

Redes de Computadores 1

Prof. Miguel Elias Mitre Campista

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

Parte IV

Camada de Enlace: Protocolos de Comunicação

Camada de Enlace

- Relembrando...
 - 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

- Por que a lembrança dos tipos de canal é importante?
- O tipo de canal teria alguma influência sobre o protocolo de comunicação?

A resposta é SIM!

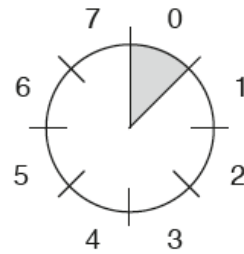
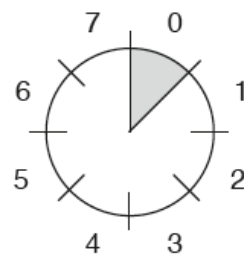
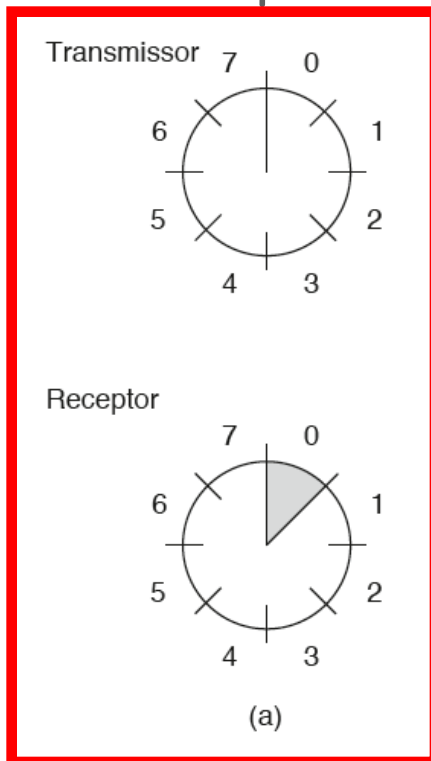
Principalmente em um canal de difusão, o acesso ao meio precisa ser controlado.

Protocolos de Janela Deslizante

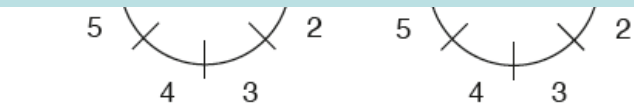
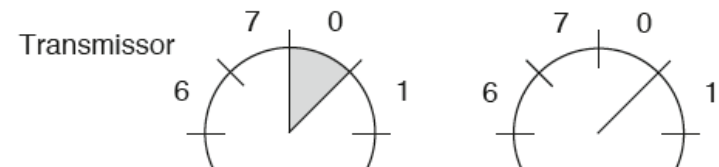
- Enviam quadros identificados por números de sequência
 - Pode variar de 0 até um valor máximo
 - Valor máximo = $2^n - 1$, onde n é o número de bits
- Transmissores mantêm um conjunto de números de sequência relacionados a quadros que ele pode enviar
 - Quadros pertencem à janela de transmissão
- Receptores também mantêm um conjunto de números de sequência relacionados a quadros que pode aceitar
 - Quadros pertencem à janela de recepção

Protocolos de Janela Deslizante

- Conjunto de números de sequência é alterado à medida que:
 - Transmissores recebem os reconhecimentos positivos
 - Receptores recebem quadros



(b)



(c)

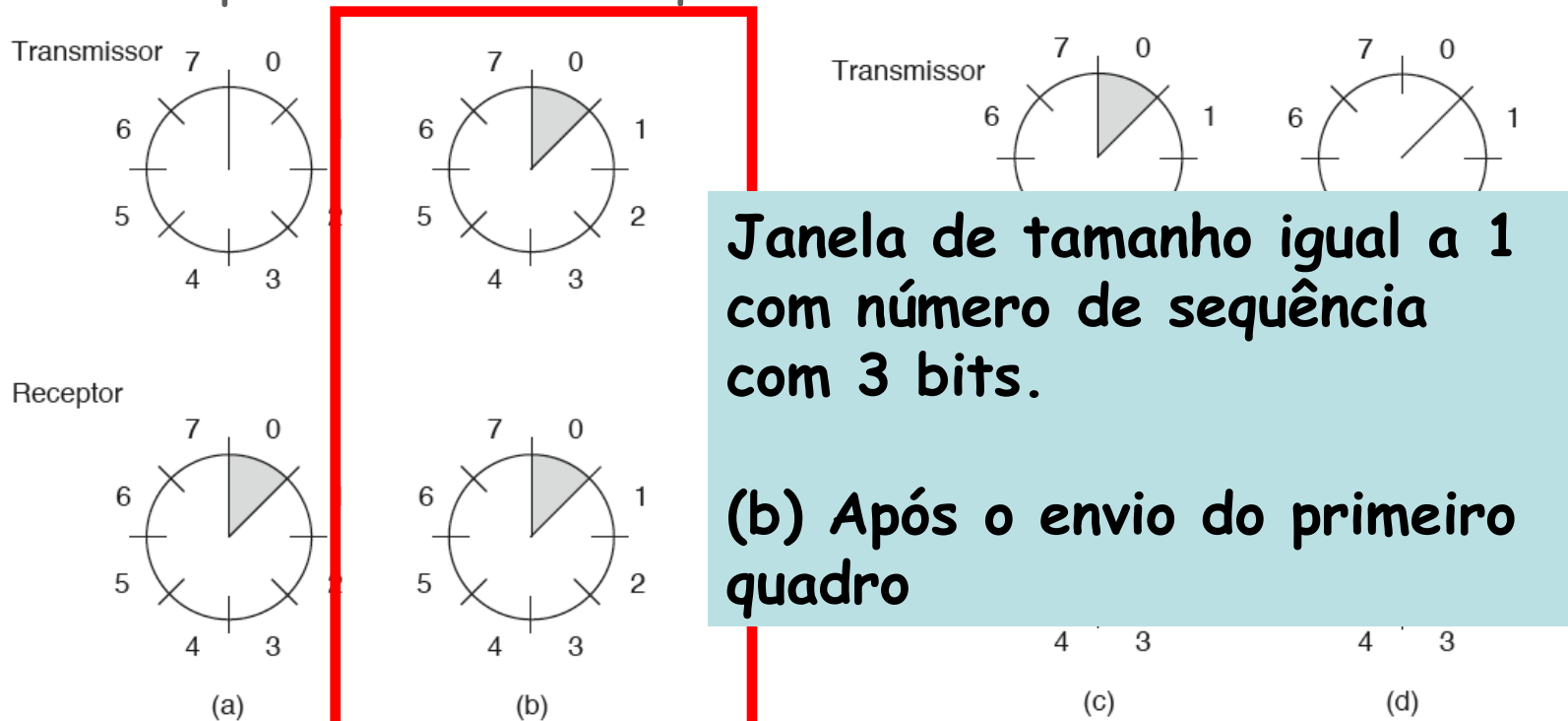
(d)

Janela de tamanho igual a 1 com número de sequência com 3 bits.

(a) Situação inicial

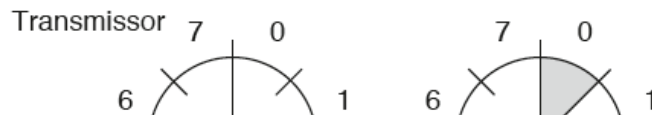
Protocolos de Janela Deslizante

- Conjunto de números de sequência é alterado à medida que:
 - Transmissores recebem os reconhecimentos positivos
 - Receptores recebem quadros



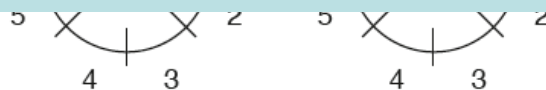
Protocolos de Janela Deslizante

- Conjunto de números de sequência é alterado à medida que:
 - Transmissores recebem os reconhecimentos positivos
 - Receptores recebem quadros



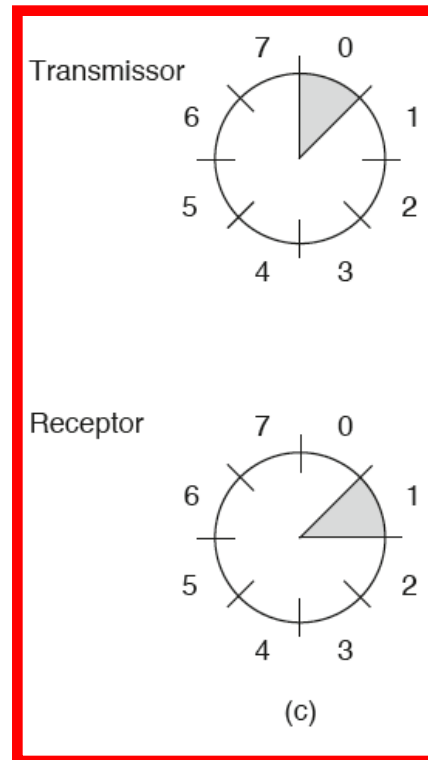
Janela de tamanho igual a 1 com número de sequência com 3 bits.

(c) Após receber o primeiro quadro



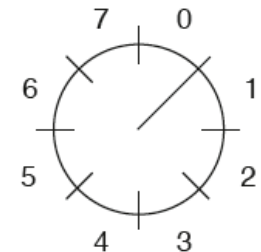
(a)

(b)



Receptor

(c)



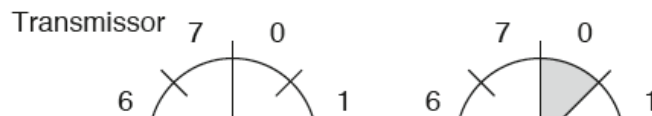
(d)

Protocolos de Janela Deslizante

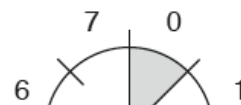
- Conjunto de números de sequência é alterado à medida que:
 - Transmissores recebem os reconhecimentos positivos
 - Receptores recebem quadros

Janela de tamanho igual a 1 com número de sequência com 3 bits.

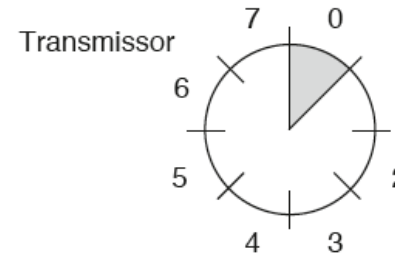
(d) Após receber o primeiro reconhecimento



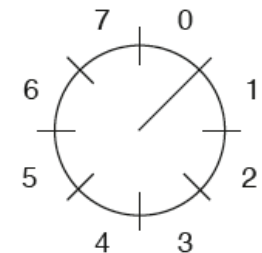
(a)



(b)



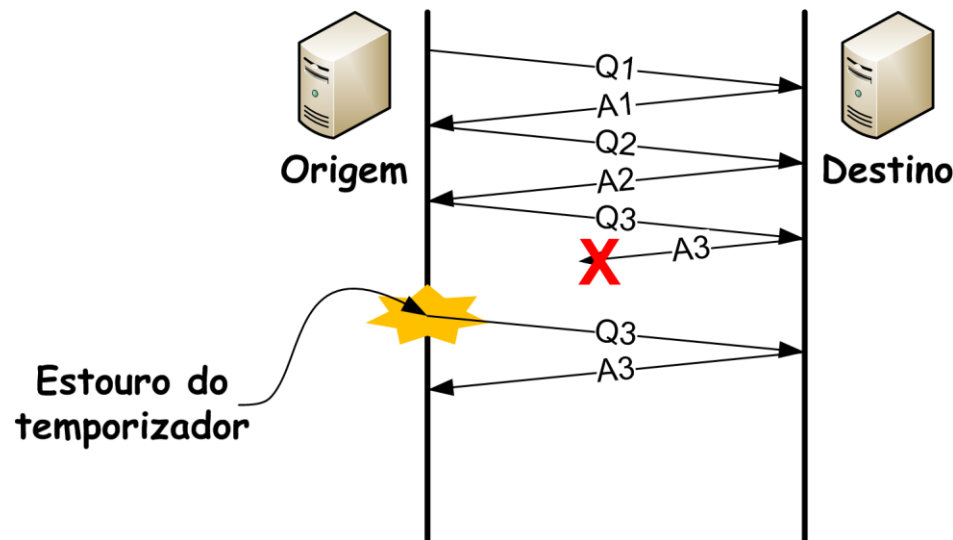
(c)



(d)

Tipos de Protocolos

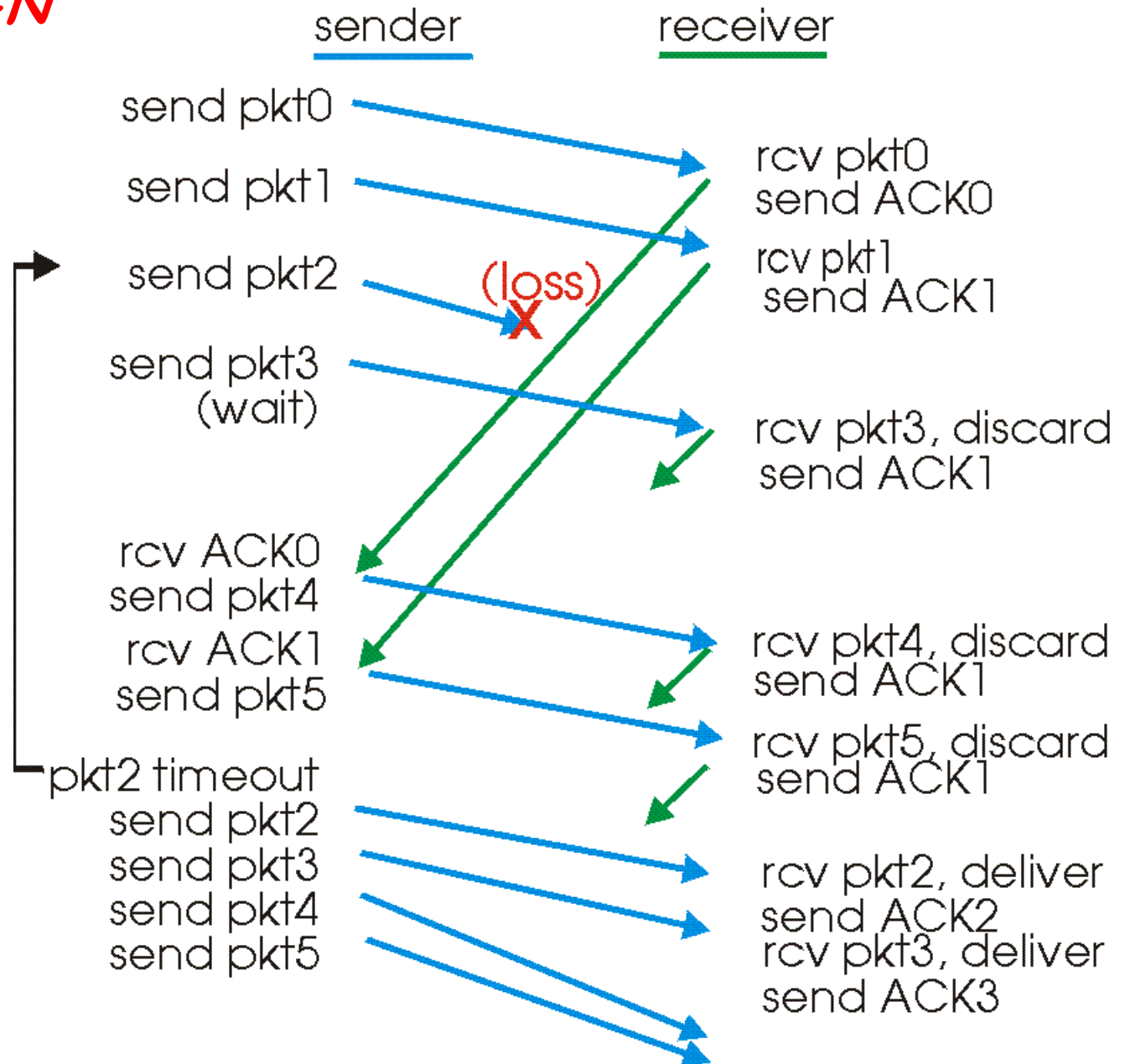
- Pare e Espere (*Stop-and-Wait*)
 - Transmissor só pode enviar um quadro por vez
 - Janela de transmissão e de recepção são iguais a 1
 - Próximo quadro só pode ser transmitido após a recepção do reconhecimento positivo (ACK) do atual



Tipos de Protocolos

- *Go Back N*
 - Transmissor pode enviar até N pacotes não reconhecidos ("em trânsito")
 - Janelas de transmissão e de recepção são iguais a N
 - Receptor envia apenas ACKs cumulativos
 - Não reconhece pacote se houver falha de sequência
 - Transmissor possui um temporizador para o pacote mais antigo ainda não reconhecido
 - Se o temporizador estourar, retransmite todos os pacotes ainda não reconhecidos

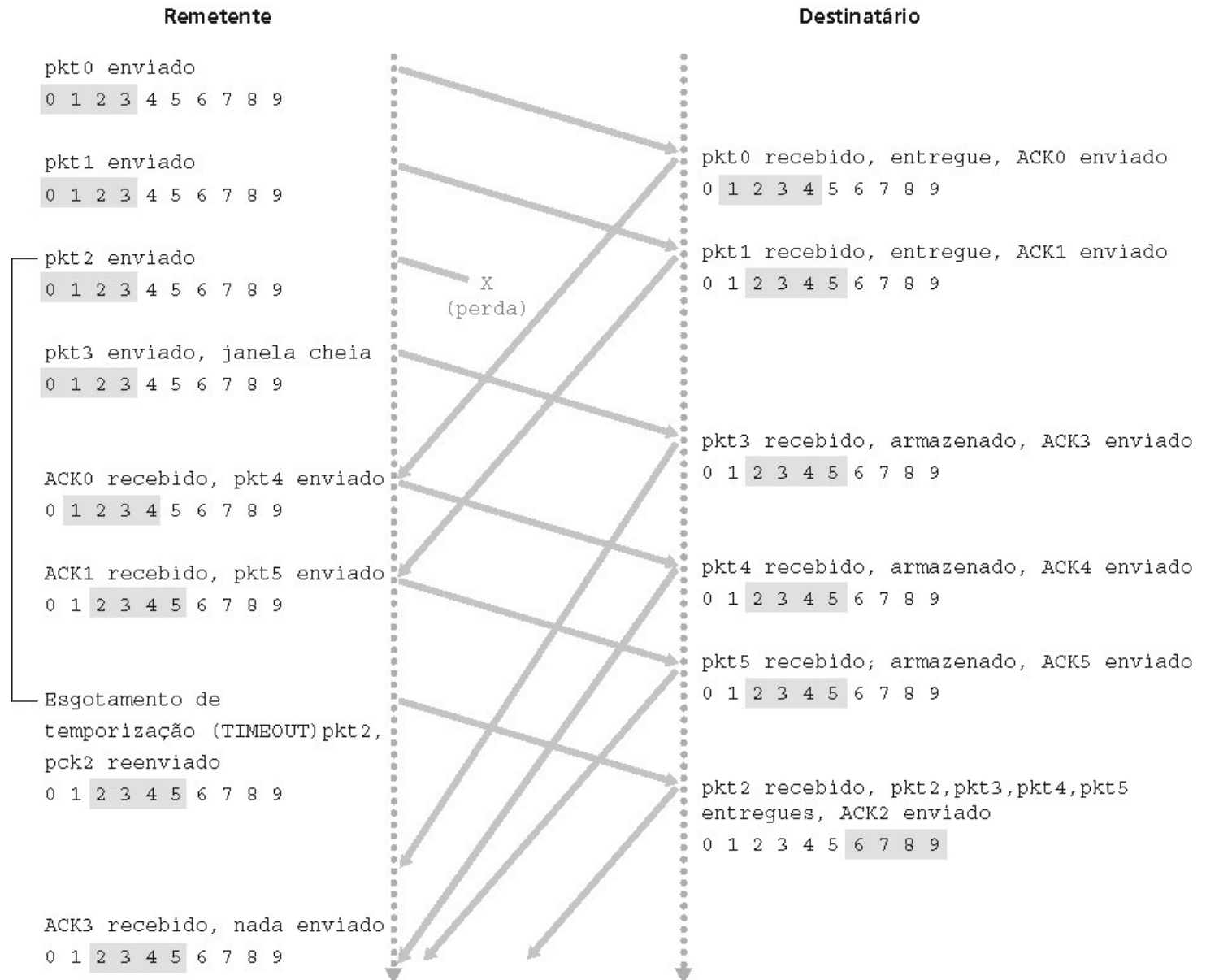
Go-Back-N



Tipos de Protocolos

- Retransmissão Seletiva
 - Receptor reconhece individualmente todos os pacotes recebidos corretamente
 - Armazena pacotes no buffer, conforme necessário, para posterior entrega ordenada à camada superior
 - Transmissor apenas reenvia pacotes para os quais um ACK não foi recebido
 - Temporizador no remetente para cada pacote sem ACK
 - Janela de transmissão
 - N números de sequência consecutivos
 - Outra vez limita números de sequência de pacotes enviados, mas ainda não reconhecidos

Retransmissão Seletiva



Protocolos de Camada de Enlace: Canal Ponto-a-Ponto

Controle de Enlace de Dados Ponto-a-Ponto

- Canal ponto-a-ponto
 - Um transmissor, um receptor, um canal
 - Mais fácil que um canal de difusão
 - Sem controle de acesso ao meio (MAC)
 - Sem necessidade de endereçamento MAC explícito
 - Entretanto, precisa de enquadramento, controle de fluxo, detecção e correção de erro etc.
 - Ex.: canal discado, canal ISDN/RDSI
- Protocolos: HDLC e PPP

HDLC

- Controle de enlace de dados de alto nível (*High-level Data Link Control*)
 - Enquadramento e detecção de erros
 - Usado no X.25
- Orientado a conexão
- Orientado a bits
 - Não se preocupam com o número de bytes do quadro

HDLC

- Usa a técnica de inserção de bits
 - Evita que sequências de delimitação de quadros apareçam no campo de informação
- Usa um protocolo de janela deslizante do tipo *Go-Back-N* ou Retransmissão Seletiva
 - Semelhante aos mecanismos do TCP

HDLC: Formato do Quadro

- *Flags* inicial e final: Sequência 01111110
- Endereço
- Controle
 - Números de sequência, confirmações, outros
- Dados
 - Sem limite de tamanho
- Verificação
 - Variação do CRC



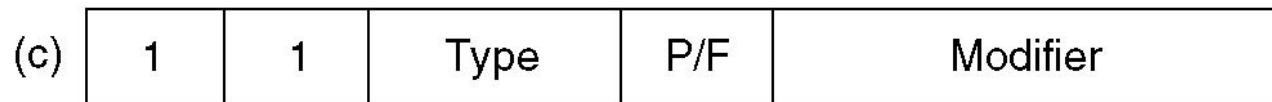
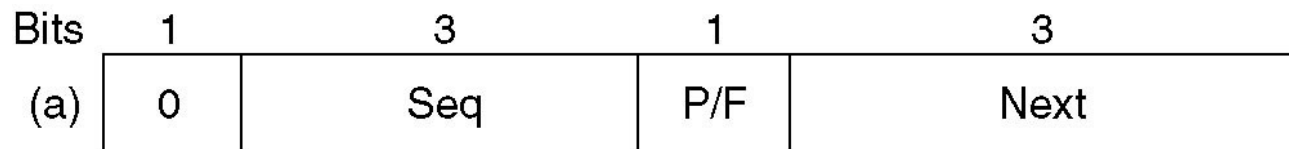
Fonte: Tanenbaum

HDLC: Tipos de Quadros

- Três tipos
 - Informação
 - Dados
 - Supervisor
 - Controle de fluxo ou de erro, quando não é possível fazer piggyback no quadro de dados
 - Não-numerado
 - Vários propósitos, inclusive para envio de dados ou controle
- Tipos de quadros se diferenciam no campo controle

HDLC: Tipos de Quadros

Campos de controle dos diferentes tipos de quadros (fonte: Tanenbaum)



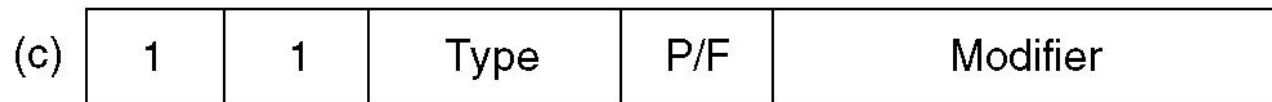
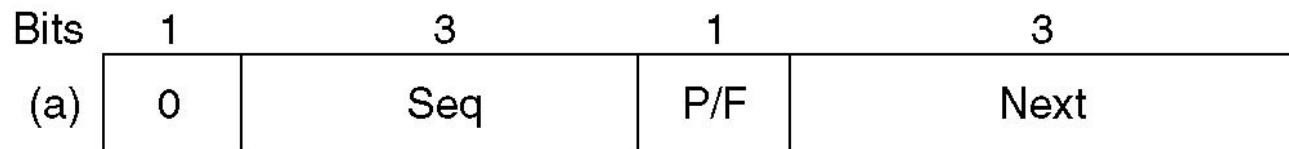
(a) Informação

(b) Supervisor

(c) Não-numerado

HDLC: Tipos de Quadros

Campos de controle dos diferentes tipos de quadros (fonte: Tanenbaum)



(a) Informação

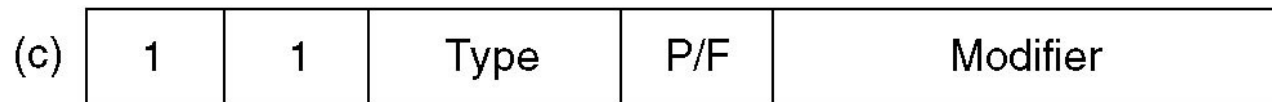
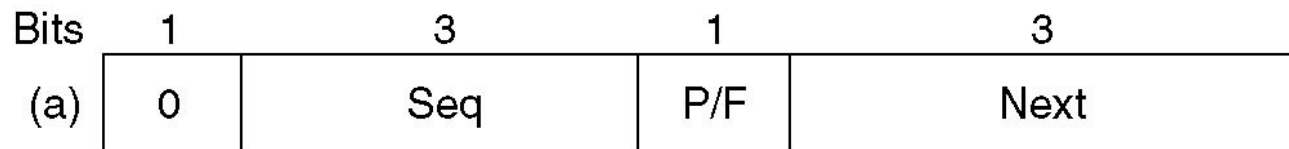
(b) Supervisor

(c) Não-numerado

Poll/Final: Poll é usado quando uma estação quer receber uma resposta de outra e o Final é usado para indicar uma resposta ou um final de transmissão

HDLC: Tipos de Quadros

Campos de controle dos diferentes tipos de quadros (fonte: Tanenbaum)



(a) Informação

(b) Supervisor

(c) Não-numerado

Seq: é o número de sequência do quadro

Next: indica o próximo quadro esperado

Type/Modifier: indicam o tipo do quadro

PPP

- Protocolo Ponto-a-Ponto (*Point-to-Point Protocol*)
- Protocolo de enlace usado em linhas ponto-a-ponto na Internet
 - Mais simples que o HDLC
 - Orientado a caracteres e não a bits como o HDLC
 - Usado frequentemente em:
 - Conexões de linhas privadas entre roteadores
 - Conexões de acesso entre estações de usuários domiciliares e roteadores
- Definido nas RFCs 1661 a 1663 e em outros

PPP

- Usa a técnica de inserção de bytes de *flags* em linhas de discagem por modem
 - PPP pode usar linhas SONET, linhas HDLC orientadas a bits, circuitos RDSI e outros
- Possui dois modos de transmissão
 - Não confiável
 - Sem números de sequência e confirmações
 - Confiável
 - Raramente usado

PPP

- Possui três funções principais
 1. Enquadramento e detecção de erros
 2. Ativação, teste, negociação e desativação de linhas
 - Através do protocolo de controle de enlace (*Link Control Protocol - LCP*)
 - Ex.: negociação da taxa de transmissão, tamanho máximo da carga útil
 3. Negociação de opções da camada rede independente do protocolo de rede utilizado
 - Através do protocolo de controle de rede (*Network Control Protocol - NCP*)
 - Ex.: definição de endereços IP

PPP: Requisitos do Projeto

- Detecção de erro
- Vida da conexão
 - Detecta, indica falhas do enlace para a camada de rede
- Negociação do endereço da camada de rede
 - Pontos terminais podem aprender/configurar o endereço de rede do outro

PPP: Requisitos do Projeto

- Enquadramento do pacote
 - Encapsula datagramas da camada de rede em quadro da camada de enlace
 - Transporta dados da camada de rede de qualquer protocolo de camada de rede (não apenas do IP), simultaneamente
- Transparência
 - Transporta qualquer padrão de bits no campo de dados
- Múltiplos protocolos de rede e tipos de enlace

PPP: Requisitos do Projeto

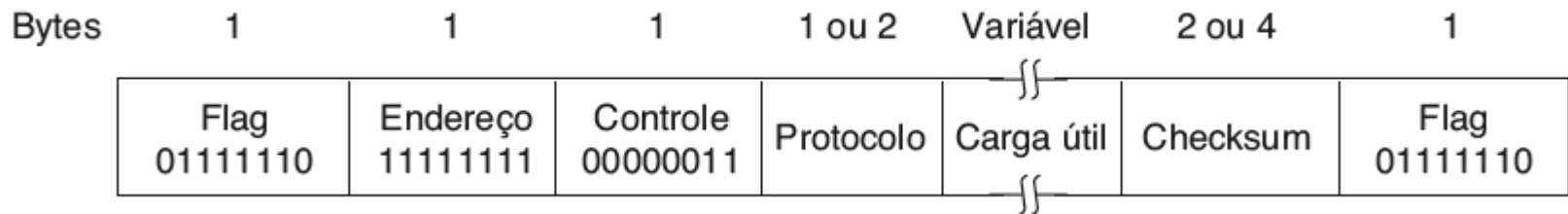
- Ser o mais simples possível
 - Não faz correção/recuperação de erros
 - Sem controle de fluxo
 - Sem controle de sequenciamento
 - Sem necessidade de dar suporte a canais de difusão

Recuperação de erros, controle de fluxo e reordenamento dos dados foram deixados para camadas superiores...

PPP: Formato do Quadro

- *Flags* inicial e final: Sequência 01111110
- Endereço
 - O único valor é o 11111111
 - Todas as estações aceitam esse endereço
- Controle
 - Para quadros não numerados é 00000011

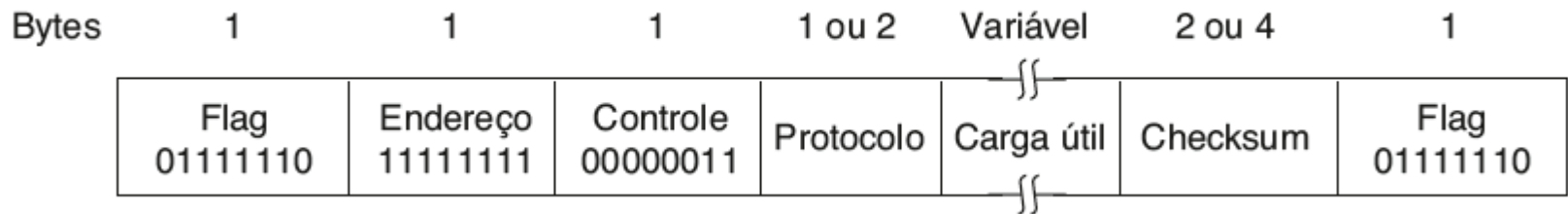
Foram
incluídos para
futuros
valores
diferentes



Fonte: Tanenbaum

PPP: Formato do Quadro

- Protocolo
 - Tipo de pacote da carga útil (ex., o protocolo IP)
- Carga útil
 - Possui um tamanho máximo negociado (LCP)
 - Padrão é 1500 octetos
 - Byte de escape é 01111101 (problema da sequência do *flag* no meio do quadro)
- Verificação: CRC

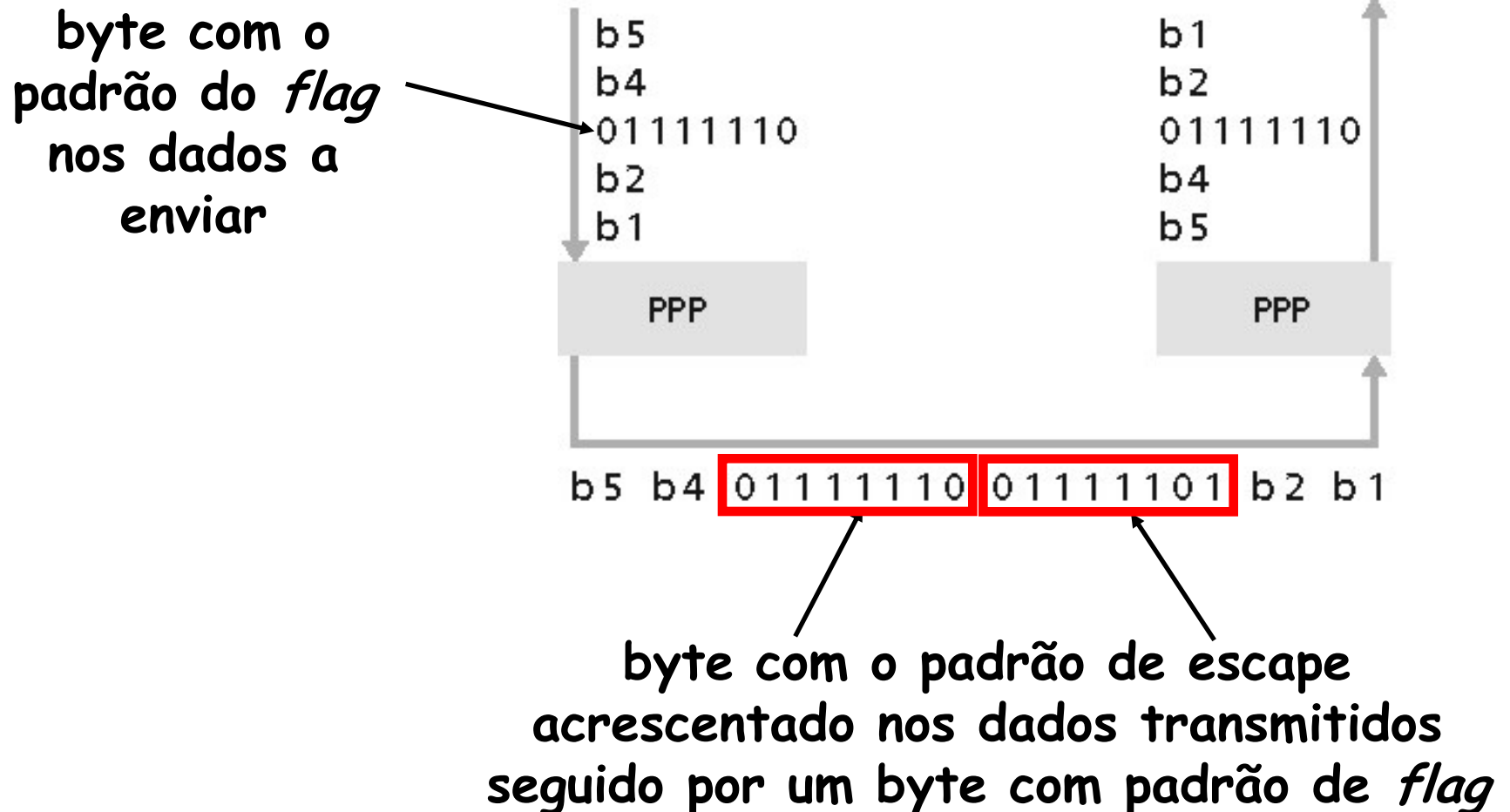


Fonte: Tanenbaum

PPP: Enchimento (*Byte Stuffing*)

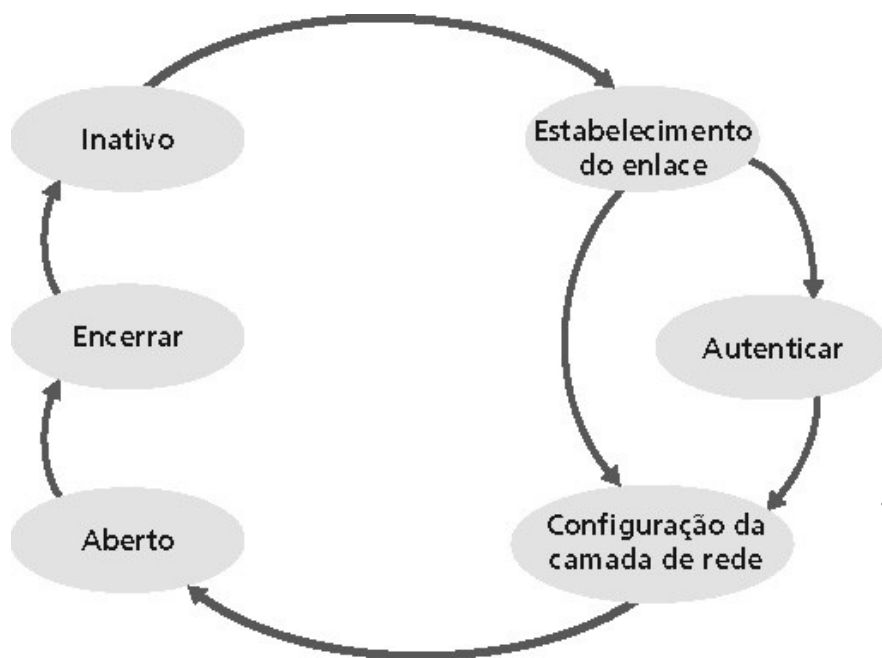
- Requisito de “transparência dos dados”
 - Carga útil pode conter o padrão do *flag* 01111110
 - Se um 01111110 for recebido, ele é dados ou *flag*?
- Transmissor
 - Adiciona (“enche”) um byte de controle de escape 01111101 antes de cada byte 01111110 de dados
- Receptor
 - Se encontrar um 01111110 precedido de um 01111101
 - Descarta o primeiro byte e continua a recepção dos dados
 - Se houver apenas um único 01111110 → byte de *flag*

PPP: Enchimento (*Byte Stuffing*)



PPP: Funcionamento

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



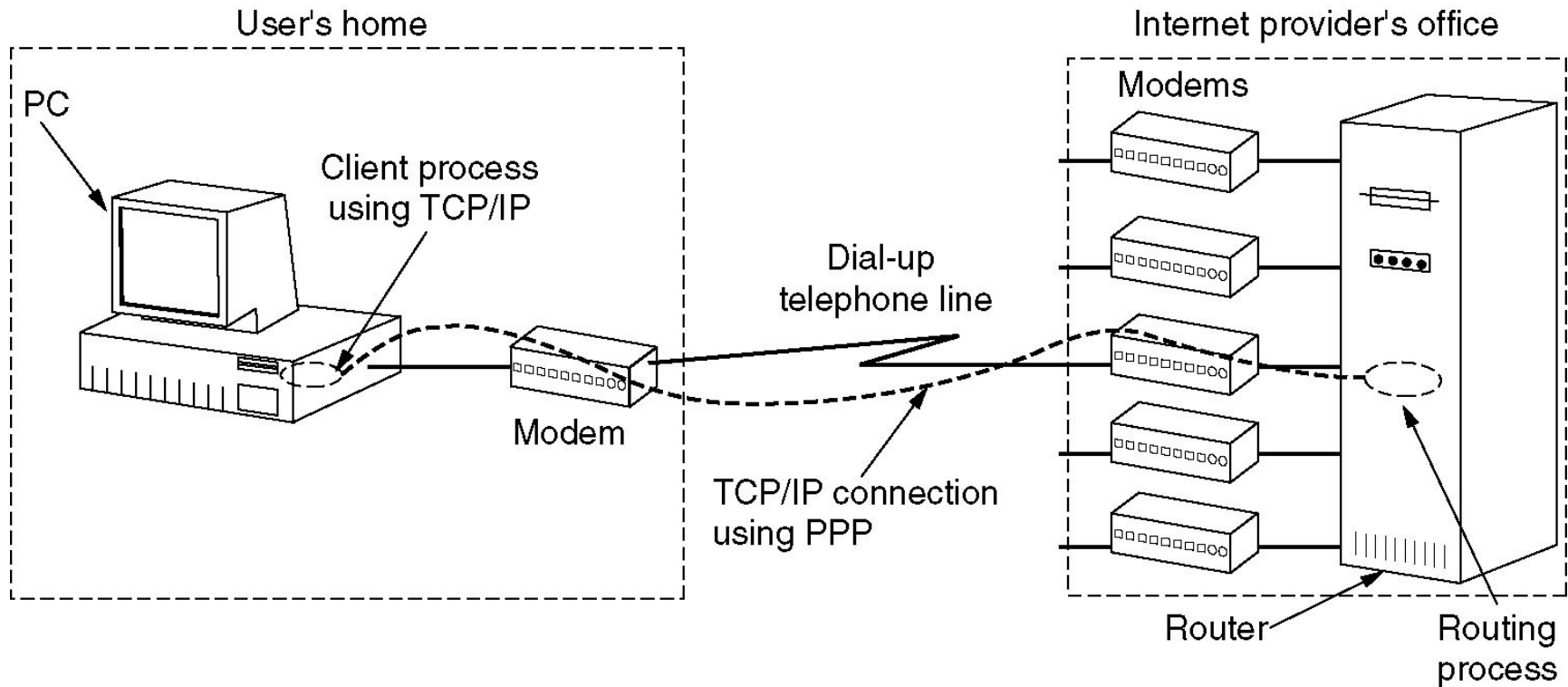
1. Configurar o enlace PPP
 - Compr. máx. quadro, etc.
 - Autenticação
2. Obter/configurar informações da camada de rede
 - Para IP: transporta mensagens do Protocolo de Controle IP (IPCP) para configurar/obter o endereço IP
3. Aberto
 - Transporta dados

PPP: Funcionamento Domiciliar

- Exemplo de uso domiciliar:
 - Estação "chama" o roteador do ISP através de um modem
 - Após o estabelecimento de uma conexão física, a estação envia quadros LCP em um ou mais quadros PPP
 - Seleccionam os parâmetros PPP a serem usados
 - Envia pacotes NCP
 - Em geral obtém endereço IP
 - Desconexões ocorrem na "ordem inversa"
 - Rede (NCP), enlace (LCP) e física (modem desliga o telefone)

PPP: Funcionamento Domiciliar

Conexão através de um usuário domiciliar (fonte: Tanenbaum)



PPPoE: PPP over Ethernet

- Conexões PPP tradicionais:
 - Estabelecidas entre duas estações conectadas através de um enlace ponto-a-ponto
 - Não há dúvidas que um quadro enviado por uma estação vá alcançar a outra
- Conexões PPP em redes Ethernet:
 - Uma estação pode alcançar todas as estações na rede
 - Nesse caso, quem seria o provedor de acesso?

PPPoE adiciona um estágio de descobrimento da estação do provedor de acesso, antes da sessão PPP. Dessa forma, as duas estações passam a conhecer o endereço MAC uma da outra

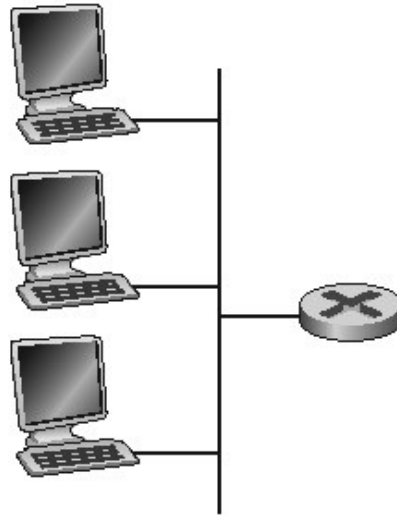
Protocolos de Camada de Enlace: Canal de Difusão

Controle de Acesso ao Meio

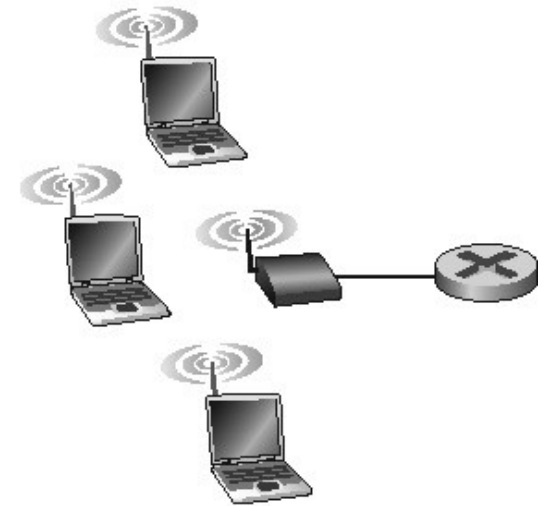
- Protocolos de múltiplo acesso usados em canais de difusão
 - Coordenação de transmissores e de receptores em um canal de difusão compartilhado
 - São algoritmos distribuídos que determinam como os nós compartilham o canal
 - Determinam quando um nó pode transmitir
 - Comunicação sobre o compartilhamento do canal deve usar o próprio canal!
 - Não há canal fora da faixa para coordenar a transmissão

Enlaces e Protocolos de Acesso Múltiplo

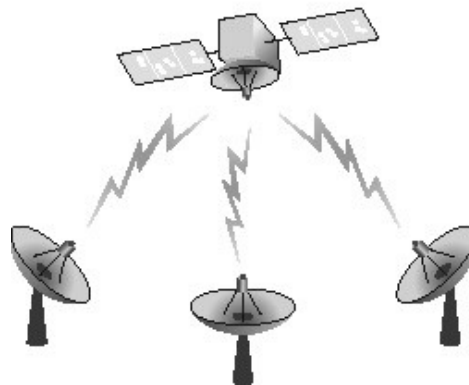
Compartilhado com fio
(por exemplo, Ethernet)



Compartilhado sem fio
(por exemplo, Wi-Fi)



Satélite



Coquetel



Por que o Acesso ao Meio Precisa Ser Controlado?

- Para evitar interferência entre transmissões simultâneas
 - Quando dois ou mais nós transmitem ao mesmo tempo, uma **colisão** pode ocorrer no nó receptor caso dois ou mais sinais cheguem ao mesmo tempo...

Protocolo Ideal de Acesso Múltiplo

- Para um canal de difusão com taxa de R b/s:
 1. Quando apenas um nó tem dados para enviar, esse nó obtém uma vazão de R b/s
 2. Quando M nós têm dados para enviar, cada um desses nós poderá transmitir em média a uma taxa de R/M b/s
 3. O protocolo é completamente descentralizado
 - Nenhum nó especial (mestre) para coordenar as transmissões e se tornar um ponto de falha
 4. O protocolo é simples para que sua implementação seja barata

Classes de Protocolos de Acesso Múltiplo

- Protocolos de Divisão de Canal
 - Divide o canal em pequenos "pedaços" (*slots* de tempo, frequências, códigos)
 - Aloca pedaços a um nó para seu uso exclusivo
- Protocolos de Acesso Aleatório
 - Canal não é dividido, podem ocorrer colisões
 - "Recupera" as colisões
- Protocolos de Revezamento
 - Nós se revezam no acesso ao meio
 - Alterna oportunidades de acesso ao meio sem que ninguém tente acessar ao mesmo tempo

Protocolos de Divisão do Canal

Protocolos de Divisão do Canal

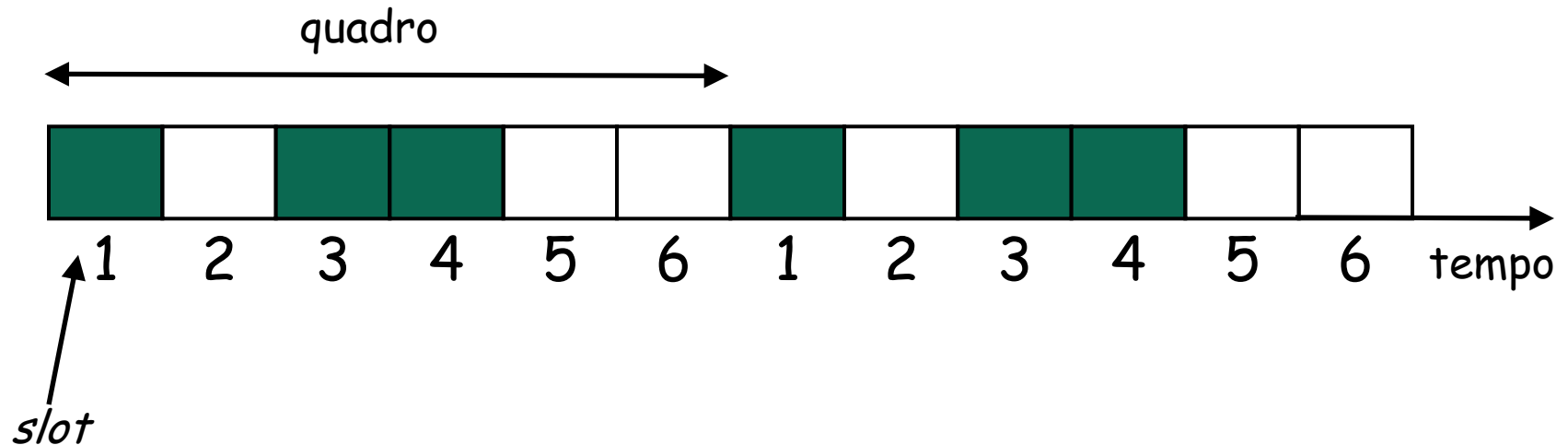
- Acesso ao meio é dividido entre as estações
 - Não podem ocorrer colisões
- Estação compartilha a taxa do canal com outras estações
- Exemplos:
 - TDMA
 - FDMA
 - CDMA

TDMA

- Acesso múltiplo por divisão de tempo (*Time Division Multiple Access*)
- Acesso múltiplo feito em função do tempo
- Tempo é dividido em *slots*
 - Geralmente de tamanho fixo e igual ao tempo para transmitir um pacote
- Em cada *slot* **somente uma estação pode transmitir**
 - Acesso ao canal em "turnos"

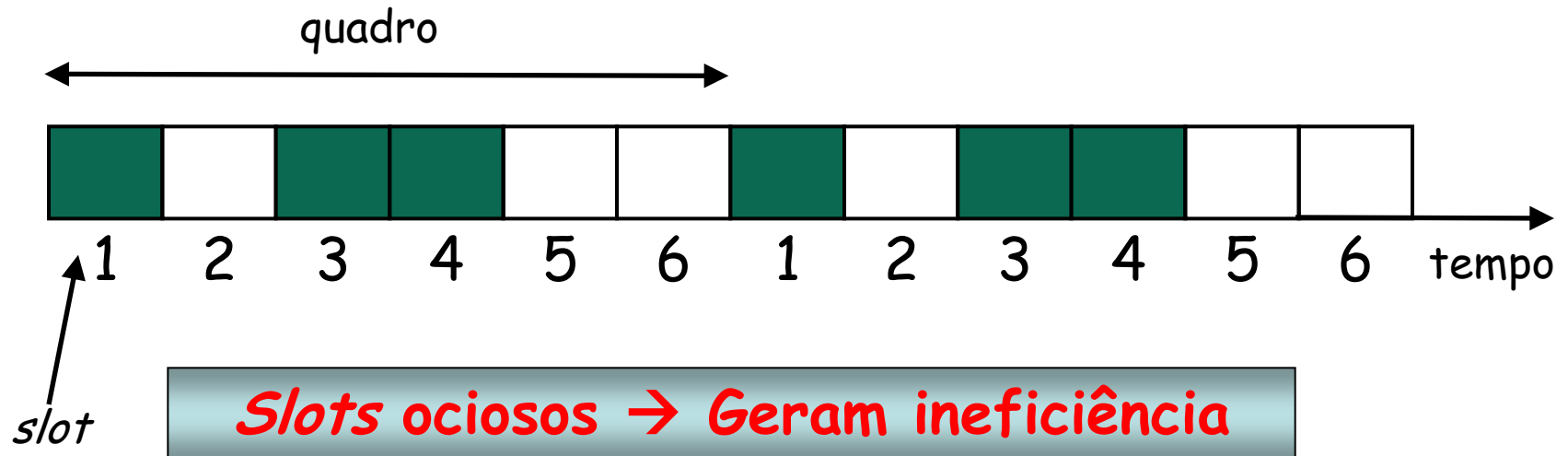
TDMA

- Exemplo
 - Rede local com 6 estações
 - *Slots* 1, 3 e 4 com pacotes
 - *Slots* 2, 5 e 6 ociosos



TDMA

- Exemplo
 - Rede local com 6 estações
 - *Slots* 1, 3 e 4 com pacotes
 - *Slots* 2, 5 e 6 ociosos



FDMA

- Acesso múltiplo por divisão de frequência (*Frequency Division Multiple Access*)
- Acesso múltiplo feito em função da frequência
- Espectro do canal dividido em bandas de frequência
 - Cada estação está associada a uma banda de frequência diferente
- Problema semelhante ao TDMA
 - Tempo de transmissão não usado nas bandas permanecem ociosos

CDMA

- Acesso múltiplo por divisão de código (*Code Division Multiple Access*)
- Acesso múltiplo feito em função do código
 - Cada estação está associada a um código diferente
 - Destino deve conhecer o código da fonte
- Muito usado em redes sem fio
- Vantagem
 - Estações podem transmitir simultaneamente usando códigos diferentes

Multiplexação

- Tem por objetivo compartilhar o meio físico
 - Divisão do meio ocorre na **camada física**
 - Geralmente centralizada em um dispositivo denominado **multiplexador**
- Pode ser classificada em função da variável usada para separar as fontes
 - Divisão de tempo (*Time Division Multiplexing* - TDM)
 - Divisão de frequência (*Frequency Division Multiplexing* - FDM)
 - Divisão de comprimentos de onda (*Wavelength Division Multiplexing* - WDM)

Duplexação

- Tipo especial de multiplexação
- Comunicação entre duas estações pode ser classificada em:
 - *Simplex* → único sentido
 - *Half-duplex* → dois sentidos, porém não simultaneamente
 - *Full-duplex* → dois sentidos, simultaneamente
- Também pode ser classificada em função da variável usada para separar as fontes
 - Divisão de tempo (*Time Division Duplexing* - TDD)
 - Divisão de frequência (*Frequency Division Duplexing* - FDD)

Protocolos de Acesso Aleatório

Protocolos de Acesso Aleatório

- Quando um nó tiver um quadro a transmitir...
 - Tenta transmitir à taxa máxima do canal sem nenhuma coordenação *a priori* entre os nós
- Entretanto, se dois ou mais nós transmitirem ao mesmo tempo:
 - Há uma colisão!
 - Acesso ao meio é realizado de forma não determinística
- Nesse cenário, o protocolo de acesso aleatório especifica:
 - Como detectar colisões e como se recuperar delas
 - Através de retransmissões retardadas, por exemplo

Protocolos de Acesso Aleatório

- Aloha
- *Slotted Aloha*
- CSMA persistente
- CSMA não persistente
- CSMA p-persistente
- CSMA/CD
- Outros

Rede Aloha

- Criada por Norman Abramson em 1960
- Primeira rede baseada em pacotes
- Interligação de computadores em várias ilhas do Havaí compartilhando um meio (RF)
 - Comunicação com um computador central
 - Disputa do meio

Protocolo Aloha

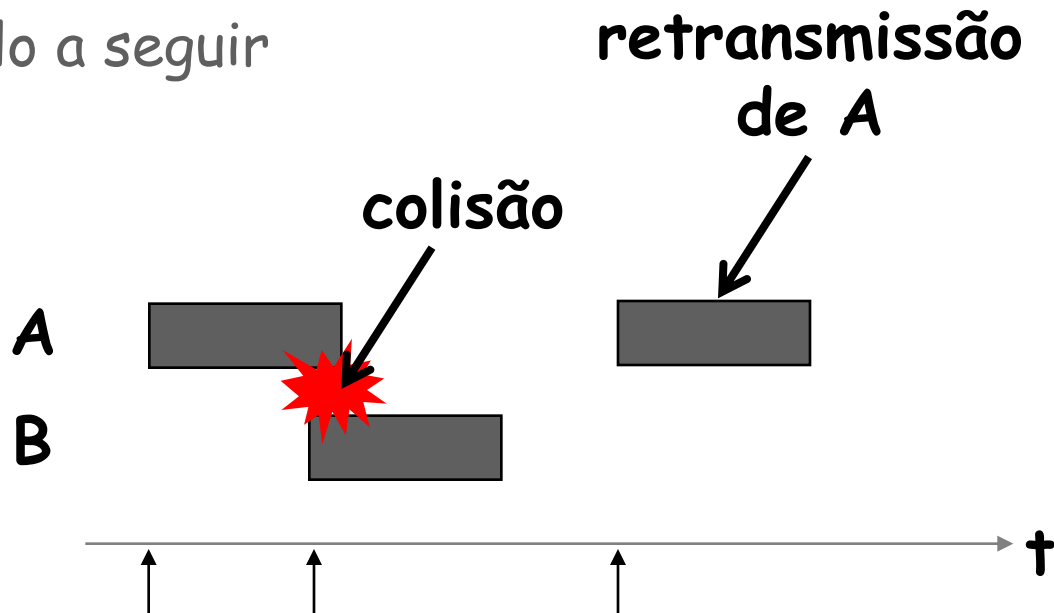
- Estação transmite quando desejar
 - Não há escuta do meio...
 - Se o quadro for recebido sem erros
 - Um reconhecimento positivo é enviado ao remetente
 - Se duas ou mais estações transmitirem ao mesmo tempo
→ **Colisão!**
 - Colisão inferida através do não recebimento do reconhecimento positivo em um tempo
 - Se o quadro for recebido com erro
 - Remetente também não recebe reconhecimento positivo

Protocolo Aloha

- Se o reconhecimento positivo não for recebido...
 - Quadro é retransmitido...
 - Retransmissão após a tempo aleatório para redução da probabilidade de nova colisão
 - Processo é repetido continuamente até que o reconhecimento seja recebido pelo remetente

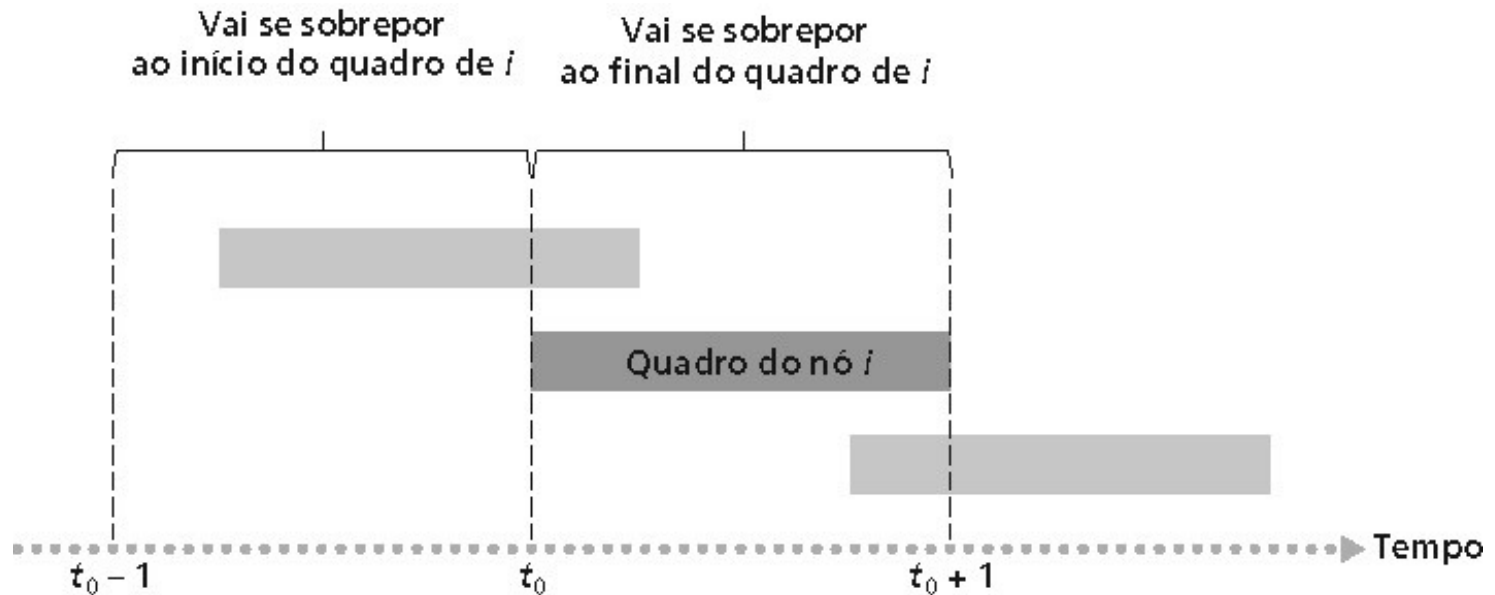
Protocolo Aloha

- Baixa eficiência
 - Cálculo a seguir



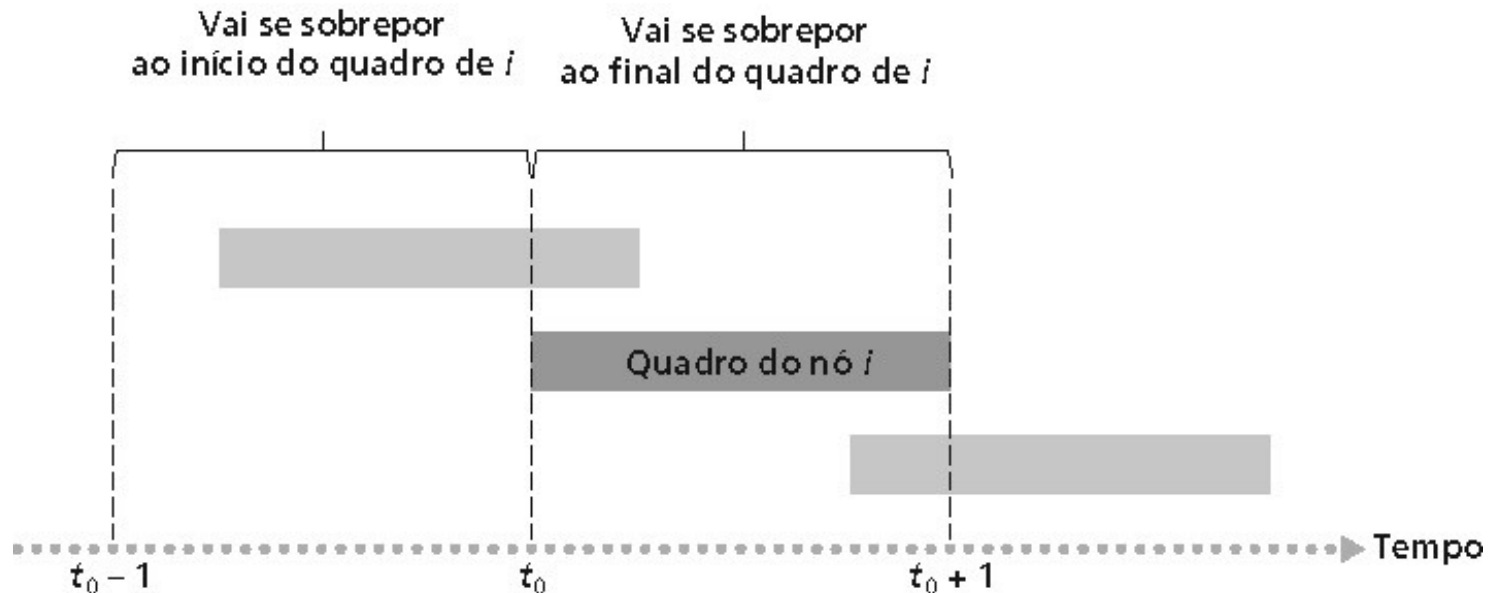
Eficiência do Aloha

- Probabilidade de colisão
 - Quadro enviado em t_0 colide com outros quadros enviados em $[t_0-1, t_0+1]$



Eficiência do Aloha

- $P(\text{sucesso por um dado nó}) =$
 $C_{n,1} \times P(\text{nó transmite})$
 $\times P(\text{nenhum outro nó transmite em } [t_0-1, t_0])$
 $\times P(\text{nenhum outro nó transmite em } [t_0, t_0+1])$



Eficiência do Aloha

- $P(\text{sucesso por um dado nó}) =$
 $C_{n,1} \times P(\text{nó transmite})$
 $\times P(\text{nenhum outro nó transmite em } [t_0-1, t_0])$
 $\times P(\text{nenhum outro nó transmite em } [t_0, t_0+1])$



$$P(\text{sucesso de um nó}) = n.p.(1-p)^{n-1} \cdot (1-p)^{n-1} = n.p.(1-p)^{2(n-1)}$$



Eficiência baixa...

$$P(\text{sucesso por um dado nó}) = 1/2e \approx \text{18\%}$$

Considerando p ótimo e n tendendo ao infinito...

Eficiência do Aloha

- Cálculo do p ótimo (p^*):

$$d[n.p^*. (1-p^*)^{2(n-1)}] / dp = 0$$

$$\Rightarrow n.(1-p^*)^{2(n-1)} + n.p^*.2.(n-1).(1-p^*)^{2(n-1)-1}.(-1) = 0$$

$$\Rightarrow (1-p^*)^{2(n-1)} = p^*.2.(n-1).(1-p^*)^{2(n-1)-1}$$

$$\Rightarrow (1-p^*)^{2(n-1)} = p^*.2.(n-1).(1-p^*)^{2(n-1)} / (1-p^*)$$

$$\Rightarrow 1-p^* = p^*.2.(n-1) \Rightarrow 1-p^* = 2.p^*.n-2.p^*$$

$$\Rightarrow 1 = 2.p^*.n - p^* \Rightarrow p^* = 1/(2n-1)$$

- Substituindo p^* em $n.p.(1-p)^{2(n-1)}$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [n/(2n-1)].[(1-1/(2n-1))^{2(n-1)}]$$

$$\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} [(1-1/(2n-1))^{2n-1}] / \lim_{n \rightarrow \infty} [(2n-2)/n] = 1/2e$$

- Lembrando que $\lim_{n \rightarrow \infty} [(1-1/n)^n] = 1/e$

Slotted Aloha

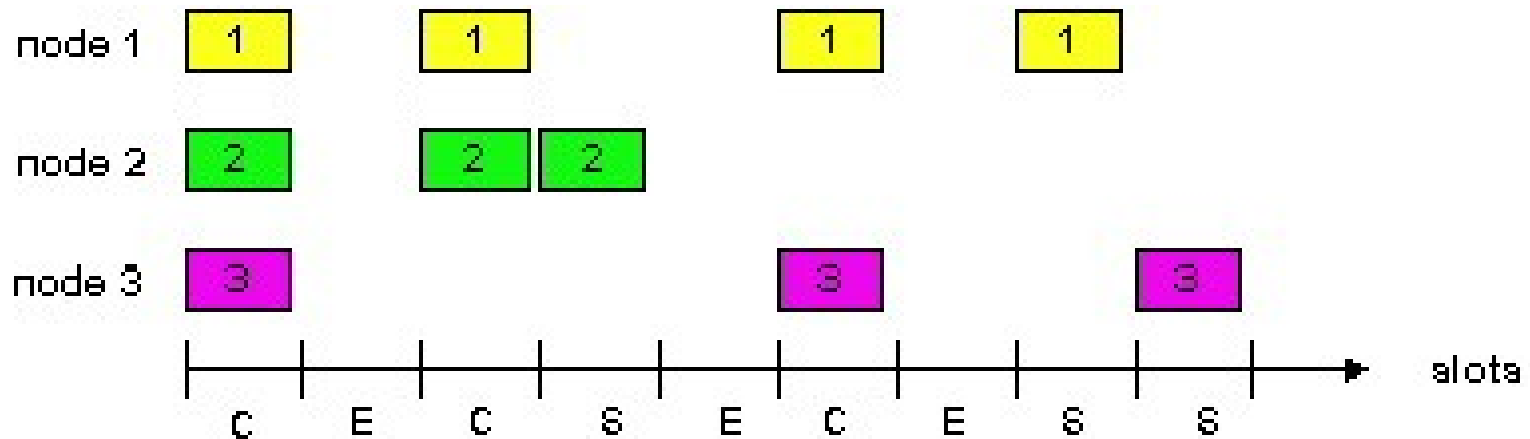
- Hipóteses:
 - Todos os quadros têm o mesmo tamanho (L bits)
 - Tempo é dividido em *slots* de tamanho igual
 - Tempo para transmitir 1 quadro (L/R seg)
 - Nós começam a transmitir quadros apenas no início dos intervalos (*slots*)
 - Nós são sincronizados para que saibam onde os intervalos começam
 - Se dois ou mais nós transmitirem em um *slot*, todos os nós envolvidos deixam de receber um reconhecimento

Slotted Aloha

- Operação
 - Quando o nó obtém um novo quadro, ele espera até o início do próximo *slot* e transmite o quadro inteiro
 - Se não houver colisão, o nó poderá enviar um novo quadro no próximo *slot*
 - Caso haja uma colisão (percebida antes do final do intervalo), o nó retransmite o quadro em intervalo subsequente com **probabilidade p** até obter sucesso

Slotted Aloha

- Operação



Slotted Aloha

- Vantagens
 - Único nó ativo pode transmitir continuamente na taxa máxima do canal
 - Altamente descentralizado
 - *Apenas os slots nos nós precisam estar sincronizados*
 - Simples

Slotted Aloha

- Desvantagens
 - Quando há colisões → *slots* desperdiçados
 - *Slots* ociosos → desperdício
 - Retransmissões em *slots* aleatórios podem gerar *slots* ociosos
 - Requer a sincronização dos relógios

Eficiência do *Slotted Aloha*

- Eficiência
 - Fração de longo prazo de *slots* bem sucedidos quando há muitos nós cada um com muitos quadros para transmitir
- Assuma n nós com muitos quadros para enviar
- Cada um transmite num *slot* com probabilidade p
- Probabilidade que nó 1 tenha sucesso em um slot
 - $p(1-p)^{n-1}$
- Probabilidade que qualquer nó tenha sucesso
 - $np(1-p)^{n-1}$

Eficiência do *Slotted* Aloha

- Para eficiência máxima com n nós
 - Encontrar p^* que maximiza $np(1-p)^{n-1}$
- Para muitos nós, faça limite para $np(1-p)^{n-1}$
 - Quando $n \rightarrow \infty$, eficiência = $1/e = 37\%$

Mais eficiente, mas ainda é baixa!

Eficiência do *Slotted Aloha*

- Cálculo do p ótimo (p^*):

$$d[n.p^*.(1-p^*)^{(n-1)}]/dp = 0$$

$$\Rightarrow n.(1-p^*)^{(n-1)} + n.p^*.(n-1).(1-p^*)^{(n-1)-1}.(-1) = 0$$

$$\Rightarrow (1-p^*)^{(n-1)} = p^*.(n-1).(1-p^*)^{(n-1)-1}$$

$$\Rightarrow (1-p^*)^{(n-1)} = p^*.(n-1).(1-p^*)^{(n-1)} / (1-p^*)$$

$$\Rightarrow 1-p^* = p^*.(n-1) \Rightarrow 1-p^* = p^*.n-p^*$$

$$\Rightarrow 1 = p^*.n \Rightarrow p^* = 1/n$$

- Substituindo p^* em $n.p.(1-p^*)^{(n-1)}$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [(1-1/n)^{(n-1)}]$$

$$\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} [(1-1/n)^n] / \lim_{n \rightarrow \infty} [(1-1/n)] = 1/e = \mathbf{37\%}$$

- Lembrando que $\lim_{n \rightarrow \infty} [(1-1/n)^n] = 1/e$

CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*)

- Uso de **detecção de portadora** (sinal no meio)
 - Escuta o meio antes de transmitir
 - Se o canal estiver livre, transmite o quadro
 - Se o canal estiver ocupado, adia a transmissão
 - Objetivo → **evitar colisões!**
- Analogia humana: não interrompa os outros!
 - Escute antes de falar → detecção de portadora
 - Se alguém começa a falar junto de você, pare de falar → detecção de colisão

CSMA X Aloha

- Aloha não escuta o meio
- Aloha não pára a transmissão caso detecte uma colisão

Tipos de CSMA

- Motivação: aumentar a eficiência
- Vários tipos
 - CSMA persistente
 - CSMA não-persistente
 - CSMA p-persistente
 - CSMA/CD
 - CSMA/CA

Colisão de Quadros

- Se todos os nós escutam o meio antes de transmitir, ainda existem colisões?

Sim!
Mas por quê?

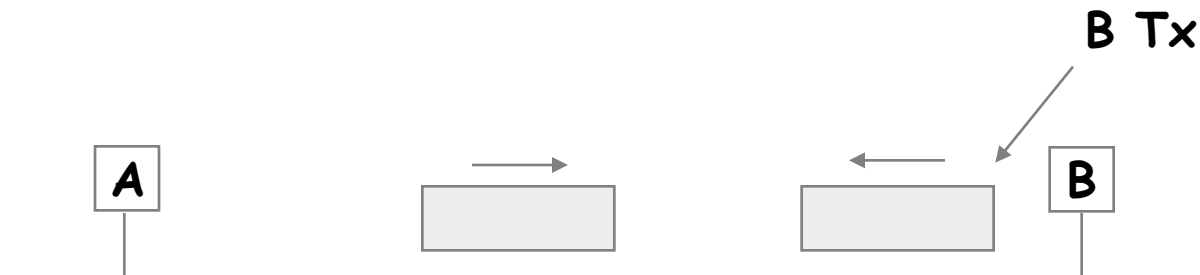
Colisão de Quadros

- Estação que quer transmitir um quadro ouve o meio
- Mesmo com a escuta da portadora, ainda podem ocorrer colisões
- Duas ou mais estações escutam o meio
 - Não escutam a transmissão da outra devido ao **atraso de propagação do sinal**



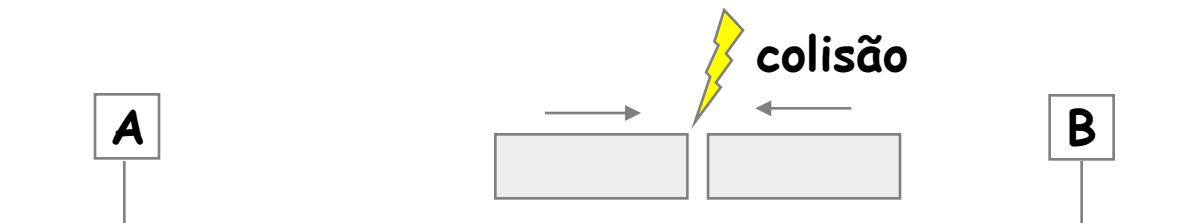
Colisão de Quadros

- Estação que quer transmitir um quadro ouve o meio
- Mesmo com a escuta da portadora, ainda podem ocorrer colisões
- Duas ou mais estações escutam o meio
 - Não escutam a transmissão da outra devido ao **atraso de propagação do sinal**



Colisão de Quadros

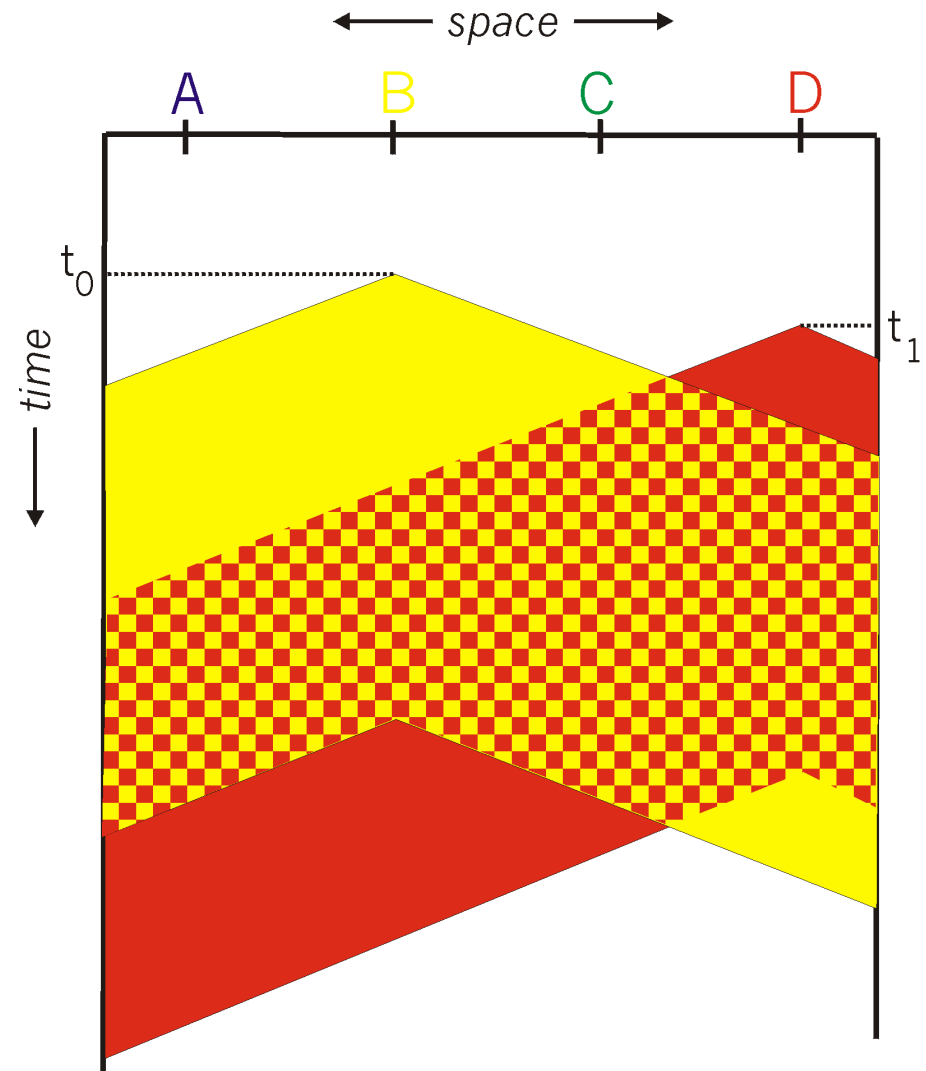
- Estação que quer transmitir um quadro ouve o meio
- Mesmo com a escuta da portadora, ainda podem ocorrer colisões
- Duas ou mais estações escutam o meio
 - Não escutam a transmissão da outra devido ao **atraso de propagação do sinal**



Colisão de Quadros

- Exemplo:
 - 4 estações: A, B, C e D
 - Em t_0 , B escuta o meio
 - Para B, o meio está livre
 - Em t_1 , D escuta o meio
 - Para D, o meio também está livre
 - Os bits enviados por B não chegaram a D

Colisão!



Colisão de Quadros

- Mesmo com a escuta da portadora, ainda podem ocorrer colisões...
 - Devido à "memória" do meio físico
 - Quanto maior o tamanho da rede
 - Maior o atraso de propagação de uma extremidade à outra
 - Maior a probabilidade de ocorrerem colisões
 - Quanto menor o tamanho da rede
 - Mais efetiva é a escuta de portadora
 - Explica o sucesso do CSMA para redes locais

Colisão de Quadros

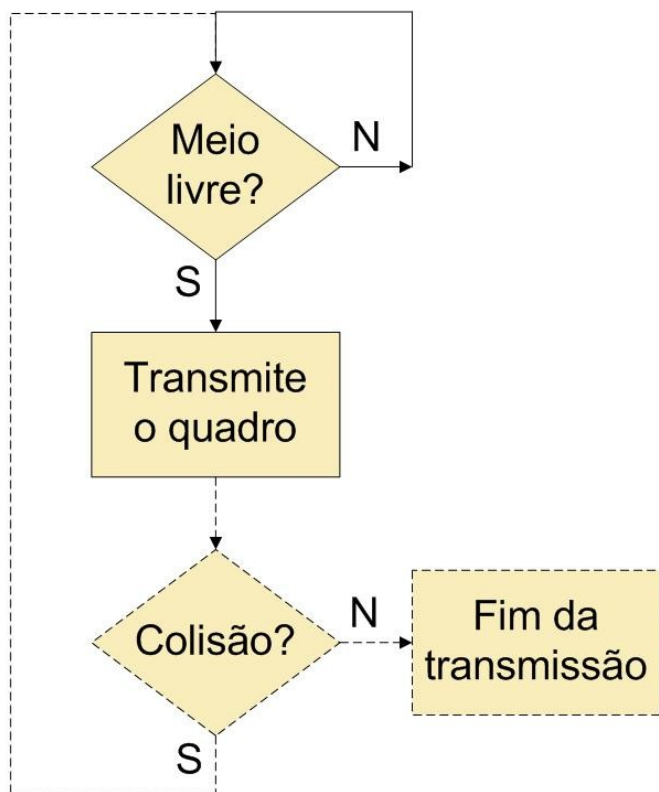
- **Inferida**
 - Através do não recebimento de um reconhecimento positivo em um tempo T
 - CSMA persistente
 - CSMA não-persistente
 - CSMA p-persistente
 - CSMA/CA (*Collision Avoidance*)
- **Detectada**
 - CSMA/CD (*Collision Detection*)

CSMA Persistente

- Quando a estação tem um quadro para transmitir...
 - Primeiro **escuta o meio**:
 - Se o meio estiver **livre** → Transmite
 - Se o meio estiver **ocupado** → Continua escutando o meio até que ele fique livre
- Se houver uma colisão
 - Espera um tempo aleatório para recomençar o processo

CSMA Persistente

Retransmissão



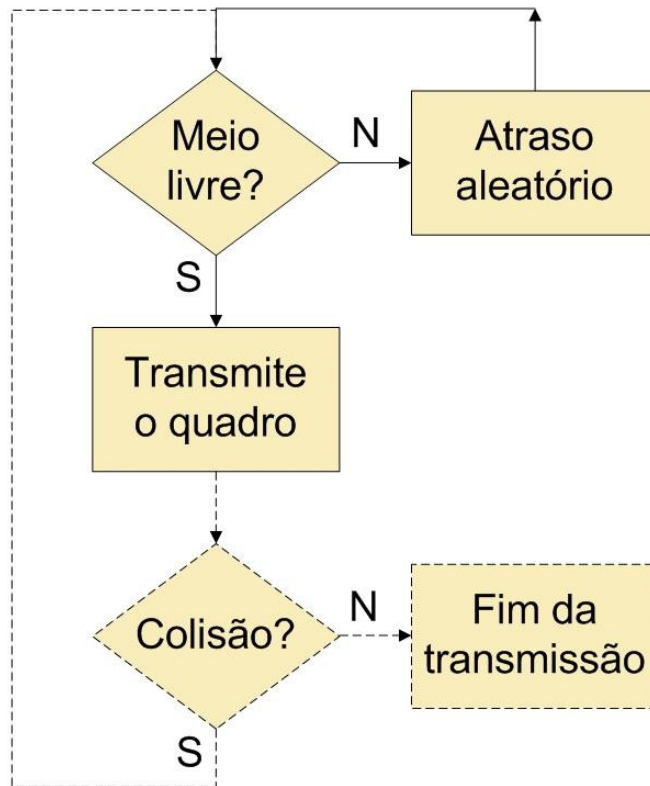
Pode haver nova colisão após o meio ficar livre!

CSMA Não-persistente

- Quando a estação tem um quadro para transmitir...
 - Primeiro **escuta o meio**:
 - Se o meio estiver **livre** → Transmite
 - Se o meio estiver **ocupado** → Estação **espera um tempo aleatório** e só depois volta a escutar o meio
 - Diferente do modo persistente, no qual a estação permanece escutando o meio até que ele fique livre
- Se houver uma colisão
 - Espera um tempo aleatório para recomençar o processo

CSMA Não-persistente

Retransmissão



Evita colisão após o meio ficar livre...

Em compensação, possui um maior retardo de acesso ao meio devido ao atraso aleatório

CSMA p-persistente

- Tempo dividido em *slots*
 - Definição de *slot* diferente da usada no *Slotted Aloha*
 - Quadro em geral ocupa vários *slots*
 - *Slot* de $T_s \rightarrow$ tempo máximo de propagação
- Ideia
 - Probabilidade p de transmitir o quadro no início de um *slot*

CSMA p-persistente

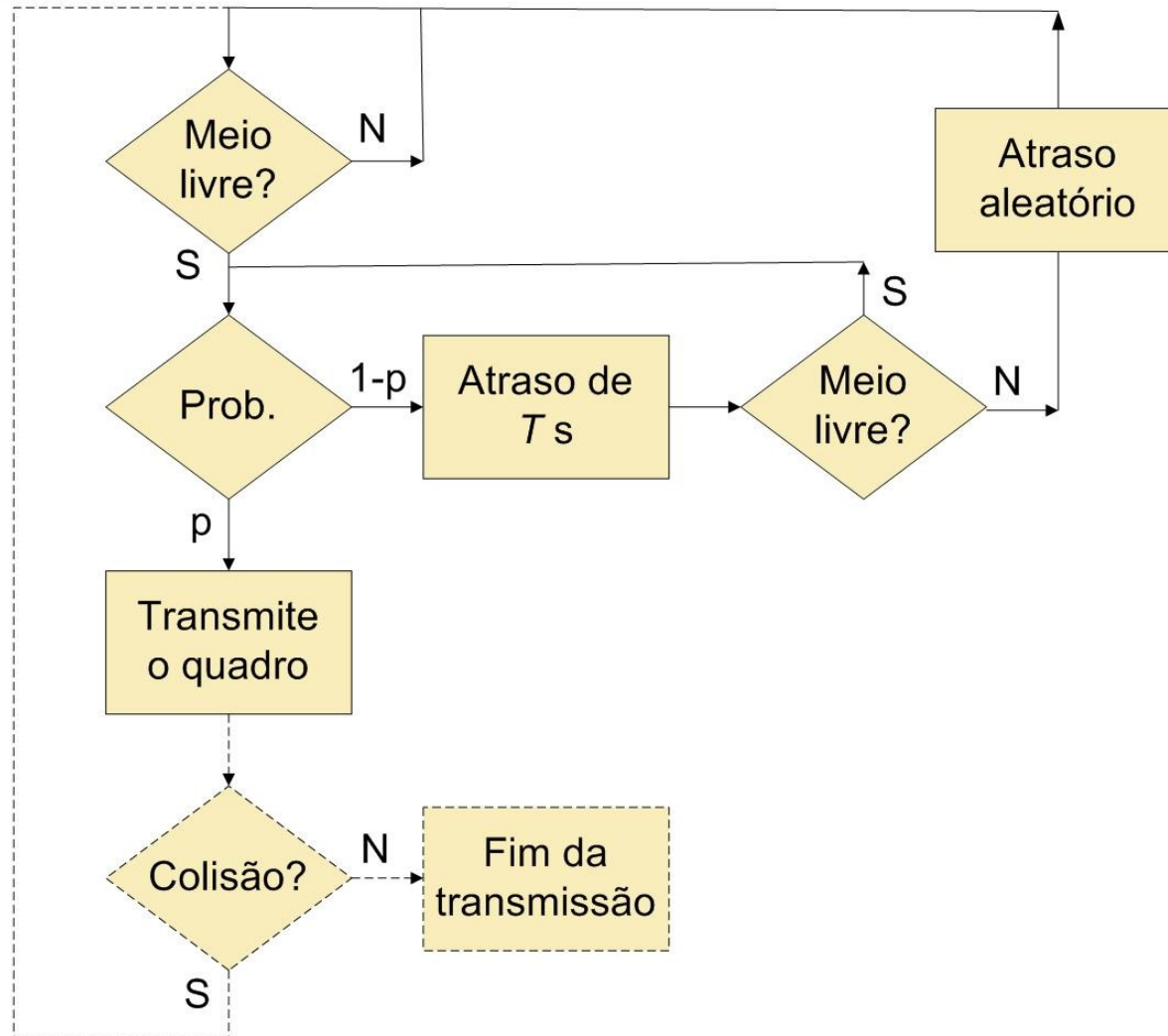
- Quando a estação tem um quadro para transmitir...
 - Primeiro **escuta o meio**:
 - Se o meio estiver **livre**
 - Estação transmite o quadro com probabilidade p
 - Espera pelo próximo *slot* com probabilidade $q = 1-p$
 - » Se o meio estiver livre, novo sorteio com probabilidade p
 - » Se o meio estiver ocupado, espera um tempo aleatório e reinicia o processo (trata como se uma colisão tivesse acontecido)
 - Se o meio estiver **ocupado** → Espera pelo próximo *slot* e repete o algoritmo

CSMA p-persistente

- Em caso de colisão após a transmissão...
 - Espera um tempo aleatório e o processo recomeça

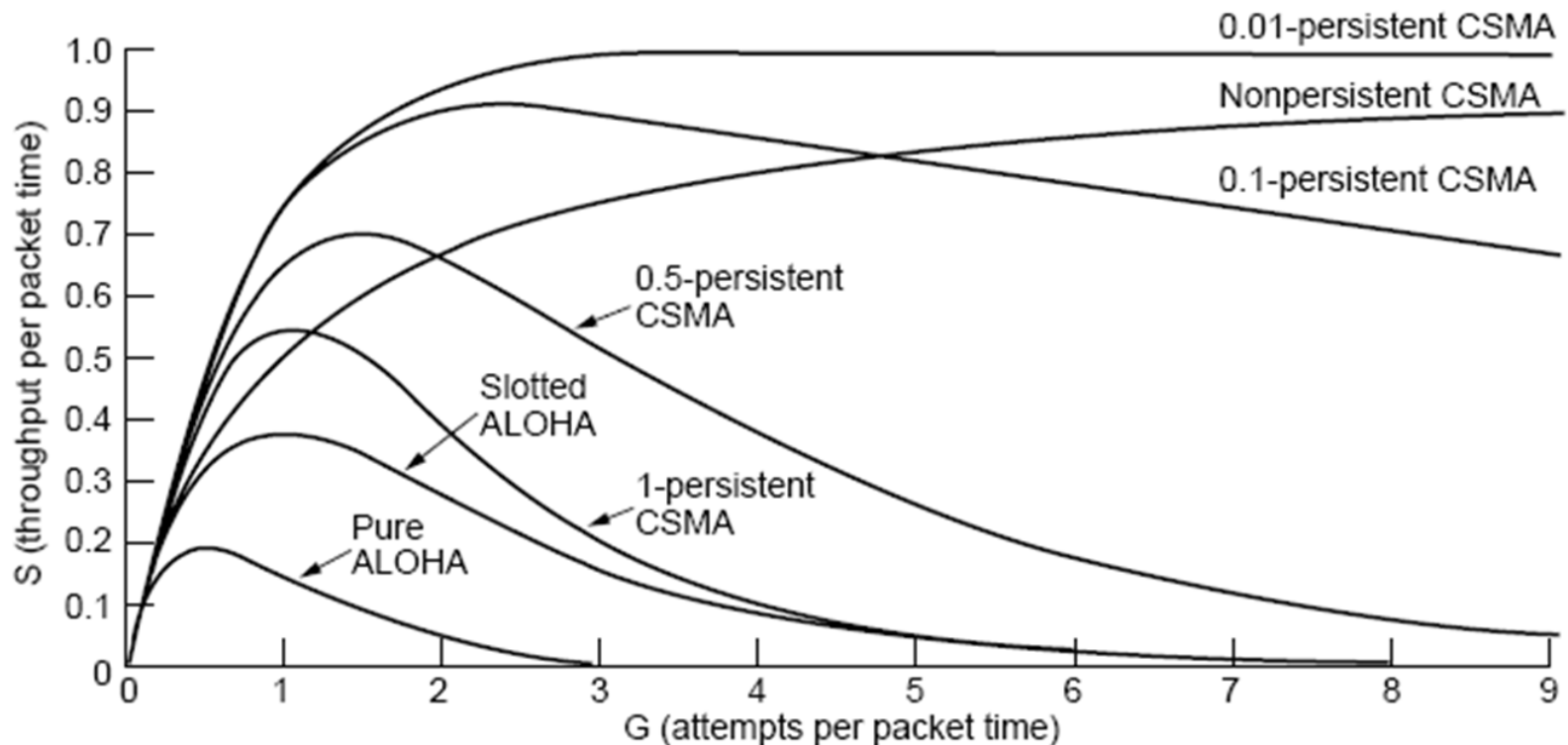
CSMA p-persistente

Retransmissão



Eficiência

Utilização do canal x carga (fonte: Tanenbaum)



O eixo Y descreve a vazão e o eixo X descreve o tráfego oferecido para a rede (número de nós com pacote para transmitir).

CSMA/CD

- Escuta de portadora
 - Como o CSMA persistente
- Detecção de colisão
 - Realizada pelo transmissor durante a transmissão do quadro
 - Transmissor escuta o meio enquanto transmite
 - Estação cancela a transmissão assim que detecta a colisão
 - Reduz o desperdício!

CSMA/CD

- Escuta de portadora
 - Como o CSMA persistente
- Detecção de colisão
 - Informação da colisão enviada para todas as estações tomarem conhecimento
 - Reforço de colisão (*jam*)
 - Diminui-se a duração dos efeitos das colisões

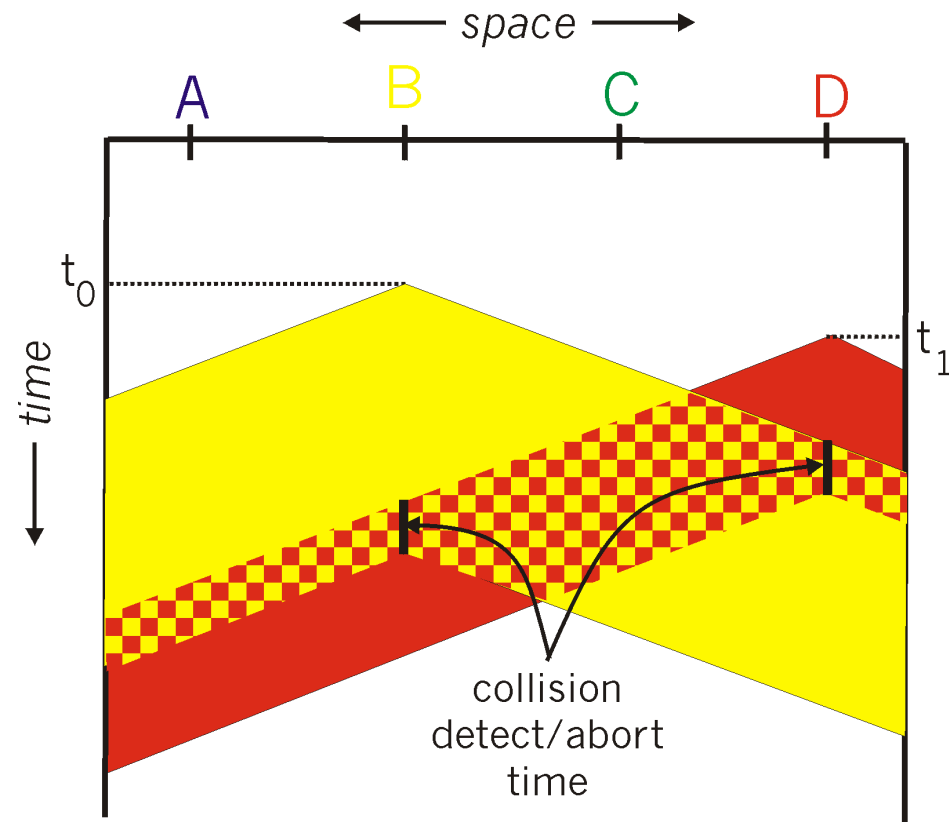
CSMA/CD

- Caso haja colisão...
 - Nova tentativa de transmissão após um tempo aleatório
 - Semelhante ao CSMA persistente
- Analogia humana: bate papo educado!
- Detecção de colisões
 - Fácil em redes locais cabeadas
 - Mede a potência do sinal, comparando o sinal recebido com o transmitido
 - Difícil em redes locais sem fio
 - O receptor é desligado durante a transmissão

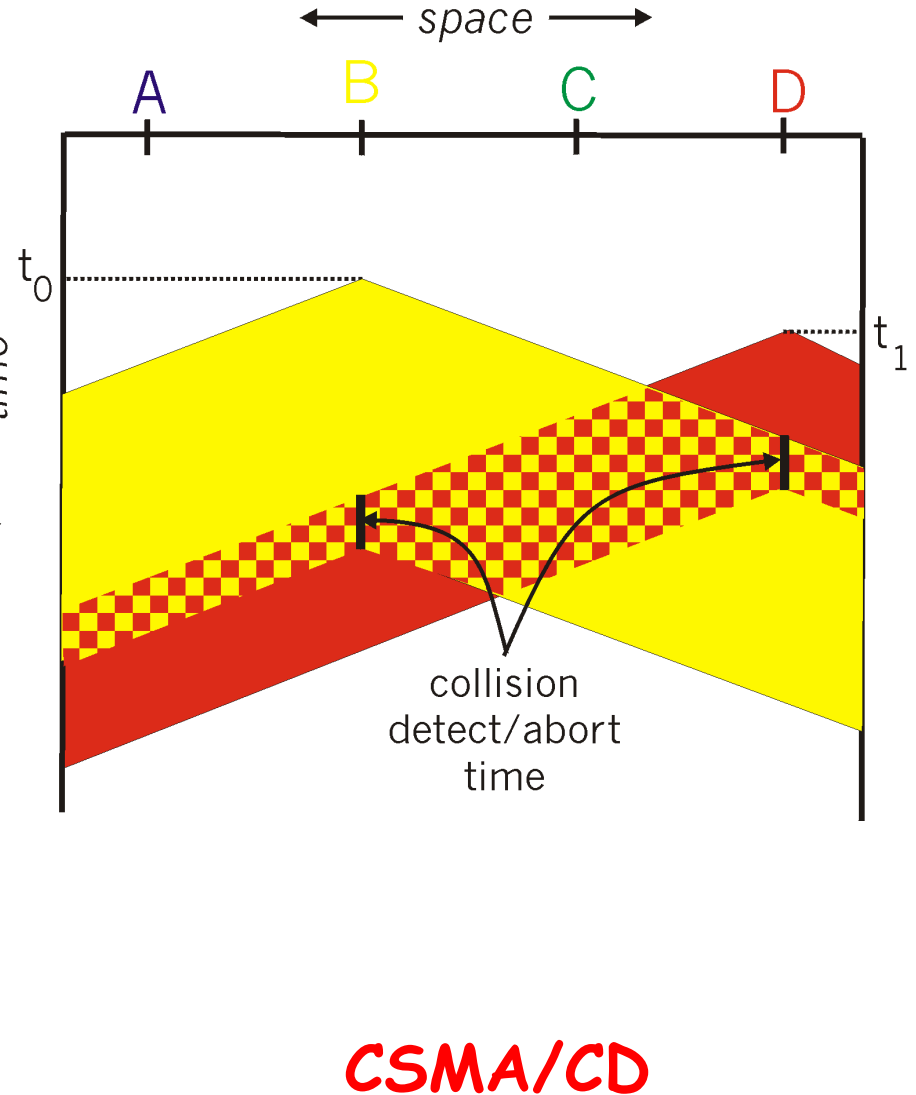
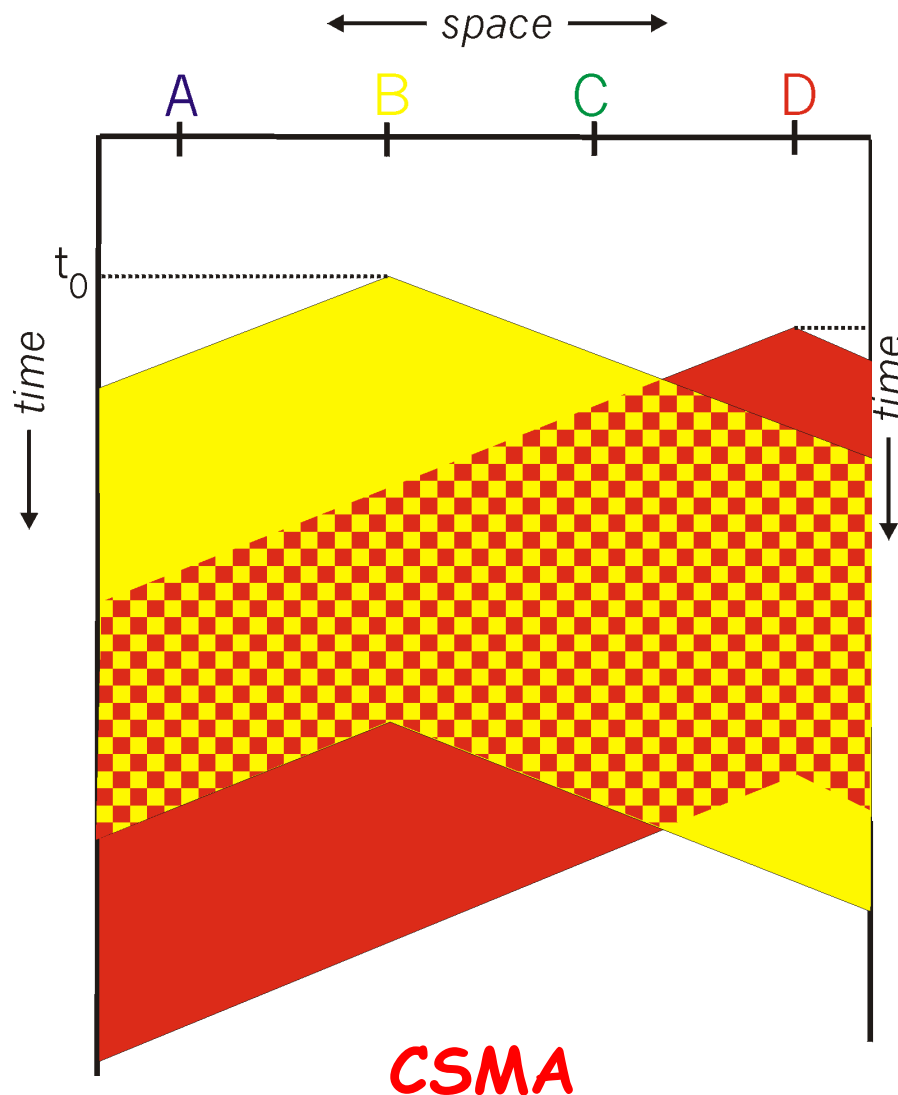
CSMA/CD

- Exemplo
 - 4 estações: A, B, C e D
 - Em t_0 , B escuta o meio
 - Para B, o meio está livre
 - Em t_1 , D escuta o meio
 - Para D, o meio também está livre
 - Os bits enviados por B não chegaram a D

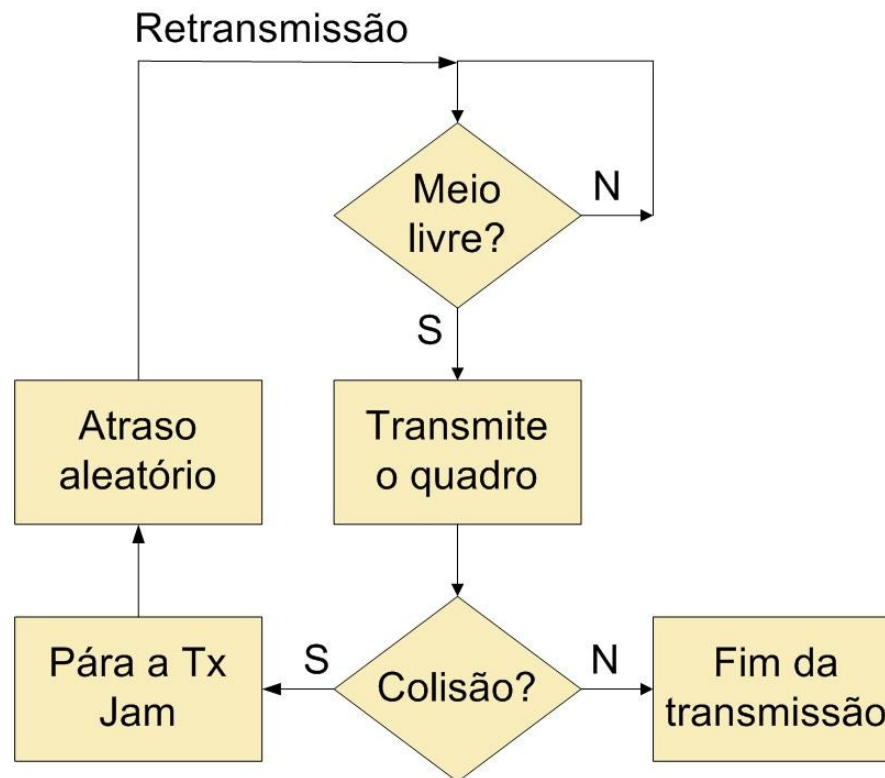
Colisão!



CSMA vs. CSMA/CD



CSMA/CD



CSMA/CD

- Problema:
 - Como garantir que todas as estações detectem colisões?

CSMA/CD

- Problema:
 - Como garantir que todas as estações detectem colisões?
- Solução:
 - Meio tem que ficar ocupado durante o dobro (ida e volta) do atraso máximo de propagação no meio (τ)
 - Quadro possui um tamanho mínimo
 - Porque a colisão é detectada pelos transmissores durante o envio dos quadros

CSMA/CD

- Para garantir que todas as estações detectam colisões
 - Meio ocupado durante o dobro (ida e volta) do atraso máximo de propagação no meio (τ)
 - *A* transmite um quadro em $t = 0$



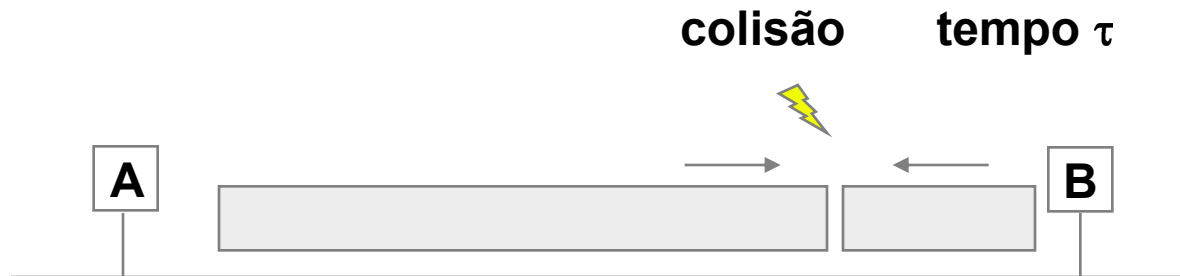
CSMA/CD

- Para garantir que todas as estações detectam colisões
 - Meio ocupado durante o dobro (ida e volta) do atraso máximo de propagação no meio (τ)
 - B começa a transmitir em $\tau - \epsilon$



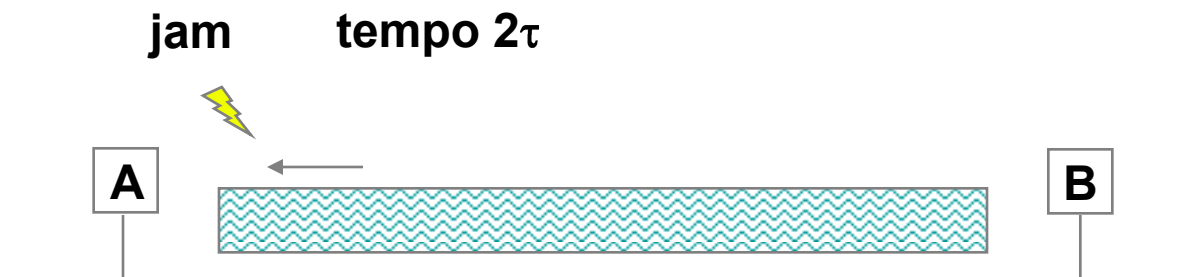
CSMA/CD

- Para garantir que todas as estações detectam colisões
 - Meio ocupado durante o dobro (ida e volta) do atraso máximo de propagação no meio (τ)
 - Colisão detectada por B (na transmissão)
 - B interrompe a transmissão e envia o *jam*



CSMA/CD

- Para garantir que todas as estações detectam colisões
 - Meio ocupado durante o dobro (ida e volta) do atraso máximo de propagação no meio (τ)
 - *Jam* chega a *A* em 2τ
 - *A* interrompe a sua transmissão
 - **Conclusão: existe um tamanho de quadro mínimo**



CSMA/CD

- Mais detalhes quando falarmos do padrão Ethernet

CSMA/CA

- Veremos quando falarmos do padrão de redes sem-fio IEEE 802.11

Protocolos de Revezamento

Protocolos de Revezamento

- Divisão de canal
 - Eficiente para carga alta
 - Compartilhamento justo do canal
 - Ineficiente para carga baixa
 - Atraso no canal de acesso
 - Divisão da largura de banda mesmo com apenas 1 nó ativo
- Acesso aleatório
 - Ineficiente para carga alta
 - Sobrecarga causada por colisões
 - Eficiente para carga baixa
 - Um único nó pode utilizar completamente o canal

Protocolos de Revezamento

- Divisão de canal
 - Eficiente para carga alta
 - Compartilhamento justo do canal
 - Ineficiente para carga baixa
 - Atraso no canal de acesso
 - Divisão da largura de banda
 - Acesso aleatório
 - Ineficiente para carga alta
 - Sobrecarga causada por colisões
 - Eficiente para carga baixa
 - Um único nó pode utilizar completamente o canal
- Revezamento → unir o melhor dos dois mundos!**
- penas 1 nó ativo

Protocolos de Revezamento

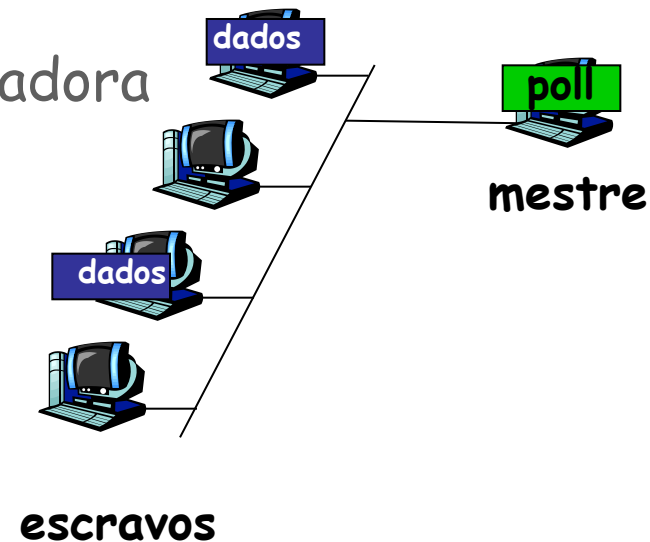
- Geralmente o acesso ao meio é realizado em função de uma **estação centralizadora**
 - Determina quando uma dada estação pode transmitir
 - Garante a ausência de colisões
- Estação compartilha a taxa do canal com outras estações

Protocolos de Revezamento

- Varredura (*polling*)
- Reserva
- Passagem de ficha de permissão (*token*)
- Outros

Varredura (*polling*)

- Estação controladora envia mensagens a outras
 - Convidando-as a transmitir dados
- Estações ao serem consultadas podem transmitir dados
- Ordem das consultas-convites
 - Lista armazenada na estação controladora
- Desvantagens
 - Introduz um atraso de seleção
 - Sobrecarga de controle
 - Ponto único de falha

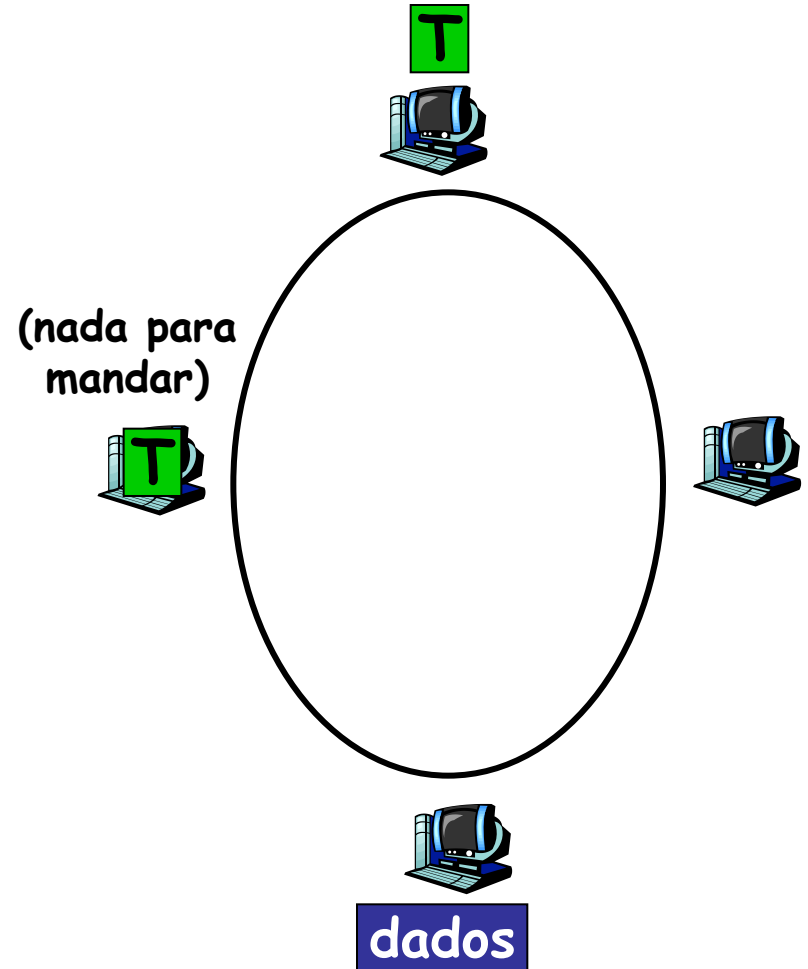


Reserva

- Estações reservam o direito de acessar o meio compartilhado
- Pedidos de reserva são enviados pelas estações
 - Processados pela estação centralizadora que escalona o posterior acesso ao meio
 - Dependendo do protocolo, pode haver colisões de pedidos

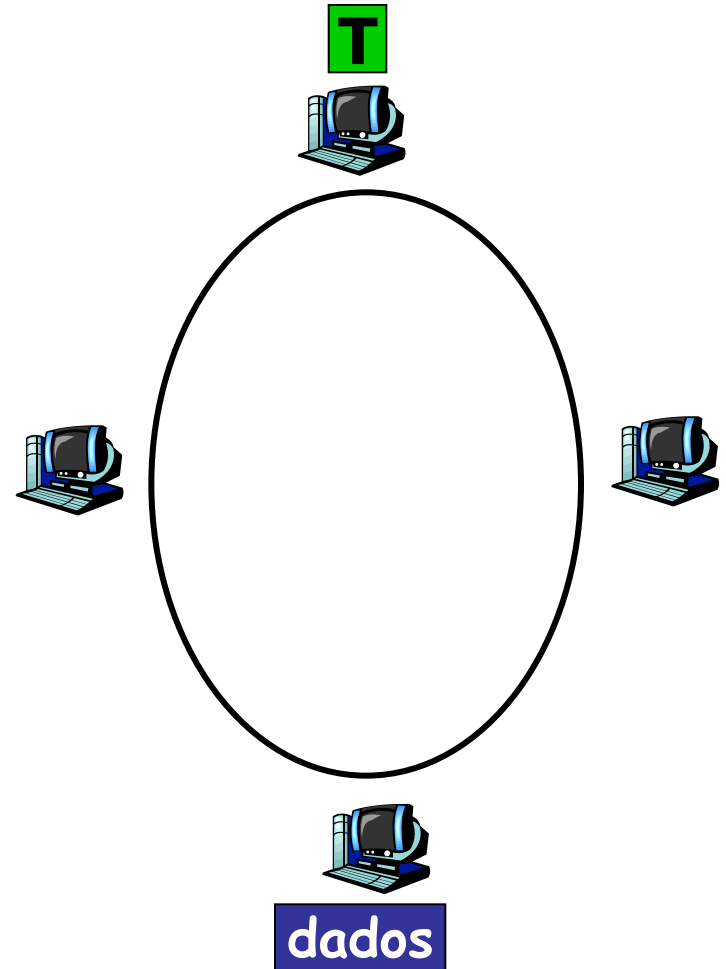
Passagem de Ficha de Permissão (*token*)

- Não existe estação centralizadora
- Ficha é a permissão para a transmissão de dados
- Ficha é passada de estação a estação obedecendo uma ordem
 - Ao obter a ficha, a estação pode transmitir dados
- Usada no Token Ring e no FDDI



Passagem de Ficha de Permissão (*token*)

- Desvantagens
 - Sobrecarga com a passagem da permissão
 - Aumento da latência
 - Falha em uma estação pode derrubar o canal inteiro
 - Ficha pode ser "perdida" em uma estação



Resumo dos Protocolos MAC

- Divisão do canal por tempo, frequência ou código
 - Divisão de Tempo, Divisão de Frequência
- Acesso Aleatório
 - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
 - Escuta da portadora:
 - Fácil em algumas tecnologias (cabeadas), mas difícil em outras (sem fio)
 - CSMA/CD usado no Ethernet
 - CSMA/CA usado no IEEE 802.11 (WiFi)
- Revezamento
 - Varredura (*polling*) a partir de um ponto central, reserva, passagem de permissões

Modelos

Modelo IEEE 802

- Padronização de redes locais e metropolitanas
 - Usada em várias tecnologias
- Arquitetura baseada no modelo OSI
 - Subcamada de enlace lógico (LLC)
 - Provê serviços de comunicação de quadro
 - Controle de fluxo
 - Controle de erros

Modelo IEEE 802

- Arquitetura baseada no modelo OSI (cont.)
 - Subcamada de controle de acesso ao meio (MAC)
 - Controle do acesso a um meio compartilhado
 - Enquadramento
 - Endereçamento
 - Detecção de erros
 - Camada física
 - Provê serviços de transmissão e recepção de bits
 - Interfaces elétricas e mecânicas
 - Características de sincronização
 - Especificação do meio de transmissão

Modelo IEEE 802 Vs. Modelo OSI



Modelo OSI



Modelo 802

Modelo IEEE 802

- Subcamada de acesso ao meio e a camada física
 - Determinam uma tecnologia de rede pessoal, local ou metropolitana
 - IEEE 802.3: rede local em barramento
 - Pequenas diferenças entre o Ethernet e o IEEE 802.3
 - IEEE 802.4: rede local em barramento com ficha de permissão (Token Bus)
 - IEEE 802.5: rede local em anel com ficha de permissão (Token Ring)
 - IEEE 802.11: rede local sem fio (Wi-Fi)

Modelo IEEE 802

Padrões IEEE 802 (fonte: Tanenbaum)

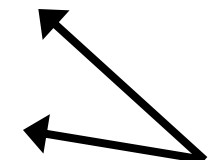
Number	Topic
802.1	Overview and architecture of LANs
802.2 ↓	Logical link control
802.3 *	Ethernet
802.4 ↓	Token bus (was briefly used in manufacturing plants)
802.5	Token ring (IBM's entry into the LAN world)
802.6 ↓	Dual queue dual bus (early metropolitan area network)
802.7 ↓	Technical advisory group on broadband technologies
802.8 †	Technical advisory group on fiber optic technologies
802.9 ↓	Isochronous LANs (for real-time applications)
802.10 ↓	Virtual LANs and security
802.11 *	Wireless LANs
802.12 ↓	Demand priority (Hewlett-Packard's AnyLAN)
802.13	Unlucky number. Nobody wanted it
802.14 ↓	Cable modems (defunct: an industry consortium got there first)
802.15 *	Personal area networks (Bluetooth)
802.16 *	Broadband wireless
802.17	Resilient packet ring

Subcamada de Enlace Lógico

- Oculta as diferenças entre os tipos de redes 802
- Fornece um formato único e uma única interface para a camada de rede
- Baseada no HDLC (*High-level Data Link Control*)
- Três tipos de serviços
 - Datagrama não confiável
 - Sem controle de fluxo e de erros
 - Datagrama com confirmação
 - Sem controle de fluxo e com controle de erros
 - Confiável orientado a conexões
 - Com controle de fluxo e de erros

Subcamada de Enlace Lógico

- Formato do quadro
 - Ponto de acesso de destino (1 byte)
 - Identificará o tipo de dado do protocolo da camada acima
 - Ponto de acesso de origem (1 byte)
 - Controle (1 ou 2 bytes)
 - Número de sequência
 - Número de confirmação



SSAP (Source Service Access Point) ou DSAP (Destination Service Access Point) são nomenclaturas herdadas da terminologia OSI que servem para identificar os protocolos de camada superior que estão usando serviço

Material Utilizado

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

Leitura Recomendada

- Capítulo 4 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