

Redes de Computadores 1

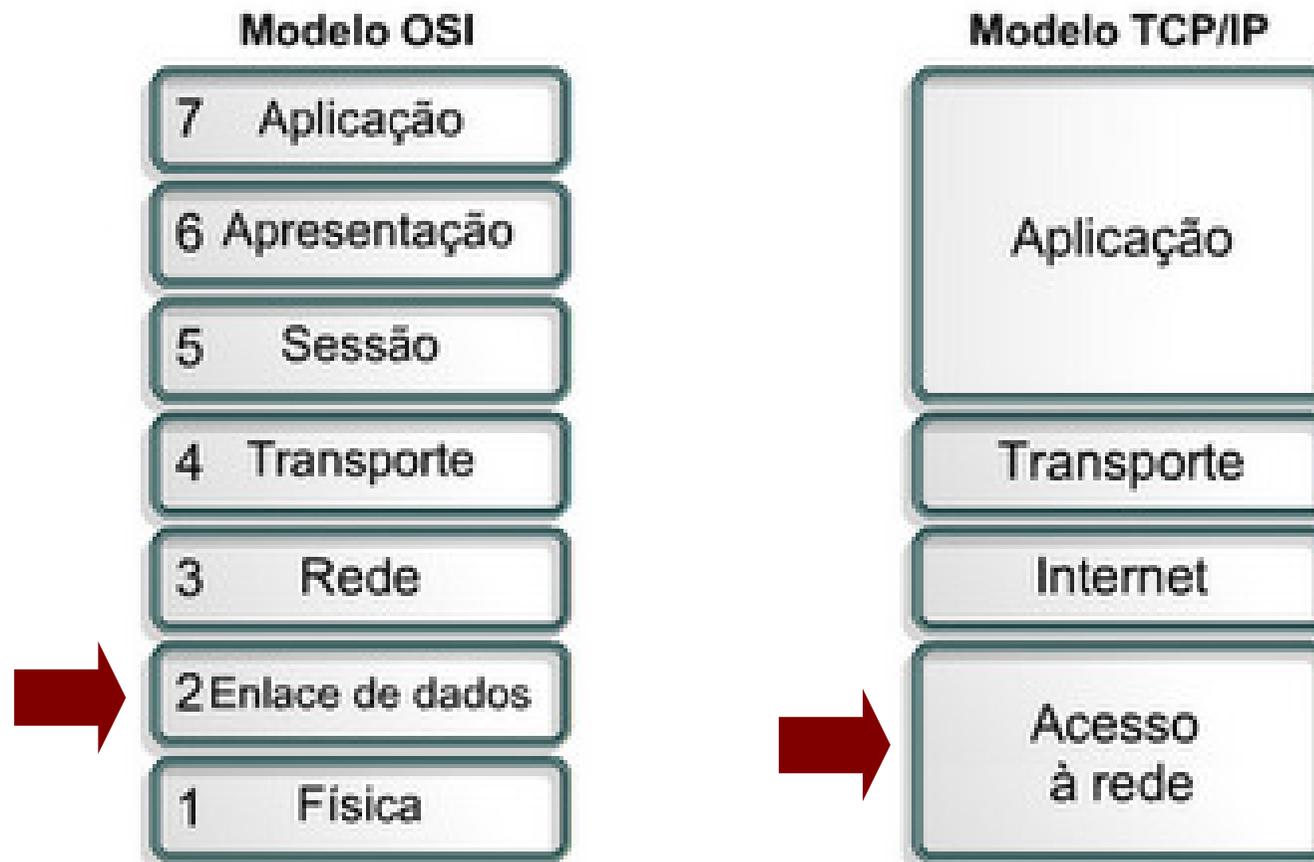
Prof. Miguel Elias Mitre Campista

`http://www.gta.ufrj.br/~miguel`

Parte IV

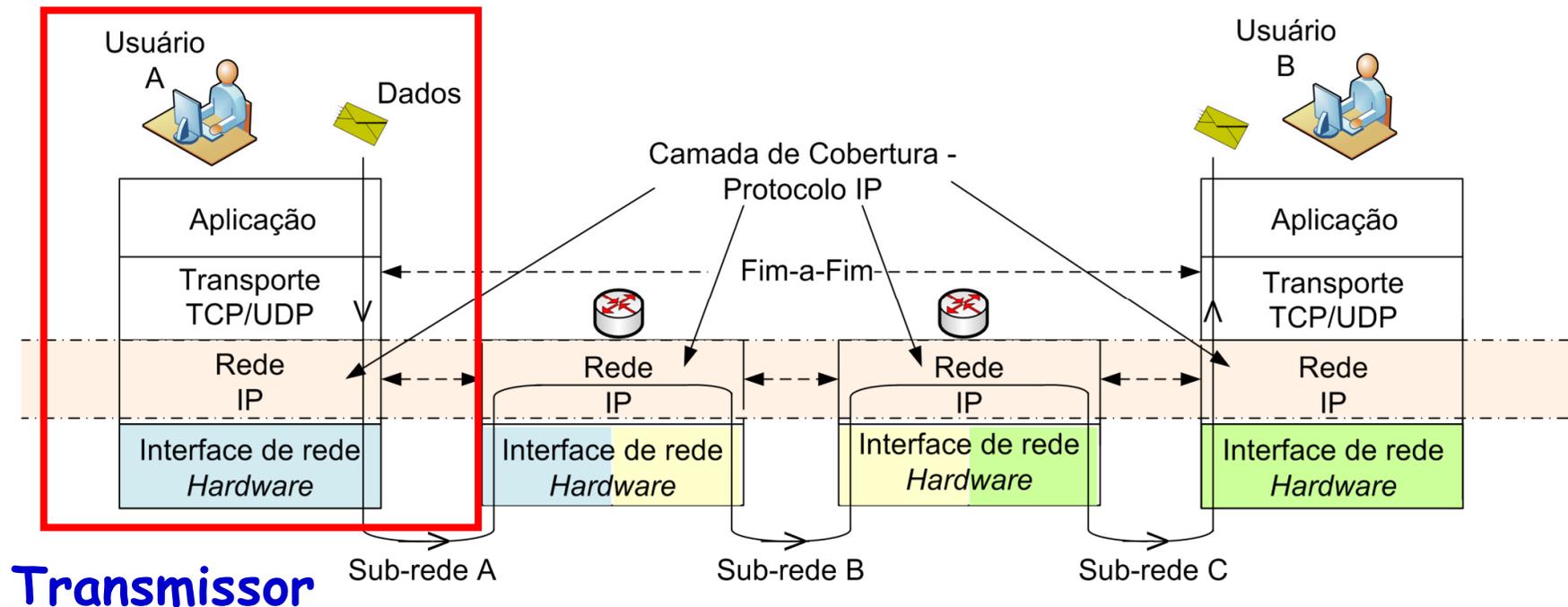
Camada de Enlace: Introdução

Camada de Enlace



Rede X Enlace

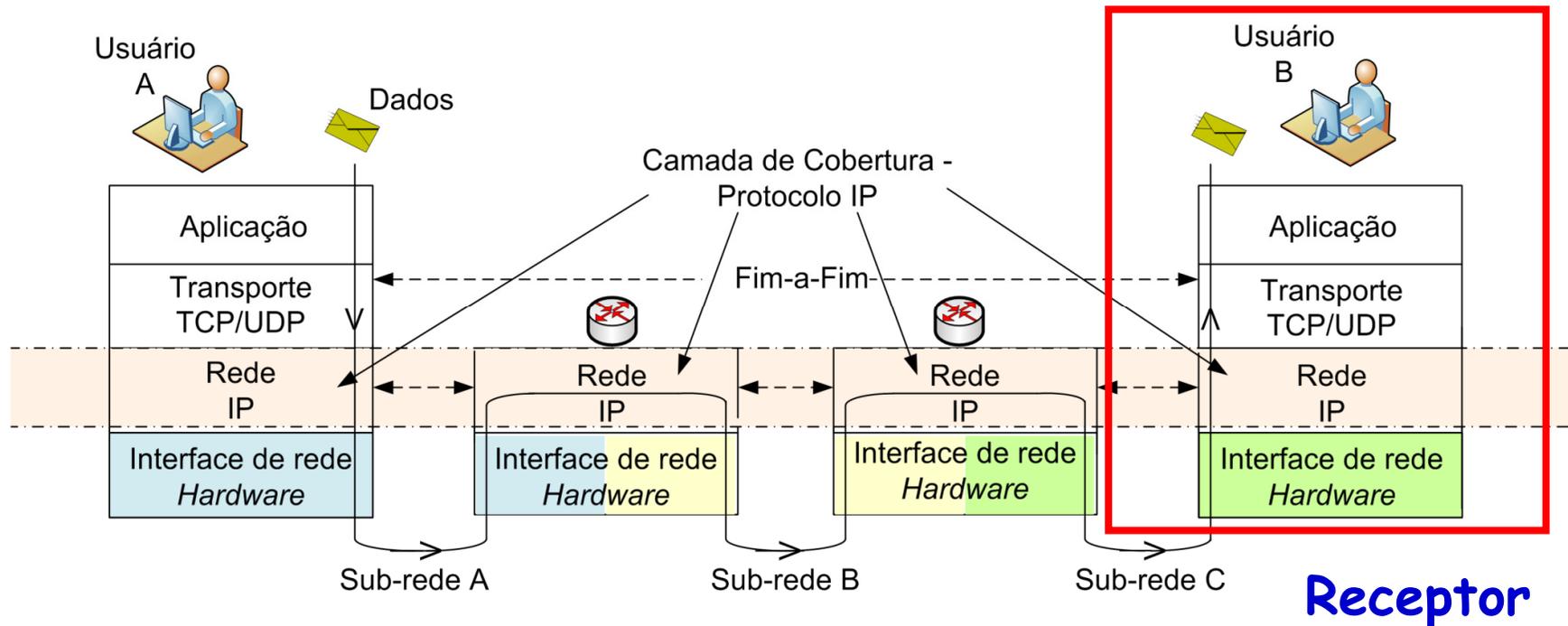
- Protocolos da camada de rede
 - Executados nos sistemas finais e nos roteadores



No lado transmissor, encapsula segmentos dentro de datagramas

Rede X Enlace

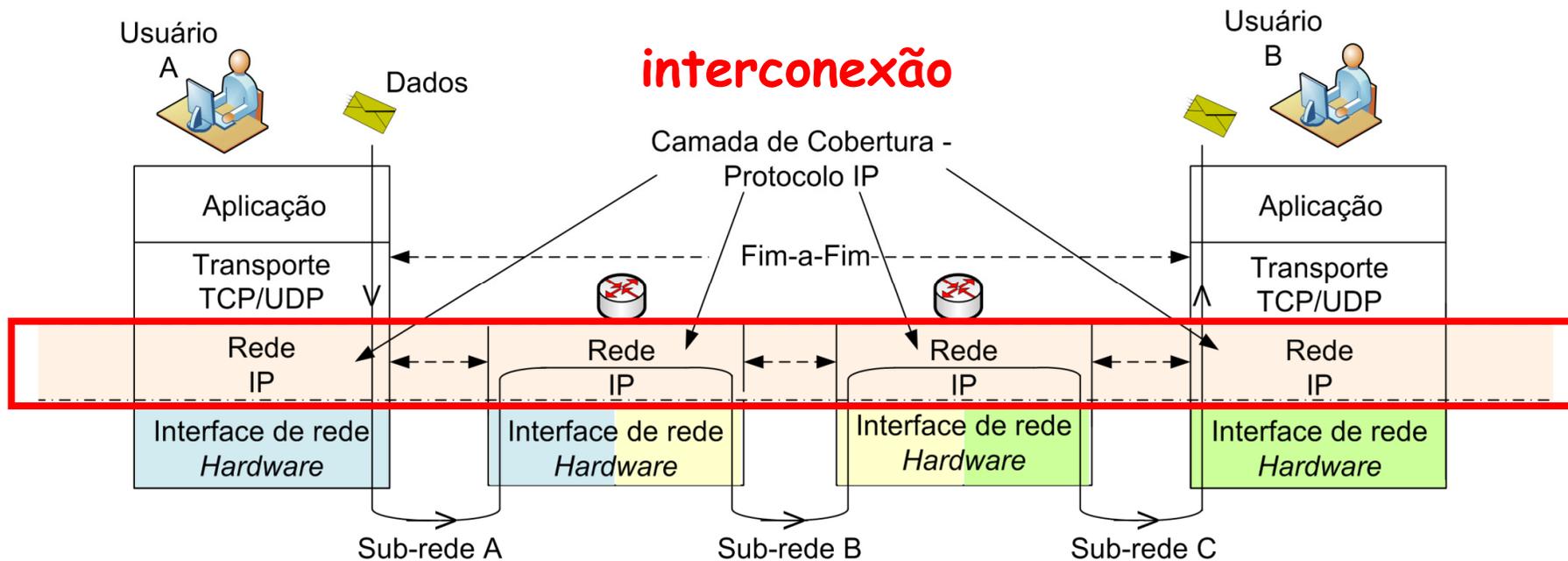
- Protocolos da camada de rede
 - Executados nos sistemas finais e nos roteadores



No lado receptor, entrega os segmentos para a camada de transporte

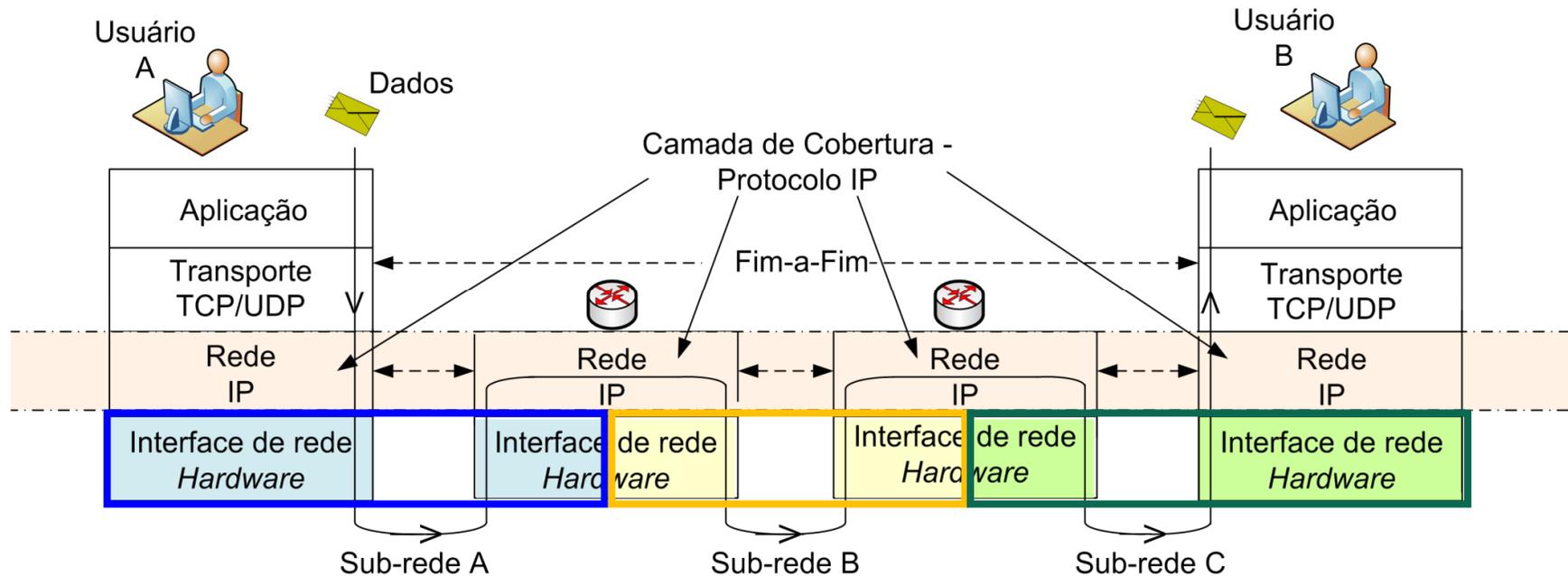
Rede X Enlace

- Protocolos da camada de rede
 - Executados nos sistemas finais e nos roteadores



Rede X Enlace

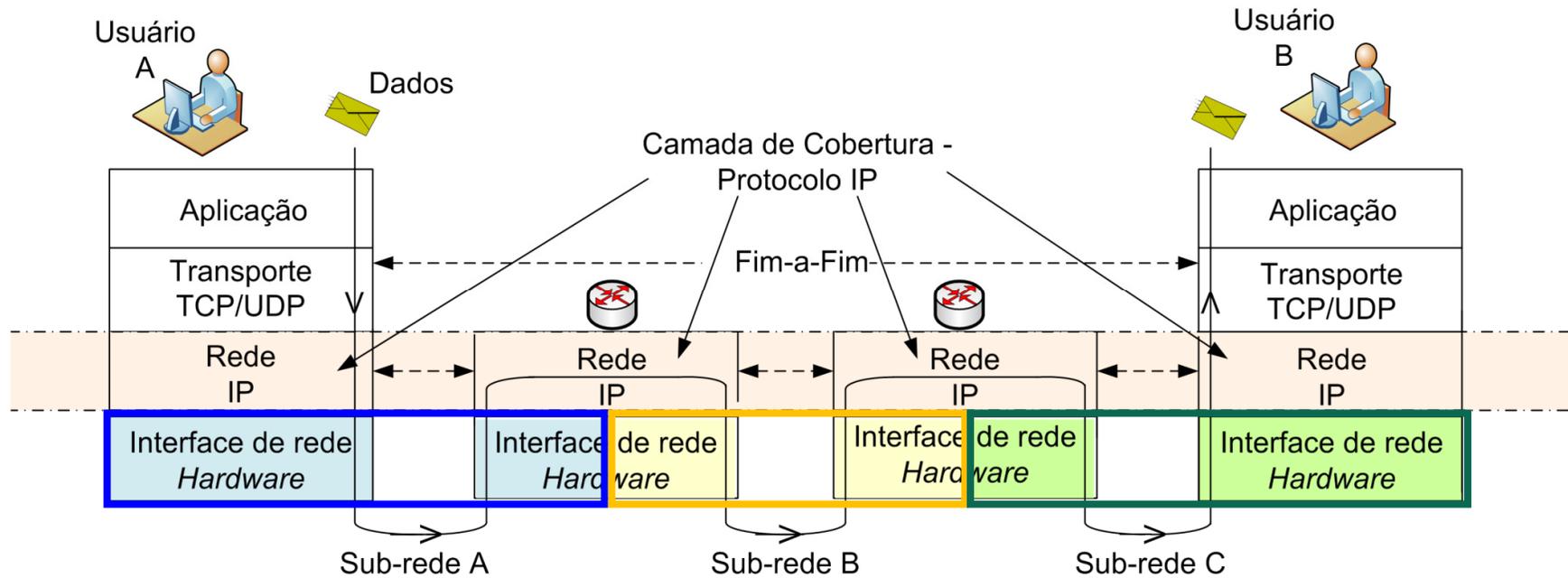
- Protocolos da camada de rede
 - Executados nos sistemas finais e nos roteadores



Cada enlace pode ter um protocolo diferente e cada protocolo pode ser utilizado em um enlace com características totalmente diferentes (p.ex. um enlace é cabeado e outro é sem-fio)

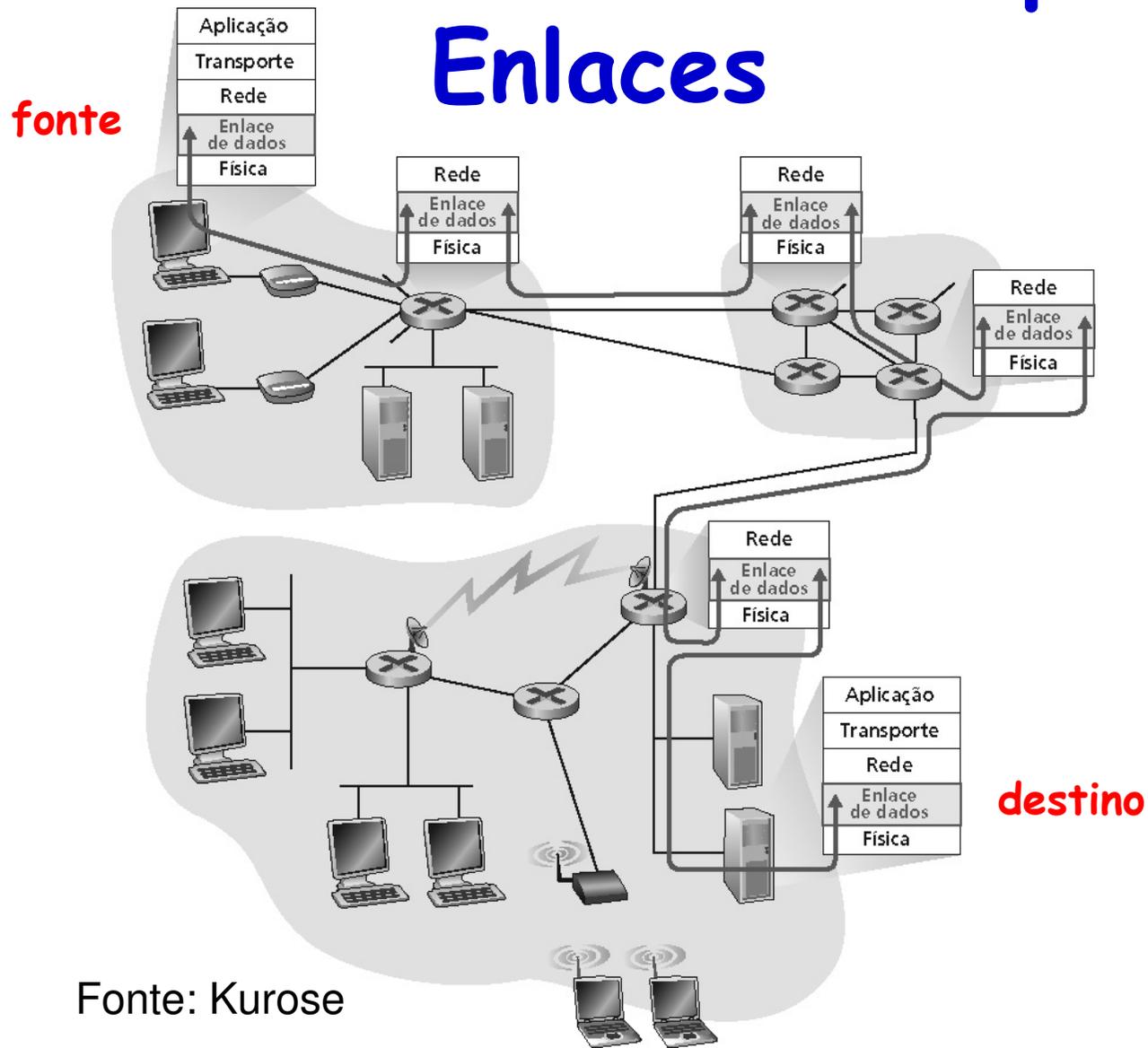
Rede X Enlace

- Protocolos da camada de rede
 - Executados nos sistemas finais e nos roteadores



Serviço salto-a-salto, em contraste com o serviço fim-a-fim

Transmissão de Dados pelos Enlaces



Fonte: Kurose

Camada de Rede

- Responsável por:
 - **Determinar o melhor caminho** para o envio dos pacotes
 - É função dos protocolos de roteamento
 - **Encaminhar** os pacotes até o destino
 - É função do protocolo IP
 - **Interconectar** redes de diferentes tecnologias
 - É função do protocolo IP

Camada de Rede

- Responsável por:
 - **Determinar o melhor caminho** para o envio dos pacotes
 - É função dos protocolos de roteamento
 - **Encaminhar** os pacotes até o destino
 - É função do protocolo IP
 - **Interconectar** redes de diferentes tecnologias
 - É função do protocolo IP

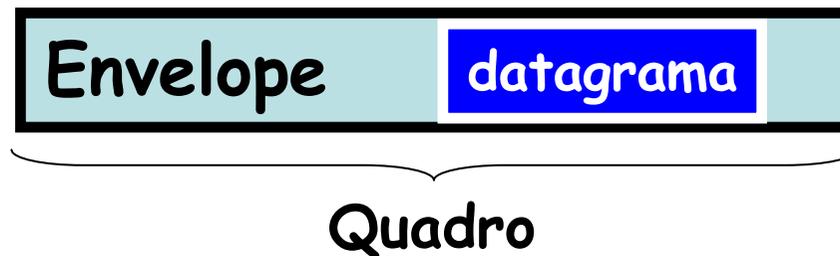
Um caminho é composto por um ou mais enlaces (*links*)



Como os dados são transmitidos em cada enlace?

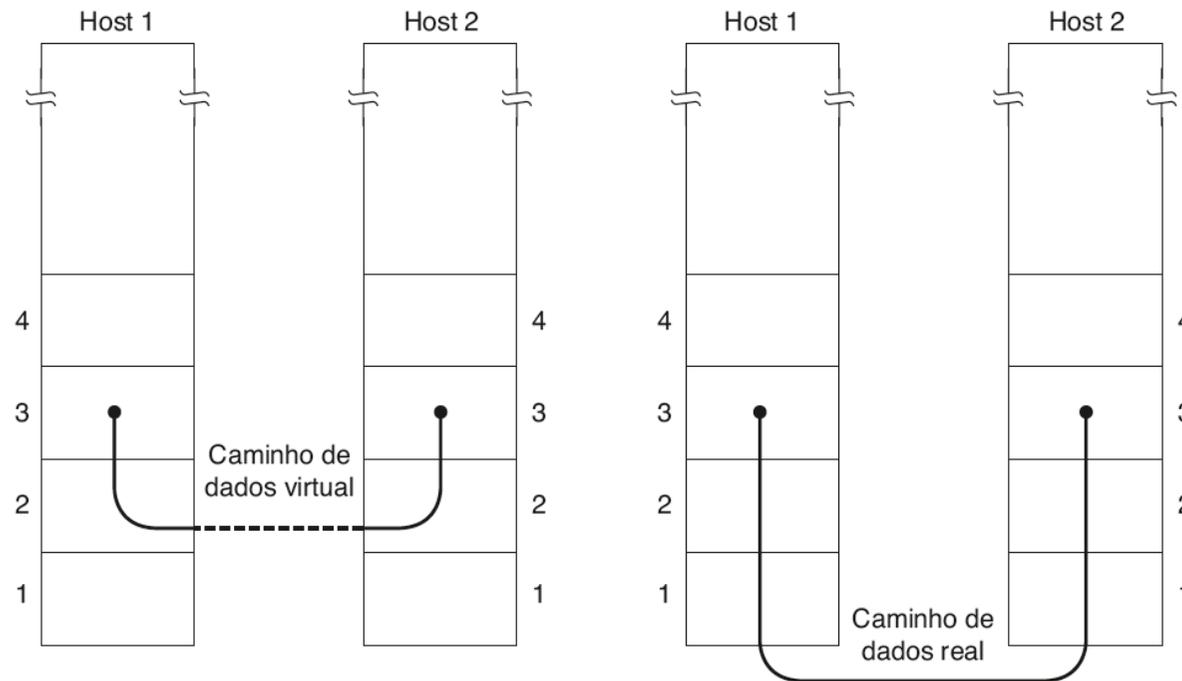
Camada de Enlace

- Presta serviço para a camada de rede
 - **Serviço básico:** Prover comunicação eficiente e confiável de unidades de informação entre dois nós adjacentes
 - **Unidade de informação:** Pacote de camada de enlace, também chamado de quadro (*frame*)
 - Quadros encapsulam datagramas da camada de rede
 - **Nós adjacentes:** Nós conectados fisicamente por um canal de comunicação, também chamado de enlace
 - Enlace entrega bits ao destinatário na mesma ordem de envio



Camada de Enlace

- Usa serviços prestados pela camada física
 - Serviço necessário para envio e recebimento de bits pelo canal de comunicação



Camada de Enlace

- Além do serviço básico...
 - Enquadramento (*framing*)
 - Entrega confiável
 - Controle de fluxo
 - Detecção e correção de erros
 - Transmissão *half-duplex* ou *full-duplex*
 - Controle de acesso ao meio

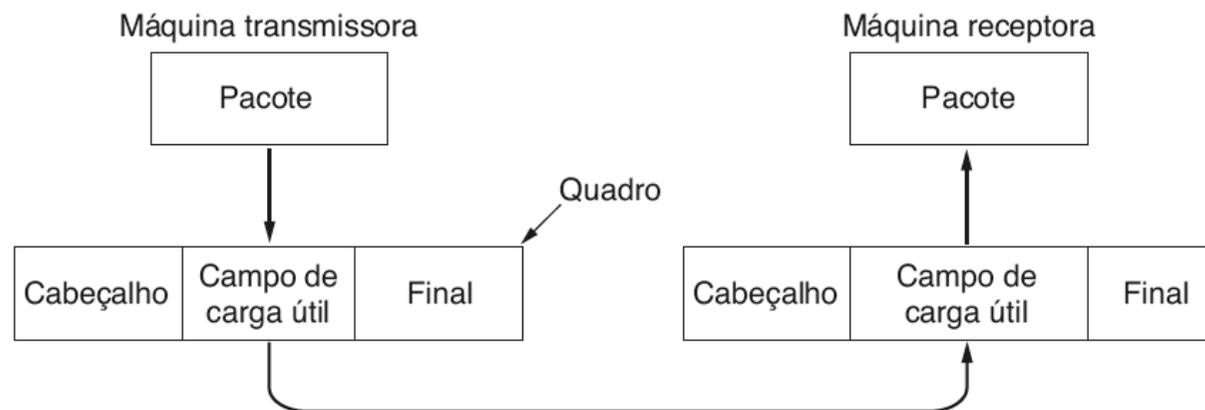
Protocolos de camada de enlace são responsáveis por oferecer tais serviços!

Camada de Enlace

- Para oferecer serviços, os protocolos devem considerar...
 - Tipos diferentes de canais de comunicação:
 - **Canal ponto-a-ponto**
 - Uma estação em cada extremidade
 - Requer controle simples de acesso
 - » Exs.: Redes de acesso domiciliares e redes entre roteadores
 - **Canal de difusão (*broadcast*)**
 - Várias estações conectadas ao mesmo canal
 - Requer controle de acesso ao meio para coordenar as transmissões
 - » Ex. rede sem-fio

Camada de Enlace

- Dependendo dos serviços e do tipo de canal...
 - Protocolo deve realizar o gerenciamento de quadros
 - Constitui uma tarefa importante para o serviço prestado para a camada de rede
 - Cada quadro possui um **cabeçalho**, um campo de **carga útil** (datagrama) e um marcador de **final**



Protocolos de Camada de Enlace

- Transportam datagramas salto-a-salto em um enlace individual
 - Devem definir quais os serviços são oferecidos à camada de rede, levando em conta:
 - Tipo de canal de comunicação
 - Ponto-a-ponto ou difusão
 - Gerenciamento de quadros
 - Formato dos quadros

Serviços da Camada de Enlace

Serviços da Camada de Enlace

- Enquadramento
 - Delimita onde começa e onde termina um quadro
 - Encapsula um datagrama em um quadro
 - Adiciona cabeçalho e fim de quadro (trailer)
- Entrega confiável entre nós adjacentes
 - Similar aos mecanismos da camada de transporte
 - Pouco usada em canais com baixas taxas de erro
 - Ex.: fibra óptica, alguns tipos de pares trançados, etc.
 - Necessária em canais com altas taxas de erro
 - Ex.: canais sem-fio

Serviços da Camada de Enlace

- 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
 - Sinaliza ao remetente a retransmissão ou descarta o quadro
- Correção de erros
 - Permite que o receptor localize e corrija o(s) erro(s) sem precisar da retransmissão

Serviços da Camada de Enlace

- *Half-duplex e full-duplex*
 - Com *half-duplex* um nó não pode transmitir e receber pacotes ao mesmo tempo
 - Com *full-duplex* um nó pode transmitir e receber pacotes ao mesmo tempo
- Controle de acesso ao meio
 - Implementa o controle de acesso ao canal se meio for compartilhado
 - 'Endereços físicos (MAC)' são usados nos cabeçalhos dos quadros para identificar origem e destino de quadros em enlaces multiponto
 - Endereços diferentes do endereço IP

Serviços da Camada de Enlace

- Funções similares: enlace e transporte
 - Para que confiabilidade nas duas camadas?
 - Para que controle de fluxo nas duas camadas?

Camada de transporte: fim-a-fim
X
Camada de enlace: salto-a-salto

Classificação dos Serviços

- Em geral, há três tipos de serviços providos
 - Não orientado a conexões e sem confirmação
 - Não orientado a conexões e com confirmação
 - Orientado a conexões e com confirmação

Classificação dos Serviços

- **Não orientado a conexões e sem confirmação**
 - Adequado quando a taxa de erros é baixa
 - Ethernet
 - Recuperação de perdas a cargo das camadas superiores
 - Camada de transporte, por exemplo
 - Adequado para tráfego de tempo real
 - Maior parte das redes locais usa um serviço desse tipo

Classificação dos Serviços

- **Não orientado a conexões e com confirmação**
 - Quadros são numerados
 - Usa temporizadores para implementar a confiabilidade
 - Usado atualmente em redes sem fio (WiFi)
 - Essas redes possuem canais não confiáveis
- **Orientado a conexões e com confirmação**
 - Há estabelecimento de conexão
 - Quadros são numerados
 - Usa temporizadores para implementar a confiabilidade
 - Usado em redes onde a retransmissão é custosa
 - Redes via satélite

Classificação dos Serviços

- Confirmação na camada enlace
 - Questão de otimização, já que pode ser feita também em camadas superiores
 - Problema da fragmentação dos pacotes em quadros
 - Retransmissão pode levar muito tempo se a confirmação for apenas fim-a-fim e não salto-a-salto

Enquadramento

- Por que é preciso?
 - Serviço provido pela camada física não garante que o fluxo de bits seja livre de erros
 - Por exemplo:
 - Bits recebidos podem ter valores diferentes dos bits transmitidos
 - Número de bits pode até ser maior ou menor do que o número de bits transmitidos!

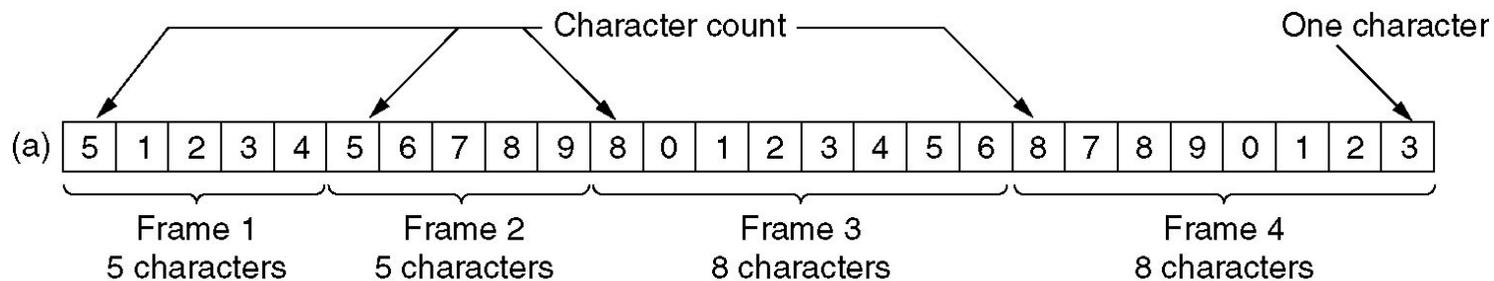
Enquadramento

- Camada de enlace:
 - Divide o fluxo de bits em quadros
 - Para isso, precisa marcar o início e o fim
 - Faz verificação de erros por quadro
 - Detecção e correção de erro, quando possível
- Métodos para marcação de início e o fim de quadros
 - Contagem de caracteres
 - Inserção de bytes de *flags*
 - Inserção de *flags* no início e no final do quadro
 - Etc.

Enquadramento: Contagem de caracteres

- Usa um campo no cabeçalho para especificar o número de caracteres do quadro

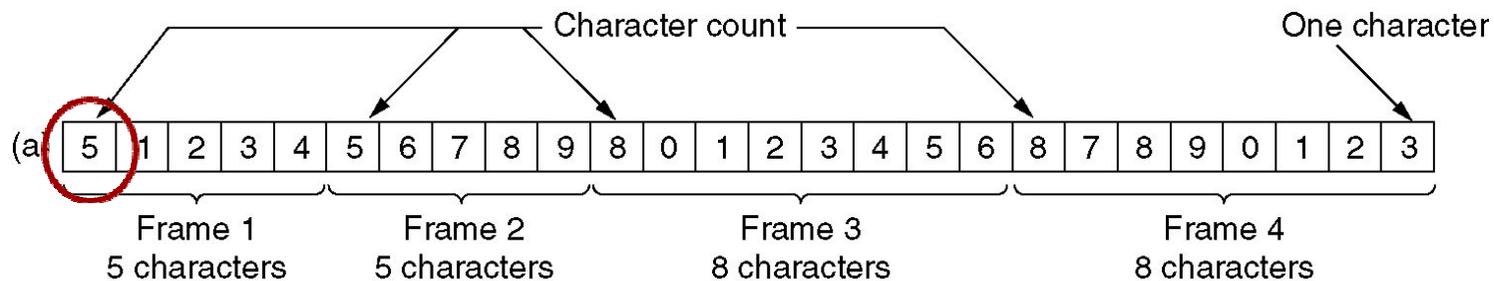
Exemplo de contagem de caracteres (fonte: Tanenbaum)



Enquadramento: Contagem de caracteres

- Usa um campo no cabeçalho para especificar o número de caracteres do quadro

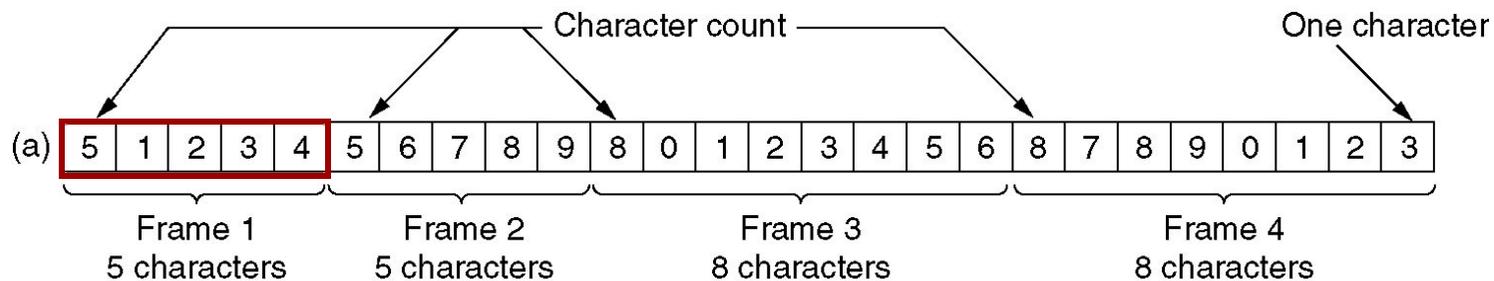
Exemplo de contagem de caracteres (fonte: Tanenbaum)



Enquadramento: Contagem de caracteres

- Usa um campo no cabeçalho para especificar o número de caracteres do quadro

Exemplo de contagem de caracteres (fonte: Tanenbaum)

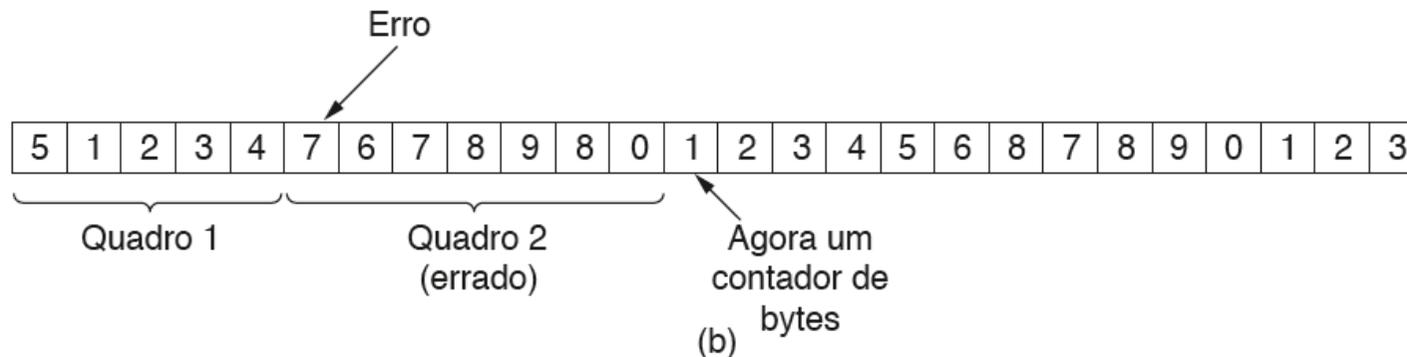
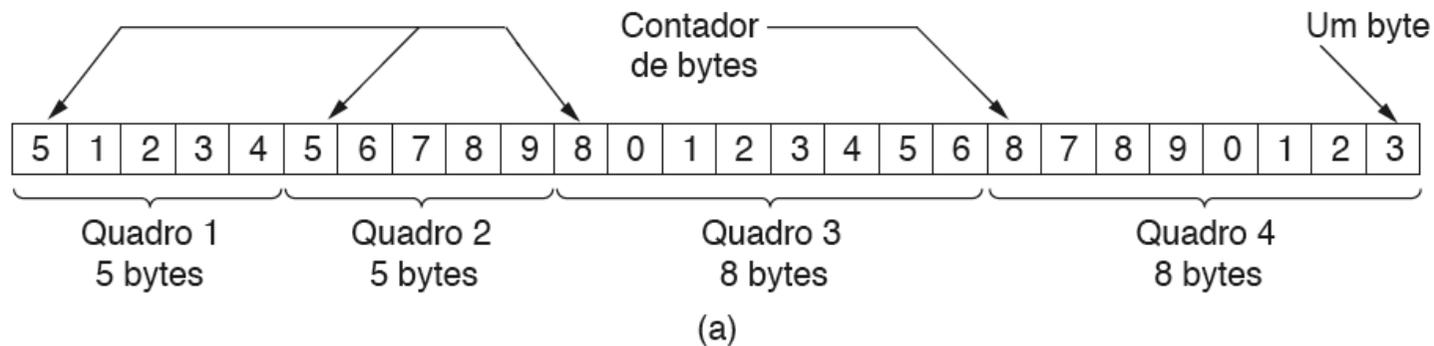


Enquadramento: Contagem de caracteres

- Problema
 - Contagem pode ser adulterada por um erro de transmissão...
 - Mesmo com a verificação incorreta, destino não sabe onde começa o próximo quadro
 - Solicitação de retransmissão também não adianta
 - Destino não sabe quantos caracteres devem ser ignorados para chegar ao início da retransmissão, já que não há marcação de início e fim de quadro

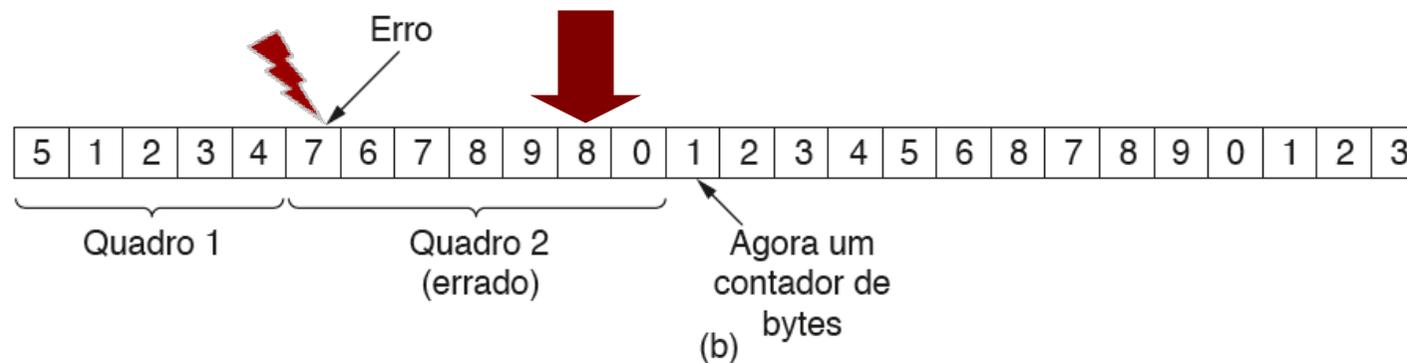
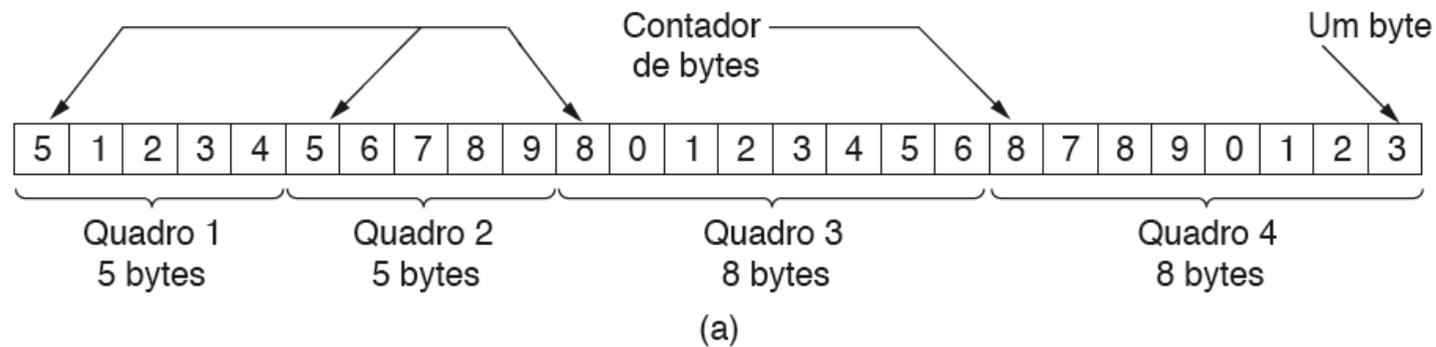
Enquadramento: Contagem de caracteres

Exemplo de contagem de caracteres com um erro (fonte: Tanenbaum)



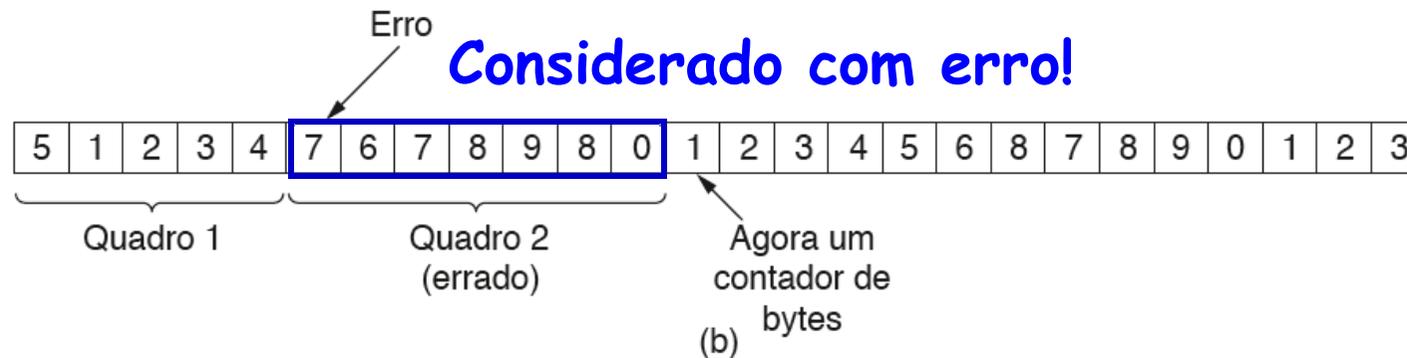
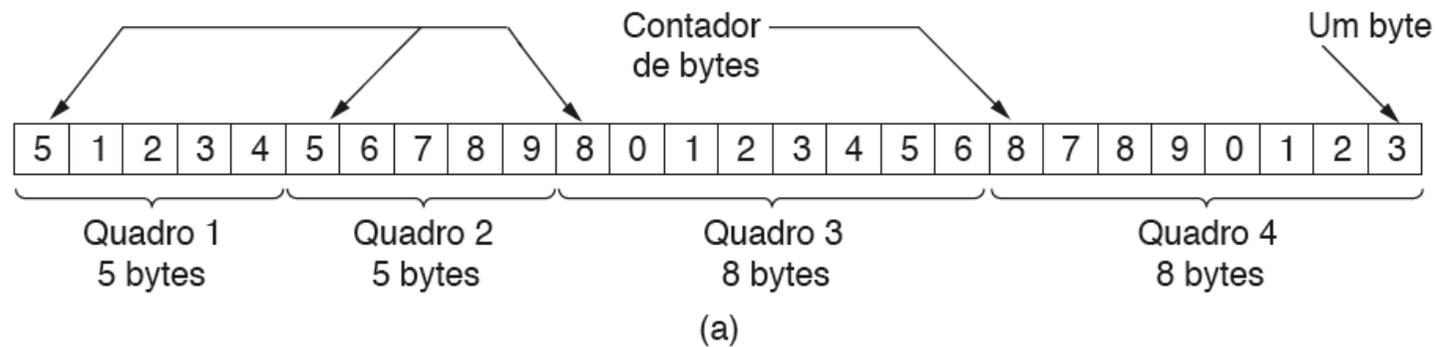
Enquadramento: Contagem de caracteres

Exemplo de contagem de caracteres com um erro (fonte: Tanenbaum)



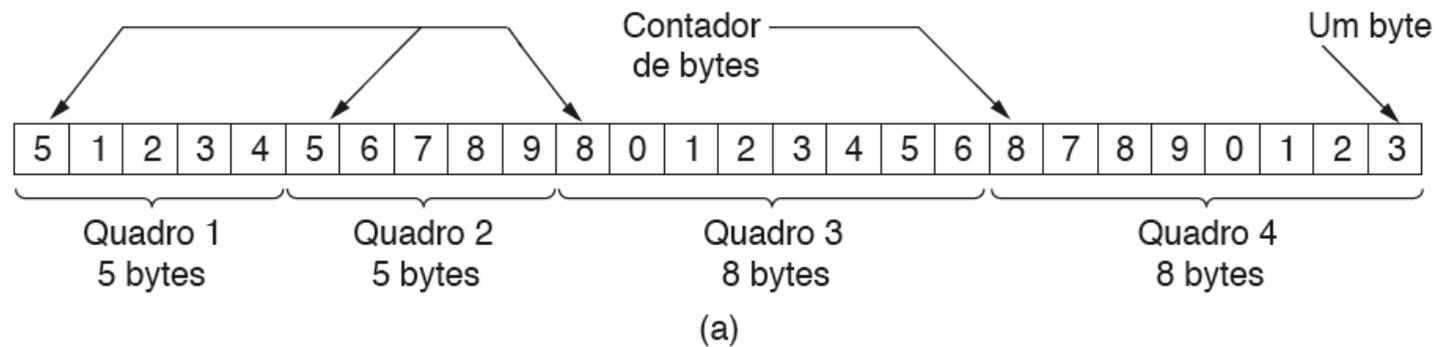
Enquadramento: Contagem de caracteres

Exemplo de contagem de caracteres com um erro (fonte: Tanenbaum)

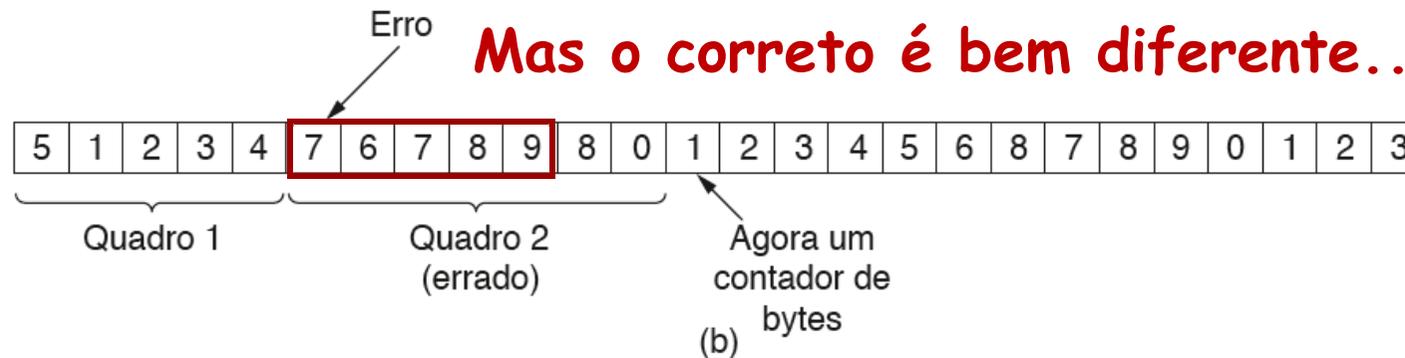


Enquadramento: Contagem de caracteres

Exemplo de contagem de caracteres com um erro (fonte: Tanenbaum)

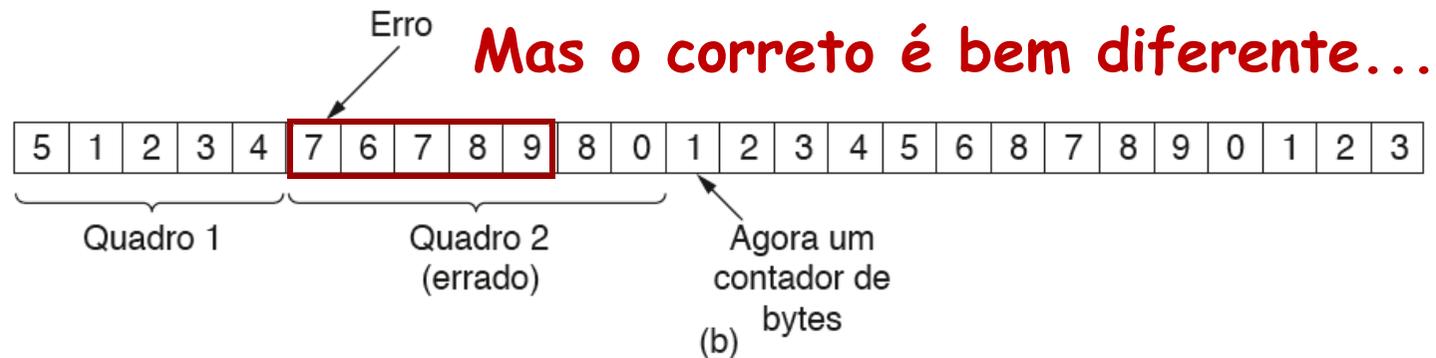


Mas o correto é bem diferente...



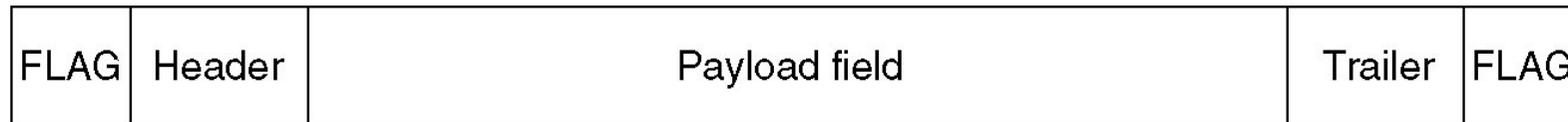
Enquadramento: Contagem de caracteres

Exemplo de contagem de caracteres com um erro (fonte: Tanenbaum)



Enquadramento: Bytes de *flags*

- Soluciona o problema de ressincronização após um erro
 - Quadro começa e termina com bytes especiais
 - Bytes de *flags* são usados para delimitar o início e o fim de um quadro

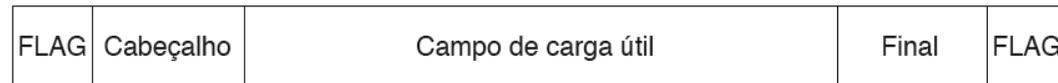


Enquadramento: Bytes de *flags*

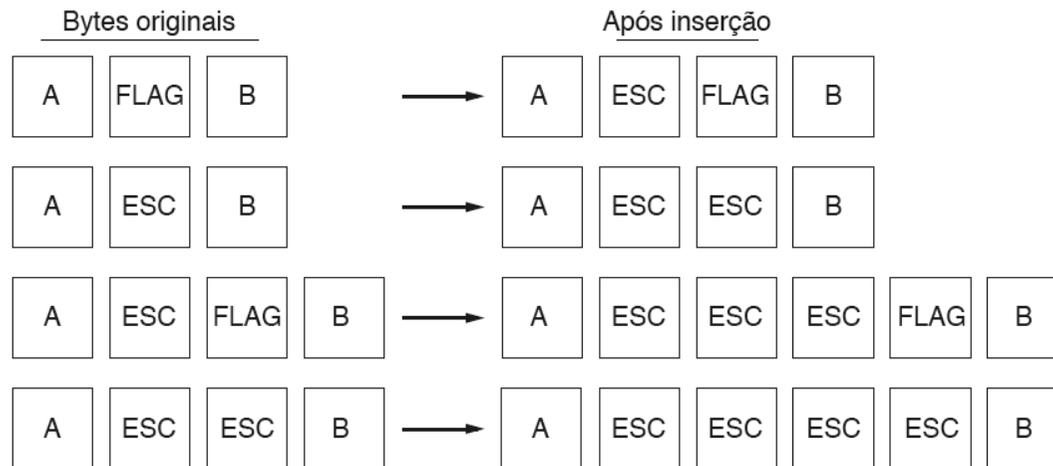
- Problema:
 - O *Payload* pode conter os bytes de *flags*
 - Se for composto por dados binários, sincronismo é perdido
- Solução
 - Transmissor da camada de enlace introduz um caractere de escape especial (ESC) antes de cada byte de *flag* "acidental" nos dados
 - Técnica chamada de inserção de octetos ou inserção de caracteres
 - Usada no protocolo PPP (*Point-to-Point Protocol*)

Enquadramento: Bytes de *flags*

Sequências de quadros com octetos de flags (fonte: Tanenbaum)

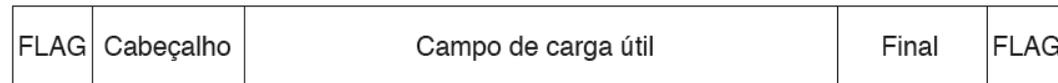


(a)

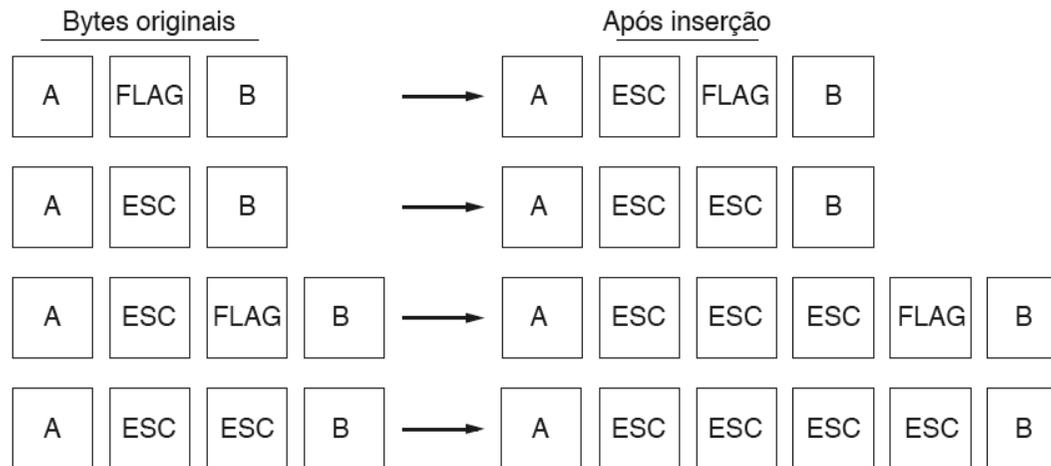


Enquadramento: Bytes de *flags*

Sequências de quadros com octetos de flags (fonte: Tanenbaum)



(a)



Problema: Depende do uso de caracteres de 8 bits

Enquadramento: *Flags* iniciais e finais

- Vantagem
 - Dados podem ter um número arbitrário de bits
- Cada quadro começa e termina com uma sequência padrão de bits
 - Ex.: Delimitador → 0111110 (Um 0, seis 1's e outro 0)
 - Transmissor
 - Quando encontra cinco bits 1's consecutivos nos dados, insere um bit 0 após a sequência → Inserção de bits
 - Receptor
 - Ao receber cinco bits 1's seguidos por um bit 0, remove o bit 0

Enquadramento: *Flags* iniciais e finais

Exemplo de inserção de bits (fonte: Tanenbaum)

(a) 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0

(b) 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 1 0

Bits inseridos

(c) 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0

(a) Dados originais

(b) Dados transmitidos

(c) Dados recebidos após a remoção dos bits

Enquadramento: *Flags* iniciais e finais

Exemplo de inserção de bits (fonte: Tanenbaum)

(a) 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0

(b) 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 1 0

Bits inseridos

(c) 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0

(a) Dados originais

(b) Dados transmitidos

(c) Dados recebidos após a remoção dos bits

Enquadramento: *Flags* iniciais e finais

- Se o receptor perder a sincronização
 - Basta procurar pelo padrão de bits

Controle de Fluxo

- Um nó quer transmitir a uma taxa maior do que a taxa que o outro pode receber
 - Uma das máquinas é mais lenta que a outra
 - Ex. Computador de última geração X smartphone
- Duas abordagens mais comuns
 - Controle de fluxo baseado em realimentação
 - Abordagem mais usada
 - Controle de fluxo baseado na velocidade
 - Mecanismo interno limita a velocidade dos dados
 - Não usa realimentação do receptor
 - Não é utilizado na camada de enlace

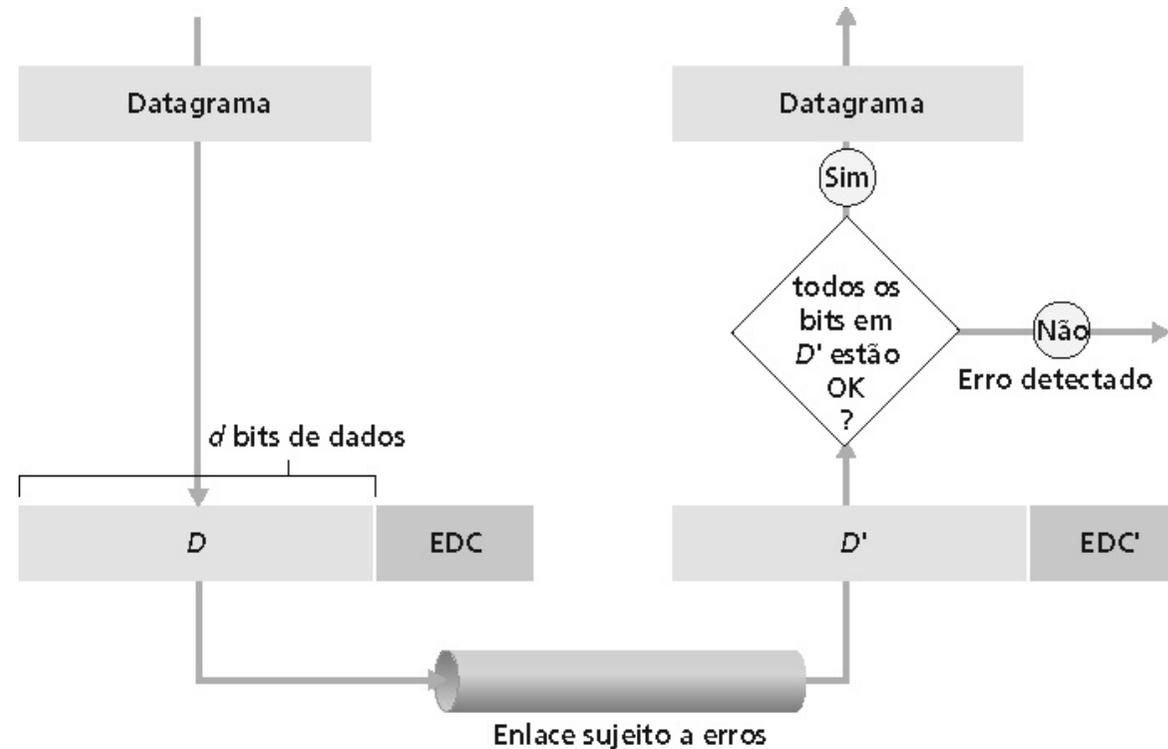
Controle de Erros

- Como garantir que os quadros enviados foram recebidos ordenadamente?
 - Mais comum é dar ao transmissor alguma realimentação sobre o que está se passando do outro lado
 - Reconhecimentos positivos e negativos
 - Além disso, usam-se temporizadores
 - Espera pela confirmação durante um tempo
 - Números de sequência também são usados
 - Várias cópias do mesmo quadro podem ser recebidas
 - Ex.: Reconhecimentos perdidos

Detecção e Correção de Erros

- **Ocorrem no nível de bits**
 - Erros de transmissão frequentes
 - *Loops locais e enlaces sem fio*
 - Erros tendem a ocorrer em rajadas
 - **Vantagem:** Podem danificar poucos quadros
 - **Desvantagem:** Dificultam a correção dos erros
- **Usam informações redundantes**
 - Para detectar e corrigir erros

Detecção e Correção de Erros

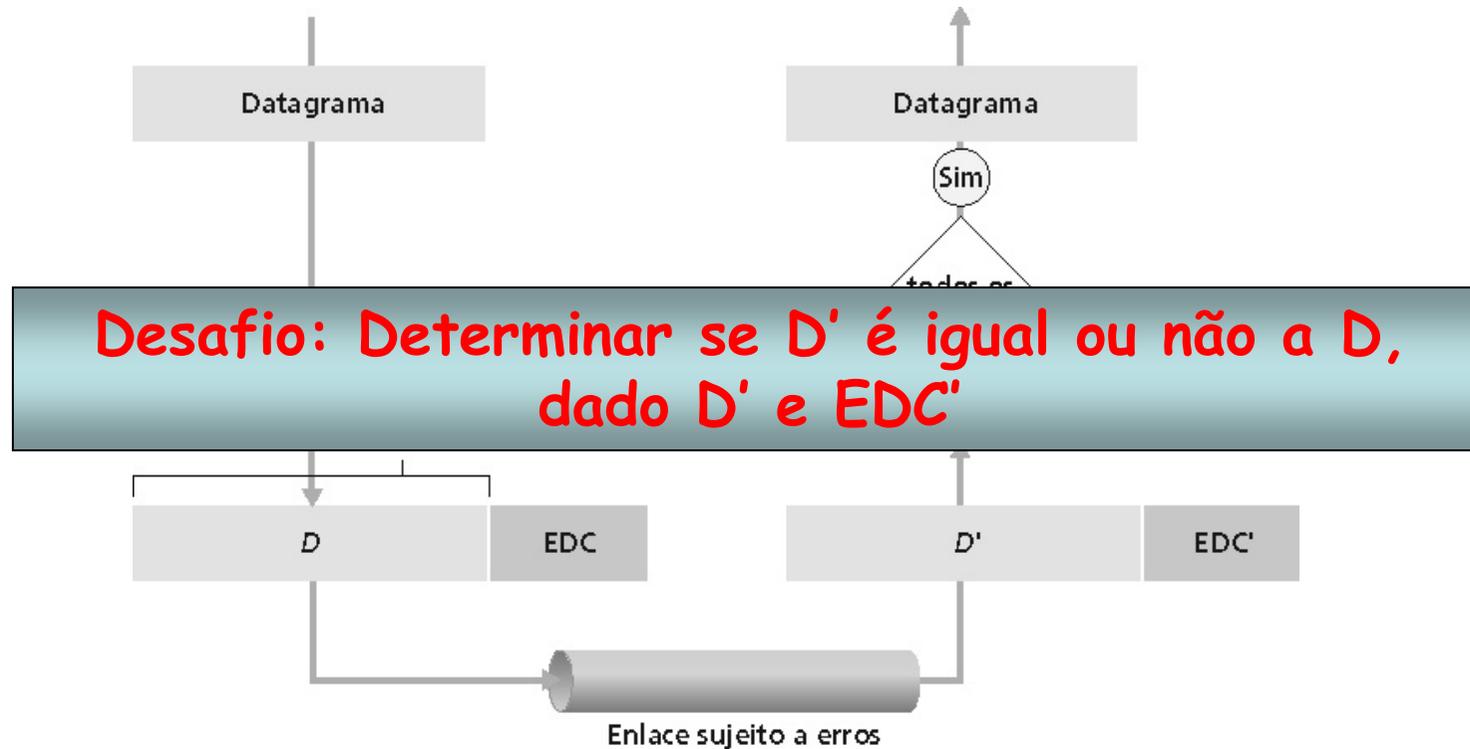


EDC: bits de Detecção e Correção de Erros (redundância)

D : dados protegidos por verificação de erros, podem incluir alguns campos do cabeçalho

→ Quanto maior o campo EDC melhor será a capacidade de detecção e correção de erros

Detecção e Correção de Erros



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

D : dados protegidos por verificação de erros, podem incluir alguns campos do cabeçalho

→ Quanto maior o campo EDC melhor será a capacidade de detecção e correção de erros

Detecção e Correção de Erros

- Códigos de **detecção** de erros
 - Bons para enlaces confiáveis
 - Retransmissão "mais confiável"
 - Ex.: enlaces de fibra
- Códigos de **correção** de erros
 - Bons para enlaces pouco confiáveis
 - Retransmissão pode ainda conter erros
 - Ex.: enlaces sem-fio

Detecção e Correção de Erros

- Quadro com m bits de dados e r bits de redundância
 - Tamanho total n bits $\rightarrow n = m + r$
- A unidade de n bits é chamada **palavra** de código de n bits
- Número de posições de bits que duas palavras diferem entre si é chamado de **distância** (de Hamming)
 - 0011 e 0000 tem distância igual a 2

Detecção e Correção de Erros

- Se duas palavras de código estiverem a uma distância d uma da outra...
 - É necessário corrigir d erros para converter uma na outra
- Em geral, todas as 2^m mensagens de dados são válidas
 - Porém, nem todas as 2^n palavras de código são usadas
- Cálculo da distância de Hamming do código completo:
 - Elabora-se uma lista contendo todas as palavras válidas e localiza-se as duas cuja distância é mínima
 - Essa distância é a distância de Hamming

Detecção e Correção de Erros

- Detecção e correção de erros dependem da distância de Hamming do código completo
 - Para detectar x erros \rightarrow código de distância $d = x + 1$
 - Não há como x erros de bits transformarem uma palavra de código válida em outra válida
 - Para corrigir x erros \rightarrow código de distância $d = 2x + 1$
 - Palavras de código válidas estarão tão distantes que, mesmo com d alterações, a palavra de código original continuará mais próxima do que qualquer outra

Detecção e Correção de Erros

- Exemplo
 - Código contendo as seguintes palavras:
0000000000, 0000011111, 1111100000 e 1111111111
 - Distância igual a 5
 - Se $d = 5$, pode corrigir erros duplos ($d = 2x + 1 \rightarrow x = 2$)
 - Se detecta 0000000111 (é um erro duplo)
 - Original deve ser 0000011111
 - Em compensação, com $d = 5$, não se pode corrigir erros triplos, apenas detectá-los
 - Se detecta 0000000111 e 0000000000 foi transmitido
 - Erro não é corrigido de maneira correta...

Verificação de Paridade

- Código simples de detecção de erros
- Bit de paridade acrescentado aos dados
 - Escolhido de forma que o número de 1's da palavra de código seja par ou ímpar
- Receptor conta quantos 1's a palavra possui
 - Se for usada paridade par e número de 1's for ímpar
 - Ocorreu um número ímpar de erros
 - Se número de erros for par
 - Erros não são detectados
- Código com um único bit de paridade tem distância 2
 - Pode detectar erros isolados

Verificação de Paridade

- Exemplo
 - 1011010 enviado com paridade par → 1011010**0**
 - 1011010 enviado com paridade ímpar → 1011010**1**
- Problema: Erros ocorrem geralmente em rajada
 - Paridade com um bit não é suficiente
 - Solução:
 - **Aumenta-se o número de bits de paridade**

Verificação de Paridade

- Paridade bidimensional
 - Pode detectar e corrigir erros isolados
 - Pode detectar erros duplos

Faz paridade de linha, de coluna e de bits de paridade

Exemplo de paridade bidimensional (fonte: Kurose)



Nenhum erro

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

Erro de bit
único corrigível

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

Erro de
paridade

Erro de
paridade

Código de Hamming

- Bits da palavra de código são numerados consecutivamente
 - Primeiro bit (Bit 1) na extremidade esquerda
- Bits que são potências de 2 são bits de verificação
- Outros bits são preenchidos com os m bits de dados

Código de Hamming

- Bits de verificação calculados usando a paridade par ou ímpar dos bits que verificam
 - Exemplo com código de mais de 12 bits
 - Bit 1 → paridade dos bits 3, 5, 7, 9, 11, ...
 - Bit 2 → paridade dos bits 3, 6, 7, 10, 11, ...
 - Bit 4 → paridade dos bits 5, 6, 7, 12, ...
 - Bit 8 → paridade dos bits 9, 10, 11, 12, ...
 - Decomposição
 - $11 = 1 + 2 + 8$, logo tanto o bit 1, quanto o 2 e o 8 consideram o bit 11 para cálculo da sua paridade...
 - $3 = 1 + 2$, usa o bit 1 e 2
 - $9 = 1 + 8$, usa o bit 1 e 8
 - Exemplo: palavra de 11 bits, 1001000 → 00110010000

Código de Hamming

- Exemplo: Código com palavra de 11 bits
 - Mensagem de 7 bits (# bits - # potências de 2):
1001000

			1		0	0	1		0	0	0
posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

- Calculando a paridade

- Bit 1 → paridade de 3, 5, 7, 9, 11
- Bit 2 → paridade de 3, 6, 7, 10, 11
- Bit 4 → paridade de 5, 6, 7
- Bit 8 → paridade de 9, 10, 11

	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Código de Hamming

- Receptor
 - Inicializa um contador com zero (contador = 0)
 - Examina cada bit de verificação k ($k = 1, 2, 4, 8, \dots$) para confirmar se a paridade está correta
 - Caso não esteja, k é somado ao valor do contador

Código de Hamming

- Receptor
 - Contador indica zero após o exame de todos os bits de verificação (contador = 0)
 - Palavra aceita como válida
 - Se o contador não é zero (contador \neq 0)
 - Ele contém o número do bit errado
 - Ex.: Se os bits de verificação 1, 2 e 8 estiverem incorretos, o bit invertido será igual a 11 (contador = $1 + 2 + 8 = 11$)
 - O bit 11 é o único verificado por 1, 2 e 8 ao mesmo tempo!

Código de Hamming

- Só pode corrigir erros simples
 - E se os erros fossem em rajada?
 - Sequência de k palavras consecutivas é organizada como uma matriz, com uma palavra de código por linha
 - Em vez de transmitir os dados uma palavra de código por vez, da esquerda para a direita, transmite-se uma coluna por vez, começando pela coluna mais à esquerda

Código de Hamming

- Só pode corrigir erros simples
 - E se os erros fossem em rajada?
 - Receptor reconstrói a matriz, uma coluna por vez
 - Se ocorrer um erro em rajada com a extensão k , no máximo um bit de cada uma das k palavras de código será afetado
 - Bloco é restaurado, pois os erros se tornam k erros simples!

Exemplo para corrigir erros em rajada (fonte: Tanenbaum)

Caracteres	ASCII	Bits de paridade	
<i>k</i> palavras { H a m m i n g c o d e	H	1001000	00110010000
	a	1100001	10111001001
	m	1101101	11101010101
	m	1101101	11101010101
	i	1101001	01101011001
	n	1101110	01101010110
	g	1100111	01111001111
		0100000	10011000000
	c	1100011	11111000011
	o	1101111	10101011111
	d	1100100	11111001100
	e	1100101	00111000101

Primeira coluna a ser enviada
Última coluna a ser enviada

Soma de Verificação (*Checksum*)

- Método simples
 - Normalmente implementado em *software*
- Bits de dados tratados como uma sequência de números inteiros de k bits
- Soma-se esses números inteiros (em complemento a 1) e usa-se o total como bits de detecção de erros

Soma de Verificação (*Checksum*)

- Receptor pode recalcular o *checksum* e compará-lo com o transmitido
 - Se diferente → Erro!
- Usado no TCP, no UDP e no IP

Soma de Verificação (Checksum)

- Observação
 - Ao adicionar números, o transbordo (vai um) do bit mais significativo deve ser adicionado ao resultado
- Exemplo: adição de dois inteiros de 16-bits

	1 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0
	1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1
<hr/>	
transbordo	① 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1
	
<hr/>	
soma	1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0
soma de verificação	0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1 1

Soma de Verificação (Checksum)

- Observação
 - Ao adicionar números, o transbordo (vai um) do bit mais significativo deve ser adicionado ao resultado
- Exemplo: adição de dois inteiros de 16-bits

**soma + soma de verificação = 1111111111111111 →
Correto!**

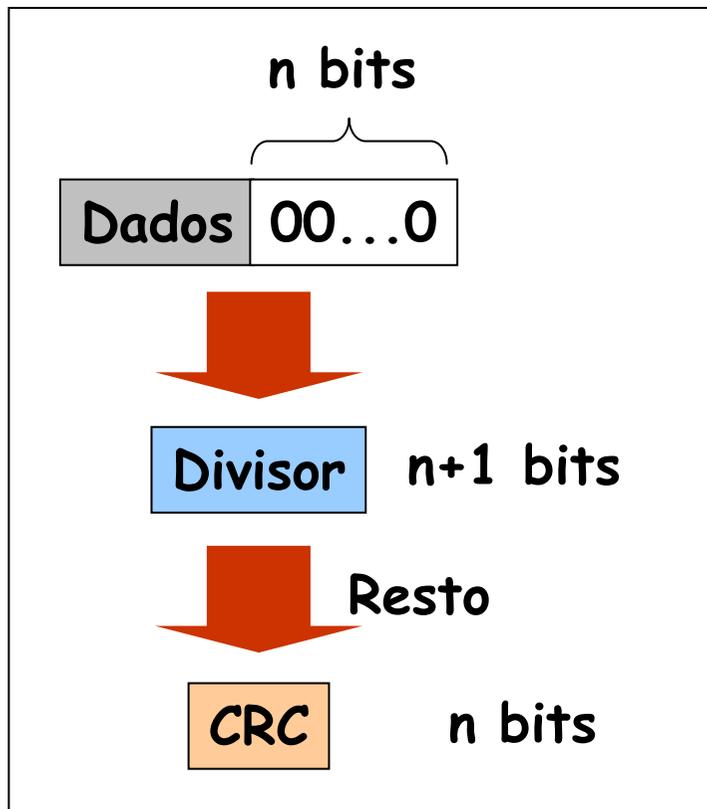
transbordo	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	+----->																
soma	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	
soma de verificação	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	

CRC

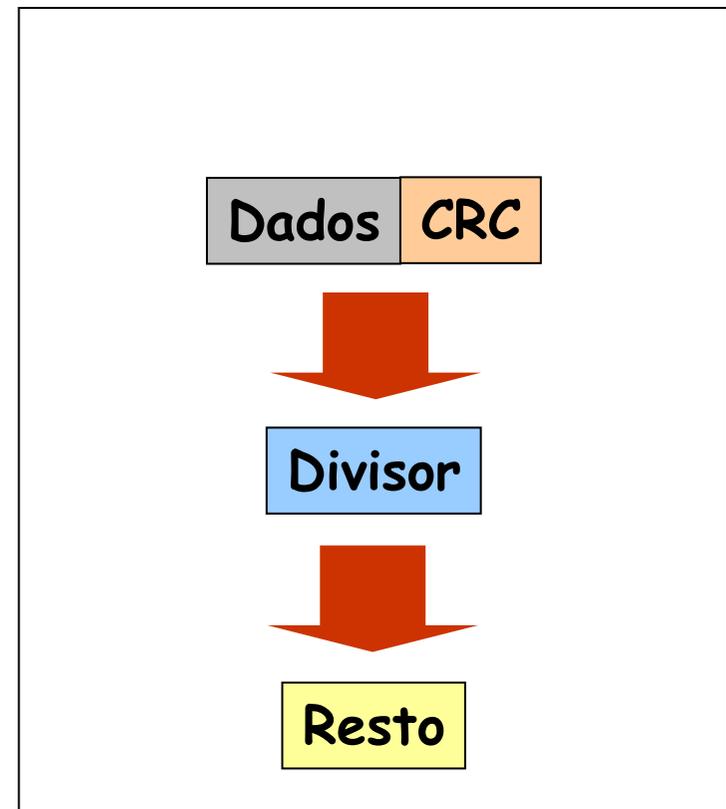
- Código de redundância cíclica (*Cyclic Redundancy Check*) ou código polinomial
- Mais complexo
 - Geralmente implementado em hardware
- Trata uma sequência de bits como representações de polinômios com coeficientes 0 e 1

CRC

Transmissor



Receptor



Se o Resto for zero, significa que os dados são aceitos

CRC

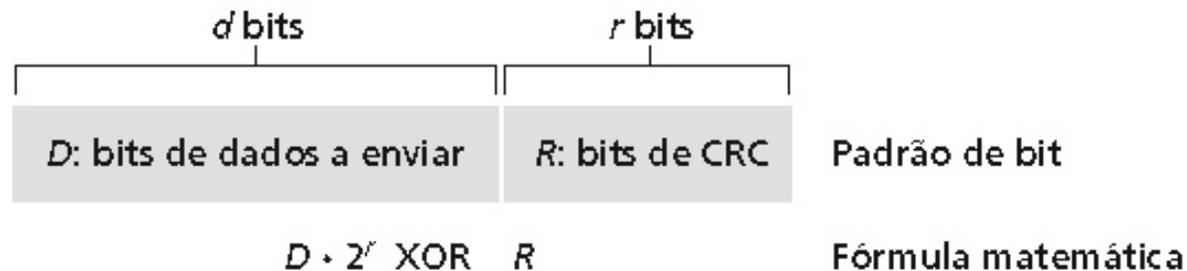
- Quadro de k bits $\rightarrow k$ termos, de x_{k-1} até x_0
 - Polinômio de grau $k-1$
- Aritmética polinomial feita em módulo 2, sem transportes para adição nem empréstimos para subtração
 - Adição e subtração são idênticas à operação ou-exclusivo

CRC

- Dados (D): Sequência de coeficientes de um polinômio (D)
 - É escolhido um polinômio *Gerador* (G)
 - $\text{grau}(G) = r+1$ bits
 - Divide-se (módulo 2) o polinômio $D \cdot 2^r$ por G
 - Acrescenta-se o resto (R) a D
 - Observa-se que, por construção, a nova sequência $\langle D, R \rangle$
 - **É exatamente divisível por G**
 - Receptor conhece G, divide $\langle D, R \rangle$ por G
 - **Caso o resto seja diferente de zero → Erro!**

CRC

- Pode-se detectar erros em rajadas
 - Menores do que $r+1$ bits
- Largamente usado na prática em redes
 - Ex.: ATM e HDLC



CRC

Queremos:

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

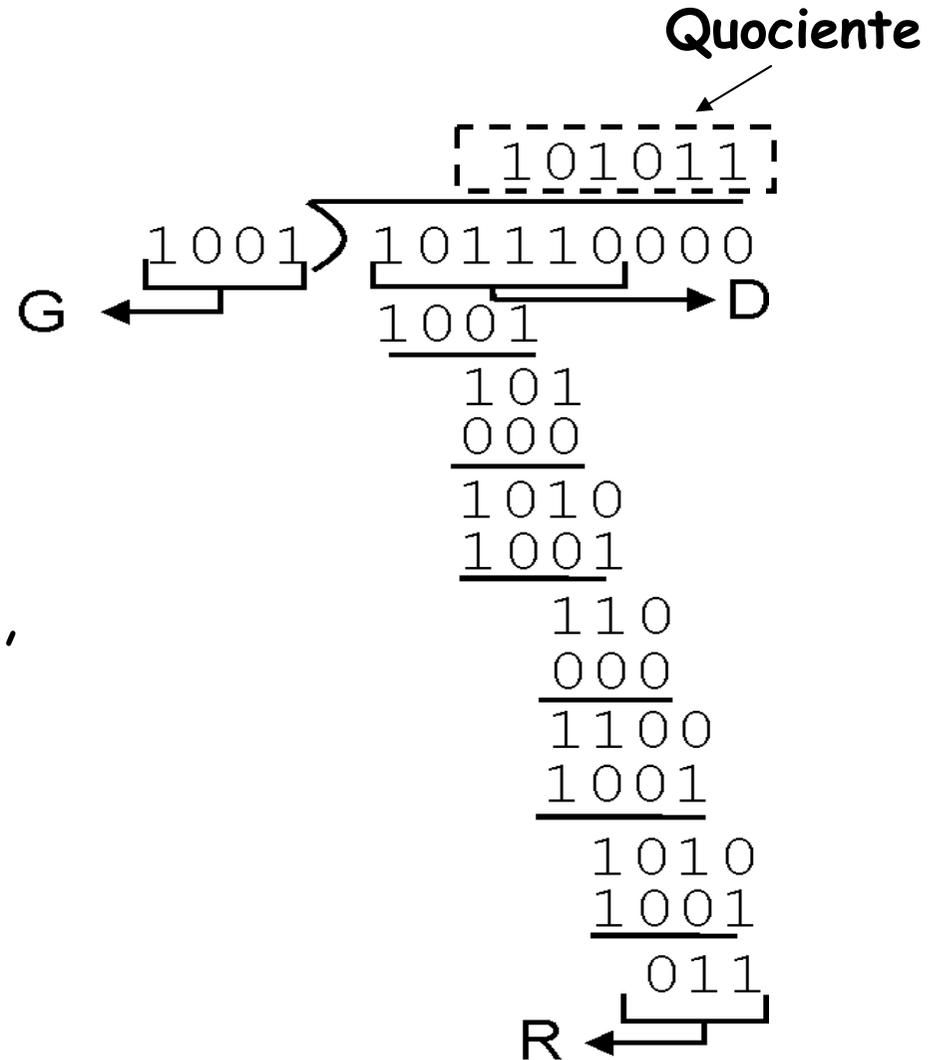
De forma equivalente:

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

de forma equivalente :

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

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



CRC

- Transmissor e receptor devem concordar em relação ao uso de um polinômio gerador $G(x)$
 - Tanto o bit de mais alta ordem quanto o bit de mais baixa ordem devem ser iguais a 1
 - Polinômio gerador pode ser escolhido de acordo com a probabilidade de ocorrerem erros
- Quadro de m bits corresponde a $M(x)$
- $M(x)$ tem de ser de maior grau do que $G(x)$

CRC

- CRC acrescentado ao final do quadro de forma que o quadro verificado seja divisível por $G(x)$
 - Sequência de verificação de quadro (*Frame Check Sequence - FCS*)
- Ao receber o quadro verificado, o receptor tentará dividi-lo por $G(x)$
 - Se o resto é diferente de zero → Erro!

CRC

- Algoritmo
 - Seja r o grau de $G(x)$
 - Acrescente r bits à extremidade de mais baixa ordem de $M(x)$
 - Polinômio $x^r M(x)$
 - Divida a sequência de bits correspondente a $x^r M(x)$ pela sequência correspondente por $G(x)$
 - Subtraia o resto da sequência correspondente a $x^r M(x)$
 - Resultado é o quadro verificado que deverá ser transmitido
 - Polinômio $T(x)$

CRC

- Caso haja erros
 - Recebido $T(x) + E(x)$
 - Cada bit 1 de $E(x)$ corresponde a um bit que foi invertido
 - Se houver k bits 1 em $E(x)$ significa que ocorreram k erros de bits simples
 - Único erro em rajada é caracterizado por um bit 1 inicial, uma mistura de bits 0 e 1 e um bit 1 final
 - Receptor divide o quadro com verificação por $G(x)$
 - $E(x)/G(x)$
 - Erros que correspondem a polinômios contendo $G(x)$ como fator são ignorados
 - Todos os outros são detectados

CRC

- Caso haja erros
 - Se houver um único erro de bit
 - $E(x) = x^i$, i determina o bit incorreto
 - Se contiver dois ou mais termos, $G(x)$ nunca dividirá $E(x)$ → todos os erros de um único bit serão detectados
 - Se houver dois erros isolados de um único bit
 - $E(x) = x^i + x^j$, $i > j$
 - $E(x) = x^i (x^{i-j} + 1)$
 - Se $G(x)$ não é divisível por x , para detectar erros duplos $G(x)$ não deve dividir $x^k + 1$ para qualquer k até o valor máximo de $i - j$
 - Ex.: $x^{15} + x^{14} + 1$ não dividirá $x^k + 1$ para k menor que 32768

CRC

- Caso haja erros
 - Se houver um número ímpar de bits com erro
 - $E(x)$ conterà um número ímpar de termos
 - Nenhum polinômio com um número ímpar de bits com erros terá $x + 1$ como fator
 - Ao tornar $x + 1$ um fator de $G(x)$, pode-se detectar todos os erros que consistem em um número ímpar de bits invertidos

CRC

- Caso haja erros
 - Se houver erros em rajada de tamanho $k \leq r$
 - $E(x) = x^i (x^{k-1} + \dots + 1)$, i determina a distância entre a extremidade direita da rajada e a extremidade direita do quadro recebido
 - Se contiver um termo x^0 , $G(x)$ não terá x^i como fator, logo se o grau de $x^{k-1} + \dots + 1$ for menor que o grau de $G(x)$, o resto nunca poderá ser zero
 - Pode-se detectar todos os erros em rajada de tamanho $\leq r$
 - Outras análises sem garantia de detecção dos erros

CRC

- Usado em diversos padrões de redes locais e metropolitanas

- Exemplo de $G(x)$ do IEEE 802

$$\begin{aligned} & - x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + \\ & + x^4 + x^2 + x^1 + 1 \end{aligned}$$

Implementação

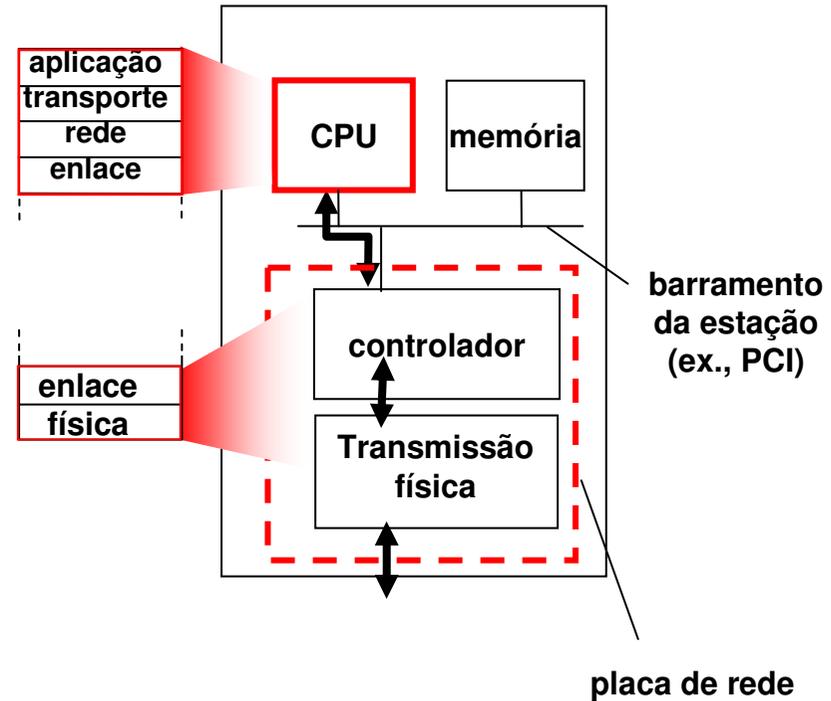
Implementação

- A camada de enlace é implementada por cada um dos nós da rede
 - Cada um pode implementar uma tecnologia
- É implementada no "adaptador" (*Network Interface Card - NIC*)
 - Exs: placa Ethernet, cartão PCMCIA, cartão 802.11
 - Também implementa a camada física
 - Está conectado ao barramento de sistema do nó
 - Ou integrada na placa mãe
 - É uma combinação de hardware, software e firmware

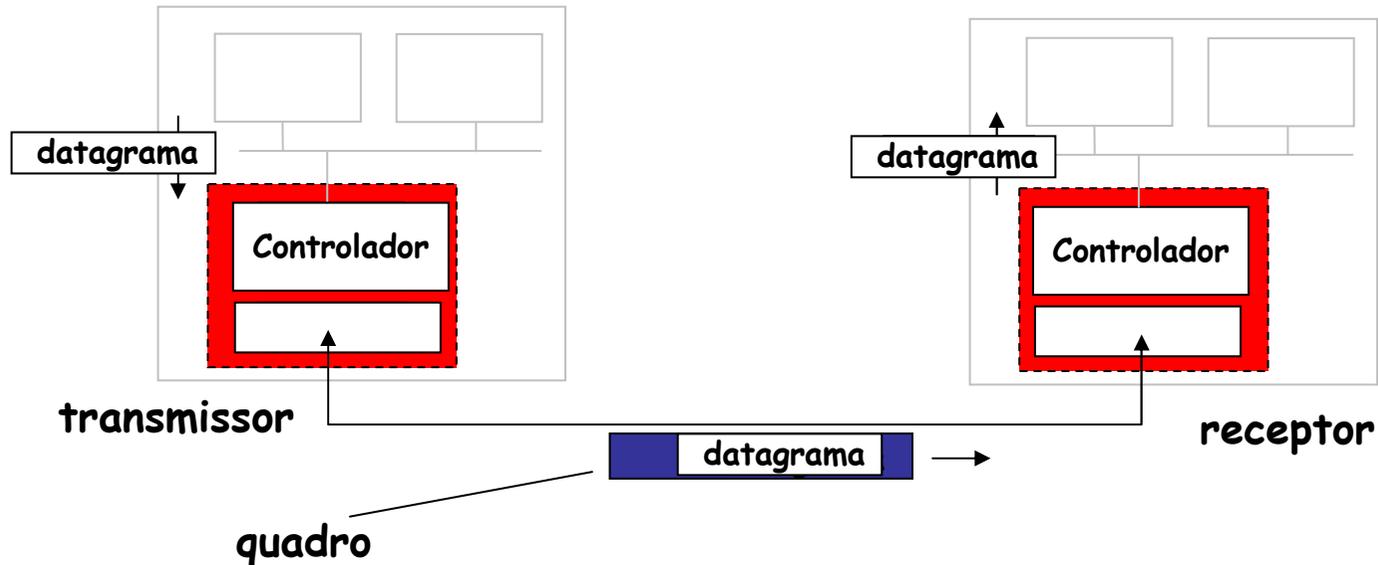
Implementação



Diagrama de blocos da estação



Comunicação entre Adaptadores



- Lado transmissor
 - Encapsula o datagrama em um quadro
 - Adiciona bits de verificação de erro, transferência confiável de dados, controle de fluxo, etc.
- Lado receptor
 - Verifica erros, transporte confiável, controle de fluxo, etc.
 - Extrai o datagrama, passá-lo para o nó receptor

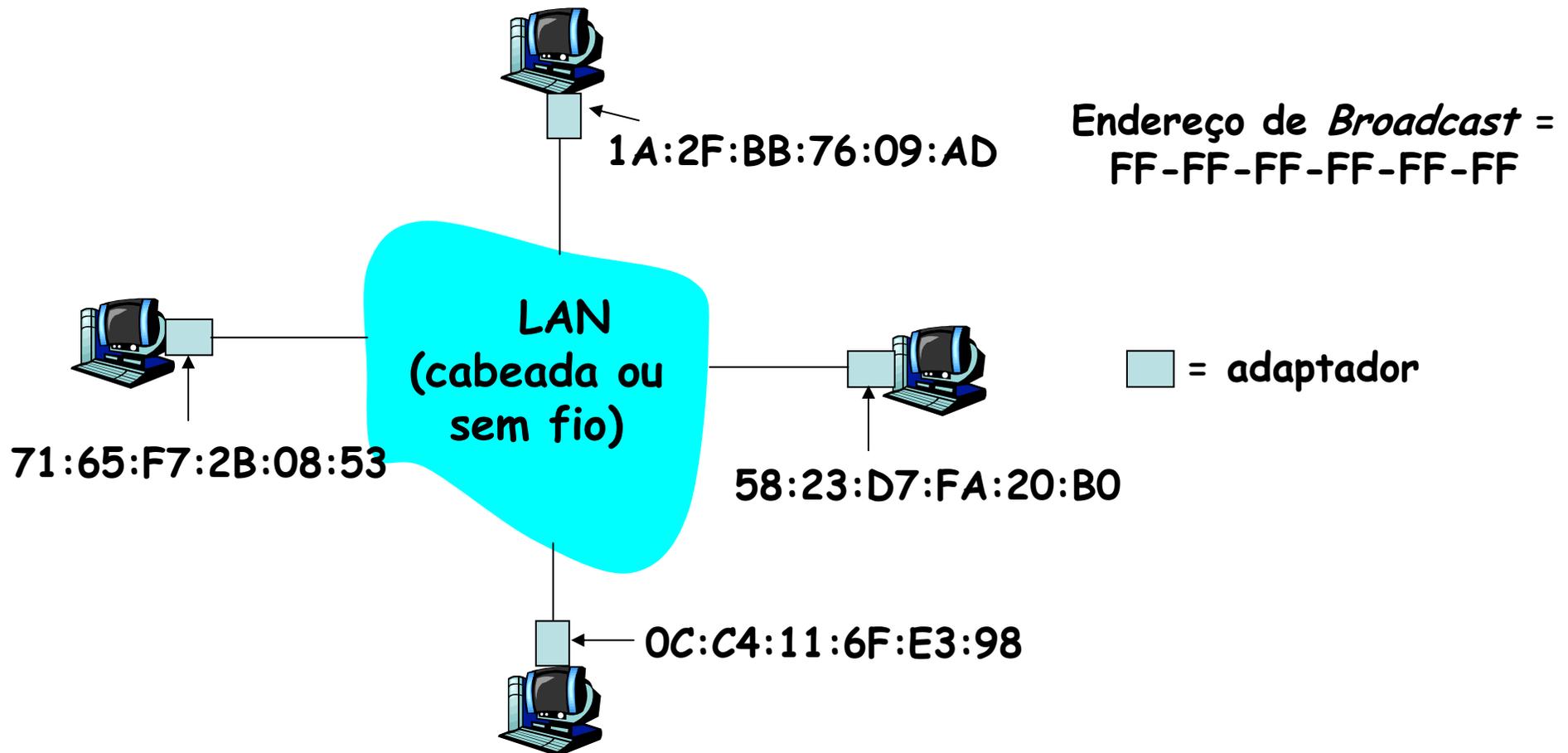
Endereçamento

Endereços MAC

- Endereço IP de 32 bits
 - Endereços da camada de rede
 - Usado para levar o datagrama à sub-rede IP destino
- Endereço MAC (ou LAN, ou físico, ou Ethernet)
 - Leva o datagrama de uma interface até outra interface conectada fisicamente (na mesma rede)
 - Possui 48 bits (para a maioria das redes)
 - Representados por 12 dígitos hexadecimais agrupados 2 a 2 (Ex.: 1A:2F:BB:76:09:AD)
 - Gravado na ROM do adaptador ou configurado por software

Endereços MAC

Cada adaptador na LAN possui um endereço MAC único



Endereços MAC

- Alocação de endereços MAC gerenciada pelo IEEE
- Um fabricante compra uma parte do espaço de endereços
 - Garantia de unicidade
- Analogia:
 - Endereço MAC
 - Como número do CPF
 - Endereço IP
 - Como endereço postal (CEP)

Endereços MAC

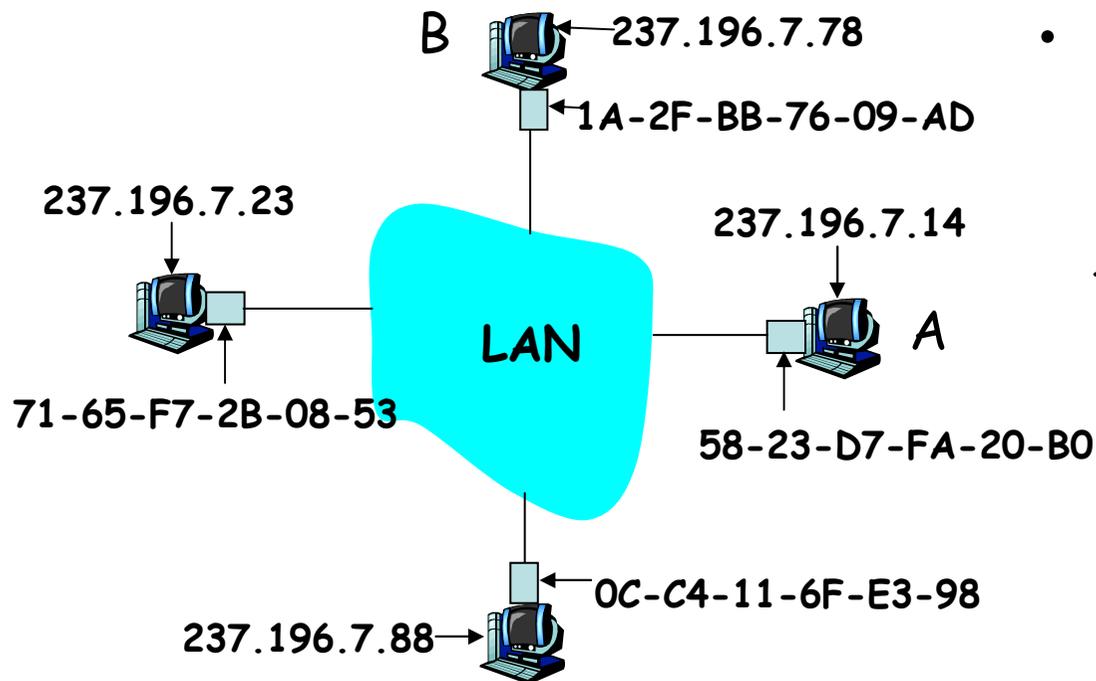
- Endereço MAC tem estrutura linear
 - Portabilidade
 - É possível mover um cartão LAN de uma LAN para outra
- Endereço IP hierárquico **NÃO** é portátil
 - Requer IP móvel, por exemplo
 - Depende da sub-rede IP à qual o nó está conectado

ARP

- Protocolo de resolução de endereços (*Address Resolution Protocol*)
 - Descrito na RFC 826
- Faz a tradução de endereços IP para endereços MAC da maioria das redes IEEE 802
 - Executado dentro da sub-rede
- Cada nó (estação ou roteador) possui uma tabela ARP
 - Contém endereço IP, endereço MAC e TTL
 - Tabela ARP construída automaticamente

ARP

Como obter o endereço MAC de B a partir do endereço IP de B?



- Cada nó de uma LAN possui 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 a partir do qual o mapeamento de endereços será esquecido (valor típico de 20 min)

Funcionamento do ARP na Mesma Rede

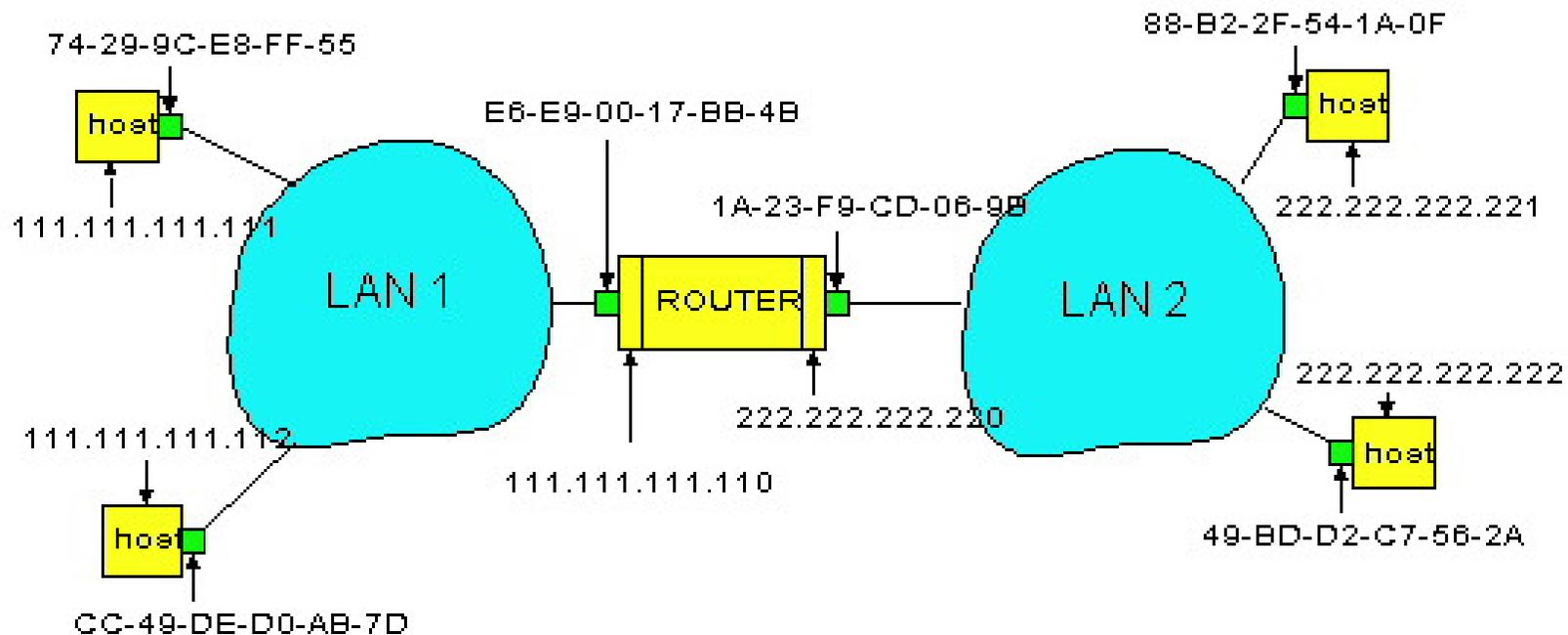
- **A** deseja enviar datagrama para **B**, mas o endereço MAC de **B** não está na tabela ARP...
- Para descobrir o endereço MAC de **B**, **A** difunde um pacote de solicitação ARP com o endereço IP de **B**
 - Endereço MAC destino = FF-FF-FF-FF-FF-FF
 - Todas as máquinas na LAN recebem a consulta do ARP
- **B** então recebe o pacote ARP com a solicitação e responde a **A** com o seu endereço MAC
 - Quadro de resposta é enviado para o endereço MAC (*unicast*) de **A**

Funcionamento do ARP na Mesma Rede

- Um *cache* (salva) o par de endereços IP-para-MAC na sua tabela ARP até que a informação expire
 - É "*soft state*"
 - Informação que expira a menos que seja renovada
 - Um nó pode responder a uma requisição com um endereço MAC que conheça
 - Não necessariamente o próprio nó de destino
- ARP é "*plug-and-play*"
 - Os nós criam suas tabelas ARP sem a intervenção do administrador da rede

Funcionamento entre Redes Diferentes

- Envio de datagrama de **A** para **B** através de **R**
- O Roteador **R** possui duas tabelas ARP
 - Uma para cada rede local



Funcionamento entre Redes Diferentes

- **A** cria o datagrama com endereço IP de fonte **A** e de destino **B**
- **A** consulta a tabela de roteamento e obtém **R** como próximo salto
- **A** usa o ARP para obter o endereço MAC de **R**
- **A** cria um quadro com endereço MAC de destino **R** e o datagrama de **A** para **B** na carga útil
- Adaptador de **A** envia o quadro para **R**
- Adaptador de **R** recebe o quadro

Funcionamento entre Redes Diferentes

- **R** remove o datagrama IP do quadro Ethernet e verifica que é destinado a **B**
- **R** consulta a tabela de roteamento
- **R** usa o ARP para obter o endereço MAC de **B**
- **R** cria o quadro contendo o datagrama de **A** para **B**
- Adaptador de **R** envia o quadro para **B**
- Adaptador de **B** recebe o quadro

Ferramentas ARP

- Saída do tcpdump

```
[root@masq-gw]# tcpdump -i eth0 \( arp \)
tcpdump: listening on eth0
0:80:c8:f8:4a:51 ff:ff:ff:ff:ff:ff 42: arp who-has 192.168.99.254 tell 192.168.99.35
0:80:c8:f8:5c:73 0:80:c8:f8:4a:51 60: arp reply 192.168.99.254 is-at 0:80:c8:f8:5c:73
```

Ferramentas ARP

- Ferramenta `arp`
 - Mostra a tabela ARP de uma estação

```
[miguel@tijuca ~]#arp
```

Address	HWtype	HWaddress	Flags	Mask	Iface
sono.gta.ufrj.br	ether	38:60:77:72:84:e8	C		br0
niteroi.gta.ufrj.br	ether	4c:72:b9:b0:df:19	C		br0
ramos.gta.ufrj.br	ether	00:1c:c0:91:36:63	C		br0
inga.gta.ufrj.br	ether	00:1c:c0:1c:b0:31	C		br0
grajau.gta.ufrj.br	ether	70:71:bc:e2:ee:7e	C		br0

Ferramentas ARP

- Arping
 - "Ping" da camada de enlace

```
ARPING 192.168.0.1 from 192.168.0.10 eth0
Unicast reply from 192.168.0.1 [00:01:80:38:F7:4C] 0.510ms
Unicast reply from 192.168.0.1 [00:01:80:38:F7:4C] 0.601ms
Unicast reply from 192.168.0.1 [00:01:80:38:F7:4C] 0.610ms
Unicast reply from 192.168.0.1 [00:01:80:38:F7:4C] 0.605ms
Sent 4 probes (1 broadcast(s))
Received 4 response(s)
```

Elementos de Interconexão

Repetidor

- Nível físico
- Tem um número pequeno de interfaces
- Tarefas executadas:
 - Recebe
 - Conformar (recupera a forma do sinal original)
 - Amplifica
 - Retransmite os bits de uma interface para todas as outras

Hub

- Nível físico
- É um repetidor
- **Repete** os bits de uma porta para **todas** as outras
- Segmentos da rede formam um **único domínio de colisão**
 - Domínio de colisão é uma única rede com CSMA/CD na qual haverá colisão se duas estações da rede transmitirem ao mesmo tempo

Hub

- Geralmente não pode conectar segmentos da rede operando em diferentes taxas
 - Esse caso poderia ser implementado usando dois hubs que operam em velocidades diferentes conectados internamente por um comutador de duas portas

Ponte (*bridge*)

- Nível de enlace
- Tem um pequeno número de interfaces
- Usam o endereço *MAC* de destino para encaminhar e filtrar quadros
- Cada **segmento** de rede é um **domínio de colisão separado**
- Pode conectar segmentos diferentes de rede, mesmo que cada uma opere a uma taxa diferente

Ponte (*bridge*)

- Conceitos
 - Filtragem
 - Capacidade da ponte decidir se um quadro será repassado para alguma interface ou descartado
 - Repasse
 - Capacidade de determinar as interfaces para as quais um quadro deve ser repassado e fazê-lo

Ponte (*bridge*)

- Tabela de comutação usada no repasse
 - Se o endereço de destino está na tabela e a interface não é a mesma de onde veio, transmite para a interface correspondente
 - Se o endereço de destino está na tabela e a interface é a mesma de onde veio, descarta
 - Significa que o destino está na mesma rede da origem
 - Se o endereço de destino não está na tabela, transmite em todas as interfaces exceto a interface de onde veio

Ponte (*bridge*)

- Possui a característica de aprendizagem automática
 - Construção automática da tabela de comutação
 - Cada quadro que passa pela ponte é examinado e são colocados na tabela o endereço fonte, a interface de onde veio o quadro e o tempo do registro na tabela
 - Registros expiram
 - Ex.: Pode-se trocar uma estação de lugar

Comutador (*switch*)

- Nível enlace
- Pontes de alto desempenho e múltiplas interfaces
 - Tem um maior número de interfaces que os repetidores e as pontes
- Atualmente a maioria é utilizada para acesso dedicado
 - Uma única estação por domínio de colisão

Comutador (*switch*)

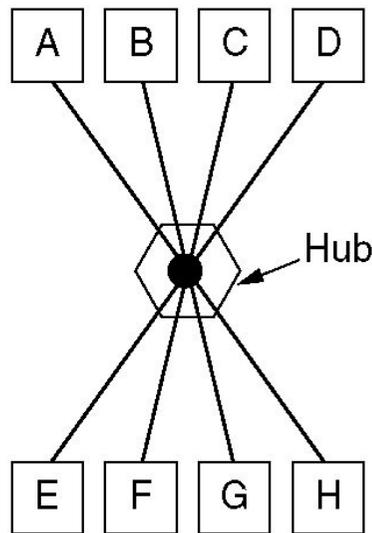
- Usam o endereço *MAC* de destino para encaminhar e filtrar quadros
- Cada segmento de rede é um domínio de colisão separado
- Pode conectar segmentos diferentes de rede, mesmo que cada uma opere a uma taxa diferente

Comutador (*switch*)

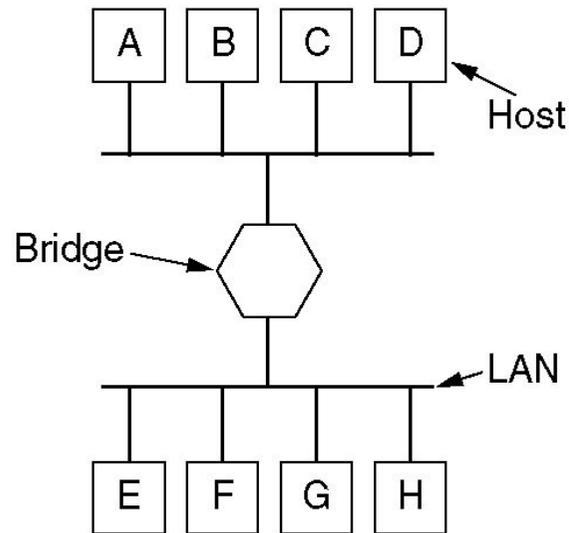
- Pode trabalhar em *full-duplex*
- Comutação de quadros
 - Quadro sempre é expedido pela mesma saída, decidida uma vez por todas quando da aceitação de trocar dados

Elementos de Interconexão

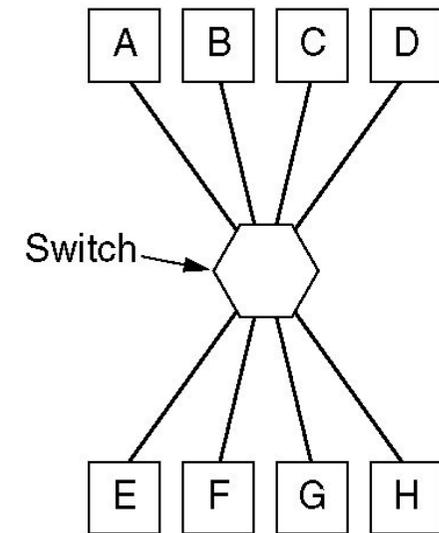
Hub, ponte e comutador (fonte: Tanenbaum)



(a)



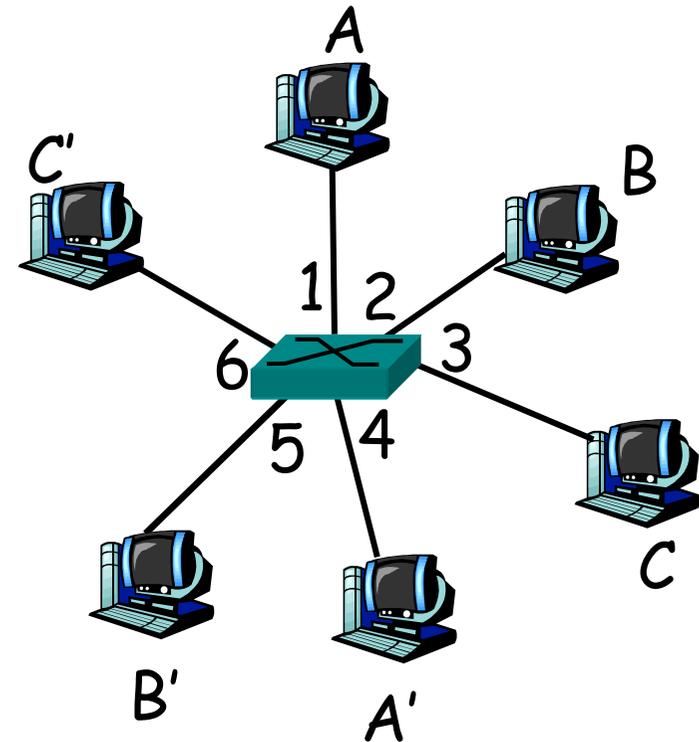
(b)



(c)

Comutador: Múltiplas Transmissões Simultâneas

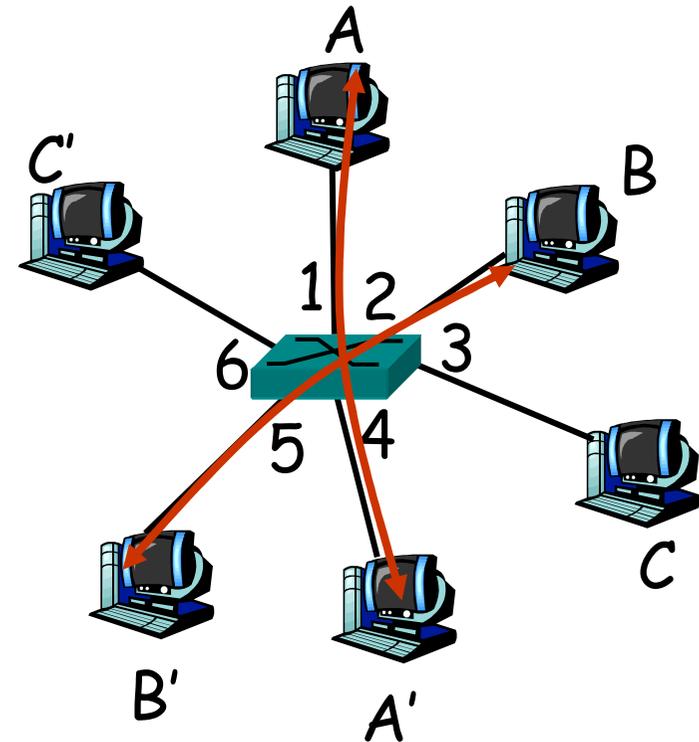
- Estações têm conexão direta e dedicada para o comutador
- Os comutadores armazenam quadros



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

Comutador: Múltiplas Transmissões Simultâneas

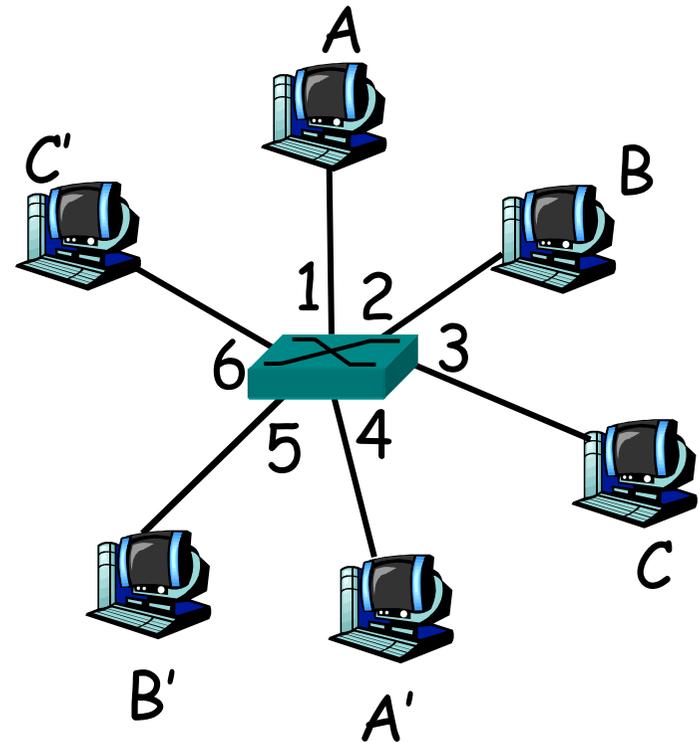
- O protocolo Ethernet é usado em *cada* enlace de entrada, mas não há colisões: *full duplex*
 - Cada enlace é o seu próprio domínio de colisão
- Comutação: A-para-A' e B-para-B' simultaneamente, sem colisões
 - Isto não é possível com hubs



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

Comutador: Tabela de Comutação

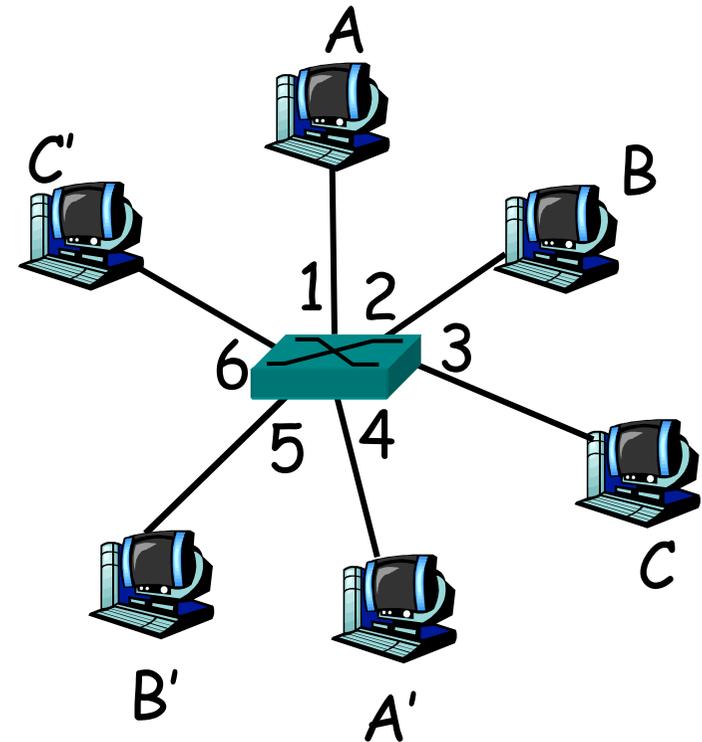
- Como é que o comutador sabe que A' é alcançável através da interface 4, e que B' é alcançável a partir da interface 5?
 - Cada comutador possui uma **tabela de comutação**, cada entrada contém:
 - (endereço MAC da estação, interface para alcançar a estação, carimbo de tempo)
 - Similar a uma tabela de roteamento



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

Comutador: Tabela de Comutação

- Como são criadas e mantidas as entradas na tabela de comutação?
 - Há algo como um protocolo de roteamento?



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

Comutador: autoaprendizagem

- Comutador **aprende** quais estações podem ser alcançados através de quais interfaces
 - Quando um quadro é recebido, o comutador "aprende" a localização do transmissor: segmento LAN de entrada
 - registra o par transmissor/localização na tabela de comutação

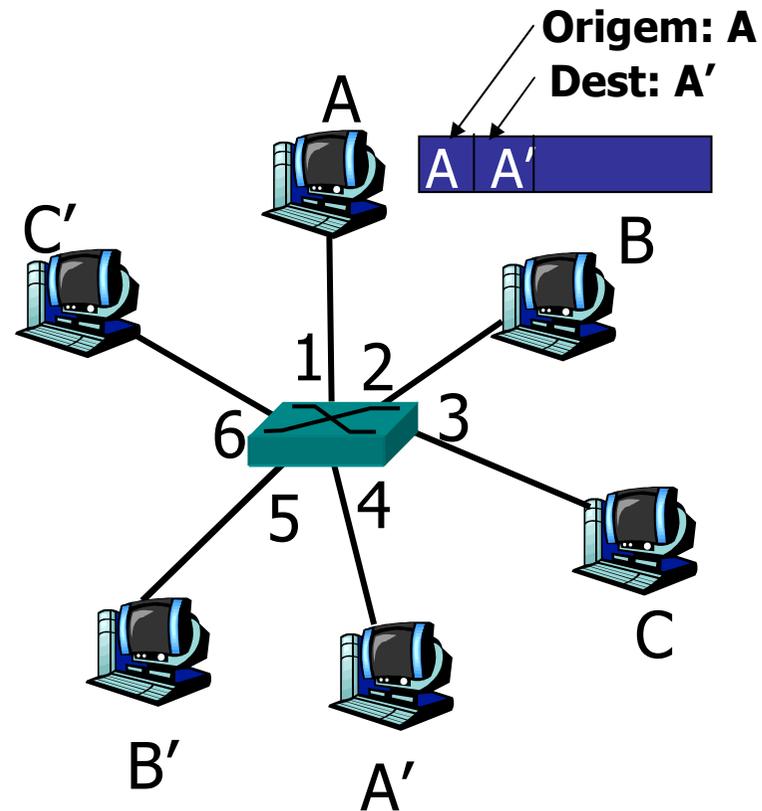


Tabela de comutação
(inicialmente vazia)

end MAC	interface	TTL
A	1	60

Filtragem e Encaminhamento

Quando um comutador recebe um quadro:

registra o enlace associado com a estação transmissora
indexa a tabela de comutação usando o endereço MAC do destino

if entrada encontrada para o destino
then{

if dest estiver no segmento de onde veio o quadro
 then descarta o quadro

else repassa o quadro na interface indicada

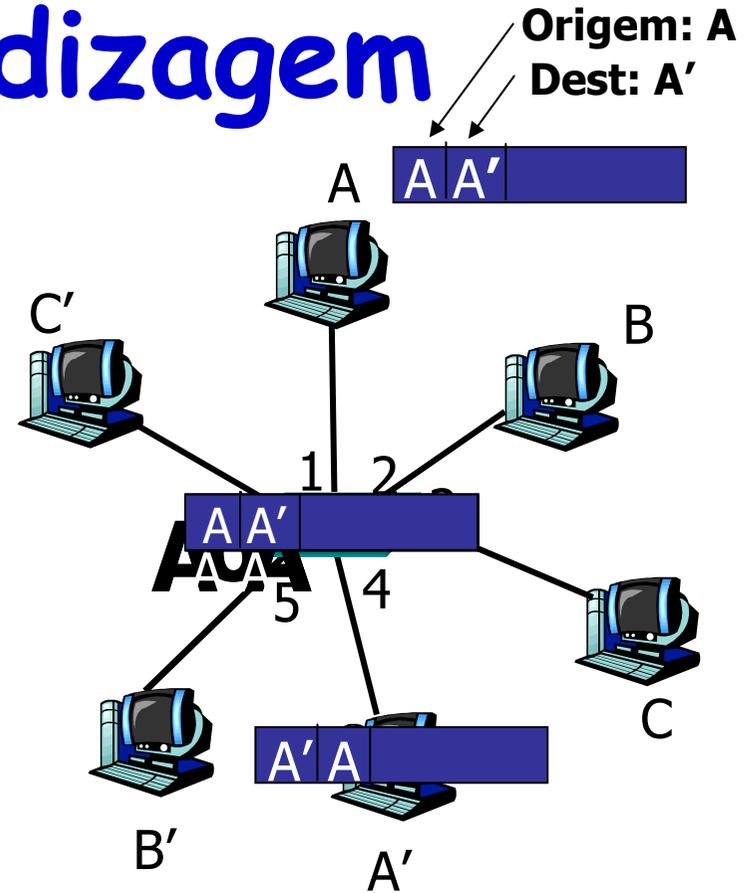
}

else usa inundação

← Repassa o quadro para todas as demais interfaces exceto aquela em que o quadro foi recebido

Autoaprendizagem

- Destino do quadro desconhecido:
inundação
- Local do destino A conhecido:
transmissão seletiva

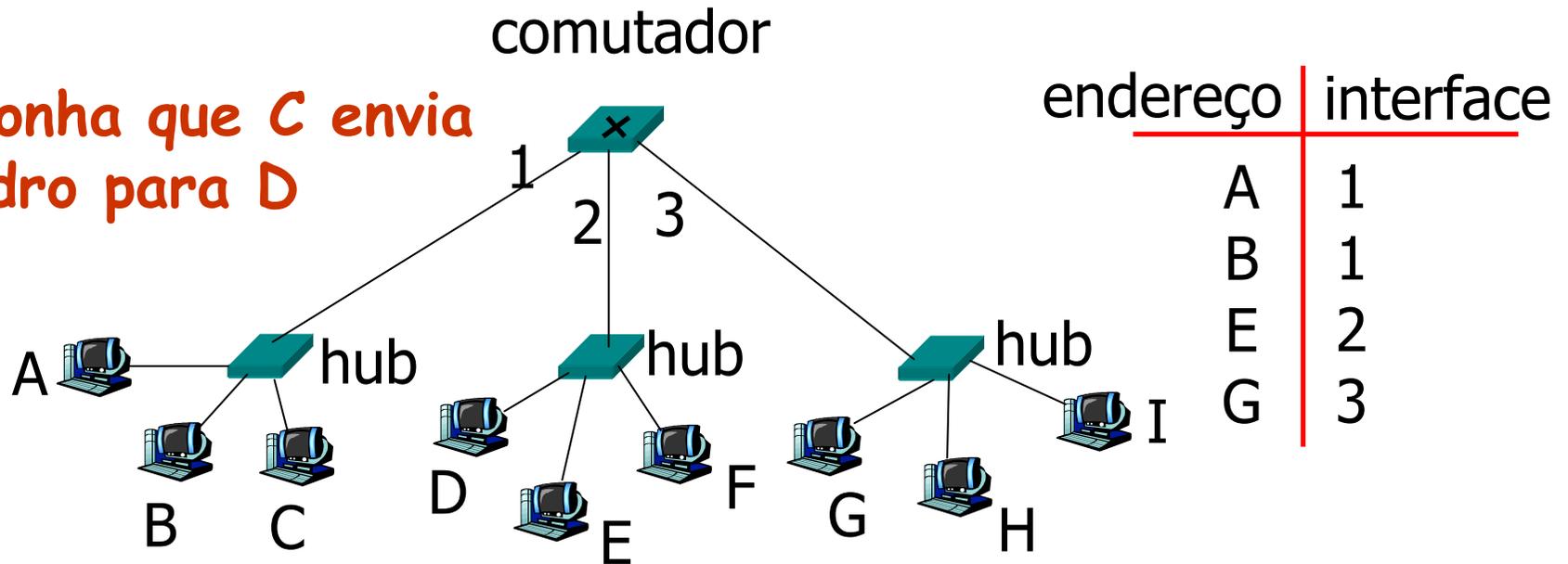


end MAC	interface	TTL
A	1	60
A'	4	60

Tabela de comutação
(inicialmente vazia)

Exemplo com Comutador

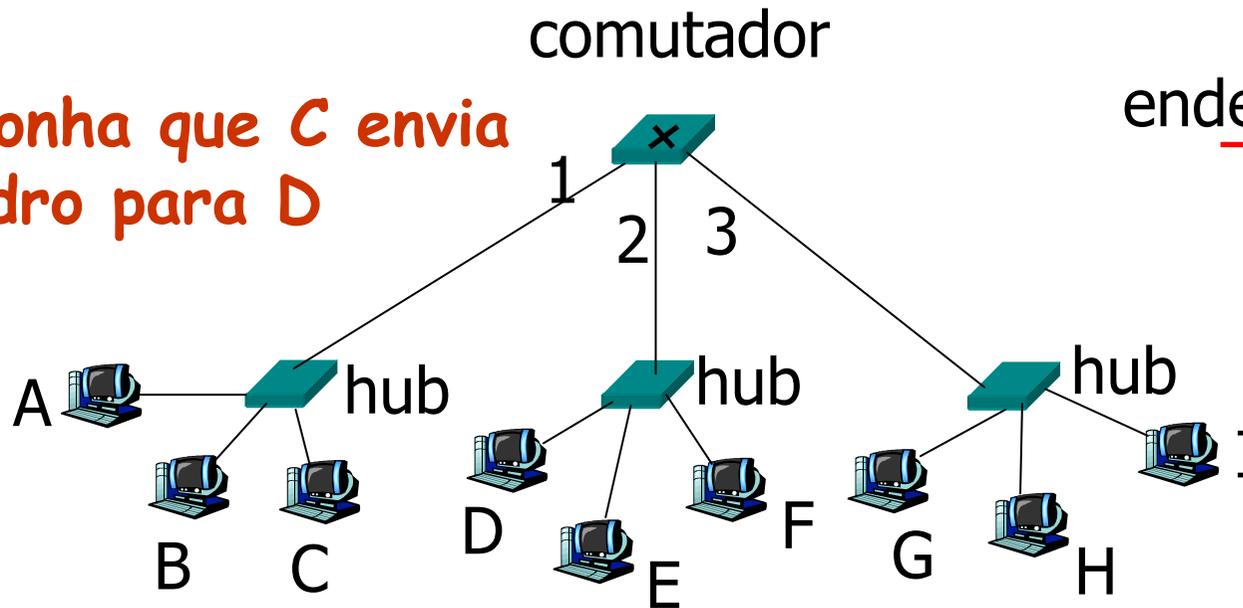
Suponha que **C** envia quadro para **D**



- Comutador recebe o quadro vindo de **C**
 - Anota na tabela de comutação que **C** está na interface 1
 - Dado que **D** não se encontra na tabela, encaminha o quadro para as demais interfaces: 2 e 3
- Quadro é recebido por **D**

Exemplo com Comutador

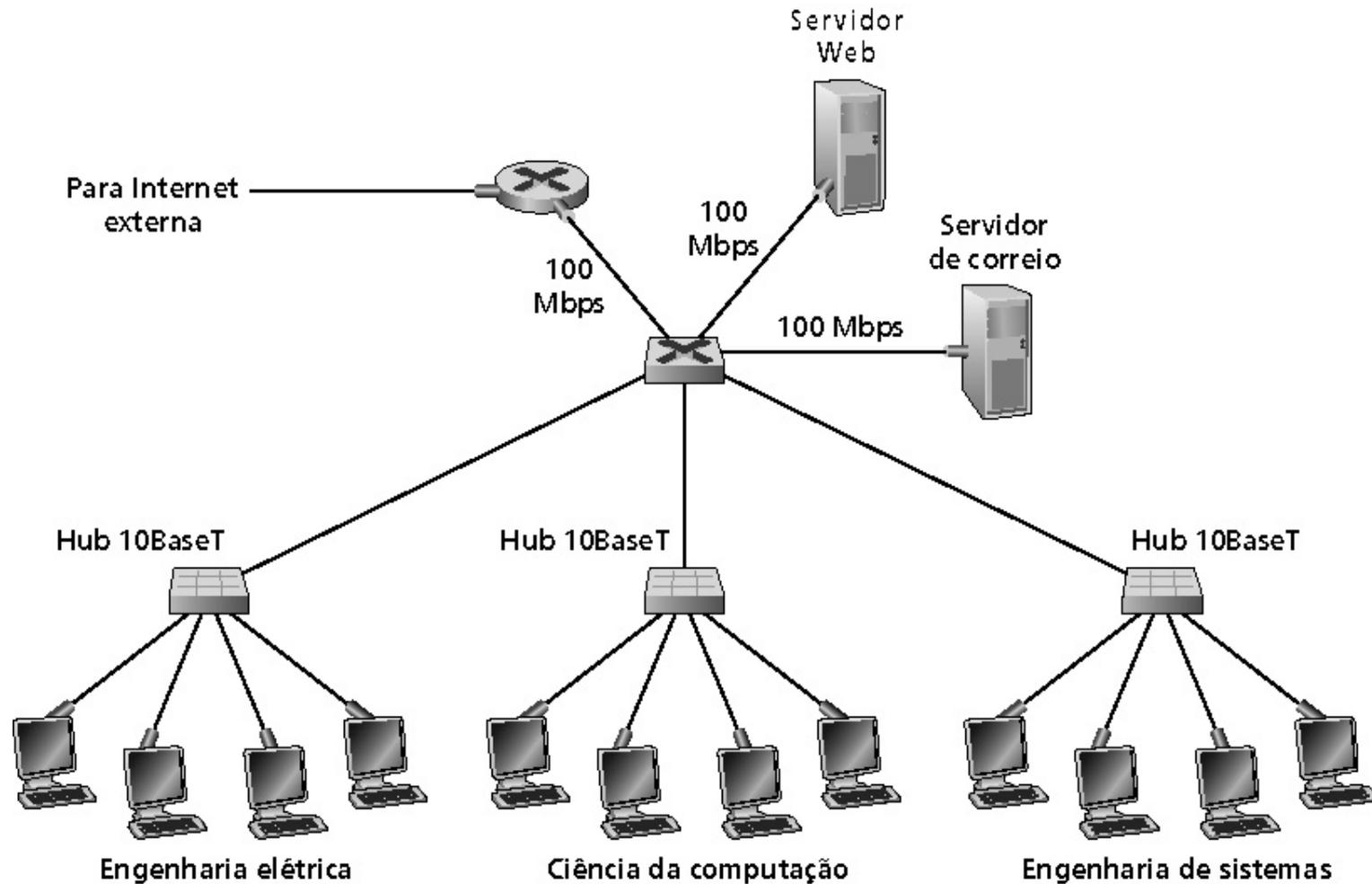
Suponha que **C** envia quadro para **D**



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

- Comutador recebe o quadro vindo de **D**
 - Anota na tabela de comutação que **D** está na interface 2
- Dado que **C** está na tabela, encaminha o quadro apenas na interface 1
 - Quadro é recebido por **C**

Rede Institucional/Corporativa



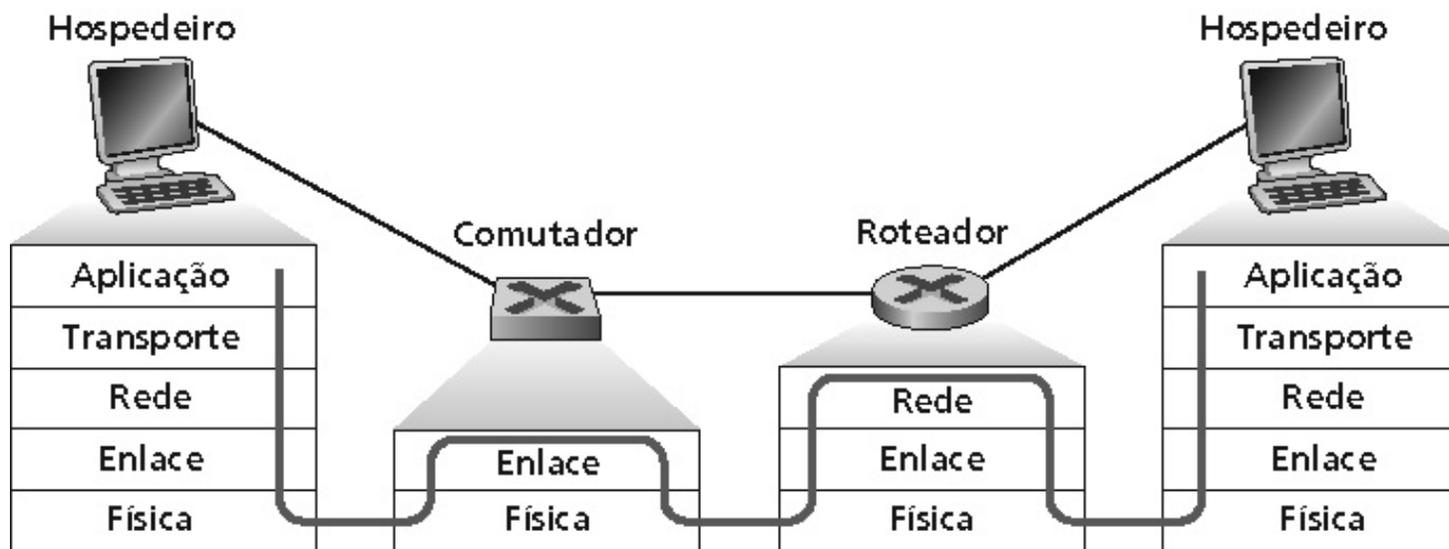
Roteador

- Nível de rede
- Roteamento de pacote
 - Endereço do destinatário
 - Escolha da melhor saída no momento da decisão

Comutadores x Roteadores

- Ambos são dispositivos do tipo armazena-e-repassa
 - Roteadores → dispositivos da camada de rede
 - Examinam os cabeçalhos dessa camada
 - Comutadores → dispositivos da camada de enlace
- Roteadores
 - Mantêm tabelas de roteamento, implementam algoritmos de roteamento
- Comutadores
 - Mantêm tabelas de comutação, implementam filtragem, algoritmos de aprendizagem

Comutadores x Roteadores

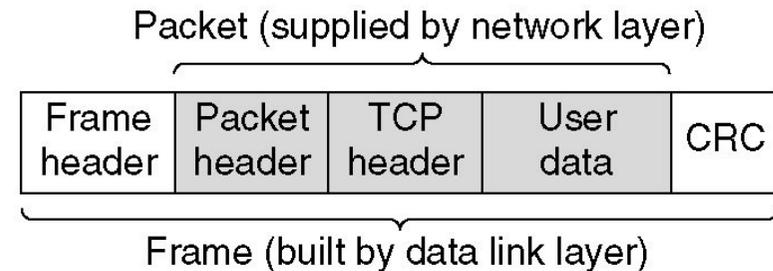


Elementos de Interconexão

Elementos (fonte: Tanenbaum)

Application layer	Application gateway
Transport layer	Transport gateway
Network layer	Router
Data link layer	Bridge, switch
Physical layer	Repeater, hub

(a)



(b)

Material Utilizado

- Notas de aula do Prof. Igor Monteiro Moraes, disponíveis em <http://www2.ic.uff.br/~igor/cursos/redespg>

Leitura Recomendada

- Capítulo 3 do Livro "*Computer Networks*", Andrew S. Tanenbaum e David J. Wetherall, 5a. Edição, Editora Pearson, 2011
- Capítulo 5 do Livro "*Computer Networking: A Top Down Approach*", 5a. Ed., Jim Kurose and Keith Ross, Editora Pearson, 2010