- Canal de comunicação único e compartilhado
- Duas ou mais transmissões simultâneas pelos nós: interferência
 - **Colisão** se um nó receber dois ou mais sinais ao mesmo tempo
- **Protocolo de múltiplo acesso:**
 - Algoritmo distribuído que determina como as estações compartilham o canal, isto é, determinam quando cada estação pode transmitir
 - Comunicação sobre o compartilhamento do canal deve utilizar o próprio canal!
 - Nenhum canal fora-de-banda para coordenação

5 Protocolo ideal de múltiplo acesso

Canal de broadcast de taxa R bps

1. Quando um nó quer transmitir, ele pode enviar a uma taxa R .
2. Quando M nós querem transmitir, cada um envia a uma taxa média R/M
3. Totalmente descentralizada:
 - Nenhum nó especial para coordenar transmissões
 - Nenhuma sincronização de relógios e compartimentos
4. Simples

5 Protocolos MAC: uma taxonomia

Três grandes classes:

- **Particionamento de canal**
 - Divide o canal em pedaços menores (compartimentos de tempo, frequência)
 - Aloca um pedaço para uso exclusivo de cada nó
- **Acesso aleatório**
 - Canal não dividido, permite colisões
 - “Recuperação” das colisões
- **Passagem de permissão**
 - Nós transmitem em seus turnos, mas com mais volume para enviar podem usar turnos mais longos

5

Protocolos MAC com particionamento de canal: TDMA

TDMA: acesso múltiplo por divisão temporal

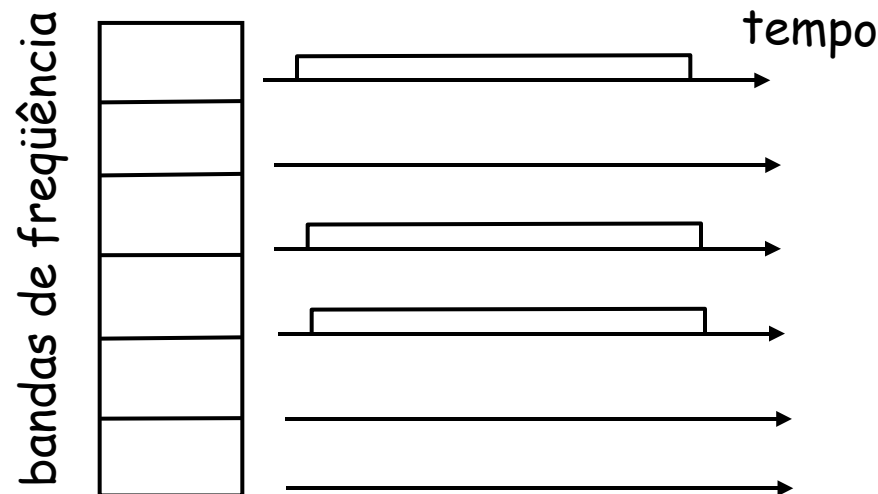
- Acesso ao canal é feito por “turnos”
- Cada estação controla um compartimento (“slot”) de tamanho fixo (tamanho = tempo de transmissão de pacote) em cada turno
- Compartimentos não usados são desperdiçados
- Exemplo: rede local com 6 estações: 1, 3, 4 têm pacotes, compartimentos 2, 5, 6 ficam vazios

5

Protocolos MAC com particionamento de canal: FDMA

FDMA: acesso múltiplo por divisão de frequência

- O espectro do canal é dividido em bandas de frequência
- Cada estação recebe uma banda de frequência
- Tempo de transmissão não usado nas bandas de frequência é desperdiçado
- Exemplo: rede local com 6 estações: 1, 3, 4 têm pacotes, as bandas de frequência 2, 5, 6 ficam vazias



5 Protocolos de acesso aleatório

- Quando o nó tem um pacote a enviar:
 - Transmite com toda a taxa do canal R.
 - Não há uma regra de coordenação *a priori* entre os nós
- Dois ou mais nós transmitindo -> “colisão”,
- **Protocolo MAC de acesso aleatório** especifica:
 - Como detectar colisões
 - Como as estações se recuperam das colisões (ex., via retransmissões atrasadas)
- Exemplos de protocolos MAC de acesso aleatório:
 - slotted ALOHA
 - ALOHA
 - CSMA e CSMA/CD



5 Slotted ALOHA

Suposições

- Todos os quadros de mesmo tamanho
- Tempo dividido em slots de mesmo tamanho, tempo para transmitir 1 quadro
- Nós começam a transmitir quadros apenas no início dos slots
- Nós são sincronizados
- Se 2 ou mais nós transmitem no slot, todos os nós detectam a colisão

Operação

- Quando um nó obtém um novo quadro, ele transmite no próximo slot
- Sem colisão, o nó pode enviar o novo quadro no próximo slot
- Se há colisão, o nó retransmite o quadro em cada slot subsequente com probabilidade p até o sucesso

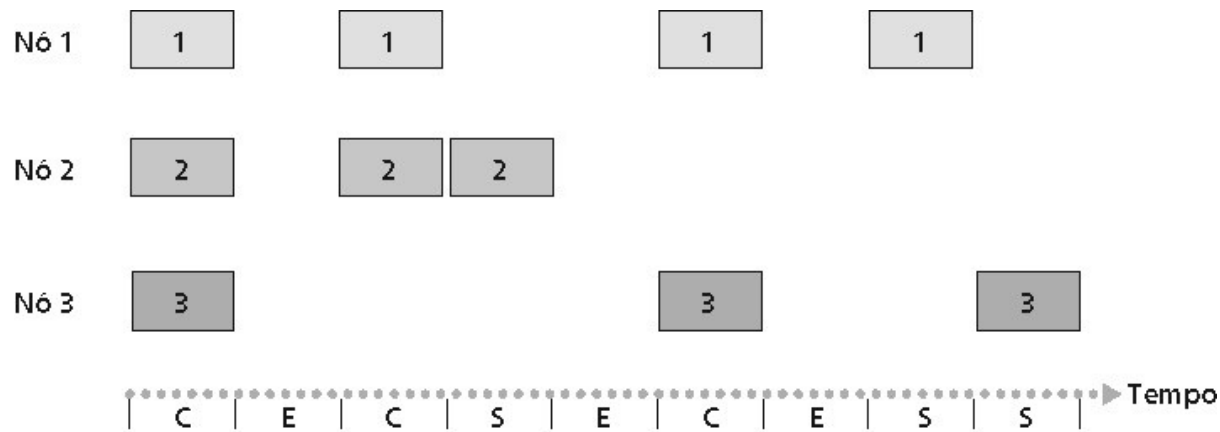
5 Slotted ALOHA

Prós

- Um único nó ativo pode transmitir continuamente com a taxa completa de canal
- Altamente descentralizada: somente slots em nós precisam ser sincronizados
- Simples

Contras

- Colisões, desperdício de slots
- Slots ociosos
- Os nós podem detectar colisão em menos tempo do que o tempo para transmitir o pacote
- Sincronização de clock



Legenda

C = Intervalo de colisão

E = Intervalo vazio

S = Intervalo bem-sucedido

5 Eficiência do slotted Aloha

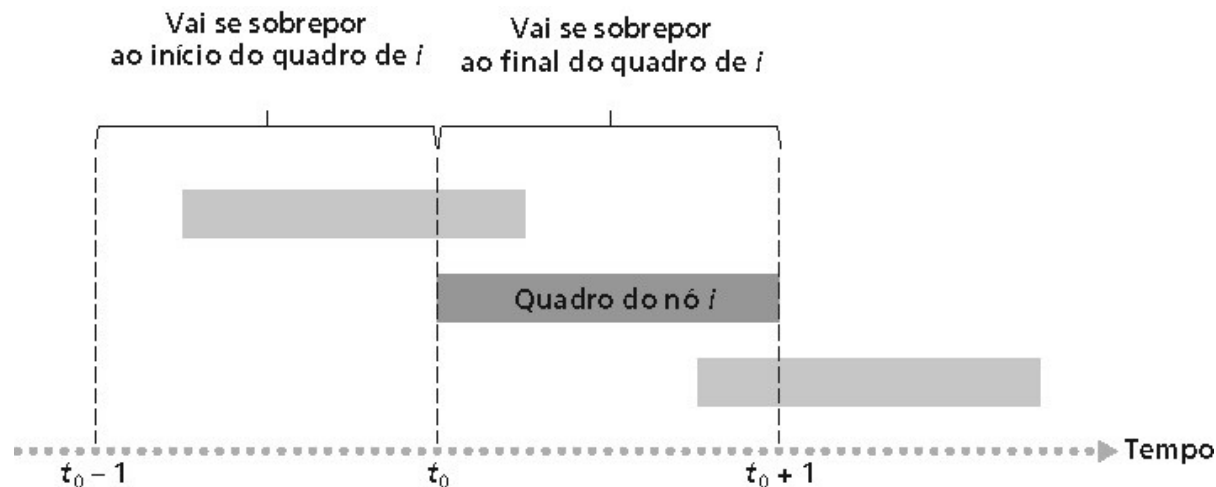
Eficiência é a fração de slots bem-sucedidos quando há muitos nós, cada um com muitos quadros para enviar

- Suponha N nós com muitos quadros para enviar, cada um transmite no slot com probabilidade p
- Prob. de o nó 1 obter sucesso num slot = $p(1-p)^{N-1}$
- Prob. de qualquer nó obter um sucesso = $Np(1-p)^{N-1}$
- Para máxima eficiência com N nós, encontre p^* que maximiza $Np(1-p)^{N-1}$
- Para muitos nós, o limite de $Np^*(1-p^*)^{N-1}$, com N indo ao infinito, resulta $1/e = 0,37$

No máximo: uso do canal para envio de dados úteis: 37% do tempo!

5 Aloha puro (unslotted)

- Unslotted Aloha: operação mais simples, não há sincronização
- Pacote necessita transmissão:
 - Enviar sem esperar pelo início de um compartimento
- A probabilidade de colisão aumenta:
Pacote enviado em t_0 colide com outros pacotes enviados em $[t_0-1, t_0+1]$



5 Eficiência do Aloha puro

$P(\text{sucesso de um dado nó}) = P(\text{nó transmitir}) \cdot$

$P(\text{nenhum outro nó transmitir em } [p_0-1, p_0]) \cdot$

$P(\text{nenhum outro nó transmitir em } [p_0-1, p_0])$

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

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

... escolhendo p ótimo e então deixando $n \rightarrow$ infinito ...

$$= 1/(2e) = 0,18$$

Ainda pior !

5 CSMA: Carrier Sense Multiple Access

CSMA: escuta antes de transmitir:

- Se o canal parece vazio: transmite o pacote
- Se o canal está ocupado, adia a transmissão
- Analogia humana: não interrompa os outros!

5 Colisões no CSMA

Colisões podem ocorrer:

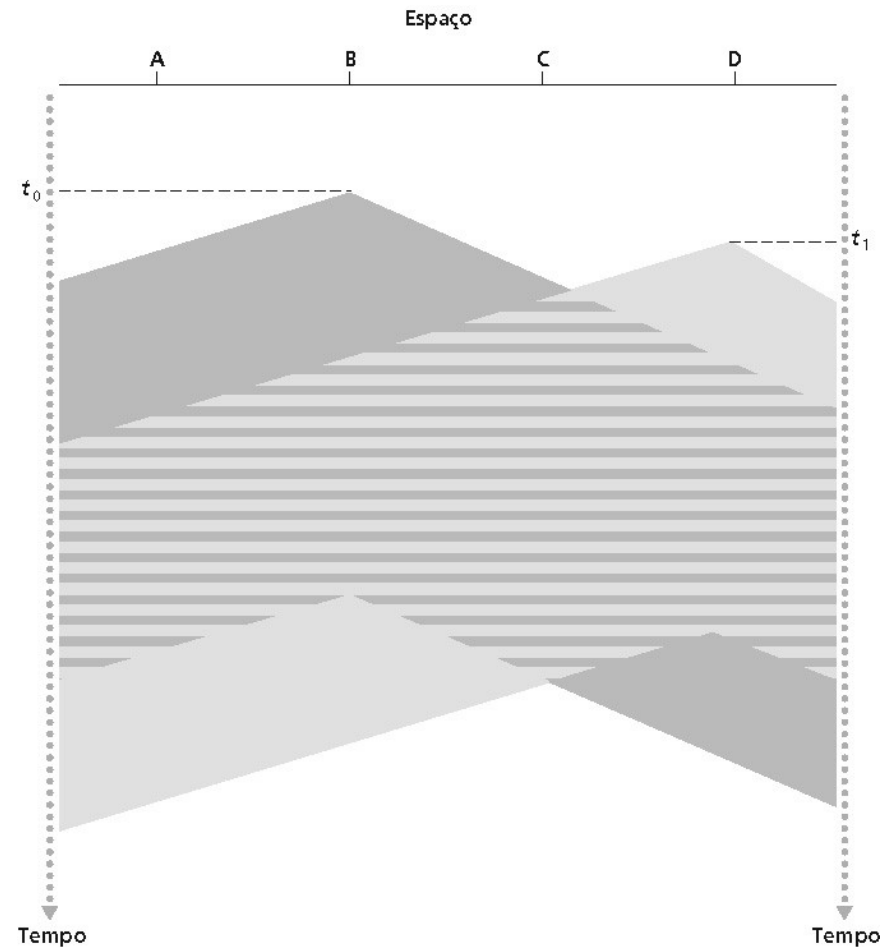
o atraso de propagação implica que dois nós podem não ouvir as transmissões do outro

Colisão:

todo o tempo de transmissão do pacote é desperdiçado

Note:

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



arranjo espacial dos nós na rede

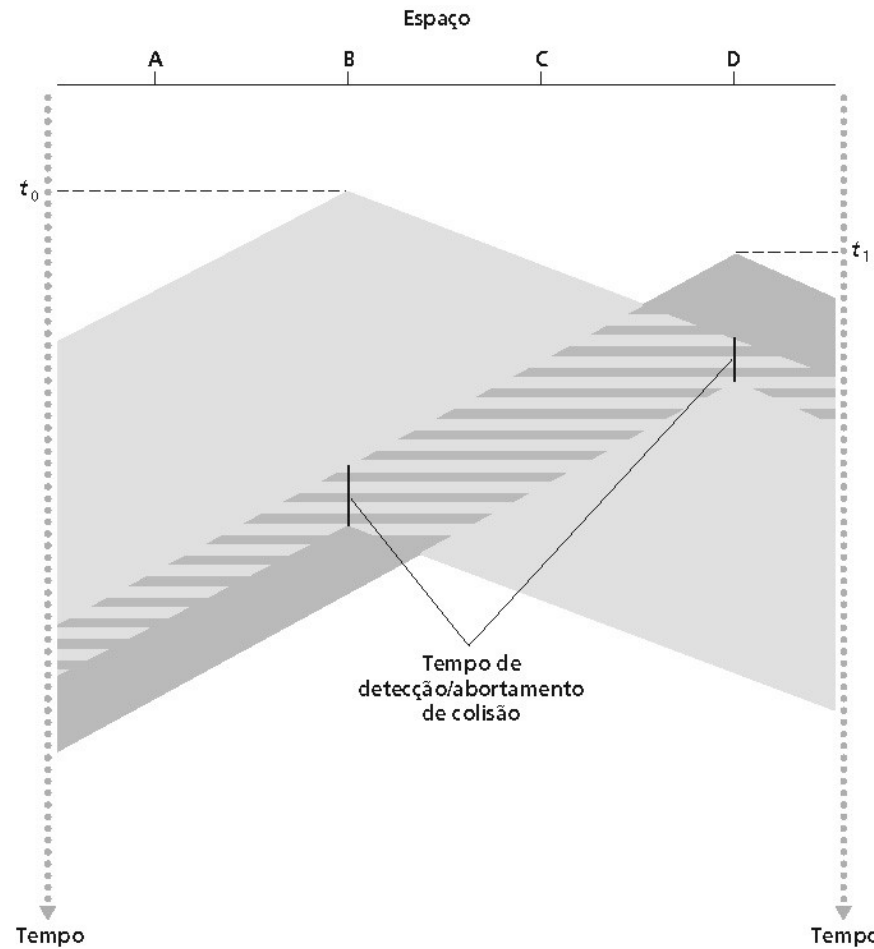


5 CSMA/CD (detecção de colisão)

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

- Colisões **detectadas** 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
- Analogia humana: o “bom de papo” educado

5 CSMA/CD detecção de colisão



5 Protocolos MAC com passagem de permissão

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!

5 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)

Token passing:

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

5 Sumário dos protocolos MAC

- Como se faz com um canal compartilhado?
 - Particionamento de canal, no tempo, por frequência ou por código
 - Divisão temporal, divisão por código, divisão por frequência
 - 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

5 Tecnologias de LAN

Camada de enlace até agora:

- Serviços, detecção de erros/correção, acesso múltiplo

A seguir: tecnologias de redes locais (LAN)

- Endereçamento
- Ethernet
- hubs, pontes, switches
- PPP

5 A camada de enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de múltiplo acesso
- 5.4 Endereçamento da camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Hubs e switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização de enlace: ATM e MPLS

5 Endereços de LAN e ARP

Endereços IP de 32-bit:

- Endereços da *camada de rede*
- Usados para levar o datagrama até a rede de destino (lembre-se da definição de rede IP)

Endereço de LAN (ou MAC ou físico):

- Usado para levar o datagrama de uma interface física a outra fisicamente conectada com a primeira (isto é, na mesma rede)
- Endereços MAC com 48 bits (na maioria das LANs) gravados na memória fixa (ROM) do adaptador de rede

5 Endereços de LAN (mais)

- A alocação de endereços 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 portátil
 - Depende da rede na qual se está ligado

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

- Cada nó IP (hospedeiro, 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>

< **IP address; MAC address; TTL**>

- TTL (Time To Live): tempo depois do qual o mapeamento de endereços será esquecido (tipicamente 20 min)

5 Protocolo ARP: Mesma LAN (network)

- 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 ARB, 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 para MAC em sua tabela ARP até que a informação se torne antiga (expirada) 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

5 Roteamento para outra LAN

Objetivo: **envia datagrama de A para B via R**
supõe que A conhece o endereço IP de B

- Duas tabelas ARP no roteador R, um para cada rede 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, o quadro Ethernet contém o datagrama IP de A para B
- A camada de enlace de A envia o quadro Ethernet
- 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 um datagrama de A para B e envia para B



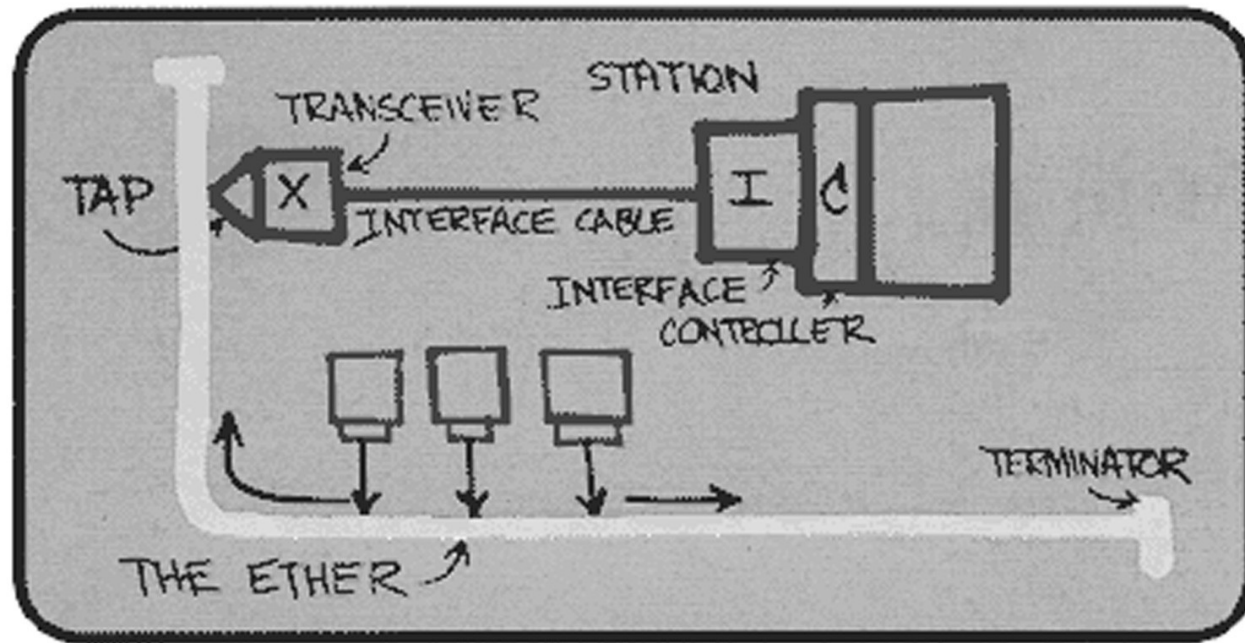
5 A camada de enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de múltiplo acesso
- 5.4 Endereçamento da camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Hubs e switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização de enlace: ATM e MPLS

5 Ethernet

Tecnologia de rede local “dominante” :

- Barato R\$20 por 100 Mbps!
- Primeira tecnologia de LAN largamente usada
- Mais simples e mais barata que LANs com token e ATM
- Velocidade crescente: 10 Mbps - 10 Gbps



esboço da Ethernet
por Bob Metcalf

5 Topologia em estrela

- Topologia de bus popular em meados dos anos 90
- Agora a topologia em estrela prevalece
- Opções de conexão: hub ou switch (mais adiante)



5 Estrutura do quadro 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

5 Estrutura do quadro Ethernet

- **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
- **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



5 Serviço não confiável, sem conexão

- **Sem conexão:** não ocorre conexão entre o adaptador transmissor e o receptor
- **Não confiável:** adaptador receptor não envia ACKs ou NACKs para o adaptador transmissor
 - O fluxo de datagramas que passa para a camada de rede pode deixar lacunas
 - Lacunas serão preenchidas se a aplicação estiver usando TCP
 - Caso contrário, a aplicação verá as lacunas

5 Ethernet usa CSMA/CD

- Sem slots
- Adaptador não transmite se ele detectar algum outro adaptador transmitindo, isto é, **carrier sense**
- O adaptador transmissor aborta quando detecta outro adaptador transmitindo, isto é, **collision detection**
- Antes de tentar uma retransmissão, o adaptador espera um período aleatório, isto é, **random access**



5 Algoritmo CSMA/CD da Ethernet

1. O adaptador recebe um datagrama da camada de rede e cria um quadro.
2. Se o adaptador detecta um canal livre, ele começa a transmitir o quadro. Se ele detecta o canal ocupado, espera até ele ficar livre e então transmite.
3. Se o adaptador transmite o quadro todo sem detectar outra transmissão, sua missão com esse quadro está cumprida!
4. Se o adaptador detecta outra transmissão enquanto transmite, ele aborta e envia um *jam signal*.
5. Após abortar, o adaptador entra em **exponential backoff**: após a m-ésima colisão, o adaptador escolhe um K aleatório de $\{0, 1, 2, \dots, 2^m - 1\}$. O adaptador espera $K \cdot 512$ tempos de bit e retorna ao passo 2.

5 Ethernet CSMA/CD

Jam signal: garante que todos os outros transmissores estão cientes da colisão;
48 bits;

Bit time: 0,1 microsseg para Ethernet de 10 Mbps;
para $K = 1023$, o tempo de espera é cerca de 50 mseg

Veja o applet Java no Web site da AWL: altamente recomendado!

Exponential backoff:

- **Objetivo:** adaptar tentativas de retransmissão para carga atual da rede
 - Carga pesada: espera aleatória será mais longa
- Primeira colisão: escolha K entre $\{0,1\}$; espera é $K \times 512$ tempos de transmissão de bit
- Após a segunda colisão: escolha K entre $\{0, 1, 2, 3\}$...
- Após 10 ou mais colisões, escolha K entre $\{0, 1, 2, 3, 4, \dots, 1023\}$

5 Eficiência do CSMA/CD

- T_{prop} = propagação máxima entre 2 nós na LAN
- t_{trans} = tempo para transmitir um quadro de tamanho máximo

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

- Eficiência tende a 1 quando t_{prop} tende a 0
- Tende a 1 quando t_{trans} tende ao infinito
- Muito melhor do que o ALOHA, e ainda é descentralizado, simples e barato

5 10BaseT e 100BaseT

- Taxa de 10/100 Mbps; chamado mais tarde de “fast ethernet”
- **T** significa “Twisted Pair” (par de fios trançados de cobre)
- Nós se conectam a um hub: “topologia em estrela”; 100 m é a distância máxima entre os nós e o hub



5 Hubs

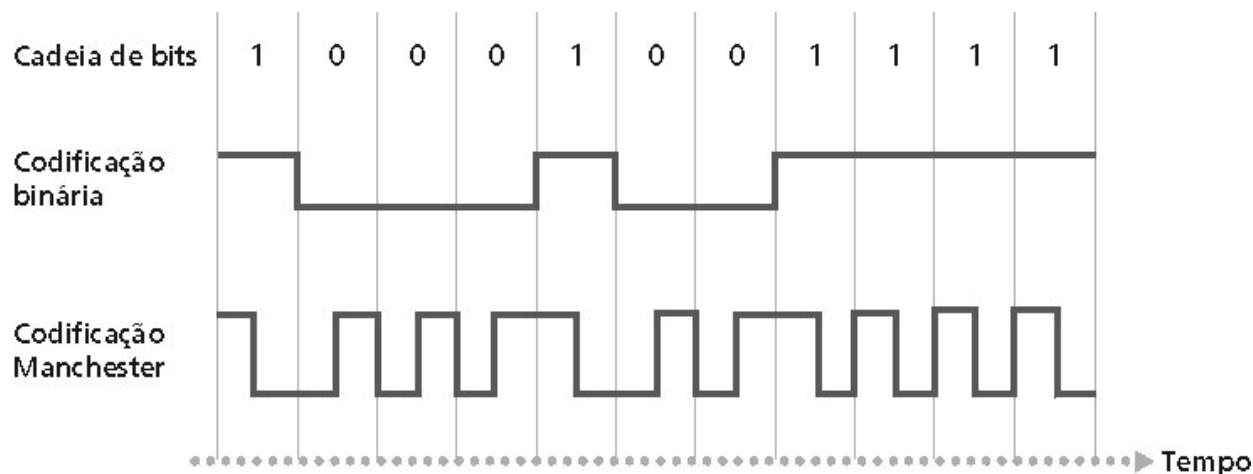
Hubs são essencialmente repetidores de camada física:

- Bits que chegam de um enlace se propagam para todos os outros enlaces
- Com a mesma taxa
- Não possuem **armazenagem de quadros**
- Não há CSMA/CD no hub: adaptadores detectam colisões
- Provê funcionalidade de gerenciamento de rede

5

Codificação Manchester

Codificação Manchester



- Usada em 10BaseT
- Cada bit possui uma transição
- Permite que os relógios nos nós de transmissão e de recepção possam sincronizar um com o outro
 - Não é necessário relógio global centralizado entre os nós!
- Ei, isso é coisa de camada física!



5 Gigabit Ethernet

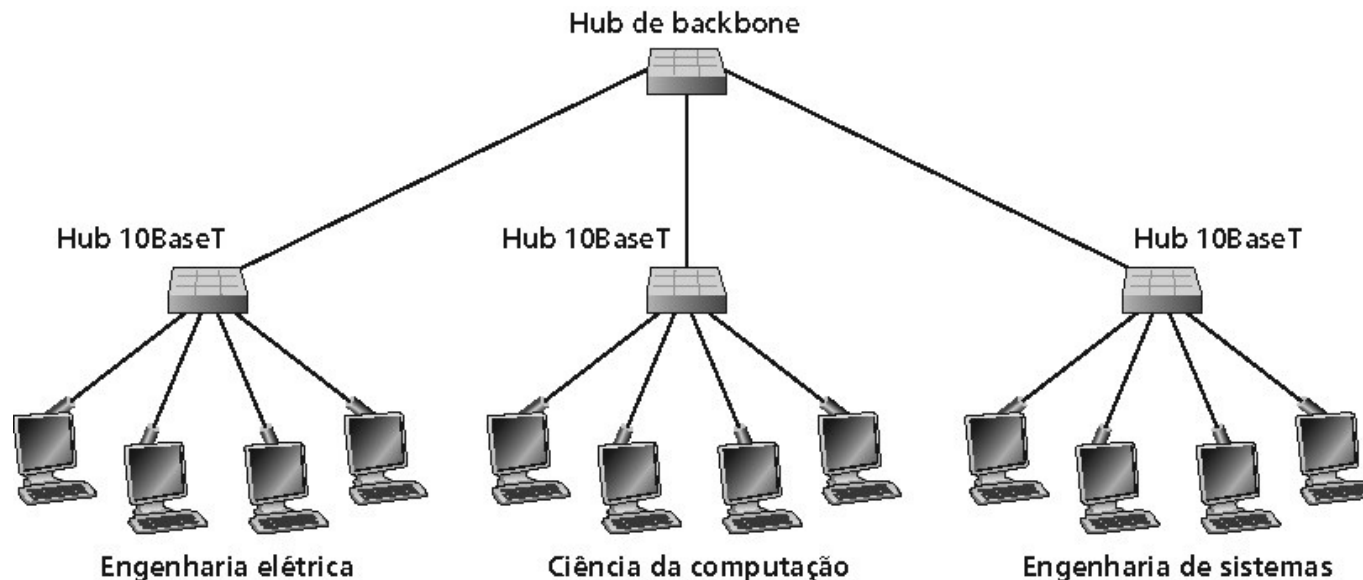
- Usa o formato do quadro do Ethernet padrão
- Permite enlaces ponto-a-ponto e canais de múltiplo acesso compartilhados
- No modo compartilhado, o CSMA/CD é usado; exige pequenas distâncias entre os nós para ser eficiente
- Usa hubs, chamados aqui de Distribuidores com Armazenagem “Buffered Distributors”
- Full-duplex a 1 Gbps para enlaces ponto-a-ponto
- 10 Gbps agora!

5 A camada de enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de múltiplo acesso
- 5.4 Endereçamento da camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Hubs e switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização de enlace: ATM e MPLS

5 Interconexão com hubs

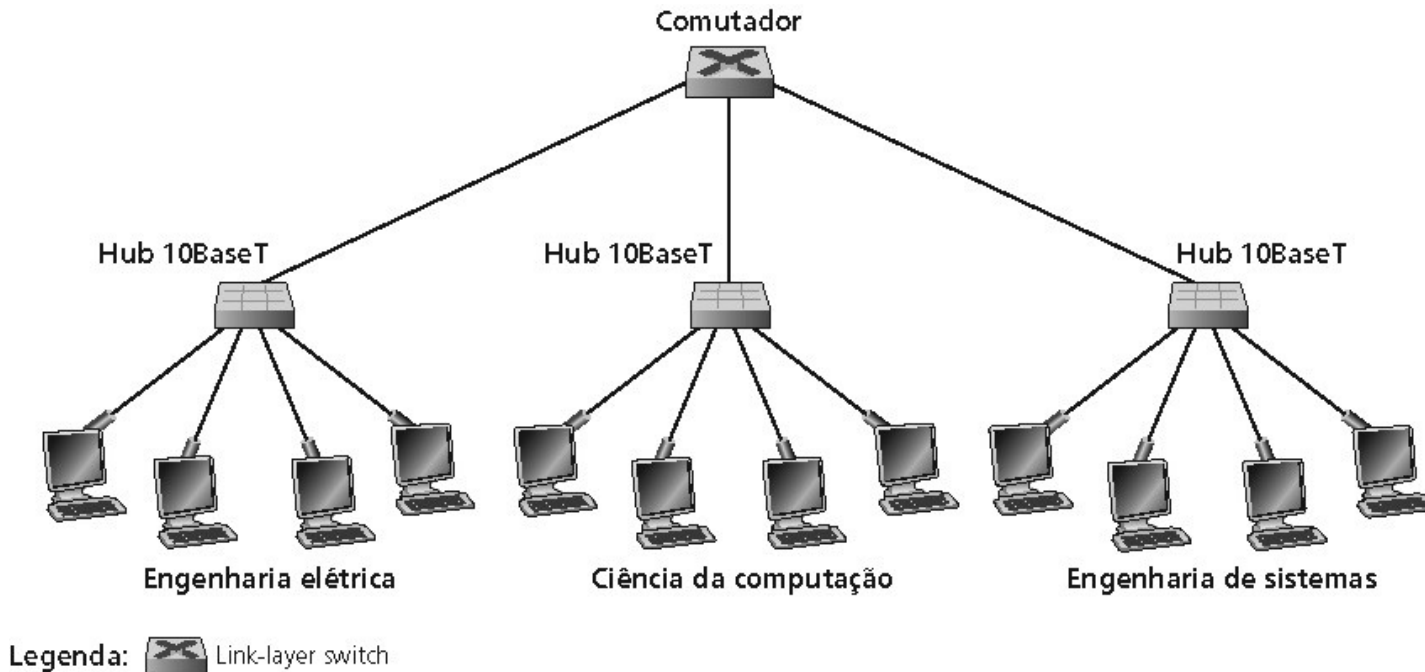
- Hub de backbone interconecta segmentos de LAN
- Estende a distância máxima entre os nós
- No entanto, domínios de colisão individuais tornam-se um único e grande domínio de colisão
- Não pode interconectar 10BaseT e 100BaseT



5 Switch

- Dispositivo de camada de enlace
 - 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
 - Hospedeiros são inconscientes da presença dos switches
- Plug-and-play, self-learning (auto-aprendizado)
 - Switches não precisam ser configurados

5 Encaminhamento



- Como determinar para qual segmento da LAN encaminhar o quadro?
- Parece um problema de roteamento...

5 Self learning (auto-aprendizado)

- Um switch possui uma **tabela de switch**
- Entrada na tabela do switch:
 - (endereço MAC, interface, marca de tempo)
 - Entradas expiradas na tabela são descartadas (TTL pode ser 60 min)
- Switch **aprende** quais hospedeiros podem ser alcançados através de suas interfaces
 - Quando recebe um quadro, o switch “aprende” a localização do transmissor: segmento da LAN que chega
 - Registra o par transmissor/localização na tabela

5 Filtragem/encaminhamento

Quando um switch recebe um quadro:

indexa a tabela do switch usando end. MAC de destino

if entrada for encontrada para o destino

then{

if dest. no segmento deste quadro chegou

then descarta o quadro

else encaminha o quadro na interface indicada

}

else flood

Encaminha para todas as interfaces,
exceto para aquela em que o quadro chegou

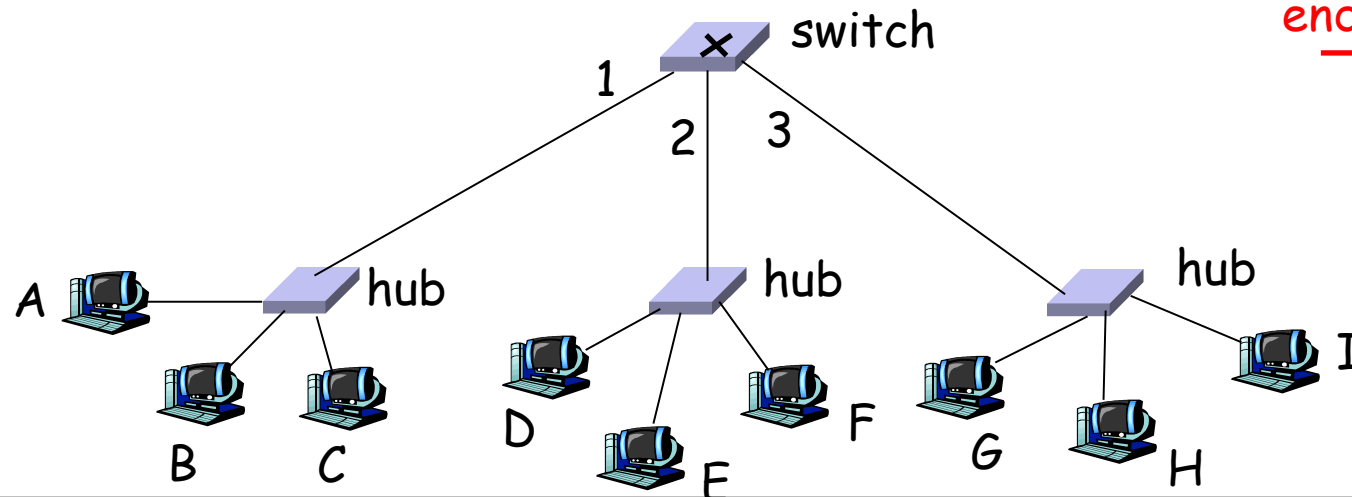


PEARSON

Addison
Wesley

5 Switch: exemplo

Suponha que C envia um quadro para D

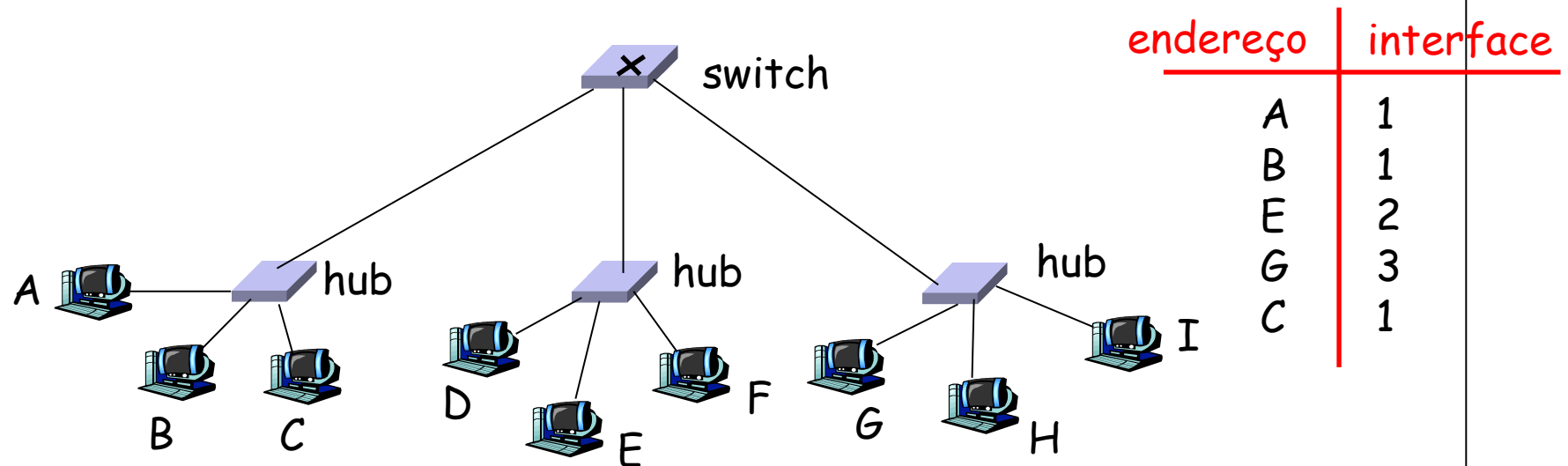


endereço	interface
A	1
B	1
E	2
G	3

- 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

5 Switch: exemplo

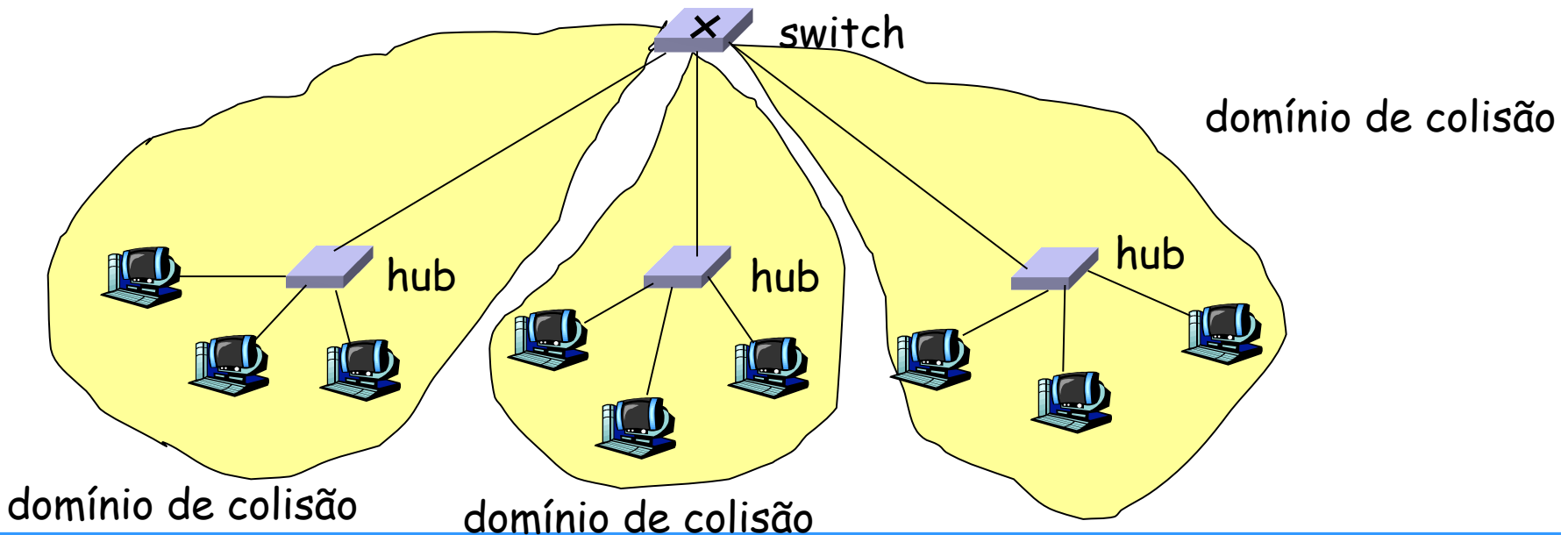
Suponha que D responde com um quadro para C.



- Switch recebe 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

5 Switch: isolação de tráfego

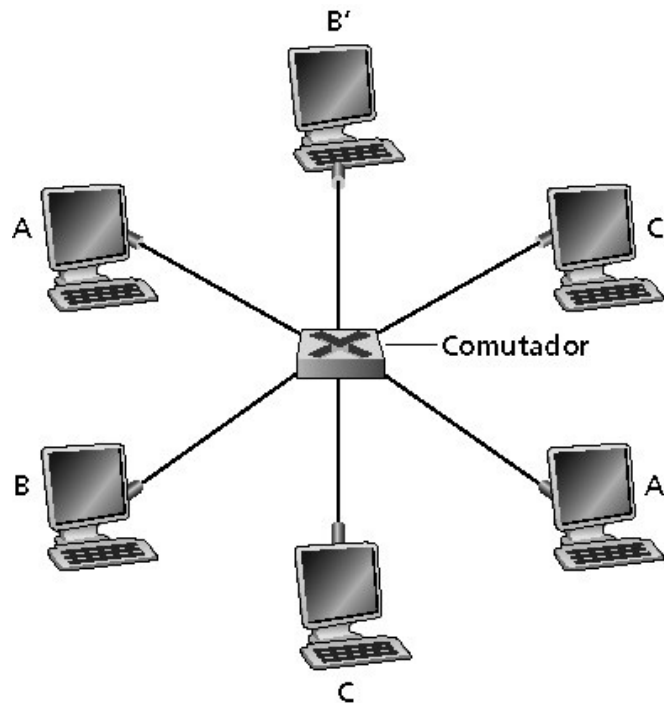
- A instalação do switch quebra as sub-redes em segmentos de LAN
- Switch **filtra** pacotes:
 - Alguns quadros do mesmo segmento de LAN não são usualmente encaminhados para outros segmento de LAN
 - Segmentos se tornam separados em **domínios de colisão**



5 Switches: acesso dedicado

- Switch com muitas interfaces
- Hospedeiros possuem conexão direta ao switch
- Sem colisões; full-duplex

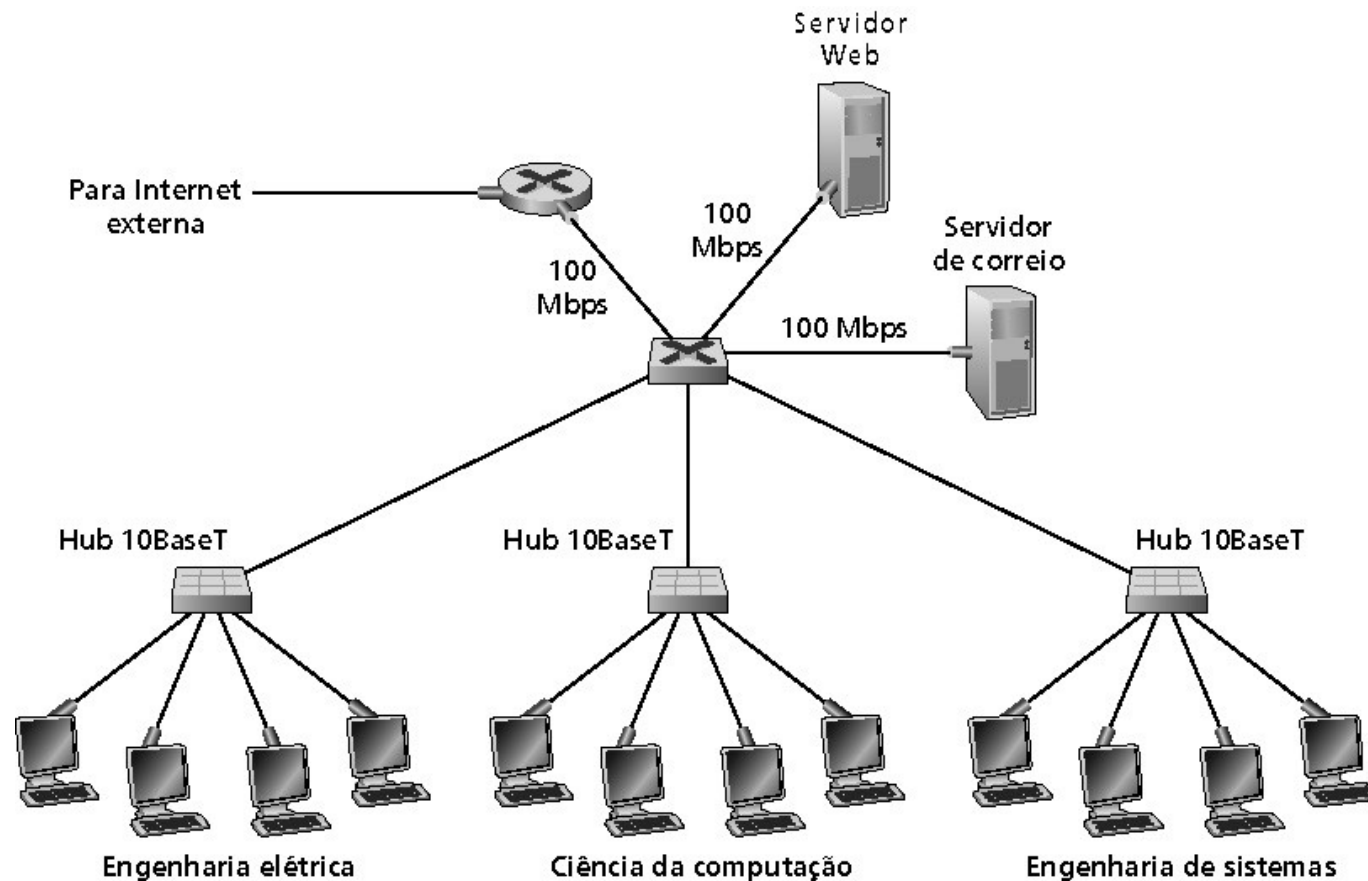
Switching: A-para-A' e B-para-B', simultaneamente, sem colisões



5 Mais sobre switches

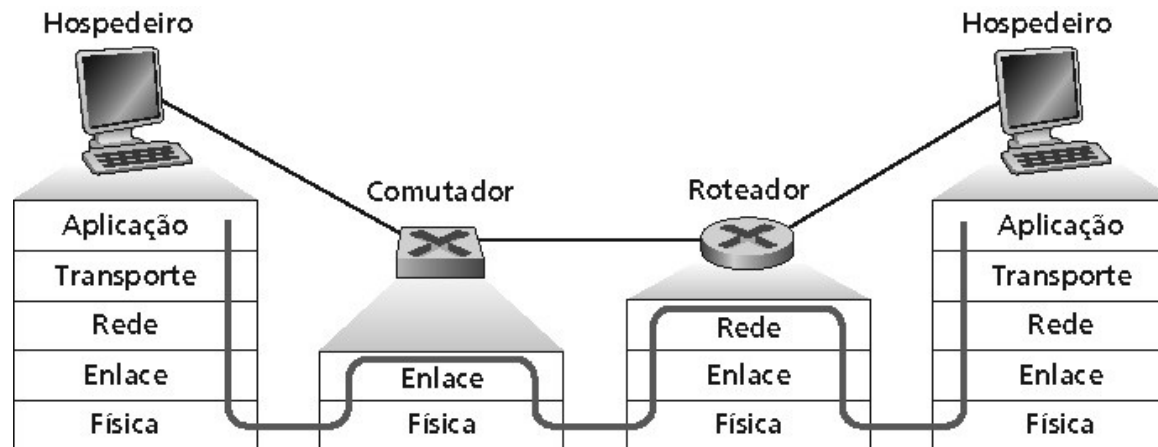
- **Cut-through switching:** quadro encaminhado da porta de entrada até a porta de saída sem ter de primeiro coletar o quadro todo
 - Ligeira redução na latência
- Combinações de interfaces 10/100/1000 Mbps compartilhadas/dedicadas

5 Redes corporativas



5 switches vs. roteadores

- Ambos são dispositivos store-and-forward
 - Roteadores: dispositivos de camada de rede (examinam cabeçalhos da camada de rede)
 - Switches são dispositivos da camada de enlace
- Roteadores mantêm tabelas de roteamento, implementam algoritmos de roteamento
- Switches mantêm tabelas de switch, implementam filtragem, algoritmos de aprendizagem



5 Resumo: comparação

	<u>hubs</u>	<u>roteadores</u>	<u>switches</u>
isolação de tráfego	não	sim	sim
plug & play	sim	não	sim
roteamento ótimo	não	sim	não
cut through	sim	não	sim



5 A camada de enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de múltiplo acesso
- 5.4 Endereçamento da camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Hubs e switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização de enlace: ATM e MPLS

5 Controle de 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!)

5 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) *ao mesmo tempo*
 - 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 dos outros

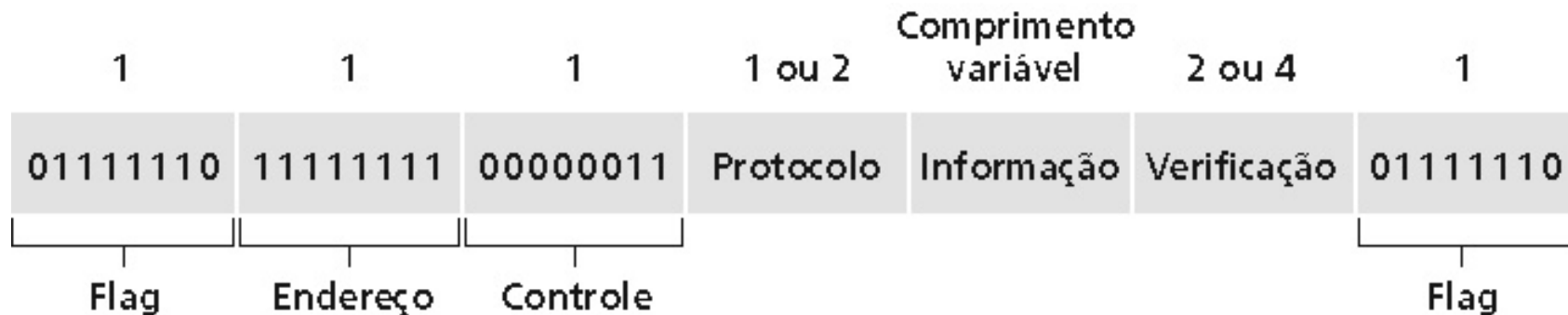
5 PPP não requisitos

- 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!

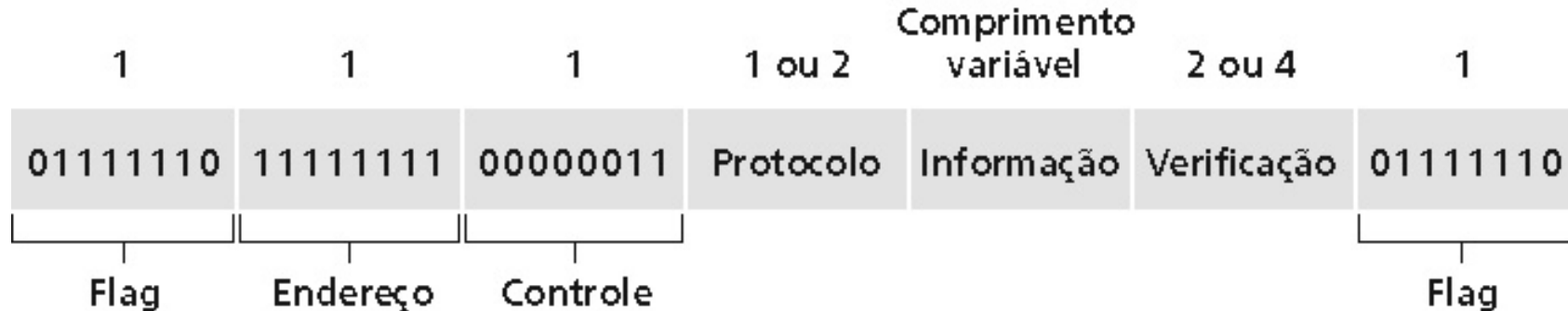
5 PPP formato do quadro

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



5 PPP formato dos dados

- **info:** dados da camada superior sendo transportados
- **CRC:** verificação de redundância cíclica para detecção de erros

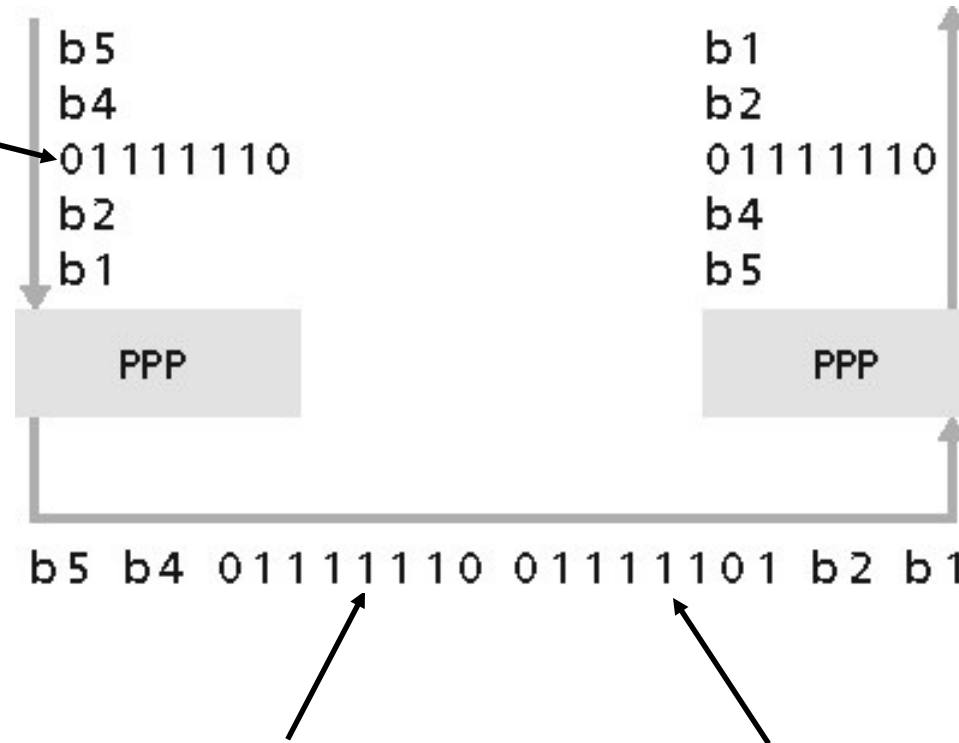


5 Byte stuffing

- 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> são dados 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 em seguida: descarta o primeiro e continua a recepção de dados
 - Único byte 01111110: então é um flag

5 Byte stuffing

byte com o padrão
do flag nos dados a
enviar

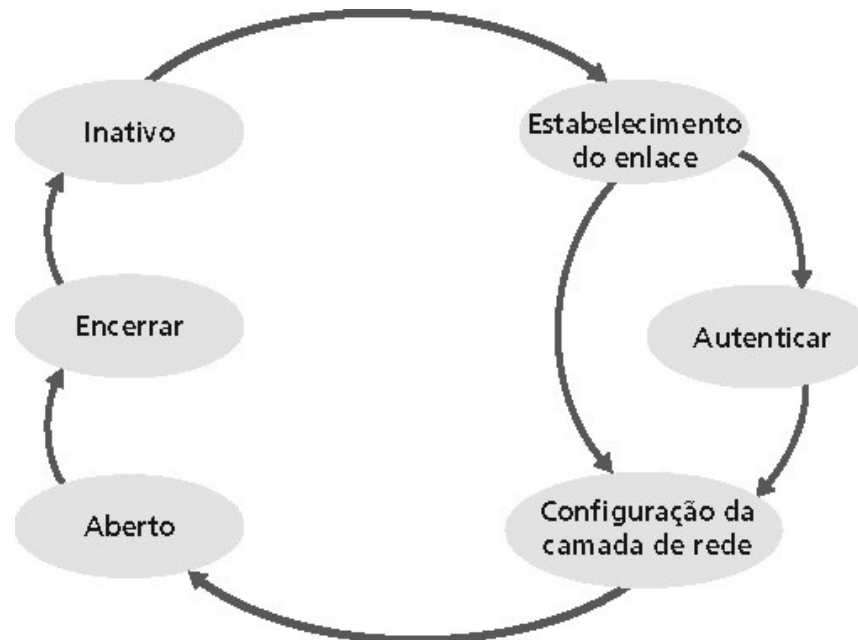


byte com o padrão de escape acrescentado
nos dados transmitidos seguido por um byte
com padrão de flag

5 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



5 A camada de enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de múltiplo acesso
- 5.4 Endereçamento da camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Hubs e switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização de enlace: ATM e MPLS

5 Virtualização das redes

Virtualização dos recursos: uma poderosa abstração em engenharia de sistemas:

- Exemplos em computação: memória virtual, dispositivos virtuais
 - Máquinas virtuais: ex.: java
 - IBM VM os dos anos 60/70
- Camada de abstrações: não se apegar a detalhes da camada mais baixa, apenas trata com as camadas mais baixas abstratamente

5 Internet: virtualização das redes

1974: múltiplas redes desconectadas

- ARPAnet
- redes de dados-sobre-cabo
- rede de pacote por satélite (Aloha)
- rede de pacotes por rádio

... diferentes em:

- convenções de endereçamento
- formatos do pacote
- recuperação de erros
- roteamento



PEARSON

Addison
Wesley

5 Internet: virtualização das redes

Camada de rede da Internet (IP):

- Endereçamento: internetwork aparece como uma entidade única e uniforme, escondendo a heterogeneidade das redes locais
- Rede de redes

Gateway:

- “Embuta pacotes da Internet no formato de um pacote local ou os extrai”
- Rota (no nível de internetwork) para o próximo gateway



PEARSON

Addison
Wesley

5 Arquitetura da Internet de Cerf & Kahn

O que é virtualizado?

- Duas camadas de endereçamento: Internet e rede local
- Nova camada (IP) torna tudo homogêneo na camada da Internet
- Tecnologia da rede local em questão
 - Cabo
 - Satélite
 - Modem telefônico de 56 K
 - Hoje: ATM, MPLS
- ... “invisível” na camada da Internet. Parece com uma tecnologia de camada de enlace para o IP!

5 ATM e MPLS

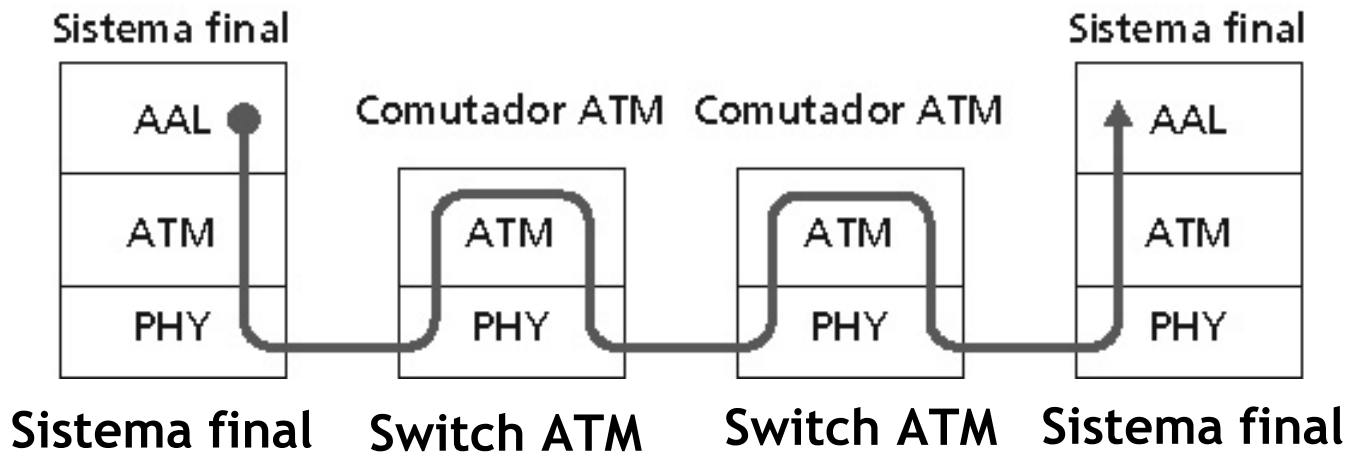
- ATM, MPLS redes separadas em seus próprios direitos
 - Modelos de serviço, endereçamento, roteamento diferentes da Internet
- Vistos pela Internet como um enlace lógico conectando roteadores IP
 - Assim como o *dialup link* é realmente parte de uma rede separada (rede telefônica)
- ATM, MPLS: de interesse técnico em seu próprio direito

5 Modo de transferência assíncrono: ATM

- Padrão dos anos 80/90 para altas taxas de transmissão (155 Mbps a 622 Mbps e mais altas) arquitetura de *Broadband Integrated Service Digital Network* (B-ISDN)
- **Objetivo:** *transporte integrado de voz, dados e imagens com foco nas redes públicas de comunicação*
 - Deve atender aos requisitos de tempo/QoS para aplicações de voz e de vídeo (*versus* o serviço de melhor esforço da Internet)
 - Telefonia de “próxima geração”: fundamentos técnicos no mundo da telefonia
 - Comutação de pacotes (pacotes de tamanho fixo, chamados “células”) usando circuitos virtuais



5 Arquitetura ATM



- **Camada de adaptação:** apenas na borda de uma rede ATM
 - Segmentação e remontagem dos dados
 - Grosseiramente análoga à camada de transporte da Internet
- **Camada ATM:** camada de “rede”
 - Comutação de células, roteamento
- **Camada física**

5 ATM: camada de rede ou de enlace?

Visão: transporte fim-a-fim: “ATM de computador a computador”

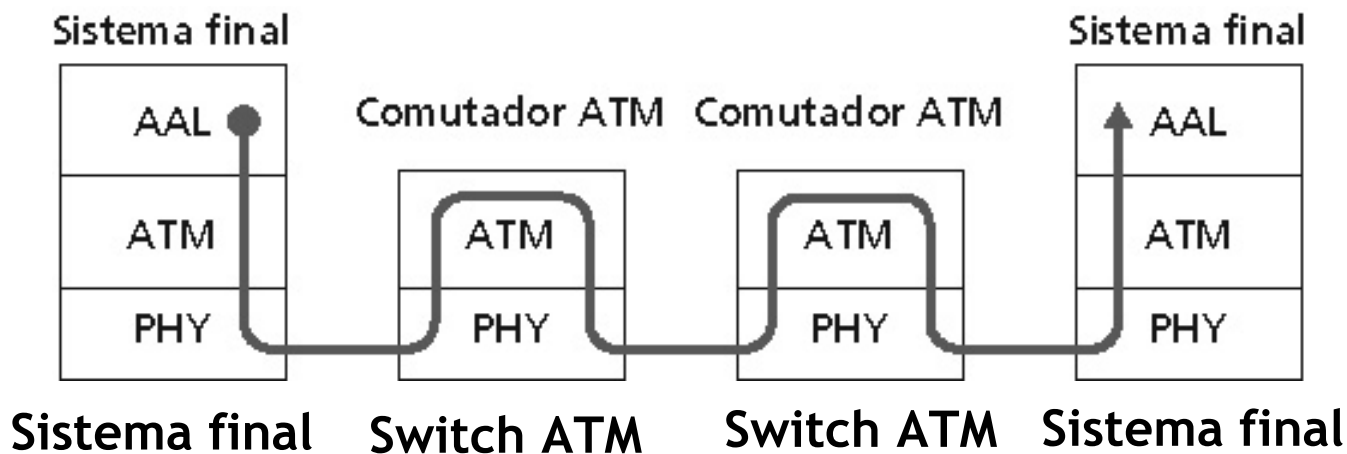
- ATM é uma tecnologia de rede

Realidade: usada para conectar roteadores IP de backbone

- “IP sobre ATM”
- ATM como uma camada de enlace comutada, conectando roteadores IP

5 Camada de adaptação ATM (AAL)

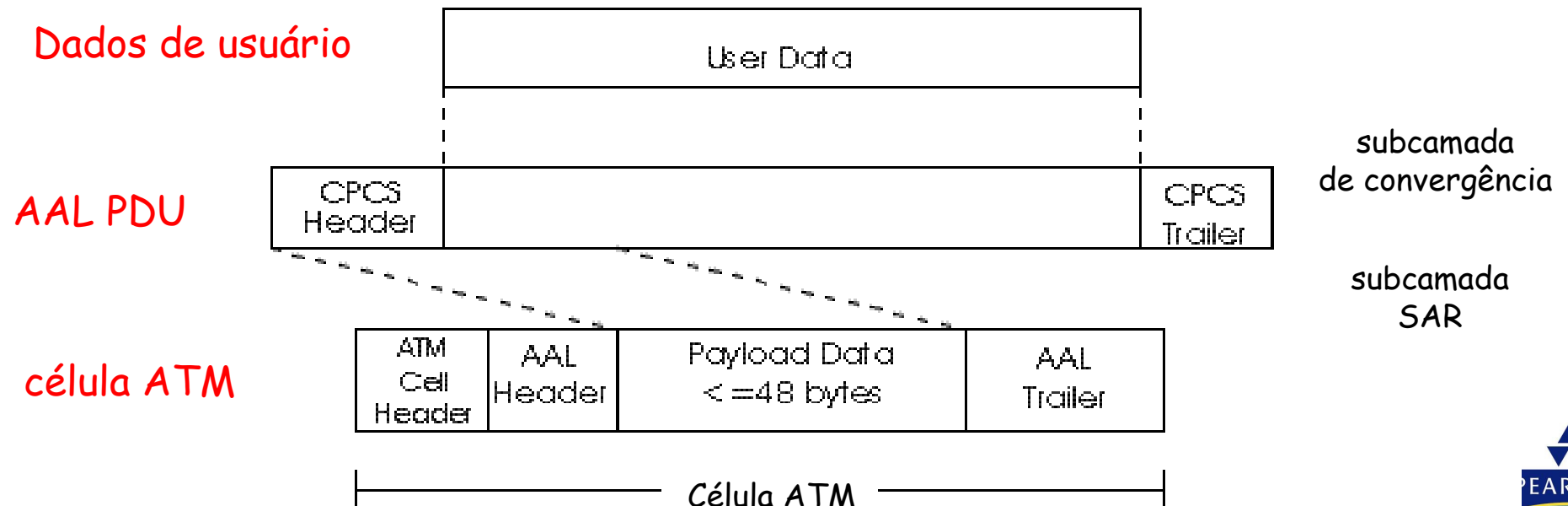
- Camada de adaptação ATM (AAL): “adapta” camadas superiores (aplicações IP ou nativas ATM) para a camada ATM abaixo
- AAL presente **apenas nos sistemas finais**, não nos comutadores ATM (“switches”)
- O segmento da camada AAL (campo de cabeçalho/trailer e de dados) são fragmentados em múltiplas células ATM
- Analogia: segmento TCP em muitos pacotes IP



5 Camada de adaptação ATM (AAL)

Diferentes versões da camada AAL, dependendo da classe de serviço ATM:

- **AAL1**: para serviço CBR (taxa de bit constante), ex.: emulação de circuitos
- **AAL2**: para serviços VBR (taxa de bit variável), ex.: vídeo MPEG
- **AAL5**: para dados (ex.: datagramas IP)



5 Camada ATM

Serviço: transporte de células através da rede ATM

- Análoga à camada de rede IP
- Serviços muito diferentes da camada de rede IP

Arquitetura de rede	Modelo de serviço	Garantias ?				Aviso de congestão
		Banda	Perda	Ordem	Tempo	
Internet	melhor esforço	não	não	não	não	não (inferido pelas perdas)
ATM	CBR	taxa constante	sim	sim	sim	não há congestão
ATM	VBR	taxa garantida	sim	sim	sim	não há congestão
ATM	ABR	mínimo garantido	não	sim	não	sim
ATM	UBR	não	não	sim	não	não



5 Camadas ATM: circuitos virtuais

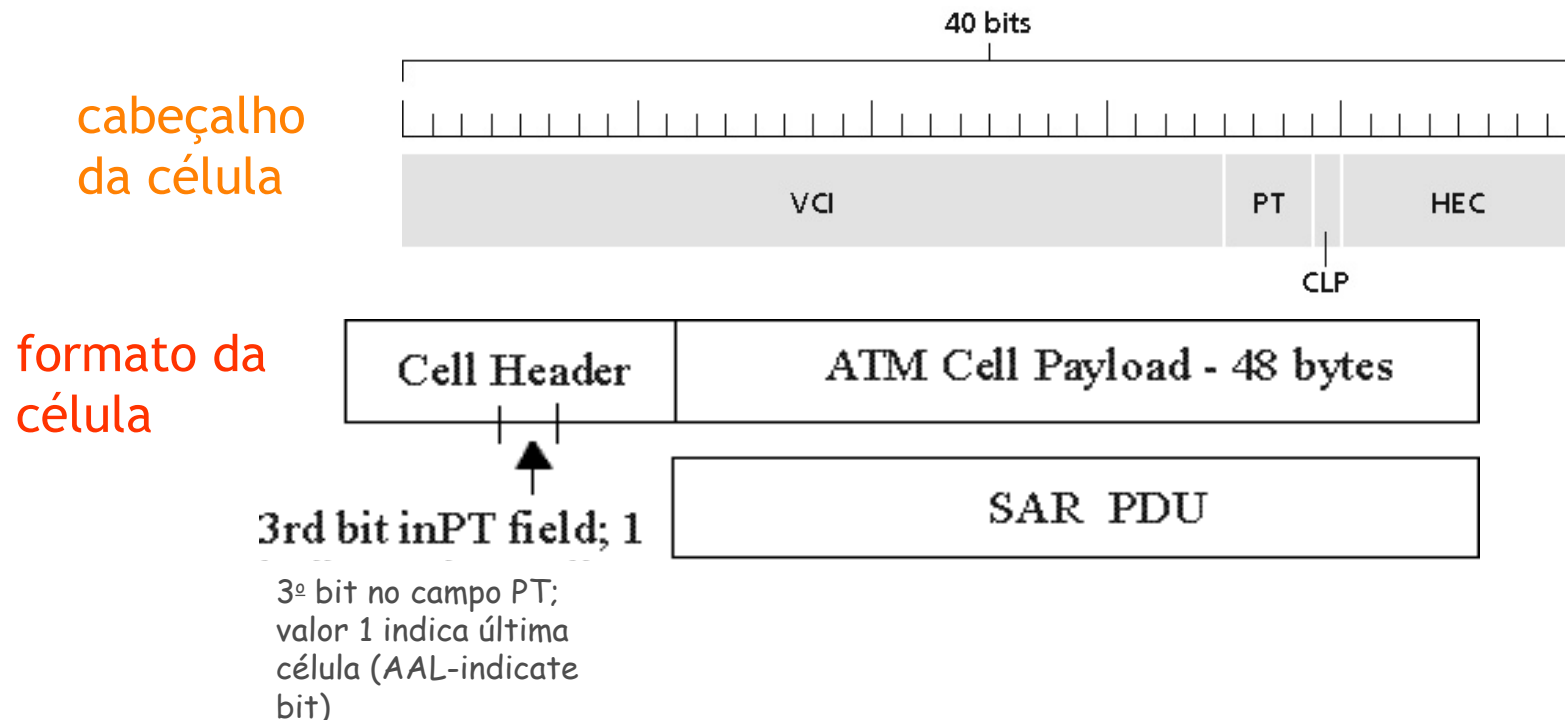
- **Transporte em VC:** células são transportadas sobre VC da fonte ao destino
 - Estabelecimento de conexão, necessário para cada chamada *antes* que o fluxo de dados possa ser iniciado
 - Cada pacote transporta um identificador de VC (não transporta o endereço do destino)
 - *Cada* comutador com caminho entre a fonte e o destino mantém o “estado” para cada conexão passante
 - Recursos do enlace e do comutador (banda passante, buffers) podem ser *alocados* por VC para obter um comportamento semelhante a um circuito físico
- **VCS permanentes (PVCs)**
 - Conexões de longa duração
 - Tipicamente: rota “permanente” entre roteadores IP
- **VCS comutados (SVC):**
 - Dinamicamente criados numa base por chamada

5 ATM VCs

- **Vantagens do uso de circuitos virtuais no ATM:**
 - Índices de QoS garantidos para conexões mapeadas em circuitos virtuais (banda passante, atraso, variância de atraso)
- **Problemas no uso de circuitos virtuais:**
 - O suporte de tráfego datagrama é ineficiente
 - Um PVC entre cada par origem/destino não tem boa escalabilidade (N^2 conexões são necessárias)
 - SVC introduz latência de estabelecimento de conexão e atrasos de processamento para conexões de curta duração

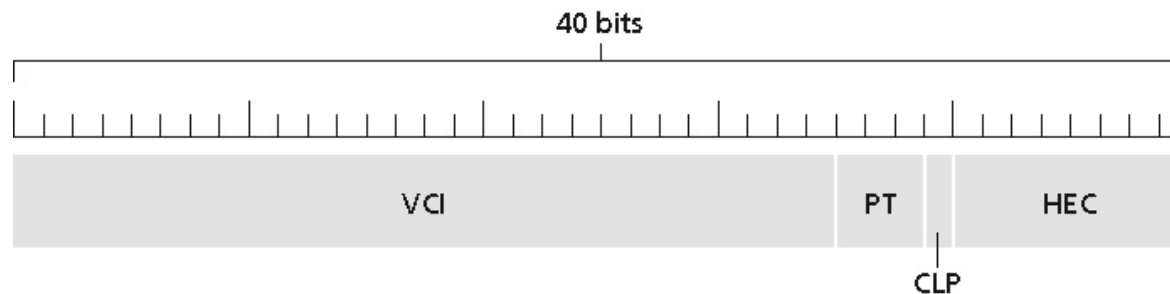
5 Camada ATM: célula ATM

- Cabeçalho da célula ATM com 5 bytes
- Carga útil com 48-bytes
 - Por quê?: carga útil pequena -> pequeno atraso de criação de célula para voz digitalizada
 - Meio do caminho entre 32 e 64 (compromisso!)



5 Cabeçalho da célula ATM

- **VCI:** identificador de canal virtual
 - Pode *mudar* de enlace para enlace através da rede
- **PT:** tipo de carga útil (ex.: célula RM *versus* célula de dados)
- **CLP:** bit de prioridade de perda de célula
 - CLP = 1 implica célula de baixa prioridade; pode ser descartada em caso de congestão
- **HEC:** verificação de erros no cabeçalho
 - Verificação cíclica de erros



5 Camada física ATM

A camada física se compõe de *duas* partes (subcamadas):

- **Subcamada de convergência de transmissão (TCS):** adapta a camada ATM acima à subcamada física abaixo (PMD)
- **Subcamada dependente do meio:** depende do tipo de meio físico que está sendo empregado

Funções da TCS :

- Geração do **checksum** do cabeçalho: 8 bits CRC
- **Delineamento** de célula
- Com uma subcamada PMD não estruturada, transmite células vazias (**“idle cells”**) quando não há células de dados a enviar



5 Camada física ATM

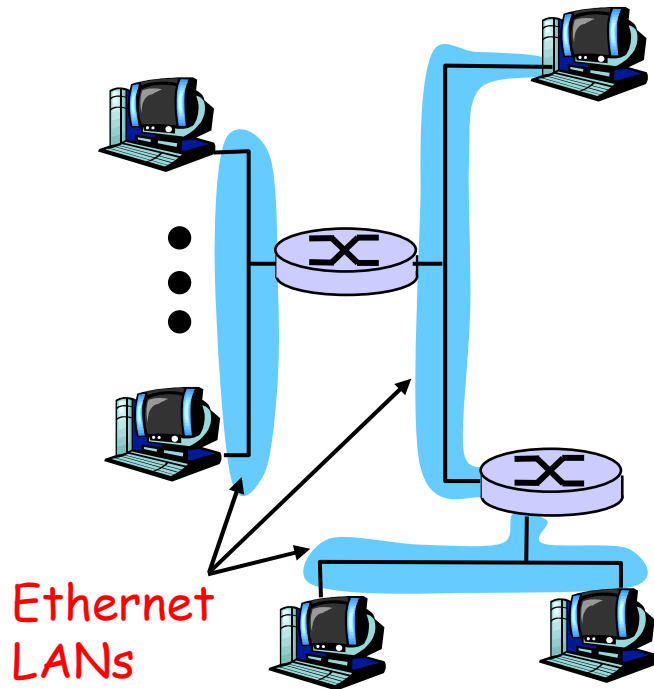
Subcamada dependente do meio físico (PMD)

- **SONET/SDH:** estrutura de transmissão de quadros (como um container carregando bits);
 - Sincronização de bits;
 - Partições da banda passante (TDM);
 - Várias velocidades: OC1 = 51,84 Mbps; OC3 = 155,52 Mbps; OC12 = 622,08 Mbps
- **T1/T3:** estrutura de transmissão de quadros (velha hierarquia de telefonia: 1,5 Mbps/45 Mbps. No Brasil, usa-se a hierarquia europeia E1/E3: 2/34 Mbps)
- **Não estruturada:** apenas células (ocupadas/vazias)

5 IP-sobre-ATM

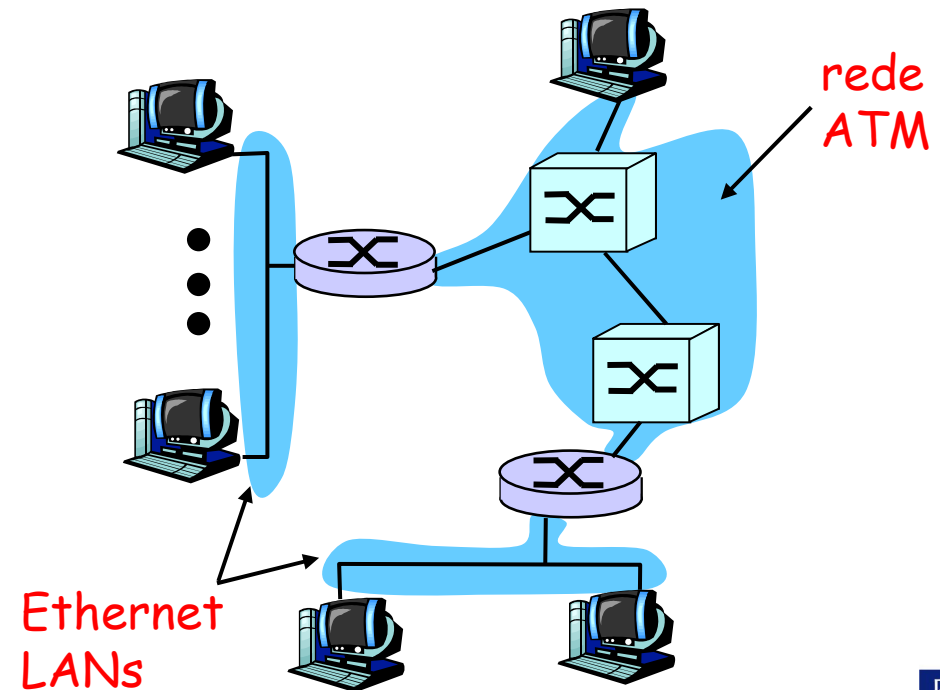
Apenas IP clássico

- 3 “redes” (ex.: segmentos de LAN)
- Endereços MAC (802.3) e IP



IP sobre ATM

- Substitui “rede” (ex.: segmento de LAN) com a rede ATM
- Endereços ATM, endereços IP



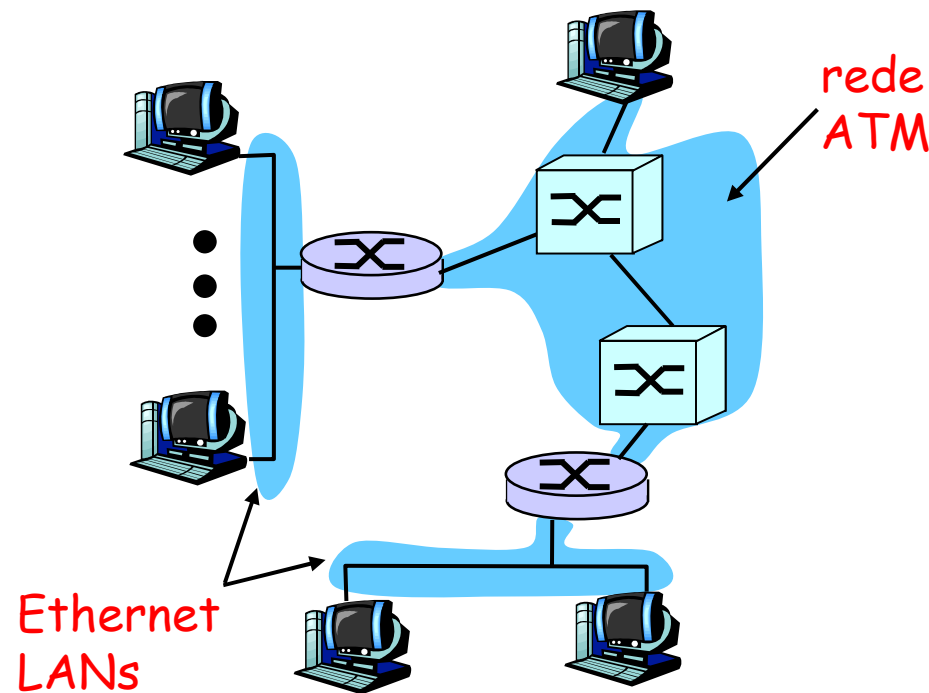
5 Viagem de um datagrama numa rede IP-sobre-ATM

- **No endereço de origem:**
 - Camada IP encontra um mapeamento entre o endereço IP e o endereço de destino ATM (usando ARP)
 - Passa o datagrama para a camada de adaptação AAL5
 - AAL5 encapsula os dados, segmenta em células e passa para a camada ATM
- **Rede ATM:** move a célula para o destino de acordo com o seu VC (circuito virtual)
- **No hospedeiro de destino:**
 - AAL5 remonta o datagrama original a partir das células recebidas
 - Se o CRC OK, datagrama é passado ao IP

5 IP-sobre-ATM

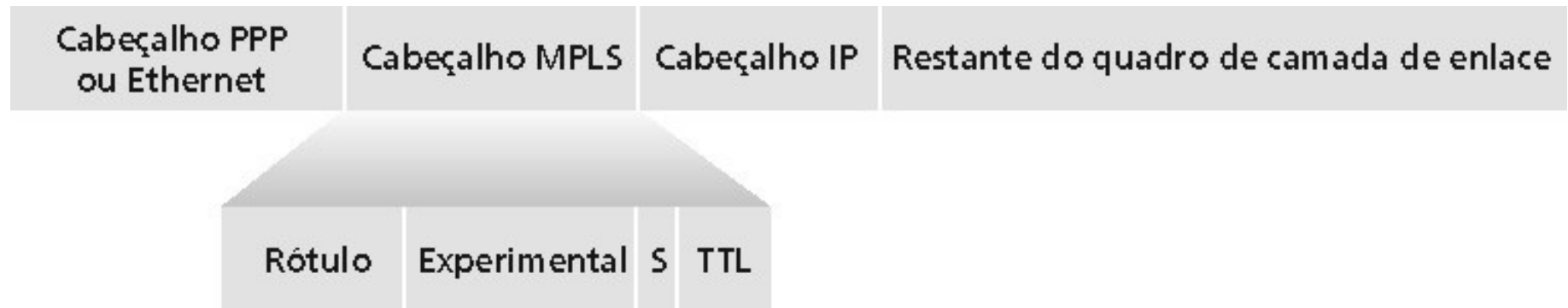
Questões:

- Datagramas IP em ATM AAL5 PDUs
- Dos endereços IP aos endereços ATM
 - Da mesma forma que de endereços IP para endereços MAC 802.3!



5 Multiprotocol label switching (MPLS)

- Objetivo inicial: aumentar a velocidade de encaminhamento IP usando labels de tamanho fixo (em vez de endereço IP)
 - Mesma idéia do método de circuito virtual (VC)
 - Mas o datagrama IP ainda mantém o endereço IP!



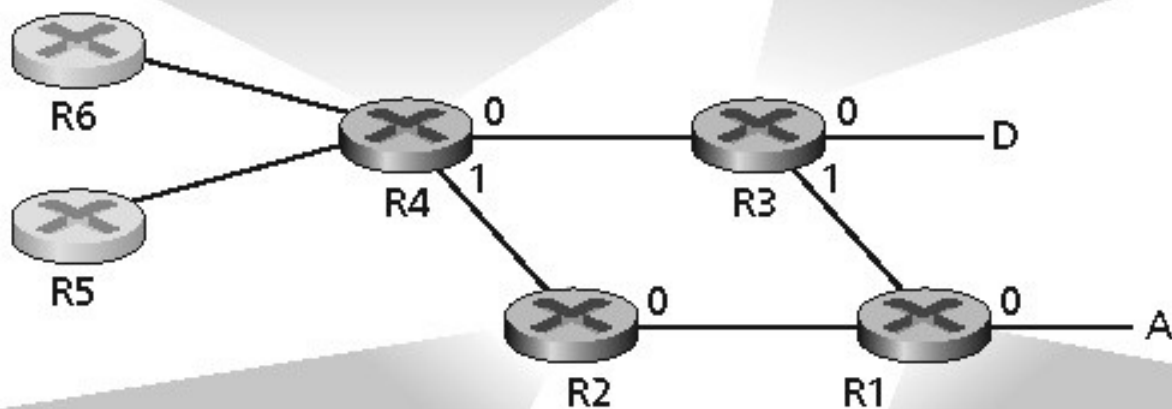
5 Roteadores MPLS

- Roteador faz a função de comutador de rótulo
- Pacotes encaminhados para interface de saída com base apenas no valor do rótulo (não inspeciona o endereço IP)
 - Tabela de encaminhamento MPLS distinta das tabelas de encaminhamento IP
- Protocolo de sinalização necessário para estabelecer o encaminhamento
 - RSVP-TE
 - Encaminhamento é possível por caminhos que o IP sozinho não pode usar (ex.: roteamento de especificado pela origem)!!
 - Use MPLS para engenharia de tráfego
- Deve coexistir com roteadores unicamente IP

5 Tabelas de encaminhamento MPLS

rótulo de entrada	rótulo de saída	destino	interface de saída
	10	A	0
	12	D	0
	8	A	1

rótulo de entrada	rótulo de saída	destino	interface de saída
10	6	A	1
12	9	D	0



rótulo de entrada	rótulo de saída	destino	interface de saída
8	6	A	0

rótulo de entrada	rótulo de saída	destino	interface de saída
6	–	A	0

5 Resumo

- Princípios por trás dos serviços da camada de enlace:
 - Detecção de erros, correção
 - Compartilhando um canal broadcast: acesso múltiplo
 - Endereçamento da camada de enlace
- Instanciação e implementação de várias tecnologias da camada de enlace
 - Ethernet
 - LANS comutadas
 - PPP
 - Redes virtualizadas como uma camada de enlace: ATM, MPLS