Redes de Computadores 1

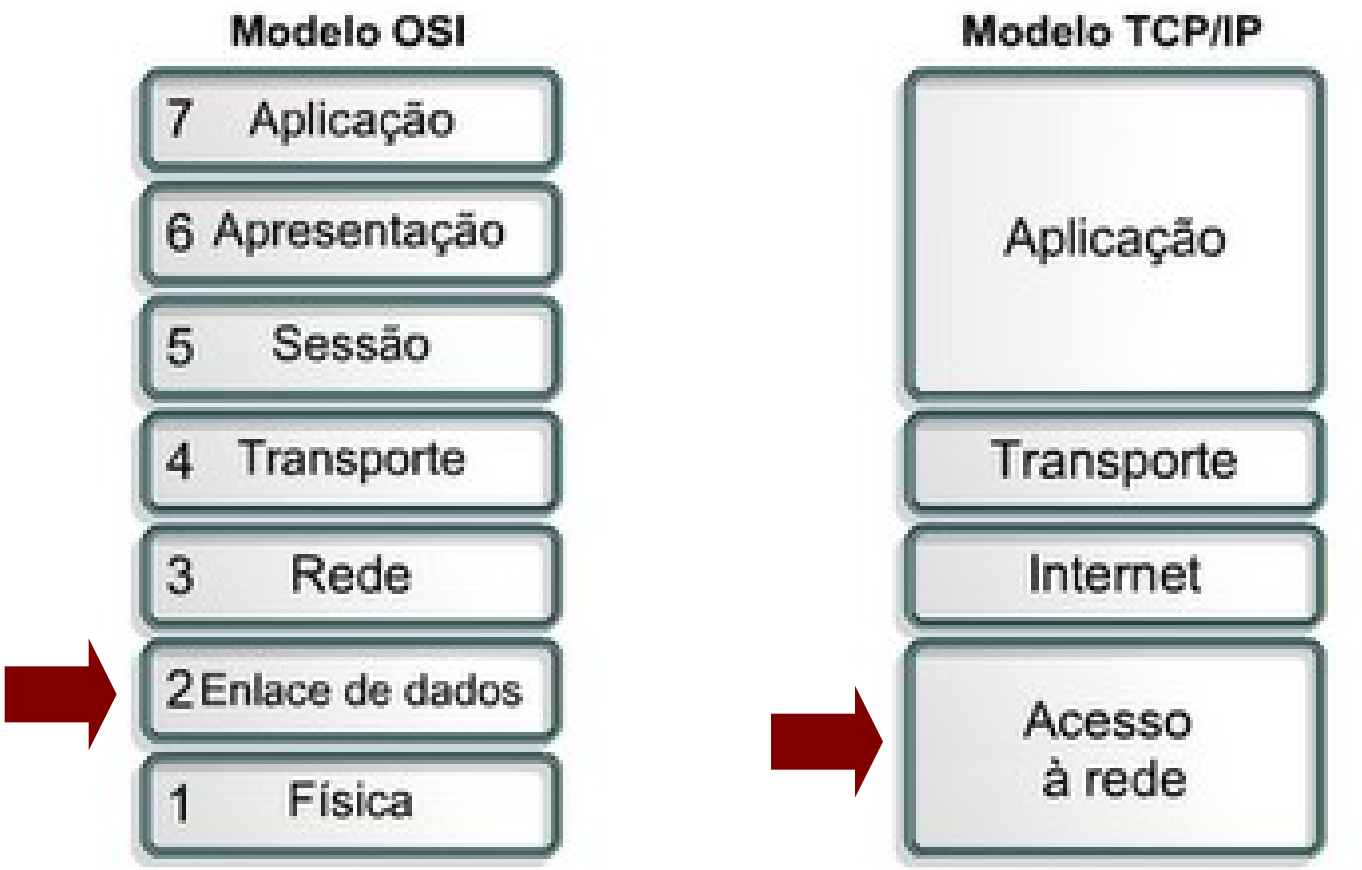
Prof. Miguel Elias Mitre Campista

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

Parte IV

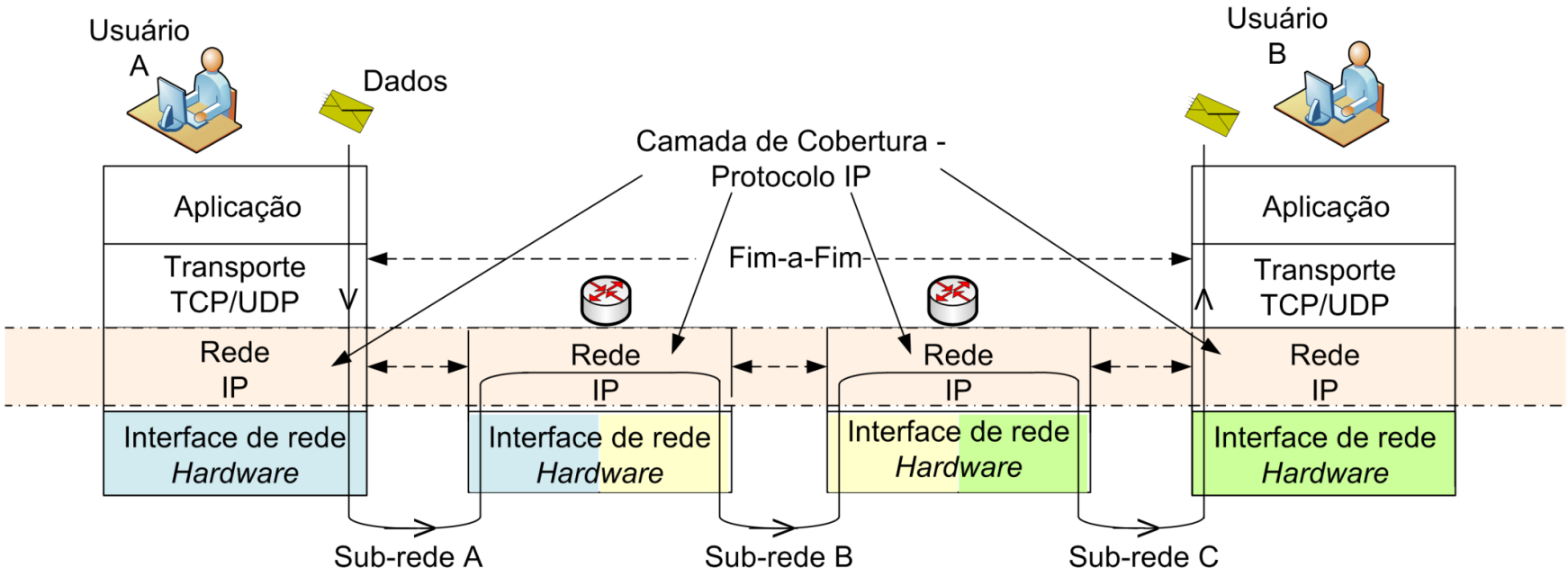
Camada de Enlace: Introdução

Camada de Enlace



Rede X Enlace

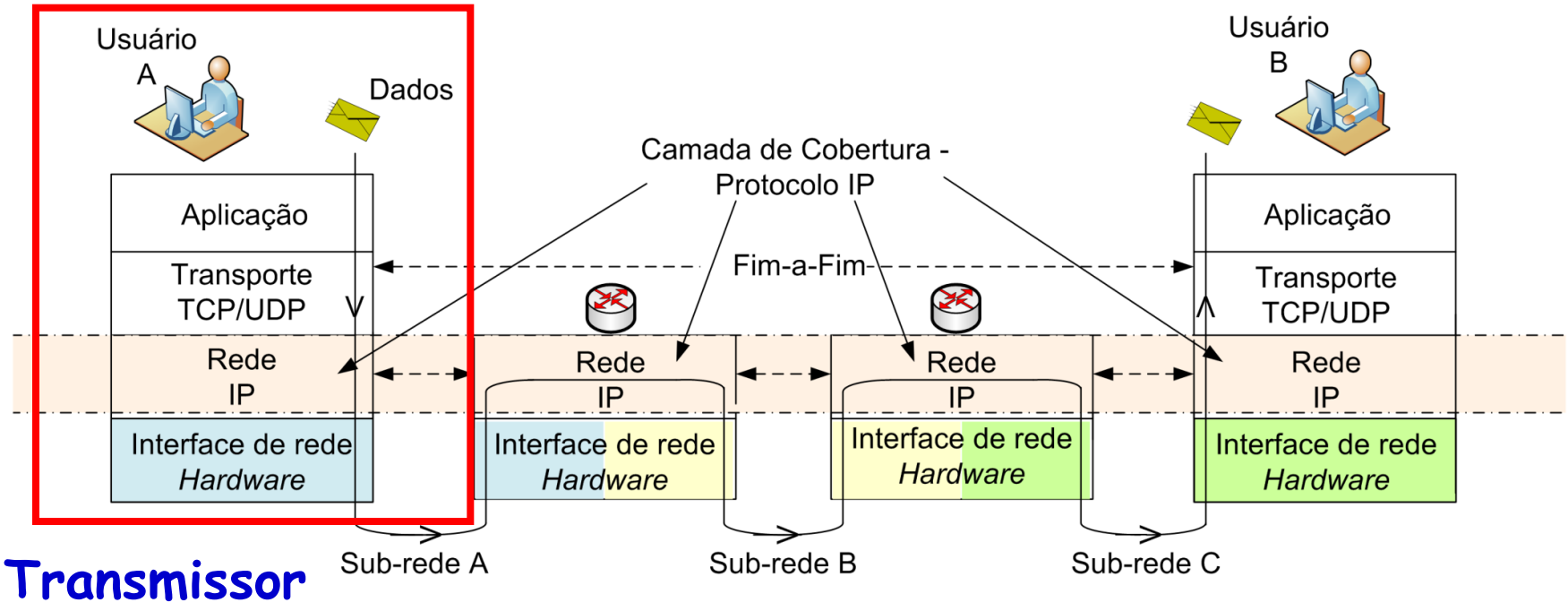
- Protocolos da camada de rede
  - Executados nos **sistemas finais** e nos **roteadores**



Transporta segmentos da estação remetente à receptora

Rede X Enlace

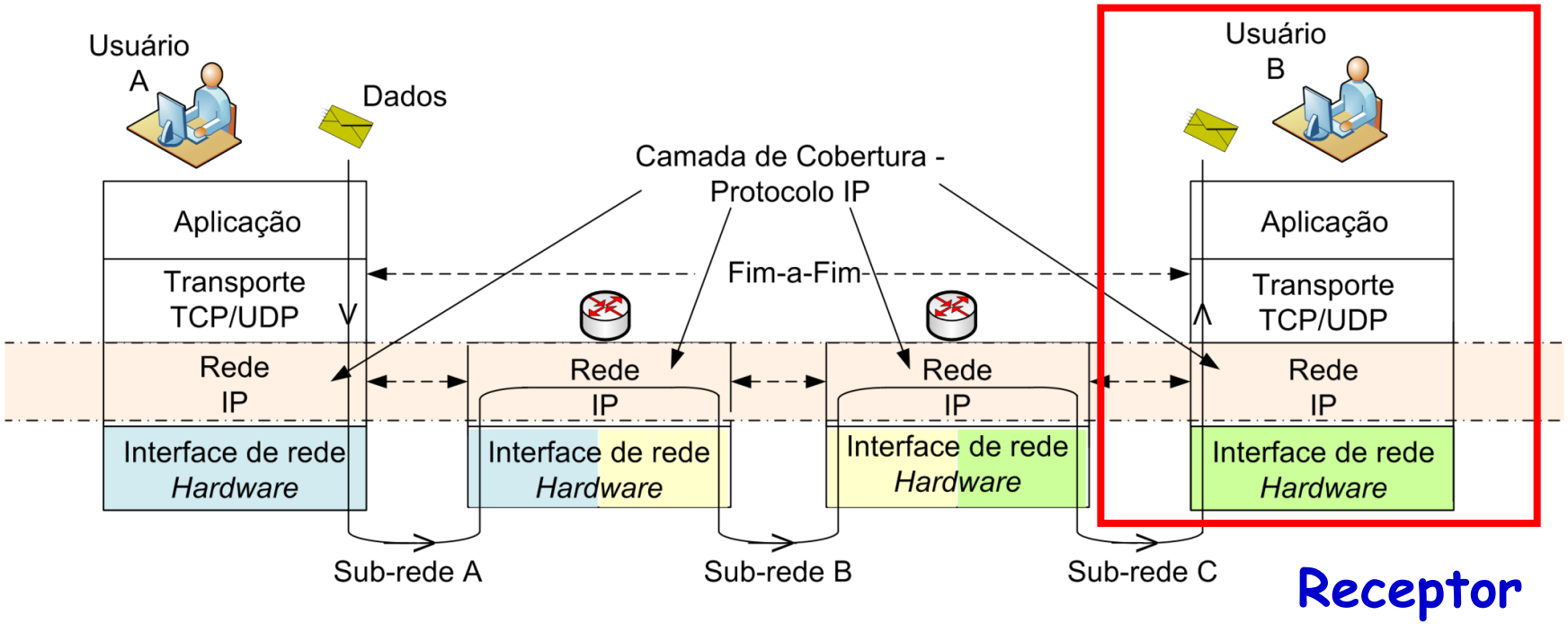
- Protocolos da camada de rede
  - Executados nos **sistemas finais** e nos **roteadores**



No lado transmissor, encapsula segmentos dentro de datagramas

Rede X Enlace

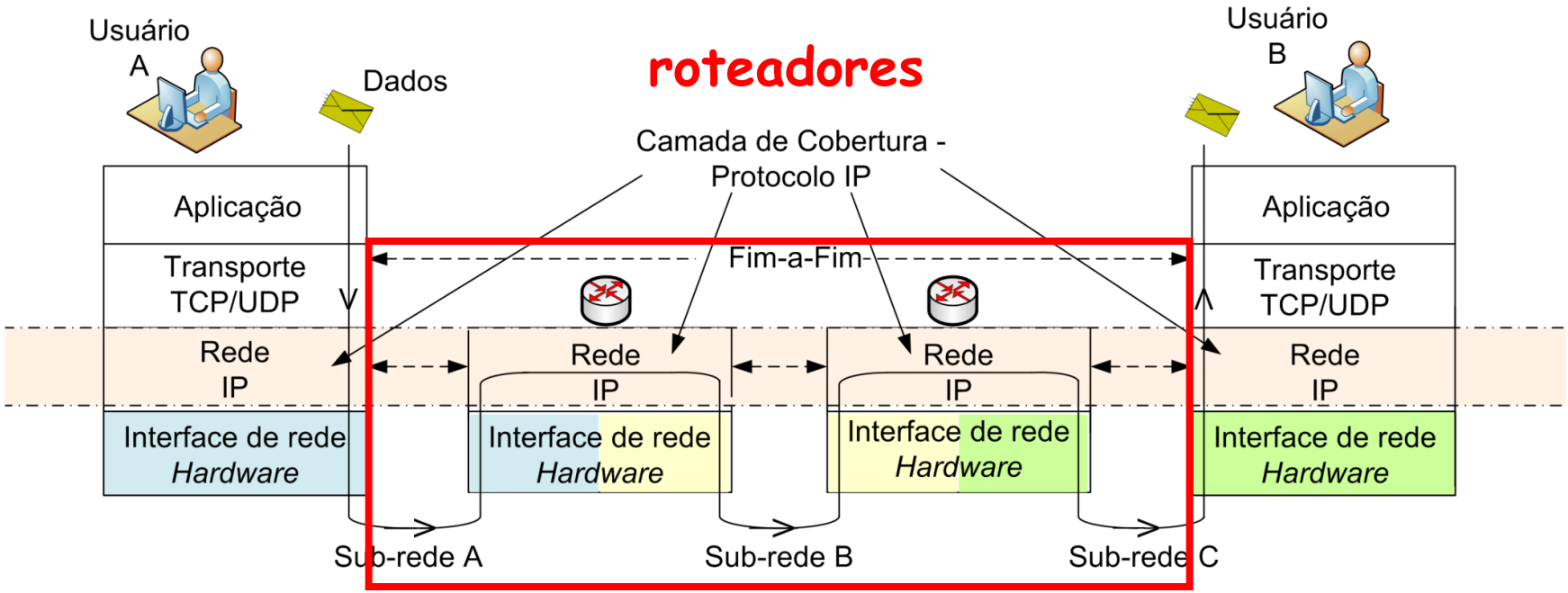
- Protocolos da camada de rede
  - Executados nos **sistemas finais** e nos **roteadores**



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

Rede X Enlace

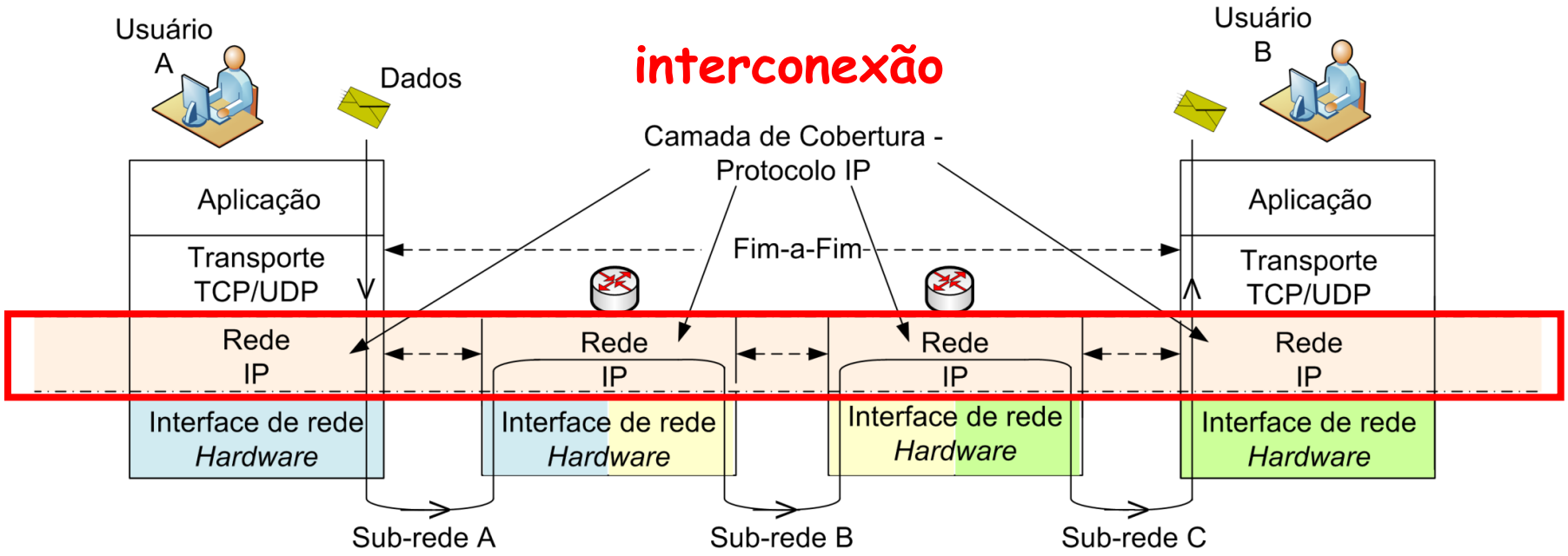
- Protocolos da camada de rede
  - Executados nos **sistemas finais** e nos **roteadores**



Roteadores examinam campos de cabeçalho de **todos** os datagramas IP que passam por eles e decidem o próximo salto a ser seguido

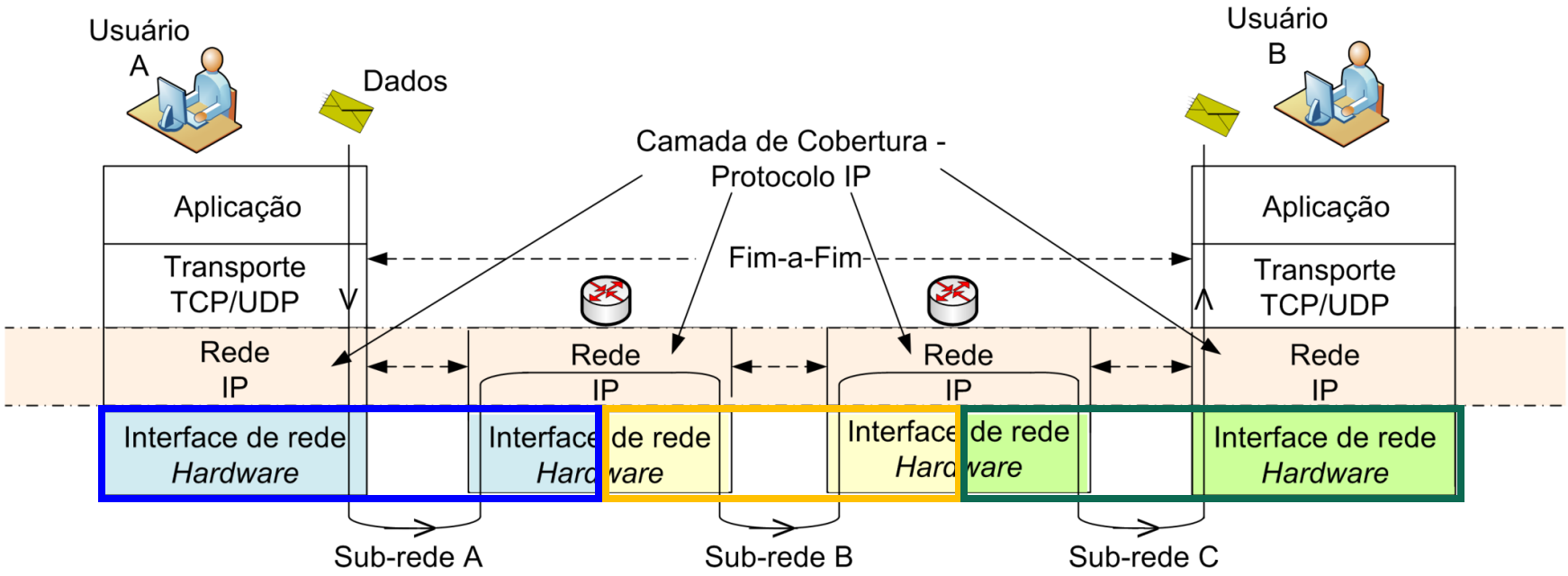
Rede X Enlace

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



Rede X Enlace

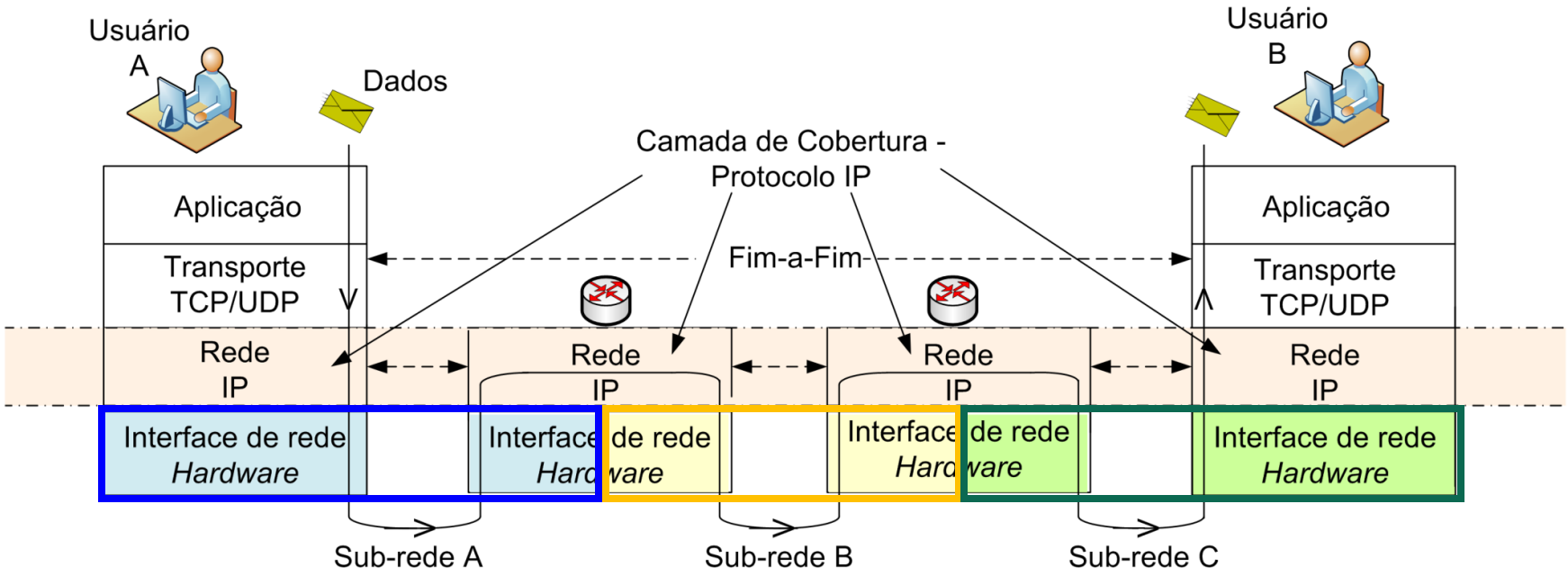
- Protocolos da camada de rede
  - Executados nos **sistemas finais** e nos **roteadores**



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)

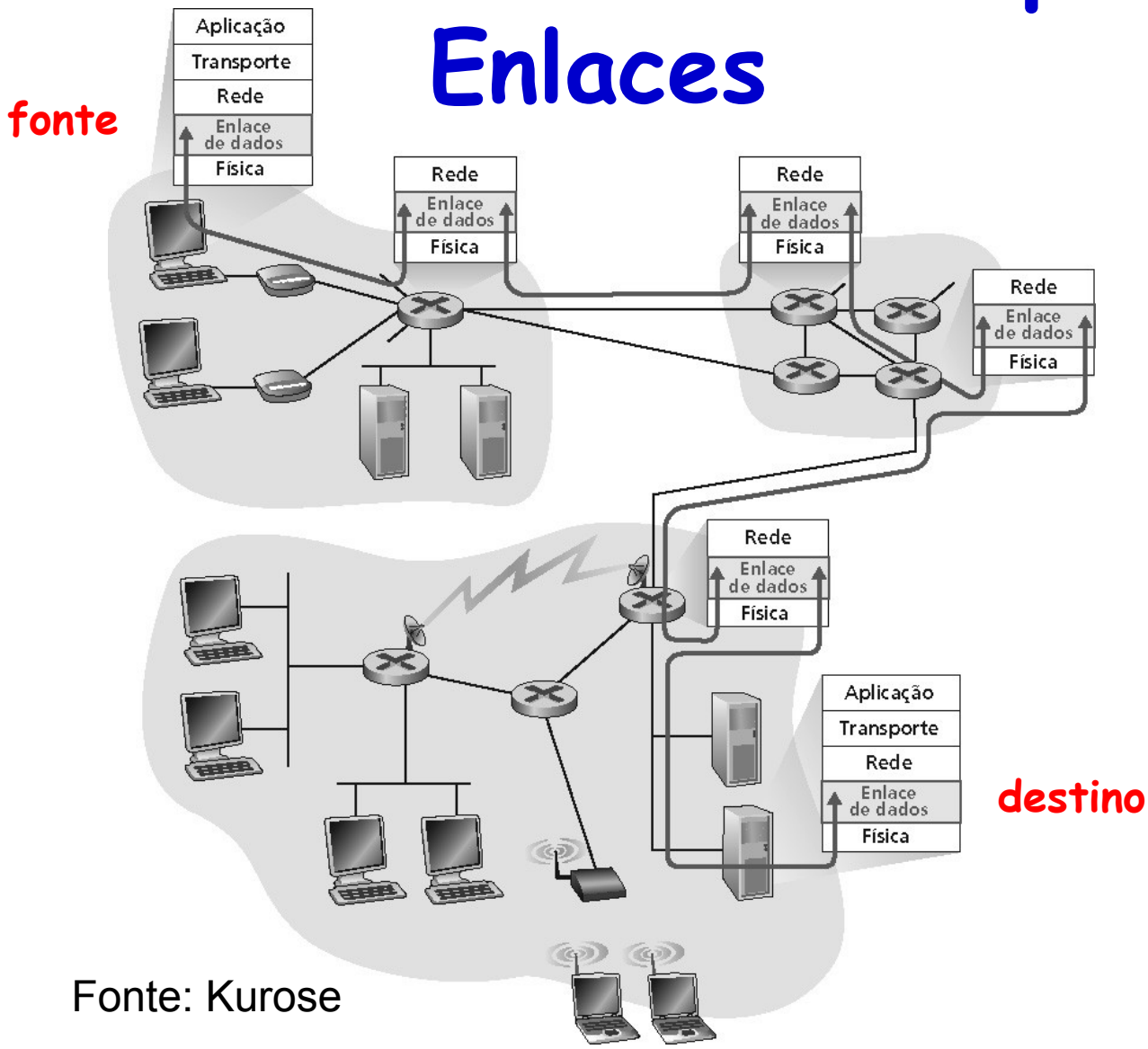
Rede X Enlace

- 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

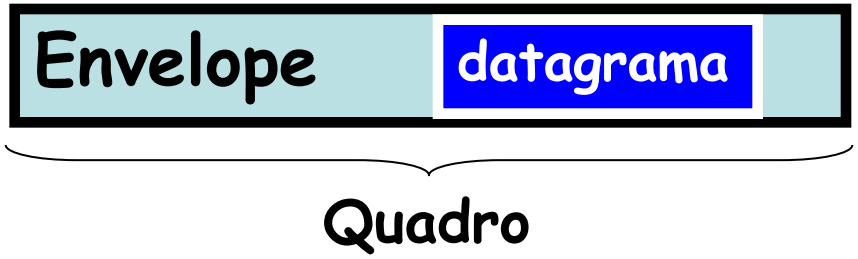
- Responsável por:
  - **Determinar o melhor caminho** para o envio dos pacotes
    - É função dos protocolos de roteamento
  - **Encaminhar** os pacotes até o destino
    - É função do protocolo IP
  - **Interconectar** redes de diferentes tecnologias
    - É função do protocolo IP

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

Como os dados são transmitidos em cada enlace?

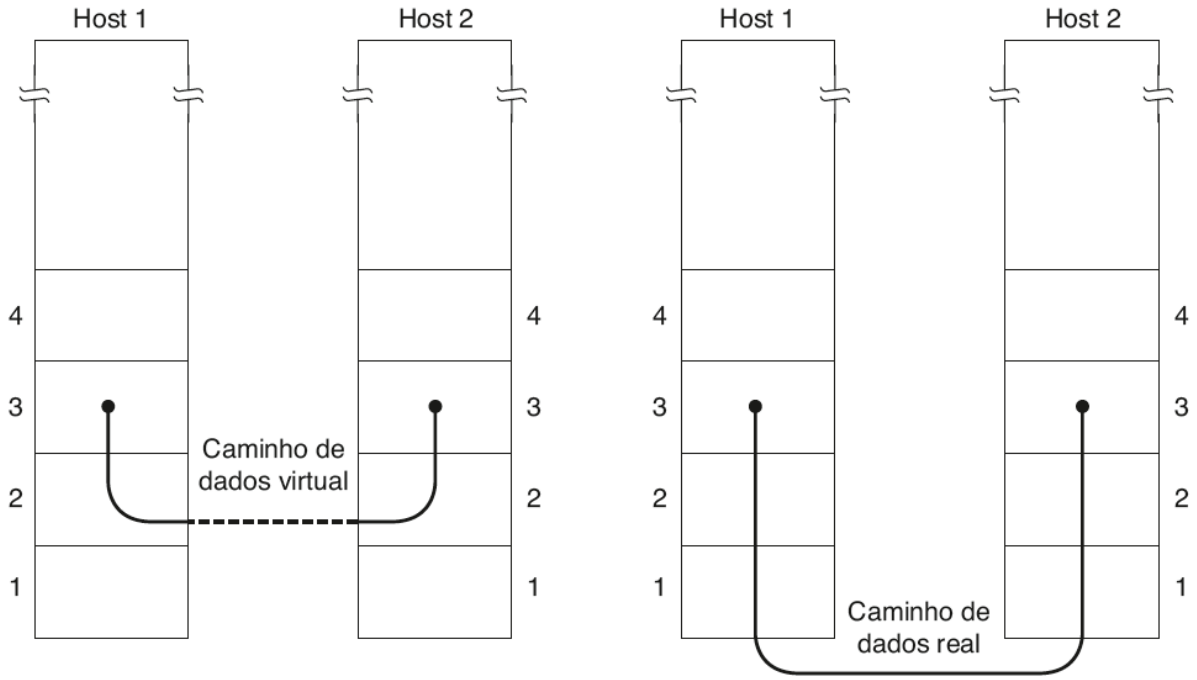
Camada de Enlace

- 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

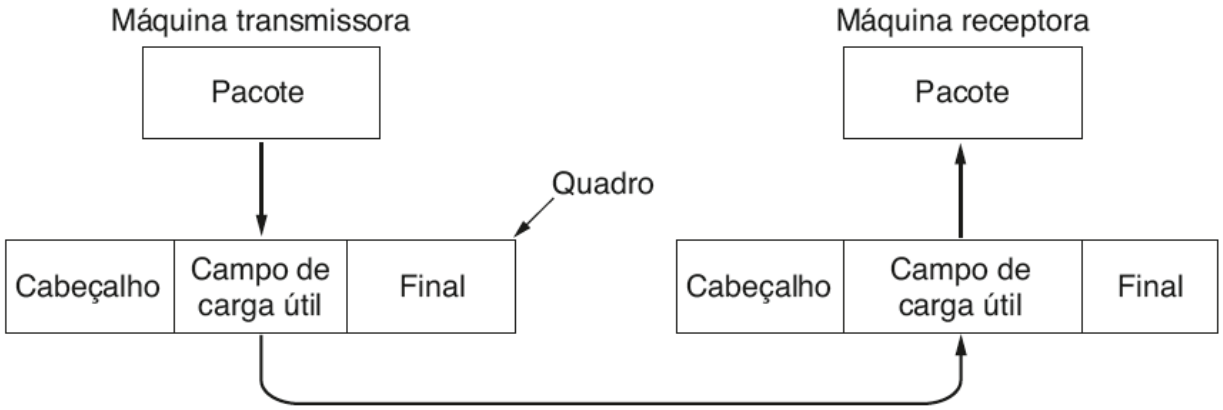
Protocolos de camada de enlace são responsáveis por oferecer tais serviços!

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

Serviços da Camada de Enlace

- Então por que a confiabilidade e o controle de fluxo não são executados na camada de rede?
  - A camada de rede também é salto-a-salto...

A camada de rede não conhece características do meio físico como tamanho do quadro (imposto pela probabilidade de erro do canal) e o atraso de propagação!

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**
  - Apropriado quando a **taxa de erros é baixa**
    - Ethernet
  - Recuperação de perdas a cargo das camadas superiores
    - Camada de transporte, por exemplo
  - Apropriado 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

Classificação dos Serviços

- **Orientado a conexões** e **com confirmação**
  - Há estabelecimento de conexão
    - Sequência de quadros é controlada e não apenas o último quadro
      - Como saber se os quadros chegaram em ordem se não houver estado?
  - 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

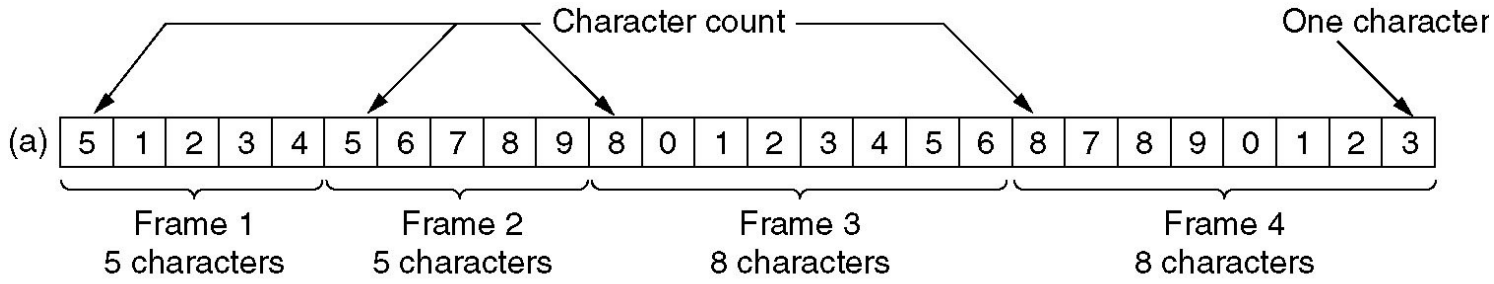
- Camada de enlace:
  - Divide o fluxo de bits em quadros
    - Para isso, precisa marcar o início e o fim
  - Faz verificação de erros por quadro
    - Detecção e correção de erro, quando possível

- 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

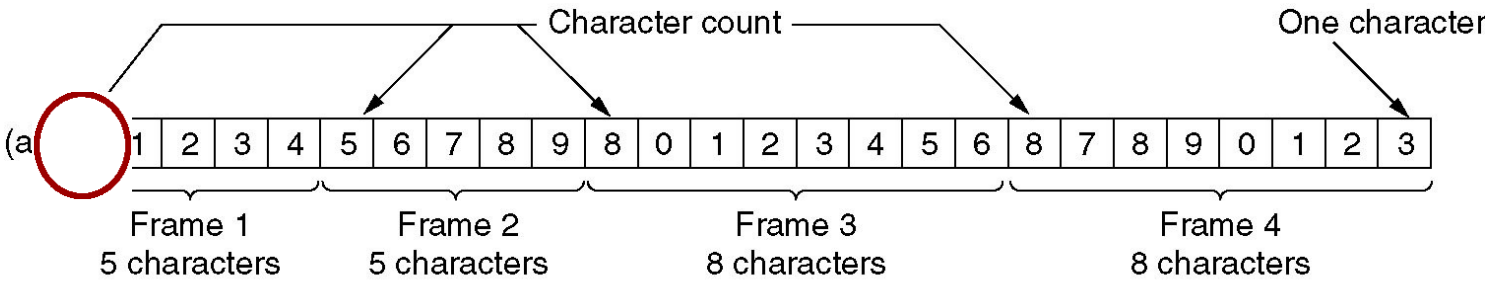
Exemplo de contagem de caracteres (fonte: Tanenbaum)



Enquadramento: Contagem de caracteres

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

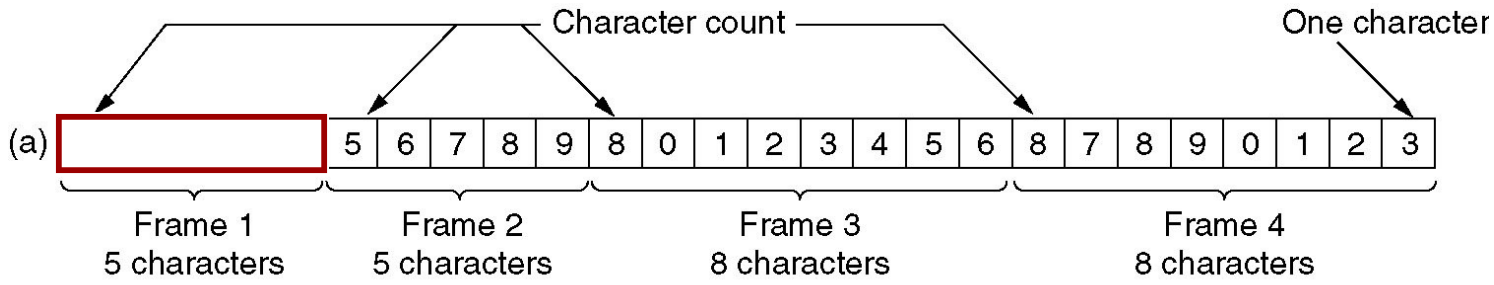
Exemplo de contagem de caracteres (fonte: Tanenbaum)



Enquadramento: Contagem de caracteres

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

Exemplo de contagem de caracteres (fonte: Tanenbaum)

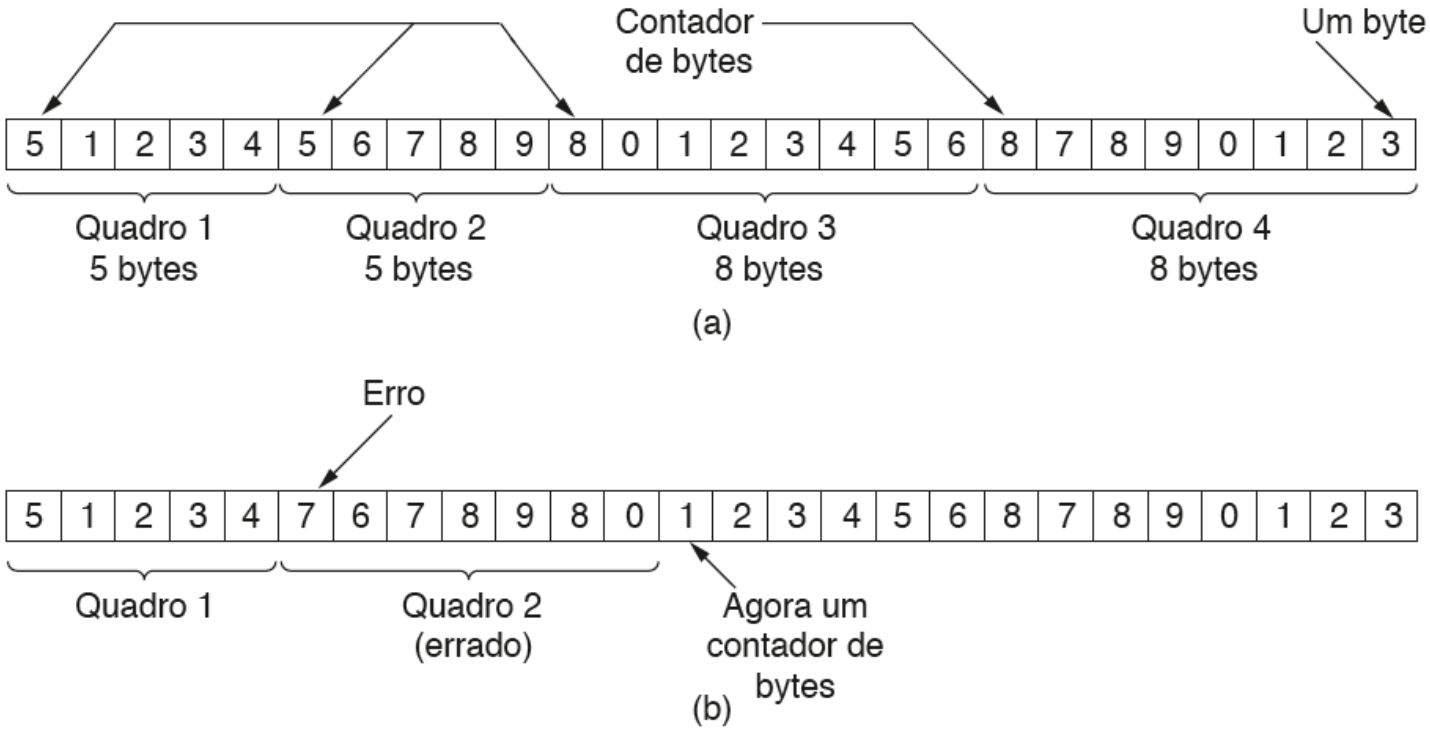


Enquadramento: Contagem de caracteres

- 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

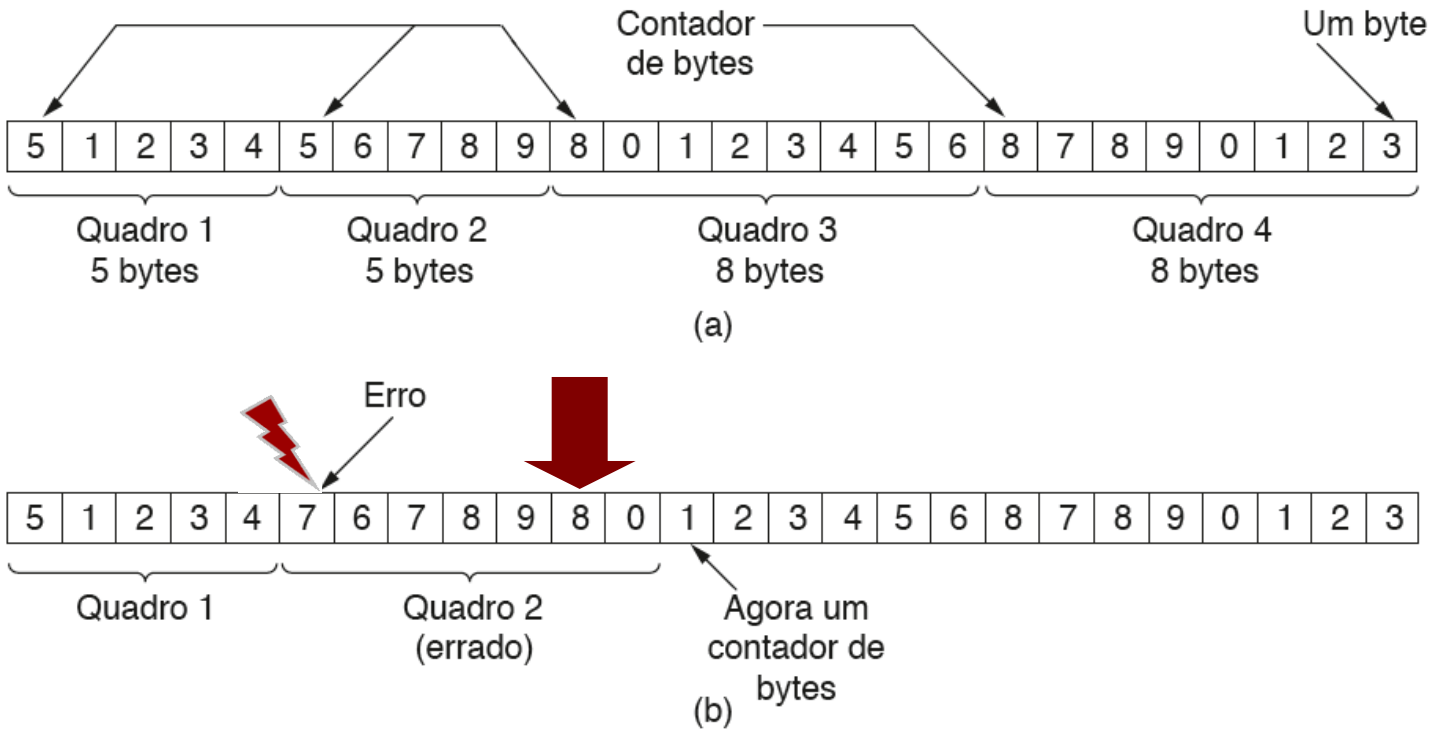
Enquadramento: Contagem de caracteres

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



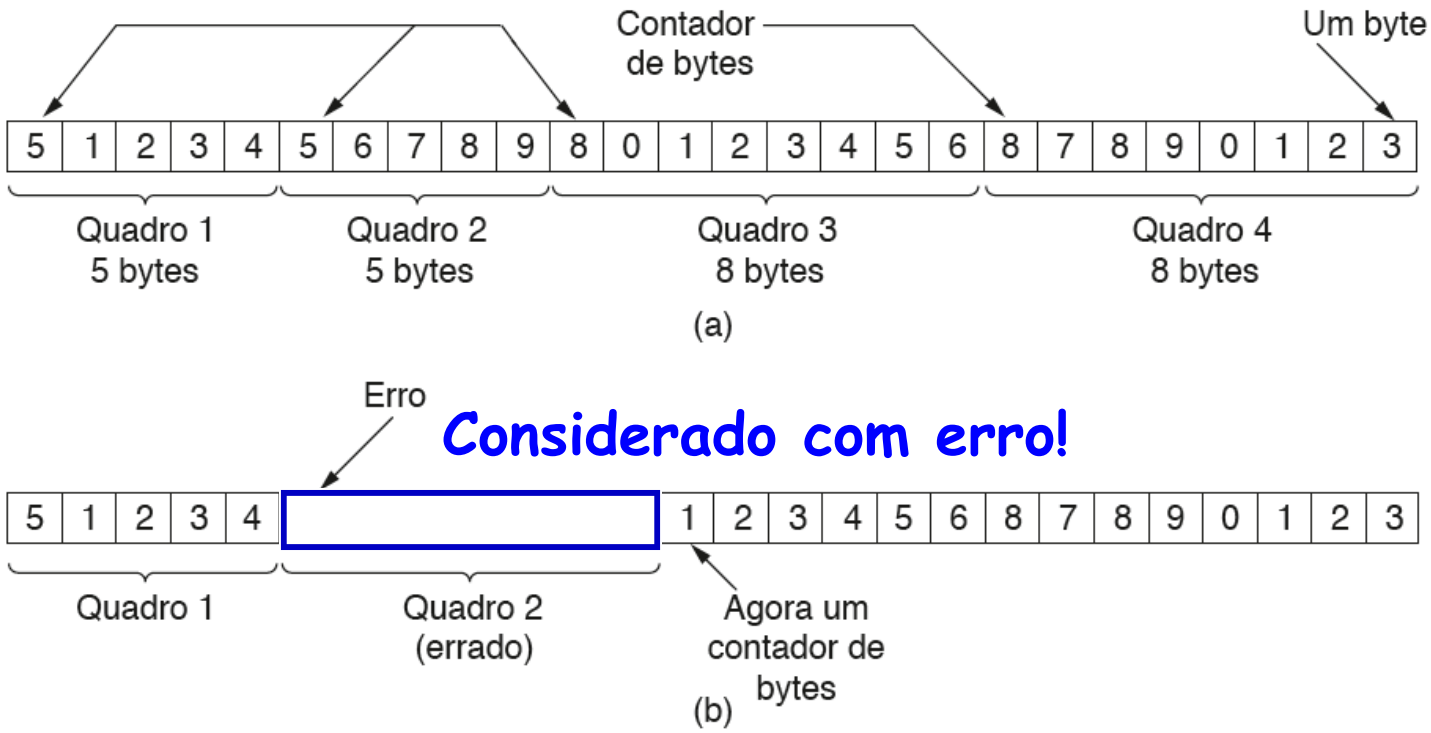
Enquadramento: Contagem de caracteres

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



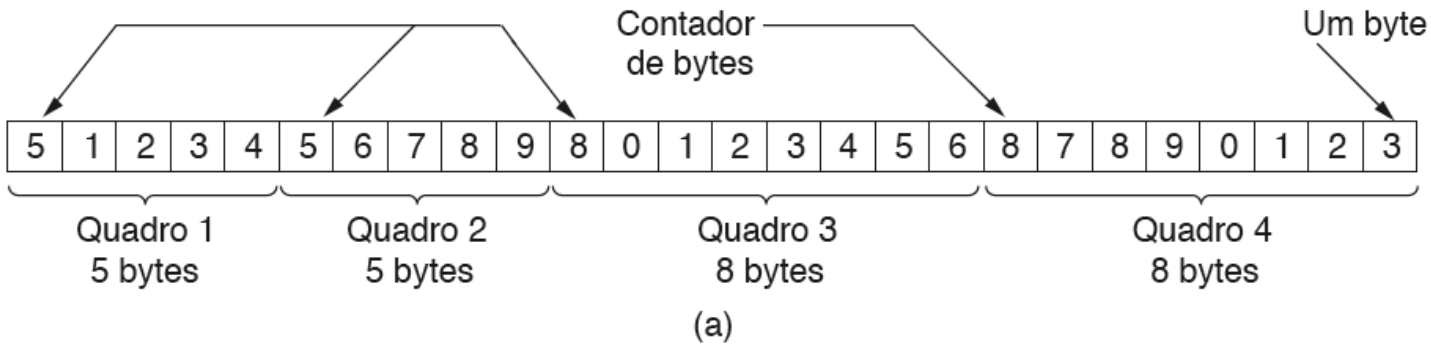
Enquadramento: Contagem de caracteres

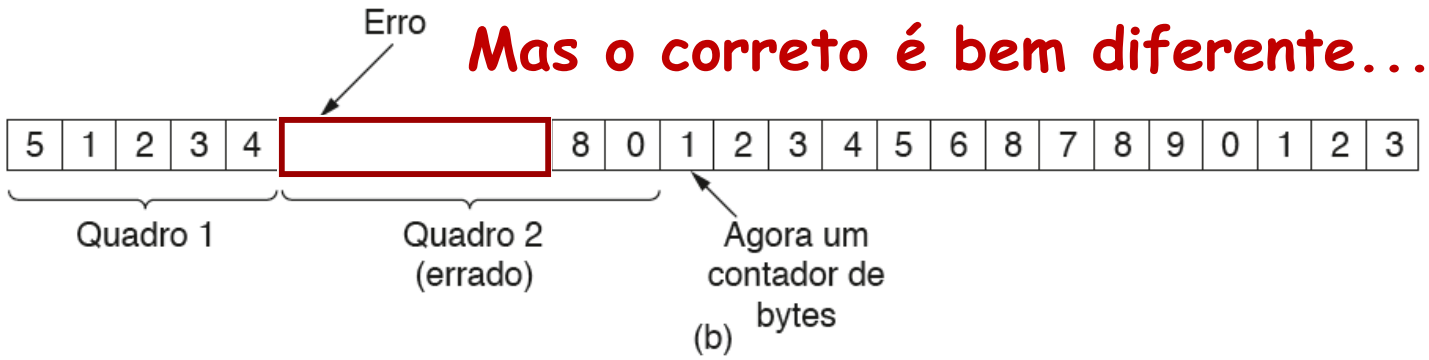
Exemplo de contagem de caracteres com um erro (fonte: Tanenbaum)



Enquadramento: Contagem de caracteres

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

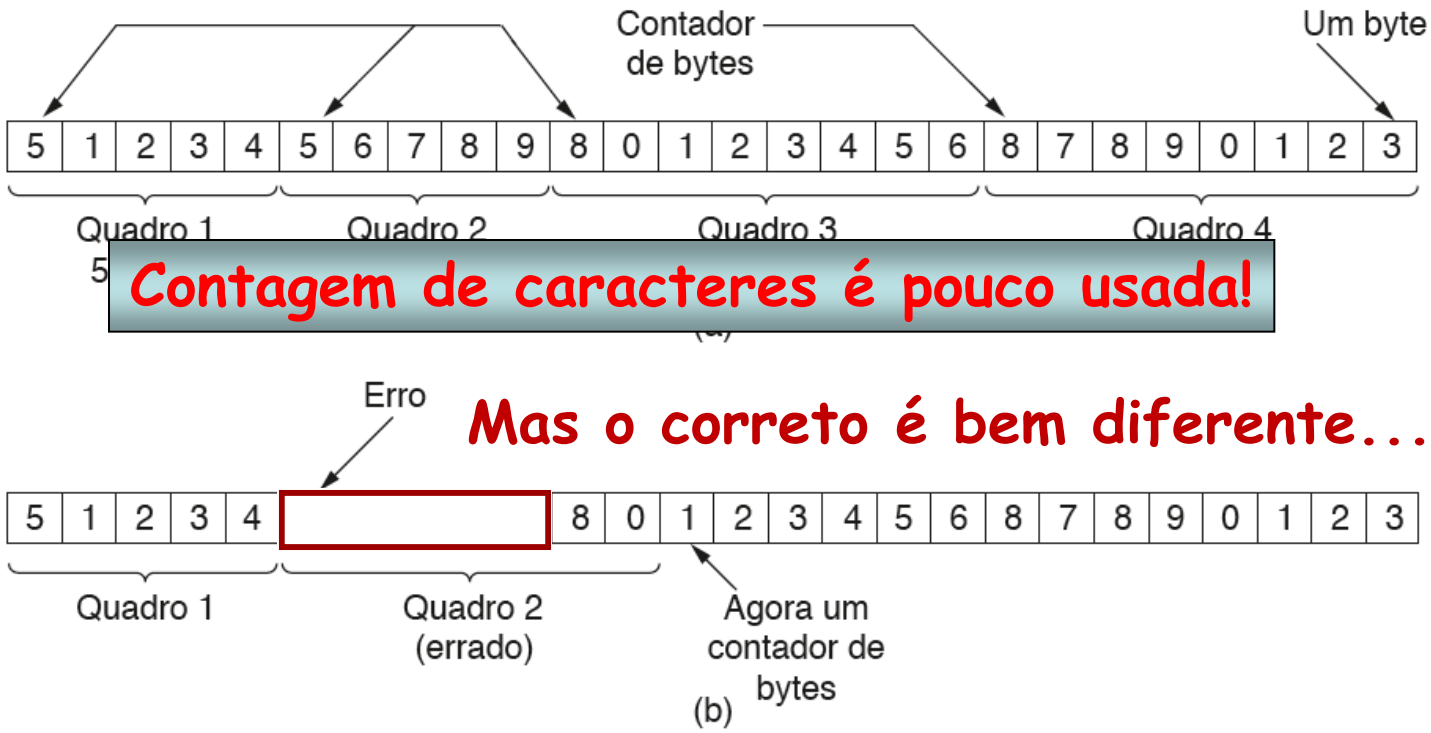




Mas o correto é bem diferente...

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

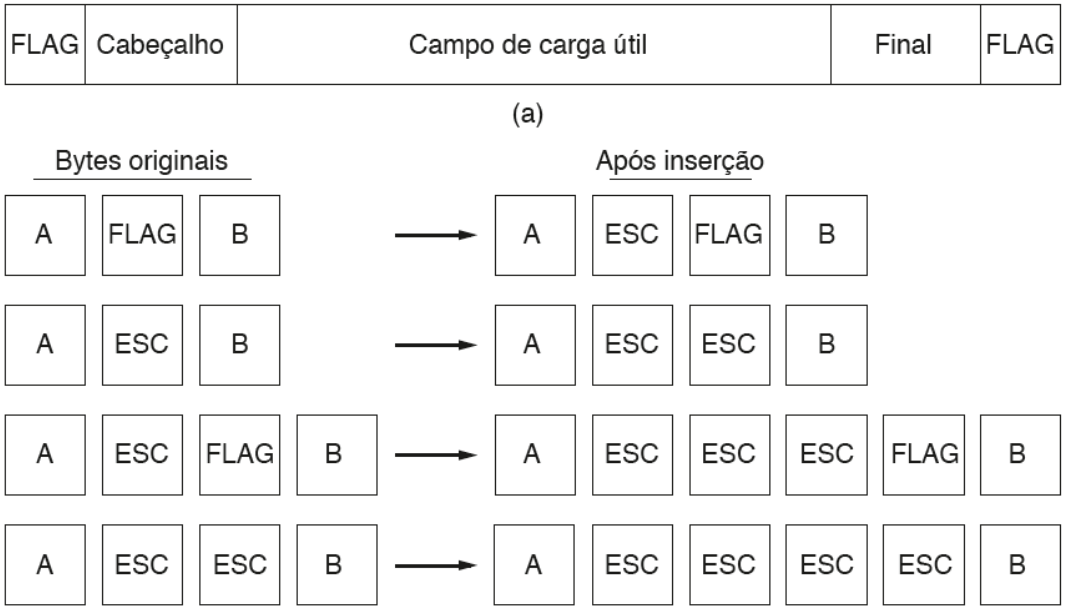
Enquadramento: Bytes de *flags*

- 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*)

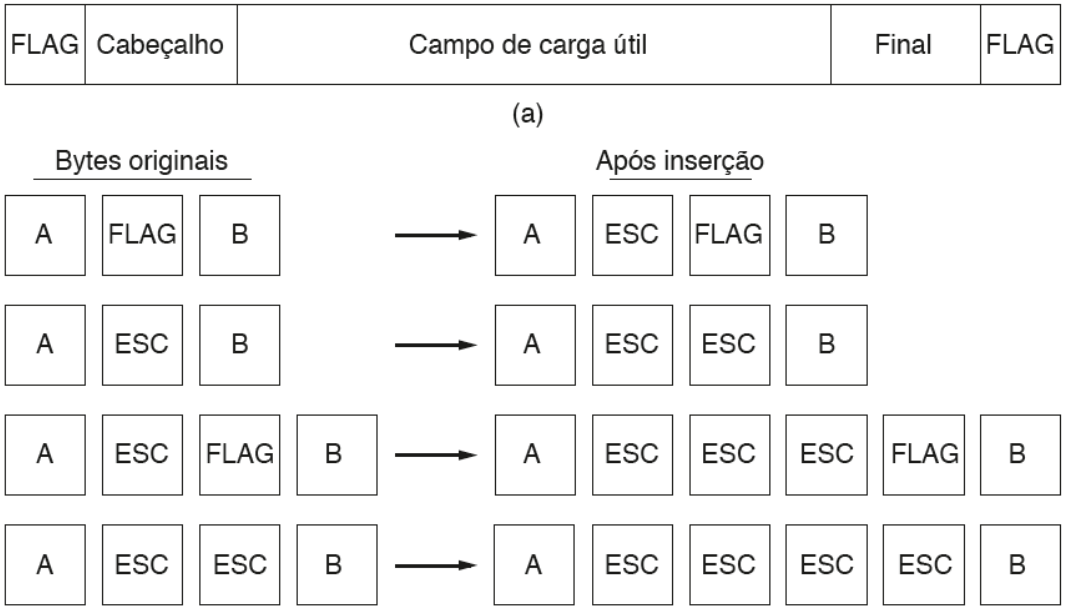
Enquadramento: Bytes de *flags*

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



Enquadramento: Bytes de *flags*

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



Problema: Depende do uso de caracteres de 8 bits

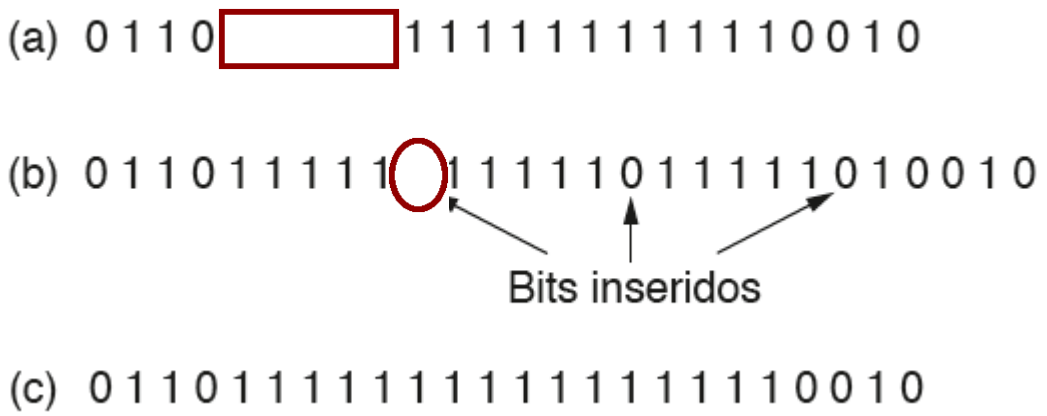
Enquadramento: *Flags* iniciais e finais

- Vantagem
  - Dados podem ter um número arbitrário de bits

- Cada quadro começa e termina com uma sequência padrão de bits
  - Ex.: Delimitador → 01111110 (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)



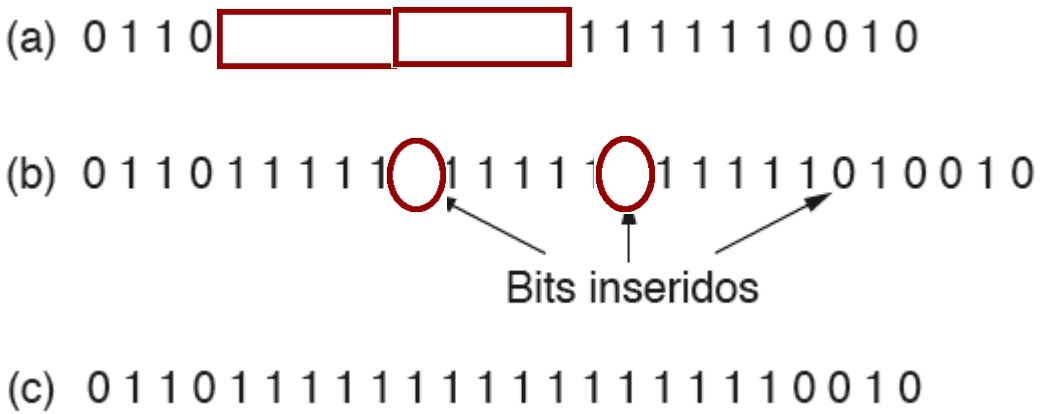
(a) Dados originais

(b) Dados transmitidos

(c) Dados recebidos após a remoção dos bits

Enquadramento: *Flags* iniciais e finais

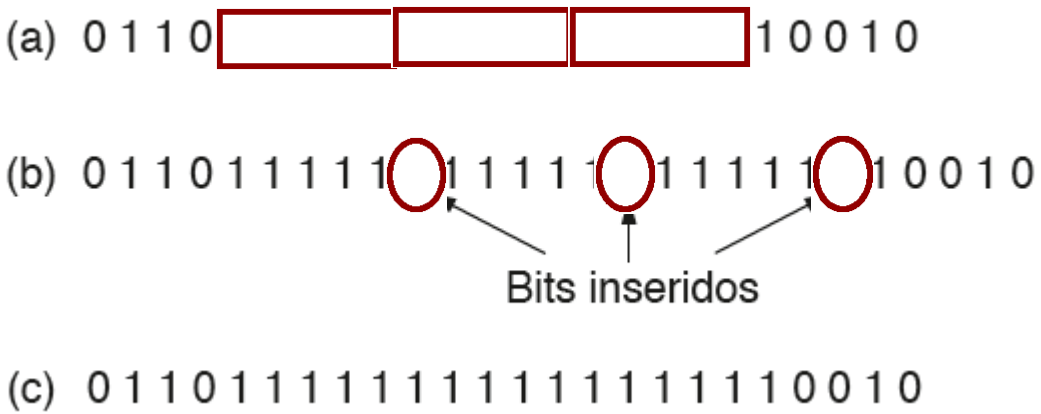
Exemplo de inserção de bits (fonte: Tanenbaum)



(a) 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) 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
    - Hardware é projetado para não causar perdas
      - Placas são capazes de atuar na "velocidade do fio"
    - Problema não é mais da camada de enlace

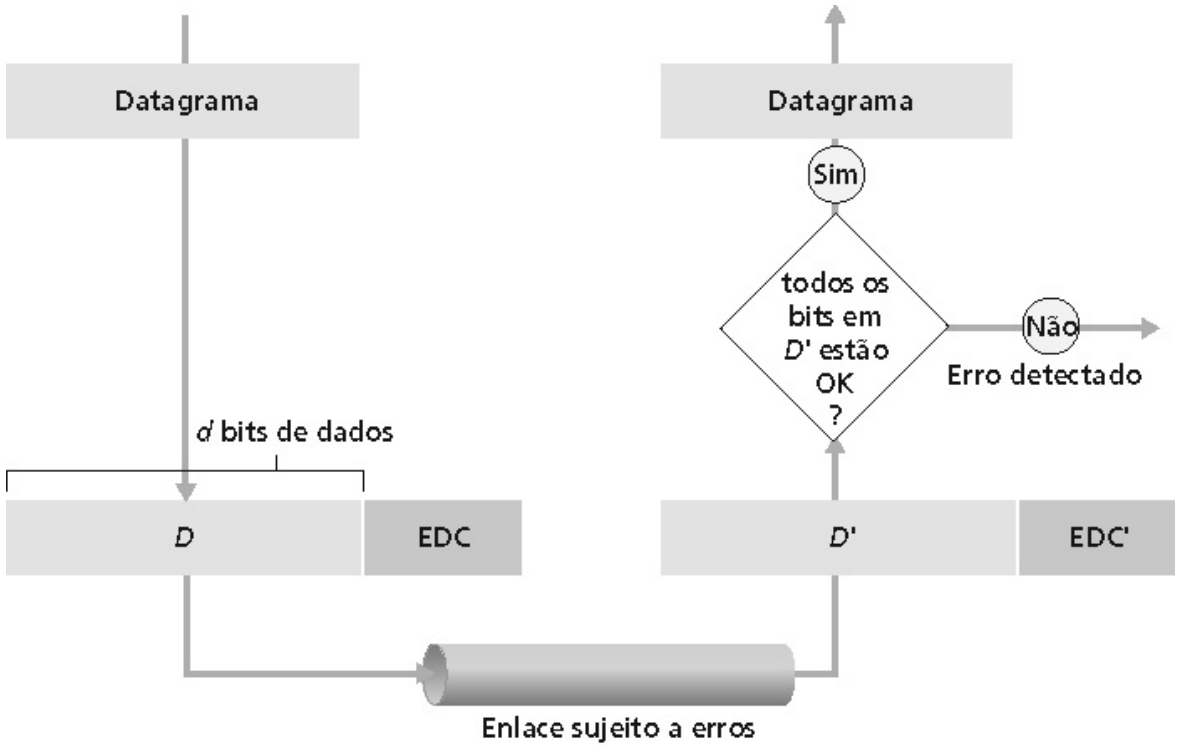
Controle de Erros

- 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

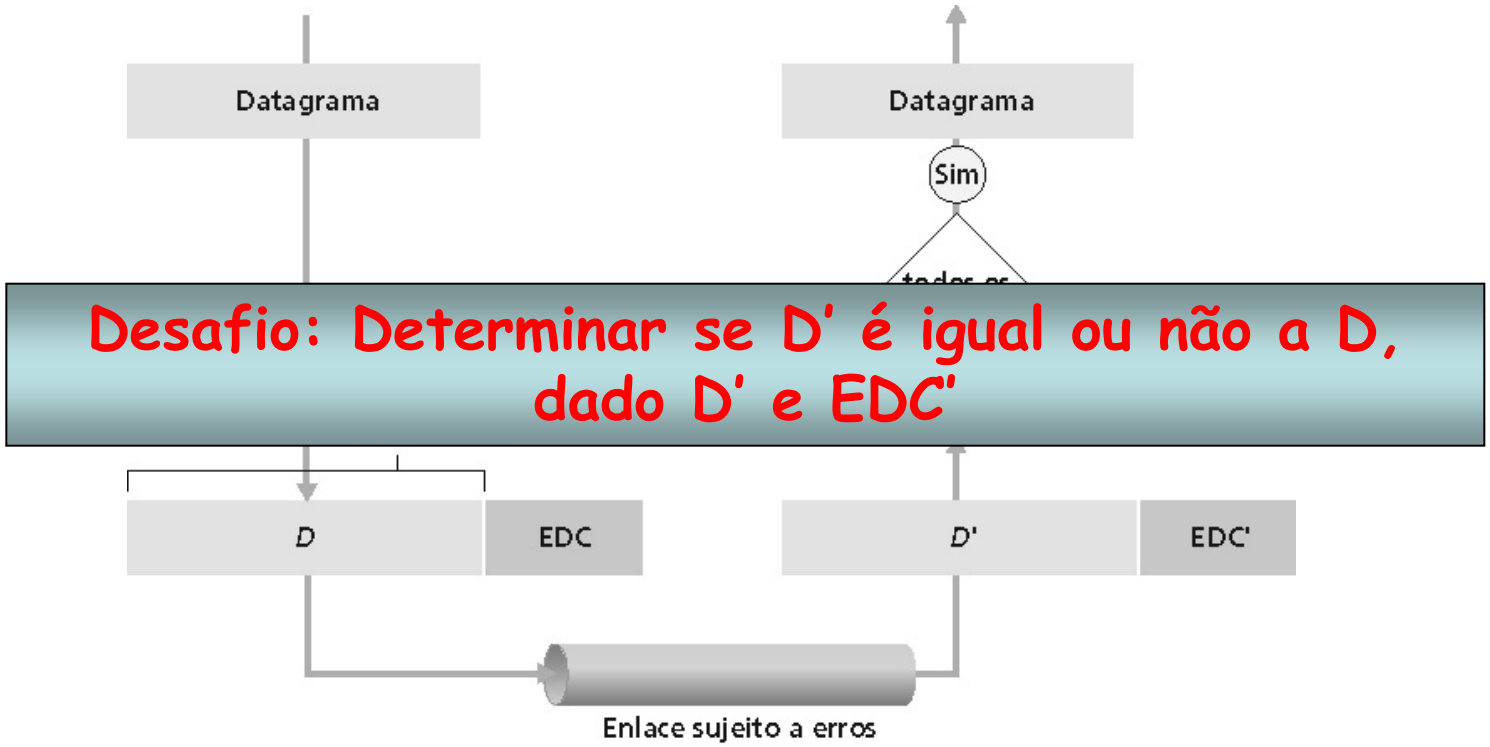
Detecção e Correção de Erros



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 é "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 → $n = m + r$
- 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...
  - Precisa-se 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
    - Depende de como os r bits de redundância são calculados
- 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 → 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 → 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 ($d = 2x + 1 \rightarrow \boldsymbol{x = 2}$)
    - 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 seria corrigido de maneira correta... seria corrigido para 0000011111...

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

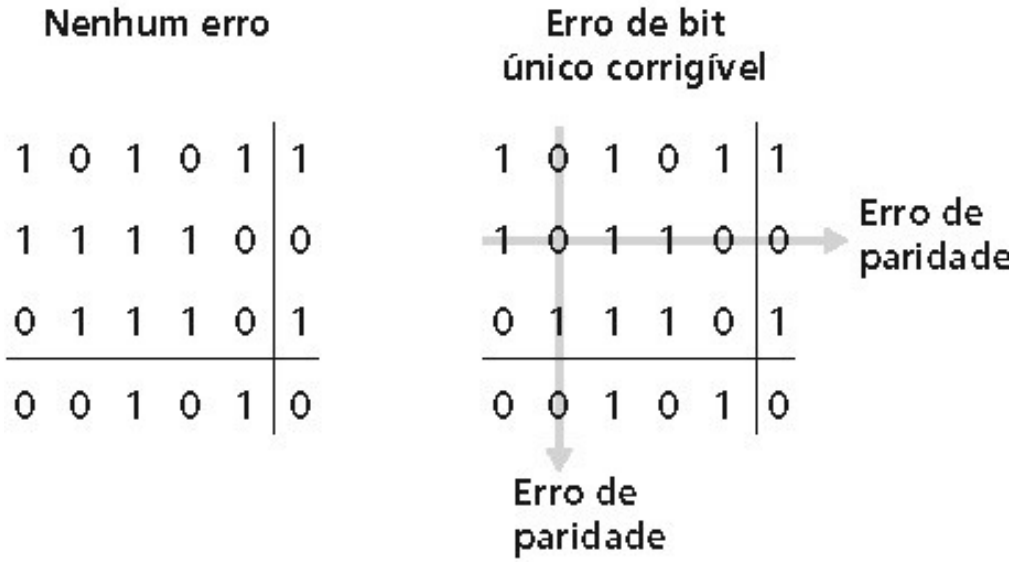
- Exemplo
  - 1011010 enviado com paridade par → 10110100
  - 1011010 enviado com paridade ímpar → 10110101
- Problema: Erros ocorrem geralmente em rajada
  - Paridade com um bit não é suficiente
  - Solução:
    - Aumenta-se o número de bits de paridade

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)



Detecção e Correção de Erros: 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

Detecção e Correção de Erros: 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 → **00**1**1**00**1**0000

Detecção e Correção de Erros: Hamming

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

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

  - 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

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

Detecção e Correção de Erros: Hamming

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

Detecção e Correção de Erros: 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 ≠ 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!
      - O valor de k também indica o bit de verificação, caso ele seja o incorreto...

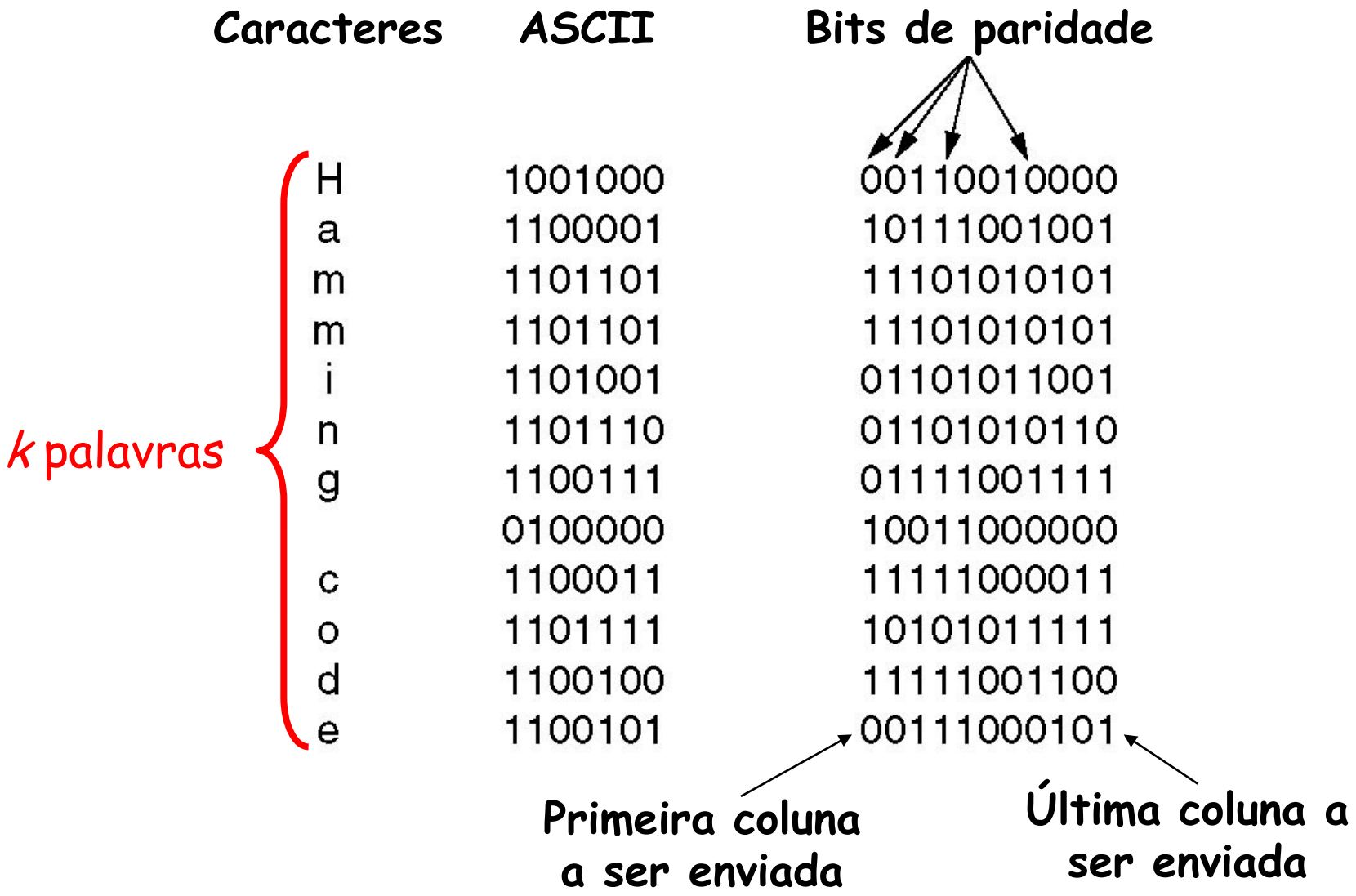
Detecção e Correção de Erros: Hamming

- 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 de uma palavra de código por vez, da esquerda para a direita, transmite-se uma coluna por vez, começando pela coluna mais à esquerda

Detecção e Correção de Erros: 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)



Detecção e Correção de Erros: Soma de Verificação (*checksum*)

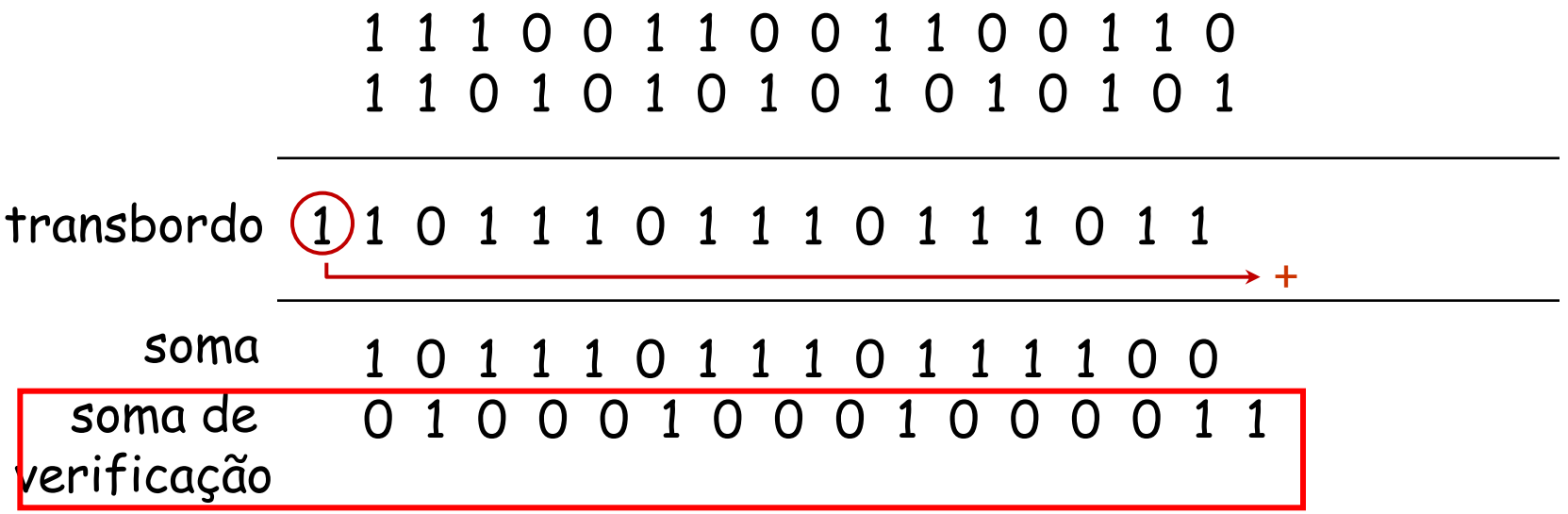
- Método simples
  - Normalmente implementado em *software*
- Bits de dados tratados como uma sequência de números inteiros de *k* bits
- Soma-se esses números inteiros (em complemento a 1) e usa-se o total como bits de detecção de erros

Detecção e Correção 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

Detecção e Correção de Erros: 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



Detecção e Correção de Erros: 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

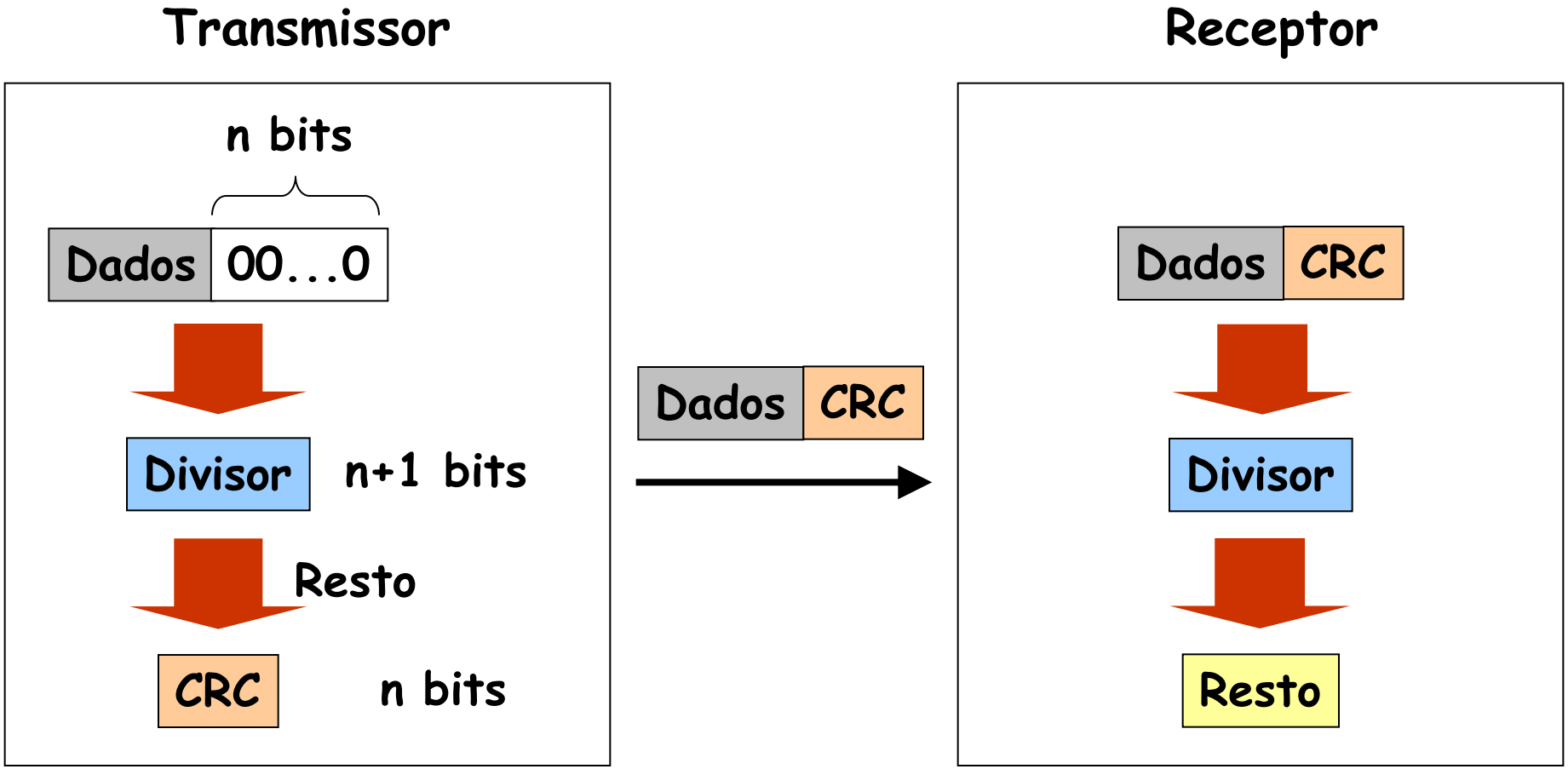
soma + soma de verificação = 1111111111111111 → Correto!

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

Detecção e Correção de Erros: 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

Detecção e Correção de Erros: CRC



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

Detecção e Correção de Erros: CRC

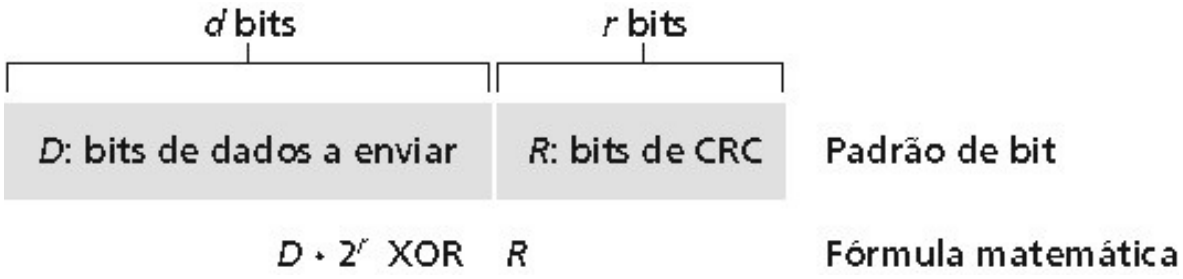
- Quadro de k bits $\rightarrow$ k termos, de x_{k-1} até x_0
  - Polinômio de grau k-1
- Aritmética polinomial feita em módulo 2, sem transportes para adição nem empréstimos para subtração
  - Adição e subtração são idênticas à operação ou-exclusivo

Detecção e Correção de Erros: CRC

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

Detecção e Correção de Erros: CRC

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



Detecção e Correção de Erros: CRC

Queremos:

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

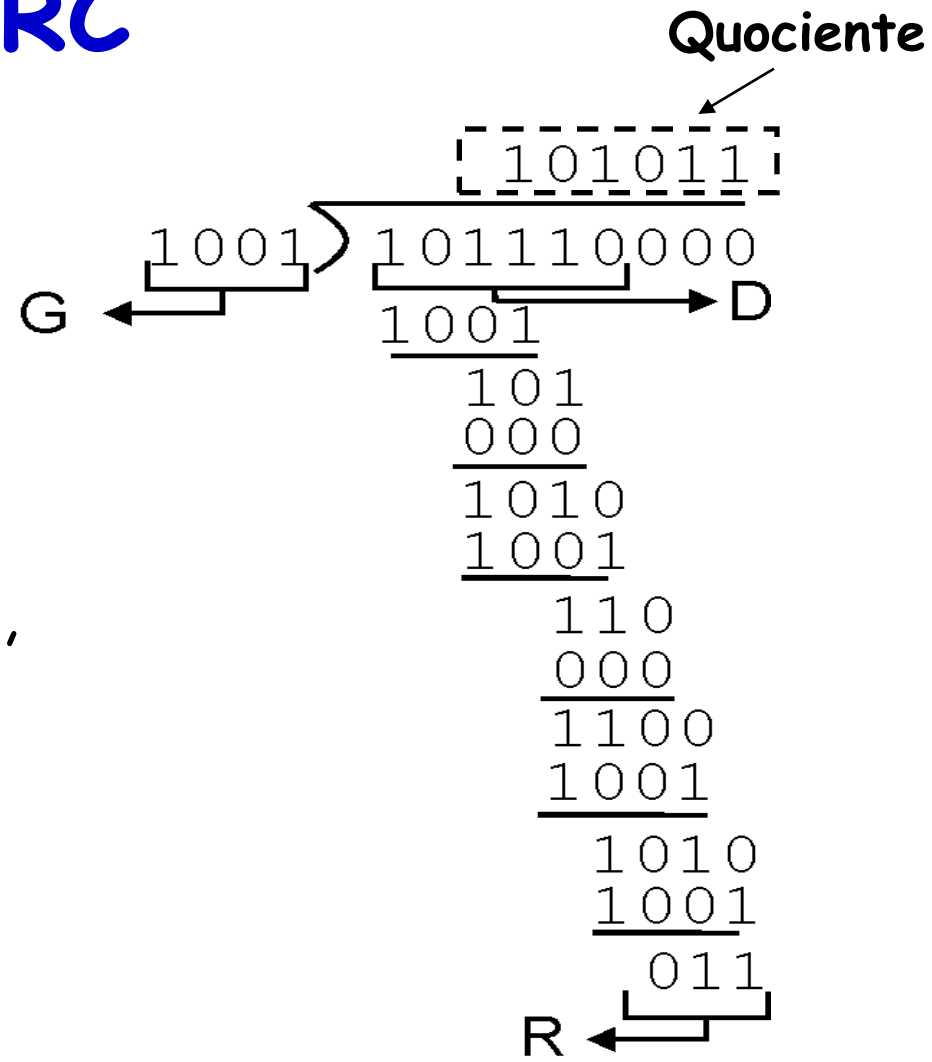
De forma equivalente:

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

de forma equivalente :

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

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



Detecção e Correção de Erros: 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)

Detecção e Correção de Erros: 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!

Detecção e Correção de Erros: CRC

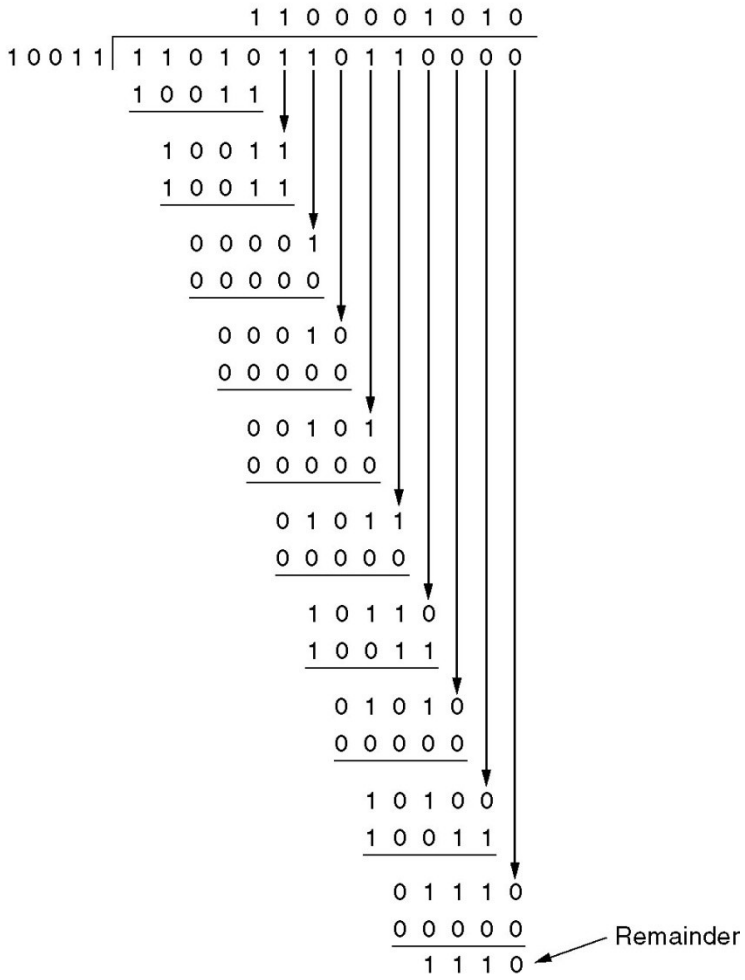
- Algoritmo
  - Seja *r* o grau de G(x)
  - Acrescente *r* bits à extremidade de mais baixa ordem de M(x)
    - Polinômio $x^r M(x)$
  - Divida a sequência de bits correspondente a $x^r M(x)$ pela sequência correspondente por G(x)
  - Subtraia o resto da sequência correspondente a $x^r M(x)$
  - Resultado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

Exemplo de cálculo de CRC (fonte: Tanenbaum)

Frame : 1 1 0 1 0 1 1 0 1 1

Generator: 1 0 0 1 1

Message after 4 zero bits are appended: 1 1 0 1 0 1 1 0 1 1 0 0 0 0



Transmitted frame: 1 1 0 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0

Detecção e Correção de Erros: CRC

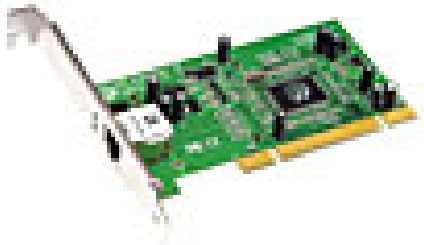
- Usado em diversos padrões de redes locais e metropolitanas
- Exemplo de G(x) do IEEE 802
  - $x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + + x^4 + x^2 + x^1 + 1$
- Receptor divide o quadro com verificação por G(x)
  - Erros que correspondem a polinômios contendo G(x) como fator são ignorados
  - Todos os outros são detectados

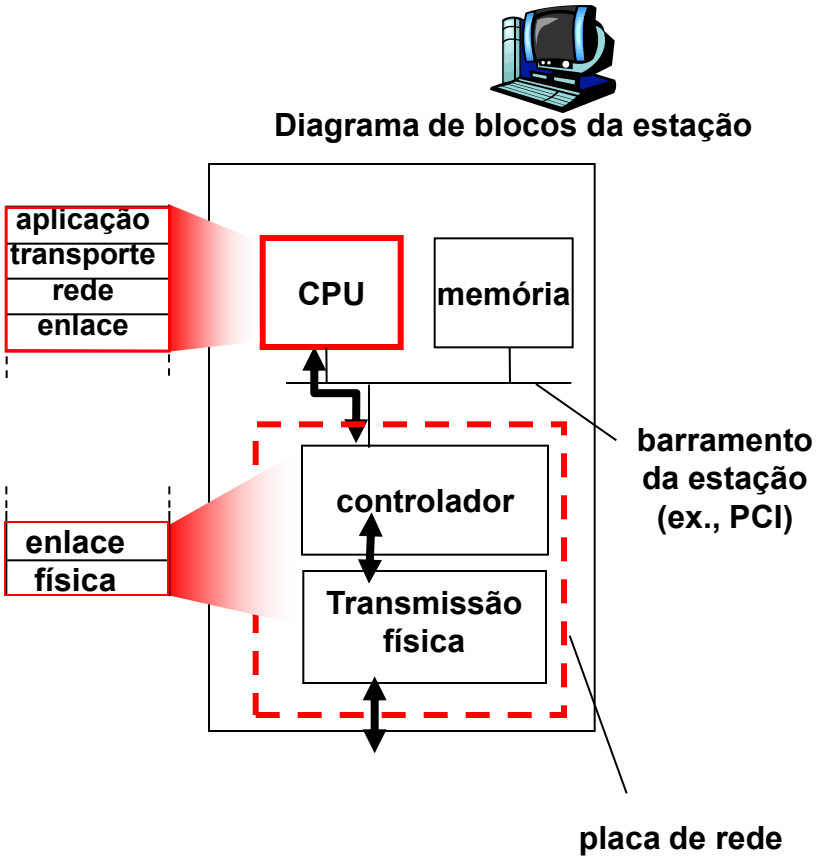
Implementação

Implementação

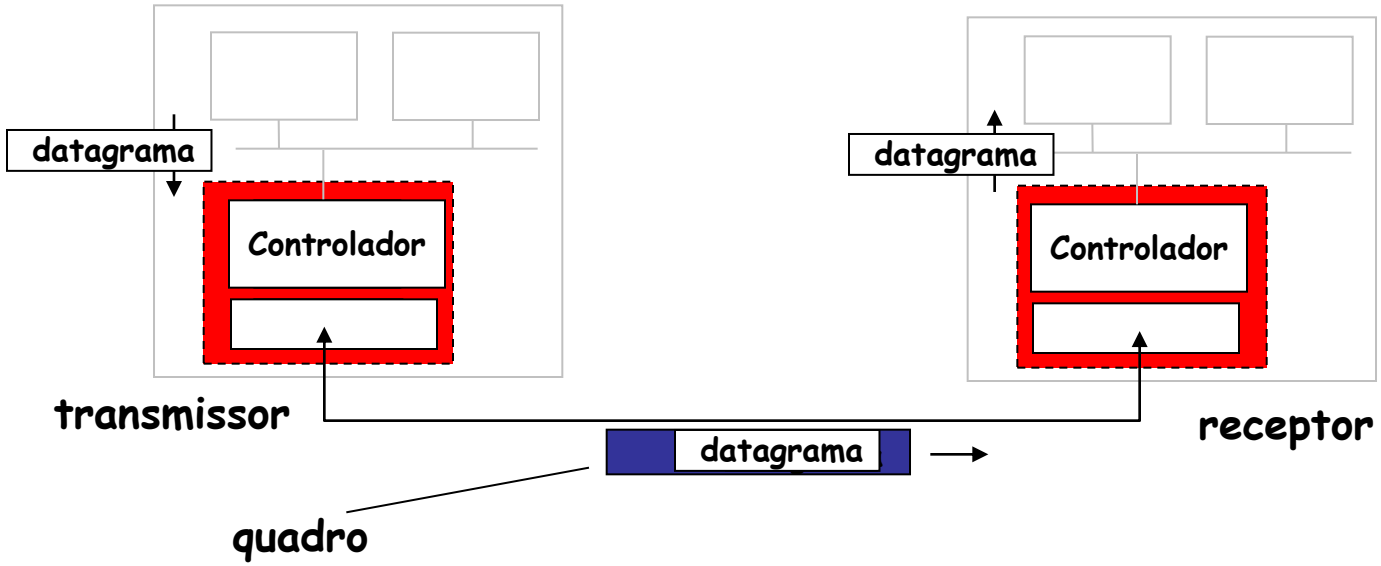
- A camada de enlace é implementada por cada um dos nós da rede
  - Cada um pode implementar uma tecnologia
- É implementada no "adaptador" (*Network Interface Card* - NIC)
  - Exs: placa Ethernet, cartão PCMCIA, cartão 802.11
  - Também implementa a camada física
  - Está conectado ao barramento de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

Implementação





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, passa-o para o nó receptor

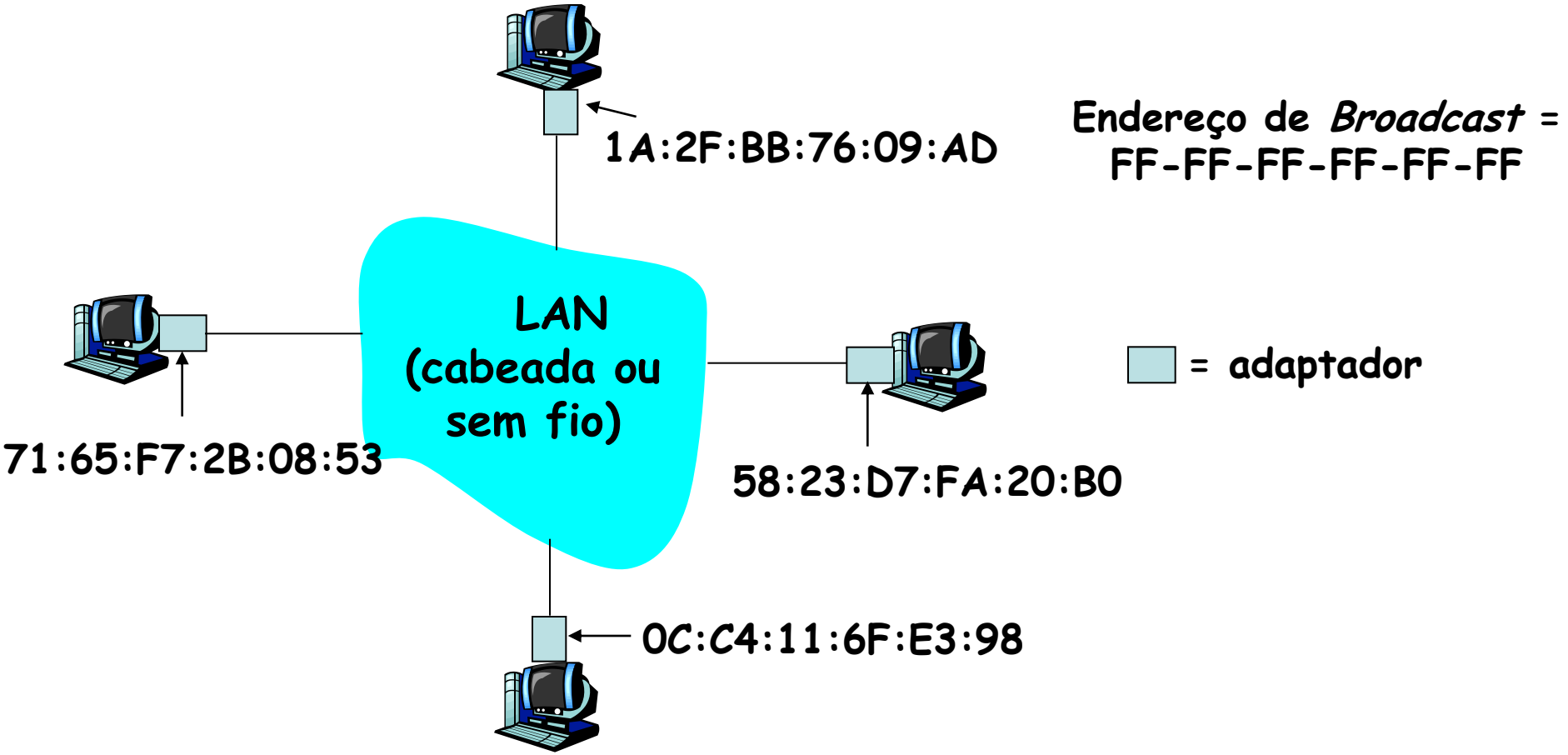
Endereçamento

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

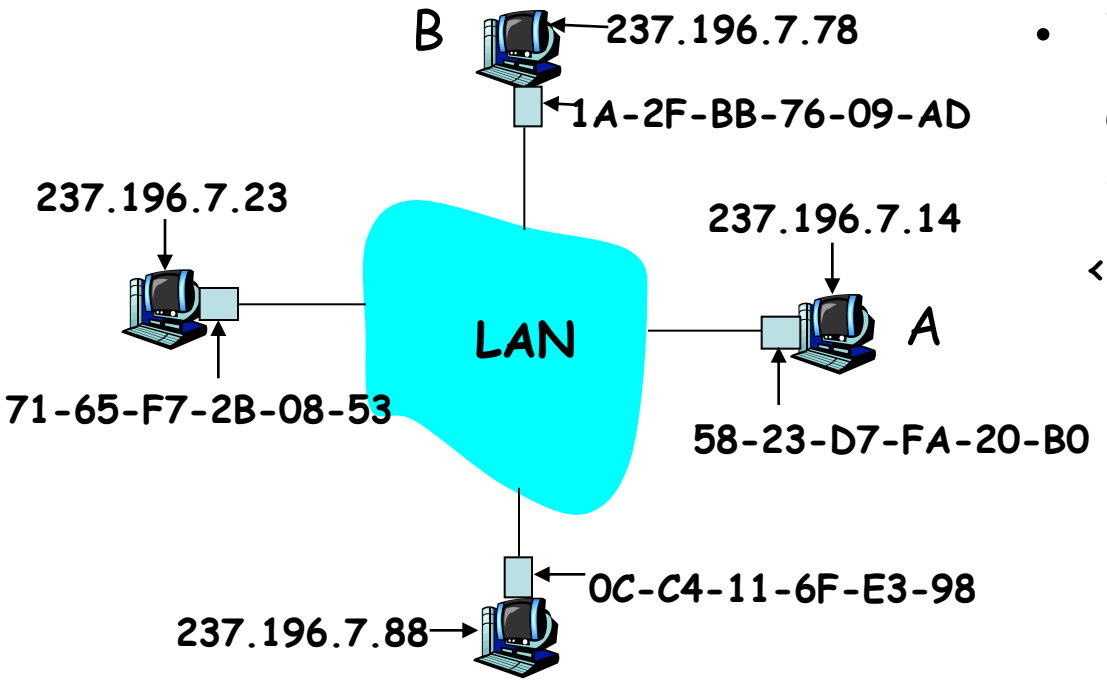
- Endereço MAC tem estrutura linear
  - Portabilidade
    - É possível mover um cartão LAN de uma LAN para outra
- Endereço IP hierárquico **NÃO** é portátil
  - Requer IP móvel, por exemplo
  - Depende da sub-rede IP à qual o nó está conectado

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**

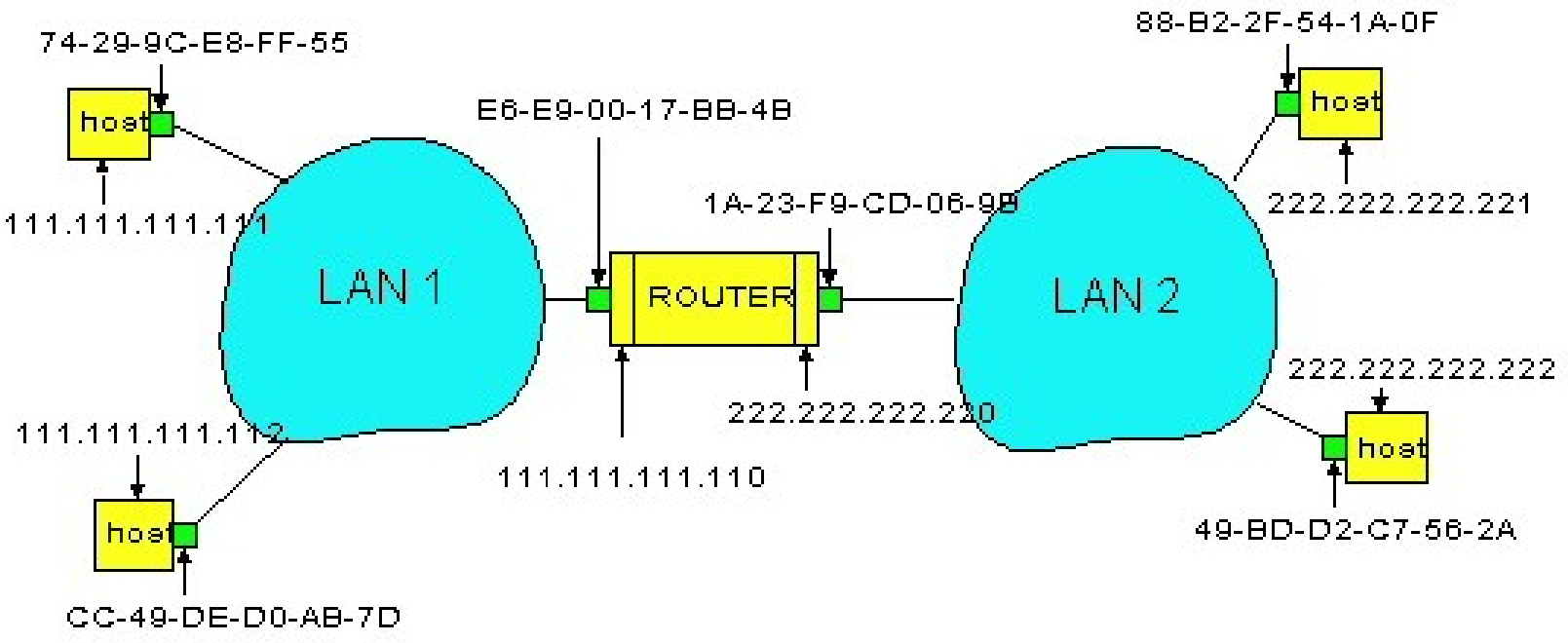
Funcionamento do ARP na Mesma Rede

- 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
  - Conforma (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 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*)

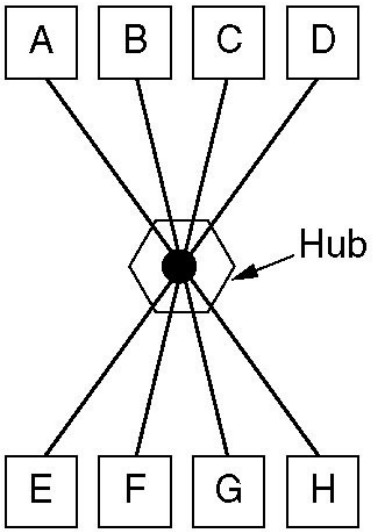
- Usam o endereço MAC de destino para encaminhar e filtrar quadros
- Cada segmento de rede é um domínio de colisão separado
- Pode conectar segmentos diferentes de rede, mesmo que cada uma opere a uma taxa diferente

Comutador (*switch*)

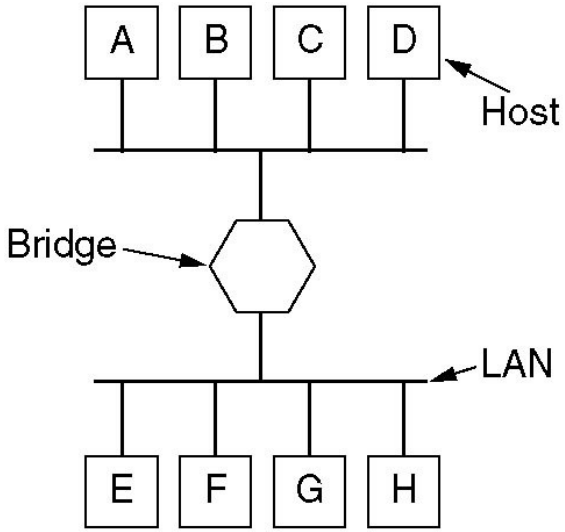
- Pode trabalhar em *full-duplex*
- Comutação de quadros
  - Quadro sempre é expedido pela mesma saída, decidida uma vez por todas quando da aceitação de trocar dados

Elementos de Interconexão

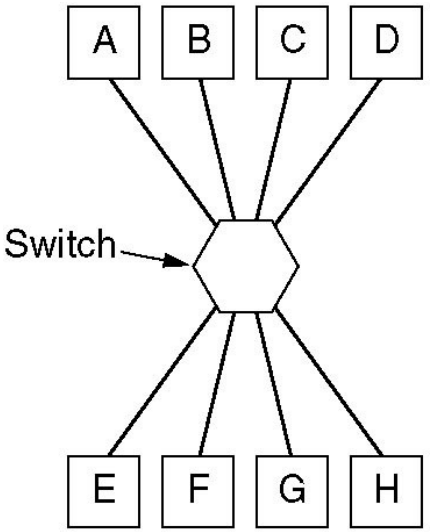
Hub, ponte e comutador (fonte: Tanenbaum)



(a)



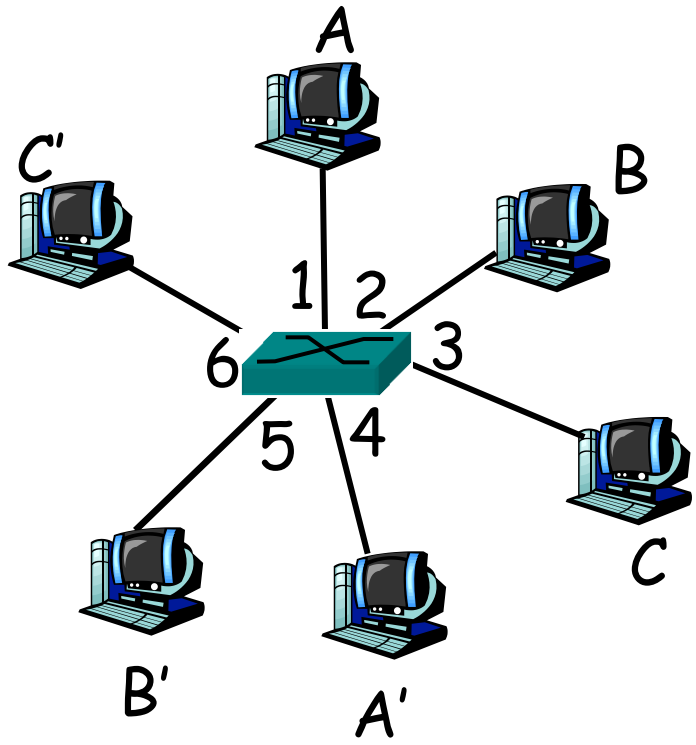
(b)



(c)

Comutador: Múltiplas Transmissões Simultâneas

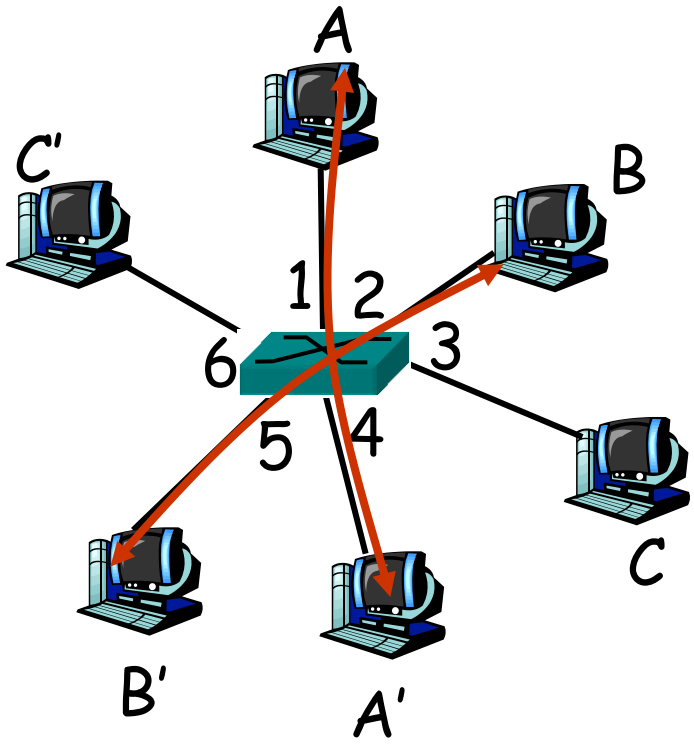
- Estações têm conexão direta e dedicada para o comutador
- Os comutadores armazenam quadros



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

Comutador: Múltiplas Transmissões Simultâneas

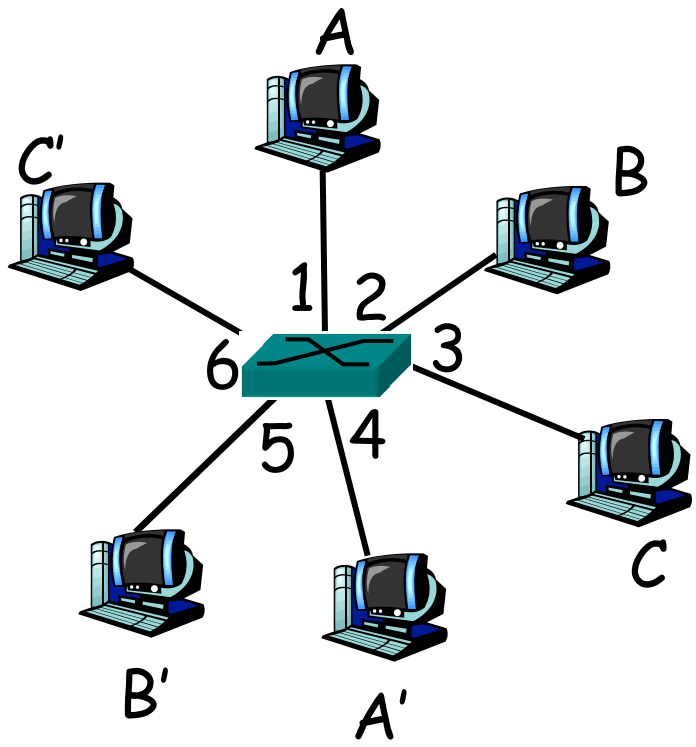
- O protocolo Ethernet é usado em *cada* enlace de entrada, mas não há colisões: *full duplex*
  - Cada enlace é o seu próprio domínio de colisão
- Comutação: A-para-A' e B-para-B' simultaneamente, sem colisões
  - Isto não é possível com hubs



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

Comutador: Tabela de Comutação

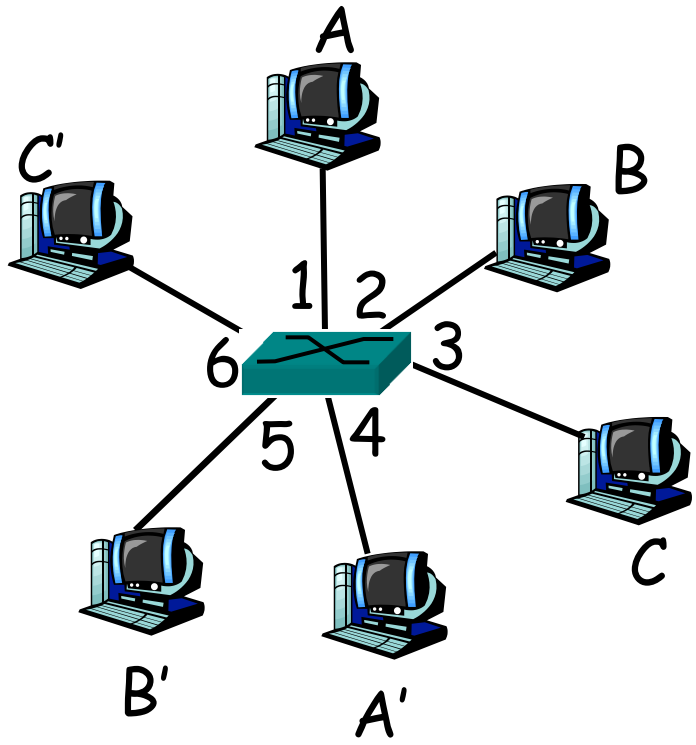
- Como é que o comutador sabe que A' é alcançável através da interface 4, e que B' é alcançável a partir da interface 5?
  - Cada comutador possui uma **tabela de comutação**, cada entrada contém:
    - (endereço MAC da estação, interface para alcançar a estação, carimbo de tempo)
  - Similar a uma tabela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

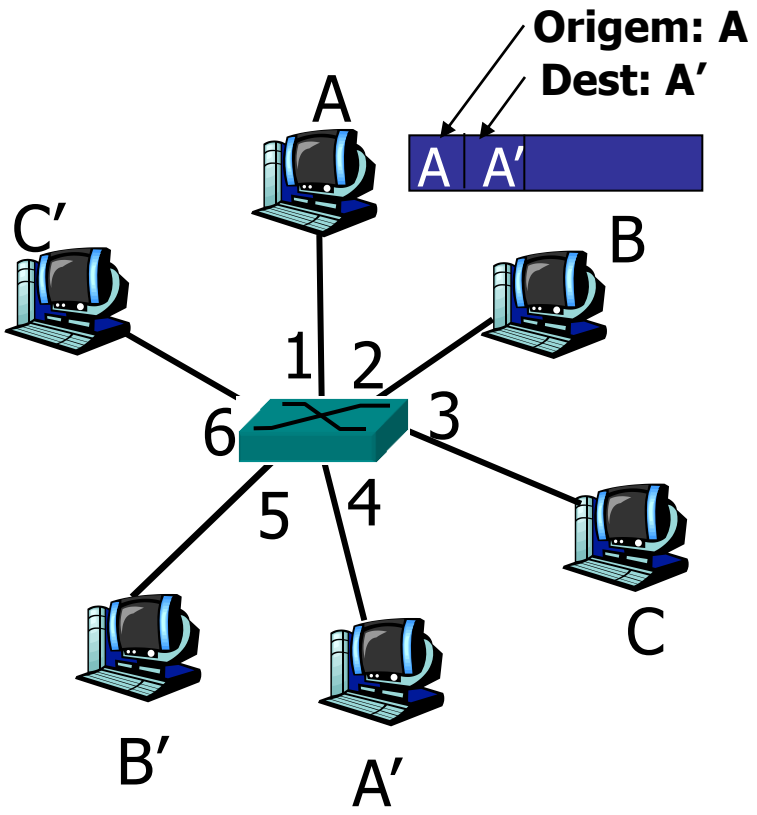


Tabela de comutação (inicialmente vazia)

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

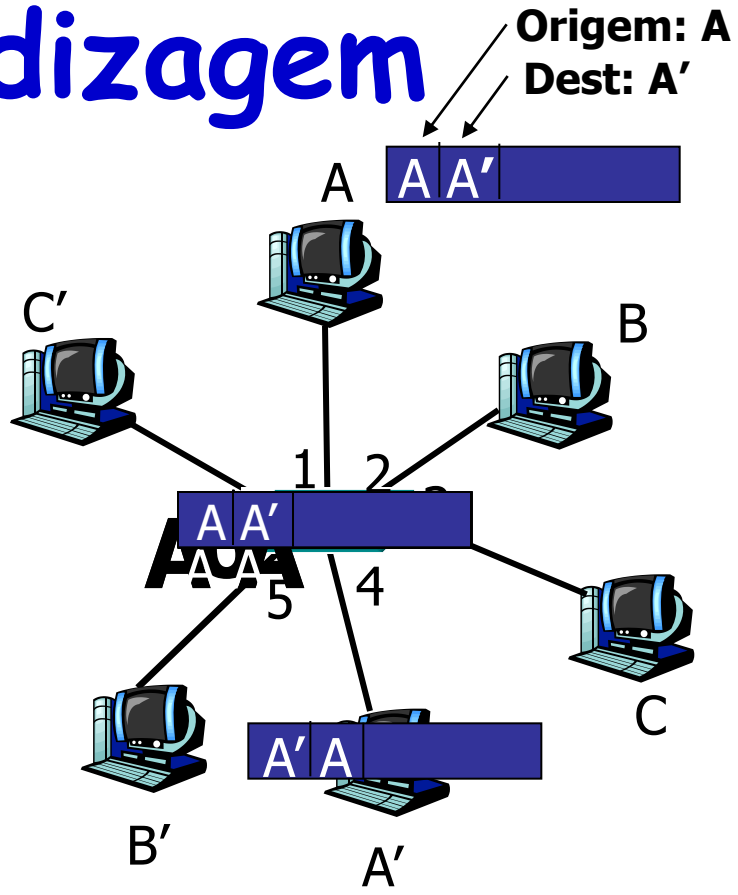
Autoaprendizagem

- Destino do quadro desconhecido:

  inundação

- Local do destino *A* conhecido:

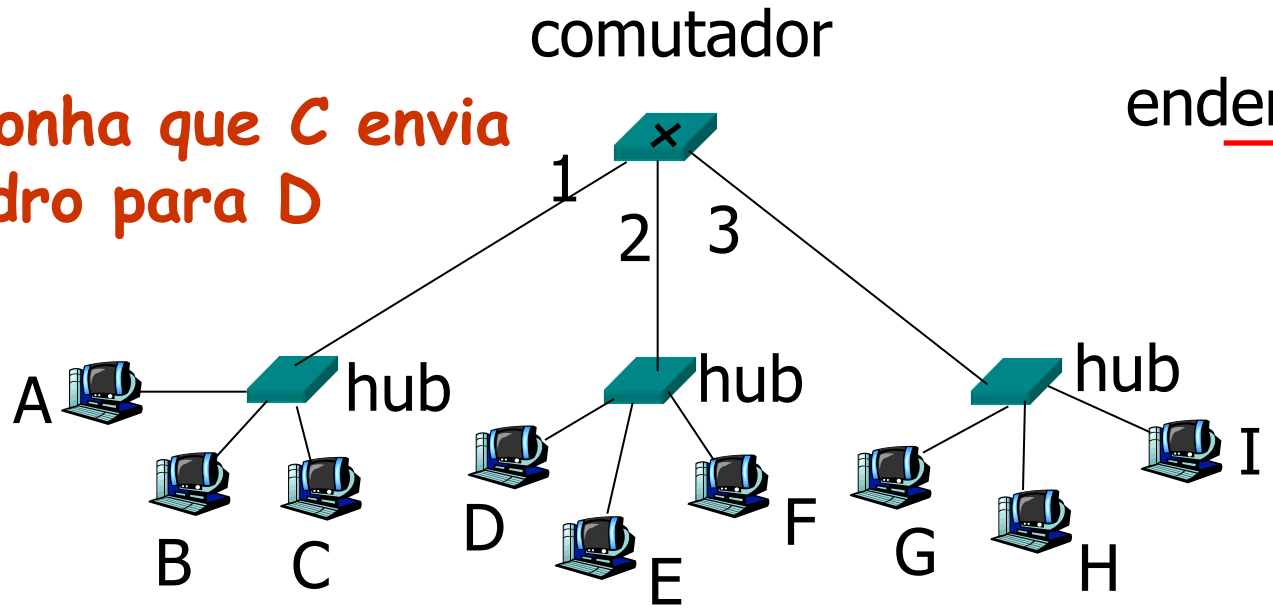
  transmissão seletiva



end MAC	interface	TTL
A	1	60
A'	4	60

Tabela de comutação (inicialmente vazia)

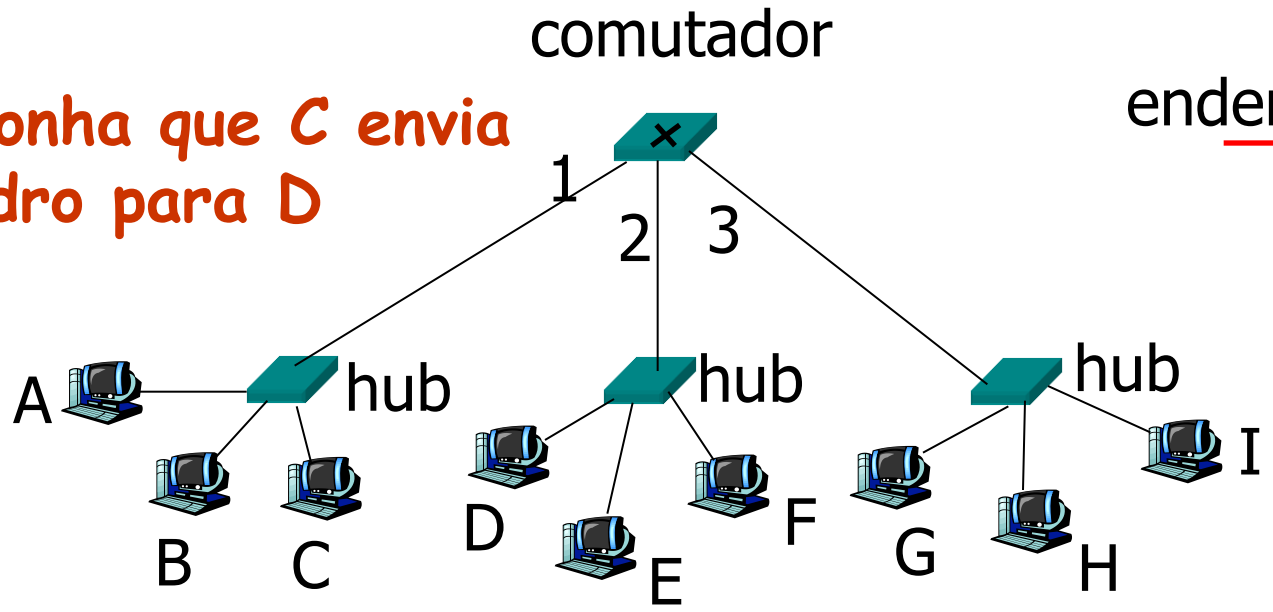
Exemplo com Comutador



endereço	interface
A	1
B	1
E	2
G	3

- 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**

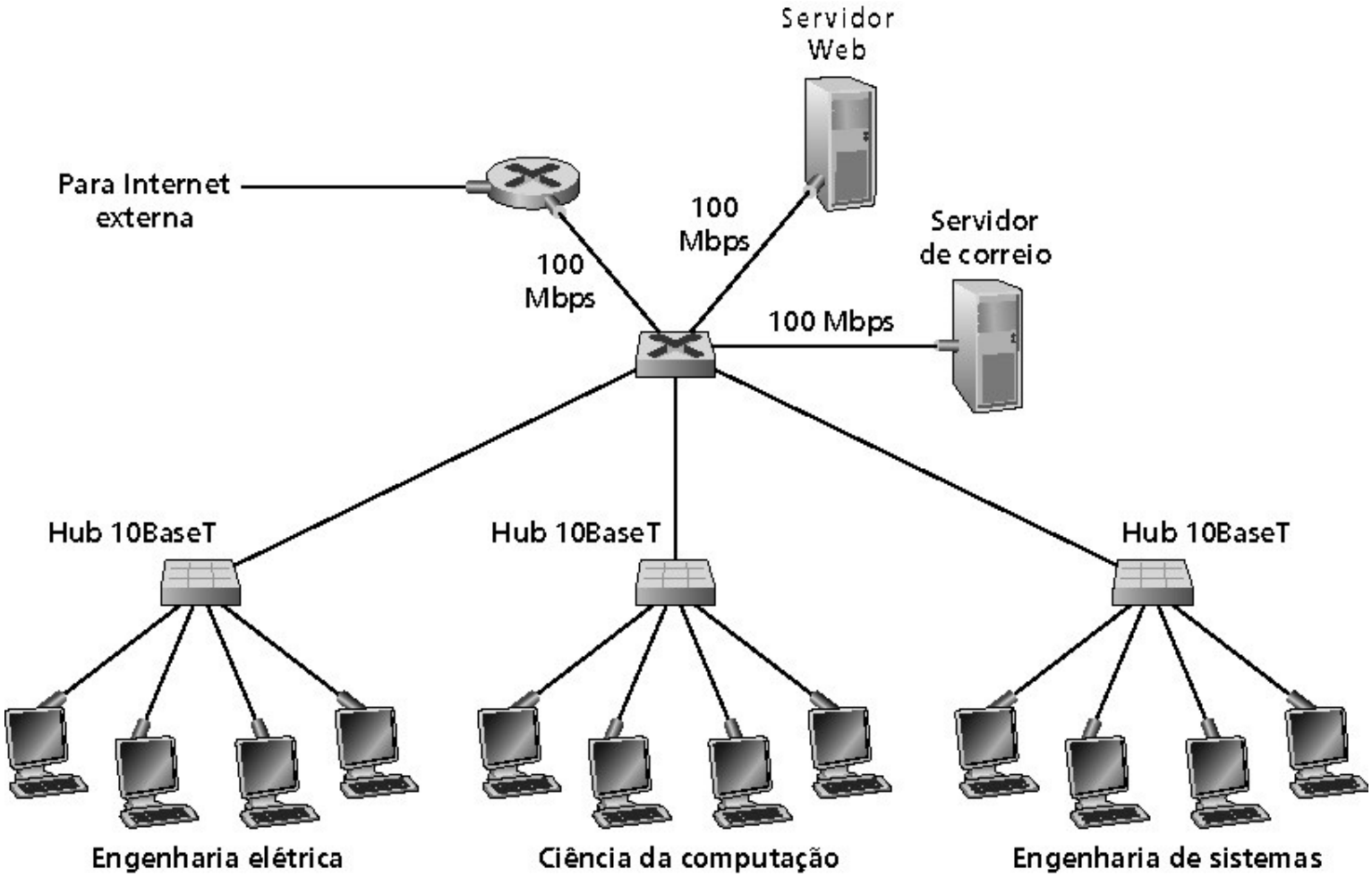
Exemplo com Comutador



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



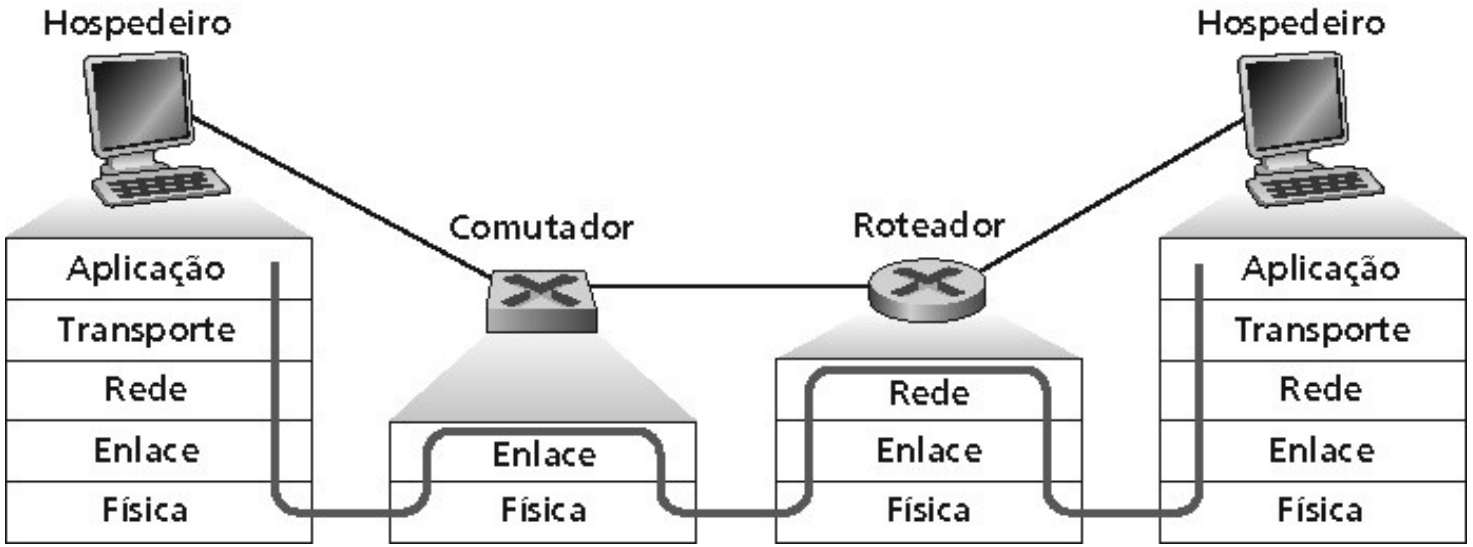
Roteador

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

Comutadores x Roteadores

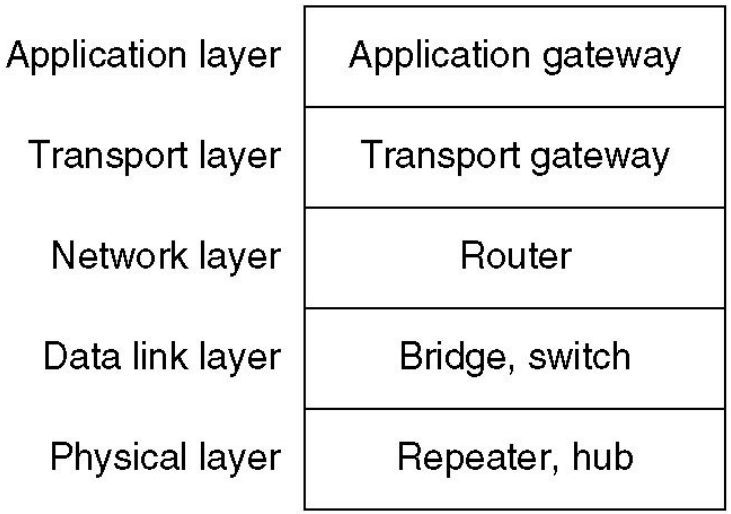
- Ambos são dispositivos do tipo armazena-e-repassa
  - Roteadores → dispositivos da camada de rede
    - Examinam os cabeçalhos dessa camada
  - Comutadores → dispositivos da camada de enlace
- Roteadores
  - Mantêm tabelas de roteamento, implementam algoritmos de roteamento
- Comutadores
  - Mantêm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

Comutadores x Roteadores

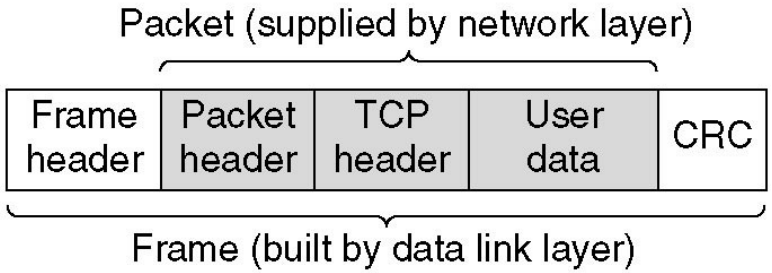


Elementos de Interconexão

Elementos (fonte: Tanenbaum)



(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