

Aula 3 – Camada de Enlace: Protocolos de Acesso Múltiplo

Diego Passos

Universidade Federal Fluminense

Redes de Computadores II

Na Última Aula...

- Responsabilidade da camada de enlace:
 - Transportar pacotes entre nós **diretamente conectados**.
- Serviços (potencialmente) providos pela camada de enlace:
 - Encapsulamento em **quadros**.
 - Gerência do **acesso ao meio** de transmissão
 - **Endereçamento**.
 - **Entrega confiável**.
 - **Deteccção de erros** (e, possivelmente, **correção**).
 - **Controle de fluxo**.
- Métodos de detecção/correção de erros:
 - Baseados na inserção de **bits de redundância**.
 - São probabilísticos (i.e., **podem falhar**).
 - Quanto mais redundância, menor probabilidade de falha.
 - Mas maior o *overhead*.
 - Vários tipos, com diferentes capacidades:
 - Deteccção apenas: e.g., bit de paridade, checksum, CRC.
 - Deteccção e correção: e.g., paridade bidimensional.
 - Capacidade de correção de erros através de bits redundantes:
 - **FEC**: *Forward Error Correction*.

Enlaces (e Protocolos) de Acceso Múltiplo

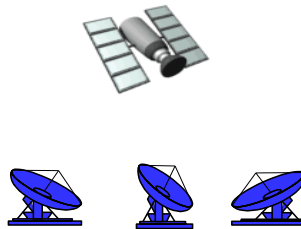
- Dois tipos de “enlaces”:
 - Ponto-a-ponto.
 - PPP para acesso discado.
 - Link ponto-a-ponto entre *switch* e *host* Ethernet.
 - **Difusão/Broadcast (cabo ou meio compartilhado).**
 - Ethernet original.
 - *Upload* em redes HFC.
 - 802.11 (Wi-Fi).



shared wire (e.g.,
cabled Ethernet)



shared RF
(e.g., 802.11 WiFi)



shared RF
(satellite)



humans at a
cocktail party
(shared air, acoustical)

Protocolos de Acesso Múltiplo

- Único canal de comunicação em difusão.
- Transmissões simultâneas por dois ou mais nós \Rightarrow interferência.
 - **Colisão**, quando nó recebe dois sinais misturados.

Protocolo de Acesso Múltiplo

- Algoritmo (possivelmente distribuído) que define como nós compartilham o meio de transmissão.
 - i.e., quando cada nó pode transmitir.
- **Normalmente**, comunicação usada para a coordenação usa o próprio canal compartilhado.
 - Sem comunicação fora-de-banda.

Protocolo de Acesso Múltiplo Ideal

- **Dado:** canal de comunicação compartilhado com capacidade de R b/s.
- **Características desejadas:**
 - Quando um nó quer transmitir, pode enviar dados à taxa R .
 - Quando M nós querem transmitir, cada um obtém uma taxa **média** de $\frac{R}{M}$.
 - Totalmente descentralizado.
 - Não há nó especial para coordenação.
 - Não necessita de sincronização entre nós.
 - Simples.

Taxinomia de Protocolos MAC: Três Grandes Categorias

Particionamento de Canal

- Divide o canal em “pedaços” menores.
 - Slots de tempo, frequências diferentes, códigos diferentes).
- Pedaços são alocados para uso exclusivo dos nós.

Acesso Aleatório

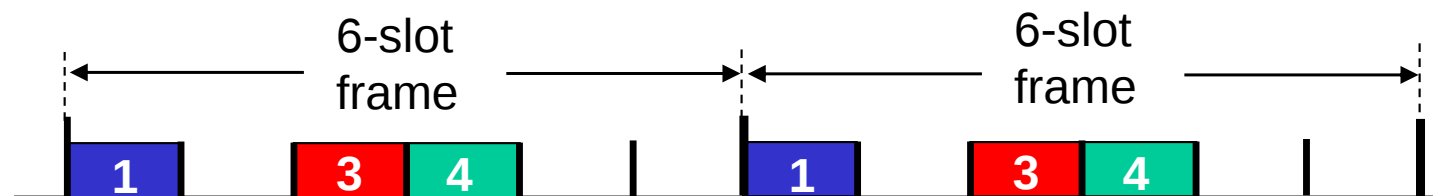
- Canal não é dividido, colisões podem ocorrer.
- Utilizam-se métodos para “recuperação” de colisões.

Acesso Alternado (“Taking-turns”)

- Ou “revezamento”.
- Nós se alternam no acesso ao meio.
- Nós com mais dados podem usar o meio por mais tempo.

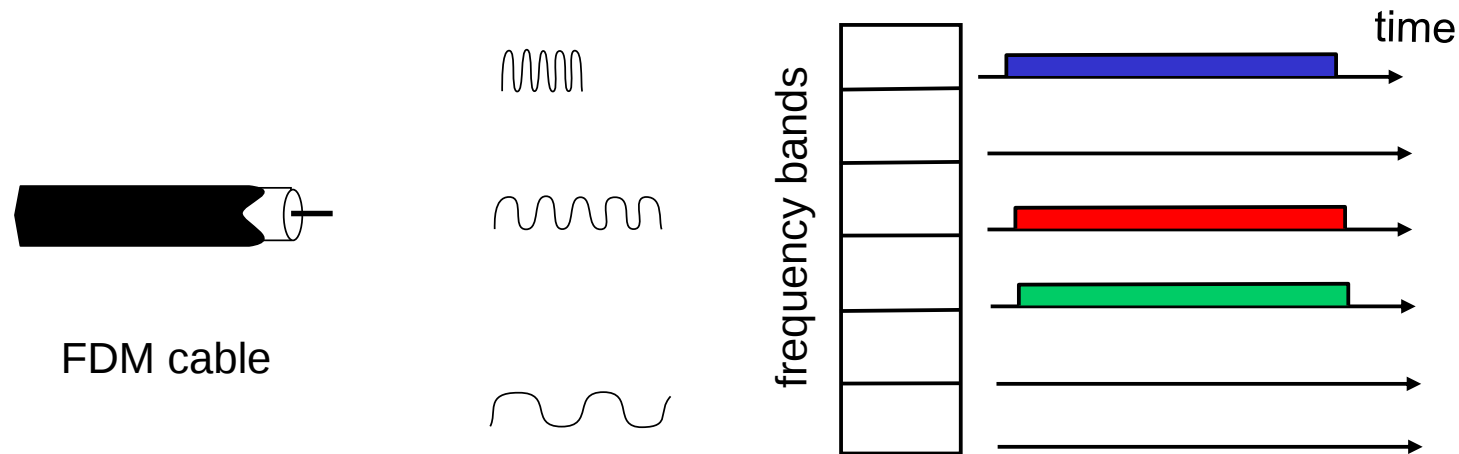
Protocolos de Particionamento de Canal: TDMA

- *Time Division Multiple Access.*
 - Acesso ao canal feito em “rodadas”.
 - Cada estação ganha um *slot* de duração fixa a cada rodada.
 - Duração suficiente para transmissão de quadro.
 - Em Slots não usados, canal ocioso.
 - Exemplo com 6 estações:
 - 1, 3 e 4 têm quadros a transmitir.
 - 2, 5 e 6 não usam seus *slots*.



Protocolos de Particionamento de Canal: FDMA

- *Frequency Division Multiple Access.*
 - Canal dividido em bandas de frequência.
 - Cada estação ganha uma frequência fixa.
 - Estações podem transmitir simultaneamente, desde que em frequências diferentes.
 - Se uma estação não utiliza sua frequência durante um intervalo, esta fica ociosa.
 - Exemplo com 6 estações:
 - 1, 3 e 4 têm quadros a transmitir.
 - 2, 5 e 6 não usam suas frequências.



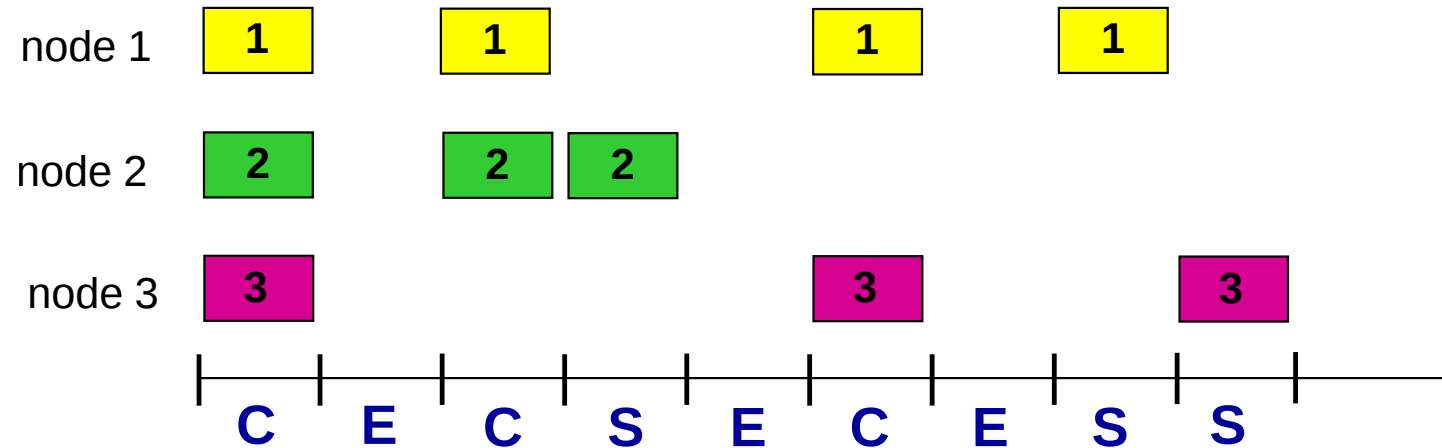
Protocolos de Acesso Aleatório

- Quando nó tem quadros a transmitir, usa o canal “inteiro”.
- Não há coordenação prévia entre nós.
- Se dois ou mais nós transmitem ao mesmo tempo, há **colisão**.
- Um protocolo MAC de acesso aleatório especifica:
 - Como determinar ocorrência de colisões.
 - Como se recuperar de colisões.
 - *e.g.*, via retransmissão do quadro.
- Exemplos de protocolos de acesso aleatório:
 - Slotted ALOHA.
 - ALOHA.
 - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA.

Slotted ALOHA (I)

- Hipóteses:
 - Todos os quadros têm mesmo tamanho.
 - Tempo é discretizado em slots de duração fixa.
 - Suficiente para a transmissão de um quadro.
 - Nós só começam a transmitir no início de slots.
 - Nós estão sincronizados.
 - i.e., sabem quando começa e termina um slot.
 - Se dois ou mais nós transmitem em um slot, todos detectam a colisão.
- Operação:
 - Quando nó possui quadro, transmite no início do próximo slot.
 - **Se não houve colisão**, nó pode enviar novo quadro no próximo slot.
 - **Se houve colisão**, nó retransmite o quadro nos slots subsequentes até o sucesso.
 - A cada novo slot, nó tenta retransmissão com probabilidade p .

Slotted ALOHA (II)



- Pontos positivos:

- Com um único nó ativo, este pode usar toda a capacidade do canal.
- Altamente descentralizado: requer apenas sincronização de *slots*.
- Simples.

- Pontos Negativos:

- Colisões, desperdiçando *slots*.
- Se nós podem detectar colisões em menos tempo que a duração de um *slot*, retransmissão poderia ser feita antes.
- Requer sincronização de relógio.

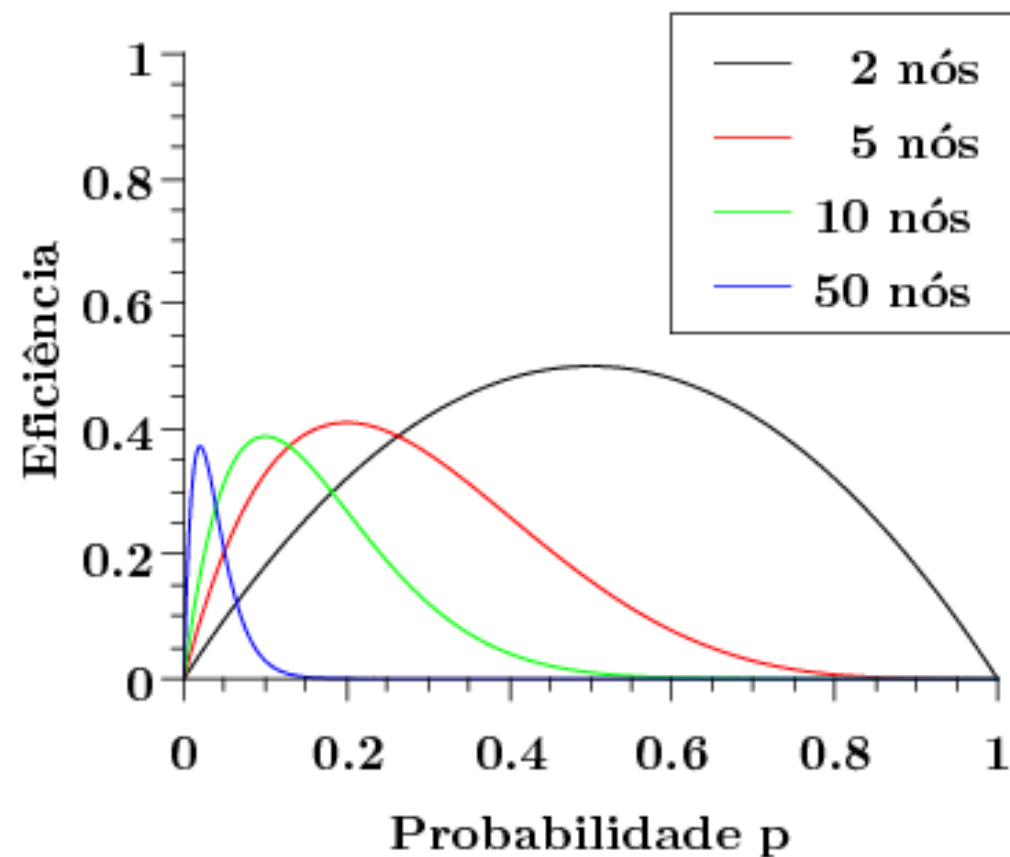
Slotted ALOHA: Eficiência (I)

- **Eficiência:** fração de slots bem sucedidos a longo prazo.
 - Considerando muitos nós, todos com muitos quadros a enviar.
- Suponha N nós com *backlog* infinito.
 - *i.e.*, sempre há quadros a enviar.
- Cada nó tenta transmissão em um slot com probabilidade p .
- Sucesso ocorre quando apenas um nó tenta transmitir no slot:

$$P(\text{Sucesso}) = p(1 - p)^{N-1}$$

- Mas se há N nós:

$$Efic(p) = N \cdot p(1 - p)^{N-1}$$



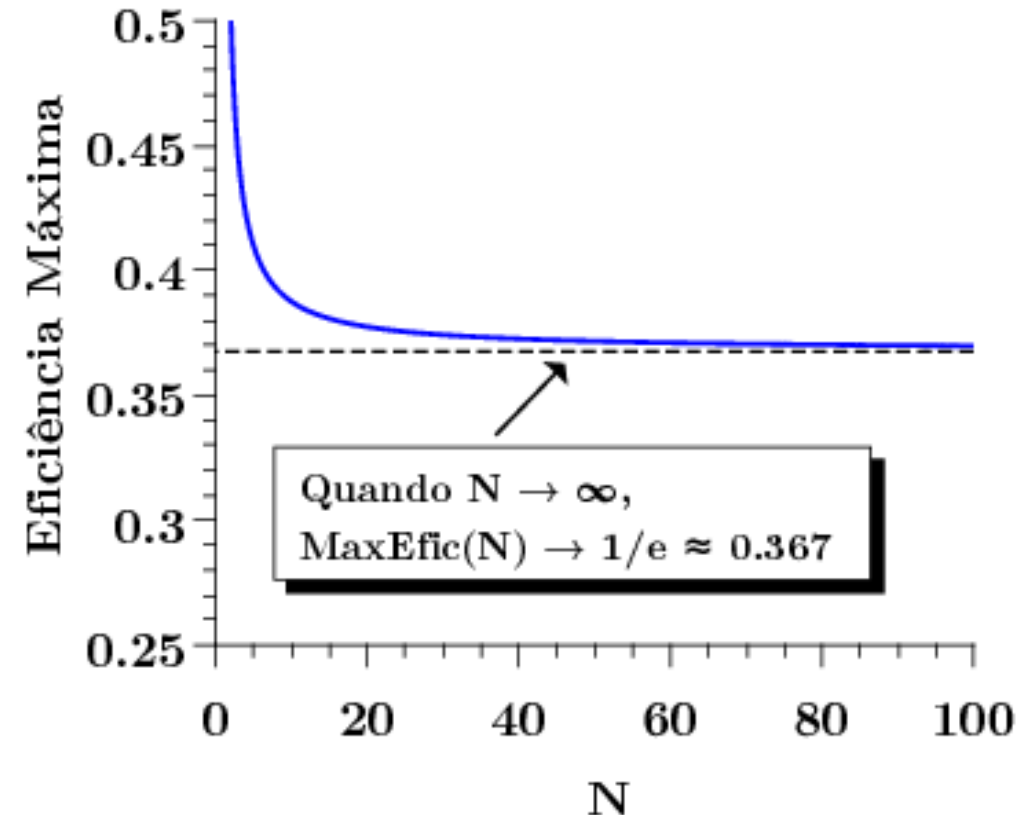
Slotted ALOHA: Eficiência (II)

- Eficiência máxima depende de p .
- Valor ótimo de p depende de N .
 - Quanto mais nós, menor o p ideal.
 - Faz sentido?
- Qual é o p ideal para um dado N ?
 - Máximo ocorre quando $Efic'(p) = 0$:

$$\begin{aligned}0 &= N(1-p)^{N-1} \\ &\quad - N \cdot (N-1) \cdot p(1-p)^{N-2} \\0 &= (1-p) - (N-1)p \\ p &= \frac{1}{N}\end{aligned}$$

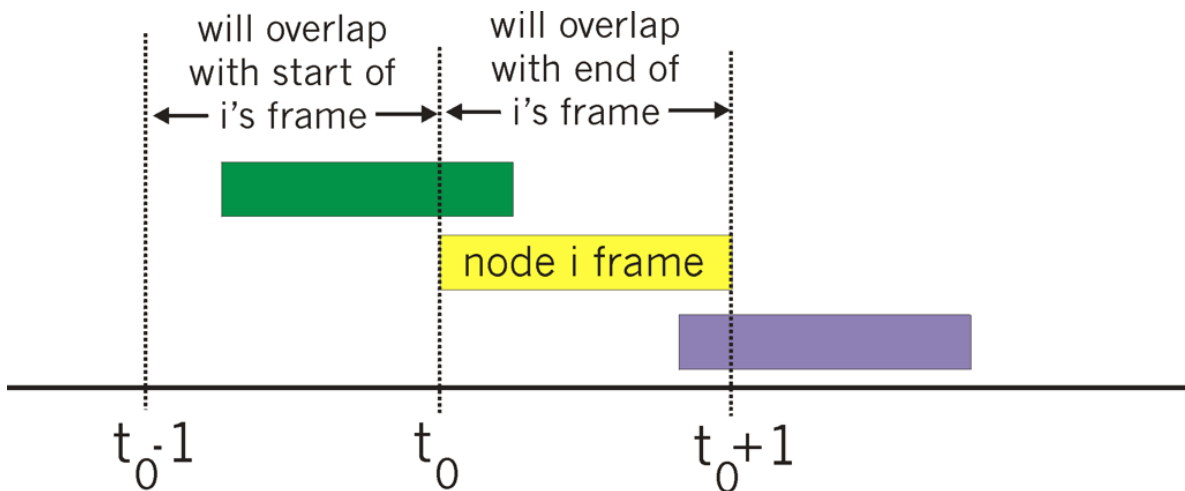
- Logo:

$$MaxEfic(N) = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1}$$



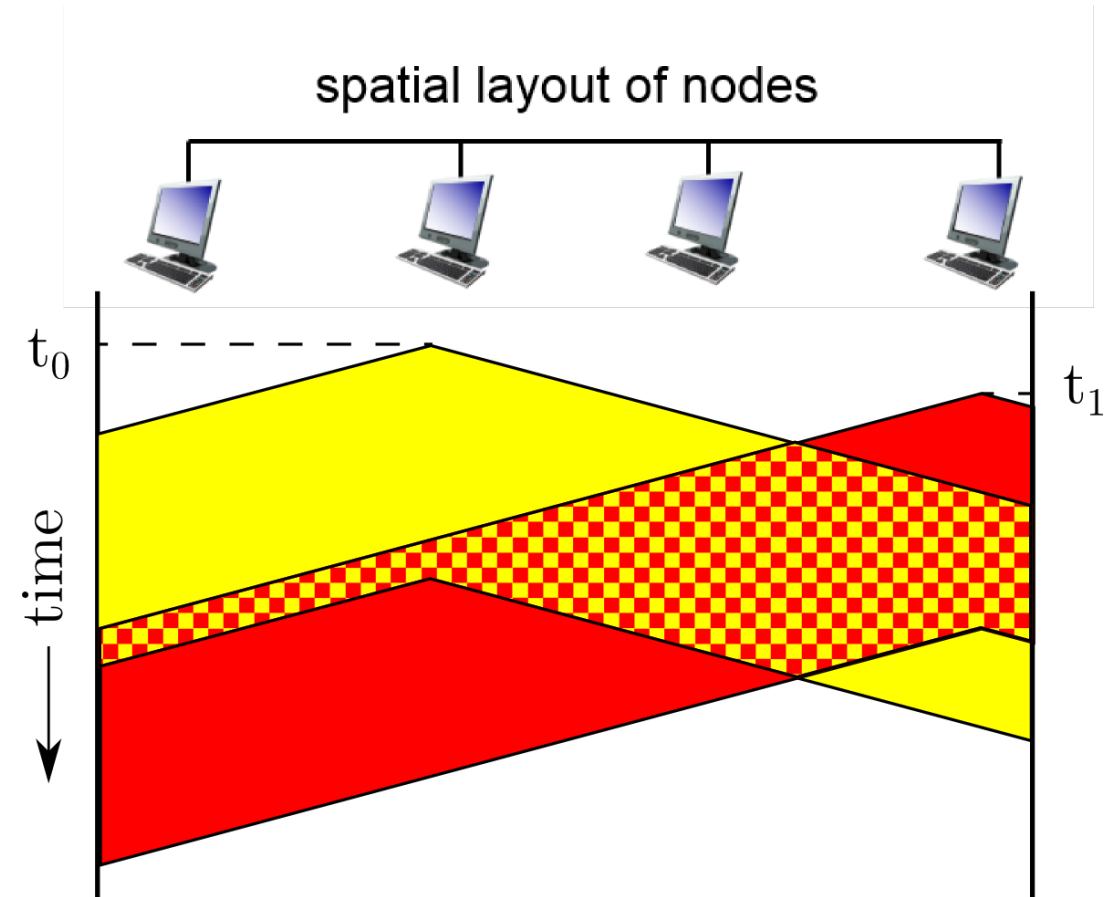
ALOHA Puro (Unslotted)

- Unslotted Aloha: mais simples, sem sincronização.
 - Quando quadro chega, transmite imediatamente.
 - Em caso de colisão, nós aguardam tempo aleatório antes de tentar novamente.
- Probabilidade de colisão aumenta.
 - Quadro enviado em t_0 colide com quadros enviados em $[t_0 - 1, t_0 + 1]$.



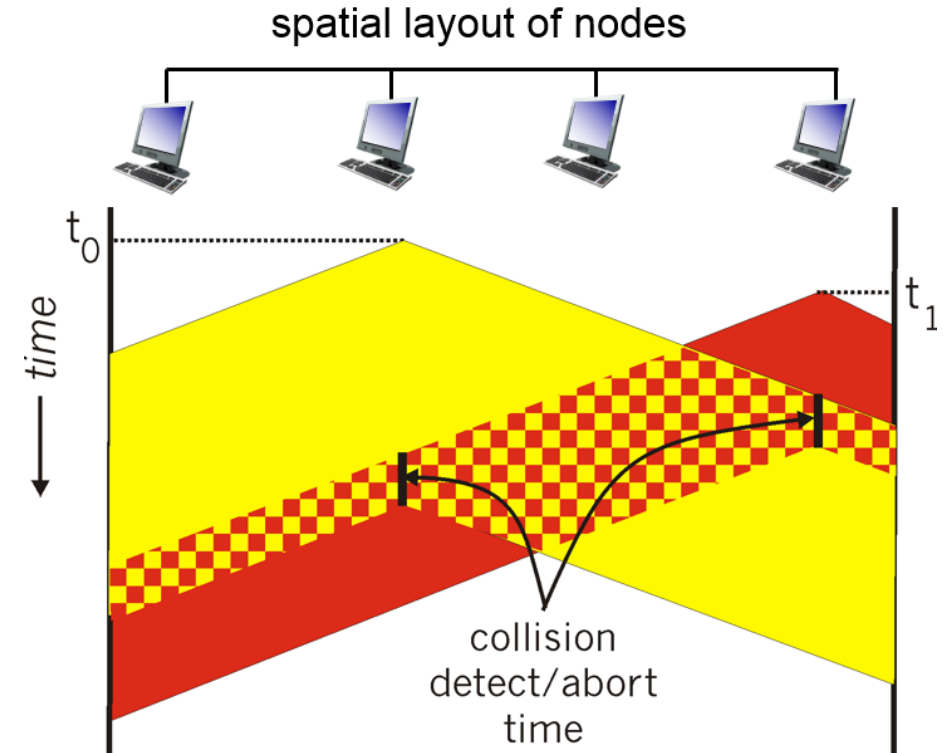
- Resultado: **eficiência é ainda mais baixa.**
- No máximo 18%!

- *Carrier Sense Multiple Access*: ouça antes de transmitir.
 - Se o meio está ocioso, transmita o quadro inteiro.
 - Se o meio está ocupado, transmita mais tarde.
- Analogia da comunicação humana:
 - Não interrompa os outros.
- Evita totalmente as colisões?
 - Não! O atraso de propagação pode fazer um nó não perceber uma transmissão.
 - Em caso de colisão, todo o quadro é perdido.



- *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection.*

- Mesmo princípio básico do CSMA: ouvir antes de transmitir.
- Durante a transmissão, nó checa por colisões.
 - Detecção rápida.
- Em caso de colisão, transmissão é abortada.
 - Reduz desperdício do canal.
- Analogia de comunicação humana: interlocutor educado.



- Detecção de colisões.

- Simples em redes cabeadas: medir intensidade do sinal, comparar sinal transmitido e recebido.
- Difícil em redes sem fio: potência do sinal transmitido é muito maior que do sinal recebido.

O Algoritmo do CSMA/CD no Ethernet

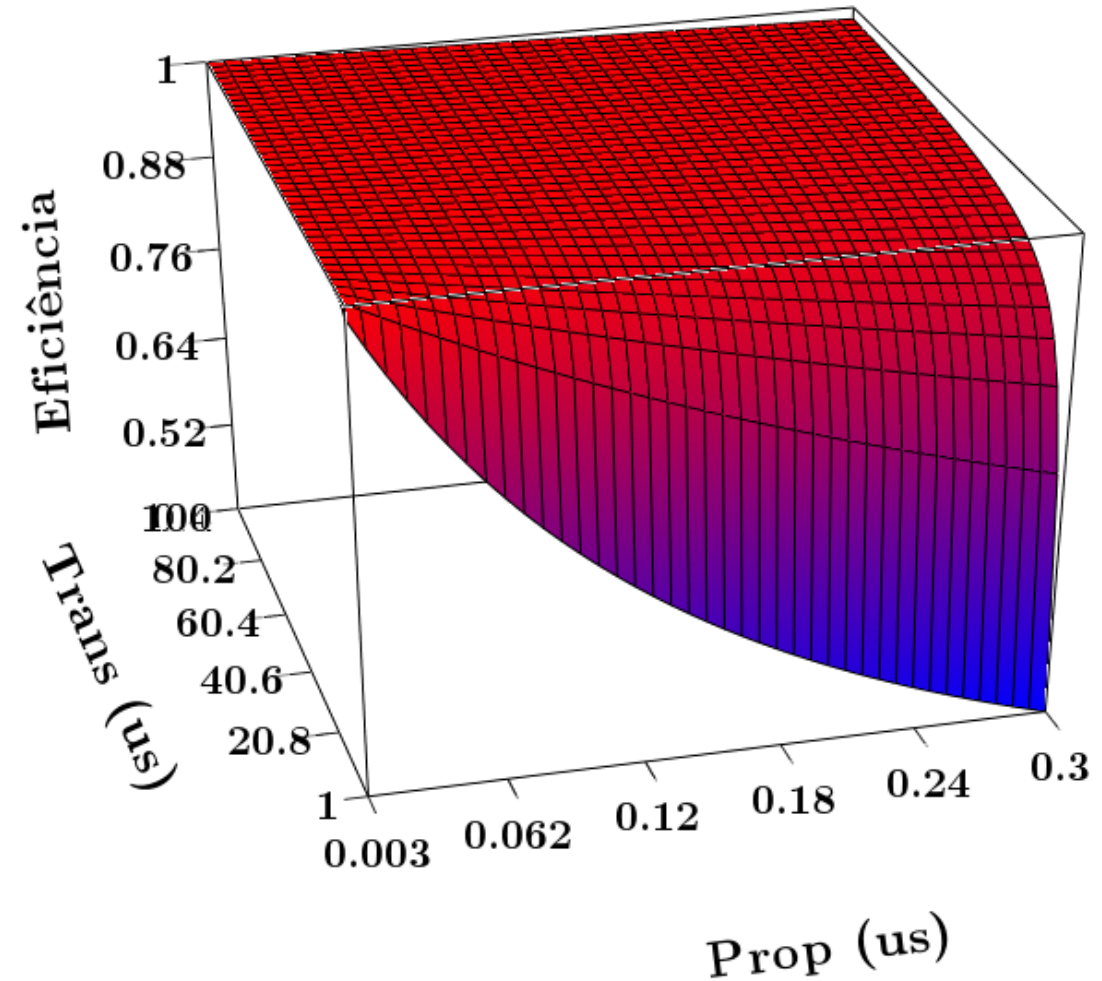
1. Interface recebe pacote da camada de rede, cria quadro.
2. Se o canal está livre, começa a transmissão do quadro.
 - Caso contrário, aguarda canal se tornar ocioso.
 - E então transmite.
3. Se a transmissão é completada sem que se tenha detectado uma colisão, processo termina.
4. Se durante a transmissão uma colisão é detectada, transmissão é abortada e **interface envia sinal de jamming**.
 - Por quê?
5. Depois de abortar, interface entra em **backoff binário (exponencial)**.
 - Após a n -ésima colisão, sorteia valor inteiro k no intervalo $[0, 2^n - 1]$.
 - Aguarda um tempo igual a $k \cdot 512$ *durações de bit* e volta ao passo 2.
 - Mais colisões \Rightarrow maiores *backoffs*.

CSMA/CD: Eficiência

- t_{prop} : tempo máximo de propagação entre dois nós.
- t_{trans} : tempo de transmissão de quadro.

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

- Eficiência tende a 1 se:
 - t_{prop} tende a 0; ou
 - t_{trans} tende a infinito.
- Melhor que o Aloha.
 - Além de simples, barato e descentralizado.



Protocolos de Acesso Alternado

- **Protocolos de Particionamento de Canal:**

- Compartilhamento é **eficiente** e **justo** sob **altas cargas**.
- Mas **ineficiente** para **cargas baixas**.
 - Atraso no acesso ao canal.
 - Banda alocada de apenas $1/N$, mesmo com um único nó ativo.

- **Protocolos de Acesso Aleatório:**

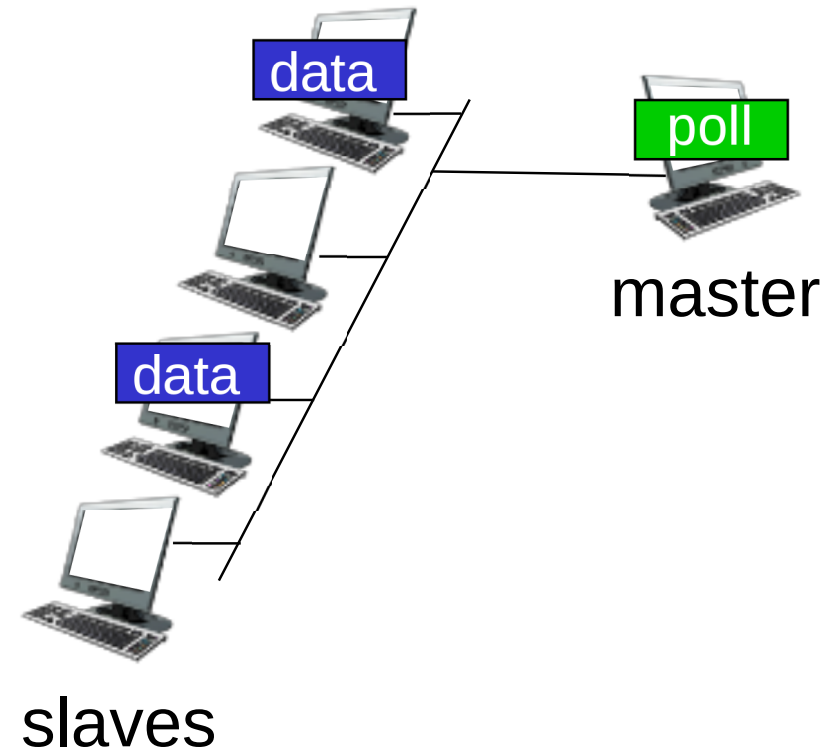
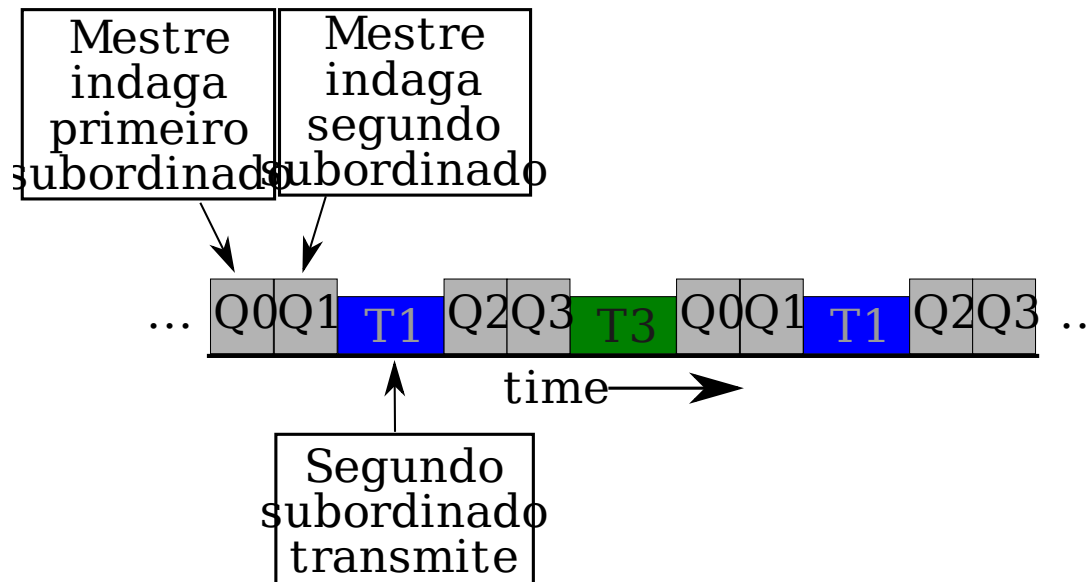
- Eficientes sob **baixa carga**.
- Mas sob **alta carga: colisões**.

- **Protocolos de Acesso Alternado:**

- Tentativa: combinar o melhor dos dois mundos!

Acesso Alternado: Polling

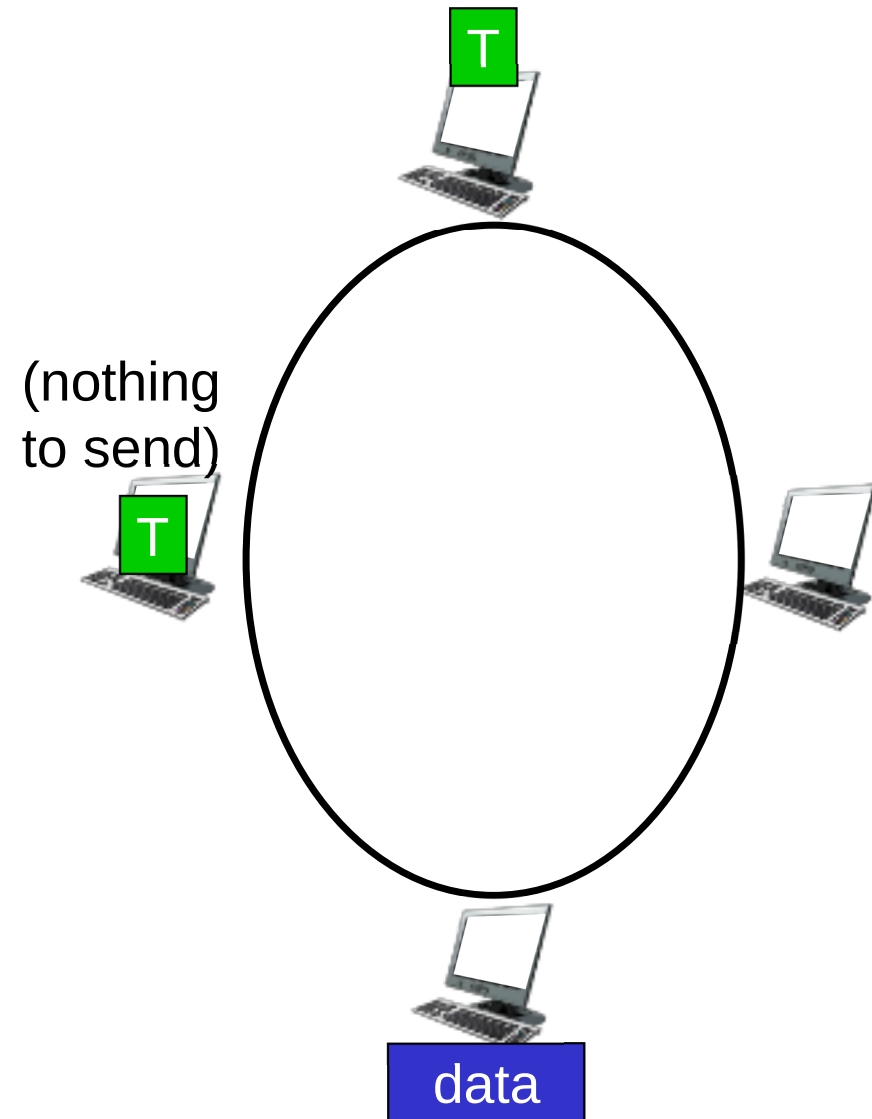
- Nó mestre “convida” nós subordinados para transmitir alternadamente.
- Normalmente usado com dispositivos subordinados “sem inteligência”.



- Potenciais problemas:
 - *Overhead* do polling.
 - Latência.
 - Ponto único de falha.

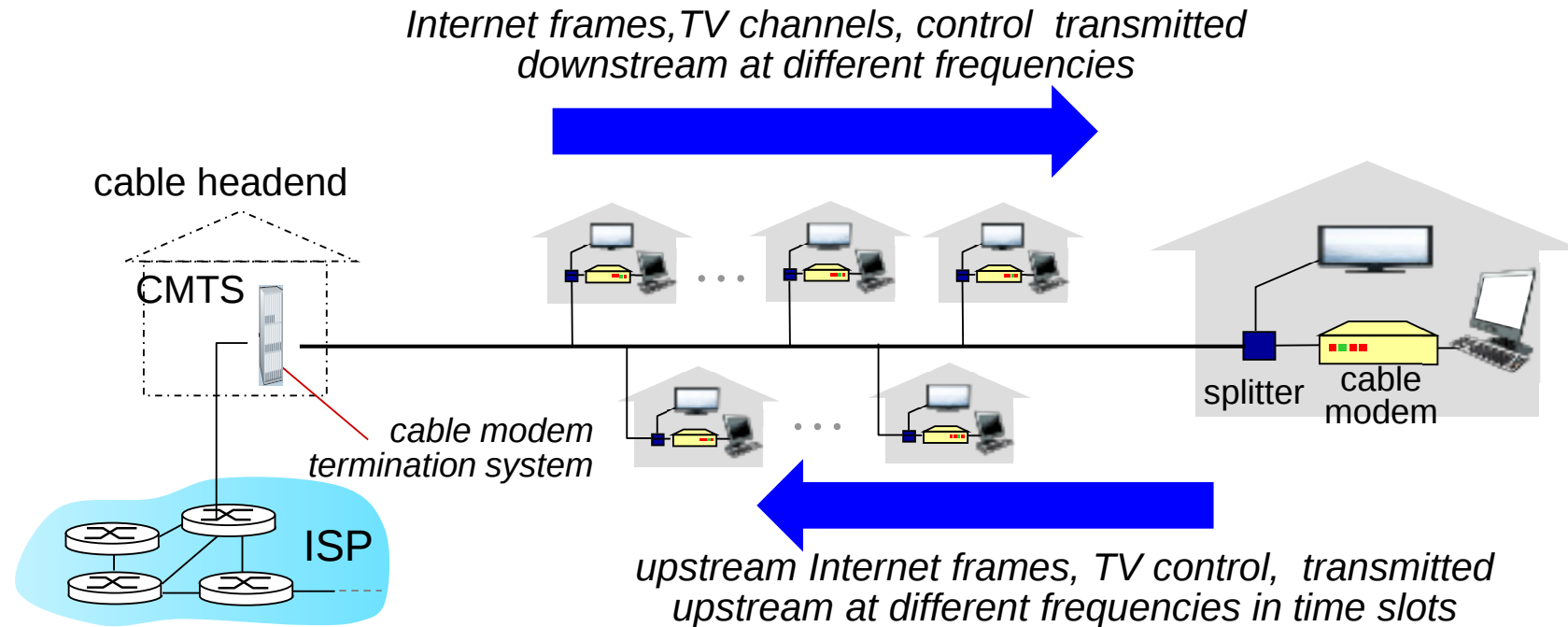
Acesso Alternado: Passagem de Token

- Token: representa o controle do canal.
 - Nó com token tem direito de transmitir.
 - Após uso (ou não), nó repassa o token.
 - Mensagem ou sinal transmitido no próprio canal.
- Potenciais problemas:
 - *Overhead* de passagem do token.
 - Latência.
 - Ponto único de falha.
 - O token.



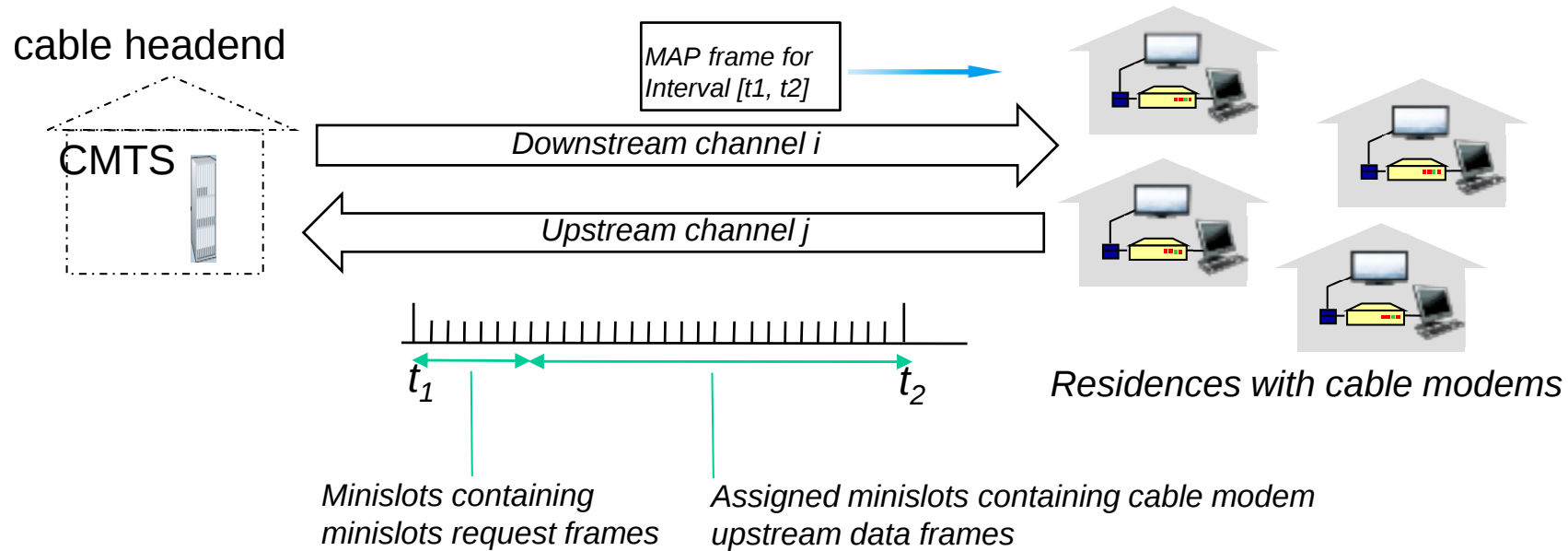
DOCSIS (I)

- Data Over Cable Service Interface Specification.



- **Múltiplos canais** (compartilhados) de *downlink* (40 Mb/s).
 - Todos usados pelo CMTS (Cable Modem Termination System).
- **Múltiplos canais** de *uplink* (30 Mb/s).
 - **Acesso múltiplo:** todos os usuários competem por slots em certos canais de *uplink*.

DOCSIS (II)



- FDM no *uplink* e *downlink*.
- TDM em canais de *uplink*:
 - Alguns slots atribuídos, outros para contenção.
 - Atribuição especificada por um MAP frame.

Resumo dos Protocolos de Acesso ao Meio

- **Particionamento de canal**, por tempo, frequência ou código.
 - TDMA, FDMA, CDMA.
- **Acesso aleatório.**
 - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD.
 - Carrier Sense (Detecção de Portadora): fácil em certas tecnologias (cabeadas), difícil em outras (sem fio).
 - CSMA/CD usado no Ethernet.
 - CSMA/CA usado no 802.11 (Wi-Fi).
- **Acesso alternado.**
 - Polling, passagem de token.
 - Bluetooth, FDDI, Token Ring.

Resumo da Aula...

- Enlaces ponto-a-ponto vs. compartilhados.
 - Ou de difusão ou *broadcast*.
- Transmissões simultâneas em enlace compartilhado podem gerar **colisões**.
 - Sinais se “misturam” no receptor.
 - Impossível entender mensagens.
- Protocolo de acesso múltiplo: **coordena acesso a meio** compartilhado.
 - *i.e.*, determina **quando** nó pode transmitir.
- Três tipos básicos:
 - **Particionamento de canal**: *e.g.*, TDMA, FDMA.
 - Cada nó ganha “pedaço” isolado do canal.
 - Recurso não utilizado por nó fica **ocioso**.
 - **Acesso alternado**: *e.g.*, passagem de token.
 - Nós recebem oportunidade de usar o meio.
 - Oferta de oportunidade de transmissão para nó reduz eficiência.
 - **Acesso aleatório**: *e.g.*, Aloha, CSMA/CD.
 - Sem divisão, nós acessam quando julgam poderem.
 - **Colisões podem ocorrer, devem ser tratadas**.
 - Colisões reduzem eficiência.
 - Quanto **mais nós, mais provável** é a ocorrência de colisões.

Leitura e Exercícios Sugeridos

- Protocolos de acesso múltiplo:
 - Páginas 328 a 337 do Kurose (Seção 5.3 até Subseção 5.3.3, inclusive).
 - Exercícios de fixação 4, 5 e 7 do capítulo 5 do Kurose.
 - Problemas 10 (itens a e b) e 13 do capítulo 5 do Kurose.
- CSMA/CD, especificamente:
 - Páginas 346 a 349 do Kurose (Subseção 5.5.2).
 - Exercício de fixação 14 do capítulo 5 do Kurose.
 - Problemas 17, 18, 19, 20, 21 e 26 do capítulo 5 do Kurose.

Próxima Aula...

- Mais sobre camada de enlace.
- Três tópicos:
 - Endereçamento.
 - Por que outro endereçamento?
 - Diferençar para o endereçamento IP.
 - ARP.
 - Como fazer endereçamentos co-existirem?
 - Como o protocolo funciona?
 - Ethernet.
 - O padrão para LANs.
 - Histórico, características, funcionamento, ...