

Aulas 3 e 4

Camada de Enlace

Protocolos ponto-a-ponto e de controle de acesso ao meio

Igor Monteiro Moraes
Redes de Computadores II

ATENÇÃO!

- Esta apresentação contém partes baseadas nos seguintes trabalhos
 - Notas de aula do Prof. Marcelo Rubinstein, disponíveis em <http://www.lee.eng.uerj.br/~rubi>
 - Notas de aula do Prof. José Augusto Suruagy Monteiro, disponíveis em <http://www.nuperc.unifacs.br/Members/jose.suruagy/cursos>
 - Material complementar do livro Computer Networking: A Top Down Approach, 5th edition, Jim Kurose and Keith Ross, Addison-Wesley, abril de 2009
 - Computer Networks, Andrew S. Tanenbaum, 4a. Edição, Editora Prentice Hall

- Dois tipos de canais de comunicação
 - Canal **ponto-a-ponto**
 - Uma estação em cada extremidade
 - Redes de acesso domiciliares
 - Entre roteadores
 - Canal **difusão** (*broadcast*)
 - Várias estações conectadas ao mesmo canal
 - É necessário um protocolo para **coordenar as transmissões**
 - Protocolos de controle de acesso ao meio

Protocolos da Camada de Enlace: canal ponto-a-ponto

Controle de Enlace de Dados Ponto-a-Ponto

- 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
 - Ex.: canal discado, canal ISDN/RDSI

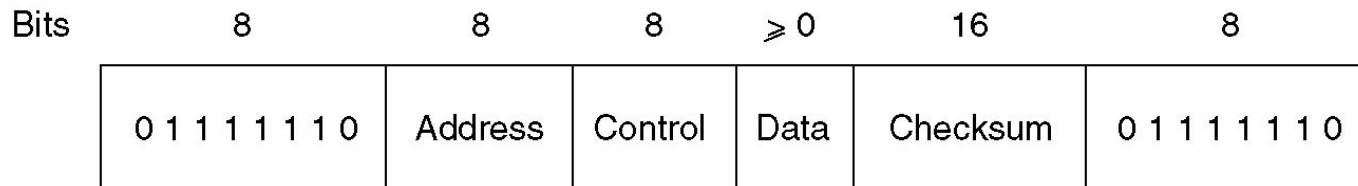
Exemplos

- Para e espera
- *Go-Back-N*
- *Selective Repeat*
- HDLC (*High-level Data Link Control*)
- PPP (*Point-to-Point Protocol*)
- Outros (principalmente para canais de difusão)

- Controle de enlace de dados de alto nível (*High-level Data Link Control*)
 - Enquadramento e detecção de erros
- Orientado a conexão
- Orientado a bits
- Usa a técnica de inserção de bits
- Usa um protocolo de janela deslizante do tipo *Go-Back-N* ou *Selective Repeat*
 - Semelhante aos mecanismos do TCP

HDLC: Formato do Quadro

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



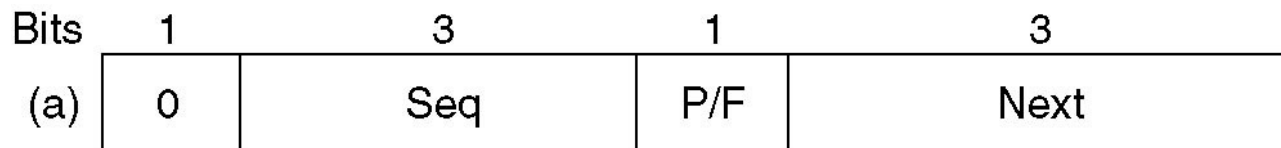
Fonte: Tanenbaum

HDLC: Tipos de Quadros

- Três tipos
 - Informação
 - Dados
 - Supervisor
 - Controle
 - Não-numerado
 - 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

- Protocolo ponto-a-ponto (*Point-to-Point Protocol*)
- Protocolo de enlace usado em linhas ponto-a-ponto na Internet
- Definido nas RFCs 1661 a 1663 e em outras
- Na verdade é multiprotocolo
- Usado em
 - Conexões de linhas privadas entre roteadores
 - Conexões de acesso entre estações de usuários domiciliares e roteadores

- 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
 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

Requisitos de Projeto do PPP

- Enquadramento do pacote
 - Encapsulamento de 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
 - Deve transportar qualquer padrão de bits no campo de dados
- Múltiplos protocolos de camada de rede
- Múltiplos tipos de enlace

Requisitos de Projeto do PPP

- Detecção de erros
 - Sem correção
- 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
- Simplicidade

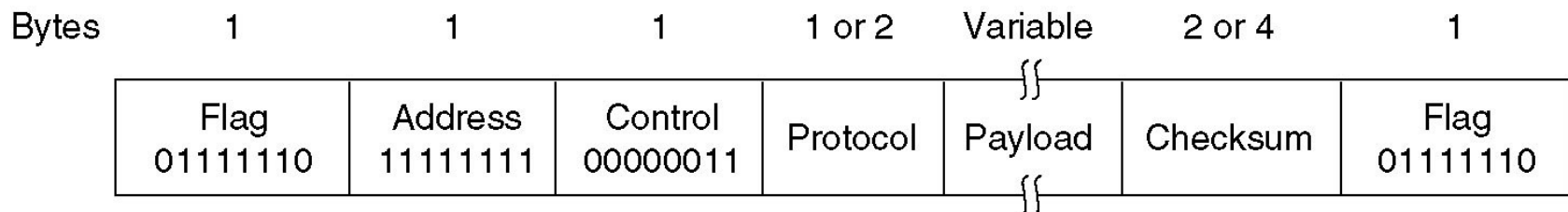
Outras Características do PPP

- 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!

Formato de Quadro

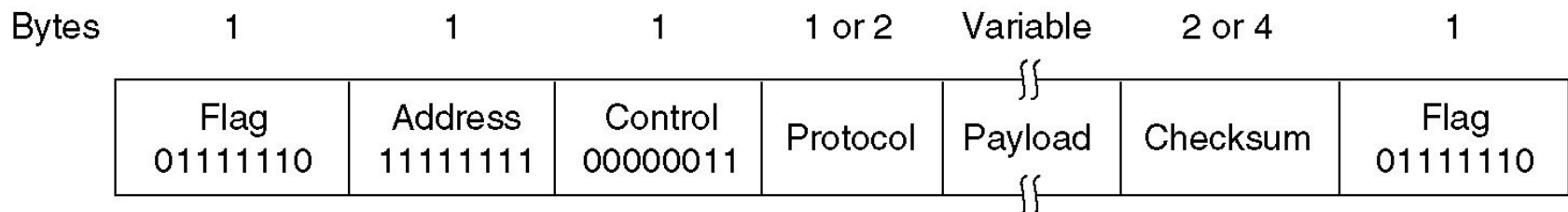
- *Flag* de início
- Endereço
- Controle
 - Para quadros não numerados é 00000011
 - Sem utilidade no momento
- Protocolo
 - Tipo de pacote da carga útil



Fonte: Tanenbaum

Formato de Quadro

- Carga útil
 - Possui um tamanho máximo negociado
 - Padrão é 1500 octetos
 - Byte de escape é 01111101
- Verificação
 - CRC
- *Flag* de fim



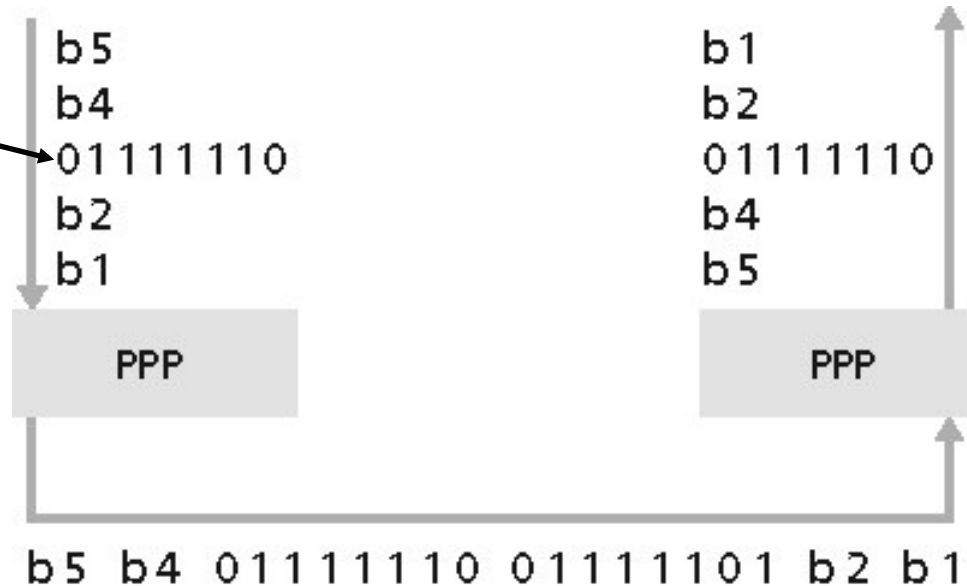
Fonte: Tanenbaum

Byte Stuffing (Enchimento)

- Requisito de “transparência dos dados”
 - Campo de dados pode conter o padrão do *flag* <01111110>
 - Um <01111110> recebido 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 (controle de escape), continua com a recepção dos dados
 - Apenas um 01111110 → byte de *flag*

Byte Stuffing

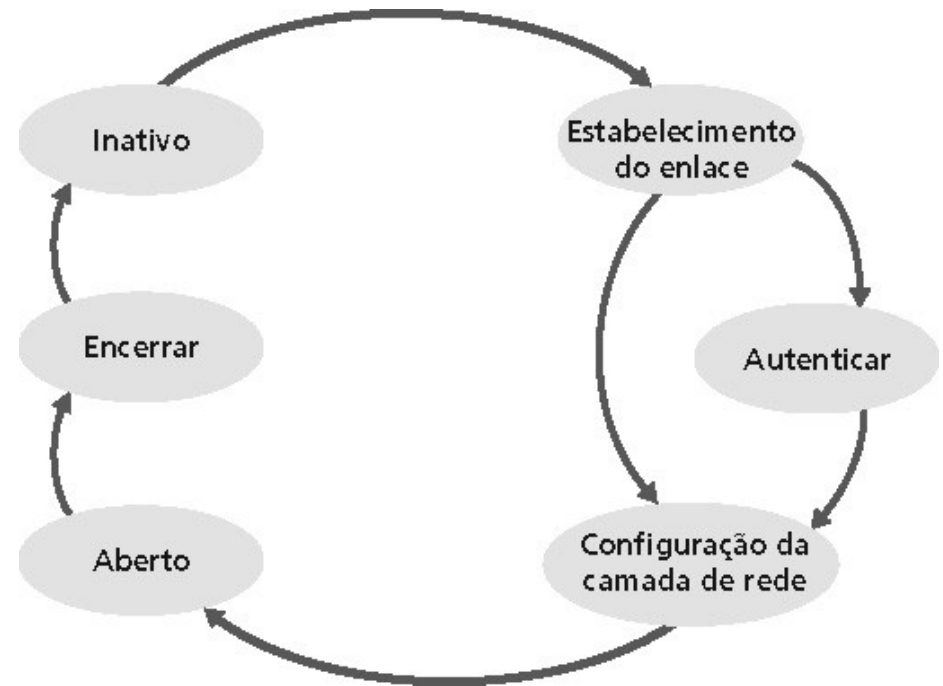
byte com o padrão
do *flag* nos dados a
enviar



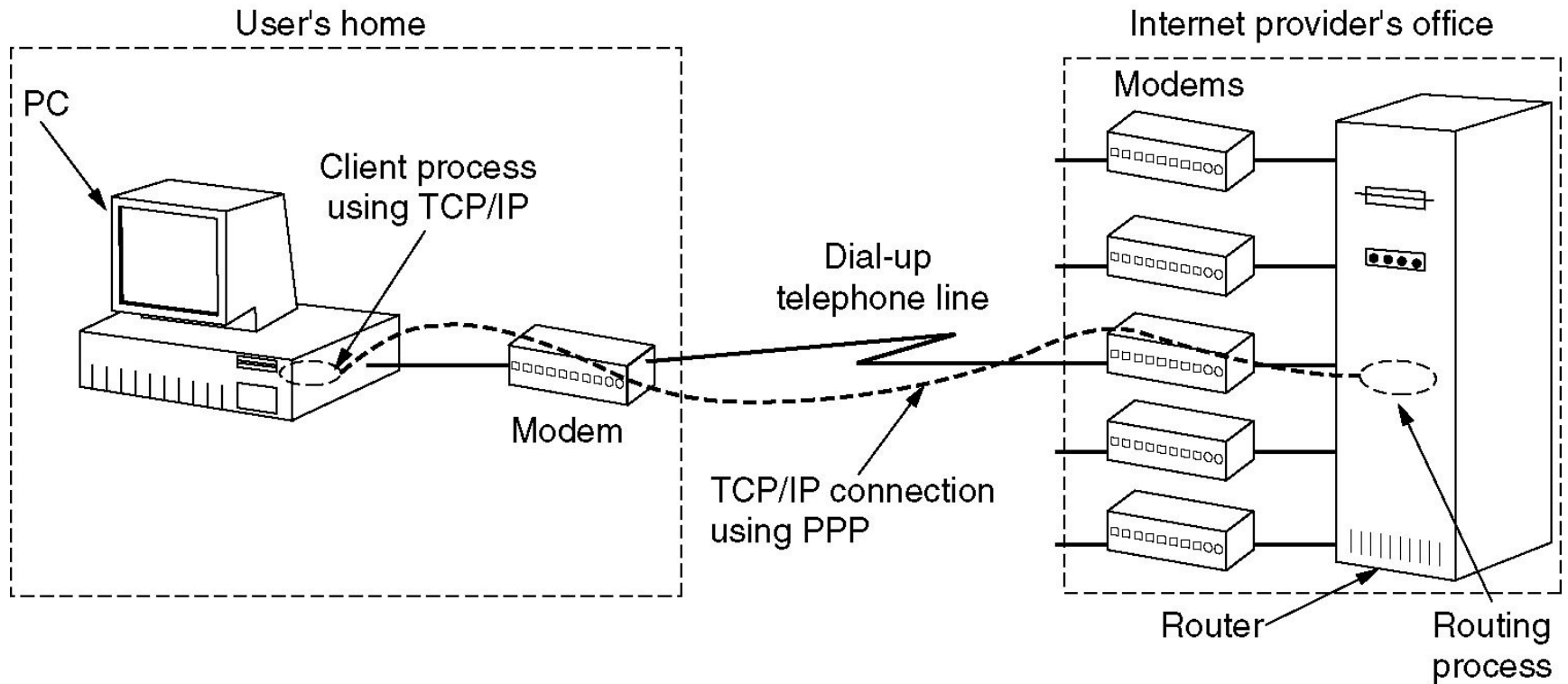
byte com o padrão de escape
acrescentado nos dados transmitidos
seguido por um byte com padrão de *flag*

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

- **Configurar o enlace PPP**
 - Compr. máx. quadro
 - Autenticação, etc.
- **Obter/configurar informações da camada de rede**
 - Para IP: transporta msgs. do Protocolo de Controle IP (IPCP) (campo de protocolo: 8021) para configurar/obter o endereço IP



Conexão através de um usuário domiciliar (fonte: Tanenbaum)



- 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
 - Selecionam 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)

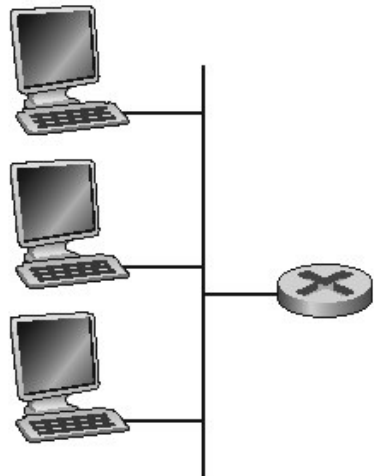
- Orientado a caracteres
- Usa a técnica de inserção de bytes de *flags* em linhas de discagem por modem
 - PPP pode usar linhas SONET, linhas HDLC orientadas a bits, circuitos RDSI e outros
- Possui dois modos de transmissão
 - Não confiável
 - Sem números de sequência e confirmações
 - Confiável
 -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

Protocolos da Camada de Enlace: canal de difusão

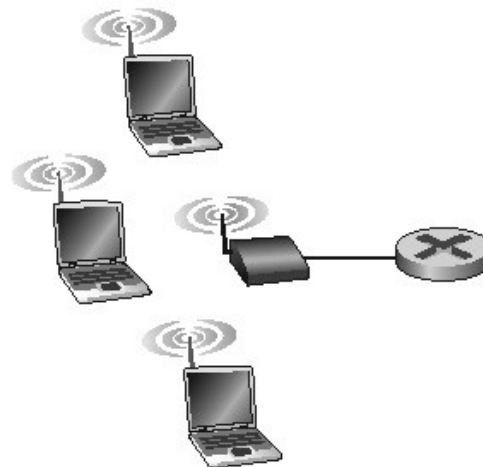
- Protocolos de acesso múltiplo usados em canais de difusão (*broadcast*)
 - Coordenação de transmissores e de receptores em um canal de difusão **compartilhado**
 - São algoritmos distribuídos que determinam como os nós compartilham o canal
 - Determinam **quando um nó pode transmitir**
 - Comunicação 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

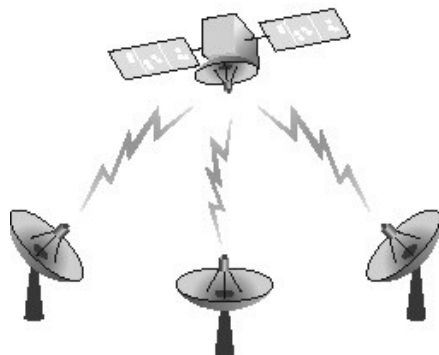
Compartilhado com fio
(por exemplo, Ethernet)



Compartilhado sem fio
(por exemplo, Wi-Fi)



Satélite



Coquetel



- Dois ou mais nós transmitem simultaneamente → **colisão**
 - Se um nó receber dois ou mais sinais ao mesmo tempo
 - Nenhum dos receptores consegue decodificar o que foi recebido
 - Todos os quadros transmitidos são perdidos → **desperdício**

- Dois ou mais nós transmitem simultaneamente → **colisão**
 - Se um nó receber dois ou mais sinais ao mesmo tempo
 - Nenhum dos receptores consegue decodificar o que foi recebido
 - Todos os quadros transmitidos são perdidos → **desperdício**

**Como coordenar as transmissões
para evitar colisões?**

Protocolo “Ideal” de Acesso Múltiplo

- Para um canal de broadcast 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. Completamente descentralizado
 - Nenhum nó especial (mestre) para coordenar as transmissões
 - Nenhuma sincronização de relógios ou *slots*
 4. Simples para que sua implementação seja barata

Taxonomia dos Protocolos MAC

- Divisão de Canal
 - Divide o canal em pequenos “pedaços” (*slots*/compartimentos de tempo, frequência, código)
 - Aloca “pedaço” a um dado nó para uso **exclusivo** deste
- Acesso Aleatório
 - Canal não é dividido, podem ocorrer colisões
 - “Recuperação” das colisões
- Revezamento
 - Nós se alternam em revezamento
 - Nós que possuem mais dados a transmitir podem demorar mais quando chegar a sua vez

Protocolos de Divisão do Canal

Protocolos de Divisão de Canal

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

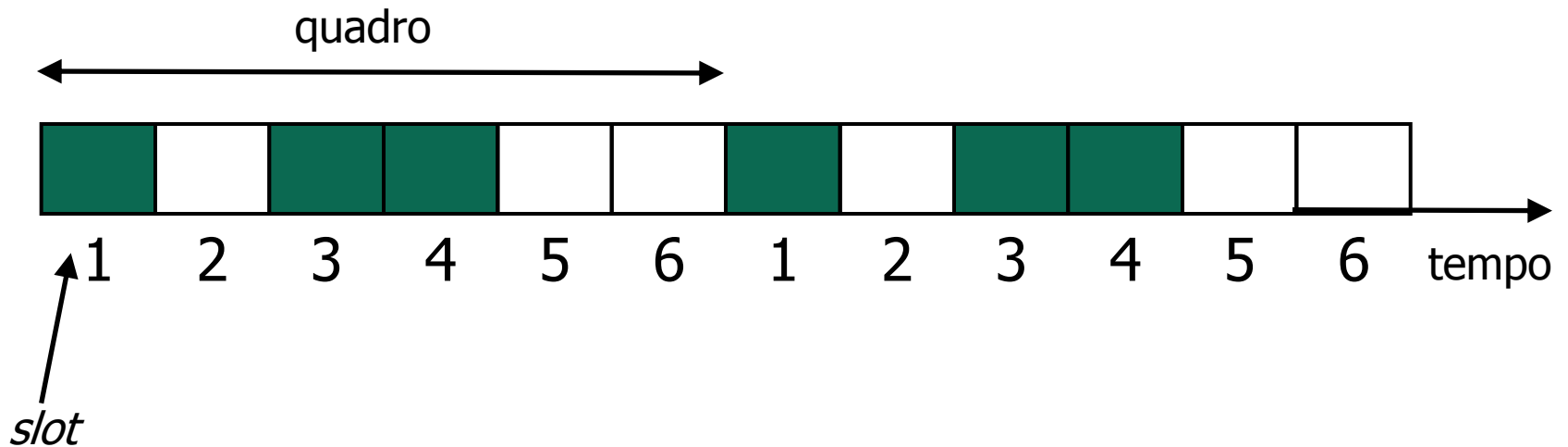
Protocolos de Divisão de Canal

- TDMA
- FDMA
- CDMA
- Outros

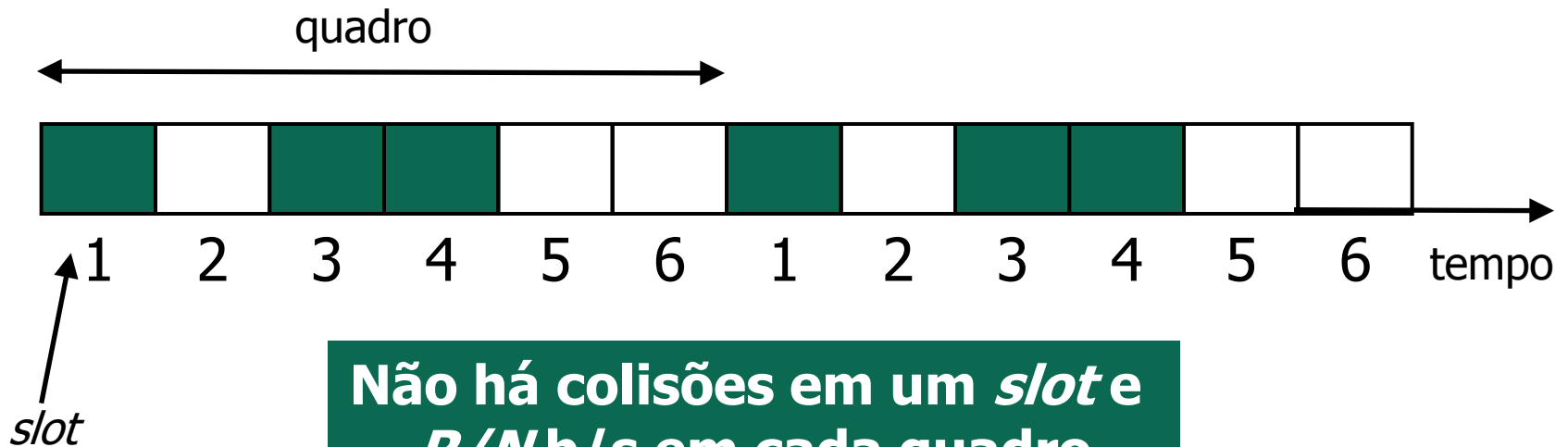
- Acesso múltiplo por divisão de tempo (*Time Division Multiple Access*)
 - É função do tempo
- Tempo é dividido em *slots* e quadros
 - Geralmente de tamanho fixo e igual ao tempo para transmitir um pacote
 - Quadro é um conjunto de *slots*
- Em cada *slot* **somente uma estação pode transmitir**
 -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

- Exemplo
 - Rede local com 6 estações

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

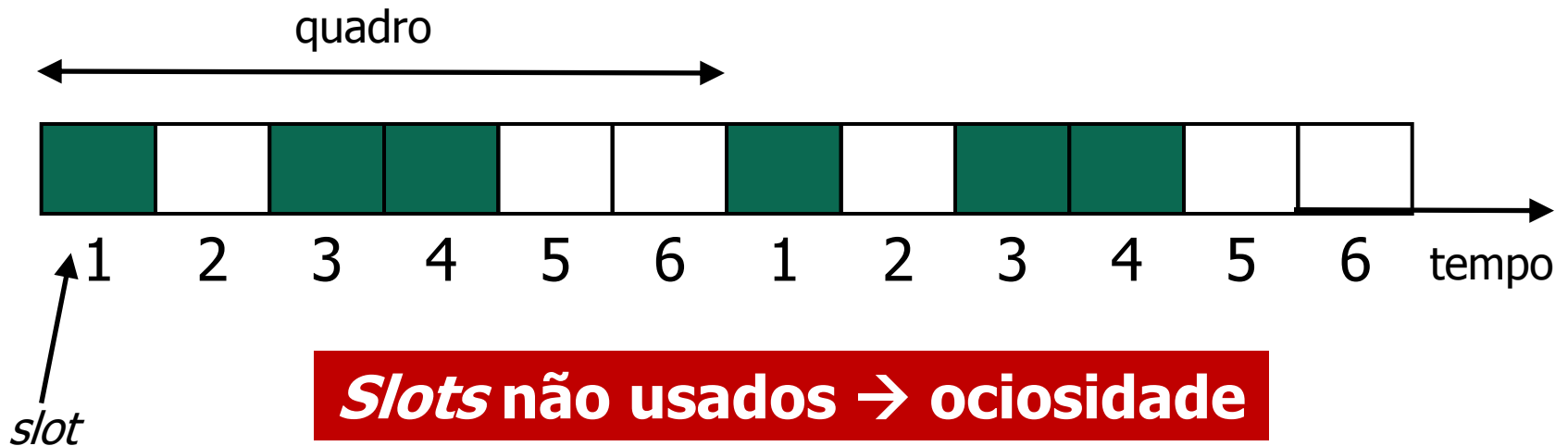


- Exemplo
 - Rede local com 6 estações
 - *Slots* 1, 3 e 4 com pacotes
 - *Slots* 2, 5 e 6 ociosos



Não há colisões em um *slot* e R/N b/s em cada quadro

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



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

- Acesso múltiplo por divisão de código (*Code Division Multiple Access*)
 - É função do código
- Cada estação está associada a um código diferente
 - Destino deve conhecer o código da fonte
- Muito usado em redes sem-fio
 - Mais detalhes no Capítulo 6
- Vantagem
 - Estações podem transmitir simultaneamente usando códigos diferentes
 - Depende do código usado

- Também 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
 - Por divisão de tempo (*Time Division Multiplexing* - TDM)
 - Por divisão de frequência (*Frequency Division Multiplexing* - FDM)
 - Por divisão de comprimentos de onda (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM)

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

Protocolos de Acesso Aleatório

- Quando nó tem um pacote para transmitir
 - Tenta transmitir à taxa máxima (R b/s) do canal
 - Nenhuma coordenação *a priori* entre os nós
- Se dois ou mais nós transmitem ao mesmo tempo: **colisão**
 - Acesso ao meio é realizado de forma não determinística
 - Um nó **espera um tempo aleatório** para retransmitir
- O protocolo MAC de acesso aleatório é responsável por
 - **Detectar** colisões
 - **Recuperar** colisões

Protocolos de Acesso Aleatório

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

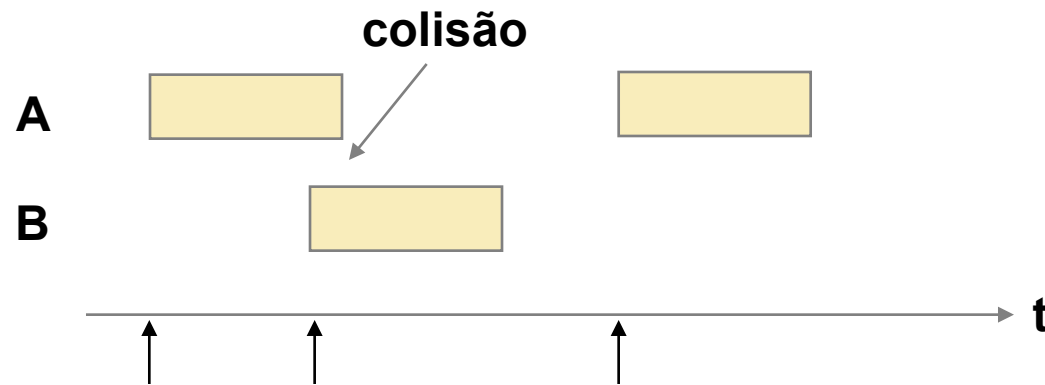
Rede Aloha

- Criada por Norman Abramson em 1960
 - Professor da Universidade do Haváí
- Primeira rede baseada em pacotes
- Interligação de computadores em várias ilhas do Haváí compartilhando um meio (radiofrequência)
 - Comunicação com um computador central
 - Disputa do meio

- Estações transmitem quando desejar
 - Duas ou mais transmiem ao mesmo tempo → **colisão**
- Como as colisões são “detectadas” (inferidas)?
 - Quadros chegam com erros → receptor não envia reconhecimento positivo
 - Nesse caso, o próprio quadro recebido é retransmitido
 - Colisão inferida através do não recebimento do reconhecimento positivo em um tempo t

- Como as colisões são recuperadas?
 - Retransmissão dos quadros após a temporização
 - Retransmissão imediata com probabilidade p
 - Caso contrário, espera pelo próximo **tempo de quadro**
 - Tempo para transmitir um quadro-padrão de comprimento fixo
 - Após a espera, retransmite o quadro com probabilidade p ou espera por um outro tempo de quadro com $1 - p$
 - Tempo de espera é **aleatório**

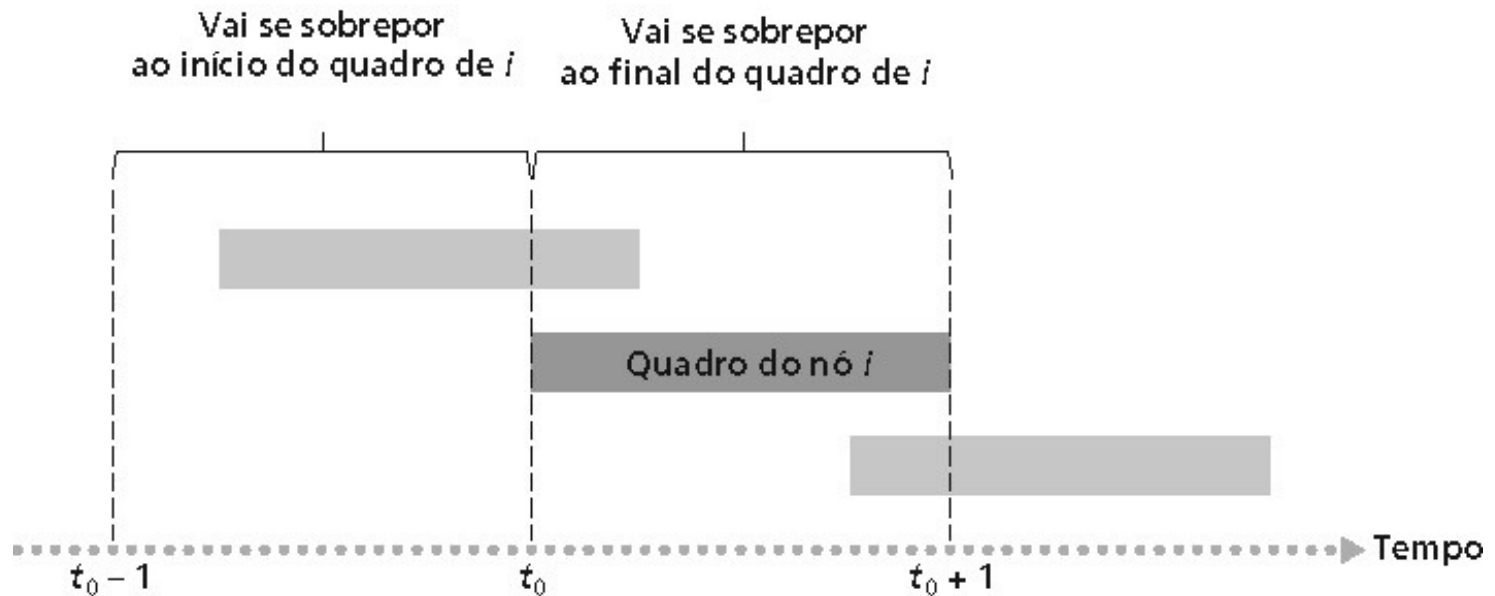
- Como as colisões são recuperadas?
 - Retransmissão dos quadros após a temporização
 - Retransmissão imediata com probabilidade p
 - Caso contrário, espera pelo próximo **tempo de quadro**
 - Tempo para transmitir um quadro-padrão de comprimento fixo
 - Após a espera, retransmite o quadro com probabilidade p ou espera por um outro tempo de quadro com $1 - p$
 - Tempo de espera é **aleatório**
 - Caso contrário, colisões se repetiriam
- Problema: **baixa eficiência**
 - Cálculo a seguir



Não importa se apenas o último e o primeiro bit de dois quadros colidiram → erro de *checksum*

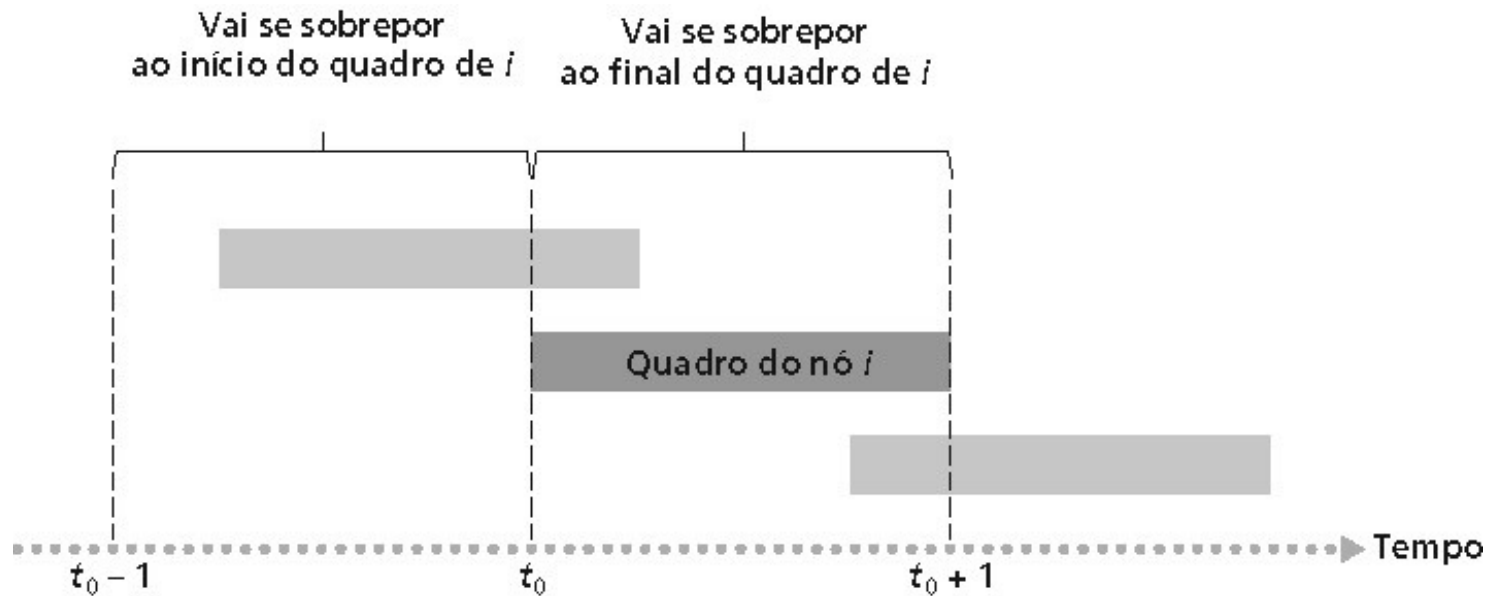
Eficiência do Aloha

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



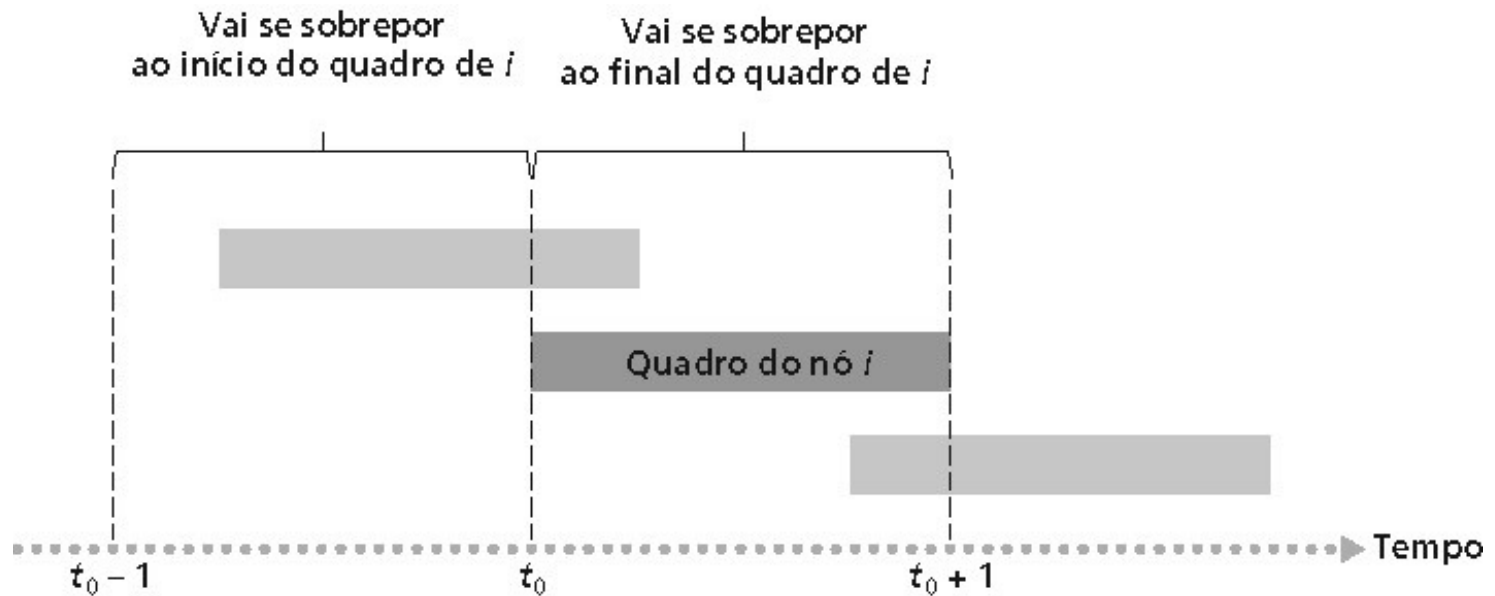
Eficiência do Aloha

$P(\text{sucesso por um dado nó}) =$



Eficiência do Aloha

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



Eficiência do Aloha

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



$$P(\text{sucesso por um dado nó}) = p(1-p)^{n-1}(1-p)^{n-1} = p(1-p)^{2(n-1)}, n = \# \text{ nós}$$

- Escolhendo p ótimo e fazendo $n \rightarrow \infty$

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

Eficiência do Aloha

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



$$P(\text{sucesso por um dado nó}) = p(1-p)^{n-1}(1-p)^{n-1} = p(1-p)^{2(n-1)}, n = \# \text{ nós}$$

- Escolhendo p ótimo e fazendo $n \rightarrow \infty$

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

Baixa eficiência!

- 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**
 - Se dois ou mais nós transmitirem em um *slot*, todos os nós detectam a colisão

- 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, nó poderá enviar um novo quadro no próximo *slot*
 - Caso haja uma colisão (detectada antes do final do intervalo), nó retransmite o quadro em cada intervalo subsequente com probabilidade p até obter sucesso

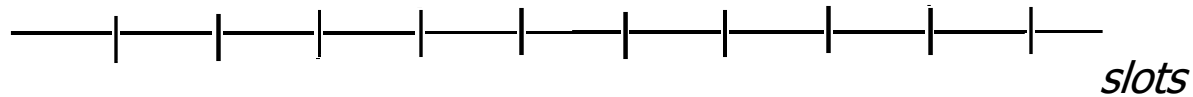
Slotted Aloha

- Operação

Nó 1

Nó 2

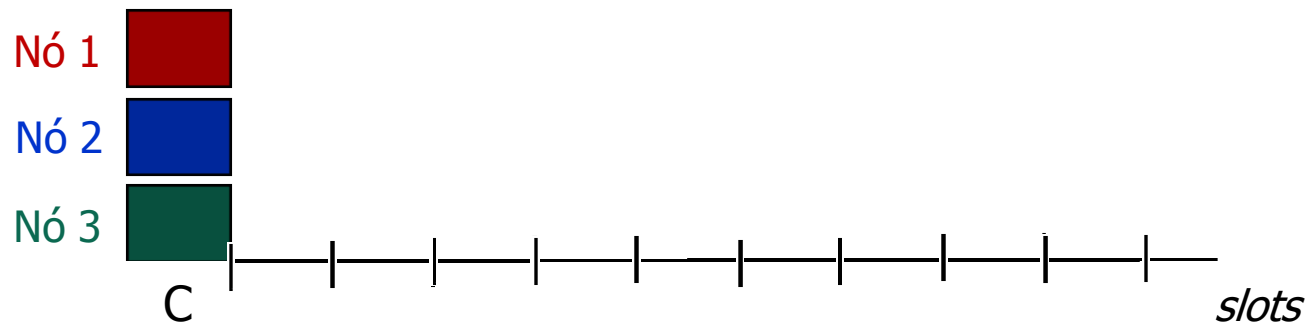
Nó 3



C = colisão
E = vazio
S = sucesso

Slotted Aloha

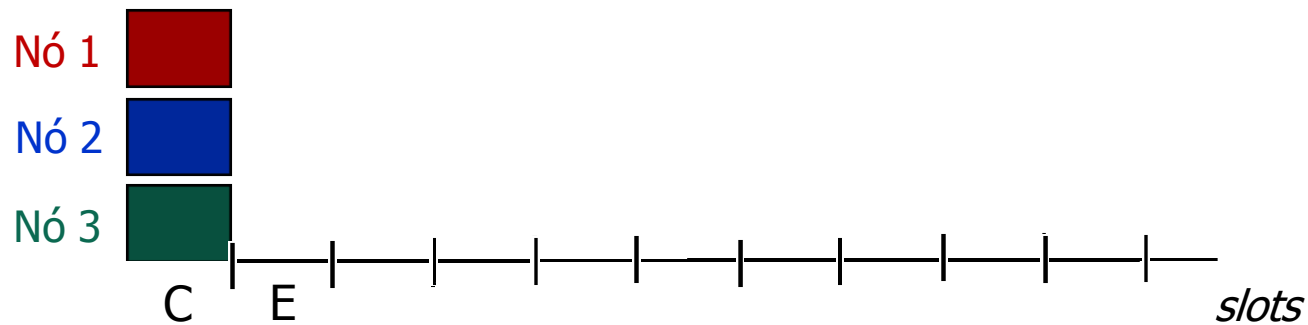
- Operação



C = colisão
E = vazio
S = sucesso

Slotted Aloha

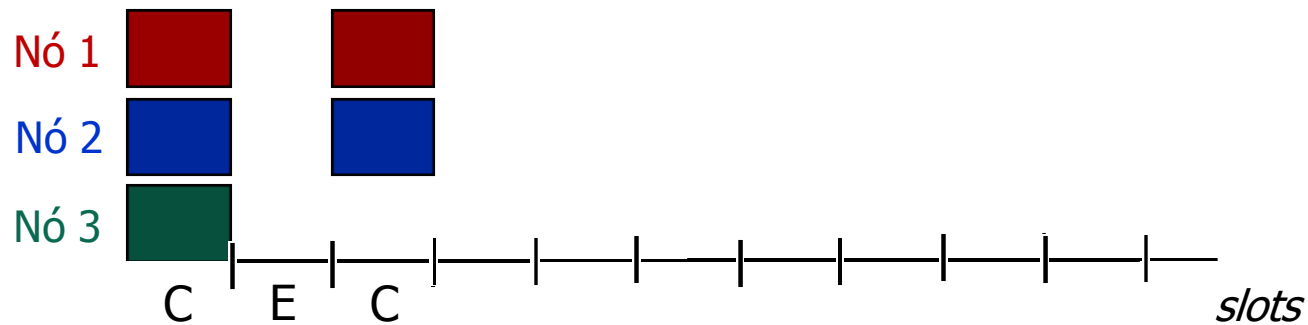
- Operação



C = colisão
E = vazio
S = sucesso

Slotted Aloha

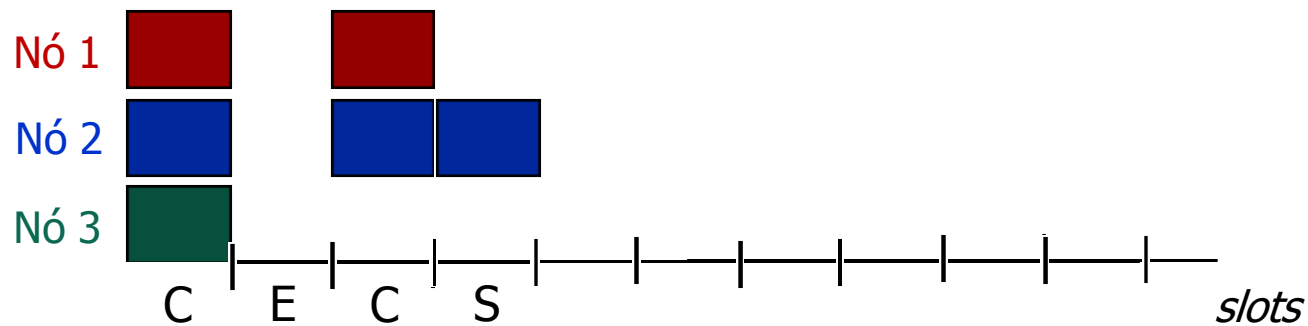
- Operação



C = colisão
E = vazio
S = sucesso

Slotted Aloha

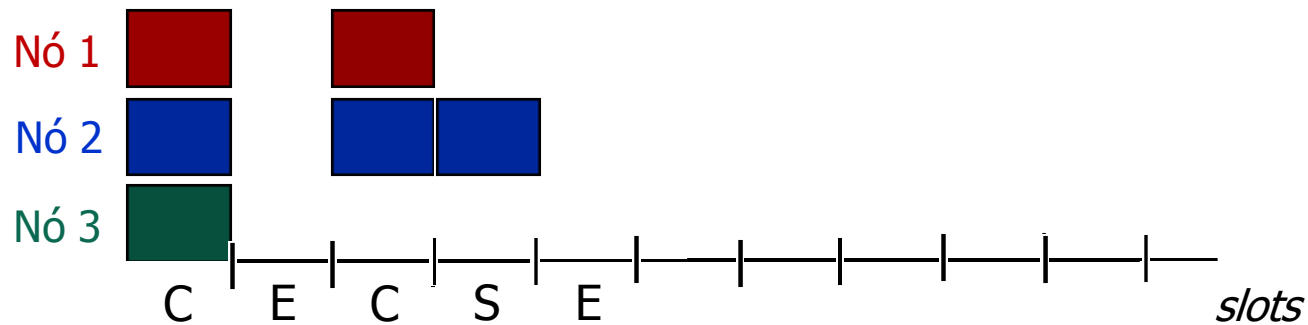
- Operação



C = colisão
E = vazio
S = sucesso

Slotted Aloha

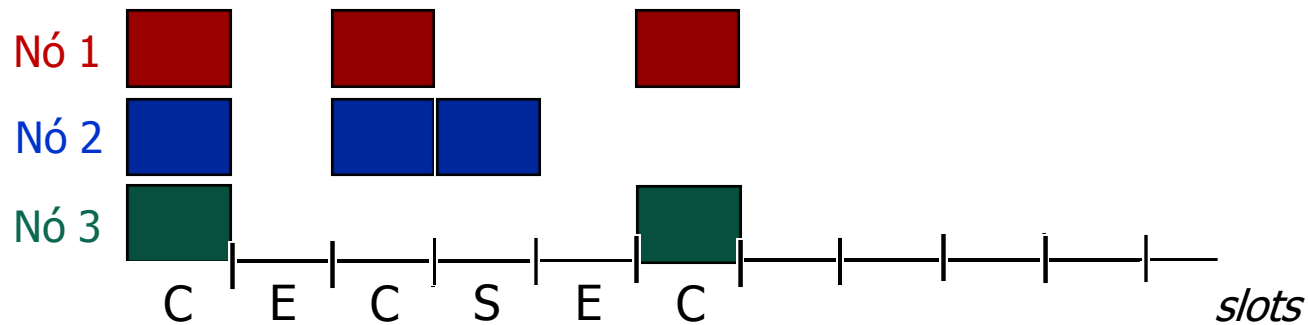
- Operação



C = colisão
E = vazio
S = sucesso

Slotted Aloha

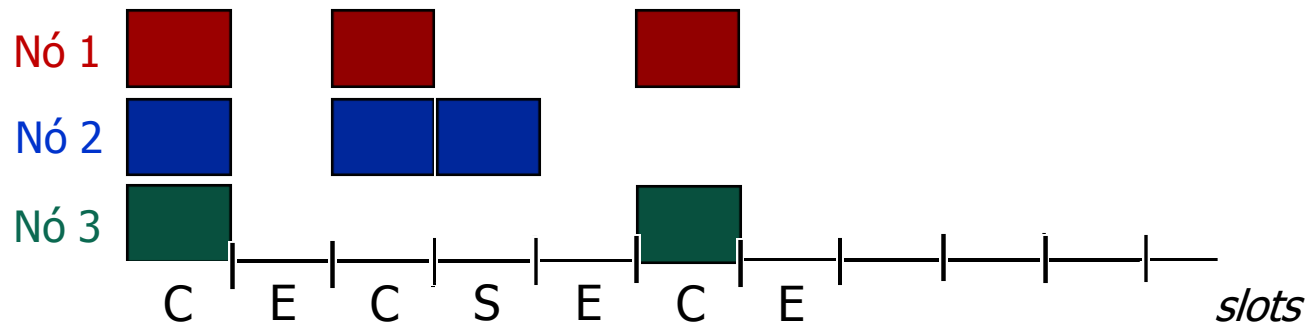
- Operação



C = colisão
E = vazio
S = sucesso

Slotted Aloha

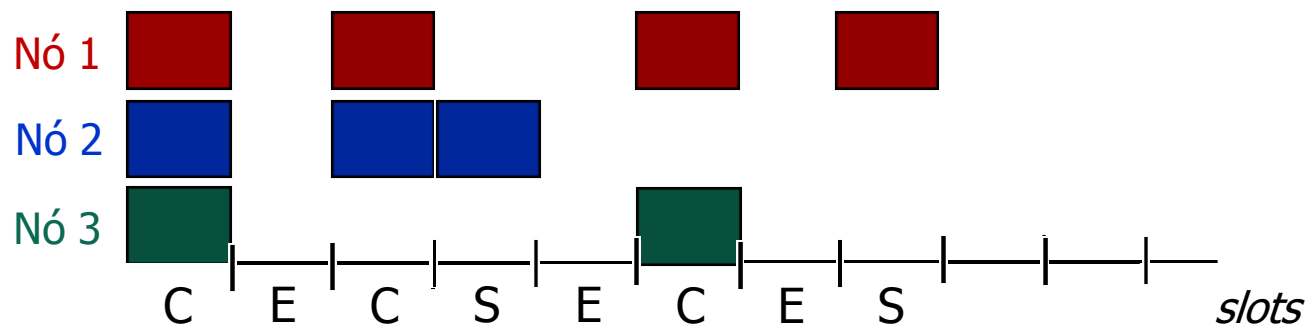
- Operação



C = colisão
E = vazio
S = sucesso

Slotted Aloha

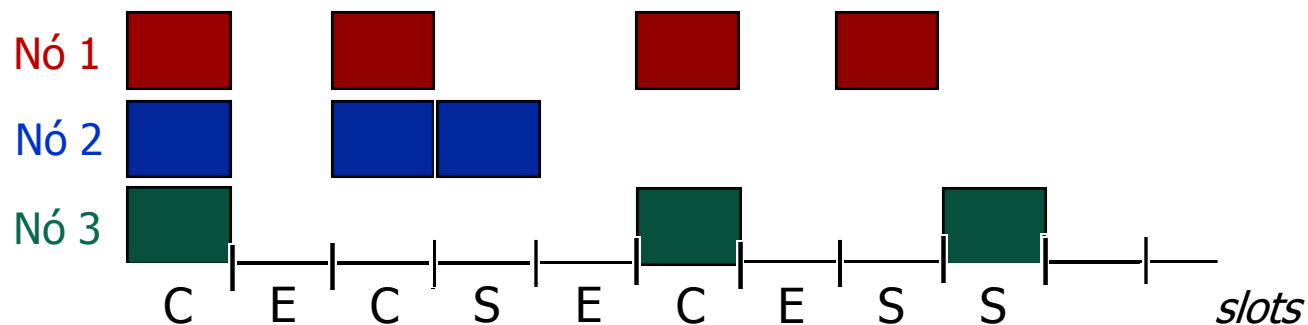
- Operação



C = colisão
E = vazio
S = sucesso

Slotted Aloha

- Operação



C = colisão
E = vazio
S = sucesso

- Vantagens
 - Único nó ativo pode transmitir continuamente na taxa máxima (R b/s) do canal
 - Altamente descentralizado e simples
 - Apenas os *slots* nos nós precisam estar sincronizados
 - Simples

- Desvantagens
 - Quando há colisões → *slots* desperdiçados
 - *Slots* ociosos → desperdício
 - Tempo de espera para retransmitir
 - Nós podem ser capazes de detectar colisões num tempo inferior ao da transmissão do pacote
 - 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 em um *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 muitos nós, faça limite para $np(1-p)^{n-1}$
 - Quando $n \rightarrow \infty$, eficiência = $1/e = 37\%$

Mais eficiente do que o Aloha, mas ainda é baixa!

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

- Motivação: aumentar a eficiência
- Vários tipos
 - CSMA persistente
 - CSMA não-persistente
 - CSMA p-persistente
 - CSMA/CD (*Collision Detection*)
 - CSMA/CA (*Collision Avoidance*)

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

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

Sim!
Mas por quê?

- Estação que quer transmitir um quadro escuta o meio em t_0



- Estação que quer transmitir um quadro escuta o meio em t_0
 - Meio está livre para A, logo A transmite o quadro



- Estação que quer transmitir um quadro escuta o meio em t_0
 - Meio está livre para A, logo A transmite o quadro
- Duas ou mais estações escutam o meio em t_1



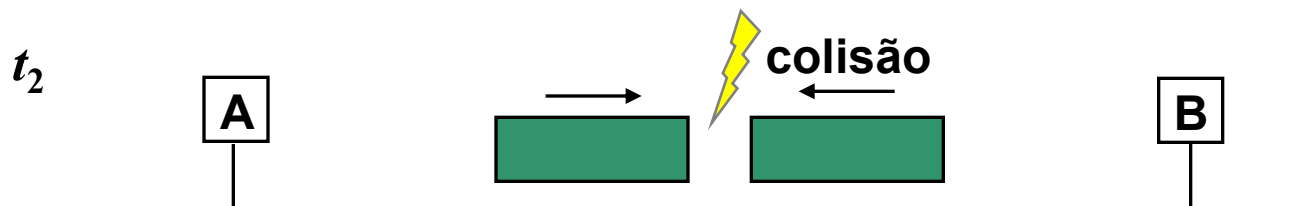
- Estação que quer transmitir um quadro escuta o meio em t_0
 - Meio está livre para A, logo A transmite o quadro
- Duas ou mais estações escutam o meio em t_1
 - Não escutam a transmissão da outra devido ao **atraso de propagação** do sinal
 - Meio está livre para B, logo B também transmite o quadro



- Estação que quer transmitir um quadro escuta o meio em t_0
 - Meio está livre para A, logo A transmite o quadro
- Duas ou mais estações escutam o meio em t_1
 - Não escutam a transmissão da outra devido ao **atraso de propagação** do sinal
 - Meio está livre para B, logo B também transmite o quadro



- Estação que quer transmitir um quadro escuta o meio em t_0
 - Meio está livre para A, logo A transmite o quadro
- Duas ou mais estações escutam o meio em t_1
 - Não escutam a transmissão da outra devido ao **atraso de propagação** do sinal
 - Meio está livre para B, logo B também transmite o quadro



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

Sim!
Mas por quê?

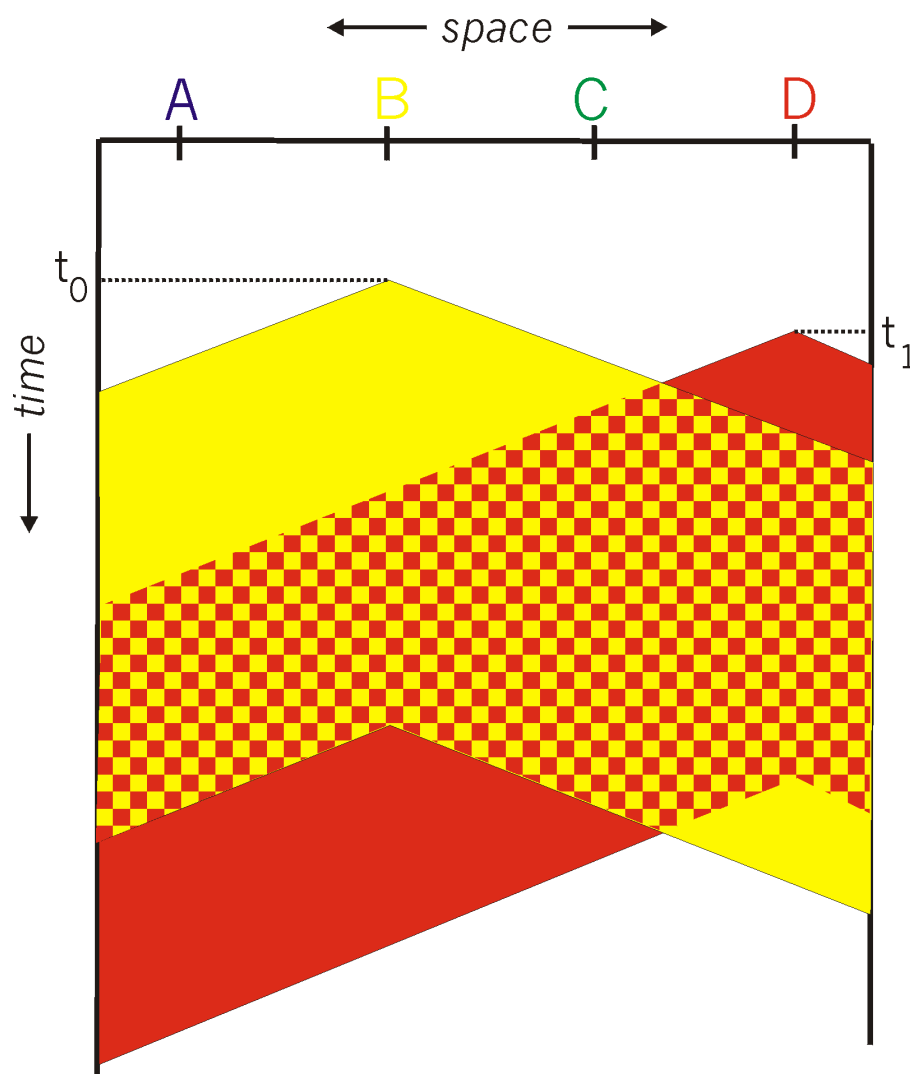
Porque existe o atraso de propagação

CSMA

- 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
 - Bits enviados por B ainda não chegaram a D



Colisão!



- Mesmo com a escuta da portadora, ainda podem ocorrer colisões
 - Devido à “memória” do meio físico
 - Atraso de propagação = d/s
 - d : comprimento do enlace
 - s = velocidade de propagação no meio
 - 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

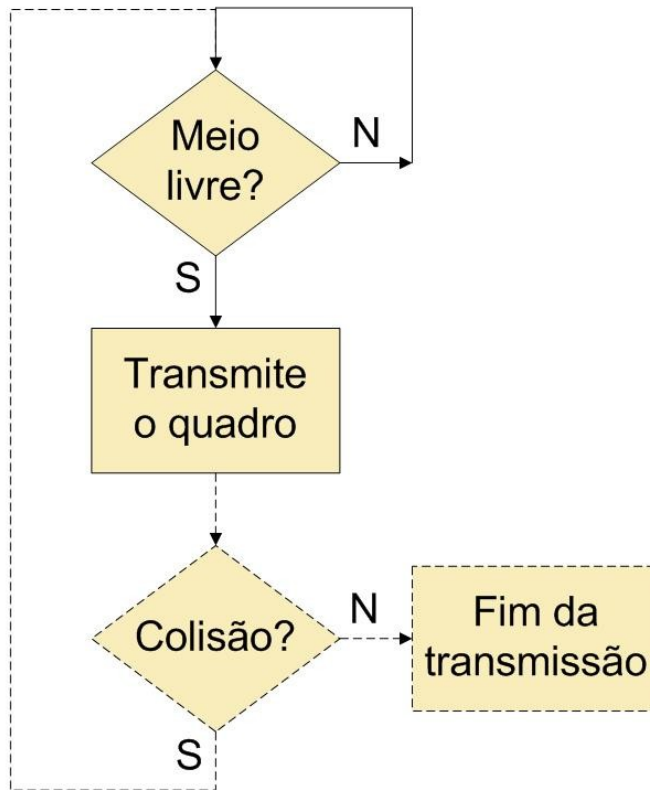
- Colisão
 - **Inferida** através do não recebimento de um reconhecimento positivo em um tempo t
 - CSMA persistente
 - CSMA não-persistente
 - CSMA p-persistente
 - CSMA/CA (*Collision Avoidance*)
 - **Detectada**
 - CSMA/CD (*Collision Detection*)

CSMA Persistente

- Quando a estação tem um quadro para transmitir
 - Escuta o meio
- Se o meio está livre
 - Transmite
- Se o meio está ocupado
 - **Continua escutando** o meio até que ele fique livre
- Se há uma colisão
 - Espera um tempo aleatório e o processo recomeça

CSMA Persistente

Retransmissão



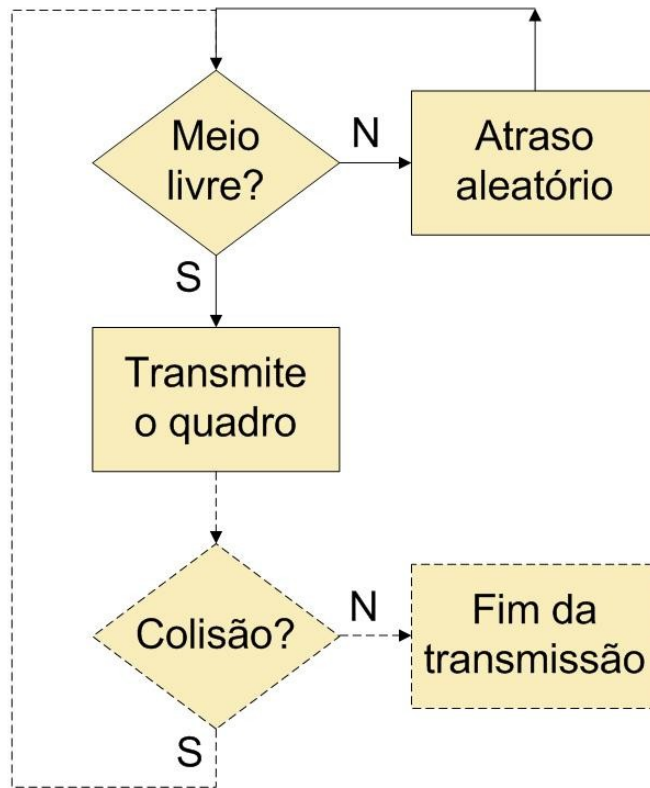
- Pode ocorrer uma colisão após o meio ficar livre

CSMA Não-persistente

- Quando a estação tem um quadro para transmitir
 - Escuta o meio
- Se o meio está livre
 - Transmite
- Se o meio está ocupado
 - Estação **espera um tempo aleatório** e só depois volta a escutar o meio
- Se há uma colisão
 - Espera um tempo aleatório e o processo recomeça

CSMA Não-persistente

Retransmissão



- Reduz a probabilidade de colisão após o meio ficar livre
- Possui um maior atraso
 - 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 de propagação máximo
- Idéia
 - Probabilidade p de transmitir o quadro no início de um *slot*

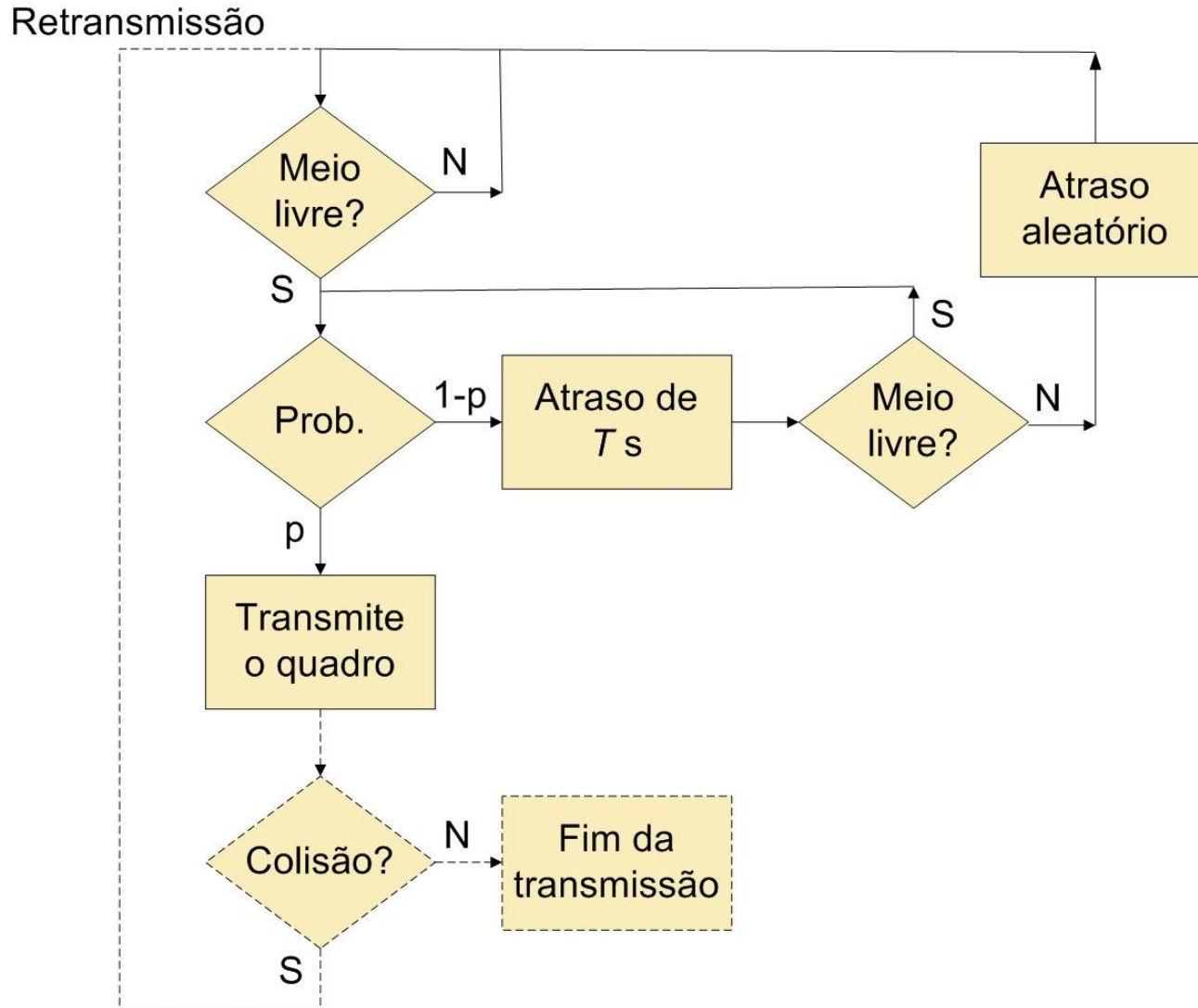
CSMA p-persistente

- Quando a estação tem um quadro para transmitir
 - Escuta o meio
- Se o meio está livre
 - Estação transmite o quadro com probabilidade p ou
 - Espera pelo próximo *slot* com probabilidade $q = 1-p$
 - Se o meio está livre, novo sorteio
 - Se o meio está ocupado, espera um tempo aleatório e reinicia o processo

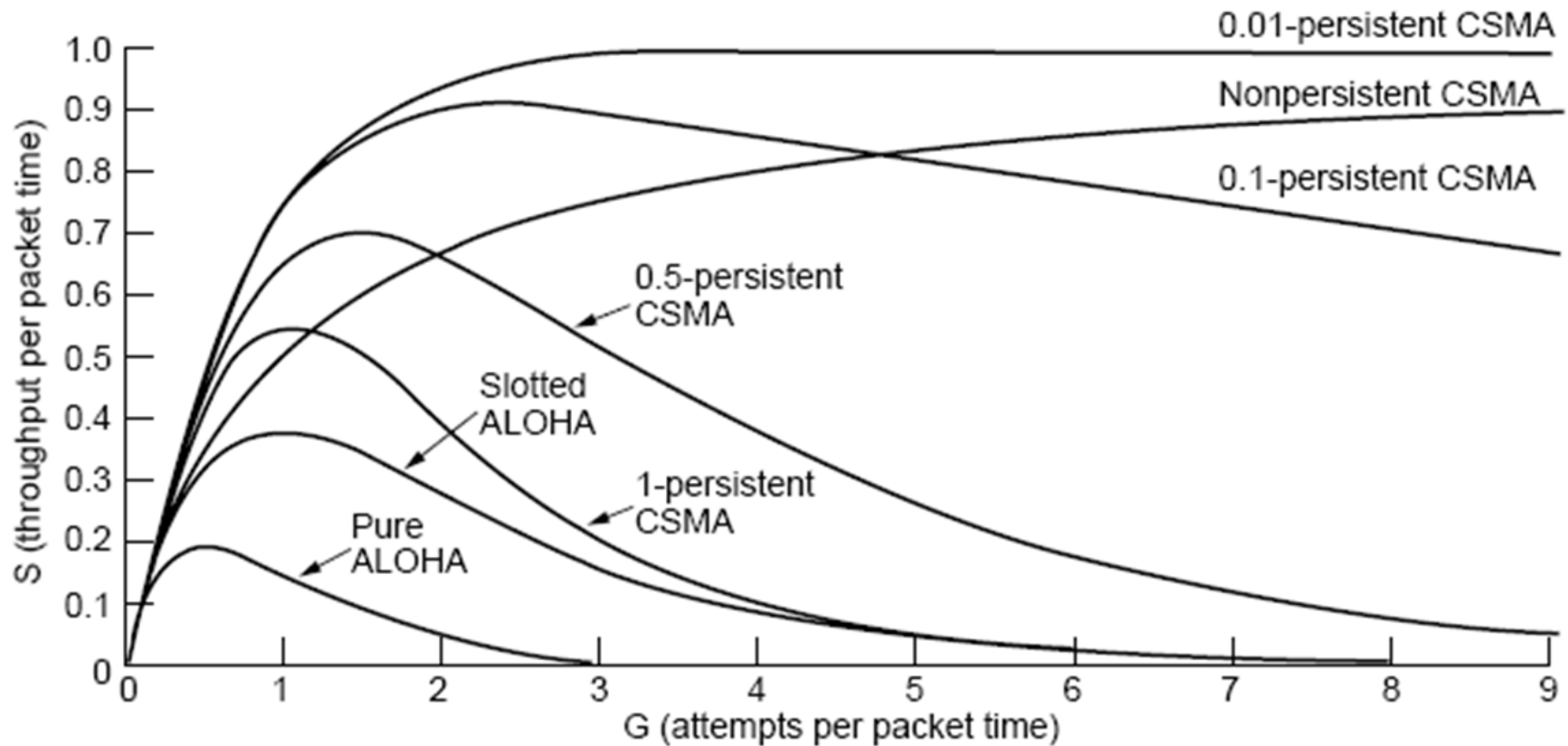
CSMA p-persistente

- Se o meio está ocupado
 - Escuta o meio até que ele fique livre
- Se há uma colisão
 - Espera um tempo aleatório e o processo recomeça

CSMA p-persistente



Utilização do canal x carga (fonte: Tanenbaum)



- Objetivo: aumentar a eficiência
- Como? Detectar colisões
 - Interromper a transmissão de um quadro, cujo conteúdo está corrompido
 - Reduzir o tempo de ocupação do meio

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
 - Sistema com um único canal e *half-duplex*
 - Estação cancela a transmissão assim que detecta a colisão
 - Reduz o desperdício
 - Informação da colisão enviada para todas as estações tomarem conhecimento
 - Reforço de colisão (*jam*)
 - Diminui-se a duração dos efeitos das colisões

- Recuperação de colisão
 - Nova tentativa de transmissão após um tempo aleatório caso detecte uma colisão
 - Como o CSMA p-persistente
 - Estação transmite o quadro com probabilidade p ou espera pelo próximo *slot* com probabilidade $1-p$

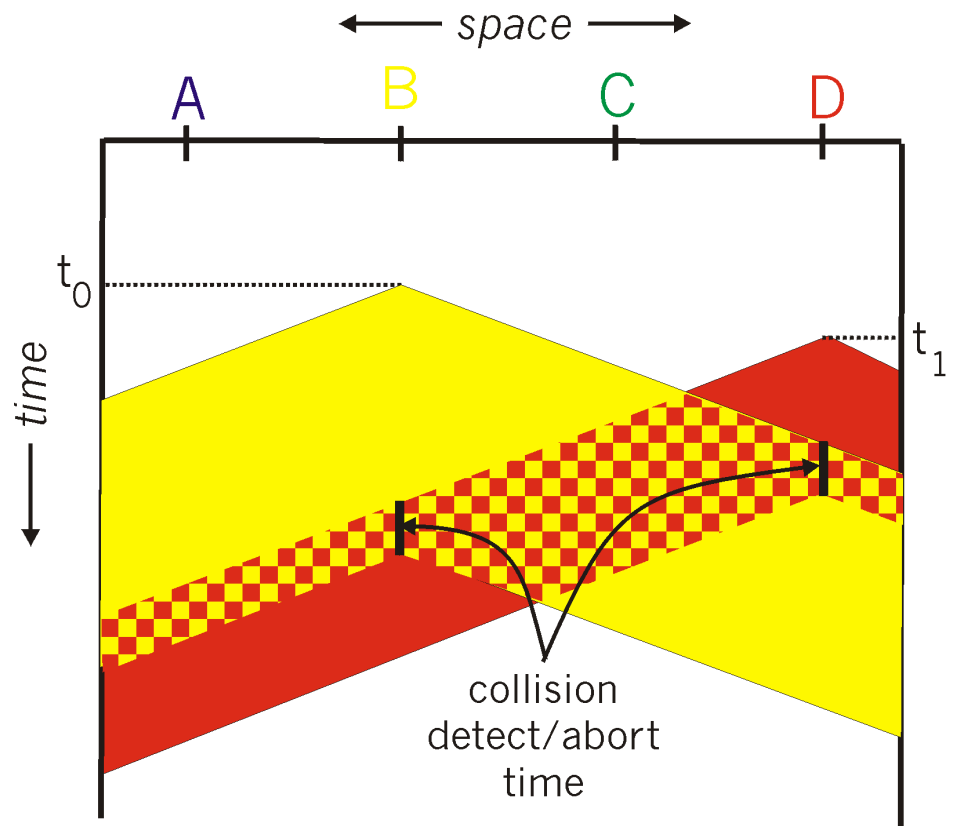
- Analogia humana: bate papo educado!
- Complexidade da detecção de colisão
 - Fácil em redes locais cabeadas
 - Medir a potência do sinal
 - Comparar o sinal recebido com o transmitido
 - Difícil em redes locais sem-fio
 - O receptor é desligado durante a transmissão

CSMA/CD

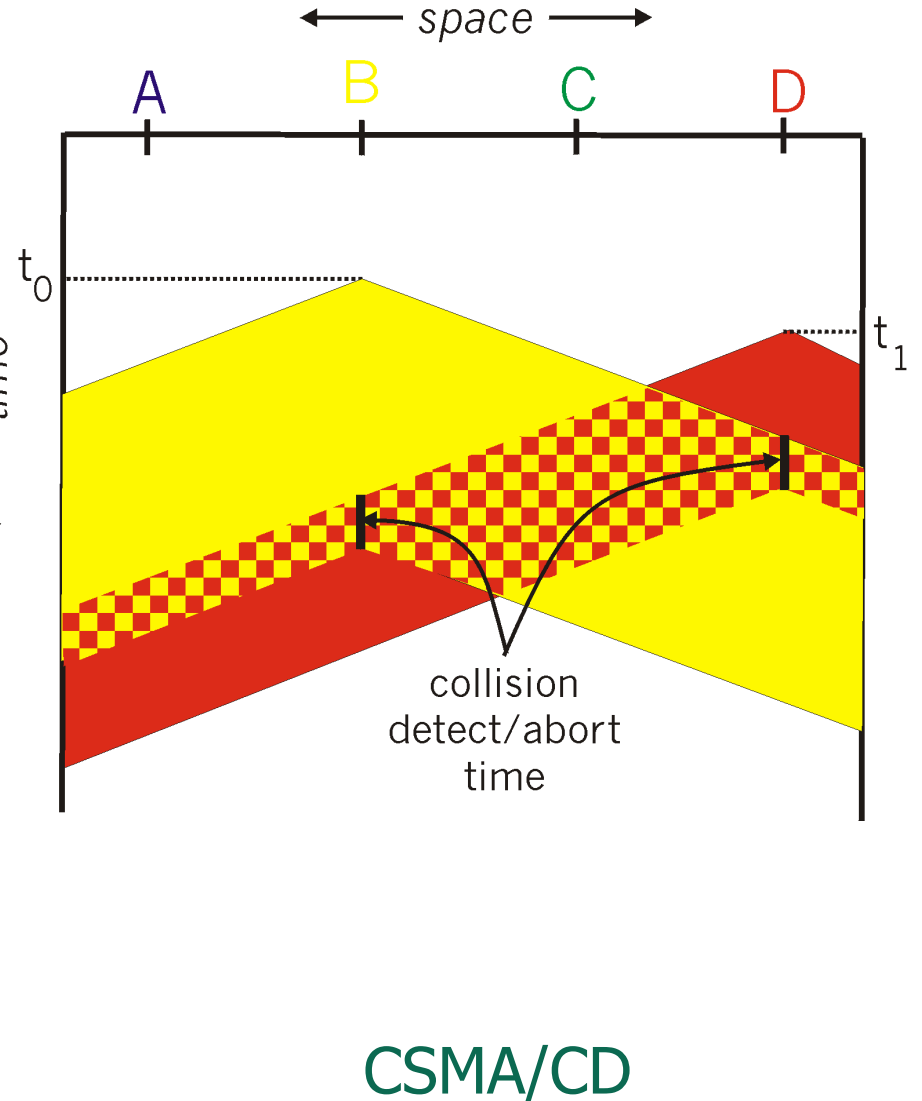
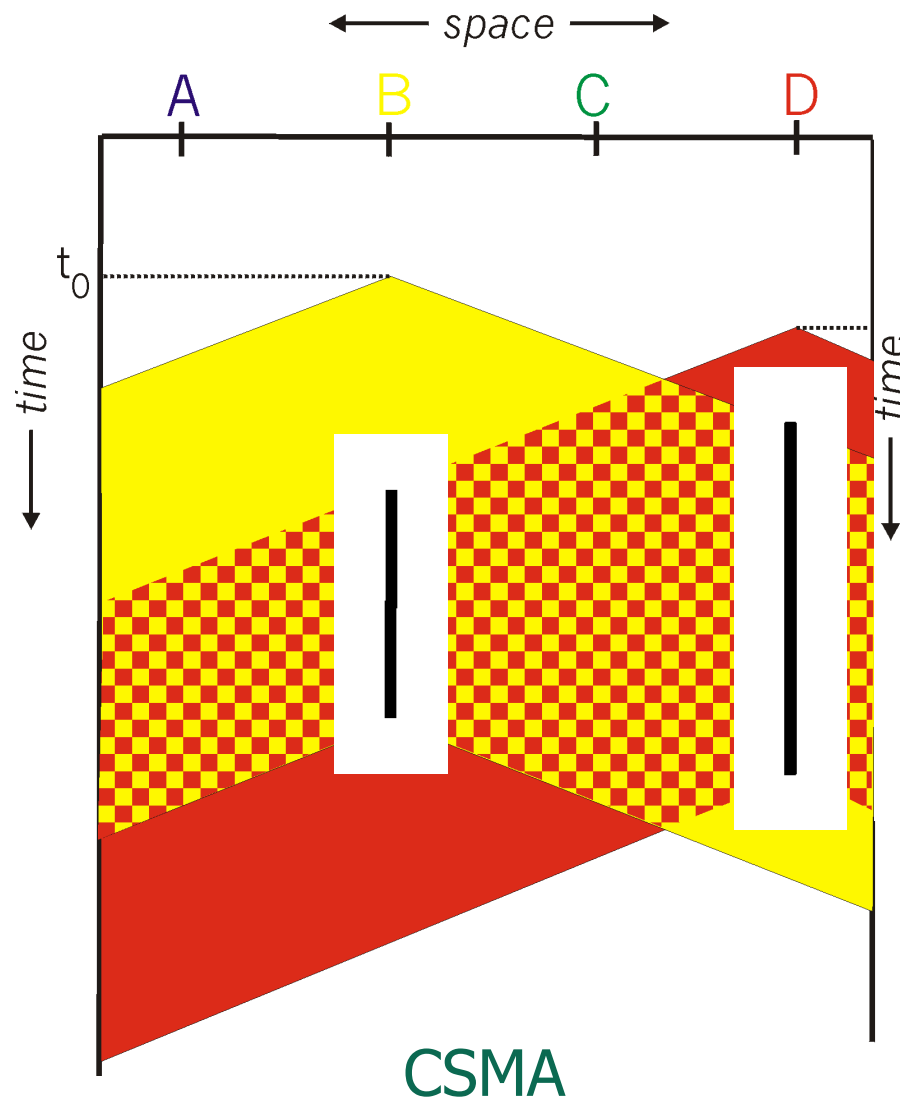
- Exemplo
 - 4 estações: A, B, C e D
 - Em t_0 , B escuta o meio
 - Para B, o meio está livre
 - Em t_1 , D escuta o meio
 - Para D, o meio também está livre
 - Os bits enviados por B não chegaram a D



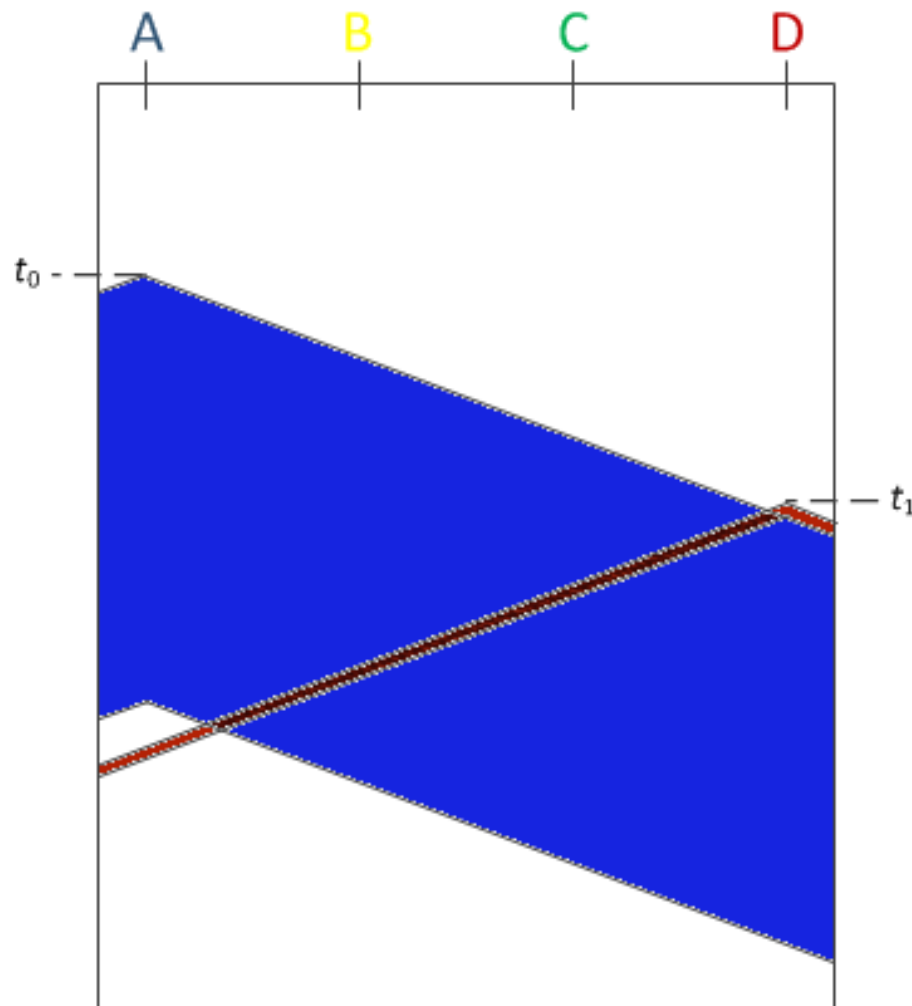
Colisão!



CSMA vs. CSMA/CD

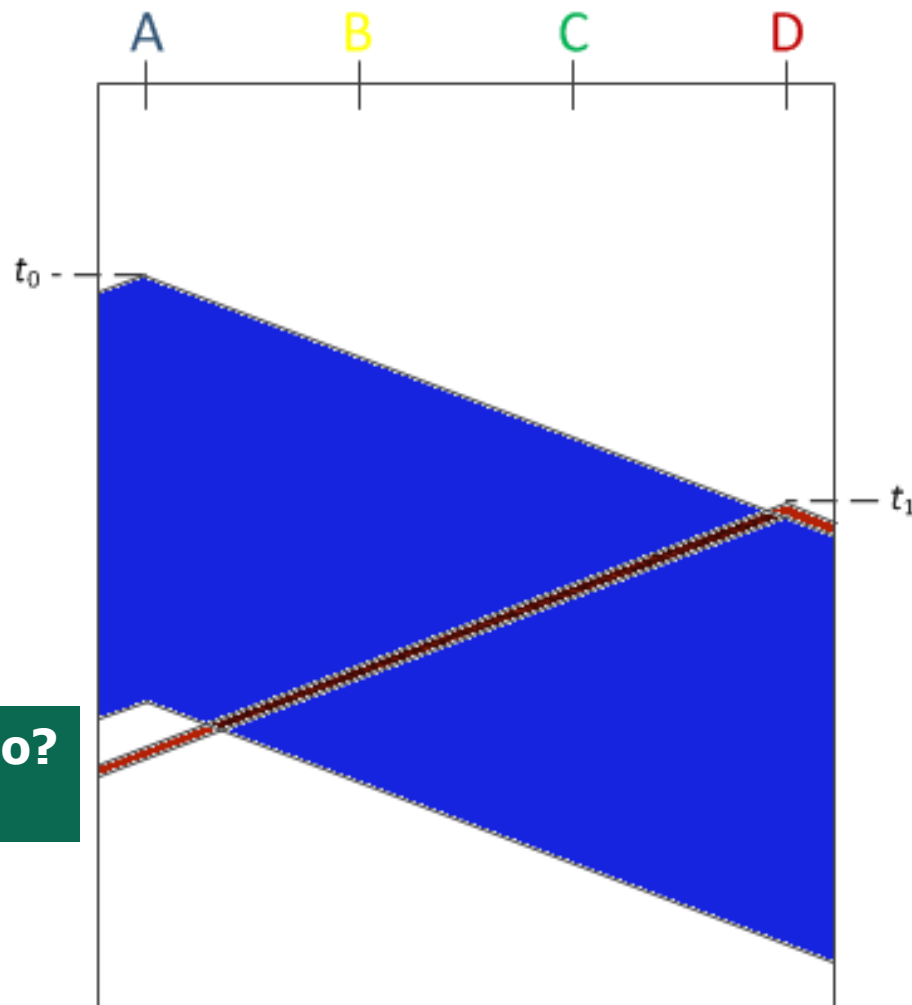


- Problema
 - Como garantir que todas as estações detectam colisões?



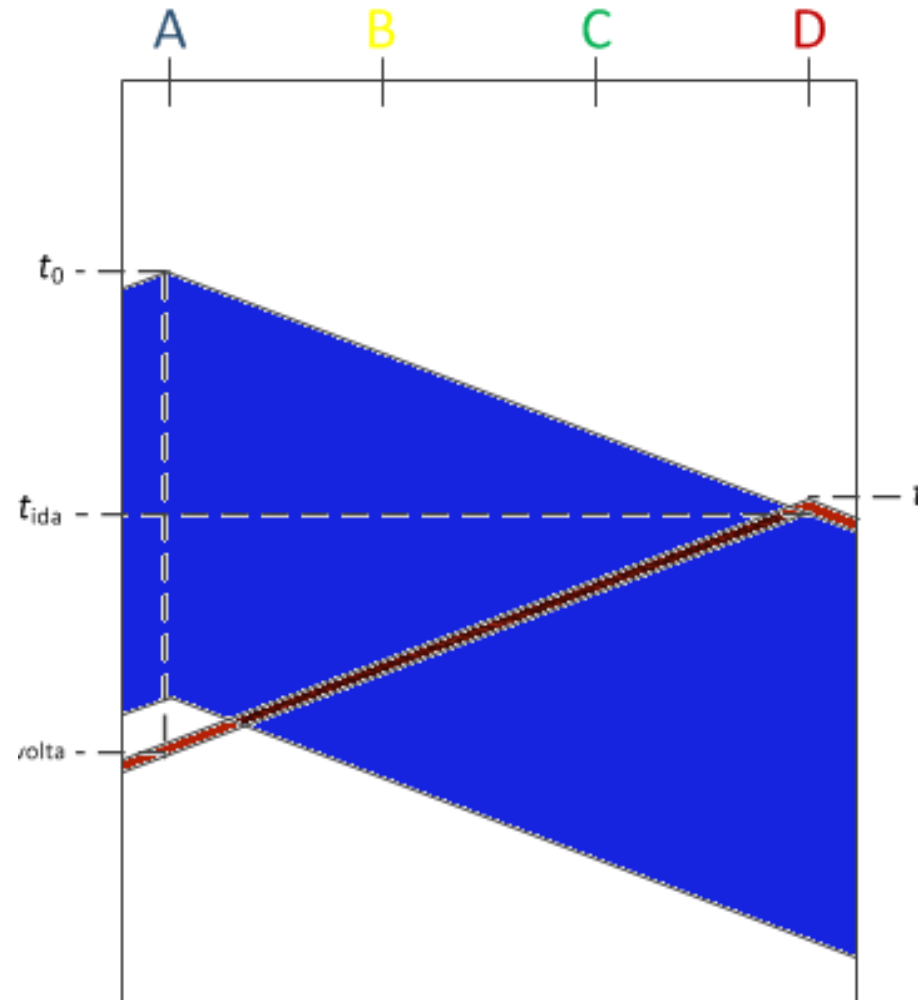
CSMA/CD

- Problema
 - Como garantir que todas as estações detectam colisões?

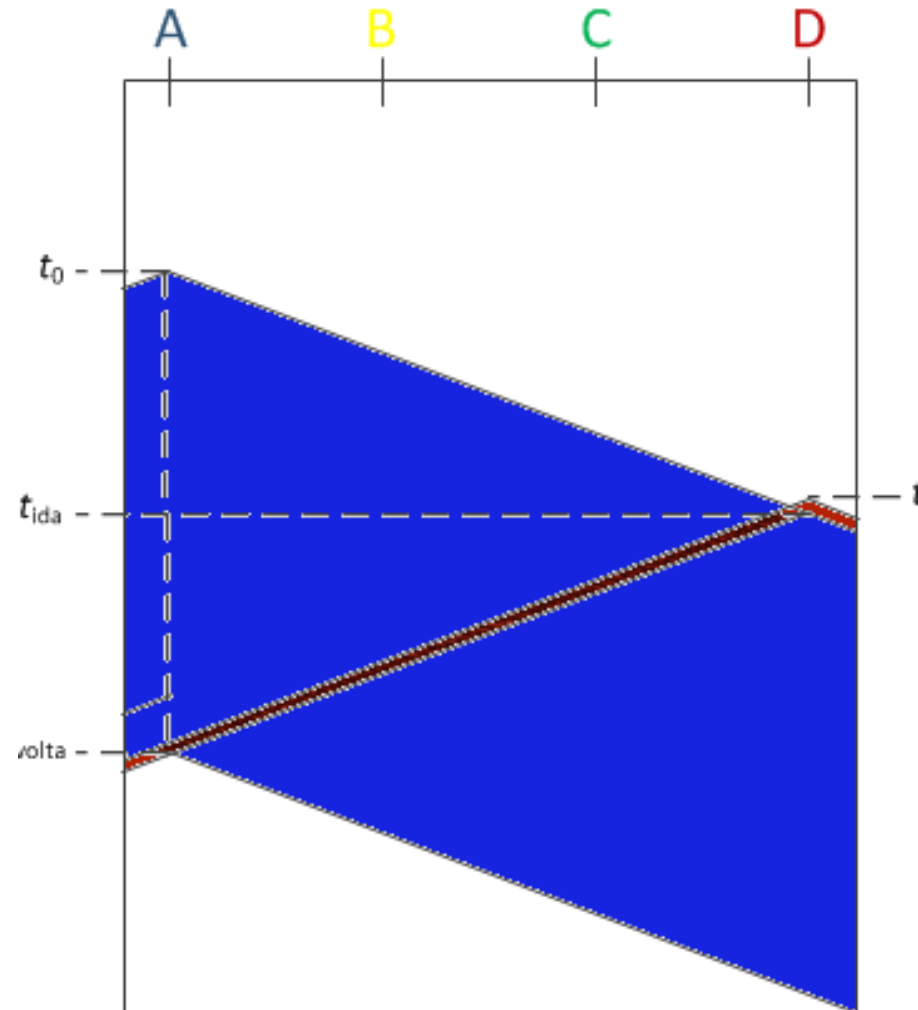


**A detecta colisão?
NÃO!**

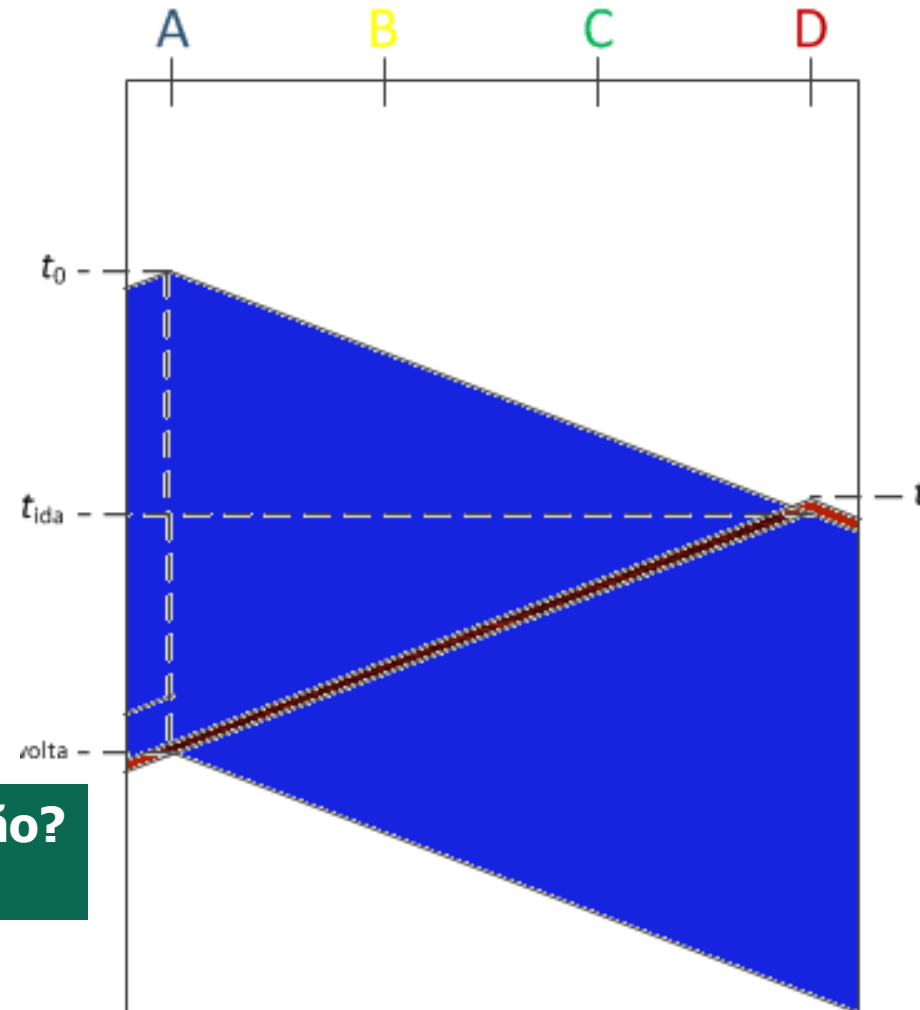
- Problema
 - Como garantir que todas as estações detectam colisões?
 - Quanto tempo “faltou” para A escutar a transmissão de B?



- Problema
 - Como garantir que todas as estações detectam colisões?
 - Quanto tempo “faltou” para A escutar a transmissão de B?
 - E se a transmitisse por mais esse tempo?



- Problema
 - Como garantir que todas as estações detectam colisões?
 - Quanto tempo “faltou” para A escutar a transmissão de B?
 - E se a transmitisse por mais esse tempo?



**A detecta colisão?
SIM!**

- Problema
 - Como garantir que todas as estações detectam colisões?
- Solução
 - Meio 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

- 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 $t = 0$



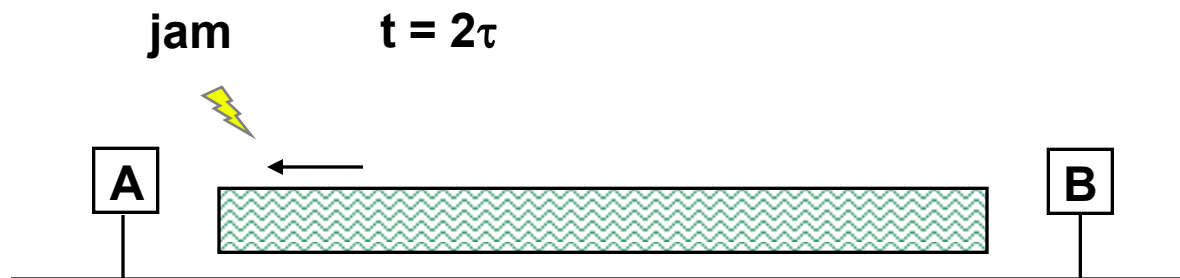
- Para garantir que todas as estações detectam colisões
 - Meio ocupado durante o dobro (ida e volta) do atraso máximo de propagação no meio (τ)
 - B começa a transmitir em $\tau - \epsilon$
 - “Pouco antes” do sinal de A chegar a B



- 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 em τ (na transmissão)
 - Em τ , o primeiro bit enviado por A chega em B
 - B interrompe a transmissão e envia o *jam* (reforço de colisão)

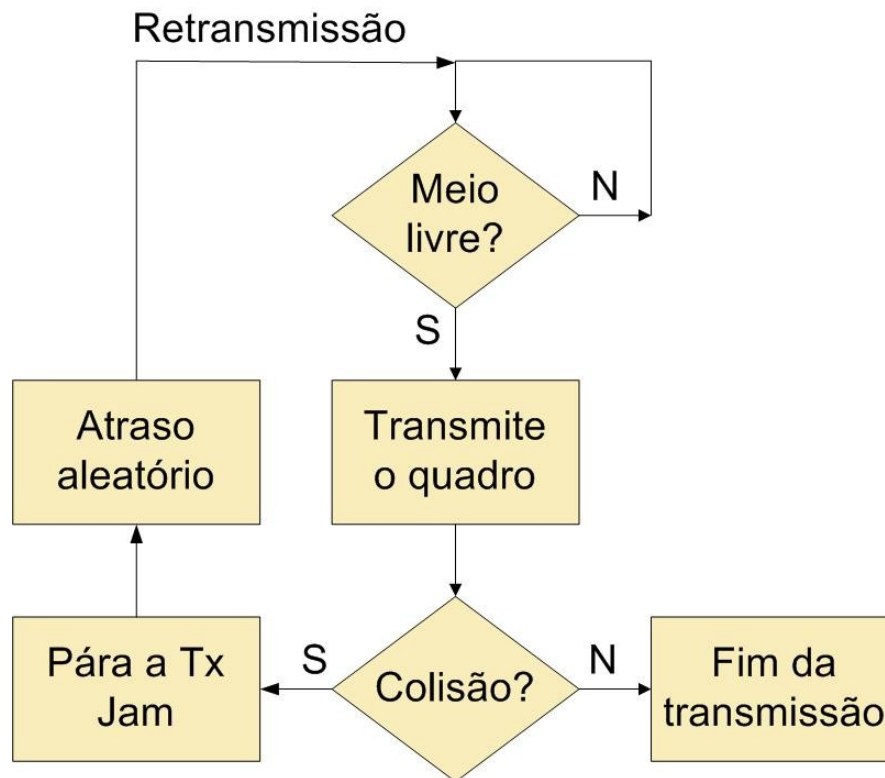


- Para garantir que todas as estações detectam colisões
 - Meio ocupado durante o dobro (ida e volta) do atraso máximo de propagação no meio (τ)
 - *Jam* chega a *A* em 2τ
 - *A* interrompe a sua transmissão
 - **Conclusão: existe um tamanho de quadro mínimo**



- Cenário anterior é o pior caso
 - A começa a transmitir seu quadro e, exatamente antes de o sinal de A alcançar B, B inicia a transmissão
 - B terá transmitido alguns bits quando abortar
 - Esse bits chegarão a A, mas podem não ter energia suficiente para A detectar a colisão
 - Para garantir, B envia o sinal de *jam* para A também abortar a transmissão/detectar a colisão

CSMA/CD



- t_{prop} = atraso máximo de prop. entre dois nós
- t_{trans} = tempo para transmitir quadro de tamanho máximo

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

- Eficiência vai para 1 à medida que:
 - t_{prop} vai para 0
 - t_{trans} vai para infinito
- Muito mais do que ALOHA
 - Ainda é descentralizado, simples e barato

CSMA/CD

- Mais detalhes quando falarmos do padrão Ethernet, na próxima aula

- Veremos quando falarmos do padrão de redes sem-fio IEEE 802.11 no Capítulo 6

Protocolos de Revezamento

Até aqui...

- Protocolos de divisão de canal
 - Eficientes para carga alta
 - Compartilhamento justo do canal
 - Ineficientes para carga baixa
 - Atraso no canal de acesso
 - Alocação de $1/N$ da largura de banda mesmo com apenas 1 nó ativo
- Protocolos de acesso aleatório
 - Ineficientes para carga alta
 - Sobrecarga causada por colisões
 - Eficientes para carga baixa
 - Um único nó pode utilizar completamente o canal

Até aqui...

- Protocolos de divisão de canal
 - Eficientes para carga alta
 - Compartilhamento justo do canal
 - Ineficientes para carga baixa
 - Atraso no canal de acesso
 - Alocação de $1/N$ da largura de banda mesmo com apenas 1 nó ativo
- Protocolos de acesso aleatório
 - Ineficientes para carga alta
 - Sobrecarga causada por colisões
 - Eficientes para carga baixa
 - Um único nó pode utilizar completamente o canal

Revezamento → unir o melhor dos dois mundos!

Protocolos de Revezamento

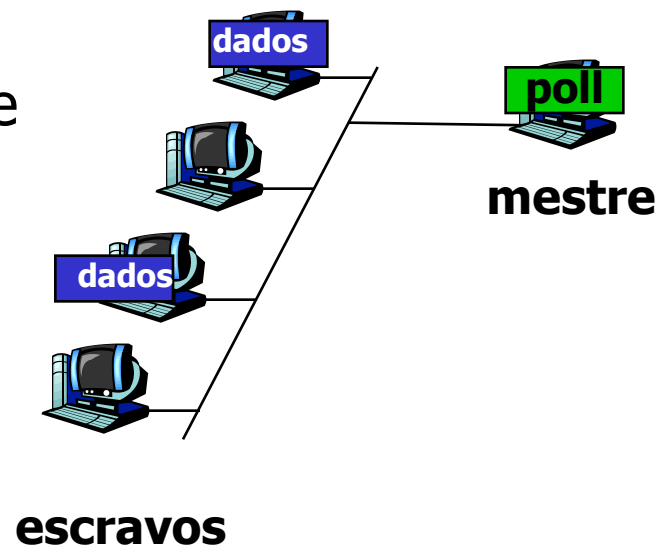
- Geralmente o acesso ao meio é realizado em função de uma estação centralizadora
 - Determina quando uma determinada estação pode transmitir
 - Não podem ocorrer colisões
- Estação compartilha a taxa do canal com outras estações

Protocolos de Revezamento

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

Varredura (*polling*)

- Estação controladora (**mestre**) envia mensagens a outras estações
 - Convidando-as a transmitir dados
- Estações ao serem consultadas (**escravos**) podem transmitir dados
- Ordem das consultas-convites
 - Lista armazenada na estação mestre



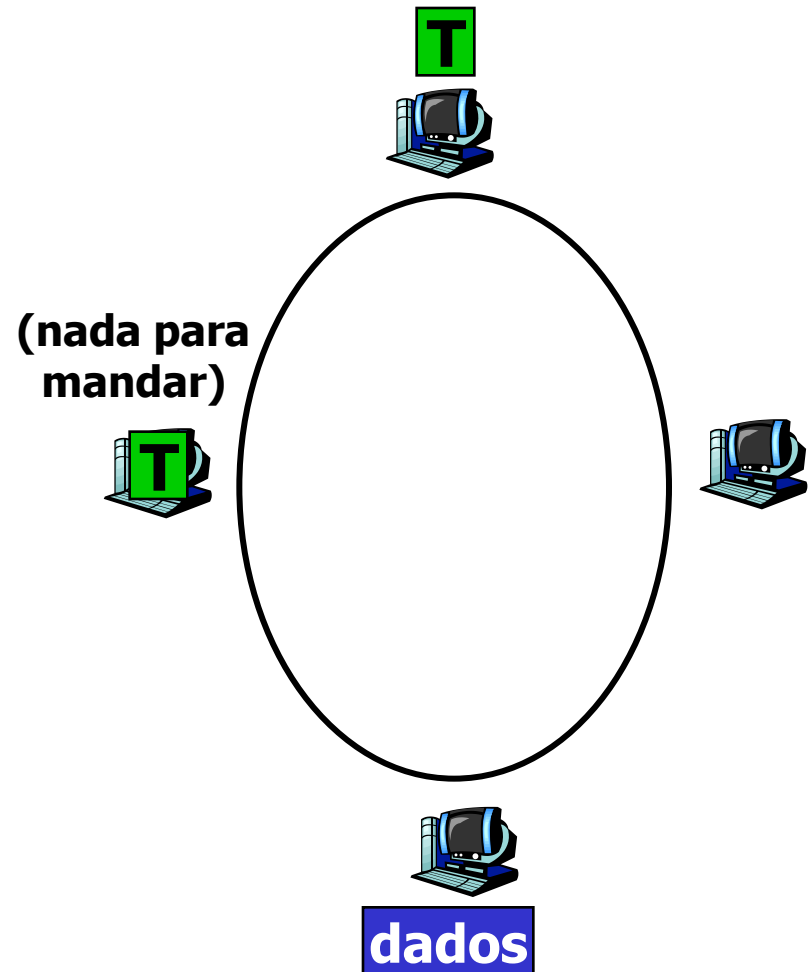
Varredura (*polling*)

- Vantagens
 - Sem colisões
 - Menor ociosidade
 - Mestre pode observar a ausência de sinal e “passar a vez”
- Desvantagens
 - Introduz um atraso de seleção
 - É preciso consultar os nós ociosos
 - Sobrecarga de controle
 - Ponto único de falha

- Estações reservam o direito de acessar o meio compartilhado
 - Pedidos de reserva são enviados pelas estações para a estação centralizadora
- Estação centralizadora processa e escalona o posterior acesso ao meio
- Vantagem
 - Não é preciso consultar nós ociosos
- Desvantagens
 - Pode haver colisões de pedidos
 - Ponto único de falha

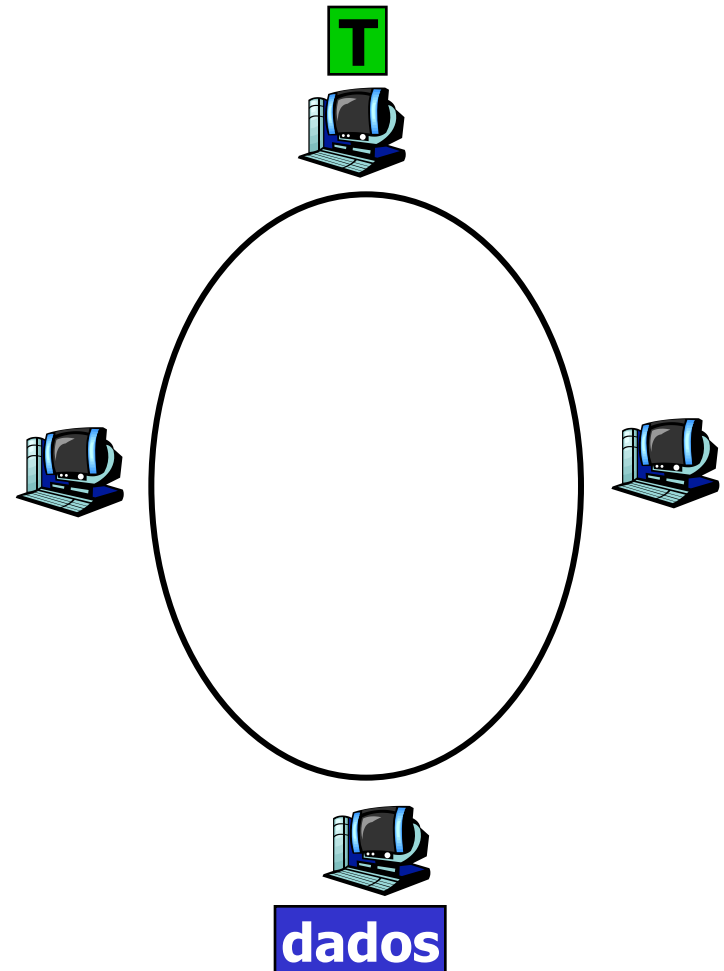
Passagem de Ficha de Permissão

- **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 até um limite
- Usada no Token Ring e no FDDI



Passagem de Ficha de Permissão

- 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
 - Escutar a portadora → fácil em algumas tecnologias (cabeadas), difícil em outras (sem fio)
 - CSMA/CD usado no Ethernet
 - CSMA/CA usado no IEEE 802.11
- Revezamento
 - Varredura (*polling*) a partir de um ponto central, passagem de permissões
 - Bluetooth, FDDI, Token Ring (IBM)

Modelos

Modelo IEEE 802

- Padronização de redes locais e metropolitanas
 - Usado 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
 - Subcamada de controle de acesso ao meio (MAC)
 - Controle do acesso a um meio compartilhado
 - Enquadramento
 - Endereçamento
 - Detecção de erros

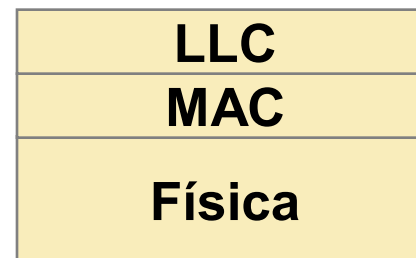
Modelo IEEE 802

- Arquitetura baseada no modelo OSI (cont.)
 - 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

- 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

Aulas 3 e 4

Camada de Enlace

Protocolos ponto-a-ponto e de controle de acesso ao meio

Igor Monteiro Moraes
Redes de Computadores II