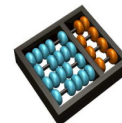


Camada de Enlace de Dados

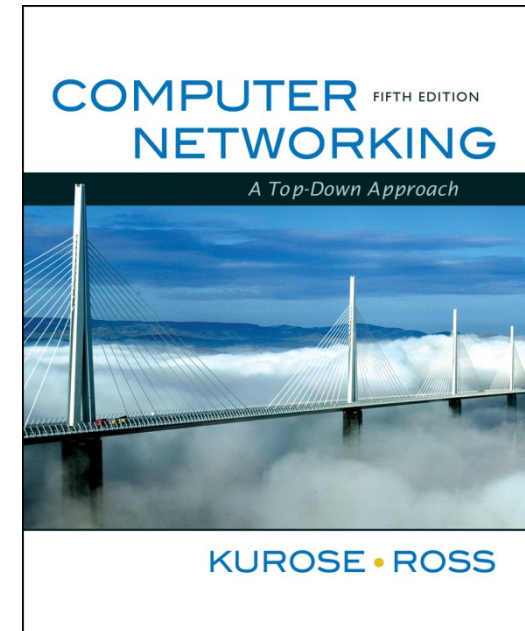
Prof Nelson Fonseca

<http://www.ic.unicamp.br/~nfonseca/redes/inf502>



Chapter 5

Link Layer and LANs



A note on the use of these ppt slides:

We're making these slides freely available to all (faculty, students, readers). They're in PowerPoint form so you can add, modify, and delete slides (including this one) and slide content to suit your needs. They obviously represent a *lot* of work on our part. In return for use, we only ask the following:

- ❑ If you use these slides (e.g., in a class) in substantially unaltered form, that you mention their source (after all, we'd like people to use our book!)
- ❑ If you post any slides in substantially unaltered form on a www site, that you note that they are adapted from (or perhaps identical to) our slides, and note our copyright of this material.

Thanks and enjoy! JFK/KWR

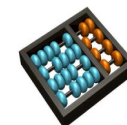
All material copyright 1996-2009

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

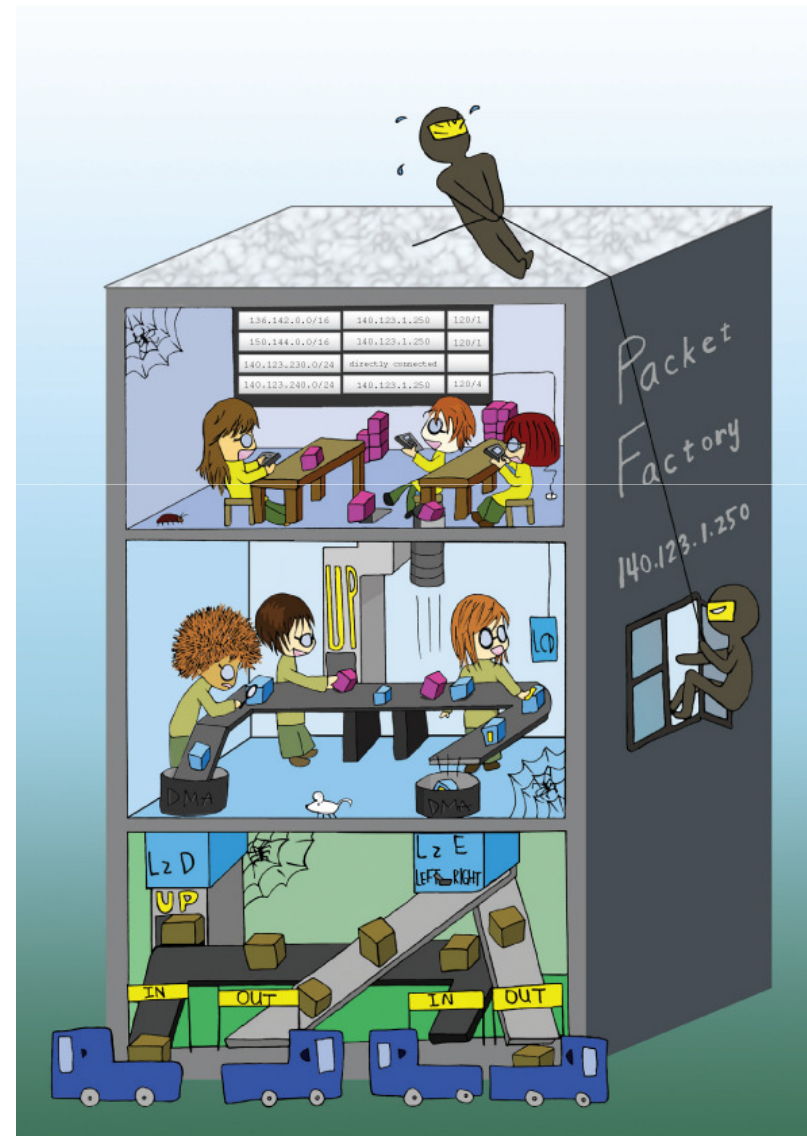


Curso de Especialização em Redes de Computadores – INF502

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



- Alguns slides nesse arquivo foram gentilmente cedidos pelos autores do livro:
- **Computer Networks: An Open Source Approach**, Ying-Dar Lin, Ren-Hung Hwang, Fred Baker, published by McGraw Hill, Feb 2011



Capítulo 5: A Camada de Enlace

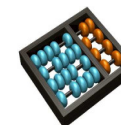
Nossos objetivos:

- entender os princípios por trás dos serviços da camada de enlace:
 - ✓ detecção de erros, correção
 - ✓ compartilhando um canal 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



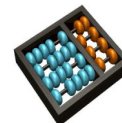
Visão Geral:

- serviços da camada de enlace
- detecção de erros, correção
- protocolos de acesso múltiplo e LANs
- endereçamento da camada de enlace, ARP
- tecnologias específicas da camada de enlace:
 - ✓ Ethernet
 - ✓ hubs, switches
 - ✓ PPP
 - ✓ ATM
 - ✓ MPLS



Camada de Enlace de Dados

- 5.1 **Introdução e Serviços**
- 5.2 Correção e detecção de
- 5.3 protocolos Múltiplo Acesso
- 5.4 Endereçamento
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização: ATM, MPLS

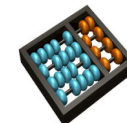
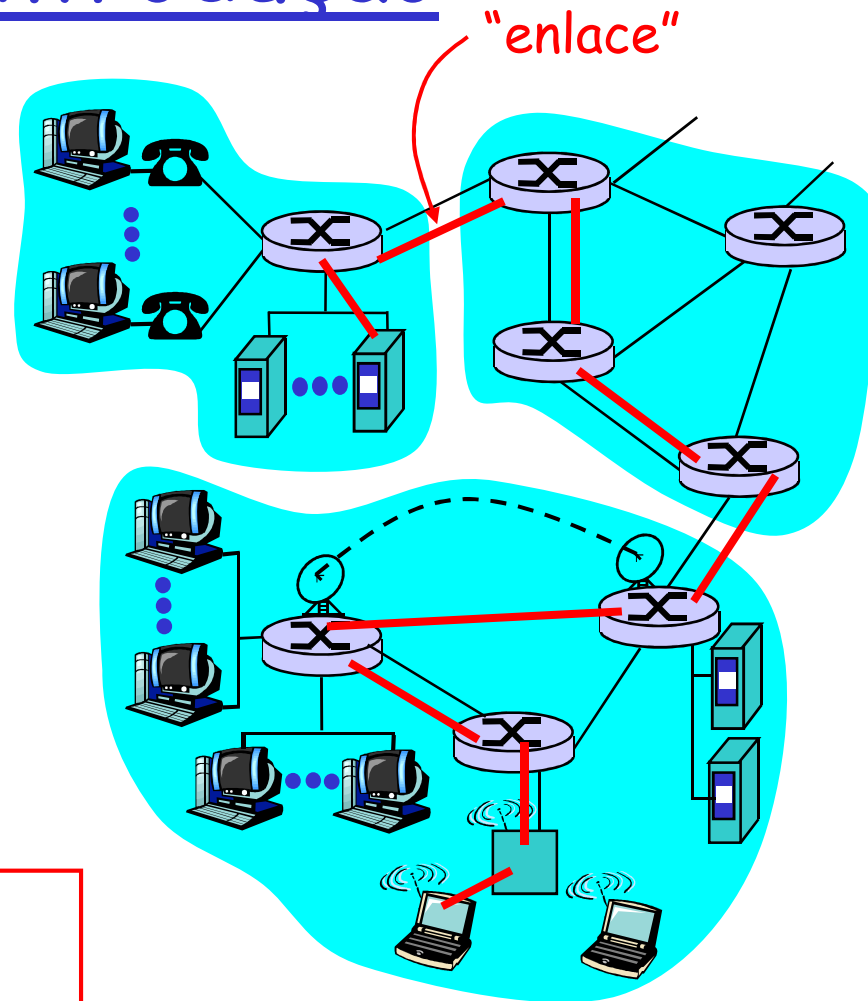


Camada de Enlace: Introdução

Alguns terminologias:

- hosts e roteadores são **nós** (pontes e comutadores também)
- **Enlaces** são canais de comunicação que conectam nós adjacentes ao longo dos caminhos de comunicação
 - ✓ Enlaces cabeados
 - ✓ Enlaces sem fios
 - ✓ LANs
- 2-PDU é um **quadro**, que encapsula um datagrama

Camada de enlace tem a responsabilidade de transferir datagramas de um nó para o nó adjacente sobre um enlace

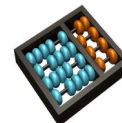


Camada de Enlace: contexto

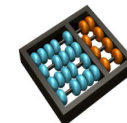
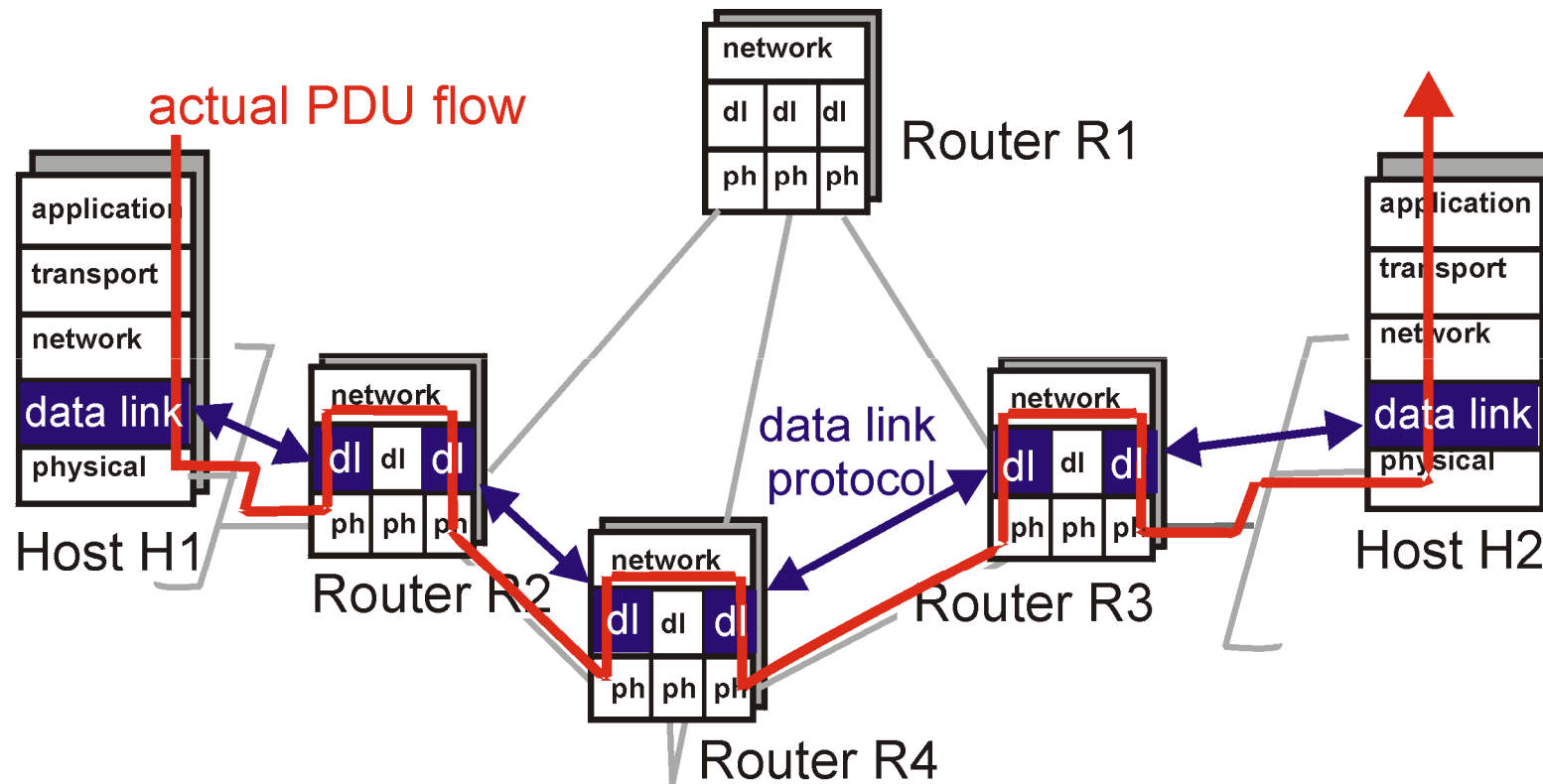
- Datagramas são transferidos por diferentes protocolos de enlace sobre diferentes tipos de enlace:
 - ✓ e.g., Ethernet no primeiro enlace, frame relay nos enlaces intermediários, e 802.11 no último enlace
- Cada protocolo de enlace provê diferentes serviços

Analogia de transporte

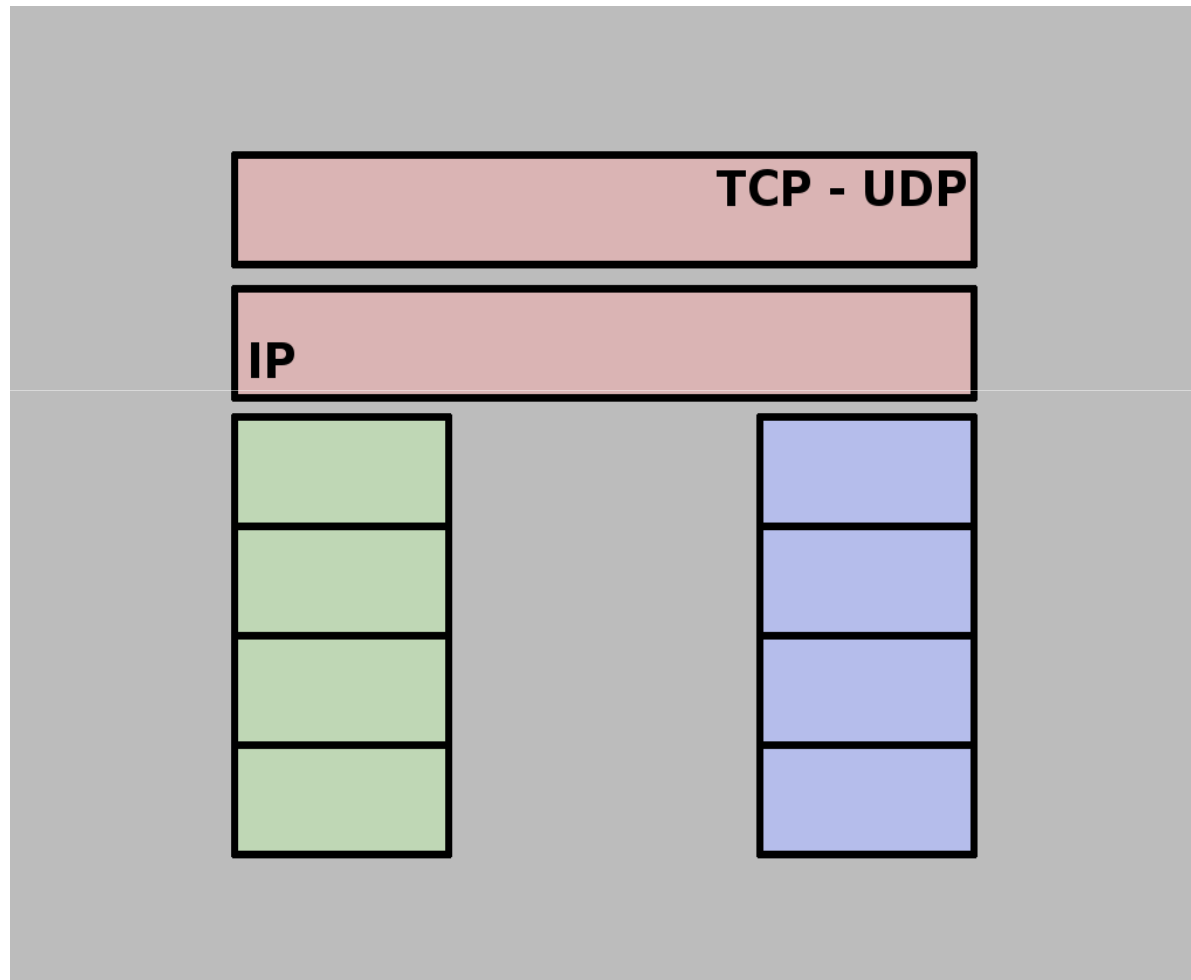
- Viagem de Campinas à Parintins
 - ✓ carro: Campinas a São Paulo
 - ✓ avião: São Paulo à Manaus
 - ✓ barco: Manaus à Parintins
- turista = **datagrama**
- Segmento de transporte = **enlace de comunicação**
- Modo de transporte = **protocolo da camada de enlace**
- Agente de viagem = **algoritmo de roteamento**



Protocolos da Camada de Enlace

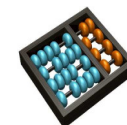


A Internet



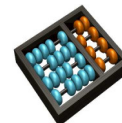
Tecnologia de redes

	PAN/LAN	MAN/WAN
Obsolete or Fading away	Token bus (802.4) Token ring (802.5) HIPPI Fiber Channel Isochronous (802.9) Demand Priority (802.12) ATM FDDI HIPERLAN	DQDB (802.6) B-ISDN HDLC X.25 Frame Relay SMDS ISDN
Mainstream or Still active	Ethernet (802.3) WLAN (802.11) Bluetooth (802.15) Fiber channel HomeRF HomePlug	Ethernet (802.3) Point-to-Point Protocol (PPP) DOCSIS xDSL SONET Cellular(3G, LTE, WiMAX(802.16)) Resilient Packet Ring (802.17) ATM



Serviços da Camada de Enlace

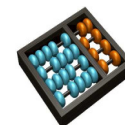
- **Enquadramento e acesso ao enlace:**
 - ✓ encapsula datagrama num quadro incluindo cabeçalho e cauda,
 - ✓ implementa acesso ao canal se meio for compartilhado,
 - ✓ 'endereços físicos' são usados em cabeçalhos de quadros para identificar origem e destino de quadros em enlaces multiponto
 - diferente do endereço IP !
- **Entrega confiável:**
 - ✓ já aprendemos como isto deve ser feito (capítulo 3)!
 - ✓ raramente usado em enlaces com baixa taxa de erro (fibra, alguns tipos de par trançado)
 - ✓ usada em enlaces sem-fio (wireless): altas taxas de erro
 - Q: porque prover confiabilidade fim-a-fim e na camada de enlace?



Enquadramento

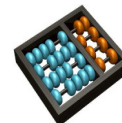
- Métodos para delimitar os quadros:
 - ✓ Caracteres especiais
e.g. STX (Start of text), ETX (End of text)
 - ✓ Padrão específico de bits
e.g. a bit pattern 01111110
 - ✓ Padrão específico de símbolo na camada física
e.g. /J/K/ and /T/R/ code group in 100BASE-X

- Bit (or byte) stuffing para evitar ambiguidade



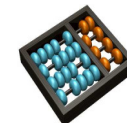
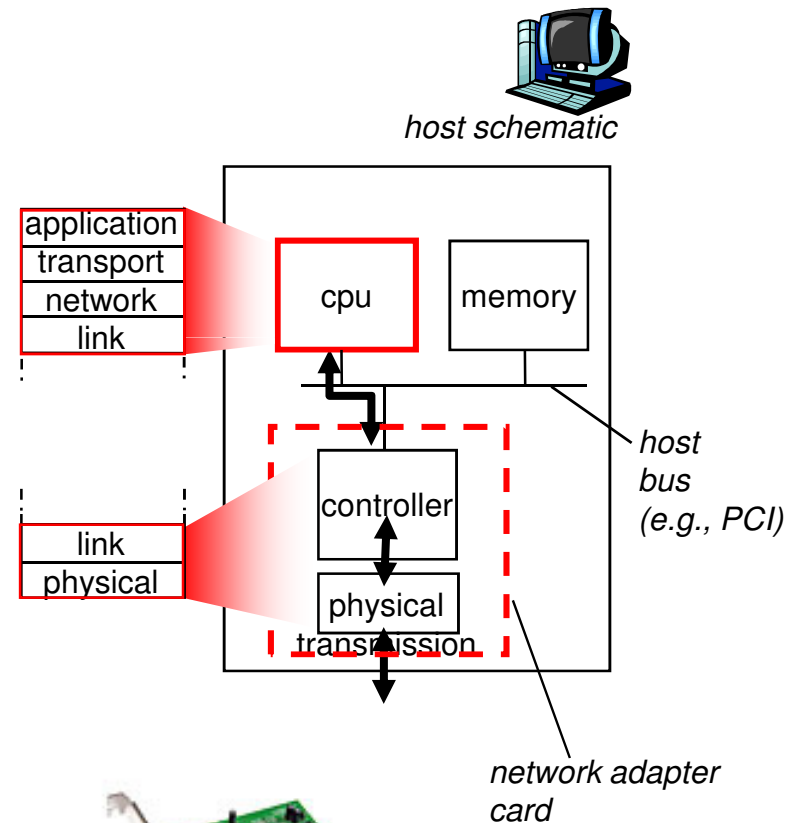
Serviços da Camada de Enlace (mais)

- **Controle de Fluxo:**
 - ✓ compatibilizar taxas de produção e consumo de quadros entre remetentes e receptores
- **Detecção de Erros:**
 - ✓ erros são causados por atenuação do sinal e por ruído
 - ✓ receptor detecta presença de erros
 - receptor sinaliza ao remetente para retransmissão, ou simplesmente descarta o quadro em erro
- **Correção de Erros:**
 - ✓ mecanismo que permite que o receptor localize e corrija o erro sem precisar da retransmissão
- **Half-duplex e full-duplex**
 - ✓ Com half duplex, os dois nós do enlace podem transmitir, mas não ao mesmo tempo



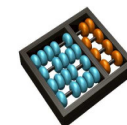
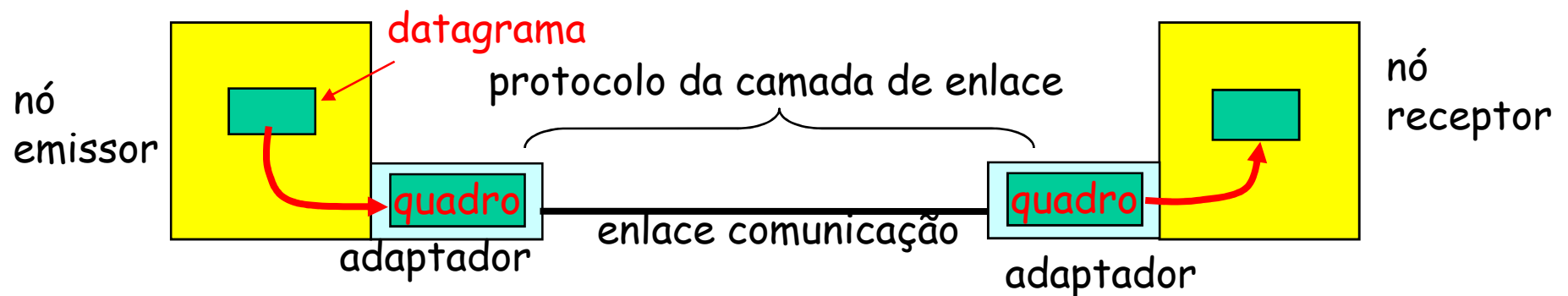
Aonde é implementado o protocolo de enlace de dados?

- Implementado em todos os host e interfaces
- Implementado na placa de redes" (*network interface card* NIC)
 - ✓ Ethernet card, PCMCIA card, 802.11 card
 - ✓ Implementa camada de redes e física correspondente
- Acoplado ao barramento da rede
- Combinação de hardware, software, firmware

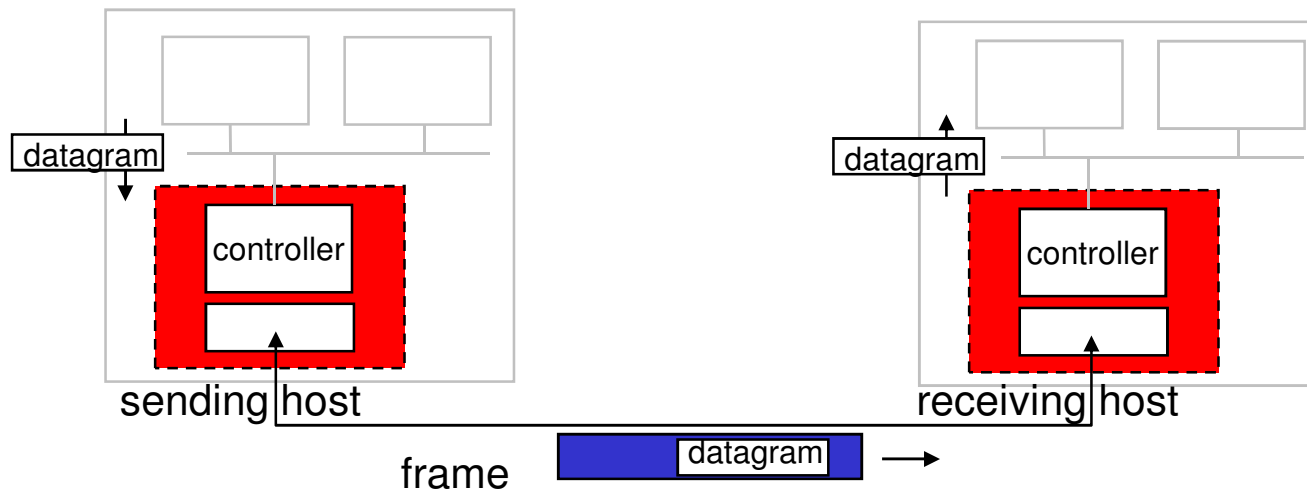


Implementação de Protocolo da Camada de Enlace

- Protocolo da camada de enlace é implementado totalmente no adaptador (p.ex., cartão PCMCIA).
 - ✓ Adaptador tipicamente inclui: RAM, circuitos de processamento digital de sinais, interface do barramento do computador, e interface do enlace
 - ✓ Adaptador é semi-autônomo
- Enlace e camadas físicas

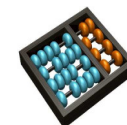


Implementação de Protocolo da Camada de Enlace



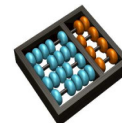
- **transmissão** do adaptador:
 - encapsula (coloca número de seqüência, info de realimentação, etc.)
 - inclui bits de detecção de erros
 - implementa acesso ao canal para meios compartilhados
 - coloca no enlace

- **recepção** do adaptador:
 - verificação e correção de erros
 - interrompe computador para enviar quadro para a camada superior
 - atualiza info de estado a respeito de realimentação para o remetente, número de seqüência, etc.



Camada de Enlace de Dados

- 5.1 Introdução e Serviços
- 5.2 Correção e detecção de erros
- 5.3 Protocolos Múltiplo Acesso
- 5.4 Endereçamento
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização: ATM, MPLS

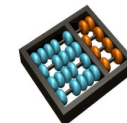
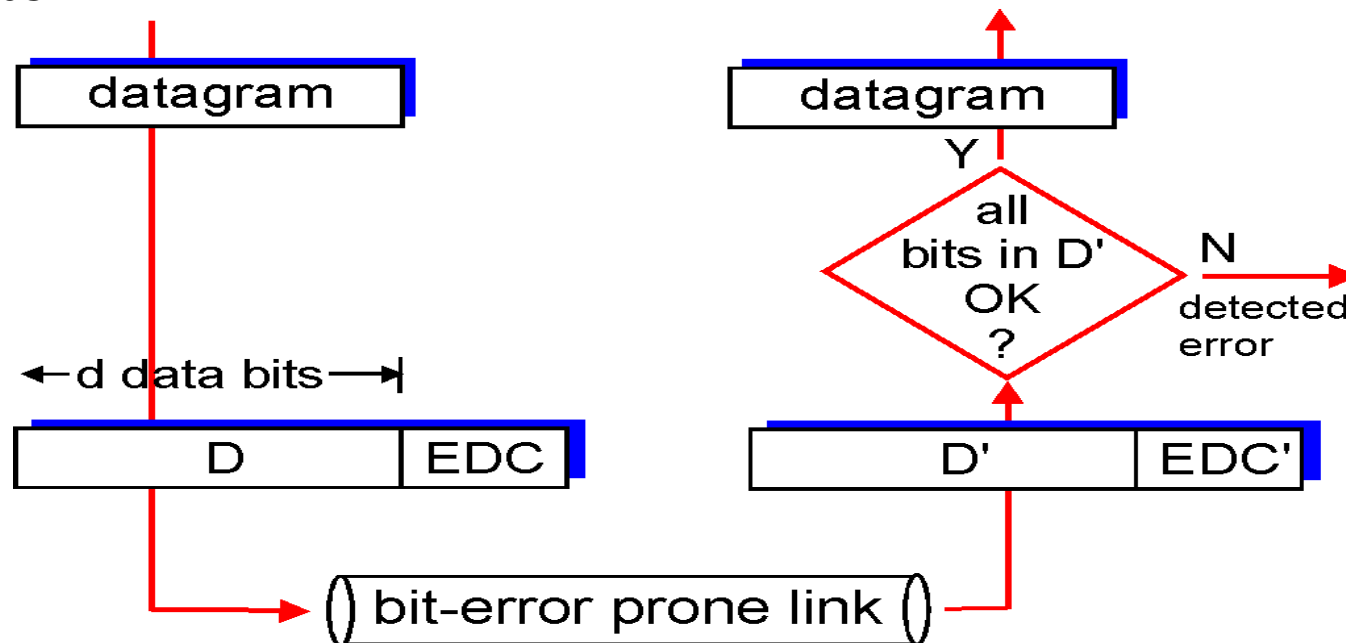


Detecção de Erros

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

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

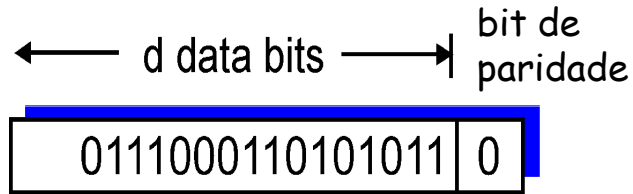
- detecção de erros não é 100% perfeita;
- protocolo pode não identificar alguns erros, mas é raro
- Quanto maior o campo EDC melhor é a capacidade de detecção e correção de erros



Uso de Bits de Paridade

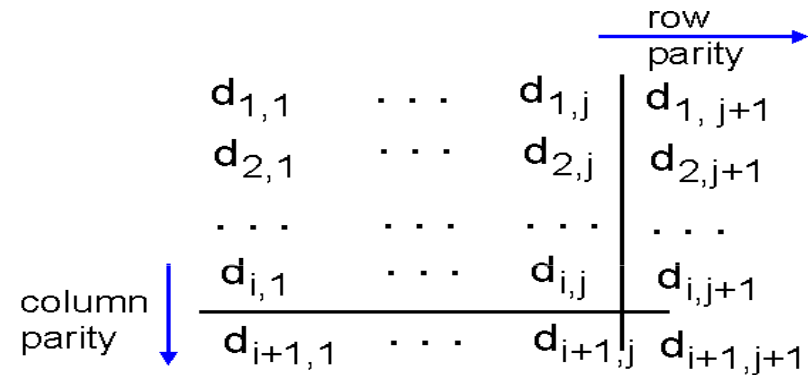
Paridade com Bit Único:

Detecta erro de um único bit



Paridade Bi-dimensional:

Detecta e corrige erros de um único bit



10101	1
11110	0
01110	1
00101	0

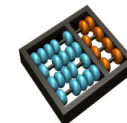
sem erros

10101	1
1 0110	0
01110	1
00101	0

erro de paridade

erro de 1 bit corrigível

erro de paridade



Checksum da Internet

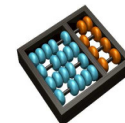
Objetivo: detectar "erros" (ex. bits trocados) num segmento transmitido (nota: usado *apenas* na camada de transporte)

Emissor:

- 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? Mais depois....*



Códigos de Redundância Cíclica (Cyclic Redundancy Codes):

- encara os bits de dados, D , como um número binário
- escolhe um padrão gerador de $r+1$ bits, 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 seqüência (burst errors) com comprimento menor que $r+1$ bits
- largamente usado na prática (ATM, HDCL)

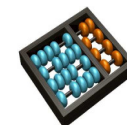
← d bits → ← r bits →



padrão de bits

$$D * 2^r \text{ XOR } R$$

fórmula matemática

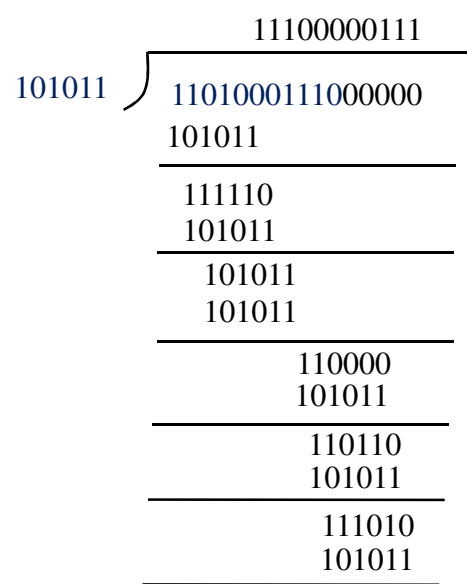


CRC

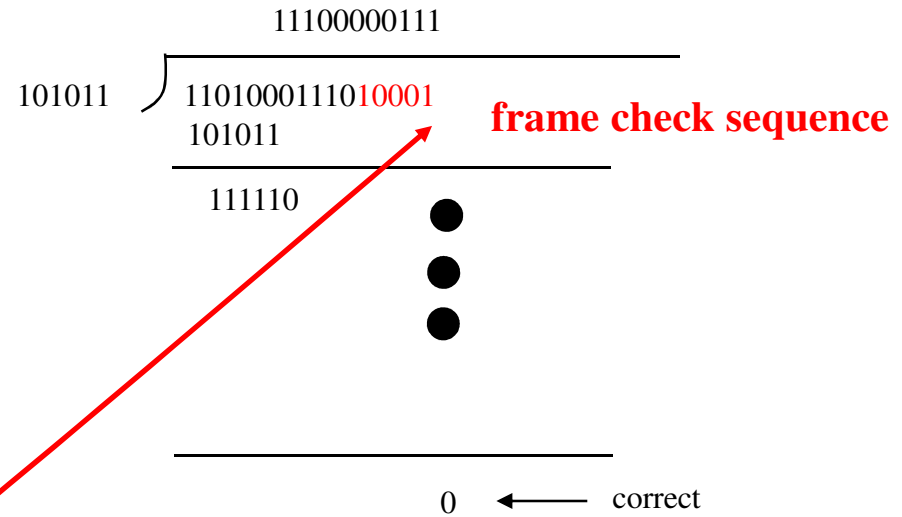
frame content: 11010001110(11 bits)

pattern: 101011 (6 bits)

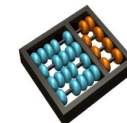
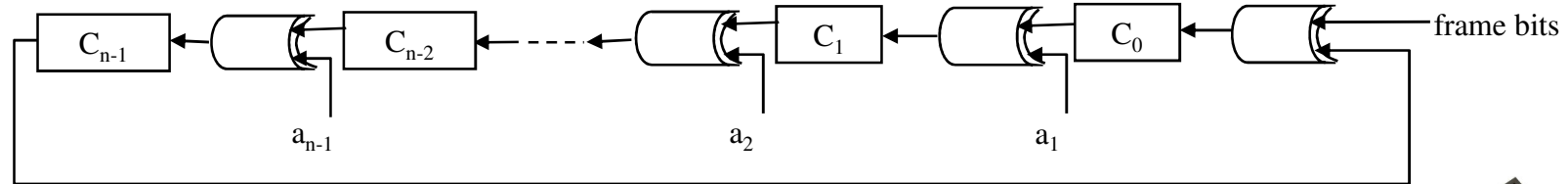
frame check sequence = (5 bits)



10001 ← the remainder

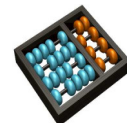


Hardware implementation



Implementação de CRC (cont)

- 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
- ATM utiliza um CRC de 32 bits em AAL5



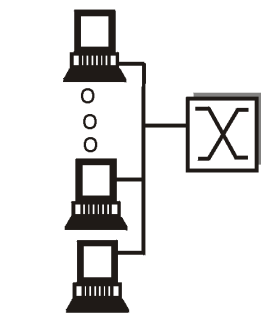
Enlaces e Protocolos de Múltiplo Acesso

Três tipos de enlace:

- (a) **Ponto-a-ponto** (um cabo único)
- (b) **Difusão** (cabo ou meio compartilhado:
Ethernet, 802.11 wireless LAN.)
- (c) **Comutado** (p.ex., E-net comutada, ATM, etc)

Começamos com enlaces com **Difusão**.

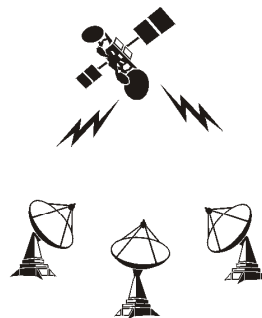
Desafio principal: **Protocolo de Múltiplo Acesso**



shared wire
(e.g. Ethernet)



shared wireless
(e.g. Wavelan)



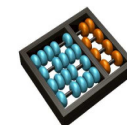
satellite



ZZZZZZZZZZZZZZZZ

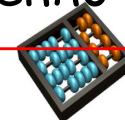


cocktail party



Protocolos de Acesso Múltiplo

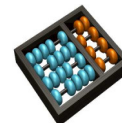
- canal de comunicação único e compartilhado
- duas ou mais transmissões pelos nós: interferência
 - ✓ apenas um nó pode transmitir com sucesso num dado instante de tempo
- **protocolo de múltiplo acesso:**
 - ✓ algoritmo distribuído que determina como as estações compartilham o canal, isto é, determinam quando cada estação pode transmitir
 - ✓ comunicação sobre o compartilhamento do canal deve utilizar o próprio canal!
 - ✓ o que procurar em protocolos de múltiplo acesso:
 - síncrono ou assíncrono
 - informação necessária sobre as outras estações
 - robustez (ex., em relação a erros do canal) desempenho



Protocolo de Acesso Múltiplo Ideal

Canal Broadcast com taxa de R bps

1. Quando um nó deseja transmitir, ele pode transmitir a taxa R
2. Quando M nós desejam transmitir, cada um transmite a uma taxa igual a R/M
3. Totalmente descentralizado.
 - ✓ Nenhum nó especial coordena as transmissões
 - ✓ Sem sincronização de relógios e de slots;
4. Simples

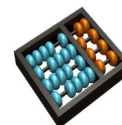


Protocolos MAC: uma taxonomia

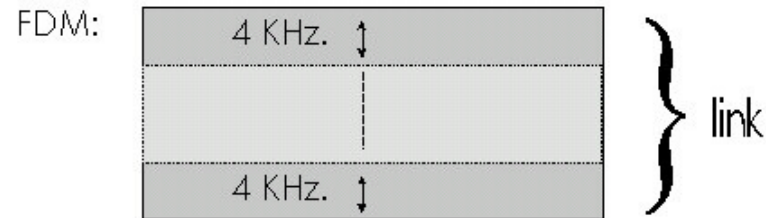
Três grandes classes:

- **Particionamento de canal**
 - ✓ dividem o canal em pedaços menores (compartimentos de tempo, frequência)
 - ✓ aloca um pedaço para uso exclusivo de cada nó
- **Acesso Aleatório**
 - ✓ permite colisões
 - ✓ "recuperação" das colisões
- **Passagem de Permissão (revezamento)**
 - ✓ compartilhamento estritamente coordenado para evitar colisões

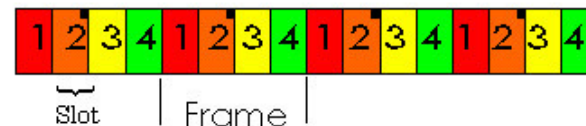
Objetivo: eficiente, justo, simples,
descentralizado



Protocolos de Particionamento do Canal

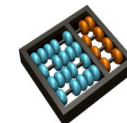


TDM:



All slots labelled  are dedicated to a specific sender-receiver pair.

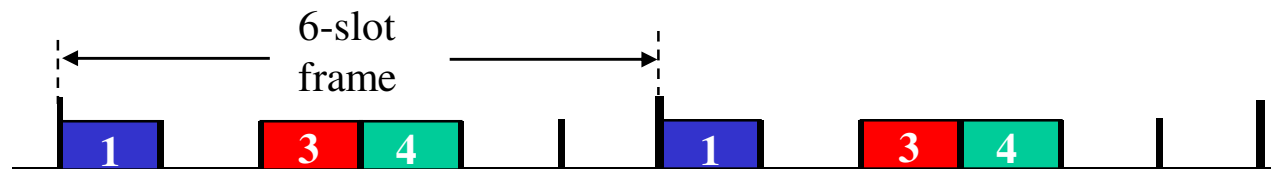
- **TDM** (Multiplexação por Divisão de Tempo): canal dividido em N intervalos de tempo ("slots"), um para cada usuário; ineficiente com usuários de pouco demanda ou quando carga for baixa.
- **FDM** (Multiplexação por Divisão de Frequência): frequência subdividida; mesmos problemas de eficiência do TDM.



Multiplexação por Divisão do Tempo

TDMA: acesso múltiplo por divisão temporal

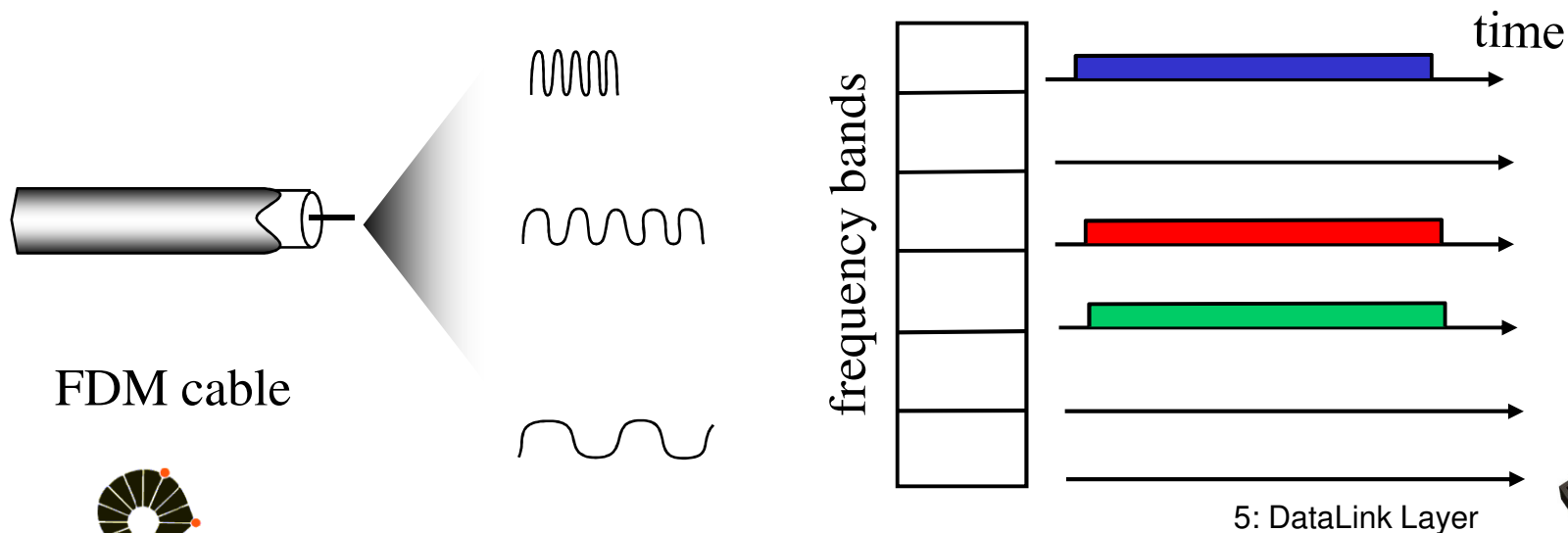
- acesso ao canal é feito por "turnos"
- cada estação controla um compartimento ("slot") de tamanho fixo (tamanho = tempo de transmissão de pacote) em cada turno
- compartimentos não usados são desperdiçados
- exemplo: rede local com 6 estações: 1,3,4 têm pacotes, compartimentos 2,5,6 ficam vazios



Multiplexação por Divisão da Frequência

FDMA: acesso múltiplo por divisão de frequência

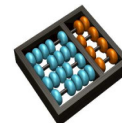
- o espectro do canal é dividido em bandas de frequência
- cada estação recebe uma banda de frequência
- tempo de transmissão não usado nas bandas de frequência é desperdiçado
- exemplo: rede local com 6 estações: 1,3,4 têm pacotes, as bandas de frequência 2,5,6 ficam vazias



Particionamento de Canal (CDMA)

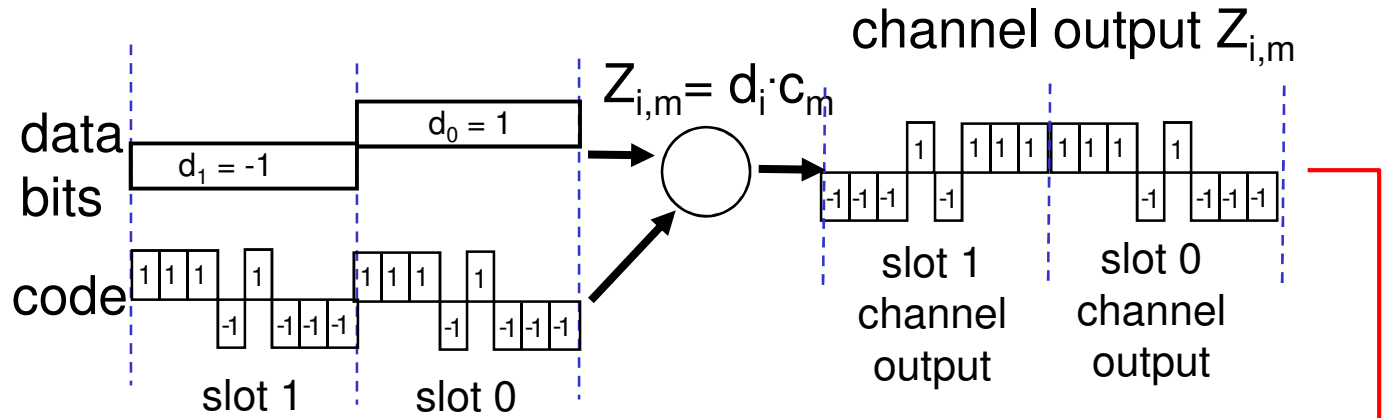
CDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Códigos)

- explora esquema de codificação de **espectro espalhado** - DS (*Direct Sequence*) ou FH (*Frequency Hopping*)
- "código" único associado a cada canal; ié, particionamento do **conjunto de códigos**
- muito usado em canais broadcast, sem-fio (celular, satélite, etc)
- todos usuários compartilham a **mesma frequência**, mas cada canal tem **sua própria seqüência de "chipping"** (ié, código)

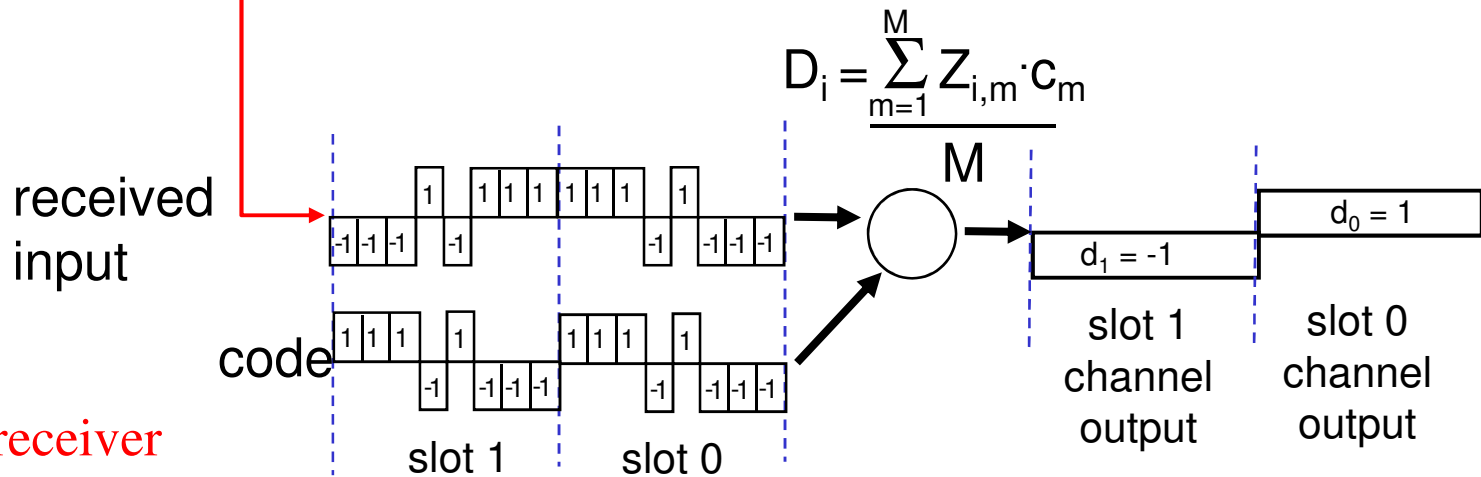


CDMA Encode/Decode

sender

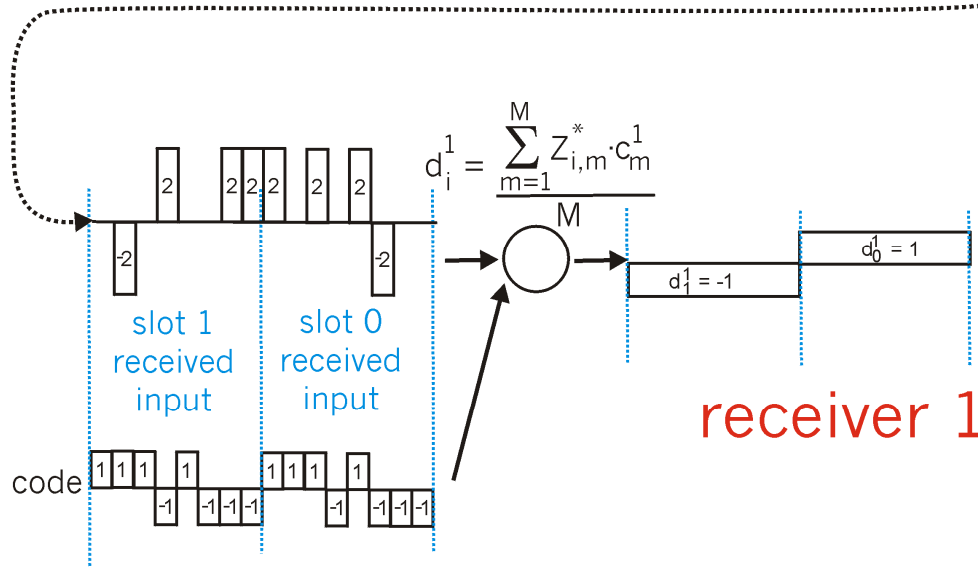
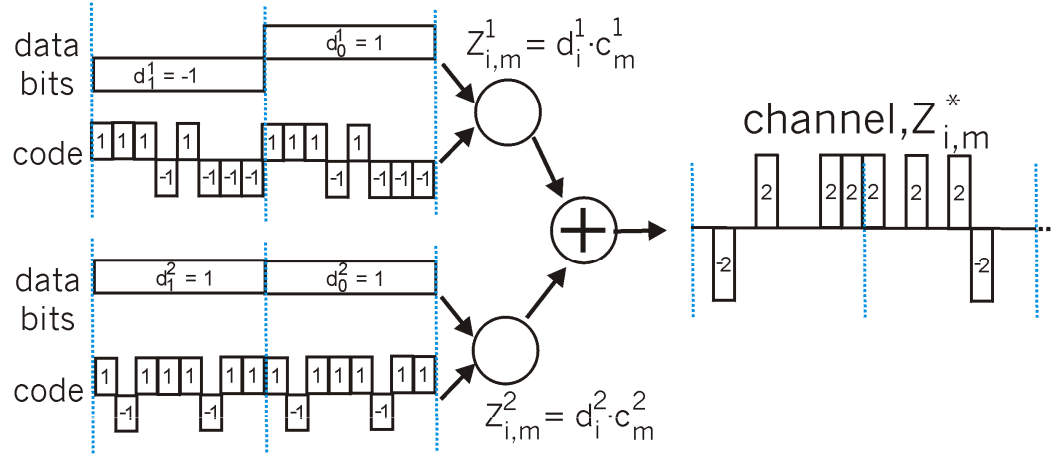


receiver



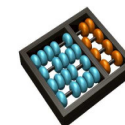
CDMA: two-sender interference

senders



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



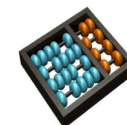
Slotted ALOHA

Considerações

- Todos os quadros tem o mesmo tamanho
- Tempo é dividido em intervalos iguais (tempo para transmitir um quadro)
- Os nós iniciam a transmissão apenas no início do intervalo;
- Nós são sincronizados
- Se 2 ou mais nós transmitem em um intervalo, todos os nós detectam colisão;

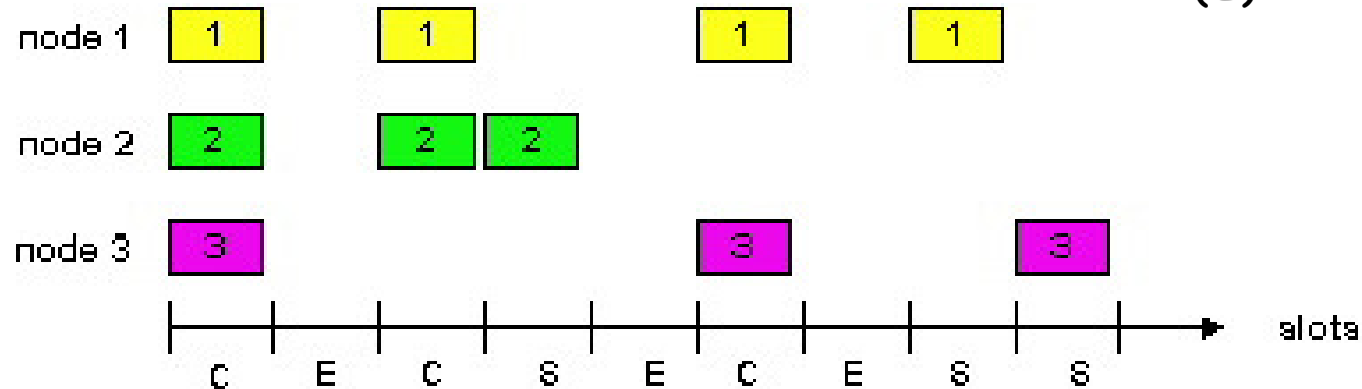
Operação

- Quando um nó tem um quadro novo para transmitir, ele tenta transmiti-lo no próximo intervalo;
- Se não há colisão, o nó pode enviar um novo quadro no próximo intervalo;
- Se tem colisão, o nó retransmite o quadro no intervalo subsequente com probabilidade p , até que o quadro seja transmitido com sucesso;



Slotted ALOHA

Intervalos com Sucesso (S), com Colisão (C), ou Vazios (E)



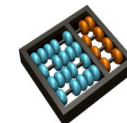
Pros

- Se há apenas um nó ativo, ele pode transmitir continuamente, utilizando toda a capacidade do canal;
- Altamente descentralizado: apenas os intervalos necessitam ser sincronizados;
- simples



Contras

- Colisões, desperdiça intervalos
- Intervalos vazios
- Nós devem ser capazes de detectar colisões em um intervalo de tempo menor que o tempo para transmitir o pacote;



Eficiência do Slotted Aloha

P: Qual a máxima fração de intervalos com sucesso?

R: Suponha que N estações têm pacotes para enviar cada uma transmite num intervalo com probabilidade p

✓ prob. sucesso de transmissão, S , é:

➤ por um único nó: $S = p(1-p)^{N-1}$;

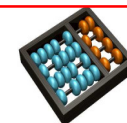
➤ por qualquer um dos N nós: $S = Np(1-p)^{N-1}$;

➤ Para eficiência máxima com N nós, deve-se escolher p^* que maximize, $Np(1-p)^{N-1}$

➤ Para vários nós, pega-se o limite de $Np^*(1-p^*)^{N-1}$ quando $N \rightarrow$ infinito, dá igual a $1/e = .37$

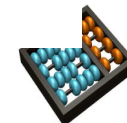
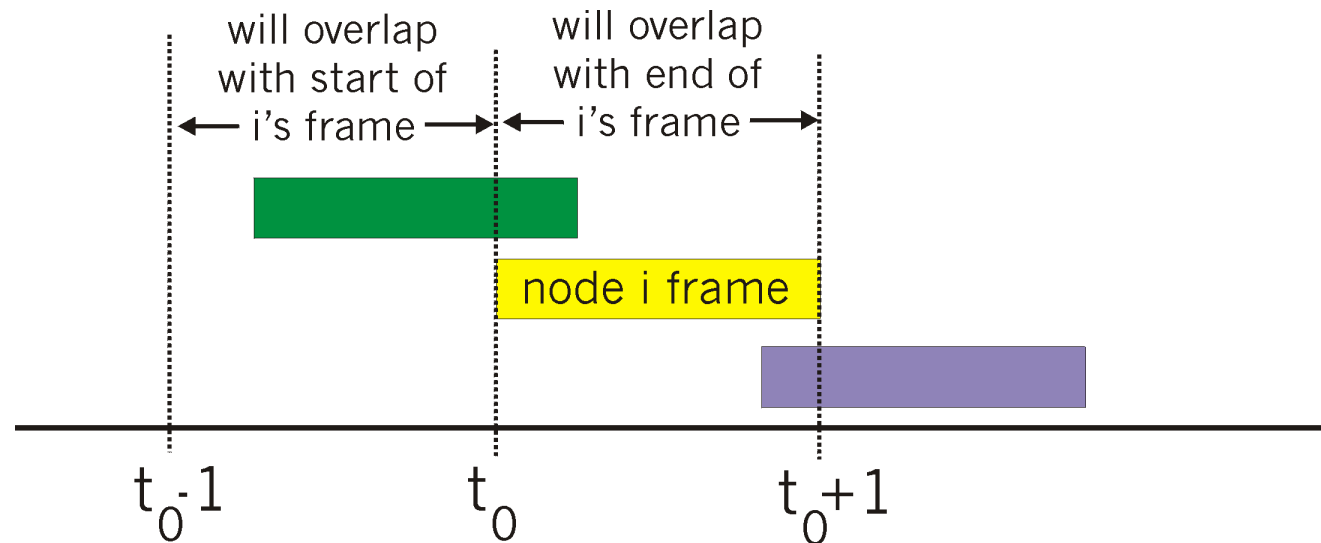
Eficiência é a fração final de intervalos bem-sucedidos no caso em que há um grande número de nós ativos, cada qual com uma grande quantidade de quadros a transmitir;

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



ALOHA Puro (unslotted)

- unslotted Aloha: operação mais simples, não há sincronização
- pacote necessita transmissão:
 - ✓ enviar sem esperar pelo início de um intervalo
- a probabilidade de colisão aumenta:
 - ✓ pacote enviado em t_0 colide com outros pacotes enviados em $[t_0-1, t_0+1]$



Aloha Puro (cont.)

$P(\text{sucesso por um dado nó}) = P(\text{nó transmite}) \cdot$

$P(\text{outro nó não transmite em } [t_0-1, t_0]) \cdot$

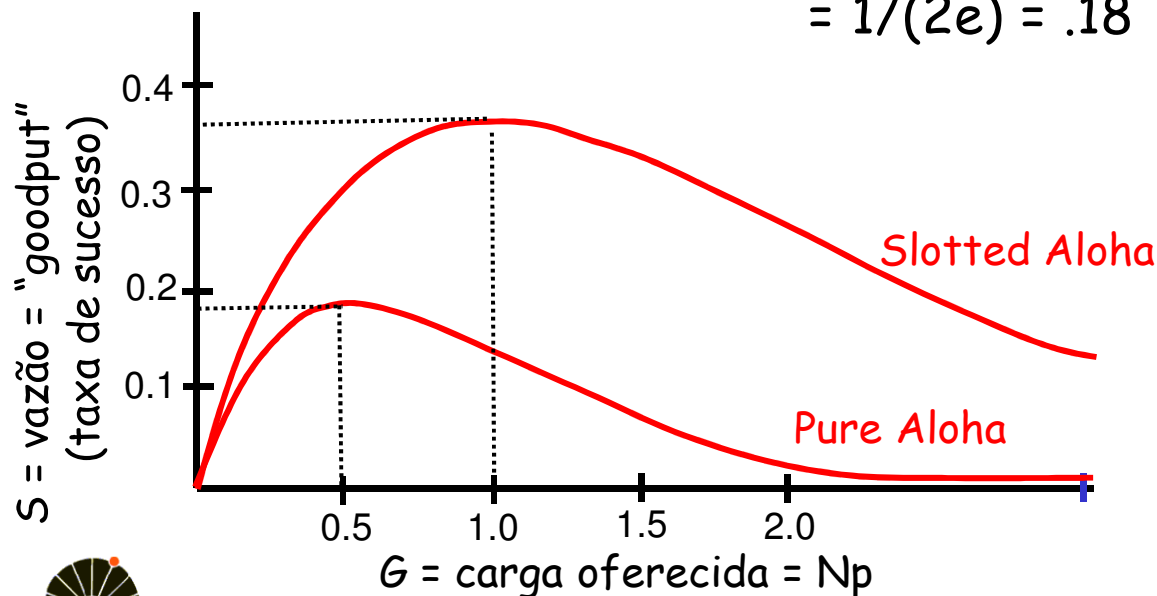
$P(\text{outro nó não transmite em } [t_0, t_0+1])$

$$= p \cdot (1-p) \cdot (1-p)$$

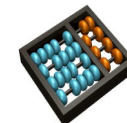
$P(\text{sucesso por um qualquer dos } N \text{ nós}) = N p \cdot (1-p) \cdot (1-p)$

... escolhendo p ótimo quando $n \rightarrow \text{infinito} \dots$

$$= 1/(2e) = .18$$



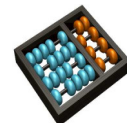
protocolo limita a vazão efetiva do canal!



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
 - ✓ **CSMA Persistente**: tenta outra vez imediatamente com probabilidade p quando o canal se torna livre (pode provocar instabilidade)
 - ✓ **CSMA Não-persistente**: tenta novamente após um intervalo aleatório
- analogia humana: não interrompa os outros!

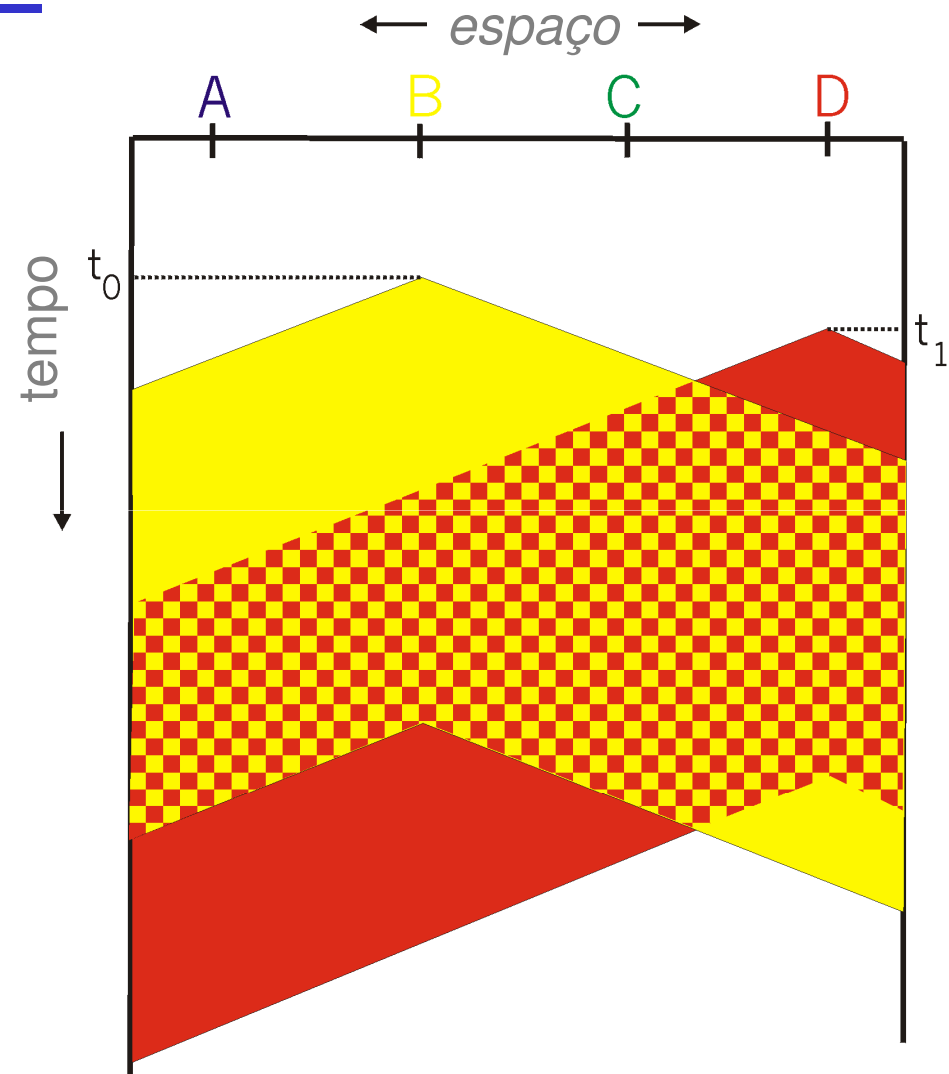


Colisões no CSMA

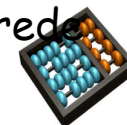
colisões podem ocorrer:
o atraso de propagação
implica que dois nós podem
não ouvir as transmissões
de cada outro

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.



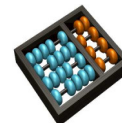
arranjo espacial dos nós na rede



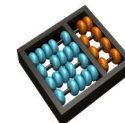
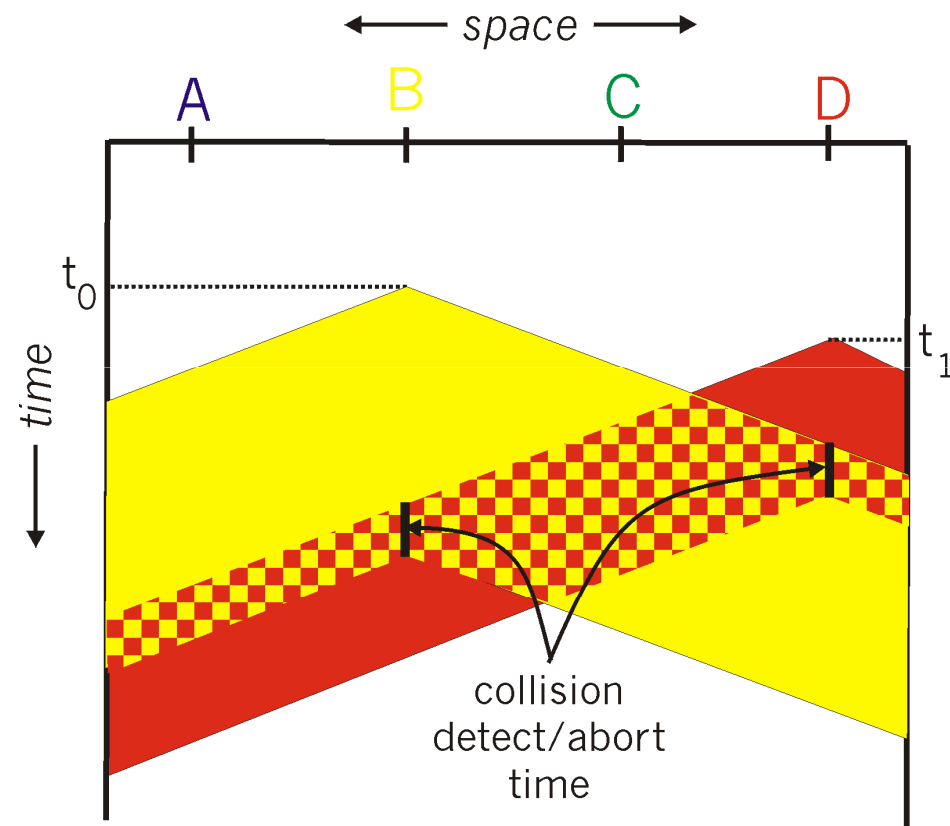
CSMA/CD (Detecção de Colisão)

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
- ✓ retransmissões **persistentes** ou não-persistentes
- detecção de colisão:
 - ✓ **fácil em LANs cabeadas:** (p.ex., E-net): pode-se medir a intensidade do sinal na linha, detectar violações do código, ou comparar sinais Tx e Rx
 - ✓ **difícil em LANs sem fio:** o receptor é desligado durante transmissão, 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 de tempo de propagação para tempo de transmissão do pacote)
- analogia humana: o "bom-de-papo" educado



Detecção de colisões em CSMA/CD



Protocolos MAC com Passagem de Permissão (revezamento)

Protocolos MAC com particionamento de canais:

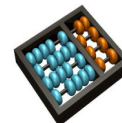
- ✓ compartilham o canal eficientemente quando a carga é alta e bem distribuída
- ✓ ineficiente nas cargas baixas: atraso no acesso ao canal. A estação consegue uma banda de $1/N$ da capacidade do canal, mesmo que haja apenas 1 nó ativo!

Protocolos MAC de acesso aleatório

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

Protocolos de passagem de permissão

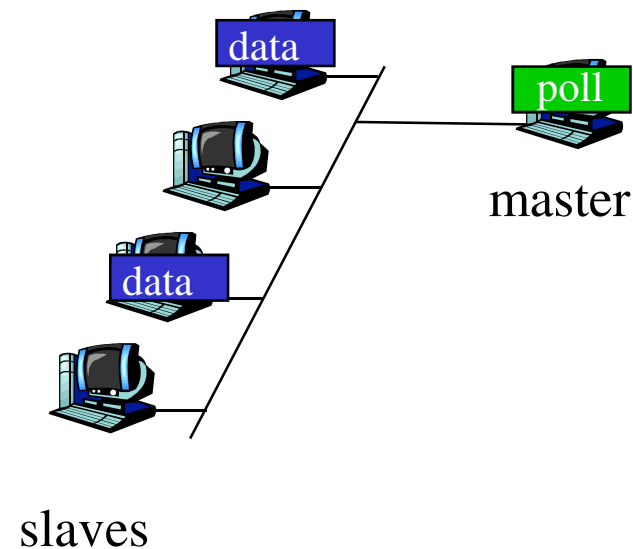
buscam o melhor dos dois mundos!



Protocolos de polling

Polling:

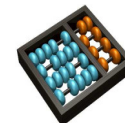
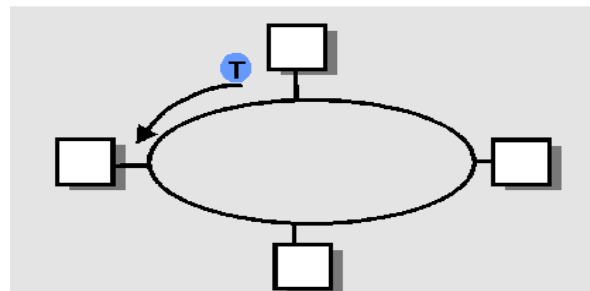
- nó mestre "convida" em ordem as estações escravas a transmitir seus pacotes (até algum Máximo).
- Mensagens Request to Send e Clear to Send
- problemas:
 - ✓ custo de Request to Send/Clear to Send
 - ✓ latência
 - ✓ ponto único de falha (mestre)



Protocolos MAC com Passagem de Permissão (revezamento)

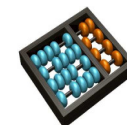
Passagem de ficha de permissão:

- a **ficha de permissão** é passada seqüencialmente de estação a estação;
- É possível aliviar a latência e melhorar tolerância a falhas (numa configuração de barramento de fichas).
- problemas:
 - ✓ token overhead
 - ✓ latência
 - ✓ ponto único de falha (token): procedimentos complexos para recuperar de **perda de ficha**, etc



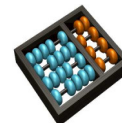
Resumo dos Protocolos MAC

- O que se pode fazer com um meio compartilhado ?
 - ✓ Particionamento do canal, por tempo, frequência ou código
 - TDM, FDM, CDMA, WDMA (wave division)
 - ✓ Particionamento aleatório (dinâmico),
 - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
 - Detecção de portadora: fácil em alguns meios físicos (cabeados), difícil em outros (sem fio)
 - CSMA/CD usado na rede Ethernet
 - ✓ Passagem de Permissão (revezamento)
 - polling a partir de um ponto central, passagem da ficha de permissão



Camada de Enlace de Dados

- 5.1 Introdução e Serviços
- 5.2 Correção e detecção de erros
- 5.3 Protocolos Múltiplo Acesso
- **5.4 Endereçamento**
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização: ATM, MPLS



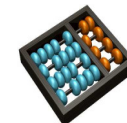
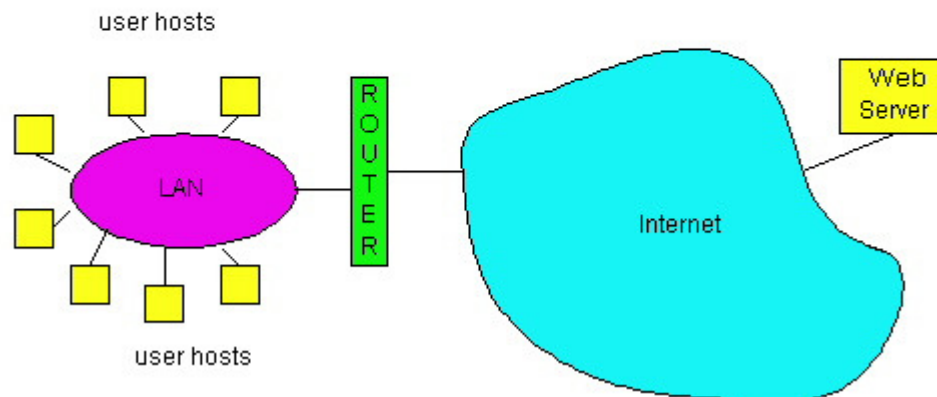
Tecnologias de Rede Local

Camada de enlace até agora:

- ✓ serviços, detecção de erros/correção, acesso múltiplo;
- ✓ Protocolos MAC usados em redes locais, para controlar acesso ao canal

A seguir: tecnologias de redes locais (LAN)

- ✓ endereçamento
- ✓ Ethernet
- ✓ hubs, switches
- ✓ PPP



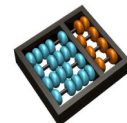
Endereços físicos e ARP

Endereços IP de 32-bit:

- endereços da *camada de rede*
- usados para levar o datagrama até a rede de destino (lembre da definição de rede IP)

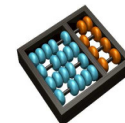
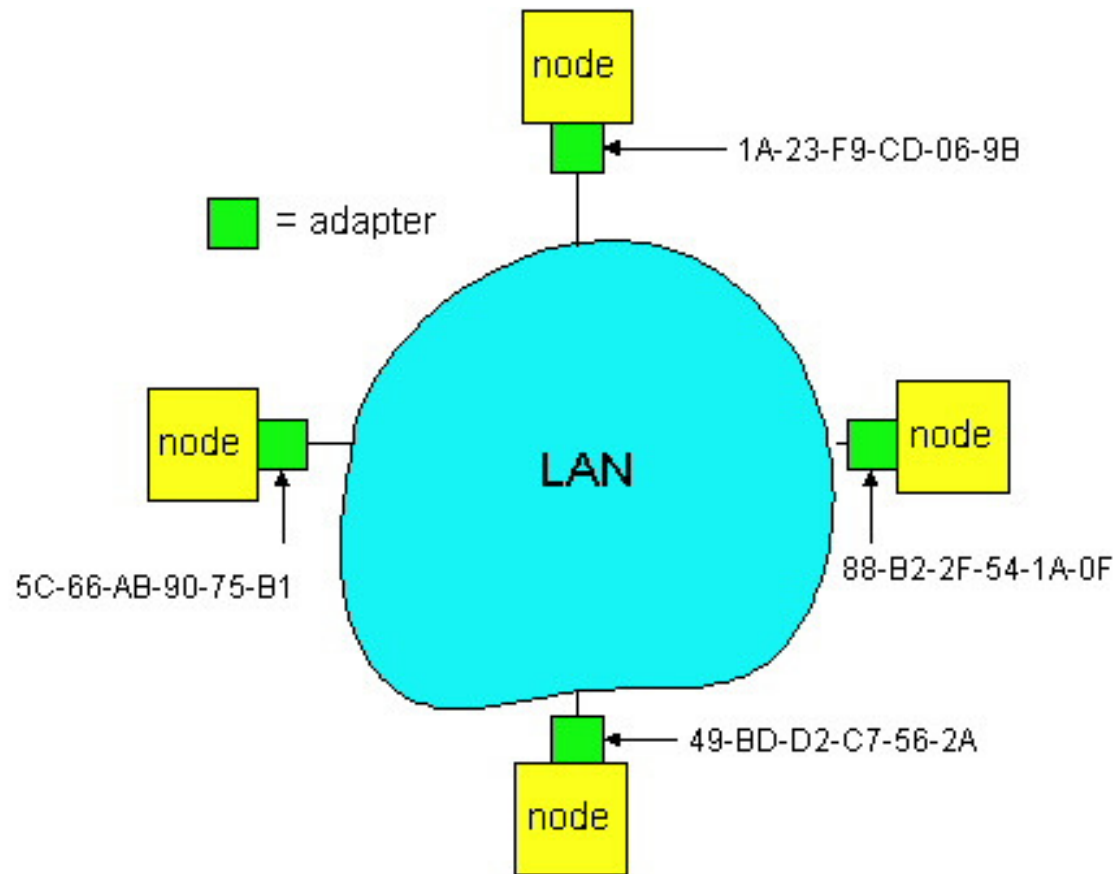
Endereço de LAN (ou MAC ou físico):

- 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) gravado na memória fixa (ROM) do adaptador de rede



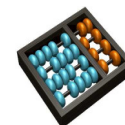
Endereços físicos e ARP

Cada adaptador numa LAN tem um único endereço de LAN



Endereços de LAN (mais)

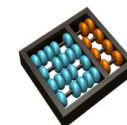
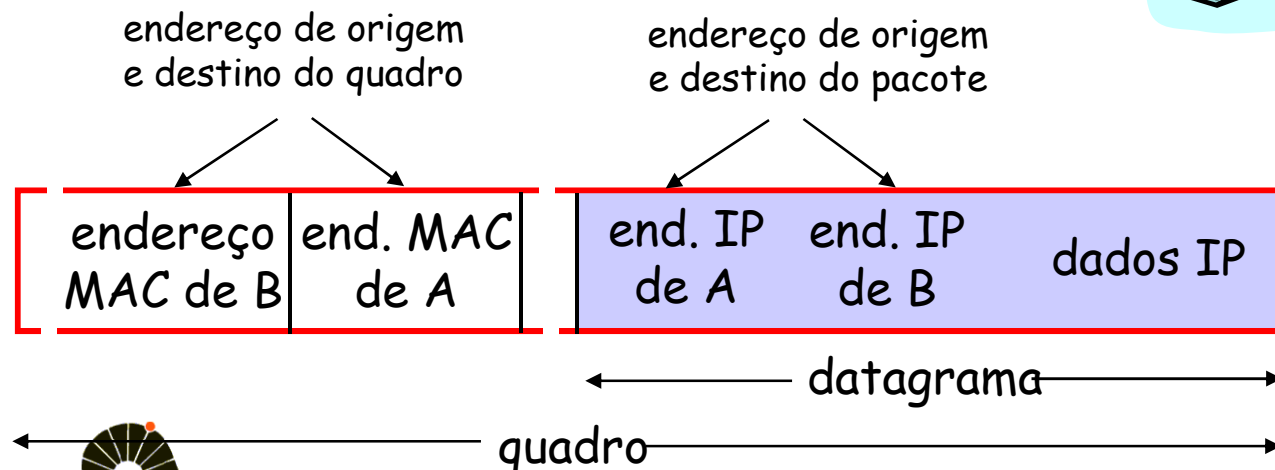
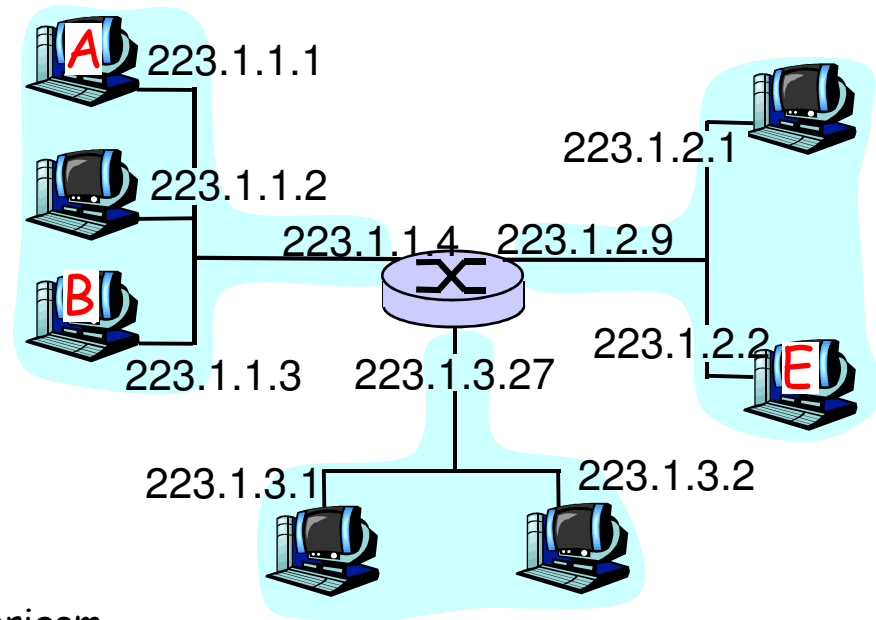
- A alocação de endereços MAC é administrada pelo IEEE
- O fabricante compra porções do espaço de endereço MAC (para assegurar a unicidade)
- Analogia:
 - (a) endereço MAC: semelhante ao número do CPF
 - (b) endereço IP: semelhante a um endereço postal
- endereçamento MAC é "flat" => portabilidade
 - ✓ é possível mover uma placa de LAN de uma rede para outra sem reconfiguração de endereço MAC
 - ✓ endereço MAC de difusão (*broadcast*): 1111.....1111
- endereçamento IP "hierárquico" => NÃO portátil
 - ✓ depende da rede na qual se está ligado



Lembrando a discussão anterior sobre roteamento

Começando em A, dado que o datagrama está endereçado para B (endereço IP):

- procure rede.endereço de B, encontre B em alguma rede, no caso igual à rede de A
- **camada de enlace envia datagrama para B dentro de um quadro da camada de enlace**



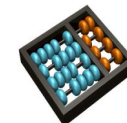
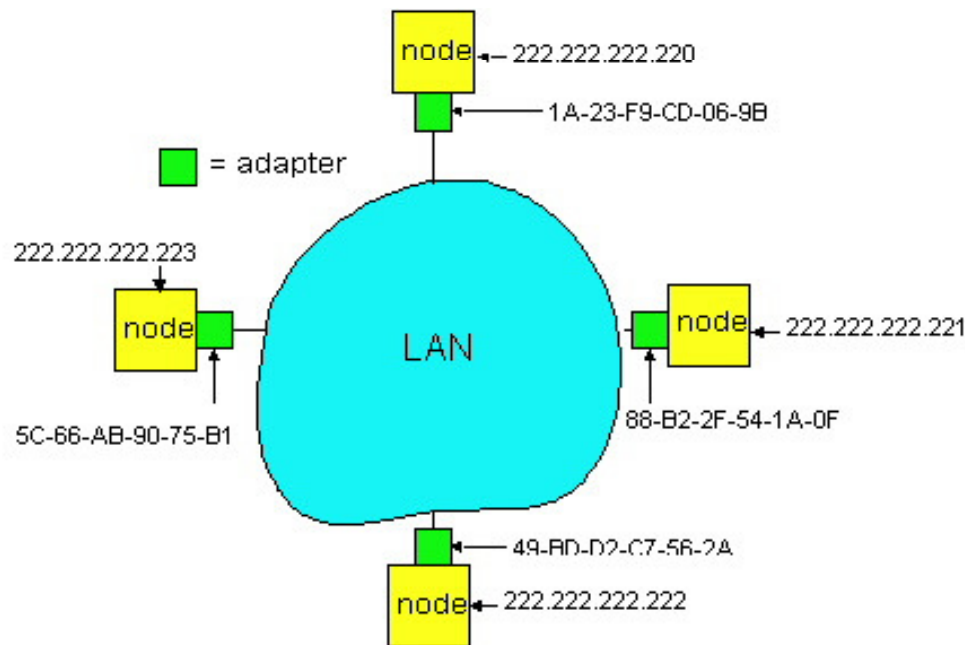
ARP: Address Resolution Protocol

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

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

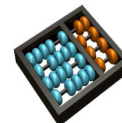
< endereço IP; endereço MAC; TTL >

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



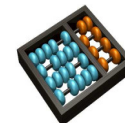
Protocolo ARP

- A conhece o endereço IP de B, quer aprender o endereço físico de B
- A envia em **broadcast** um pacote ARP de consulta contendo o endereço IP de B
 - ✓ todas as máquinas na LAN recebem a consulta ARP
- B recebe o pacote ARP, responde a A com o seu (de B) endereço de camada física
- A armazena os pares de endereço IP-físico até que a informação se torne obsoleta (esgota a temporização)
 - ✓ soft state: informação que desaparece com o tempo se não for re-atualizada



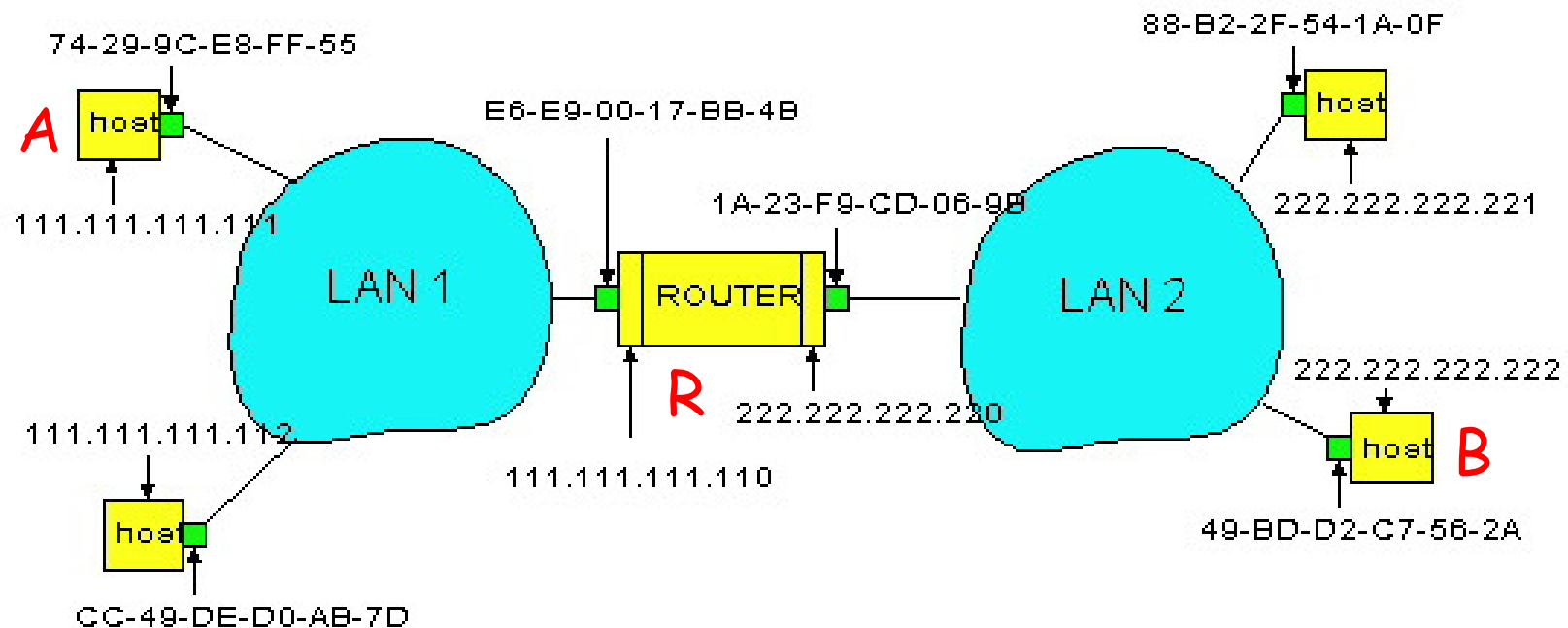
Protocolo ARP

- A deseja enviar um datagrama para B, e conhece o seu endereço IP;
- Suponha que o endereço MAC de B não esteja na tabela ARP de A;
- A envia em **broadcast** um pacote ARP de consulta com o endereço IP de B
 - ✓ todas as máquinas na LAN recebem a consulta
- B recebe o pacote ARP, responde a A com o seu endereço de camada física
 - ✓ Quadro enviado para o endereço MAC de A;
- A armazena os pares de endereço IP-físico até que a informação se torne obsoleta (esgota a temporização)
 - ✓ soft state: informação que desaparece com o tempo se não for re-atualizada
- ARP é "plug-and-play":
 - ✓ Nós criamos suas tabelas ARP sem a intervenção do administrador da rede;

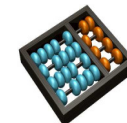


Roteamento para outra LAN

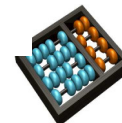
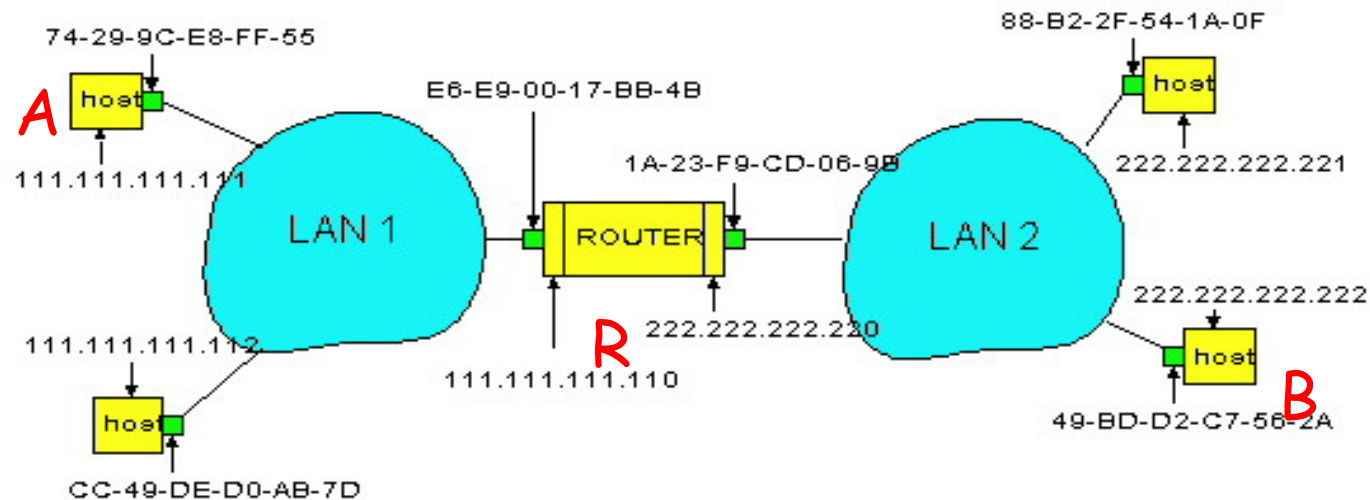
caminho: roteamento de A para B via R



- Na tabela de roteamento no Host origem, encontra o roteador 111.111.111.110
- Na tabela de ARP na origem, encontra o endereço MAC E6-E9-00-17-BB-4B, etc

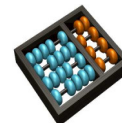


- A cria o pacote IP com origem A, destino B
- A usa ARP para obter o endereço de camada física de R correspondente ao endereço IP 111.111.111.110
- A cria um quadro Ethernet com o endereço físico de R como destino, o quadro Ethernet contém o datagrama IP de A para B
- A camada de enlace de A envia o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



Camada de Enlace de Dados

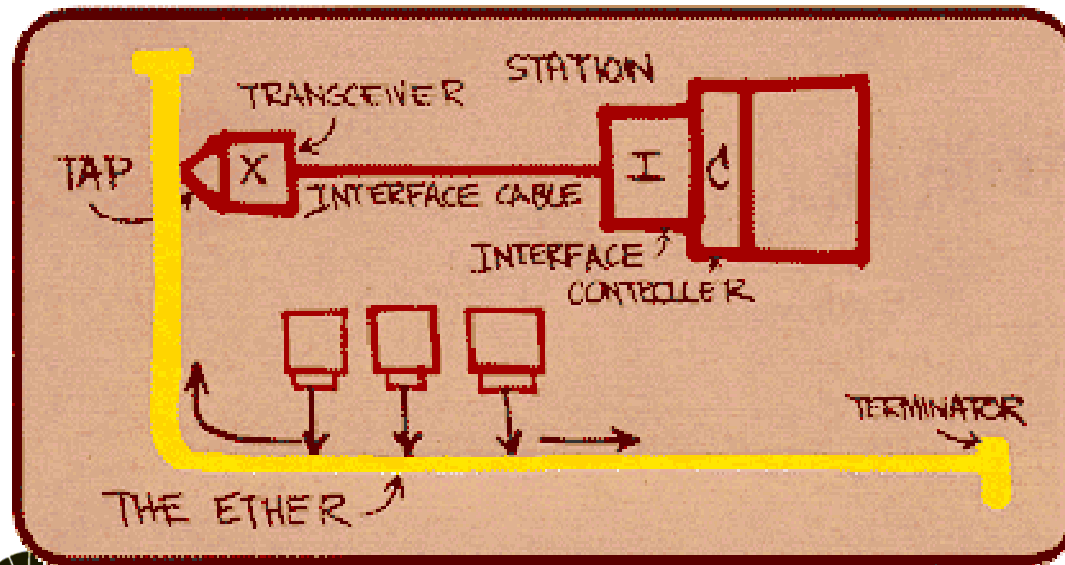
- 5.1 Introdução e Serviços
- 5.2 Correção e detecção de
- 5.3 protocolos Múltiplo Acesso
- 5.4 Endereçamento
- **5.5 Ethernet**
- 5.6 Switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização: ATM, MPLS



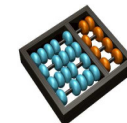
Ethernet

Tecnologia de rede local "dominante" :

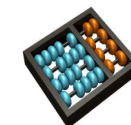
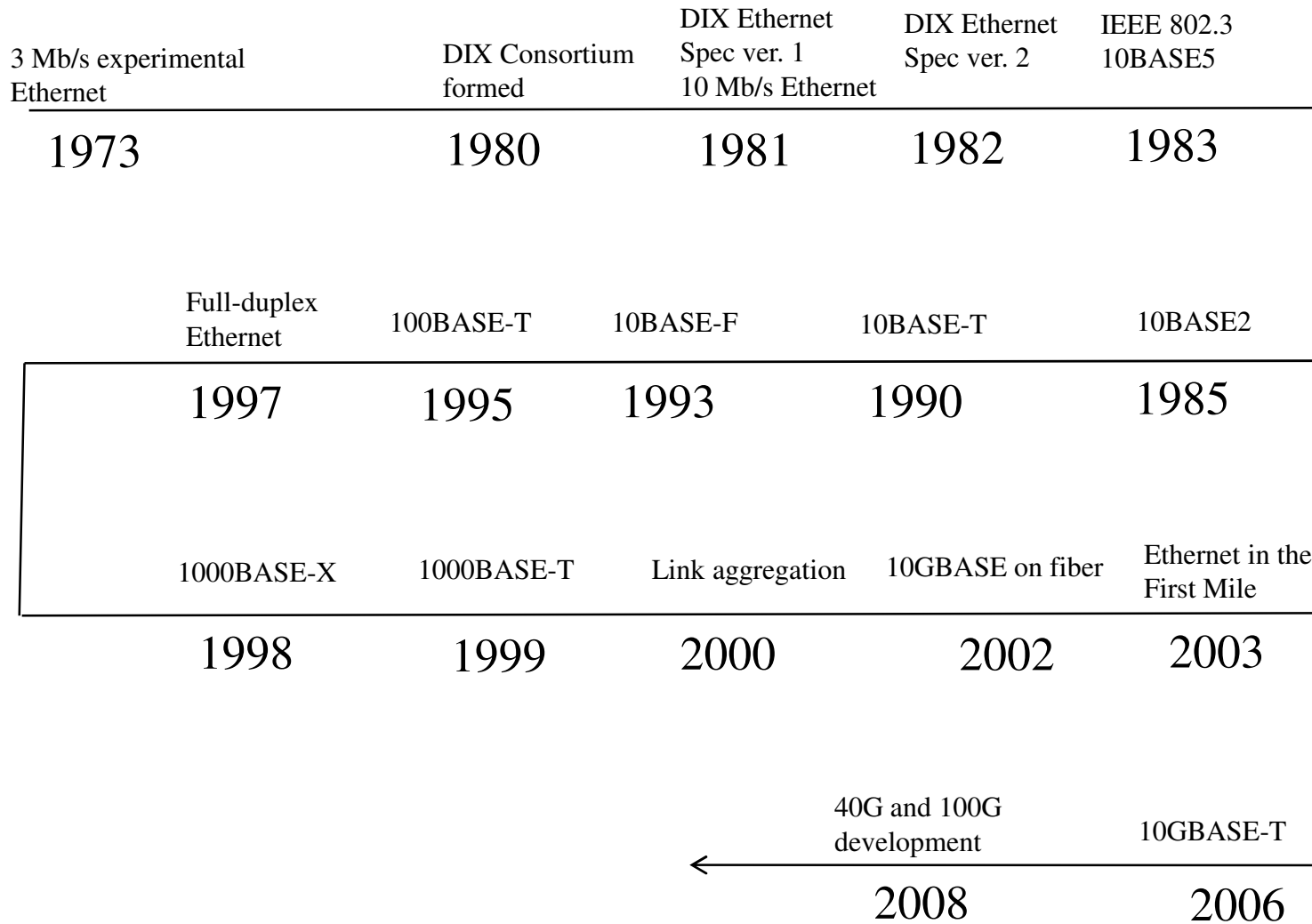
- barato R\$20 por 100Mbps!
- primeira tecnologia de LAN largamente usada
- Mais simples, e mais barata que redes usando ficha e ATM
- Velocidade crescente: 10, 100, 1000, 10000 Mbps
- Muitas tecnologias E-net (cabo, fibra, etc). Mas todas compartilham características comuns



Esboço da Ethernet
por Bob Metcalf

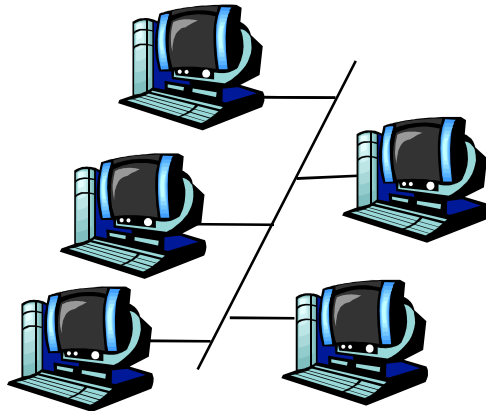


Evolução da Tecnologia

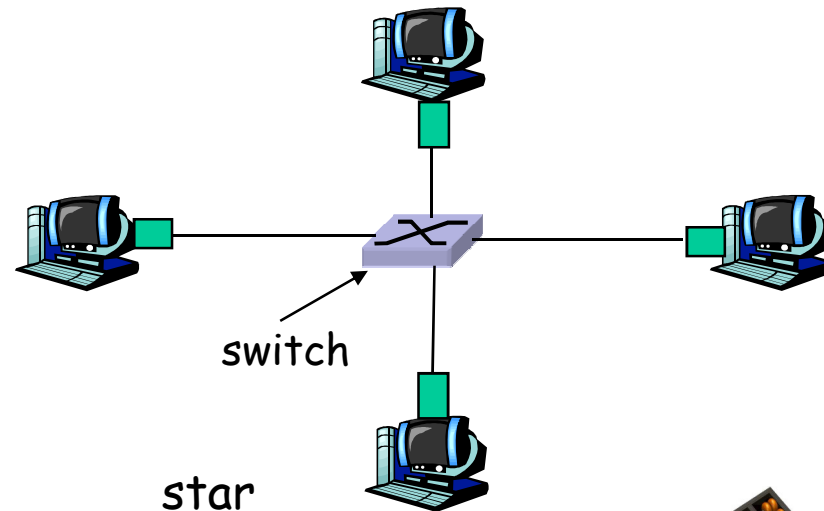


Topologia

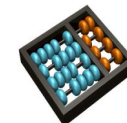
- Topologia barramento popular até meados dos anos 90s
 - ✓ Todos os nós no mesmo domínio de colisão
- Topologia estrela atualmente
 - ✓ Computador central
 - ✓ Cada perna executa o protocolo



bus: coaxial cable

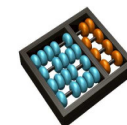


star



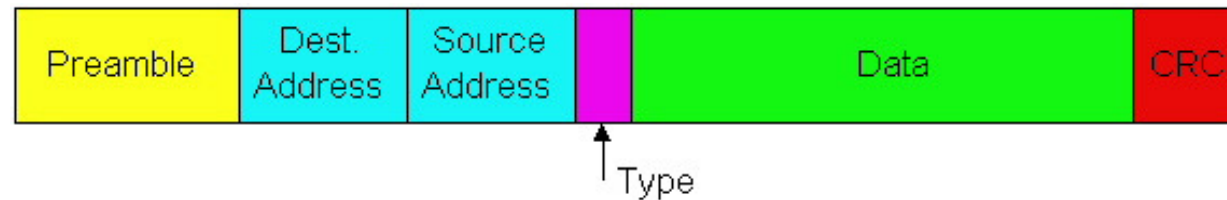
Meios de transmissão

medium \ speed	Coaxial cable	Twisted pairs	Fiber
under 10 Mb/s		1BASE5 (1987) 2BASE-TL (2003)	
10 Mb/s	10BASE5 (1983) 10BASE2 (1985) 10BROAD36 (1985)	10BASE-T (1990) 10BASE-TS (2003)	10BASE-FL (1993) 10BASE-FP (1993) 10BASE-FB (1993)
100 Mb/s		100BASE-TX (1995) 100BASE-T4 (1995) 100BASE-T2 (1997)	100BASE-FX (1995) 100BASE-LX/BX10 (2003)
1 Gb/s		1000BASE-CX (1998) 1000BASE-T (1999)	1000BASE-SX (1998) 1000BASE-LX (1998) 1000BASE-LX/BX10 (2003) 1000BASE-PX10/20 (2003)
10 Gb/s		10GBASE-T (2006)	10GBASE-R (2002) 10GBASE-W (2002) 10GBASE-X (2002)



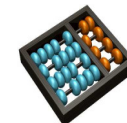
Estrutura do Quadro Ethernet

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



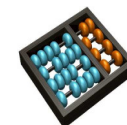
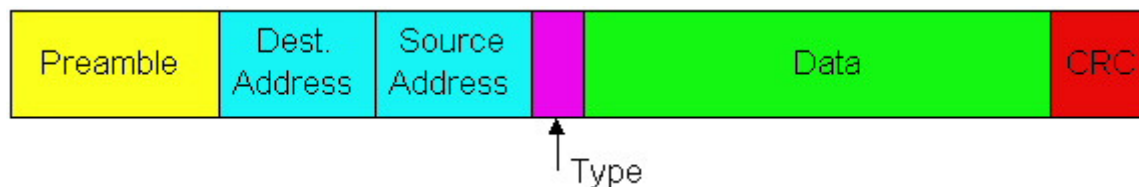
Preâmbulo:

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



Estrutura de Quadro Ethernet (cont)

- **Cabeçalho** contém Endereços de Destino e Origem e um campo Tipo
- **Endereços:** 6 bytes, o quadro é recebido por todos adaptadores numa rede local e descartado se não casar o endereço de destino com o do receptor
- **Tipo:** indica o protocolo da camada superior, usualmente IP, mas existe suporte para outros (tais como IPX da Novell e AppleTalk)
- **CRC:** verificado pelo receptor: se for detectado um erro, o quadro será descartado



Taxa Máxima de Quadros

Quadro com tamanho mínimo tem:

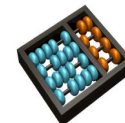
- 7 bytes Preamble + 1 byte SFD
- 64 bytes tamanho mínimo quadro
- 12 bytes Inter-frame gap (IFG)

A 10 Mb/s:

$$\begin{aligned} \text{Taxa máxima de quadros} &= 10 \cdot 10^6 / ((7+1+64+12) \cdot 8) \\ &= 14,880 \text{ quadros / s} \end{aligned}$$

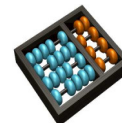
$$100 \text{ Mb/s} \rightarrow 148,809 \text{ quadros / s}$$

$$1 \text{ Gb/s} \rightarrow 1,488,095 \text{ quadros / s}$$



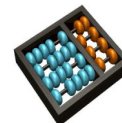
Serviço não confiável e sem conexão

- **Sem conexão:** Não é feito o handshaking entre o adaptador emissor e o receptor.
- **Não confiável:** o adaptador receptor não envia acks or nacks para o adaptador emissor
 - ✓ A cadeia de datagramas enviados a camada de rede pode ter algumas lacunas
 - ✓ As lacunas podem ser preenchidas se a aplicação usa TCP
 - ✓ Caso contrário, a aplicação verá as lacunas;



Ethernet utiliza CSMA/CD

- Sem intervalos (slots)
- Detecção de portadora: o adaptador não transmite se verifica que algum outro adaptador esteja transmitindo
- **Detecção de colisão**: o adaptador transmissor aborta a transmissão quando verifica que um outro adaptador está transmitindo
- **Acesso aleatório**: antes de tentar retransmitir um pacote, o adaptador transmissor espera um intervalo de tempo aleatório



Algoritmo Ethernet CSMA/CD

Adaptador recebe o datagrama e monta o quadro

A: escuta canal, **se** ocioso

então {

transmite e monitora o canal;

se detectou outra transmissão

então {

aborta e envia sinal de "jam";

atualiza número de colisões "m";

retarda de acordo com o algoritmo de retardamento exponencial (o adaptador escolhe um valor K aleatório entre $\{0,1,2,\dots,2^m-1\}$ e espera um intervalo de $K*512$)

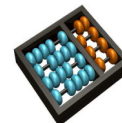
vai para A

}

senão {terminado este quadro; zera número de colisões}

}

senão {espera o final da transmissão atual e **vai para A**}



Ethernet CSMA/CD (mais)

Sinal "Jam":

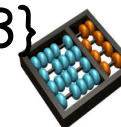
- garante que todos os outros transmissores estão cientes da colisão; 48 bits;

Bit time:

.1 microsec for 10 Mbps Ethernet ;
for $K=1023$, wait time is about 50 msec

Retardamento Exponencial (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 $\{0,1,2,3,4,\dots,1023\}$

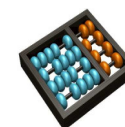


Eficiência CSMA/CD

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

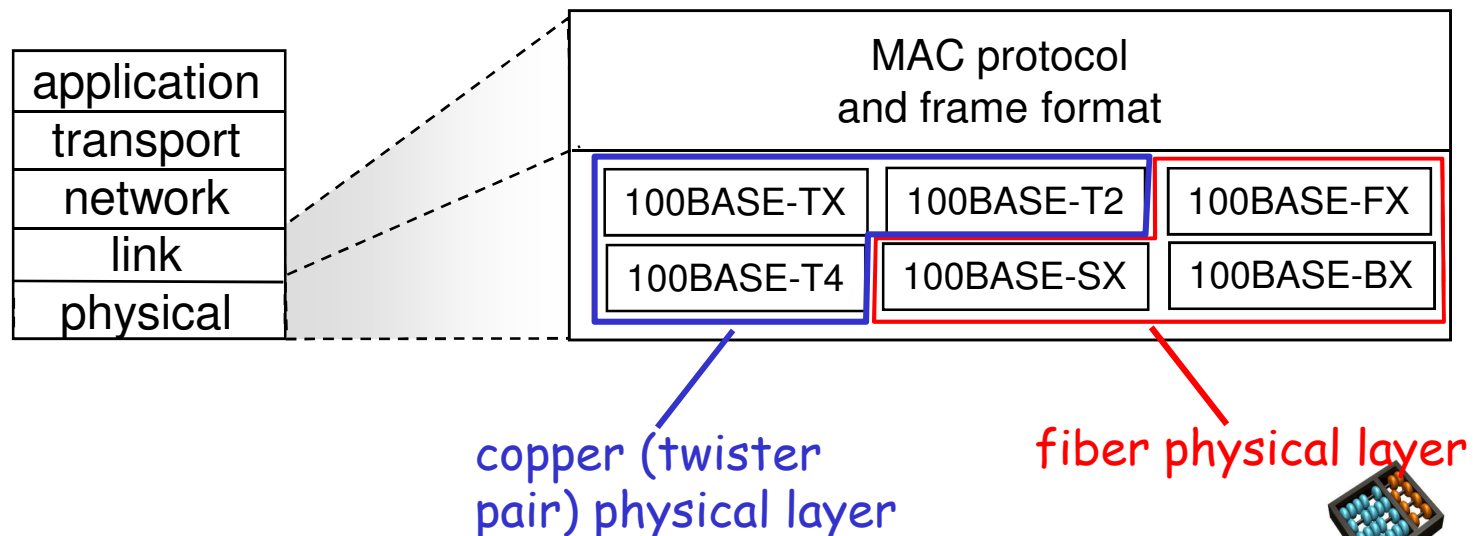
$$\text{efficiency} = \frac{1}{1 + 5t_{prop} / t_{trans}}$$

- Eficiência se aproxima de 1 quando t_{prop} se aproxima de 0;
- Eficiência se aproxima de 1 quando t_{trans} vai para infinito;
- Bem melhor que ALOHA, mais ainda descentralizado, simples e barato;
- Nota-se que neste esquema um quadro novo tem uma chance de sucesso na primeira tentativa, mesmo com tráfego pesado



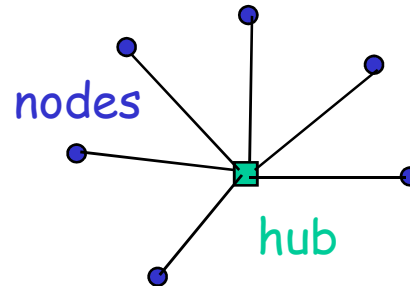
Standard 802.3

- *vários* padrões
 - ✓ Protocolo MAC e quadro padronizados
 - ✓ Taxas diferentes: 2 Mbps, 10 Mbps, 100 Mbps, 1Gbps, 10G bps
 - ✓ Diferentes medias: fibras, cabos, par

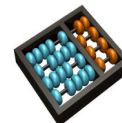


10BaseT e 100BaseT

- T significa "Twisted Pair" (par trançado)
- Os nós se conectam a um concentrador (hub) por um meio físico em "par trançado", portanto trata-se de uma "topologia em estrela";

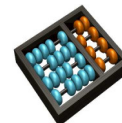


- Os hubs são essencialmente repetidos da camada física:
 - ✓ Bits que chegam em um enlace vão para todos os outros enlaces;
 - ✓ Não existe armazenamento de quadros;
 - ✓ Não se tem CSMA/CD no hub: adaptadores detectam colisões;



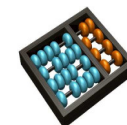
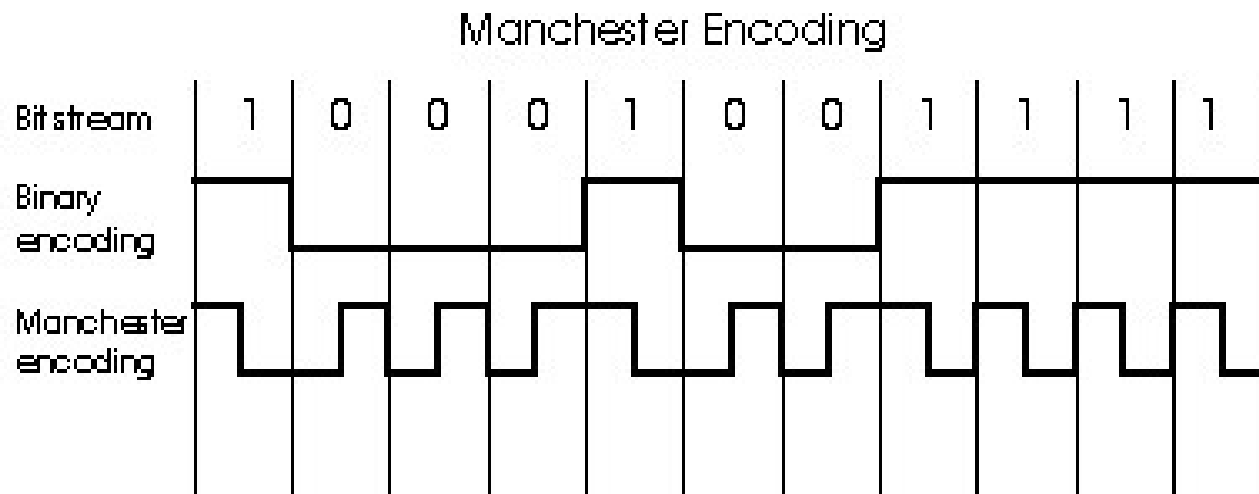
10BaseT e 100BaseT (cont)

- Distância máxima do nó ao hub é de 100 metros
- Hub pode desligar da rede um adaptador falho ("jabbering"); 10Base2 não funcionaria se um adaptador não pára de transmitir no cabo
- Hub pode coletar informação e estatísticas de monitoramento para administradores da rede
- 100BaseT não usa codificação Manchester; usa 4B5B para maior eficiência



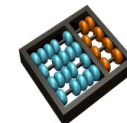
Codificação Manchester

- Banda básica significa que não se usa modulação de portador; ao invés disto, bits são codificados usando codificação Manchester e transmitidos diretamente, modificando a voltagem de sinal de corrente contínuo
- Codificação Manchester garante que ocorra uma transição de voltagem a cada intervalo de bit, ajudando sincronização entre relógios do remetente e receptor
 - Não é necessário a existência de um relógio global centralizado entre os nós;
- Usado em 10BaseT



Codificação 4B/5B

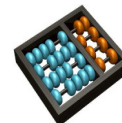
Name	4B	5B	description
0	0000	11110	hex data 0
1	0001	01001	hex data 1
2	0010	10100	hex data 2
3	0011	10101	hex data 3
4	0100	01010	hex data 4
5	0101	01011	hex data 5
6	0110	01110	hex data 6
7	0111	01111	hex data 7
8	1000	10010	hex data 8
9	1001	10011	hex data 9
A	1010	10110	hex data A
B	1011	10111	hex data B
C	1100	11010	hex data C
D	1101	11011	hex data D
E	1110	11100	hex data E
F	1111	11101	hex data F
Q	n/a	00000	Quiet (signal lost)
I	n/a	11111	Idle
J	n/a	11000	Start #1
K	n/a	10001	Start #2
T	n/a	01101	End
R	n/a	00111	Reset
S	n/a	11001	Set
	n/a	00100	Halt



Gbit Ethernet

- Usa formato do quadro Ethernet padrão
- Admite enlaces ponto-a-ponto e canais de difusão compartilhados
- Em modo compartilhado, usa-se CSMA/CD; para ser eficiente, as distâncias entre os nós devem ser curtas (poucos metros)
- Os Hubs usados são chamados de Distribuidores com Buffers ("Buffered Distributors")
- Full-Duplex em 1 Gbps para enlaces ponto-a-ponto
- Agora 10 Gbps!!!

- Nota: o uso de enlaces ponto-a-ponto também foi estendido a 10Base-T e 100Base-T.



Half-Duplex vs. Full-Duplex

Half-duplex

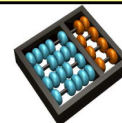
Somente uma estação transmite (*necessário CSMA/CD*)

Full-duplex (IEEE 802.3x, 1997)

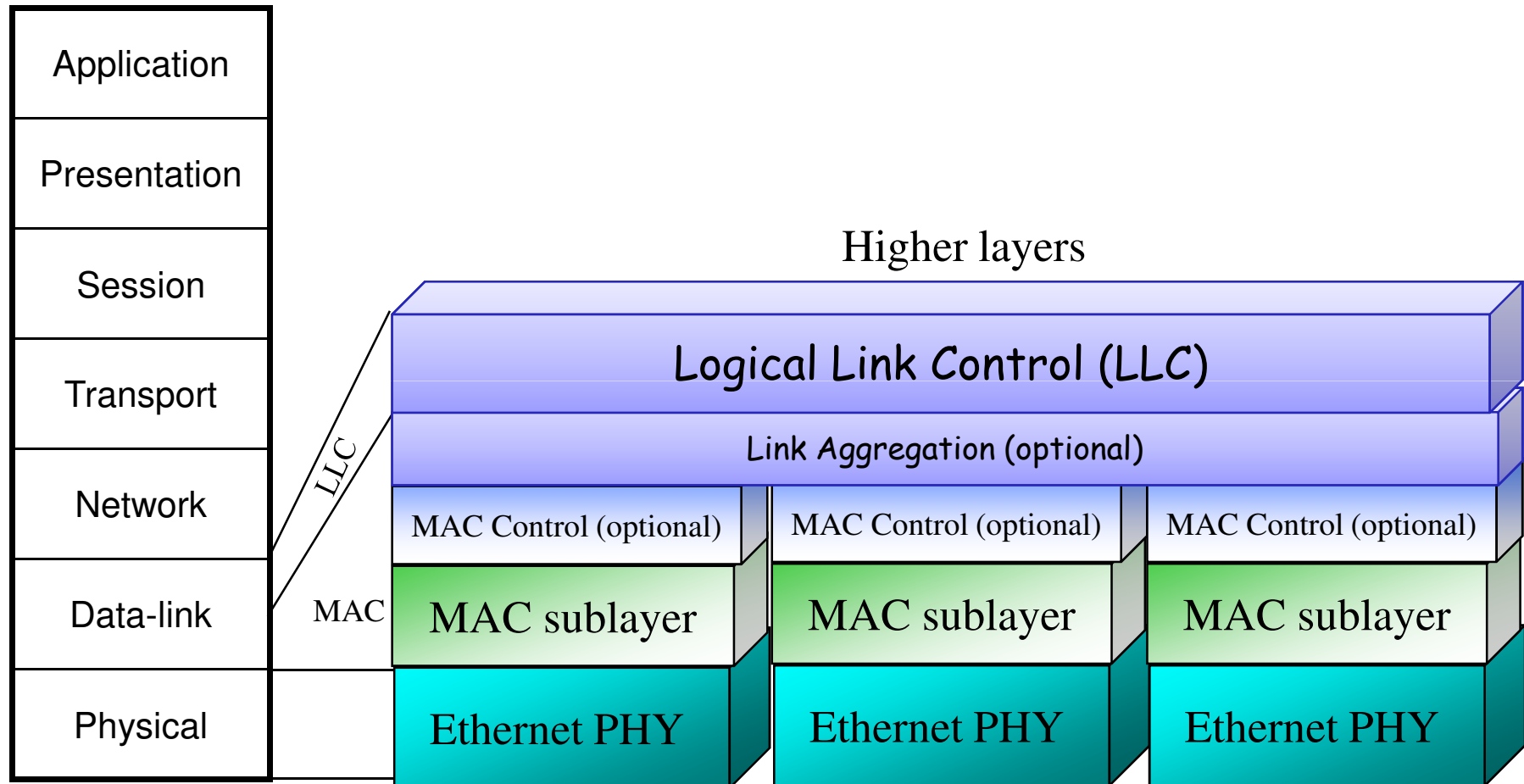
Transmissão simultânea entre pares de estações em enlace pont-o-a-ponto (*elimina CS, MA e CD*)

Três condições necessárias para full-duplex

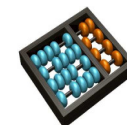
1. Transmissões simultâneas sem interferência
2. Enlace ponto-a-ponto dedicado com exatamente duas estações
3. Capacidade de configuração das estações a operarem em full-duplex



Gigabit Ethernet



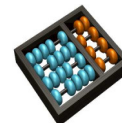
OSI model



Controle de Fluxo na Ethernet

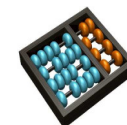
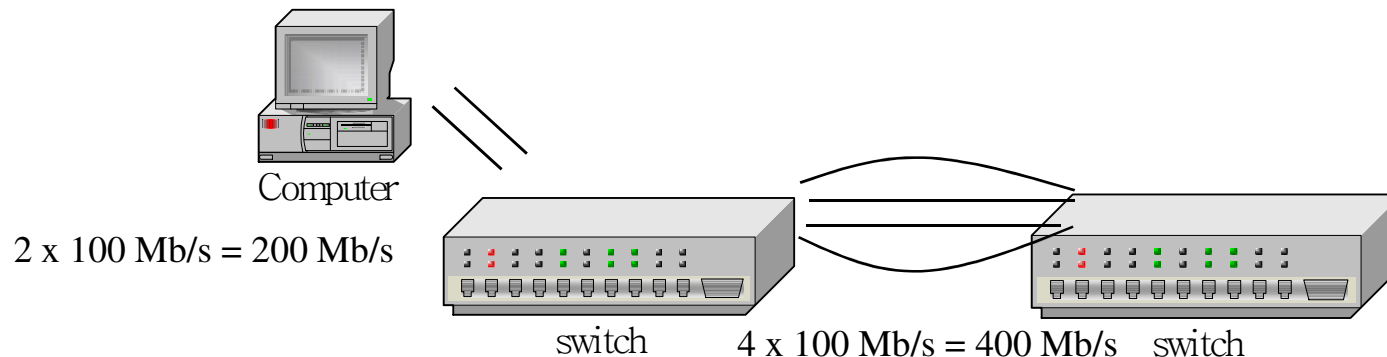
- Back pressure - half-duplex
 - ✓ Força colisão

- PAUSE frame - full-duplex Ethernet
 - ✓ Quadro PAUSE (IEEE 802.3x) enviado do receptor para o transmissor



Agregação de Enlace

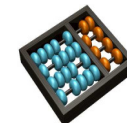
- Definido no padrão IEEE 802.3ad (2000)
- Permite obter enlaces de maior capacidade
- Balanceamento de carga
- Transparente às camadas superiores



10 Gigabit Ethernet

- Especificado no padrão IEEE 802.3ae (2002)
- Características
 1. Somente Full-duplex
 2. Retro-compatível
 3. Entrando na escala de WANs
(Longas distâncias, interface com OC-192)

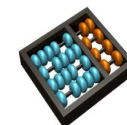
Code name	Wave length	Transmission distance (m)
10GBASE-LX4	1310 nm	300
10GBASE-SR	850 nm	300
10GBASE-LR	1310 nm	10,000
10GBASE-ER	1550 nm	10,000
10GBASE-SW	850 nm	300
10GBASE-LW	1310 nm	10,000
10GBASE-EW	1550 nm	40,000



Ethernet na Primeira (Última) Milha

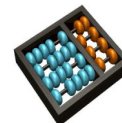
- IEEE 802.3ah finalizado em 2003.
- Orientado a redes de Acesso
- **Novas topologias:** fibras ponto-a-ponto, fibras ponto-a-multiponto, cobre ponto-a-ponto
 - **Novos PHYs:** 1000BASE-X extensão, Ethernet PON, voice-grade copper
 - **OAM:** detecção de falha remota, monitoramento de

Code name	Description
100BASE-LX10	100 Mbps on a pair of optical fibers up to 10 km
100BASE-BX10	100 Mbps on a optical fiber up to 10 km
1000BASE-LX10	1000 Mbps on a pair of optical fibers up to 10 km
1000BASE-BX10	1000 Mbps on a optical fiber up to 10 km
1000BASE-PX10	1000 Mbps on passive optical network up to 10 km
1000BASE-PX20	1000 Mbps on passive optical network up to 20 km
2BASE-TL	At least 2 Mbps over SHDSL up to 2700 m
10PASS-TS	At least 10 Mbps over VDSL up to 750 m



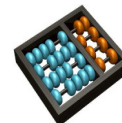
Camada de Enlace de Dados

- 5.1 Introdução e Serviços
- 5.2 Correção e detecção de
- 5.3 protocolos Múltiplo Acesso
- 5.4 Endereçamento
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização: ATM, MPLS



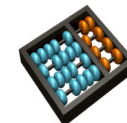
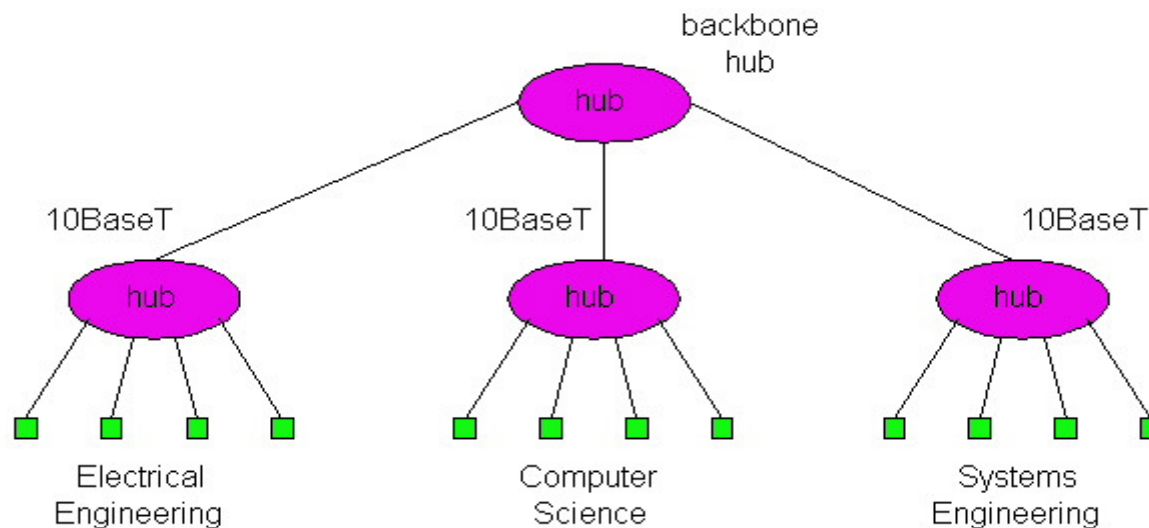
Interconectando segmentos de Redes

- Usados para estender as características das 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 provêem roteamento ótimo de pacotes IP
- **Concentradores** (Hubs), **Pontes** (Bridges), **Comutadores** (Switches)
 - ✓ Nota: comutadores são essencialmente pontes com múltiplas portas;
 - ✓ O que se fala para pontes, também é válido para comutadores;



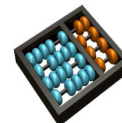
Interconexão utilizando Hubs

- Dispositivos da camada física: basicamente são repetidores operando ao nível de bit: repete os bits recebidos numa interface para as demais interfaces
- Hubs podem ser dispostos numa hierarquia (ou **projeto de múltiplos níveis**), com um hub **backbone** na raiz;
- Domínios de colisões individuais tornam-se grandes domínios de colisões
 - ✓ Se um nó em CS e um outro nó em EE transmitirem ao mesmo tempo: colisão;



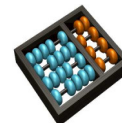
Interconexão utilizando Hubs (cont)

- Cada rede local ligado é chamada de **segmento** de rede local
- Hubs **não isolam** domínios de colisão: um nó pode colidir com qualquer outro nó residindo em qualquer segmento da rede local
- Vantagens de Hubs:
 - ✓ Dispositivos simples, 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 (100m por Hub)



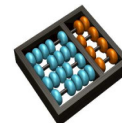
Interconexão utilizando Hubs (cont)

- Limitações de Hubs:
 - ✓ Domínio de colisão único resulta em nenhum aumento na vazão máxima; a vazão no caso de múltiplos níveis é igual à do segmento único
 - ✓ Restrições em redes locais individuais põe limites no número de nós no mesmo domínio de colisão (portanto, por Hub ou coleção de Hubs); e na cobertura geográfica total permitida
 - ✓ Não se pode misturar tipos diferentes de Ethernet (p.ex., 10BaseT and 100BaseT)



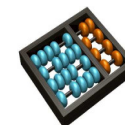
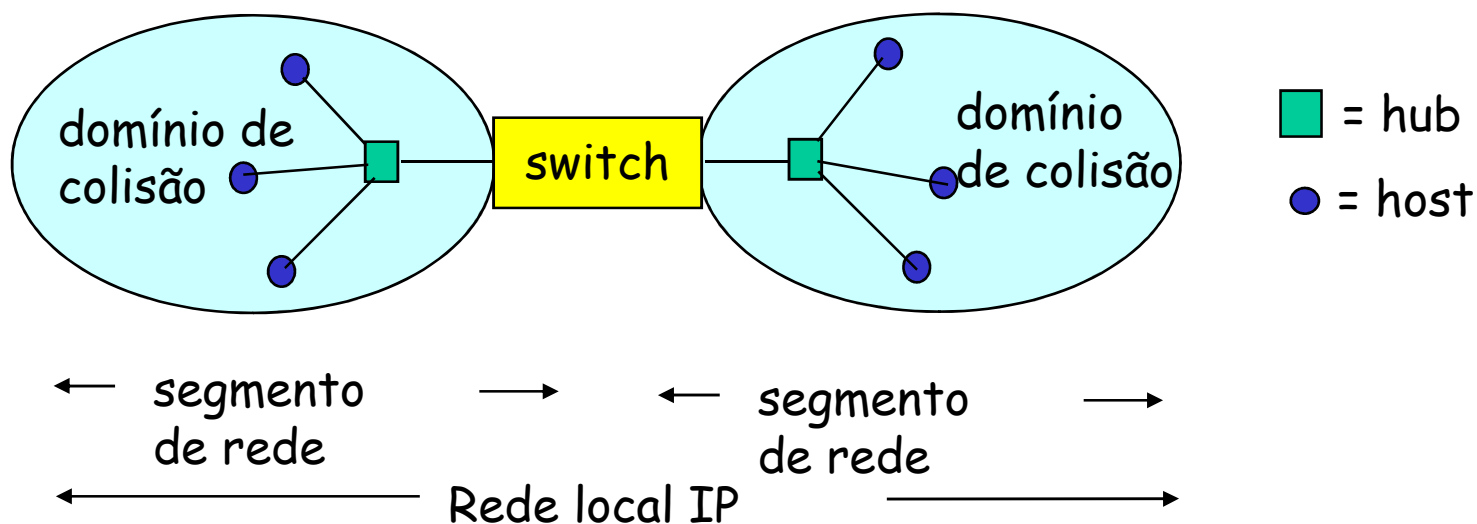
Comutadores ("Switches")

- **Dispositivos da camada de enlace:**
 - ✓ operam em quadros Ethernet
 - ✓ examinam o cabeçalho do quadro, e reencaminham selectivamente um quadro com base no seu endereço de destino
 - ✓ Quando se quer re-encaminhar um quadro num segmento, usa CSMA/CD para fazer acesso ao segmento e transmitir;
- **Transparente:** hosts desconhecem a existência dos switches;
- **plug-and-play, auto aprendizagem**
 - ✓ Switches não necessitam ser configuradas

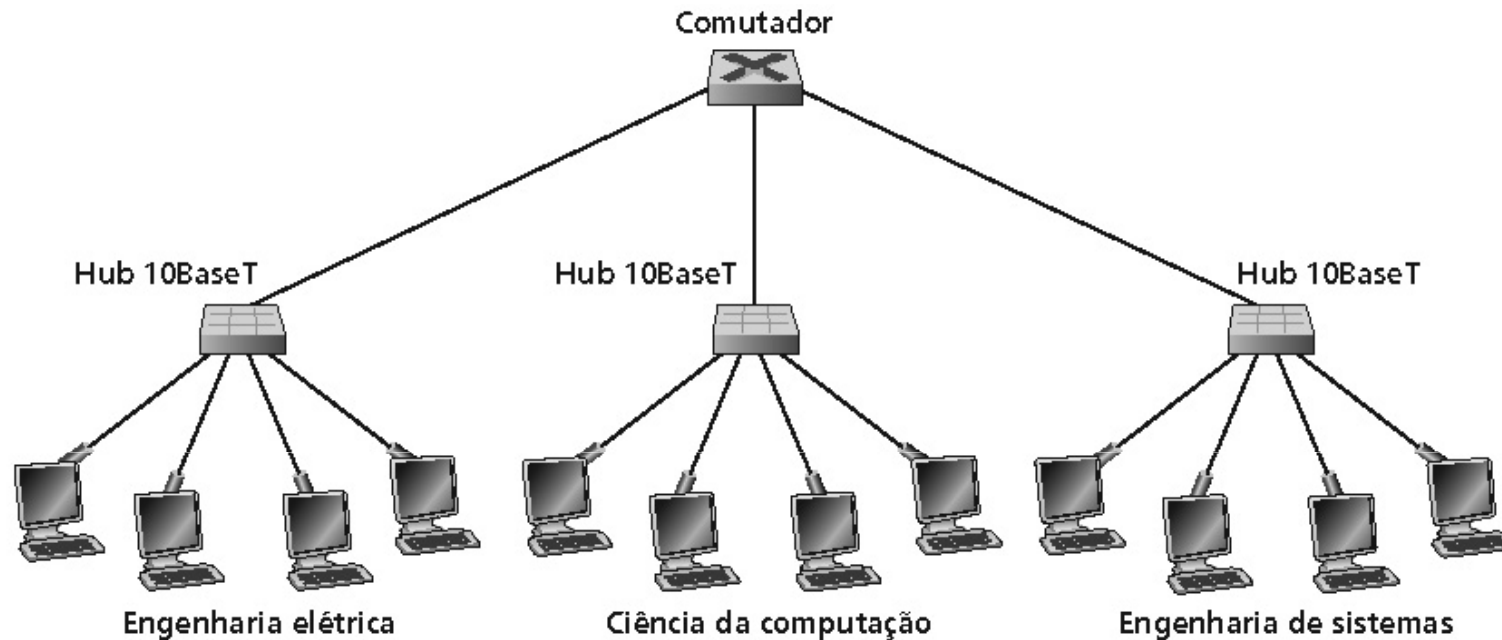


Switches: isolamento de tráfego

- A instalação do switch particiona a rede em **segmentos** de LAN
- switch **filtra** pacotes:
 - ✓ Quadros de um segmento de rede não são geralmente reencaminhados para outro segmento de rede;
 - ✓ Segmentos separam os **domínios de colisão**



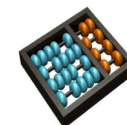
Encaminhamento dos quadros



Legenda:  Link-layer switch

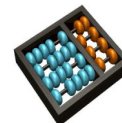
Como determinar para qual segmento de rede um quadro deve ser encaminhado?

- Parece um problema de roteamento



Auto Aprendizagem

- Um switch tem uma **tabela de switch**;
- Entradas da tabela do switch:
 - ✓ (endereço do nó na rede, interface do switch, tempo corrente)
 - ✓ Entradas expiradas na tabela de filtragem são descartadas (TTL geralmente é de 60 min)
- switches aprendem quais hosts podem ser acessados através de quais interfaces
 - ✓ Quando um quadro é recebido, o switch “aprende” a localização do emissor: qual segmento de rede ele pertence;
 - ✓ Armazena o par emissor/localização na tabela;



Filtragem/Encaminhamento de quadros

Quando um switch recebe um quadro:

se destino estiver na rede local pela qual o quadro foi recebido

então descarta o quadro

senão { faz pesquisa na tabela de filtragem

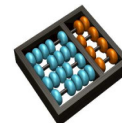
se foi encontrada a entrada para o destino

então re-encaminha o quadro na interface indicada;

senão faz inundação;

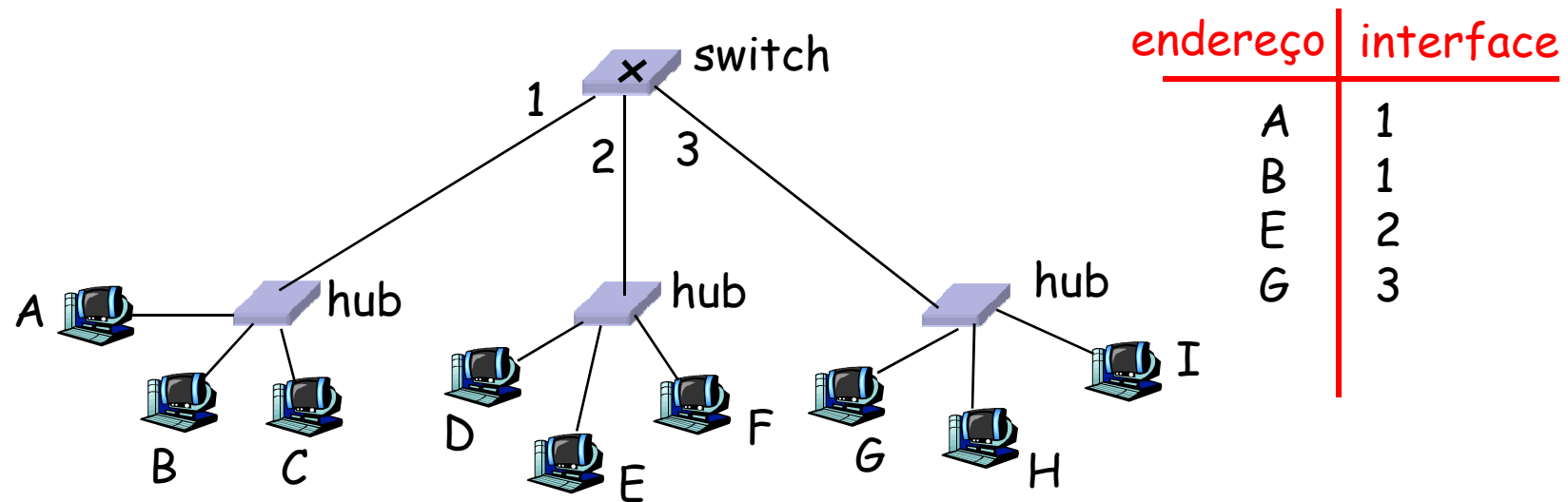
}

re-encaminha em todas as interfaces exceto naquela por onde chegou

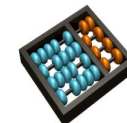


Switch: exemplo

Suponha que C envia um quadro para D

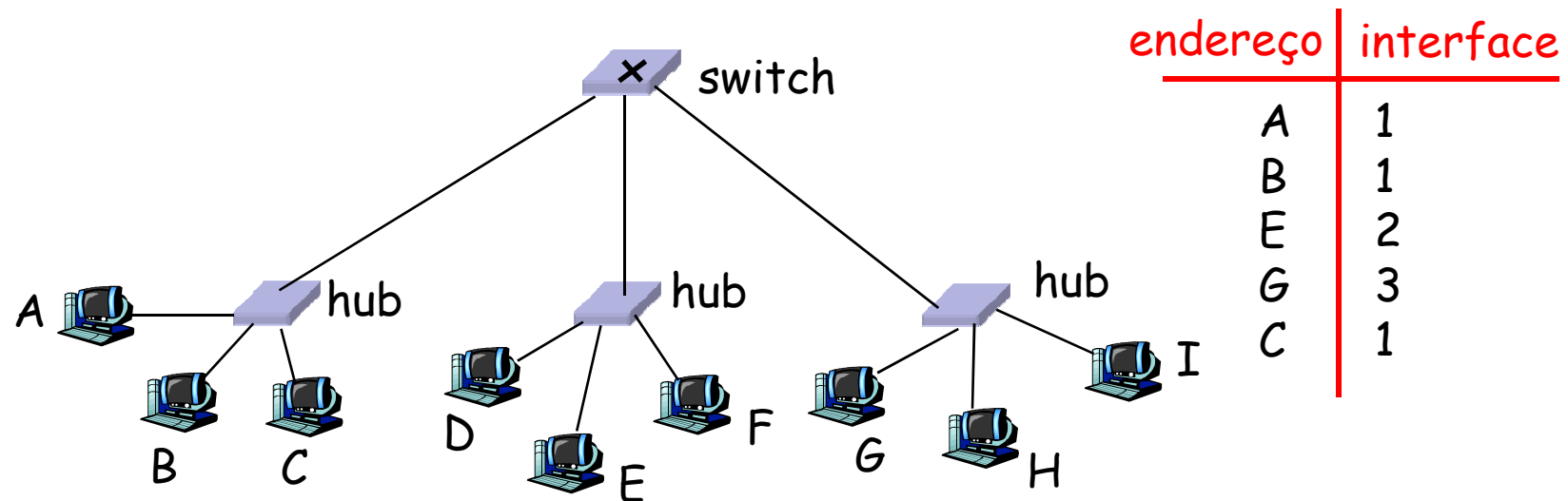


- Switch recebe o quadro de C
 - Anota na tabela que C está na interface 1
 - Como D não está na tabela, o switch encaminha o quadro para as interfaces 2 e 3
- Quadro recebido por D

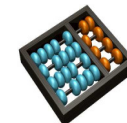


Switch: exemplo

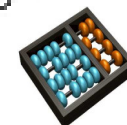
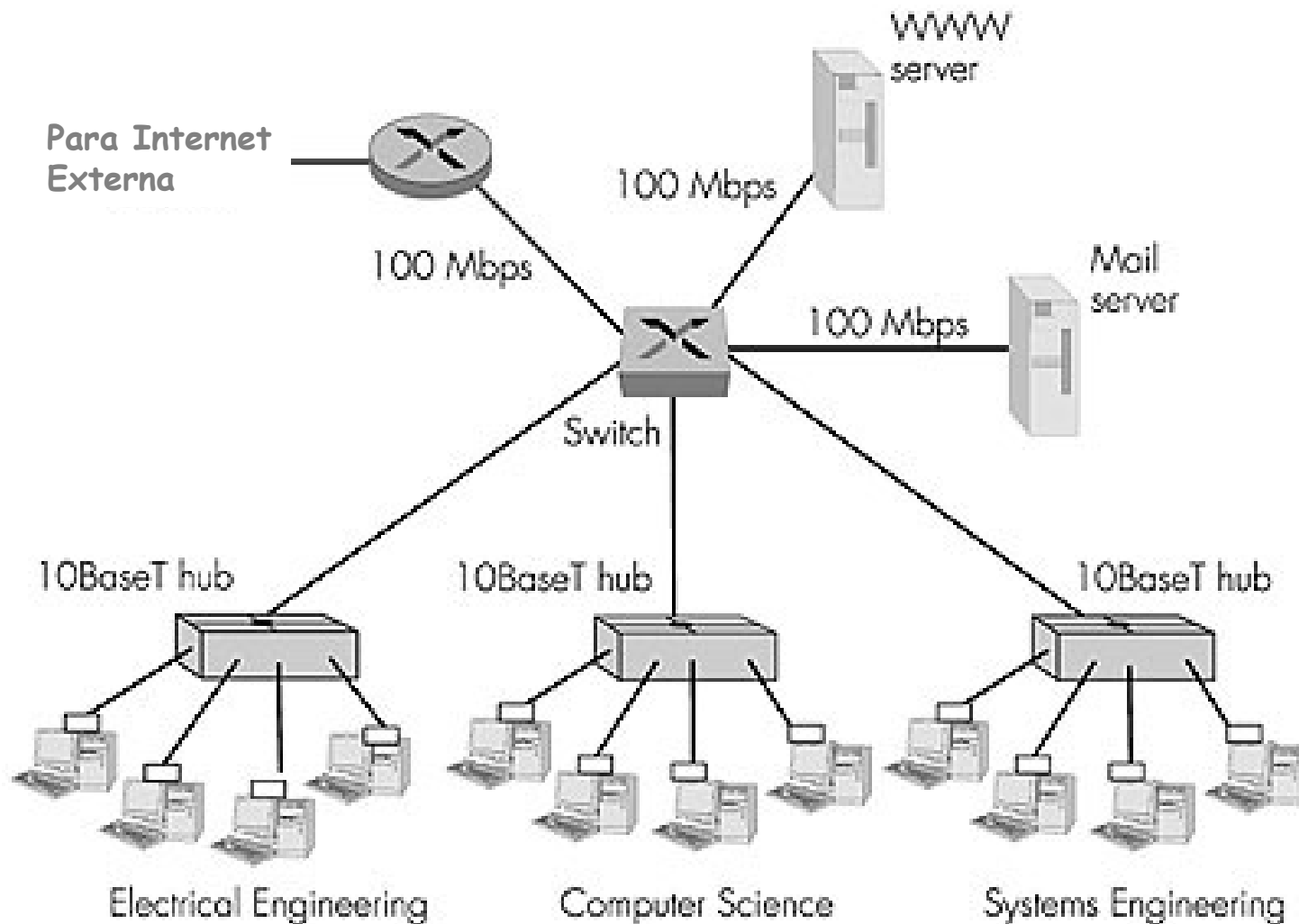
Suponha que D responde com um quadro para C.



- 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

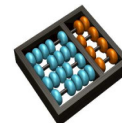


Switches (mais)



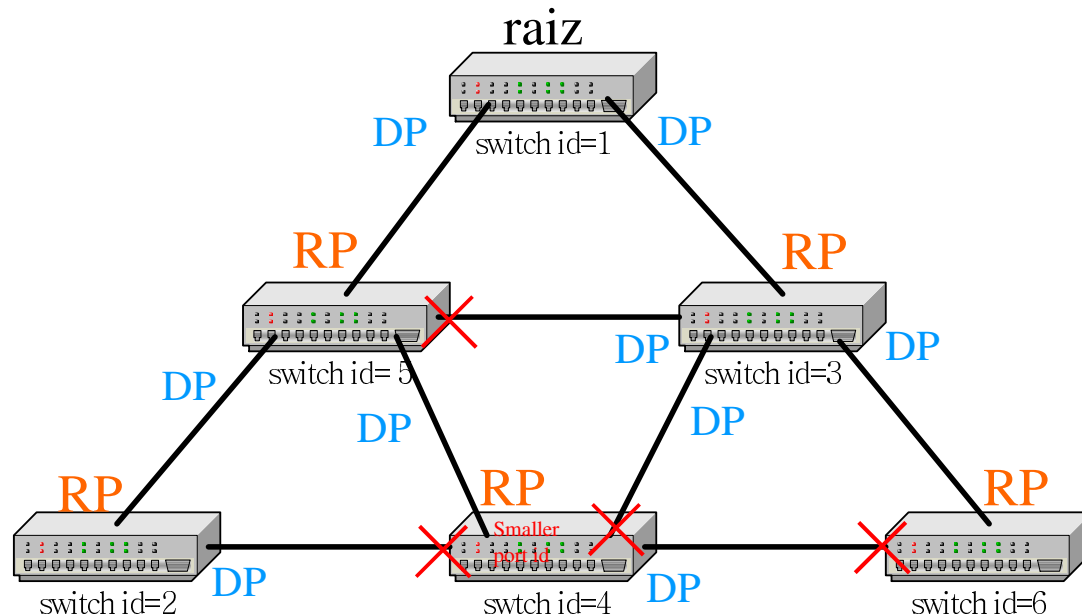
Switches (cont)

- Alguns switches suportam **comutação acelerada (cut-through switching)**: o quadro é enviado da entrada para a saída sem esperar pela montagem do quadro inteiro
 - ✓ pequena redução da latência
- Switches variam em tamanho, e os mais rápidos incorporam uma rede de interconexão de alta capacidade



Spanning Tree

Objetivo: Resolve loops em bridges conectadas

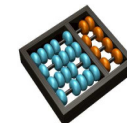


RP: Porta da Raiz (root port)

DP: Porta designada (designated port)

BPDU: Bridge Protocol Data Unit

1. A raiz é a switch com menor id
2. Propaga informações de configuração tais como custo dos enlaces em pacotes BPDU para as portas designadas
3. Para cada LAN (switch), a DP (RP) seleciona-se a porta com menor custo para ser a porta designada
4. Se houver empate, seleciona-se a porta com o menor identificador (id)
5. Todas as portas que não são portas designadas são bloqueadas

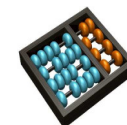
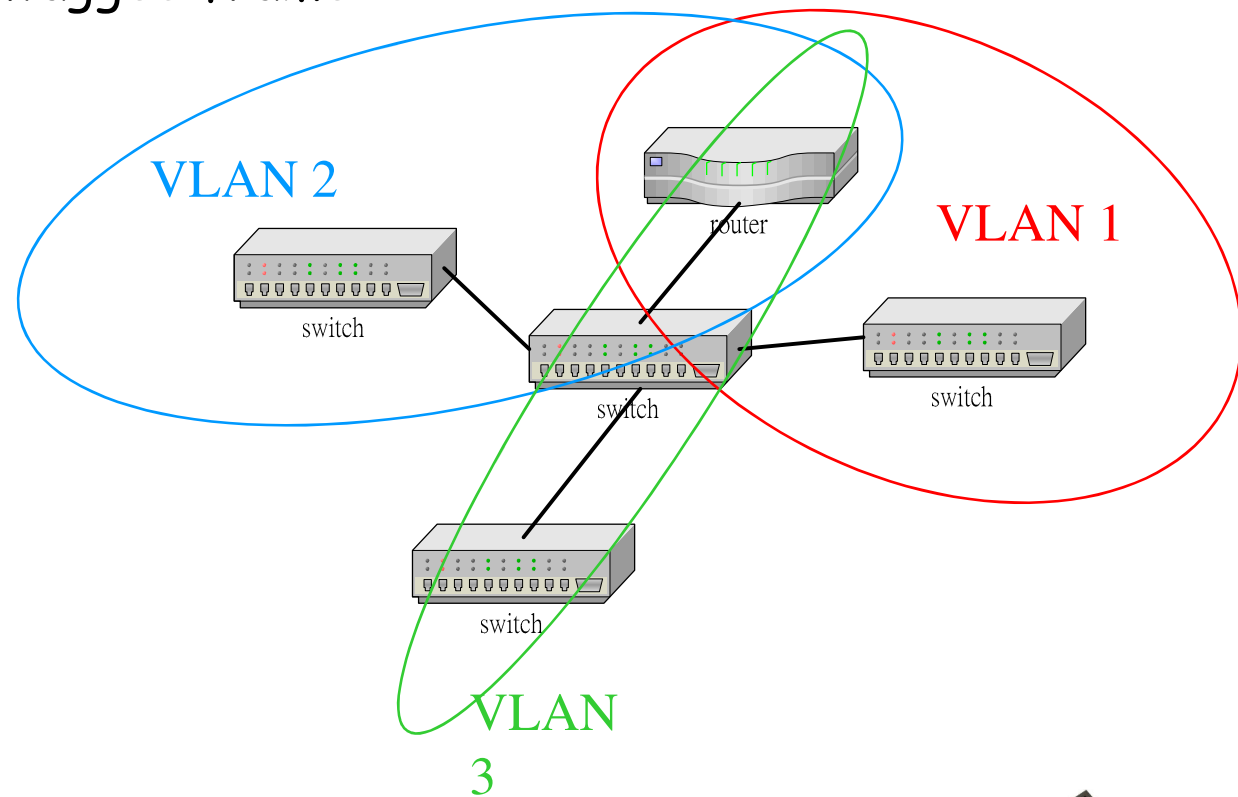


VLAN

- Especificado no IEEE 802.1Q
- Conectividade lógica
- tagged frame vs. untagged frame

VLAN pode ser associada a

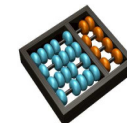
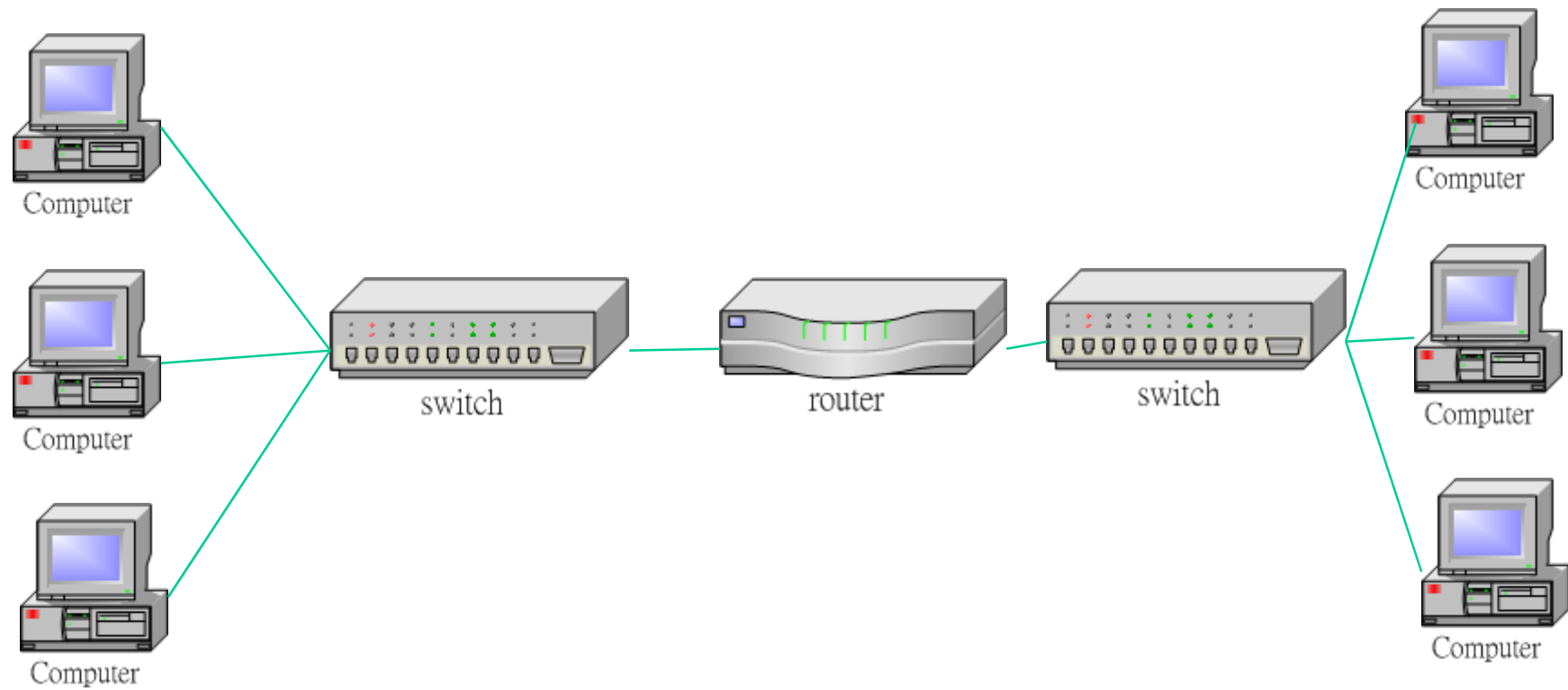
1. Port
2. MAC address
3. Protocolo
4. Subrede IP
5. Application-based



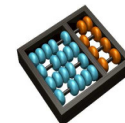
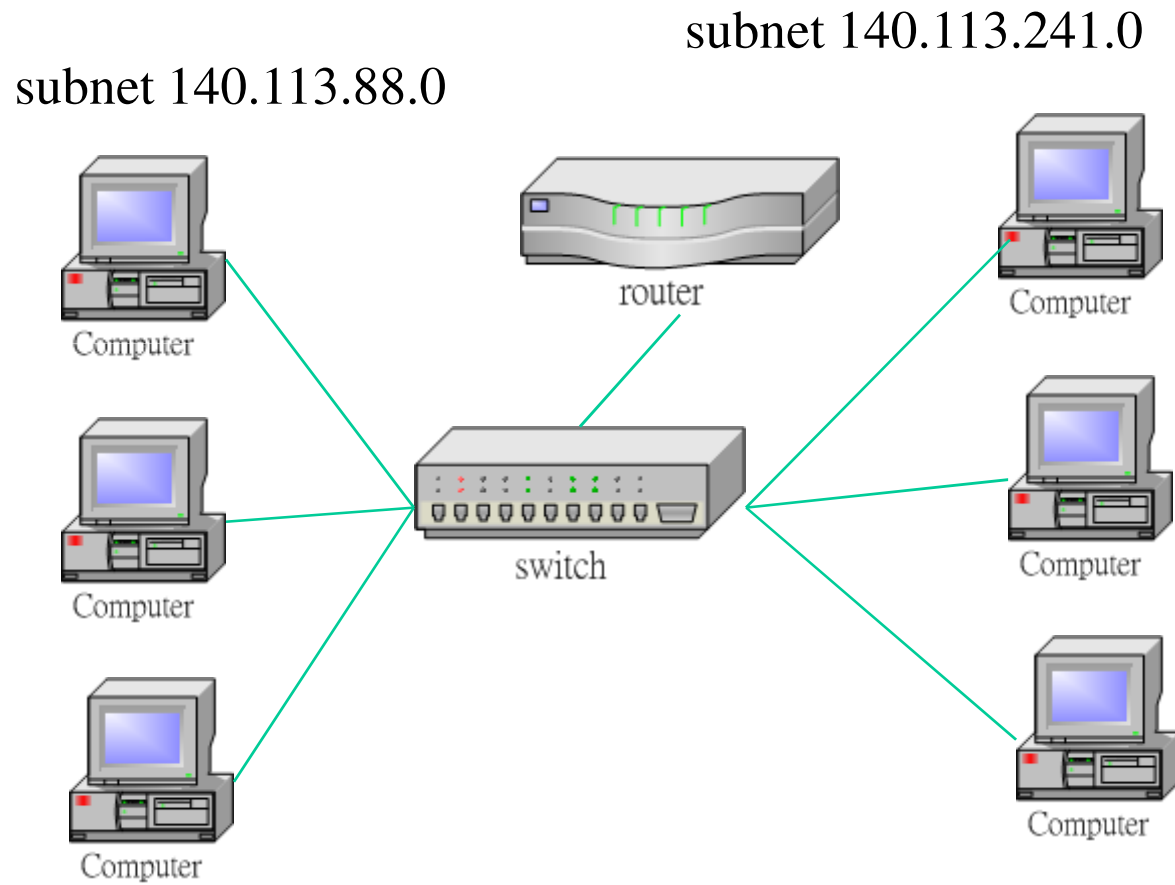
Exemplo VLAN

subnet 140.113.88.0

subnet 140.113.241.0

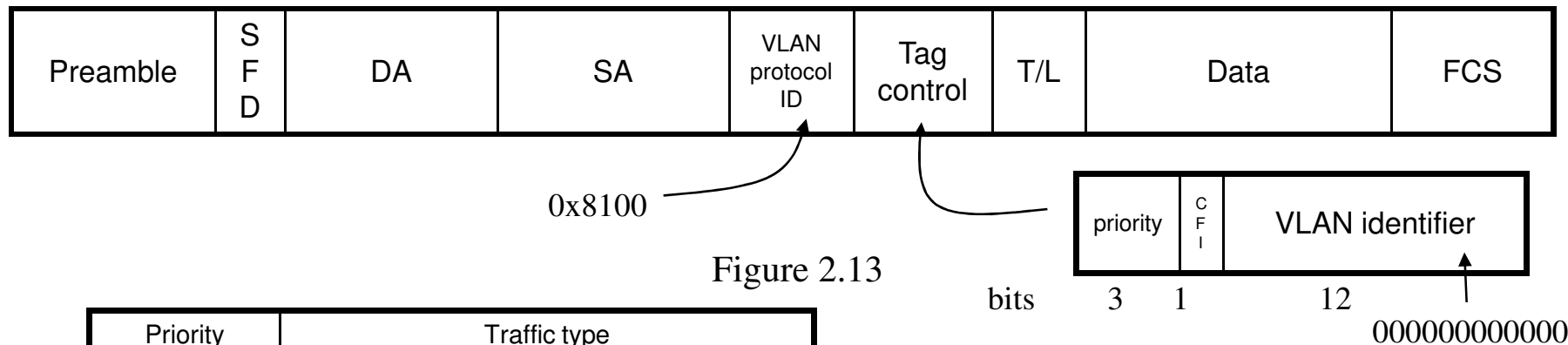


Exemplo VLAN



Priority Tag

- Priority field embedded in VLAN tag



Priority	Traffic type
1	Background
2	Spare
0(default)	Best effort
3	Excellent effort
4	Controlled load
5	< 100 ms latency and jitter
6	< 10 ms latency and jitter
7	Network control

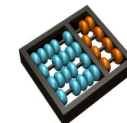
low

high

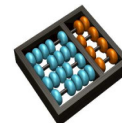
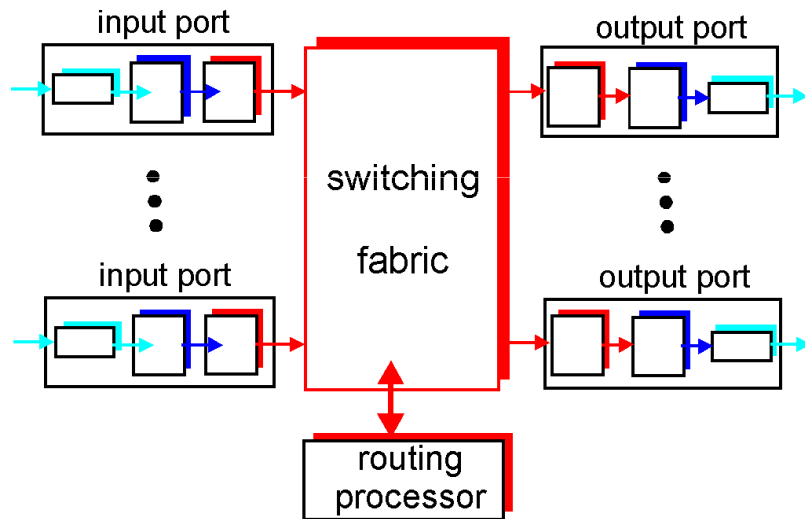
802.1p QoS

Class of Service (CoS) vs.

Quality of Service (QoS)

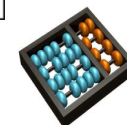
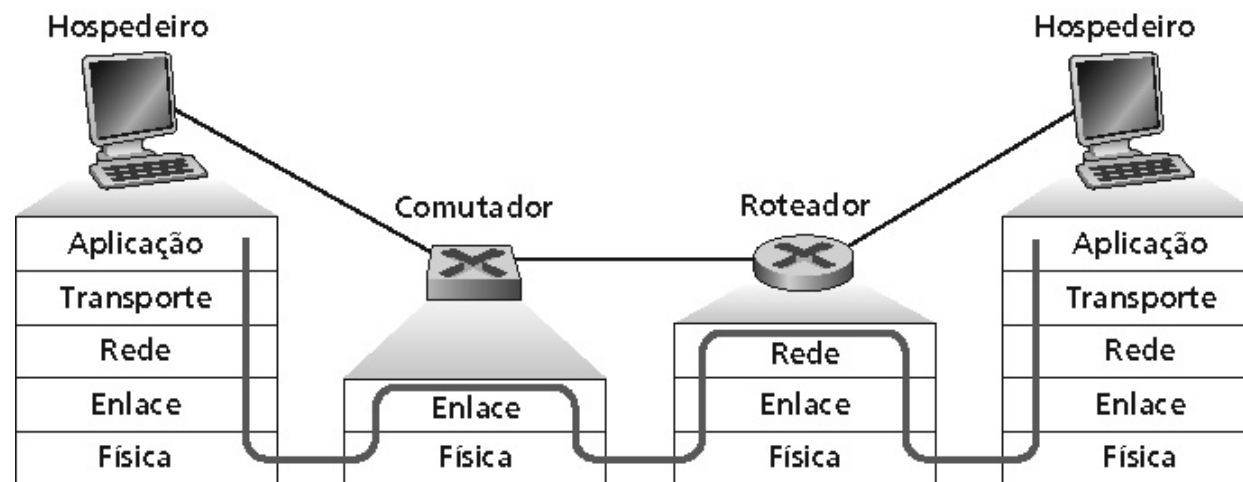


Switch Layer 2



Switches versus Roteadores

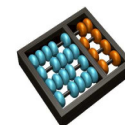
- ambos são dispositivos "armazena e re-encaminha",
 - ✓ roteadores são dispositivos da Camada de Rede (examinam cabeçalhos da camada de rede)
 - ✓ switches são dispositivos da Camada de Enlace
- roteadores mantêm tabelas de rotas e implementam algoritmos de roteamento;
- switches mantêm tabelas, implementam filtragem, são autodidatas e mantêm algoritmos de árvore geradora



Switches versus Roteadores

Switches + e -

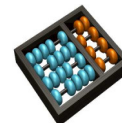
- + Operação de um switch é mais simples requerendo menor capacidade de processamento
- + Tabelas de swicthes são autodidatas;
- Topologias são restritas com switches: uma árvore geradora deve ser construída para evitar ciclos
- Switches não oferecem proteção contra tempestades de difusão ("broadcast storms"): difusão contínua feita por um nó será espalhada por um switch



Switches versus Roteadores

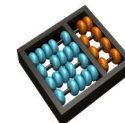
Roteadores + e -

- + São suportadas topologias arbitrárias, ciclos são limitados por contadores TTL (e bons protocolos de roteamento)
- + Provêm proteção "parede corta-fogo" contra tempestades de difusão
- Requerem configuração de endereços IP (não são "plug and play")
- Requerem maior capacidade de processamento



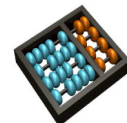
Comparação

	<u>hubs</u>	<u>roteadores</u>	<u>comutadores</u>
isolamento de tráfego	não	sim	sim
plug & play	sim	não	sim
roteamento ótimo	não	sim	não
comutação acelerada	sim	não	sim



Camada de Enlace de Dados

- 5.1 Introdução e Serviços
- 5.2 Correção e detecção de erros
- 5.3 Protocolos Múltiplo Acesso
- 5.4 Endereçamento
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização: ATM, MPLS



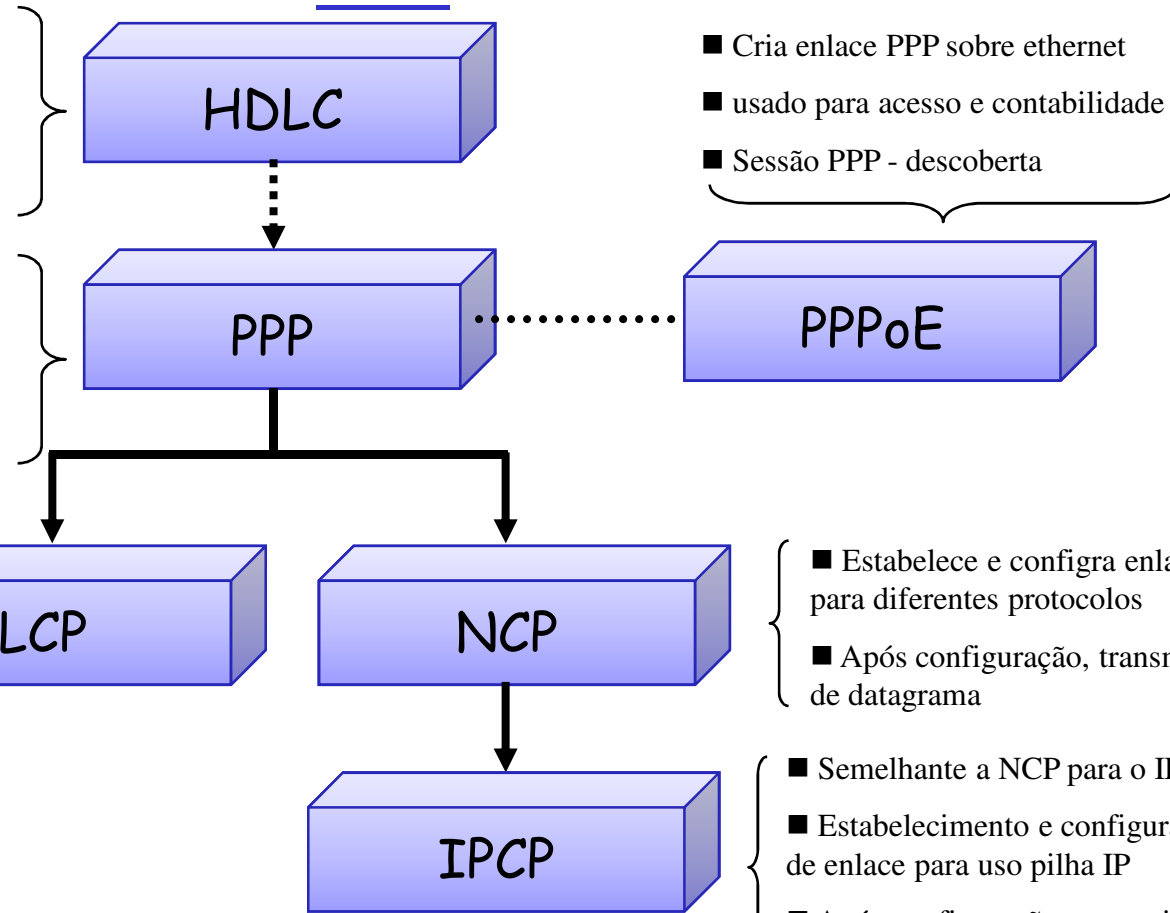
PPP

- Vários outros protocolos foram derivados do HDLC
- ponto-a-ponto e pont-multiponto
- muito utilizado em WANs

- Carrega daagramas de diferentes protocolos em enlaces ponto-a-ponto
- peer-to-peer
- LCP → NCP → carregam datagramas

- estabelece e configura enlace PPP
- usado por NCP

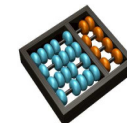
-→ Herdado de
- Parte de
- Relacionado a



- Cria enlace PPP sobre ethernet
- usado para acesso e contabilidade
- Sessão PPP - descoberta

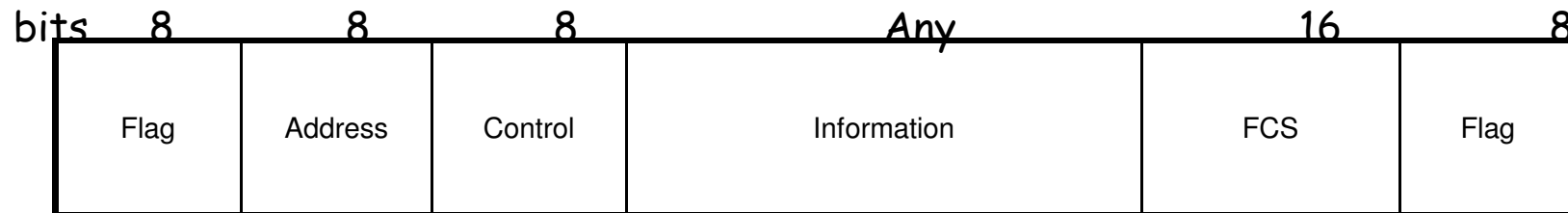
- Estabelece e configura enlace para diferentes protocolos
- Após configuração, transmissão de datagrama

- Semelhante a NCP para o IP
- Estabelecimento e configuração de enlace para uso pilha IP
- Após configuração, transmissão datagrama IP

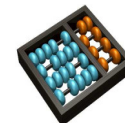


High-level Data Link Control (HDLC)

- Assíncrono, confiável, full-duple, orientado a bit

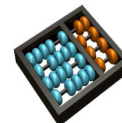


- Diferentes tipos de frame
- Enlaces peer-to-peer em WAN



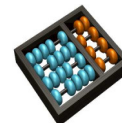
Controle de Enlace Ponto-a-Ponto

- Um transmissor, um receptor, um link: 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
- PPP (Point to Point Protocol) é muito popular: usado em conexões discadas entre sistema doméstico e provedor; tb. em conexões SONET/SDH, etc
- PPP é extremamente simples (o mais simples dos protocolos de enlace de dados) e muito otimizado
- 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!)



PPP Requisitos de Projeto [RFC 1557]

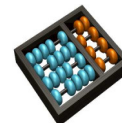
- **Enquadramento de pacote:** encapsulamento do datagrama da camada de rede no quadro da camada de enlace
 - ✓ transporta dados da camada de rede de qualquer protocolo de rede (não apenas o IP) *ao mesmo tempo*
 - ✓ capacidade de separar os protocolos na recepção
- **transparência de bits:** deve transportar qualquer padrão de bits 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 de cada outro



Não são requisitos PPP

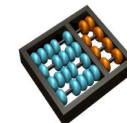
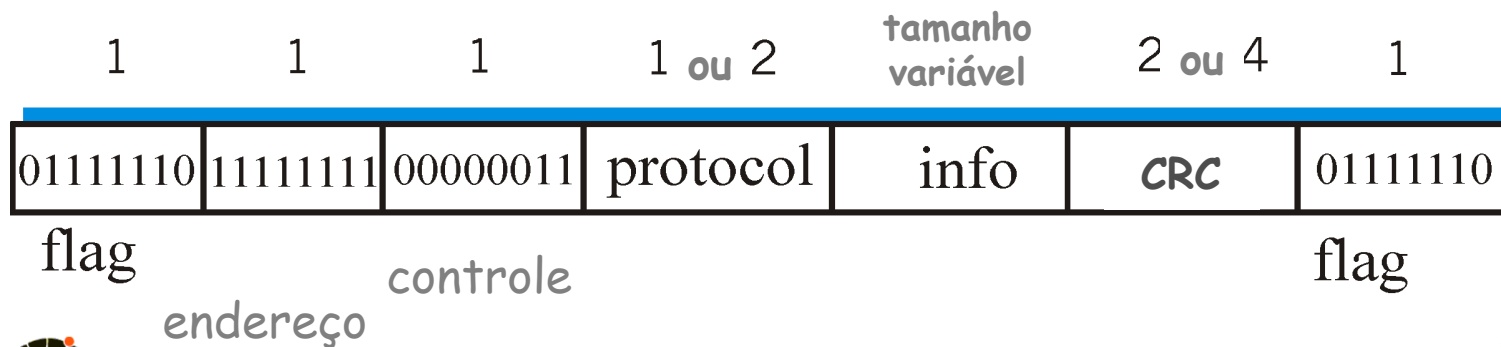
- correção nem recuperação de erros
- controle de fluxo
- necessidade de suportar enlaces multiponto (ex., polling)

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



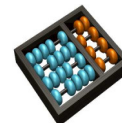
Quadro de Dados do PPP

- **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

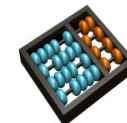
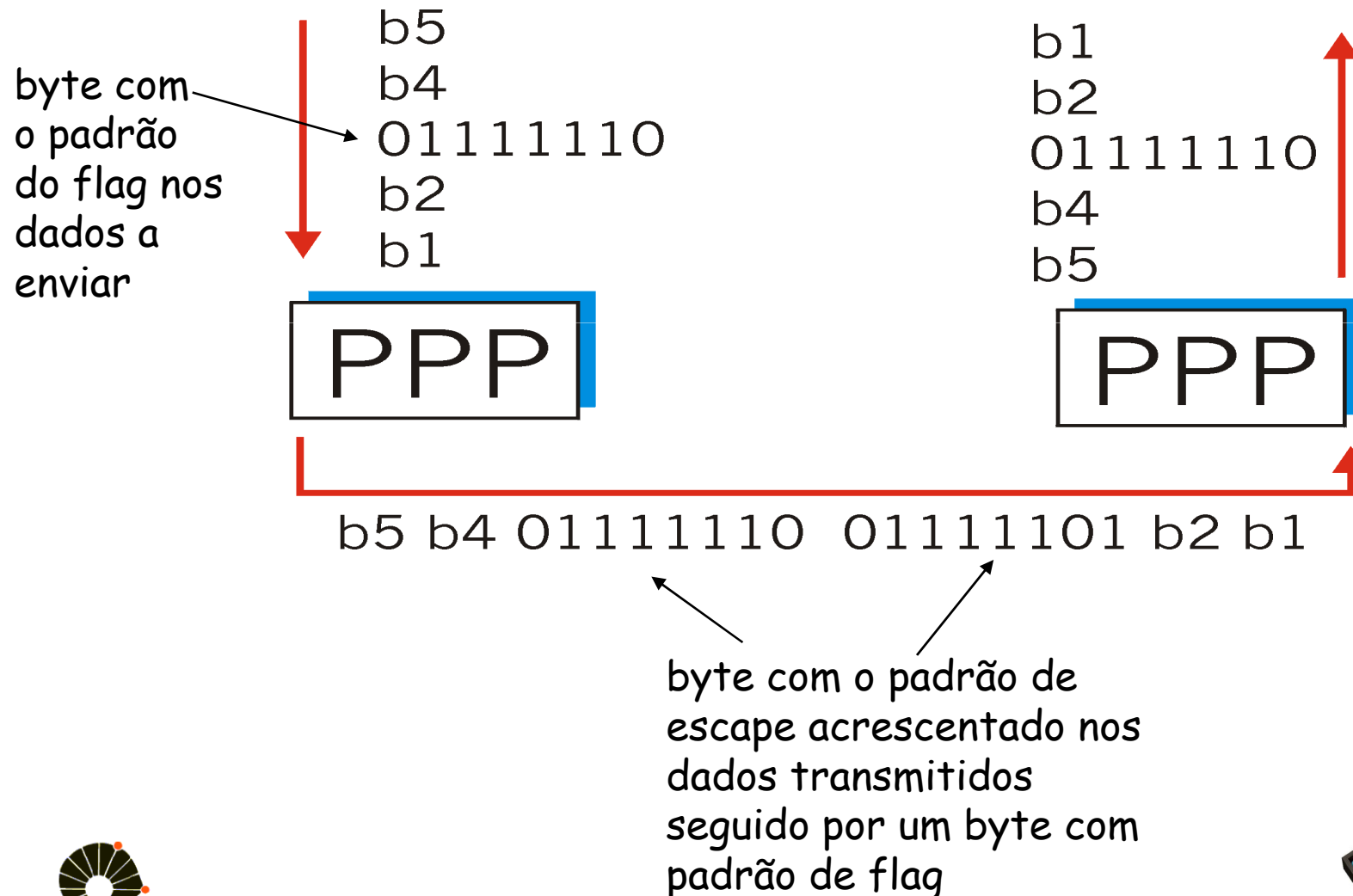


Byte Stuffing - Transparência de Dados (RFC 1662)

- Requisito de "transparência de dados": o campo de dados deve poder incluir o padrão correspondente ao flag <01111110>
 - ✓ **Q:** 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: discarta o primeiro e continua a recepção de dados
 - ✓ único byte 01111110: então é um flag



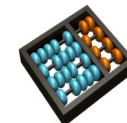
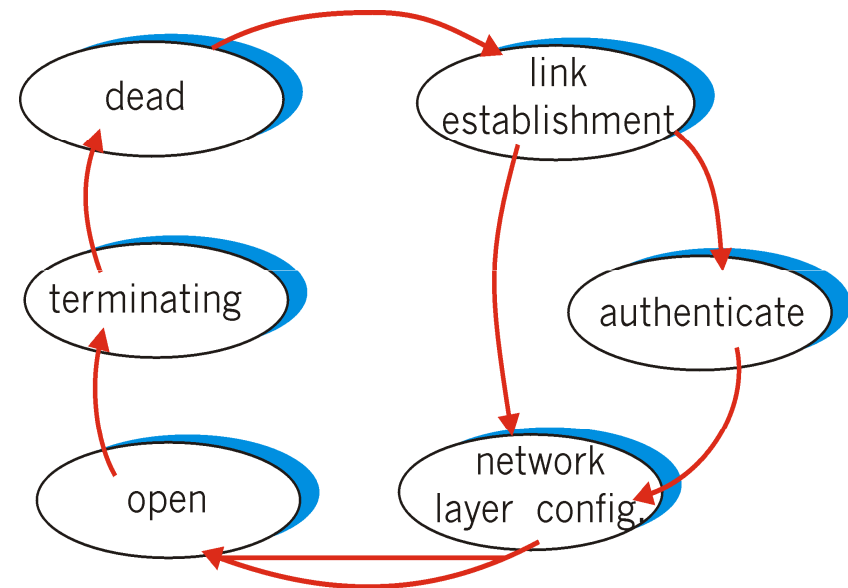
Byte Stuffing



PPP Protocolo de Controle de Dados

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

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

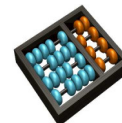


Link Control Protocol

- Negociação de opções para estabelecimento de enlace lógico

Class	Type	Function
Configuration	Configure-request	Open a connection by giving desired changes to options
	Configure-ack	Acknowledge Configure-request
	Configure-nak	Deny Configure-request because of unacceptable options
	Configure-reject	Deny Configure-request because of unrecognizable options
Termination	Terminate-request	Request to close the connection
	Terminate-ack	Acknowledge Terminate-request
Maintenance	Code-reject	Unknown requests from the peer
	Protocol-reject	Unsupported protocol from the peer
	Echo-request	Echo back the request (for debugging)
	Echo-reply	The echo for Echo-request (for debugging)
	Discard-request	Just discard the request (for debugging)

Opções de configuração: Maximum-Receive-Unit, Authentication-Protocol, Quality-Protocol, Magic-Number, Protocol-Field-Compression, Address-and-Control-Field-Compression

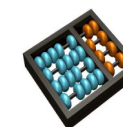


Internet Protocol Control Protocol

- Estabelece e configura enlace PPP para uso do protocolo IP
- PPP frame com opção 0x8021.

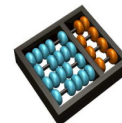
Class	Type	Function
Configuration	Configure-request	Open a connection by giving desired changes to options
	Configure-ack	Acknowledge Configure-request
	Configure-nak	Deny Configure-request because of unacceptable options
	Configure-reject	Deny Configure-request because of unrecognizable options
Termination	Terminate-request	Request to close the connection
	Terminate-ack	Acknowledge Terminate-request
Maintenance	Code-reject	Unknown requests from the peer

configurable options: IP-Compression-Protocol, IP-Address



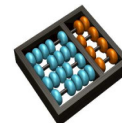
PPP over Ethernet (PPPoE)

- Permite estações em uma rede ethernet estabelecerem enlaces PPP
- Por que usar PPPoE ao invés de IP sobre ethernet?
- Redes de acesso e contabilidade da mesma forma que redes dial-up usando PPP.
- Quadro PPP carregado na carga do usuário do quadro ethernet



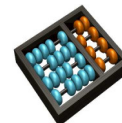
Camada de Enlace de Dados

- 5.1 Introdução e Serviços
- 5.2 Correção e detecção de
- 5.3 protocolos Múltiplo Acesso
- 5.4 Endereçamento
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches
- 5.7 PPP
- 5.8 Virtualização: ATM, MPLS

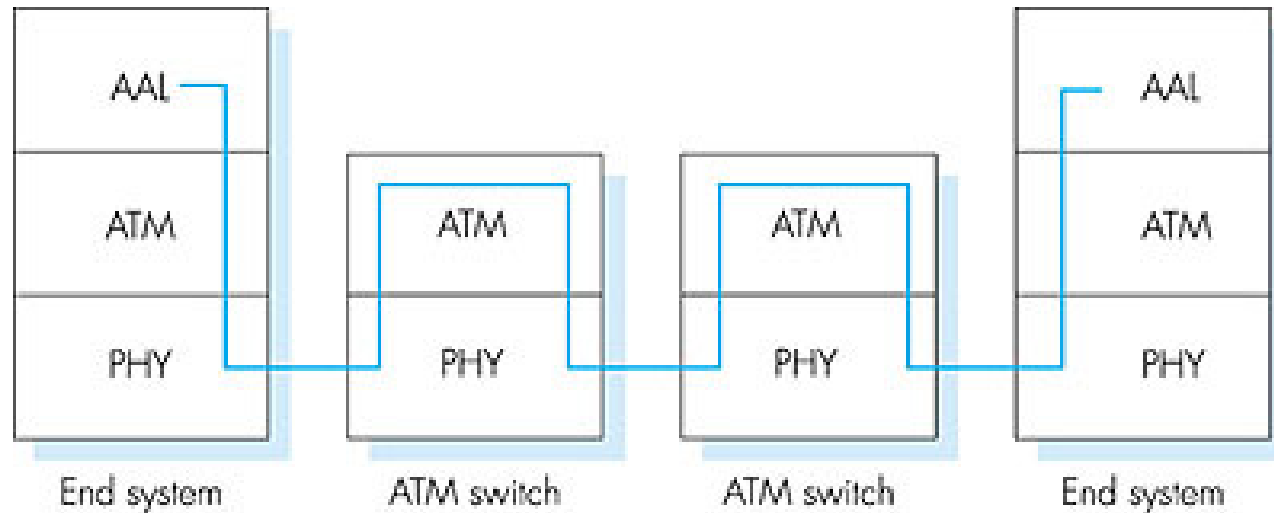


Modo de Transferência Assíncrono: ATM

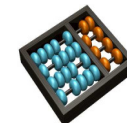
- Padrão dos anos 1980/1990 para altas taxas de transmissão (155Mbps a 622 Mbps e mais alto) arquitetura de *Broadband Integrated Service Digital Network* (B-ISDN)
- Objetivo: transporte integrado de voz, dados e imagens com foco nas redes públicas de comunicação
 - ✓ deve atender os requisitos de tempo/QoS 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



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**



ATM: camada de rede ou de enlace?

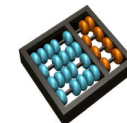
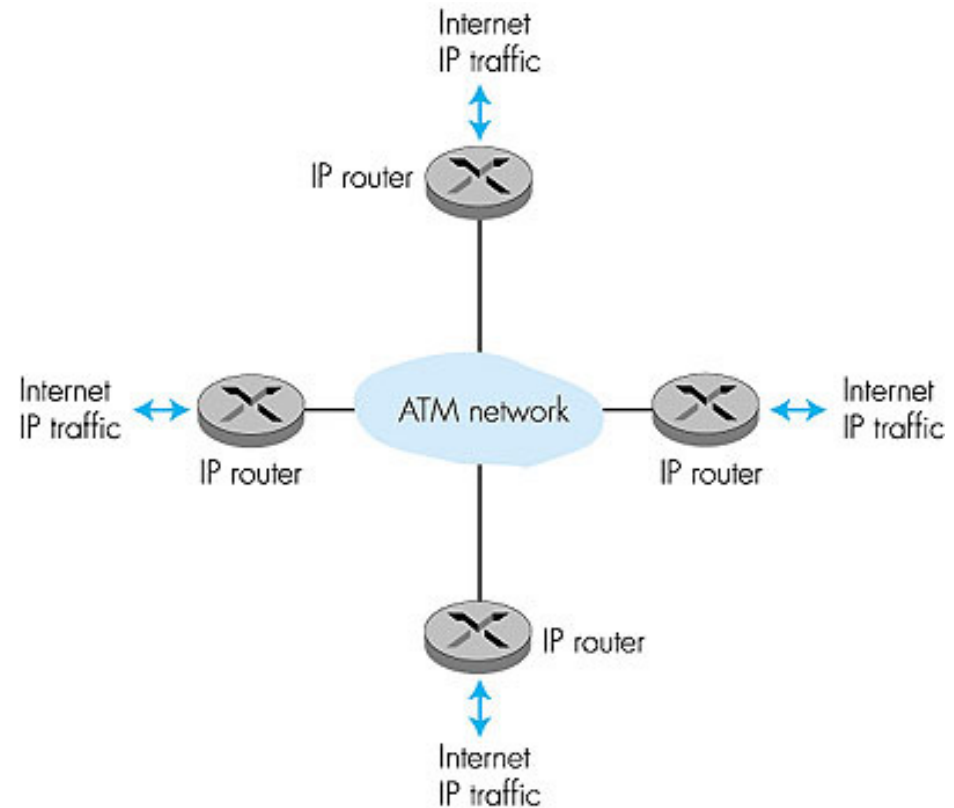
Visão: transporte fim-a-fim:

"ATM de computador a computador"

- ✓ ATM é uma tecnologia de rede

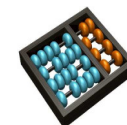
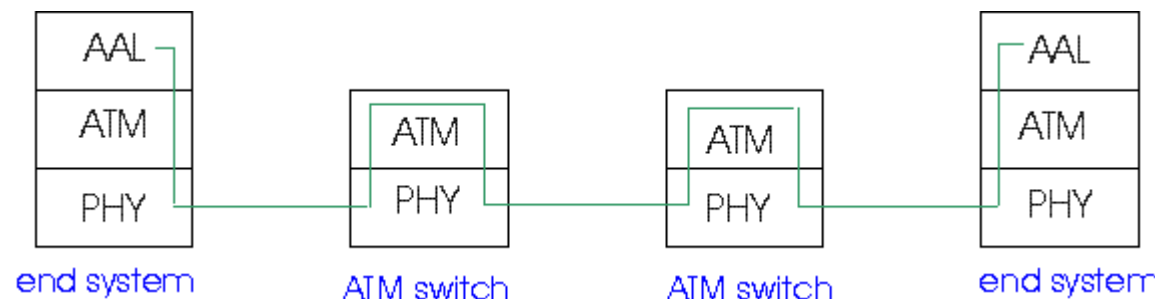
Realidade: usada para conectar roteadores IP de backbone

- ✓ "IP sobre ATM"
- ✓ ATM como uma camada de enlace comutada, conectando roteadores IP



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

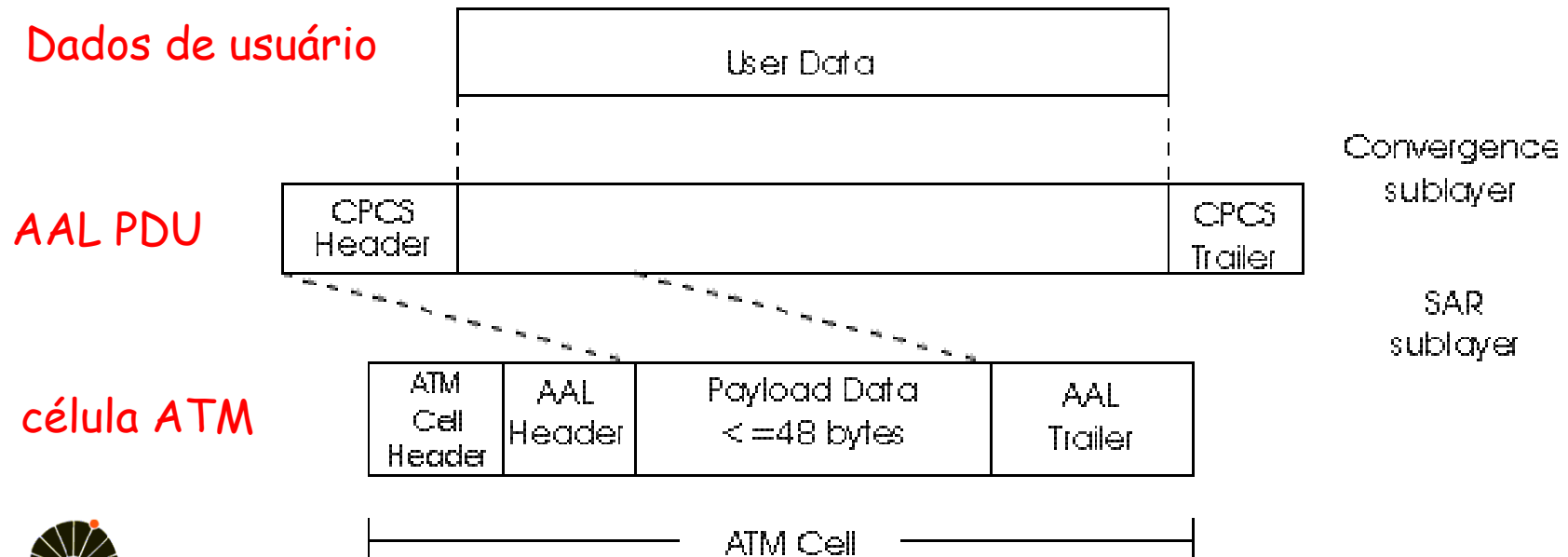


Camada de Adaptação ATM (AAL)

[mais]

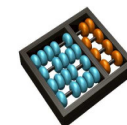
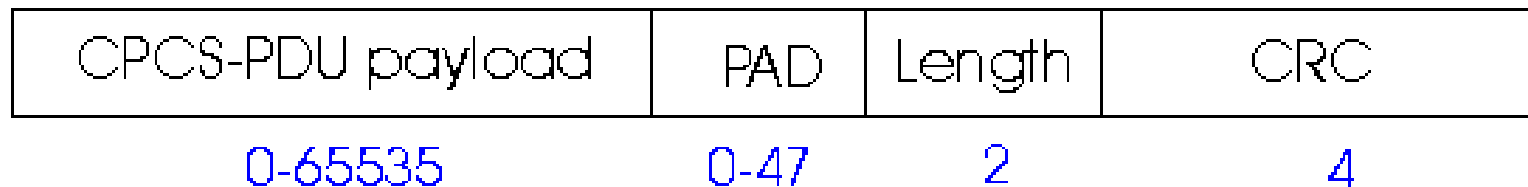
Diferentes versões da camada AAL, dependendo da classe de serviço ATM:

- **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)



AAL5 - "Simple And Efficient AL" (SEAL)

- **AAL5: AAL com cabeçalhos pequenos** usado para transportar datagramas IP
 - ✓ 4 bytes de verificação cíclica de erros
 - ✓ PAD assegura que o segmento tem tamanho múltiplo de 48 bytes
 - ✓ grandes unidades de dados AAL5 devem ser fragmentadas em células ATM de 48-bytes

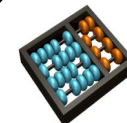


Camada ATM

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

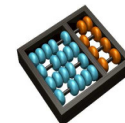


Camada ATM: Circuitos Virtuais

- **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):**

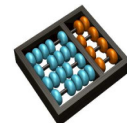


dinamicamente criados numa base por chamada



Circuitos Virtuais ATM

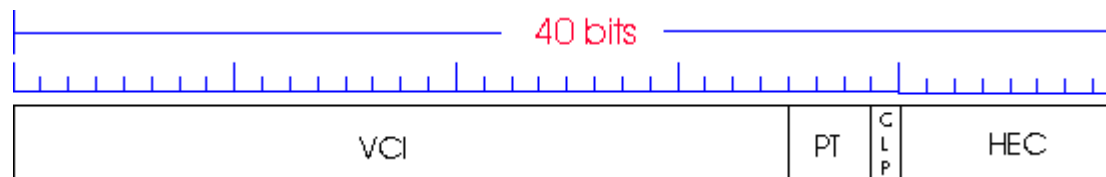
- **Vantagens do uso de circuitos virtuais no ATM:**
 - ✓ índices de QoS garantidos para conexões mapeadas em circuitos virtuais (banda passante, atraso, variância de atraso)
- **Problemas no uso de circuitos virtuais:**
 - ✓ O suporte de tráfego datagrama é ineficiente
 - ✓ um PVC entre cada par origem/destino 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



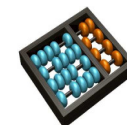
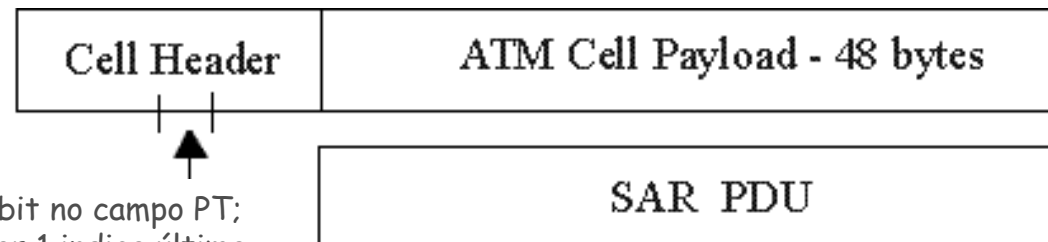
Camada ATM: célula ATM

- cabeçalho da célula ATM com 5 bytes
- carga útil com 48-bytes
 - ✓ Porque?: carga útil pequena -> pequeno atraso de criação de célula para voz digitalizada
 - ✓ meio do caminho entre 32 and 64 (compromisso!)

Cabeçalho da célula

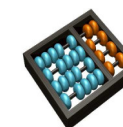
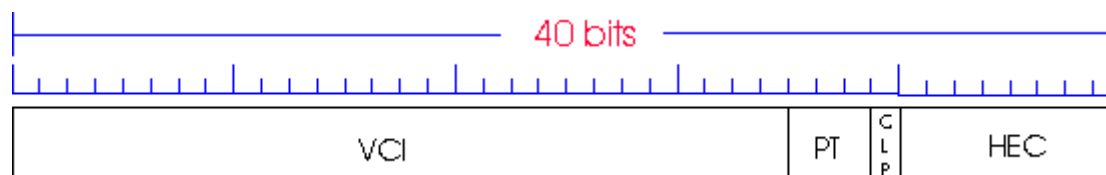


Formato da célula



Cabeçalho da célula ATM

- **VCI:** identificador de canal virtual
 - ✓ pode *mudar* de enlace para enlace através da rede
- **PT:** Tipo de payload (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



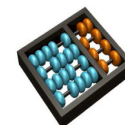
Camada Física ATM

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 sendo empregado

Funções da TCS :

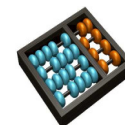
- ✓ Geração do **checksum** do cabeçalho: 8 bits CRC
- ✓ **Delineamento** de célula
- ✓ Com uma subcamada PMD não estruturada, transmite células vazias ("**idle cells**") quando não há células de dados a enviar



Camada Física ATM (mais)

Subcamada Dependente do Meio Físico (PMD)

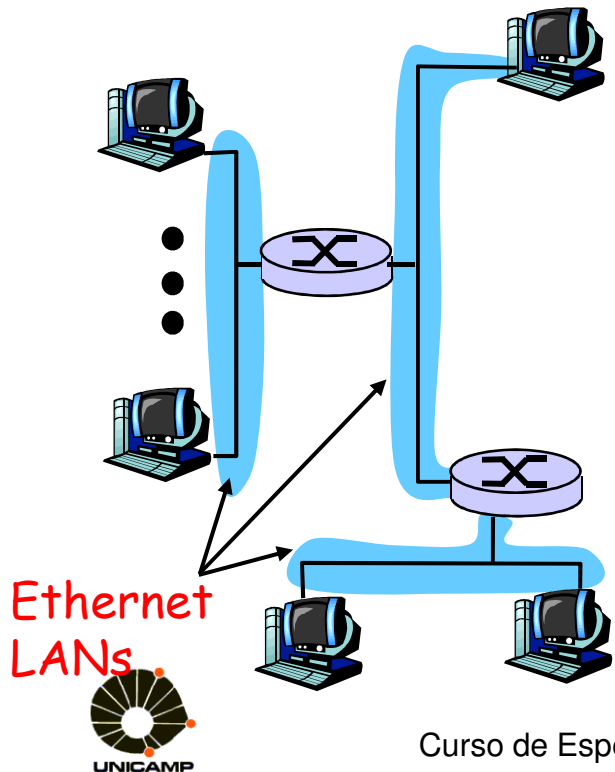
- **SONET/SDH:** estrutura de transmissão de quadros (como um container carregando bits);
 - ✓ sincronização de bits;
 - ✓ partições da banda passante (TDM);
 - ✓ várias velocidades: OC1 = 51.84 Mbps; OC3 = 155.52 Mbps; OC12 = 622.08 Mbps
- **T1/T3:** estrutura de transmissão de quadros (velha hierarquia 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)



IP-sobre-ATM

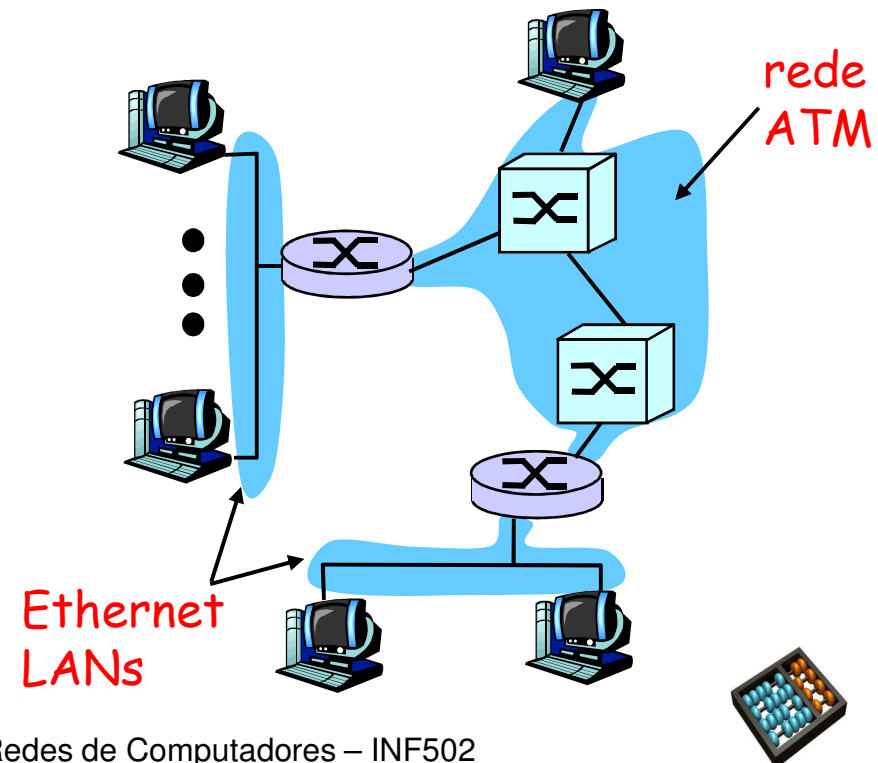
apenas IP Clássico

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



IP sobre ATM

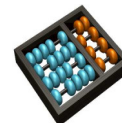
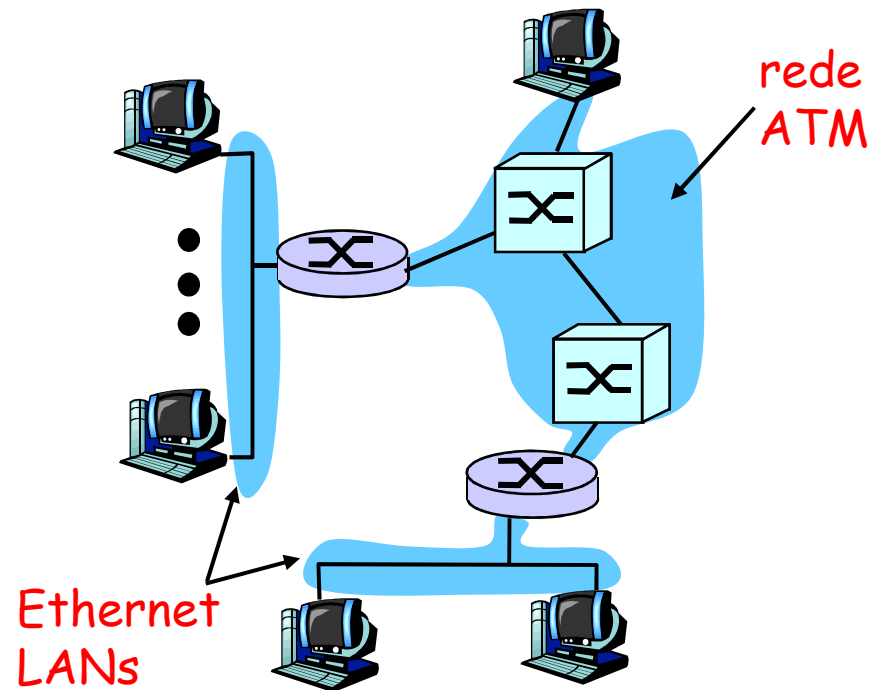
- substitui "rede" (ex., segmento de LAN) com a rede ATM
- endereços ATM, endereços IP



IP-sobre-ATM

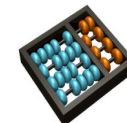
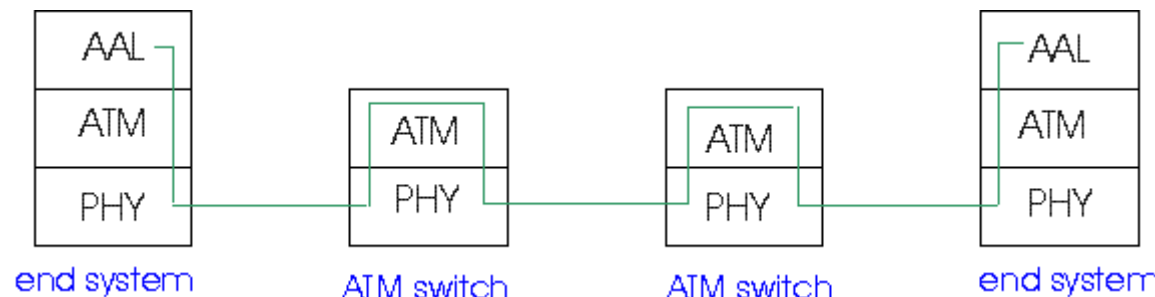
Questões:

- datagramas IP em ATM AAL5 PDUs
- dos endereços IP aos endereços ATM
 - ✓ da mesma forma que de endereços IP para endereços MAC 802.3!



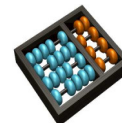
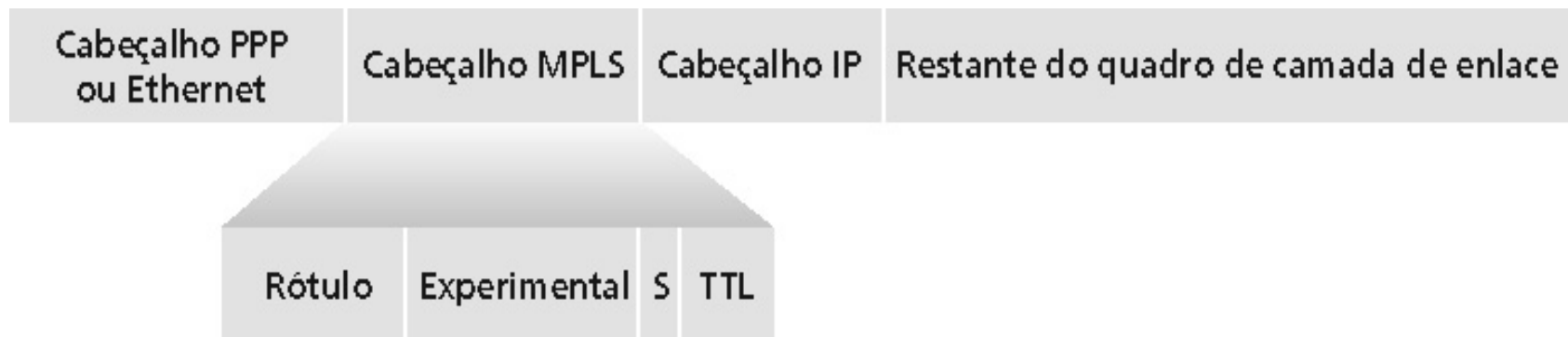
Viagem de um Datagrama numa Rede IP-sobre-ATM

- **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 Host de Destino:**
 - ✓ AAL5 remonta o datagrama original a partir das células recebidas
 - ✓ se o CRC OK, datagrama é passado ao IP



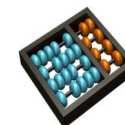
Multiprotocol label switching (MPLS)

- 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!



Roteadores MPLS

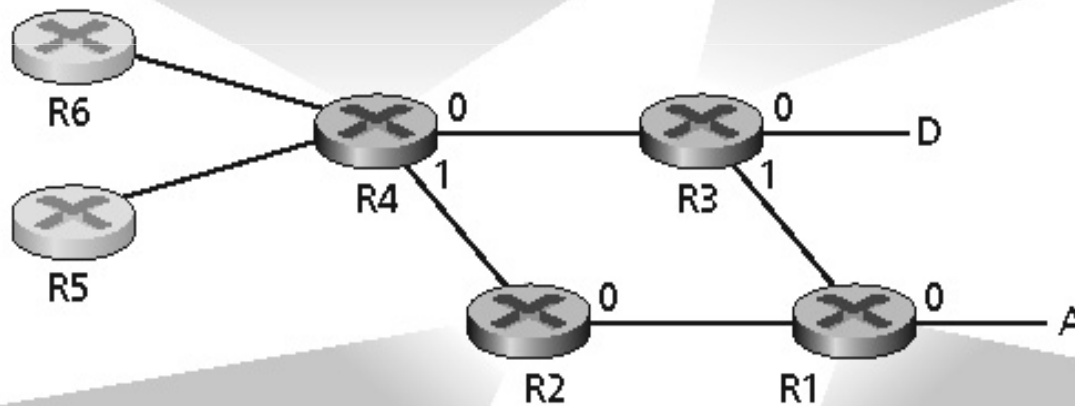
- Roteador faz a função de comutador de rótulo
- Pacotes encaminhados para interface de saída com base apenas no valor do rótulo (não inspeciona o endereço IP)
 - ✓ Tabela de encaminhamento MPLS distinta das tabelas de encaminhamento IP
- Protocolo de sinalização necessário para estabelecer o encaminhamento
 - ✓ 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



Tabelas de encaminhamento MPLS

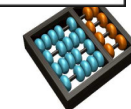
rótulo de entrada	rótulo de saída	destino	interface de saída
	10	A	0
	12	D	0
	8	A	1

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



Capítulo 5: Resumo

- princípios por trás dos serviços da camada de enlace:
 - ✓ detecção e correção de erros
 - ✓ compartilhando um canal broadcast: acesso múltiplo
 - ✓ endereçamento da camada de enlace, ARP
- várias tecnologias da camada de enlace
 - ✓ Ethernet
 - ✓ hubs, switches
 - ✓ PPP
 - ✓ ATM
 - ✓ MPLS
- viagem através da pilha de protocolos agora **ENCERRADA!**
 - ✓ A seguir: redes sem fio, redes móveis, redes multimídia, segurança, gerenciamento de rede

