

Capítulo 5: A Camada de Enlace

Objetivos:

- entender os princípios por trás dos serviços da camada de enlace:
 - detecção e correção de erros,
 - compartilhamento de um canal de difusão (*broadcast*) acesso múltiplo
 - endereçamento da camada de enlace
 - transferência de dados confiável, controle de fluxo: *já visto!*
- instanciação e implementação de várias tecnologias da camada de enlace

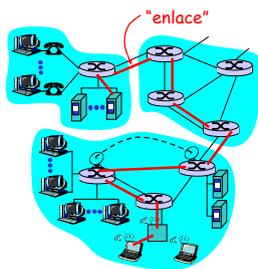
030206 1

Camada de Enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Distribuidores e computadores (*Hubs and switches*)
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização de enlace : ATM e MPLS

2

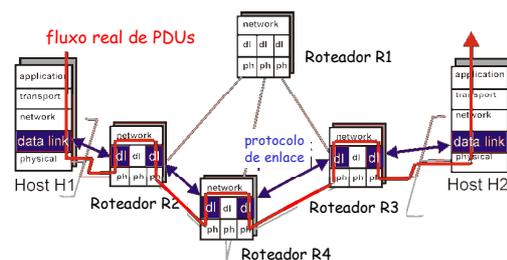
Camada de enlace: contexto



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

3

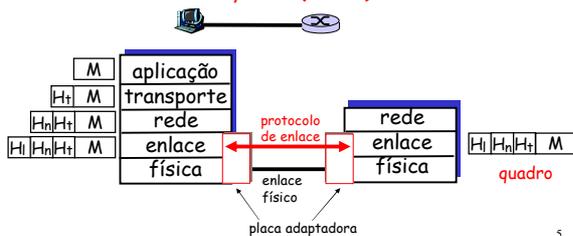
Camada de enlace: contexto



4

Camada de enlace: contexto

- dois elementos físicos *fisicamente conectados*:
 - hospedeiro-roteador, roteador-roteador, hospedeiro-hospedeiro
- unidade de dados: *quadro (frame)*



5

Serviços da Camada de Enlace

- **Enquadramento e acesso ao enlace:**
 - encapsula datagramas em quadros, acrescentando cabeçalho e *trailer* (reboque)
 - implementa acesso ao canal se o meio é compartilhado
 - endereços "MAC" usados nos cabeçalhos dos quadros para identificar a fonte e o destino dos quadros em enlaces multiponto
 - diferente do endereço IP !
- **Entrega confiável entre nós adjacentes:**
 - já aprendemos como isto deve ser feito (capítulo 3)!
 - raramente usado em enlaces com baixa taxa de erro (fibra, alguns tipos de par trançado, cabo coaxial)
 - enlaces sem-fio (*wireless*): altas taxas de erro
 - Por quê confiabilidade fim-a-fim e na camada de enlace? ⁶

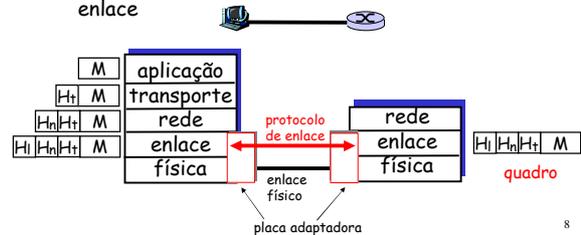
Serviços da Camada de Enlace (cont.)

- ❑ **Controle de Fluxo:**
 - o limitação da transmissão entre transmissor e receptor (compatibilizar taxas)
- ❑ **Deteção de Erros:**
 - o erros causados pela atenuação do sinal e por ruídos.
 - o o receptor detecta a presença de erros:
 - avisa ao transmissor para reenviar o quadro perdido ou simplesmente descarta o quadro
- ❑ **Correção de Erros:**
 - o o receptor identifica e *corrige* o(s) bit(s) com erro(s) sem recorrer à retransmissão
- ❑ **Half-duplex and full-duplex**

7

Implementação de Protocolo da Camada de Enlace

- ❑ implementado totalmente no "adaptador"
 - o ex., placa PCMCIA, placa Ethernet
 - o tipicamente inclui: RAM, chips DSP, interface com barramento do hospedeiro e interface do enlace



8

Camada de Enlace

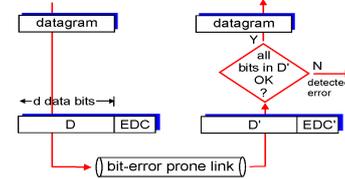
- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Deteção e correção de erros
- ❑ 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.5 Ethernet
- ❑ 5.6 Distribuidores e computadores (*Hubs and switches*)
- ❑ 5.7 PPP
- ❑ 5.8 Virtualização de enlace : ATM e MPLS

9

Deteção de Erros

EDC= Error Detection and Correction bits
(Bits de Deteção e Correção de Erros, redundância)
D = Dados protegidos pela verificação de erros, pode incluir os campos de cabeçalho

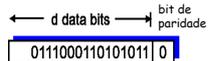
- A deteção de erros não é 100% confiável:
 - protocolos podem deixar passar alguns erros, mas é raro;
 - quanto maior o campo EDC, maior a capacidade de deteção e correção



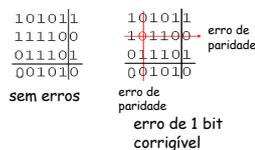
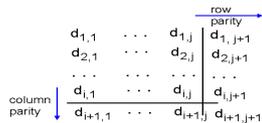
10

Verificação de Paridade

Paridade simples:
Detecta erros de um bit



Paridade Bi-dimensional:
Detecta e corrige erros de um bit



11

Soma de verificação da Internet

Objetivo: detectar "erros" (ex. bits trocados) em um segmento transmitido (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

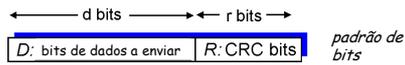
Receptor:

- ❑ computa o **checksum** do segmento recebido
- ❑ verifica se o **checksum** calculado é igual ao valor do campo **checksum**:
 - o NÃO - erro detectado
 - o SIM - não detectou erro. (*Mas, apesar disso, talvez ainda haja erros...*)

12

Cyclic Redundancy Check (CRC)

- encara os bits de dados, D , como a seqüência de coeficientes de um polinômio
- escolhe um padrão (polinômio) gerador de $r+1$ bits, G
- objetivo: escolhe r bits, R (CRC), tal que
 - $\langle D, R \rangle$ seja 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 rajada (*burst errors*) com comprimento menor que $r+1$ bits
- largamente usado na prática (ATM, HDCL)



$$D \cdot 2^r \text{ XOR } R \quad \text{fórmula matemática}$$

13

Exemplo de CRC

Desejado:

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

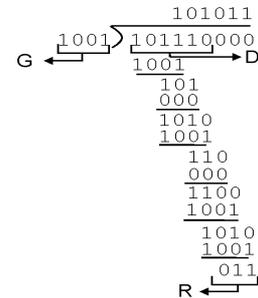
equivalente a:

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

equivalente a:

se dividimos $D \cdot 2^r$ por G , o resto será R

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



14

Implementação de CRC

- Remetente realiza em tempo real, por hardware, a divisão da seqüência D pelo polinômio G e acrescenta o resto R a D
- O receptor divide $\langle D, R \rangle$ por G ; se o resto for diferente de zero, a transmissão teve erro
- Padrões internacionais de polinômios G de graus 8, 12, 15 e 32 já foram definidos
- A ARPANET utilizava um CRC de 24 bits no protocolo de enlace de bit alternado
- ATM utiliza um CRC de 32 bits em AAL5
- HDLC utiliza um CRC de 16 bits

15

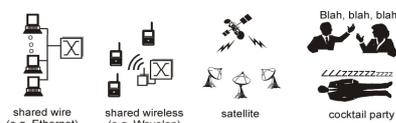
Camada de Enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Distribuidores e computadores (*Hubs and switches*)
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização de enlace : ATM e MPLS

16

Enlaces e Protocolos de Acesso Múltiplo

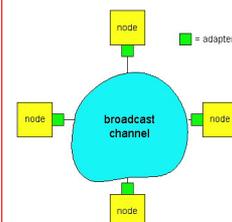
- Dois tipos de "enlaces" :
 - ponto-a-ponto
 - PPP para acesso discado
 - Ponto a ponto entre comutador Ethernet e hospedeiro
 - Difusão - *broadcast* (cabo ou meio compartilhado)
 - Ethernet tradicional
 - Canal de subida HFC
 - LAN sem fio 802.11



17

Protocolos de Acesso Múltiplo

- Enlaces com difusão: canal de comunicação único e compartilhado
- duas ou mais transmissões pelos nós: interferência (colisão)
 - apenas um nó pode transmitir com sucesso num dado instante de tempo



18

Protocolos de Acesso Múltiplo

□ *Protocolo de acesso múltiplo :*

- o algoritmo distribuído que determina como as estações compartilham o canal, isto é, determina quando cada estação pode transmitir
- o comunicação sobre o compartilhamento do canal deve utilizar o próprio canal!

19

Protocolo de Acesso Múltiplo Ideal

Canal de difusão de taxa R bps

1. Quando um nó quer transmitir, ele envia à taxa R.
2. Quando M nós querem transmitir, cada um envia à taxa média de R/M
3. Totalmente descentralizado:
 - o Ausência de um nó especial que coordena as transmissões
 - o Ausência de sincronização de relógios, *slots* etc.
4. Simples

□ **Objetivo:** eficiente, justo, simples, descentralizado

20

Protocolos MAC : taxonomia

Três grandes classes :

- o **Particionamento de canal**
 - divide o canal em pedaços menores (compartimentos de tempo, frequência)
 - aloca um pedaço para uso exclusivo de cada nó
- o **Acesso Aleatório**
 - canal não dividido, permite colisões
 - "recuperação" das colisões
- o **Revezamento (passagem de permissão)**
 - compartilhamento estritamente coordenado para evitar colisões

21

Particionamento de Canal: TDMA

TDMA: acesso múltiplo por divisão temporal

- acesso ao canal é feito por "turnos"
- cada estação recebe um compartimento ("slot") de tamanho fixo (= tempo de transmissão de um 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



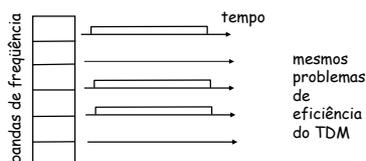
- ineficiente com usuários de pouca demanda ou quando carga for baixa

22

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



23

Protocolos de Acesso Aleatório

- Quando o nó tem um pacote a enviar:
 - o transmite aleatoriamente à taxa do canal (R bps)
 - o não há coordenação *a priori* entre os nós
- dois ou mais nós transmitindo -> "colisão"
- **Protocolo MAC de acesso aleatório** especifica:
 - o como detectar colisões
 - o como as estações se recuperam das colisões (ex., via retransmissões)
- Exemplos de protocolos MAC de acesso aleatório:
 - o *slotted* ALOHA
 - o ALOHA
 - o CSMA e CSMA/CD

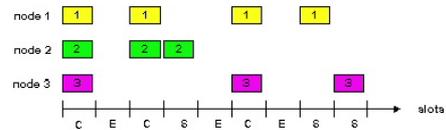
24

Slotted Aloha

- O tempo é dividido em compartimentos (*slots*) de tamanho igual (= tempo de transmissão de um quadro)
- Um nó com quadro pronto transmite no início do próximo compartimento
- Se houver colisão (realimentação pelo canal,):
 - o a origem retransmite o quadro nos compartimentos posteriores com probabilidade p , até obter sucesso

25

Slotted ALOHA



Pro

- Se apenas um nó estiver ativo, pode transmitir continuamente à taxa do canal
- Bastante descentralizado: apenas os *slots* dos nós precisam ser sincronizados
- simples

Contra

- Colisões, desperdício de *slots*
- *Slots* ociosos
- Os nós podem ser capazes de detectar uma transmissão em menos tempo do que o necessário para enviar um pacote
- Sincronização de relógios

26

Eficiência do Slotted Aloha

Eficiência: fração de longo-prazo de *slots* bem sucedidos, quando há muitos nós, cada um com muitos quadros a enviar

- Supondo N nós com muitos quadros a enviar, cada um transmite em um *slot* com probabilidade p
- prob. de que um nó específico tenha sucesso em um *slot* = $p(1-p)^{N-1}$
- prob. de um nó qualquer ter sucesso = $Np(1-p)^{N-1}$

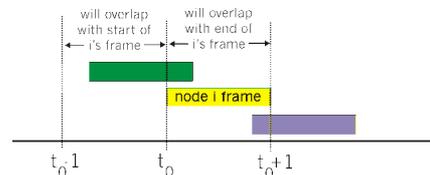
- Para eficiência máxima
 - o N nós ativos, encontrar p^* que maximize $Np^*(1-p^*)^{N-1}$
 - o muitos nós, fazer o limite de $Np^*(1-p^*)^{N-1}$ para N tendendo a infinito resulta em $1/e = 0,37$

Na melhor das hipóteses: o canal é usado para transmissões úteis 37% do tempo!

27

ALOHA Puro (sem slots)

- Aloha puro: operação mais simples, pois não requer *slots* (e nem a sincronização dos mesmos)
- quadro pronto: transmitir imediatamente
- a probabilidade de colisão aumenta:
 - o pacote enviado em t_0 colide com outros pacotes enviados em $[t_0-1, t_0+1]$ (2 vezes o tamanho da janela do ALOHA com slots)



28

Eficiência do Aloha Puro

$P(\text{sucesso para um dado nó}) =$
 $P(\text{nó transmitir}) \cdot$
 $P(\text{nenhum outro nó transmite em } [p_0-1, p_0]) \cdot$
 $P(\text{nenhum outro nó transmite em } [p_0-1, p_0])$

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

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

... escolhendo p ótimo e fazendo $N \rightarrow$ infinito ...

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

Ainda pior !

29

CSMA: Carrier Sense Multiple Access

CSMA: escuta antes de transmitir:

- Se o canal parece vazio: transmite o quadro
- Se o canal está ocupado, adia a transmissão
 - o **CSMA Persistente:** tenta outra vez imediatamente com probabilidade p quando o canal se torna livre
 - o **CSMA Não-persistente:** tenta novamente após um intervalo aleatório
- Analogia humana: não interrompa os outros!
- Desta forma, o problema das colisões fica resolvido?

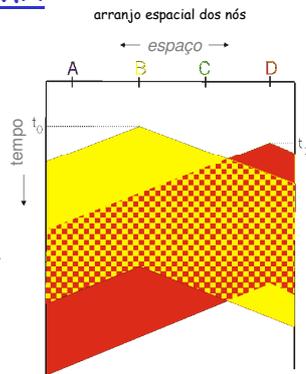
30

Colisões no CSMA

colisões podem ocorrer:
o atraso de propagação faz com que dois nós possam não ouvir as transmissões do outro

colisão:
todo o tempo de transmissão do pacote é desperdiçado

nota:
papel da distância e do atraso de propagação na determinação da probabilidade de colisão (janela de vulnerabilidade = retardo ida e volta entre os dois nós envolvidos)



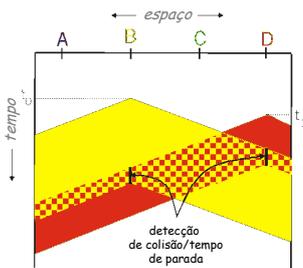
CSMA/CD (Detecção de Colisão)

CSMA/CD:

- colisões *detectadas* num tempo curto
- transmissões com colisões são interrompidas, reduzindo o desperdício do canal
- retransmissões persistentes ou não-persistentes
- detecção de colisão:
 - fácil em LANs cabeadas: medição da intensidade do sinal ou comparação dos sinais transmitidos e recebidos
 - difícil em LANs sem fio: receptor desligado enquanto transmitindo, para evitar danificá-lo com excesso de potência
- CSMA/CD pode conseguir utilização do canal perto de 100% em redes locais (se tiver baixa razão entre tempo de propagação e tempo de transmissão do pacote)
- analogia humana: interlocutor educado

32

CSMA/CD detecção de colisão



33

Protocolos com Revezamento

Protocolos MAC com particionamento de canal

- compartilham o canal eficientemente quando a carga é alta e bem distribuída
- ineficiente nas cargas baixas: retardos elevados para acesso ao canal.

Protocolos MAC de acesso aleatório

- eficiente com cargas baixas: um único nó pode usar todo o canal
- cargas altas: excesso de colisões

Protocolos MAC com revezamento

buscam o melhor dos dois mundos!

34

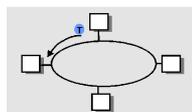
Protocolos MAC com Revezamento

Consulta (Polling):

- nó mestre "convida" os escravos a transmitirem, um de cada vez
- problemas:
 - custo da consulta (*polling overhead*)
 - latência
 - falha do mestre

Passagem de permissão

- Ficha de controle (*token*) passada de um nó para o próximo sequencialmente.
- problemas:
 - custo (sobrecarga) da ficha
 - latência
 - falhas: ficha e nós

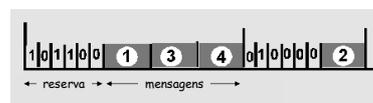


35

Protocolos de Reserva

Consulta (polling) distribuída:

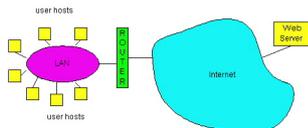
- O tempo é dividido em compartimentos ("slots")
- começa com N **compartimentos de reserva** curtos
 - tempo do compartimento de reserva é igual ao atraso de propagação fim-a-fim do canal
 - estação com mensagem a enviar faz uma reserva
 - reserva é vista por todas as estações
- depois dos compartimentos de reserva ocorre a transmissão das mensagens ordenadas pelas reservas e pelas prioridades de transmissão



36

Tecnologias de Rede Local

- Protocolos MAC usados em redes locais, para controlar acesso ao canal
- **Anéis de fichas:** IEEE 802.5 (Token Ring da IBM), para sala de computação, ou rede departamental, até 16Mbps; FDDI (Fiber Distributed Data Interface), para rede de Campus ou Metropolitana, até 200 estações, em 100Mbps.
- **Ethernet:** emprega o protocolo CSMA/CD; 10Mbps (IEEE 802.3), Fast E-net (100Mbps), Gigabit E-net (1.000 Mbps); de longe a tecnologia mais popular de rede local



37

Sumário de protocolos MAC

- O que se pode fazer com um meio compartilhado?
 - Particionamento do canal, por tempo, frequência ou código
 - TDMA, FDMA, CDMA, WDMA (wave division)
 - Particionamento aleatório (dinâmico),
 - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
 - detecção de portadora fácil com algumas tecnologias (cabos) difícil com outras (sem fio)
 - CSMA/CD usada na Ethernet
 - CSMA/CA usada nas redes 802.11
 - Revezamento
 - consulta por um nó central, passagem de ficha de permissão
- Para satélites, é difícil detectar se o canal ascendente está ocupado (retardos de 270ms): ALOHA, FDM, TDM, CDMA

38

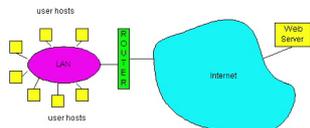
Tecnologias de LAN

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



39

Camada de Enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Distribuidores e computadores (*Hubs and switches*)
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização de enlace : ATM e MPLS

40

Endereços Físicos 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)

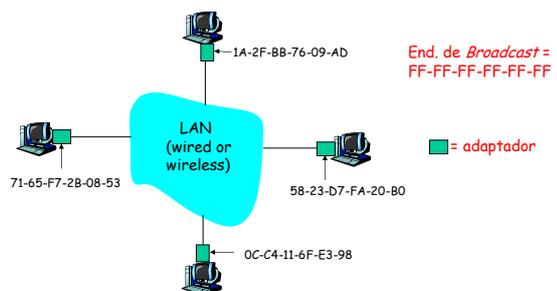
Endereço MAC (ou de LAN, físico, Ethernet):

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

41

Endereços Físicos e ARP

Cada adaptador numa LAN tem um único endereço de LAN



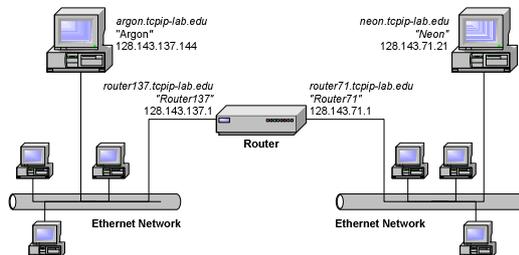
42

Endereços Físicos e ARP

- ❑ A alocação de endereços MAC é administrada pelo IEEE
- ❑ O fabricante compra porções do espaço de endereço MAC (24 bits) para assegurar a unicidade
- ❑ Analogia:
 - (a) endereço MAC: semelhante ao número do CPF
 - (b) endereço IP: semelhante a um endereço postal
- ❑ endereçamento MAC é plano (sem estrutura) => portabilidade
 - o é possível mover uma placa de LAN de uma rede para outra sem reconfiguração do endereço MAC
- ❑ endereçamento IP é "hierárquico" => NÃO portátil
 - o depende da rede na qual se está ligado

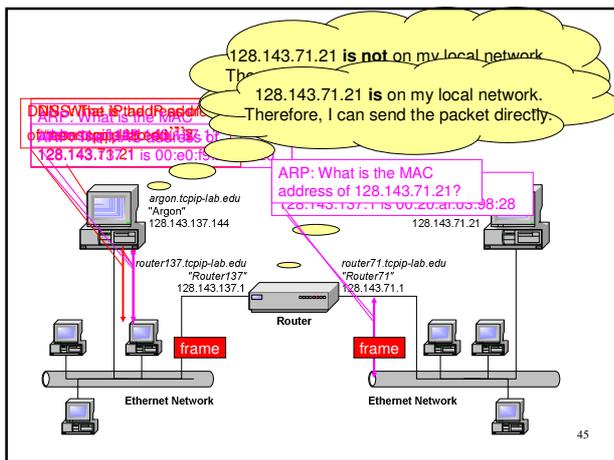
43

Envio de um pacote de Argon para Neon



Fonte: Liebeherr & El Zarki, 2004
<http://www.cs.virginia.edu/~itlab/book/slides/index.html>

44

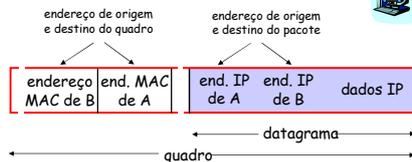
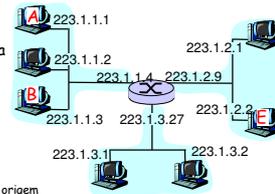


45

Relação endereços IP/MAC

A tem um datagrama IP endereçado a B :

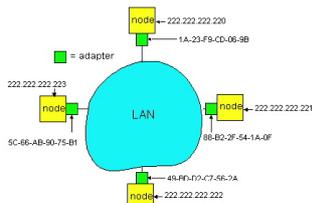
- ❑ verifica end. de rede B: B na mesma rede de A
- ❑ camada de enlace envia datagrama para B dentro de um quadro da camada de enlace



46

ARP: Address Resolution Protocol (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 uma tabela ARP
- ❑ Tabela ARP: mapeamento de endereços IP/MAC para alguns nós da LAN
 - < endereço IP; endereço MAC; TTL >
 - < >
 - < >
- o TTL (Time To Live): tempo depois do qual o mapeamento de endereços será esquecido (tipicamente 5 ou 20 min)

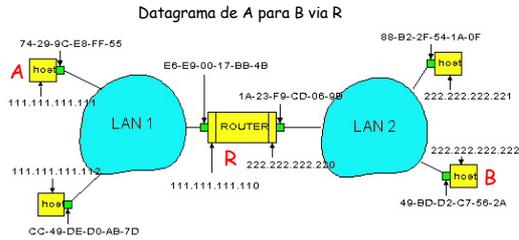
47

Protocolo ARP

- ❑ O nó A quer enviar pacote para o nó B na mesma rede local
- ❑ A verifica se sua tabela ARP contém o endereço IP de B
- ❑ Se o end. de não estiver na Tabela ARP, o módulo ARP de A difunde um pacote ARP de consulta contendo o endereço IP de B.
 - o TODOS os nós na rede local recebem o pacote ARP
- ❑ O nó B responde ao nó A com pacote ARP unicast informando seu próprio endereço MAC
- ❑ A armazena o par endereço IP-MAC em sua tabela ARP até que a informação se torne obsoleta
 - o soft-state: informação que desaparece com o tempo se não for re-atualizada
- ❑ ARP é "plug-and-play":
 - o nós criam as suas tabelas ARP sem intervenção do administrador da rede

48

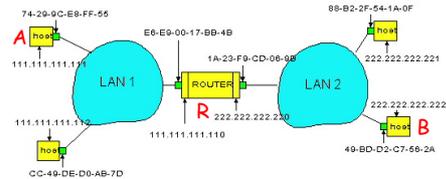
Roteamento para outra LAN



- Na tabela de rotas no *host* origem, encontra-se o roteador 111.111.111.110
- Na tabela de ARP na origem, encontra-se o endereço MAC E6-E9-00-17-BB-4B, etc

49

- A cria o pacote IP com origem A e destino B
- A usa o 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 do Nó A para B e envia para B



50

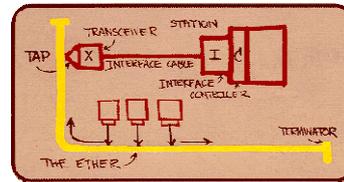
Camada de Enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- 5.5 Ethernet**
- 5.6 Distribuidores e computadores (*Hubs and switches*)
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização de enlace : ATM e MPLS

51

Ethernet

- Tecnologia de rede local "dominante" :
 - Barata
 - Primeira tecnologia de LAN largamente usada
 - Mais simples e mais barata que LANs com *token* e ATM
 - Velocidade crescente: 10 Mbps - 10 Gbps
- Serviço não orientado a conexão, não confiável

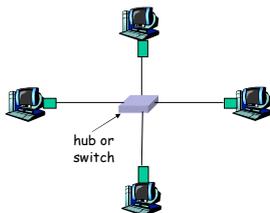


Esboço da Ethernet por Bob Metcalfe

52

Topologia em estrela

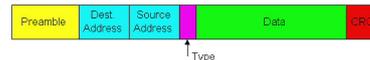
- Barramento popular até meados dos anos 90
- Atualmente prevalece a topologia em estrela
- Conexão: *hub* ou *switch*



53

Estrutura do Quadro Ethernet

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



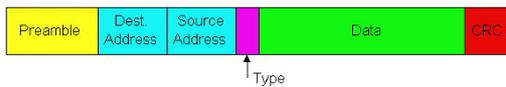
Preâmbulo:

- 7 bytes com o padrão 10101010 seguidos por um byte com padrão 01010111
- usado para sincronizar os relógios do receptor e do emissor

54

Estrutura do Quadro Ethernet (cont.)

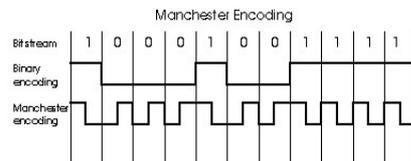
- ❑ **Endereços:** 6 bytes, quadro é recebido por todos os adaptadores e descartado se o endereço do quadro não coincide com o endereço do adaptador
- ❑ **Tipo:** indica o protocolo da camada superior; geralmente é o protocolo IP, mas outros podem ser suportados (p.ex. Novell IPX e AppleTalk)
- ❑ **CRC:** verificado no receptor; se erro é detectado, o quadro é descartado.



55

Codificação Manchester

- ❑ Banda básica: transmissão digital, bits são codificados usando codificação Manchester e transmitidos diretamente, modificando a voltagem de sinal de corrente contínua
- ❑ Cada bit tem uma transição
- ❑ Permite que os relógios (*clocks*) nos nós emissor e receptor mantenham-se sincronizados
 - Não é necessário um relógio centralizado, global, para todos os nós
- ❑ Aspecto da camada física



56

Ethernet: usa CSMA/CD

A: escutar canal, se em silêncio por determinado tempo (96 BTT)

```

então {
  transmitir e monitorar o canal;
  Se detectada outra transmissão
  então {
    abortar e enviar sinal de "jam" (48 bits);
    atualizar número de colisões;
    esperar de acordo com o algoritmo "exponential backoff"
    (retardo exponencial);
    ir para A
  }
  senão {quadro transmitido; zerar contador de colisões}
}
senão {esperar até terminar a transmissão em curso; ir para A}
    
```

57

Ethernet CSMA/CD (cont.)

Sinal de "Jam": garante que todos os outros transmissores estejam cientes da colisão (48 bits);

Tempo de Bit (BTT): 0,1 μ s para Ethernet de 10 Mbps; para K=1023, tempo de espera é de aprox. 50 msec

"Exponential Backoff"

- ❑ **Objetivo:** adaptar tentativas de retransmissão à carga atual estimada da rede
 - carga pesada: espera aleatória mais longa
- ❑ Esperar $K \cdot 512$ BTT
- ❑ primeira colisão: escolher K entre {0,1};
- ❑ segunda colisão: escolher K entre {0,1,2,3}
- ❑ ...
- ❑ após 10 ou mais colisões, escolher K entre {0,1,2,3,4,...,1023}

58

Ethernet - Eficiência

- ❑ **Eficiência** com tráfego pesado e número grande de nós:

$$Eficiência = \frac{1}{1 + (5 * \frac{t_{prop}}{t_{trans}})}$$

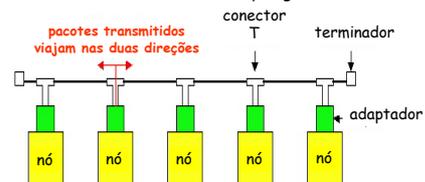
t_{prop} = tempo máximo de propagação entre 2 nós
 t_{trans} = tempo para transmitir um quadro de tamanho máximo

- Quando t_{prop} tende a 0 a eficiência tende a 1
- Quando t_{trans} tende a infinito a eficiência tende a 1
- Muito melhor que ALOHA, e ainda descentralizado, simples e barato

59

Tecnologias Ethernet: 10Base2

- ❑ 10: 10Mbps; 2: comprimento máximo do cabo de 200 metros (de fato, 185 metros)
- ❑ Utiliza cabo coaxial fino numa topologia em barramento

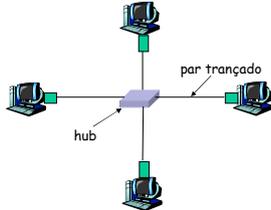


- ❑ repetidores são usados para conectar múltiplos segmentos (até um máximo de 4)
- ❑ repetidor repete os bits que ele recebe numa interface para as suas outras interfaces: atua somente na camada física!

60

10BaseT e 100BaseT

- ❑ Taxas de 10 e 100 Mbps
- ❑ A de taxa 100 Mbps é chamada de "Fast Ethernet"
- ❑ T significa "Twisted Pair" (par trançado)
- ❑ Nós conectados a um concentrador ("hub"): "topologia em estrela"; distância máxima de 100m entre um nó e o *hub*



61

10BaseT e 100BaseT (cont.)

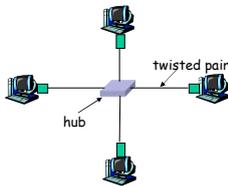
- ❑ Distância máxima do nó ao *hub*: 100 metros
- ❑ Hub pode desconectar da rede um adaptador que não pára de transmitir ("*jabbering adapter*") - 10Base2 não funcionaria...
- ❑ Hub pode coletar e monitorar informações e estatísticas para apresentação ao administradores da LAN
- ❑ 10BaseT usa codificação Manchester.
- ❑ 100BaseT usa 4B5B (5 *clocks* para transmitir 4 bits)

62

Hubs

Hubs são essencialmente repetidores da camada física:

- bits vindos de um enlace vão para todos os demais enlaces
- ... à mesma velocidade
- não há armazenamento de quadros (*buffering*)
- não há CSMA/CD no hub: adaptadores detectam as colisões
- oferece funções de gestão de rede



63

Gbit Ethernet (IEEE 802.3z)

- ❑ Usa formato do quadro Ethernet padrão
- ❑ Permite enlaces ponto-a-ponto (com *switches*) e canais de difusão compartilhados (com *hubs*)
- ❑ Em modo compartilhado, usa CSMA/CD;
 - para ser eficiente, as distâncias entre os nós devem ser curtas (poucos metros)
- ❑ *hubs* chamados de Distribuidores com Buffers ("Buffered Distributors")
- ❑ Full-Duplex em 1 Gbps para enlaces ponto-a-ponto
- ❑ 10 Gbps, atualmente

64

Camada de Enlace

- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Detecção e correção de erros
- ❑ 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.5 Ethernet
- ❑ **5.6 Interconexões: distribuidores e computadores (*Hubs and switches*)**
- ❑ 5.7 PPP
- ❑ 5.8 Virtualização de enlace : ATM e MPLS

65

Interconexão de LANs

- ❑ Por que não somente 1 grande LAN ?
 - Limitação de tráfego
 - em uma única LAN todas as estações compartilham a largura de banda
 - Limitação de distância
 - 802.3 especifica o comprimento máximo do cabo
 - Grande "domínio de colisão"
 - pode-se colidir com muitas estações
 - Limitação do número de estações
 - passagem de *ficha* provoca atraso em cada estação, p. ex.

66

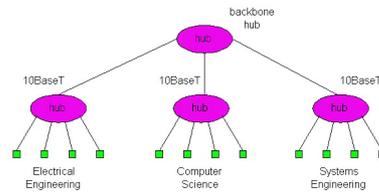
Hubs e Computadores

- ❑ Usados para estender redes locais: cobertura geográfica, número de nós, funcionalidade administrativa, etc.
- ❑ Diferem entre si em respeito a:
 - isolamento de domínios de colisão
 - camada em que operam
- ❑ Diferentes de roteadores:
 - "plug and play"
 - não provêm roteamento ótimo de pacotes IP

67

Hubs

- ❑ Dispositivos de camada física
 - repetem os bits recebidos numa interface para as demais
- ❑ Podem ser dispostos numa hierarquia (*multi-tier hub desing*)



68

Hubs (cont.)

Vantagens de Hubs:

- Dispositivos simples e baratos
- Configuração em múltiplos níveis provê degradação paulatina: porções da rede local continuam a operar se um dos hubs parar de funcionar
- Estende a distância máxima entre pares de nós

69

Hubs (cont.)

❑ Limitações

- Domínio de colisão único não leva a aumento na vazão máxima
 - a vazão no caso de múltiplos níveis é igual à de um único segmento
- As tecnologias Ethernet (10Base@, 10BaseT etc.) estabelecem limites no número de nós no mesmo domínio de colisão, distância entre hospedeiros e número máximo de níveis (*tiers*)
- Não se pode misturar Ethernet 10BaseT e 100Base)

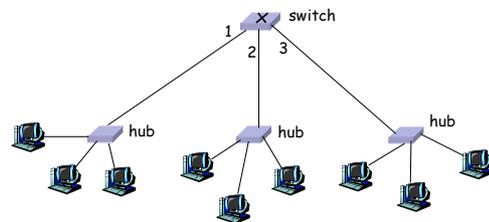
70

Computador (Switch)

- ❑ **Dispositivo da camada de enlace**
 - Armazena e reenvia quadros Ethernet
 - Encaminha os quadros a partir dos respectivos endereços MAC de destino
 - Quando quer repassar um quadro para um segmento, usa o CSMA/CD para acessar o segmento
- ❑ Transparente
 - Hospedeiros não sabem da presença do switch
- ❑ *plug-and-play*, auto-aprendizado
 - Não precisam ser configurados

71

Repassa (forwarding)



- Com se determina para que segmento de LAN se deve repassar um quadro?
- Parece um problema de roteamento...

72

Auto-aprendizado

- ❑ Comutador tem uma tabela de comutação (*switch table*)
- ❑ Entrada na tabela de comutação:
 - (Endereço MAC, Interface, Selo do Tempo)
 - Entradas antigas descartadas
- ❑ O comutador *aprende* que nós são alcançáveis através de suas interfaces
 - Quando um quadro é recebido, "aprende" a localização do remetente: segmento de LAN de chegada

73

Filtragem e Repasse

Quando um quadro é recebido:

```

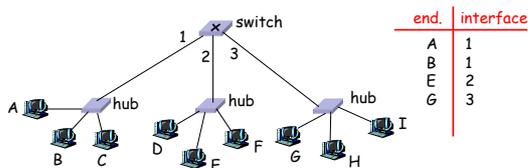
indexar a tabela de comutação usando o end. MAC destino
se entrada encontrada
então {
  se destino no segmento de onde o quadro foi recebido
  então descartar o quadro
  senão repassar o quadro para a interface indicada (CSMA/CD)
}
senão inundar
    
```

Repassar a todas as interfaces exceto àquela por onde chegou o quadro

74

Exemplo

Suponha que C envia quadro para D

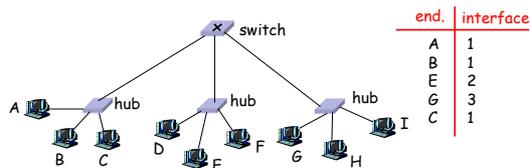


- ❑ *Switch* recebe o quadro de C
 - registra na tabela que C está na interface 1
 - como D não está na tabela, repassa o quadro para as interfaces 2 e 3
- ❑ quadro recebido por D

75

Exemplo

Suponha que D responde para C

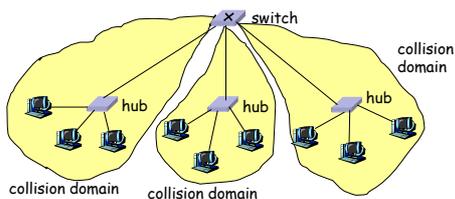


- ❑ *Switch* recebe o quadro de D
 - registra na tabela que D está na interface 2
 - como C está na tabela, repassa o quadro apenas para a interface 1
- ❑ quadro recebido por C

76

Comutador: isolamento de tráfego

- ❑ A instalação de um comutador divide uma subrede em vários segmentos de LAN
- ❑ Comutador *filtra* os quadros:
 - segmentos tornam-se diferentes **domínios de colisão**

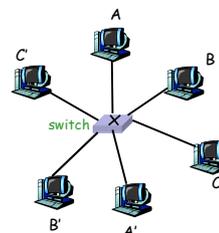


77

Comutador: acesso dedicado

- ❑ Comutadores com muitas interfaces
- ❑ Hospedeiros têm conexão direta com o comutador
- ❑ Sem colisões; *full duplex*

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



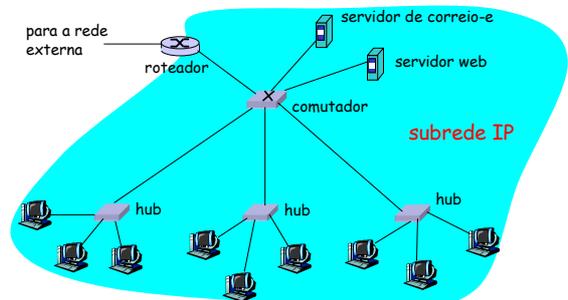
78

Comutador ...

- ❑ Alguns comutadores implementam *cut-through*
 - o quadro é repassado sem esperar a montagem do quadro inteiro no buffer do comutador
 - pequena redução da latência
- ❑ Combinações de interfaces compartilhadas/dedicadas de 10/100/1000 Mbps

79

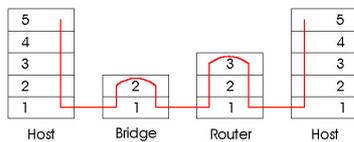
Rede institucional



80

Comutadores vs. Roteadores

- ❑ ambos são dispositivos do tipo armazena-e-repassa
 - roteadores: dispositivos da camada de rede (examinam cabeçalhos da camada de rede)
 - comutadores: dispositivos da camada de enlace
- ❑ roteadores mantêm tabelas de rotas e implementam algoritmos de roteamento;
- ❑ comutadores mantêm tabelas de filtragem, implementam filtragem



81

Comparação Sumária

	hubs	routers	switches
traffic isolation	no	yes	yes
plug & play	yes	no	yes
optimal routing	no	yes	no
cut through	yes	no	yes

82

Camada de Enlace

- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Detecção e correção de erros
- ❑ 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.5 Ethernet
- ❑ 5.6 Distribuidores e comutadores (*Hubs and switches*)
- ❑ 5.7 PPP
- ❑ 5.8 Virtualização de enlace : ATM e MPLS

83

Controle de Enlace Ponto-a-Ponto

- ❑ Um transmissor, um receptor, um enlace: mais fácil que um enlace *broadcast*:
 - não há Controle de Acesso ao Meio
 - não há necessidade de endereçamento MAC explícito
 - ex., enlace discado, linha ISDN
- ❑ protocolos ponto-a-ponto populares para camada de enlace:
 - PPP (point-to-point protocol)
 - HDLC: High-level Data Link Control (A camada de enlace costumava ser considerada de alto nível na pilha de protocolos!)

84

Protocolo Ponto-a-Ponto (PPP)

- PPP é muito popular: usado em conexões discadas entre sistema doméstico e provedor, em conexões SONET/SDH, etc
- PPP é extremamente simples (o mais simples dos protocolos de enlace de dados) e muito otimizado

85

PPP: Requisitos de Projeto [RFC 1577]

- **Enquadramento de pacotes:** encapsulamento do datagrama da camada de rede no quadro da camada de enlace
- **Transparência de bits:** deve transportar qualquer padrão de bits no campo de dados
- **Múltiplos protocolos da camada de rede** (não apenas o IP) *ao mesmo tempo*
 - capacidade de separar os protocolos na recepção
 - Campo 'tipo de protocolo' como no IP?
- **Múltiplos tipos de enlace:** seriais, paralelos, síncronos, assíncronos, elétricos, ópticos ...
- **Deteção de erros** (mas não correção)
- **connection liveness:** detecta e informa falhas do enlace para a camada de rede
- **Negociação de endereço da camada de rede:** as camadas de rede comunicantes devem poder aprender ou configurar mutuamente seus endereços de rede
- **Simplicidade!**

86

Nem tudo foi requerido do PPP

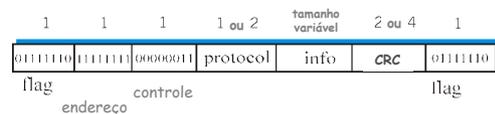
- não há correção nem recuperação de erros
- não há controle de fluxo
- aceita entregas fora de ordem (embora seja pouco comum)
- não há necessidade de suportar enlaces multiponto (ex., *polling*)
 - HDLC os permite

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

87

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



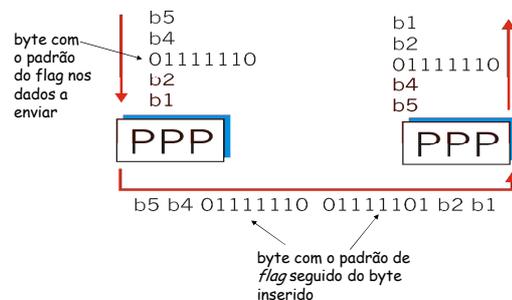
88

Byte Stuffing

- Requisito de "**transparência de dados**": o campo de dados deve poder incluir o padrão correspondente ao flag <01111110>
- **Transmissor:** acrescenta ("*stuffs*") um byte extra com o padrão <01111101> (escape) antes de cada byte de dados <01111110>
- **Receptor:**
 - dois bytes 01111101 seguidos : descarta o primeiro e continua a recepção de dados
 - um byte 01111110: *flag*
- Em enlaces síncronos orientados a bit, usa-se *bit stuffing*:
 - depois de uma seqüência de 5 bits '1', o transmissor insere um bit '0';

89

Byte Stuffing

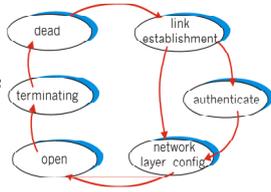


90

PPP: Protocolo de Controle de Enlace (LCP) e Controle de Rede

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

- ❑ configurar o enlace PPP (PPP-LCP): (tamanho máximo do quadro, autenticação)
- ❑ aprender/configurar informações da camada de rede
 - para o IP: mensagens do Protocolo de Controle IP (IPCP) para configurar/aprender os endereços IP



91

Camada de Enlace

- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Detecção e correção de erros
- ❑ 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.5 Ethernet
- ❑ 5.6 Distribuidores e computadores (*Hubs and switches*)
- ❑ 5.7 PPP
- ❑ **5.8 Virtualização de enlace : ATM e MPLS**

92

ATM e MPLS

- ❑ ATM, MPLS redes com arquiteturas próprias
 - modelos de serviço, endereçamento e roteamento diferentes dos da Internet
- ❑ Vistos pela Internet como enlaces lógicos conectando roteadores IP
 - assim como um enlace discado é parte de uma rede separada (a rede de telefonia)
- ❑ ATM, MPLS: de interesse técnico por si mesmas

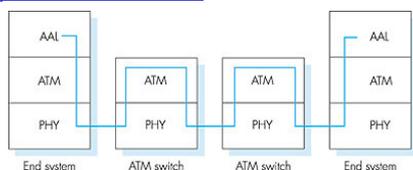
93

ATM: Modo de Transferência Assíncrono

- ❑ Padrão dos anos 1990/00 para a arquitetura de alta velocidade (155, 622Mbps, ...) da *Broadband Integrated Service Digital Network* (B-ISDN)
- ❑ **Objetivo: transporte integrado fim-a-fim de voz, vídeo e dados**
 - 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

94

Arquitetura ATM



- ❑ **camada de adaptação**: apenas na borda de uma rede ATM
 - grosseiramente análoga à camada de transporte da Internet
 - "adapta" camadas superiores (aplicações IP ou nativas ATM) para a camada ATM abaixo
- ❑ **camada ATM**: camada de "rede"
 - comutação de células, roteamento
- ❑ **camada física**

95

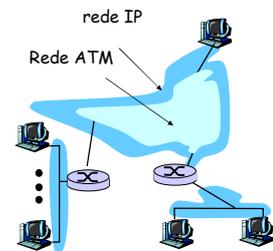
ATM: camada de rede ou de enlace?

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



96

Camada ATM

Serviço: transporte de células através da rede ATM

- o análoga à camada de rede IP
- o Serviços muito diferentes da camada de rede IP

Arquitetura de Rede	Modelo de Serviço	Banda	Garantias ?			Aviso de Congestão
			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

97

Camada ATM: Circuitos Virtuais

- **Transporte em CV:** células (53 bytes) são transportadas sobre CV da fonte ao destino
 - o estabelecimento de conexão necessário *antes* que o fluxo de dados possa ser iniciado
 - o cada pacote transporta um identificador de CV (não transporta o endereço do destino)
 - o cada comutador no caminho entre a fonte e o destino mantém o "estado" para cada conexão passante
 - o recursos do enlace e do comutador (banda passante, *buffers*) podem ser *alocados* ao CV: para obter um comportamento semelhante ao de um circuito físico
- **CVs Permanentes (PVC)**
 - o conexões de longa duração
 - o tipicamente: rota "permanente" entre roteadores IP
- **CVs Comutados (SVC):**
 - o conexões de curta duração
 - o dinamicamente criados com base nas chamadas

98

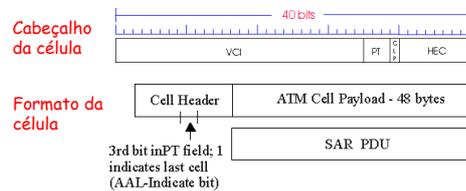
CVs ATM

- **Vantagens do uso de circuitos virtuais no ATM:**
 - o Consegue garantir níveis de QoS para conexões mapeadas em circuitos virtuais (banda passante, atraso, variância de atraso)
- **Problemas no uso de circuitos virtuais:**
 - o O tráfego de datagramas é ineficiente
 - o um PVC entre cada par origem/destino não é escalável (N^2 conexões são necessárias)
 - o SVC introduz latência de estabelecimento de conexão e atrasos de processamento para conexões de curta duração

99

Camada ATM: célula ATM

- Cabeçalho da célula ATM com 5 bytes
- Carga útil com 48-bytes
 - o Por que?
 - o carga útil pequena -> pequeno atraso de criação de célula para voz digitalizada



100

Camada ATM: Cabeçalho da célula ATM

- **VCI:** identificador de canal virtual
 - o pode *mudar* de enlace para enlace através da rede
- **PT:** Tipo de *payload* (carga).
 - o Ex.: célula de gerenciamento versus célula de dados
- **CLP:** bit de Prioridade de Perda de Célula (*Cell Loss Priority*)
 - o CLP = 1 implica célula de baixa prioridade -> pode ser descartada em caso de congestionamento
- **HEC:** Verificação de Erros no Cabeçalho
 - o verificação cíclica de erros



101

Camada Física ATM ...

Compõe-se de *duas* partes (subcamadas):

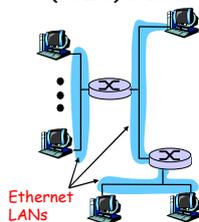
- **Transmission Convergence Sublayer - TCS:** adapta a camada ATM acima à subcamada física abaixo (PMD)
- **Physical Medium Dependent Sublayer - PMD:** depende do tipo de meio físico sendo empregado

102

IP-sobre-ATM

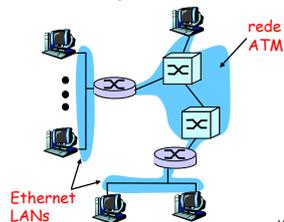
Apenas IP Clássico

- 3 "redes" (ex., segmentos de LAN)
- endereços MAC (802.3) e IP



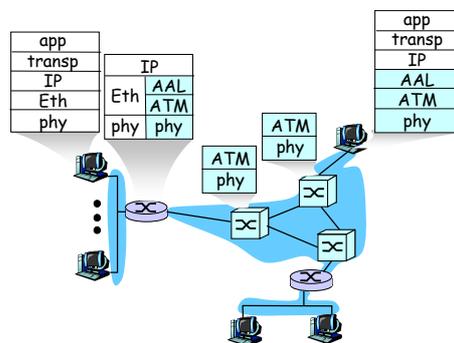
IP sobre ATM

- substitui "rede" (ex., segmento de LAN) por rede ATM
- endereços ATM, endereços IP



103

IP-sobre-ATM



104

Viagem de um Datagrama numa Rede IP-sobre-ATM

Hospedeiro de Origem:

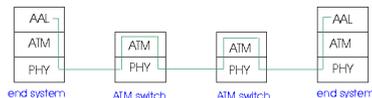
- Camada IP encontra um mapeamento entre o endereço IP e o endereço de destino ATM (usando ATM-ARP)
- passa o datagrama para a camada de adaptação AAL5
- AAL5 encapsula os dados (datagrama), segmenta em células, e passa para a camada ATM

Rede ATM:

- move a célula para o destino, de computador a computador, de acordo com o seu CV (circuito virtual)

Hospedeiro de Destino:

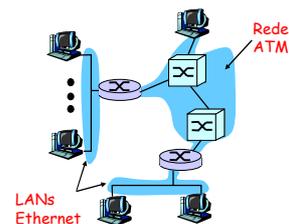
- AAL5 remonta o datagrama original a partir das células recebidas
- se o CRC OK, datagrama é passado ao IP



105

IP-sobre-ATM

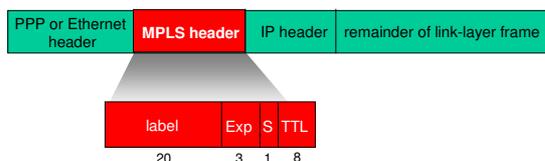
- datagramas IP em PDUs ATM AAL5
- de endereços IP para endereços ATM
 - como de endereços IP para endereços MAC 802.3



106

Multiprotocol label switching (MPLS)

- Objetivo inicial: acelerar o repasse de datagramas IP usando um rótulo de tamanho fixo
 - usa idéias da abordagem de Circuitos Virtuais



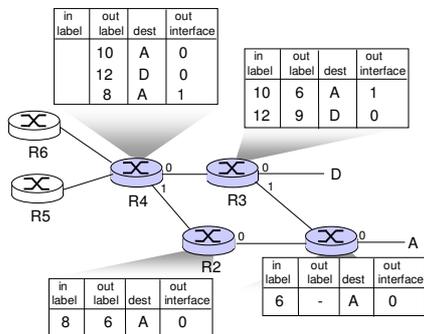
107

Roteadores habilitados para MPLS

- Roteadores de chaveamento de rótulos (*label-switched router*)
- Repassa pacotes para as interfaces de saída baseado apenas no valor do rótulo (não inspeciona o endereço IP)
 - tabela de repasse de MPLS, diferente da tabela de repasse IP
- Necessário um protocolo de sinalização
 - RSVP-TE
 - Repassa possível através de caminhos que o IP sozinho não permitiria (p.ex. roteamento específico para fonte - *source-specific routing*)
 - MPLS pode ser usado para engenharia de tráfego
- Deve coexistir com roteadores que entendem apenas IP

108

Tabelas de repasse MPLS



109

Camada de Enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Distribuidores e computadores (*Hubs and switches*)
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização de enlace : ATM e MPLS

110