

# Aula 3 - Camada de Enlace: Protocolos de Acesso Múltiplo

Diego Passos

Universidade Federal Fluminense

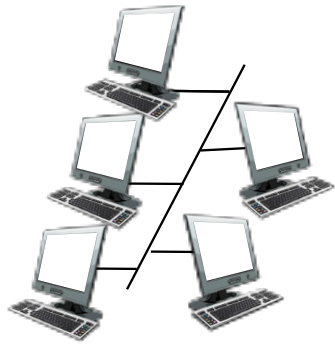
Redes de Computadores II

# 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

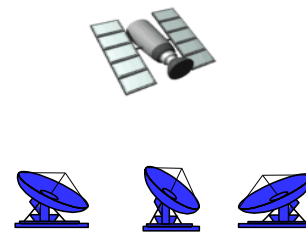
- Dois tipos de “enlaces”:
  - Ponto-a-ponto.
    - PPP para acesso discado.
    - Link ponto-a-ponto entre *switch* e *host* Ethernet.
  - **Difusão/Broadcast (cabo ou meio compartilhado).**
    - Ethernet original.
    - *Upload* em redes HFC.
    - 802.11 (Wi-Fi).



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

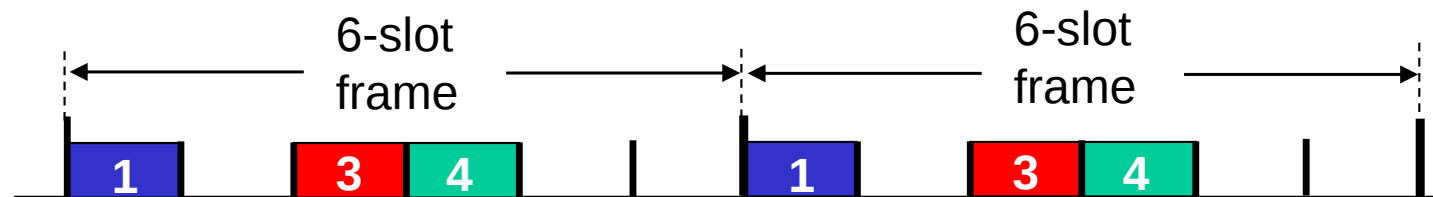
- Canal não é dividido, colisões podem ocorrer.
- Utilizam-se métodos para “recuperação” de colisões.

## Acesso Alternado (“Taking-turns”)

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

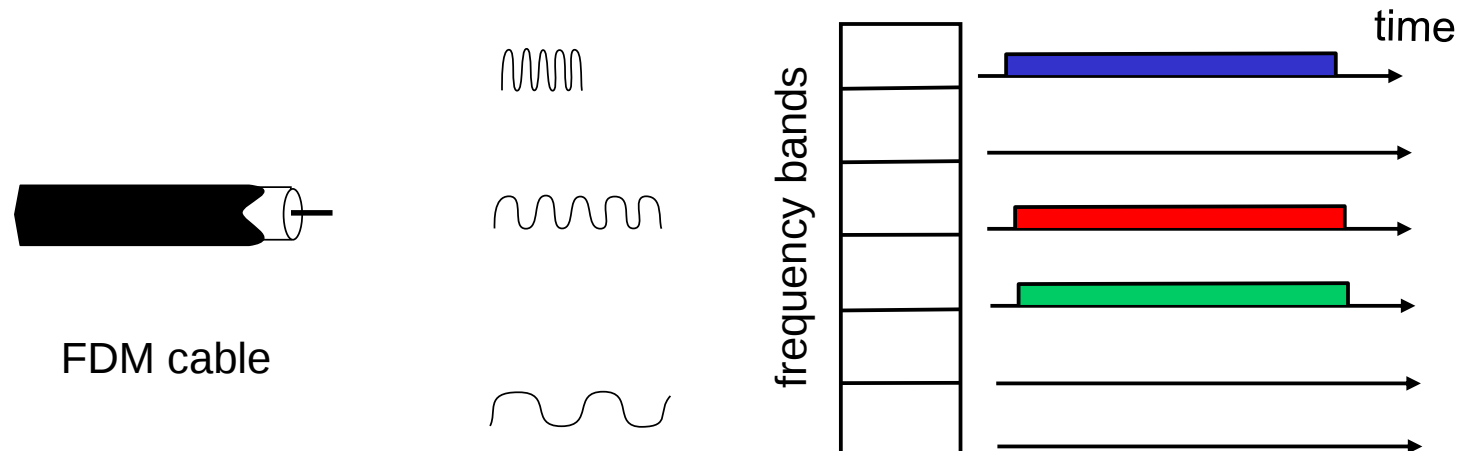
# Protocolos de Particionamento de Canal: TDMA

- *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.





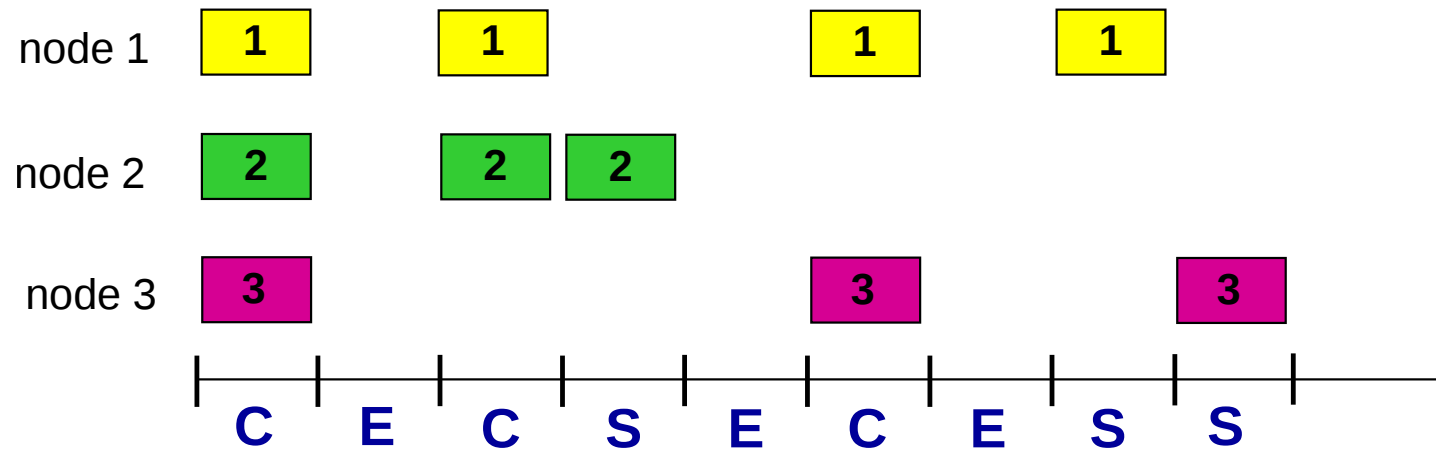
# Protocolos de Acesso Aleatório

- 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.

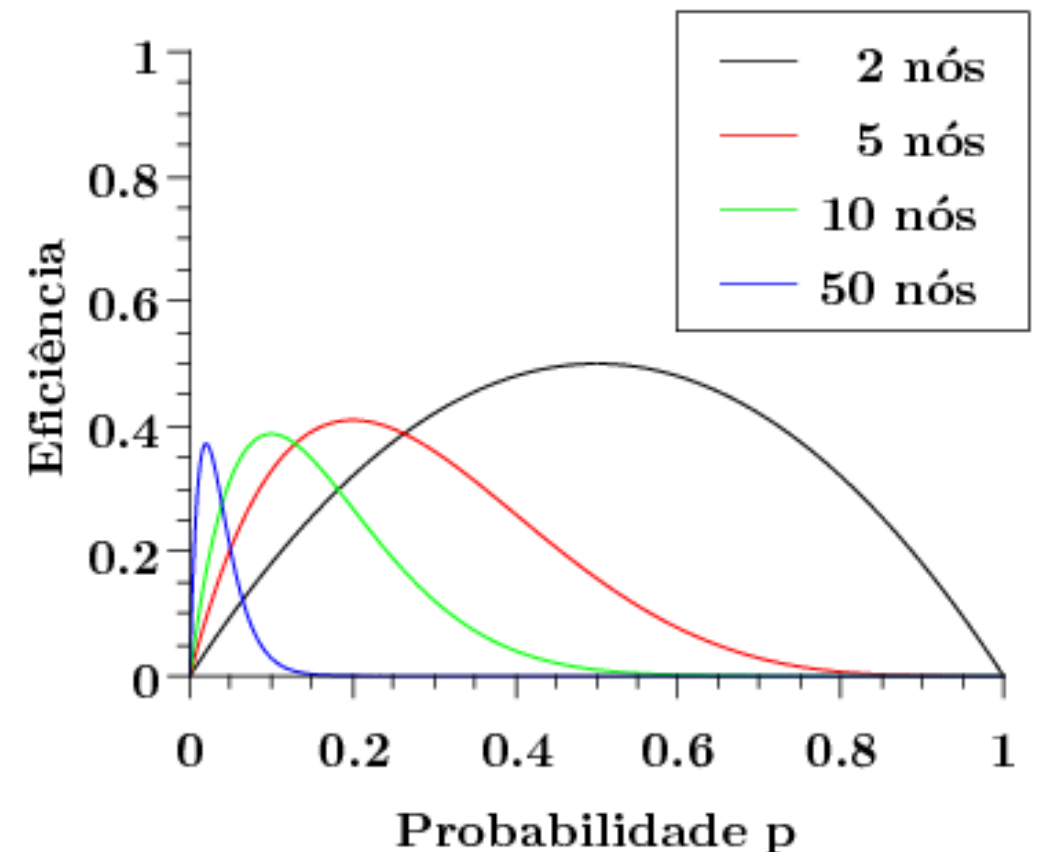
# Slotted ALOHA: Eficiência (I)

- **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:

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



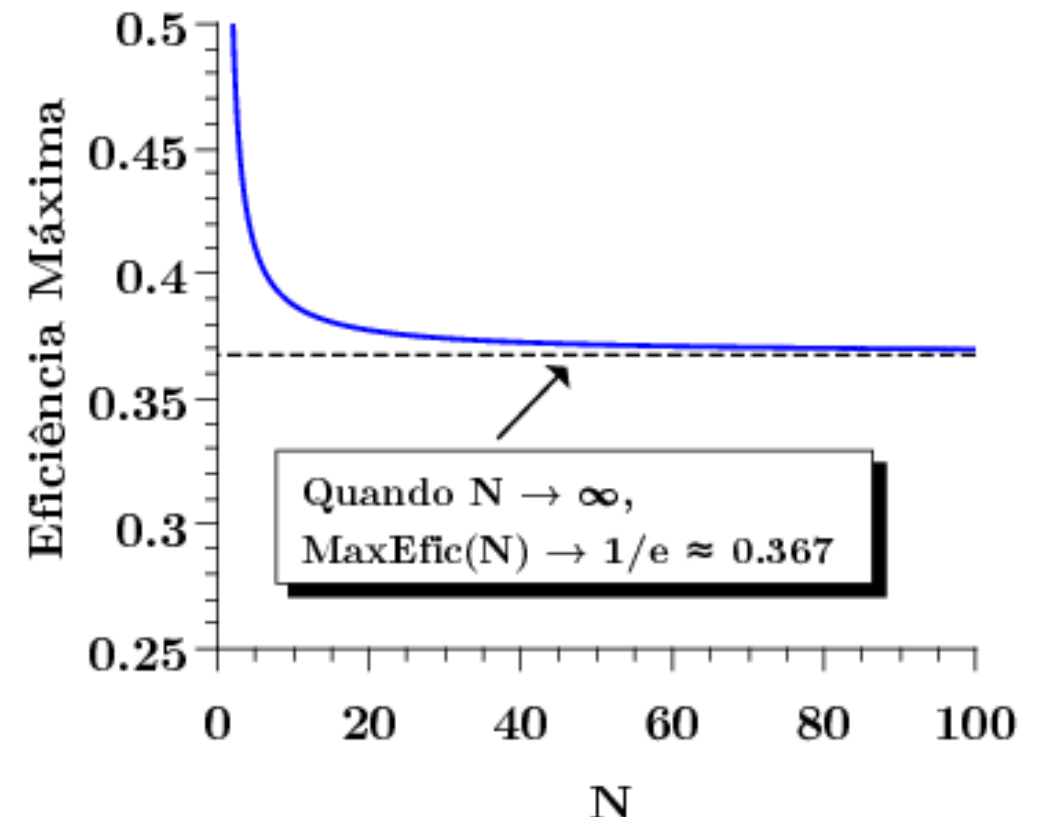
# Slotted ALOHA: Eficiência (II)

- 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  $Efic'(p) = 0$ :

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

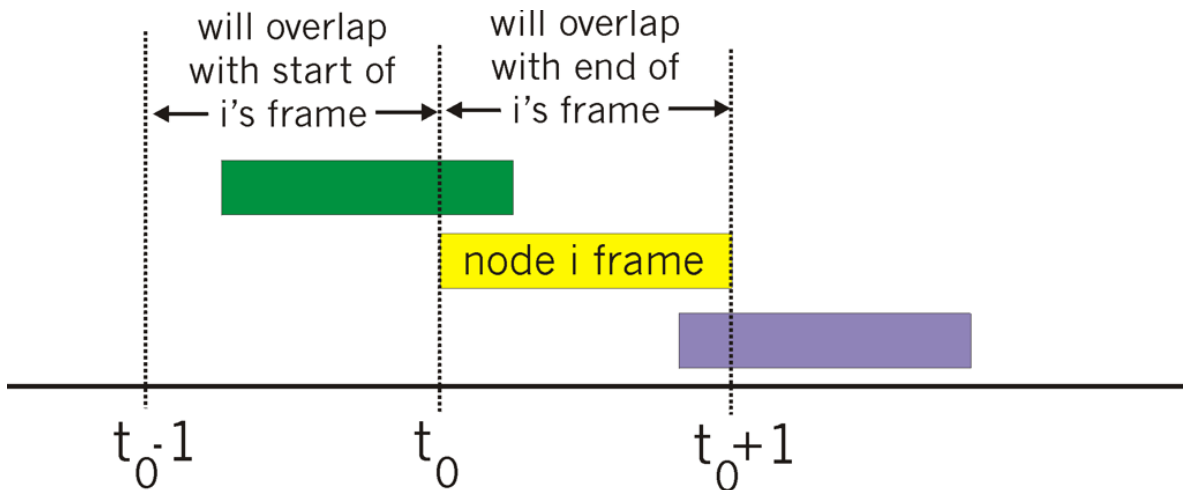
- Logo:

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



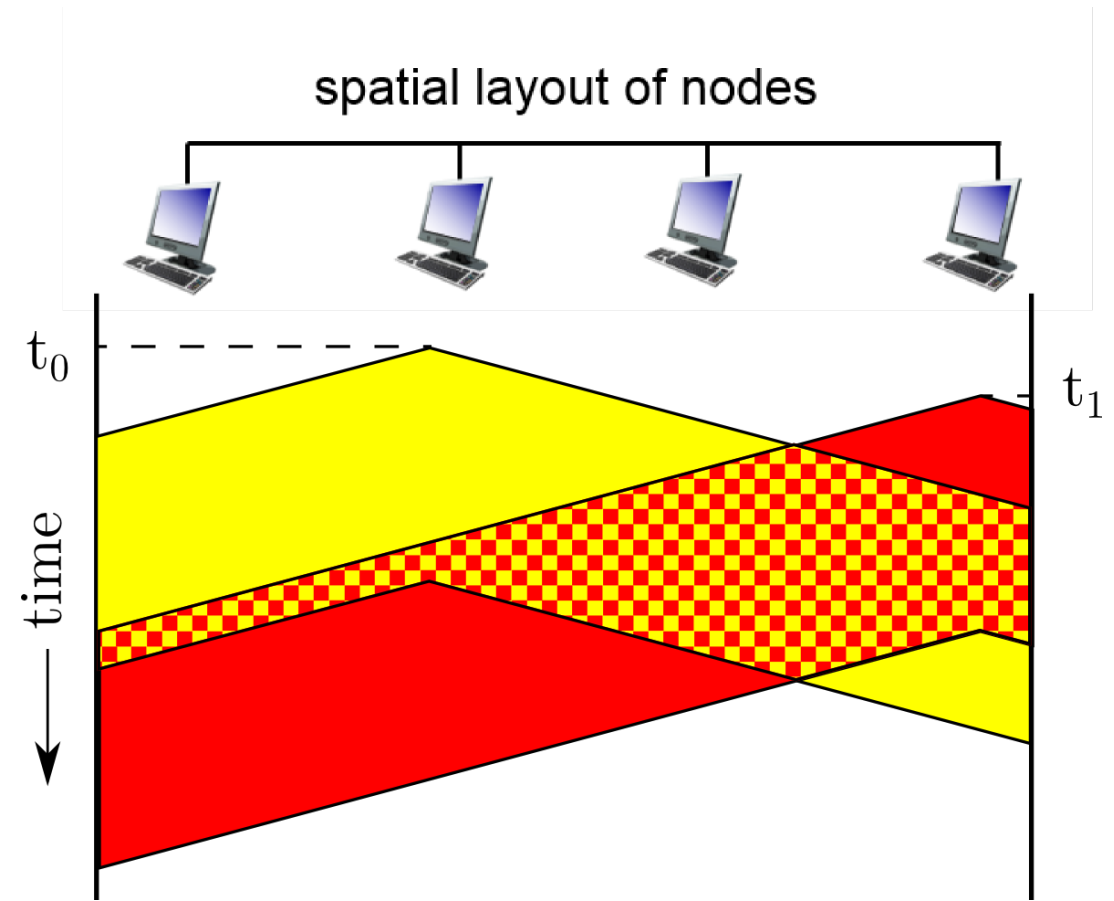
# ALOHA Puro (Unslotted)

- 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  $[t_0 - 1, t_0 + 1]$ .



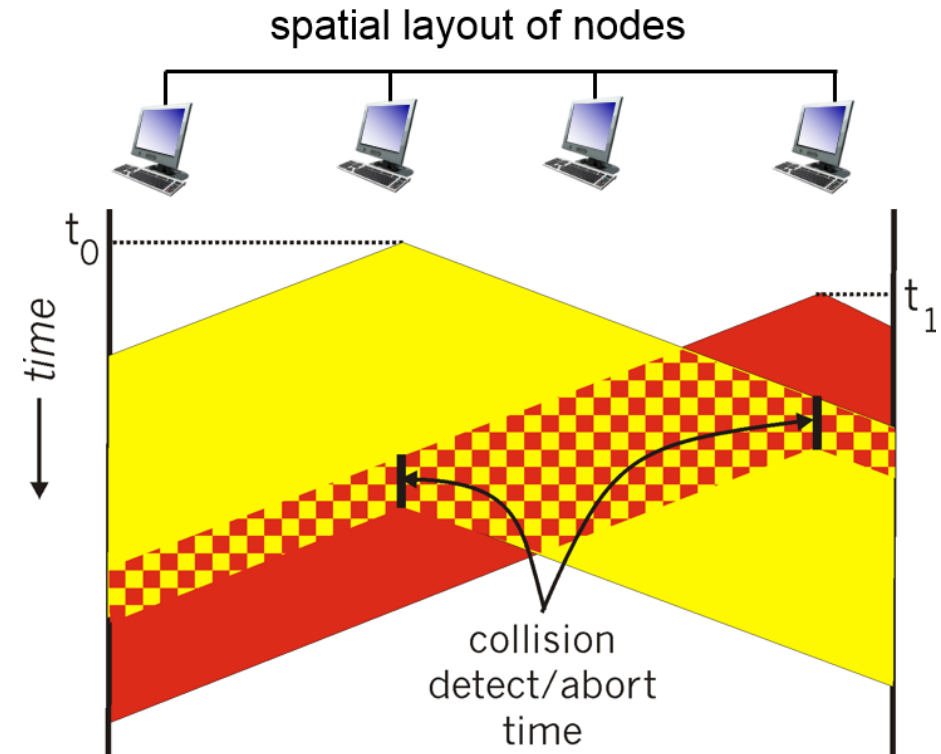
- Resultado: **eficiência é ainda mais baixa.**
- No máximo 18%!

- *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

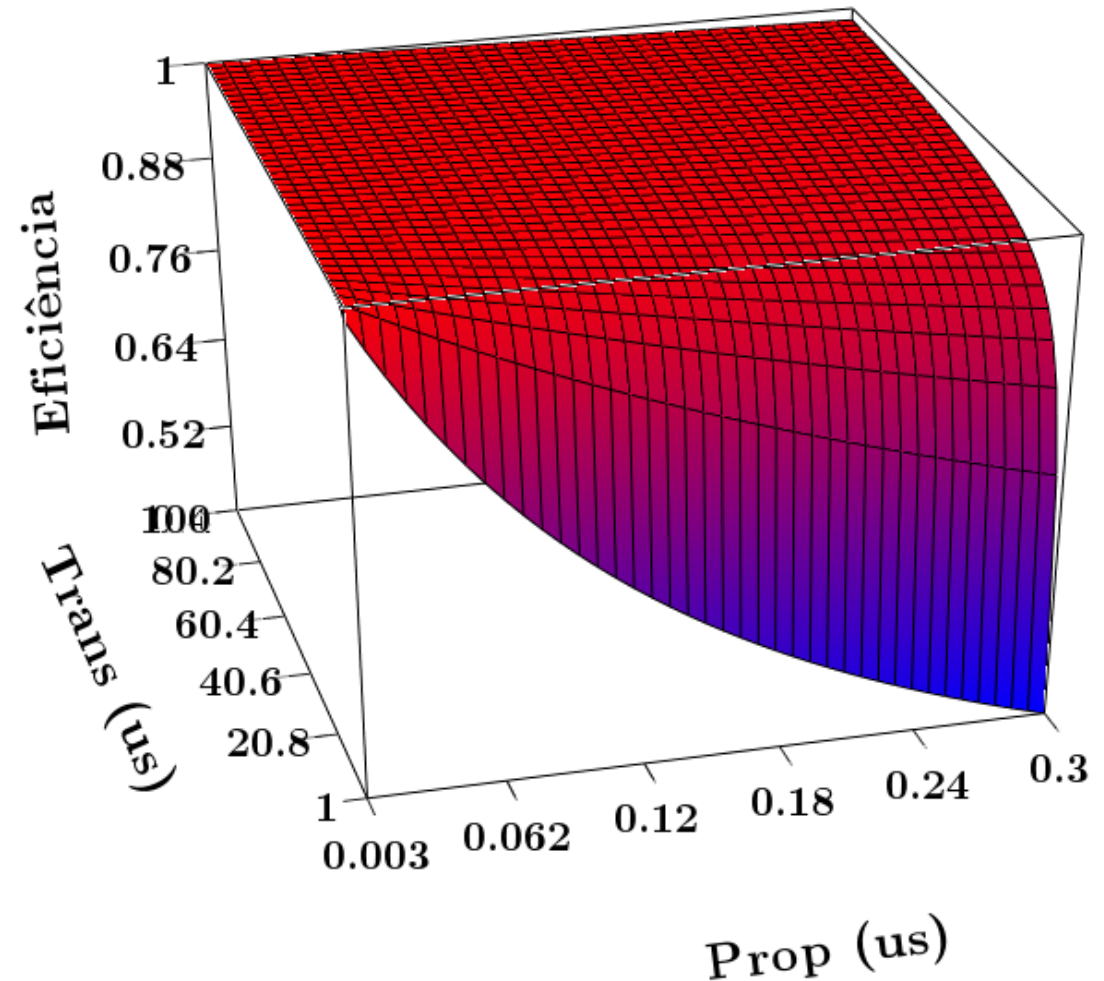
1. Interface recebe pacote da camada de rede, cria quadro.
2. Se o canal está livre, começa a transmissão do quadro.
  - Caso contrário, aguarda canal se tornar ocioso.
  - E então transmite.
3. Se a transmissão é completada sem que se tenha detectado uma colisão, processo termina.
4. Se durante a transmissão 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  $\implies$  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:**

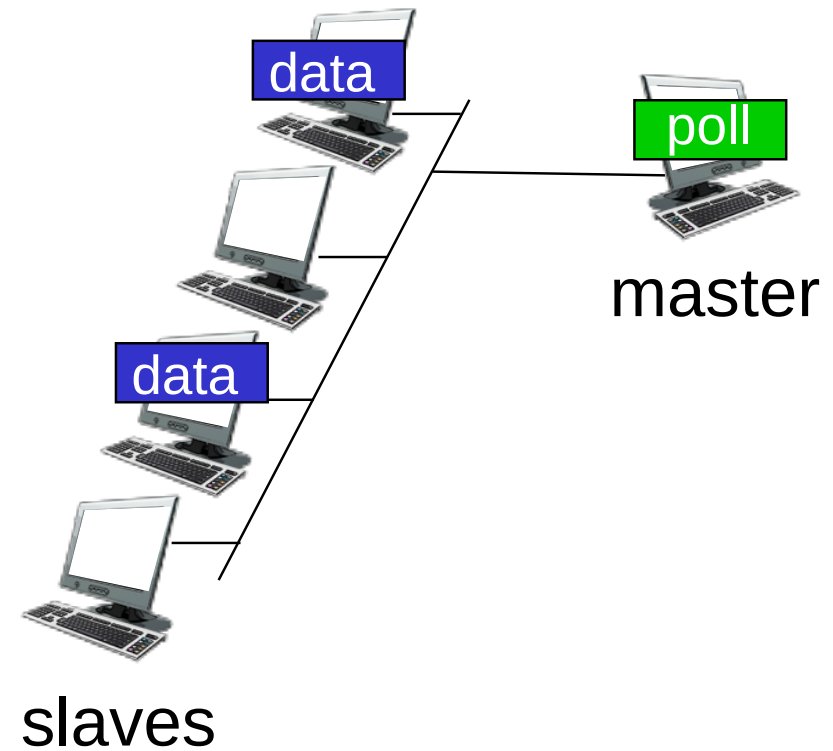
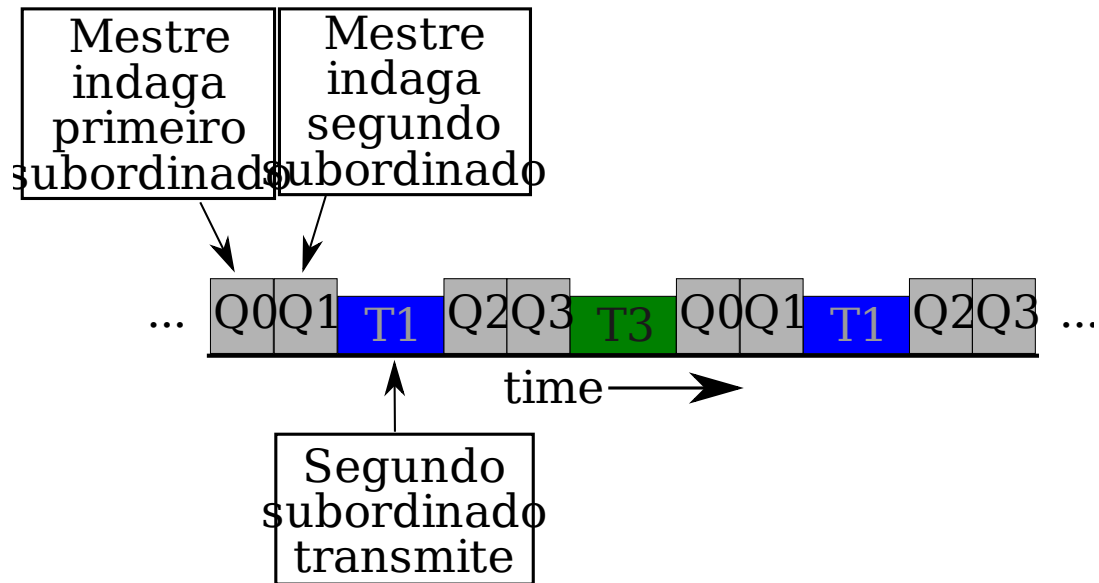
- Eficientes sob **baixa carga**.
- Mas sob **alta carga**: **colisões**.

- **Protocolos de Acesso Alternado:**

- Tentativa: combinar o melhor dos dois mundos!

# Acesso Alternado: Polling

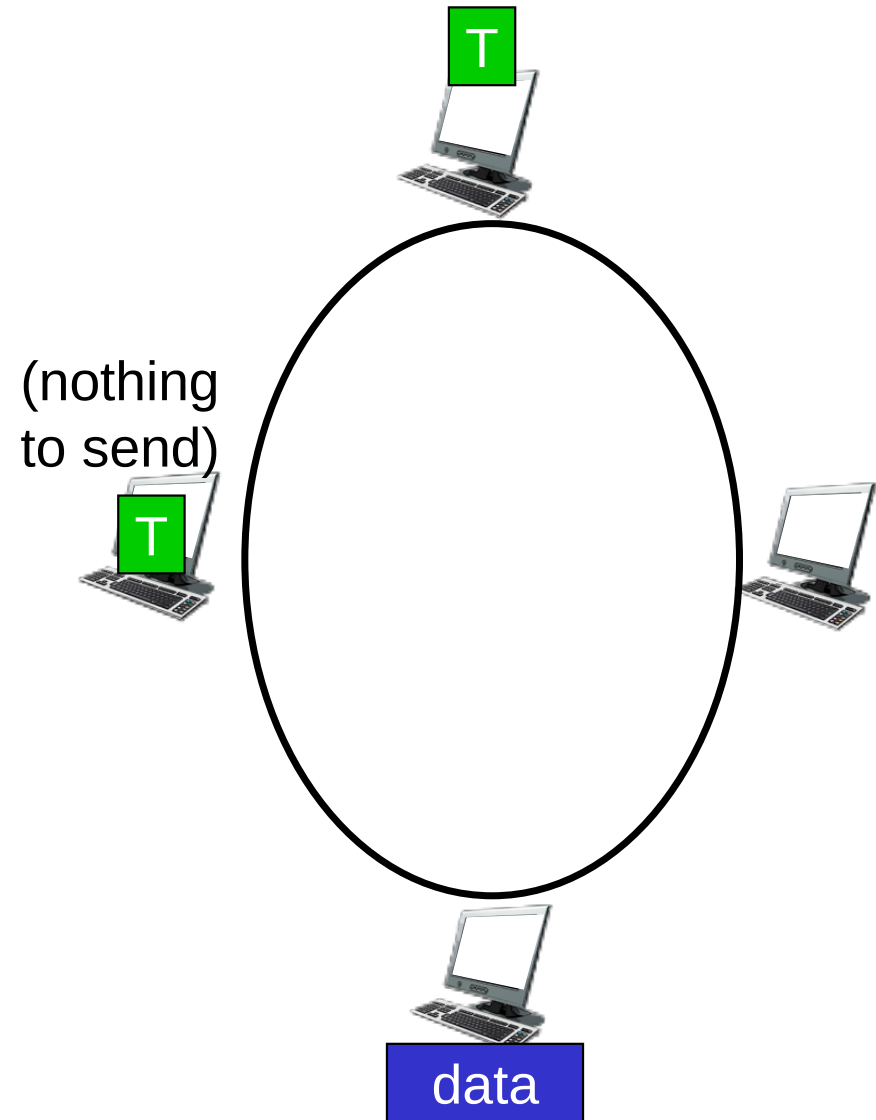
- Nó mestre “convida” nós subordinados para transmitir alternadamente.
- Normalmente usado com dispositivos subordinados “sem inteligência”.



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

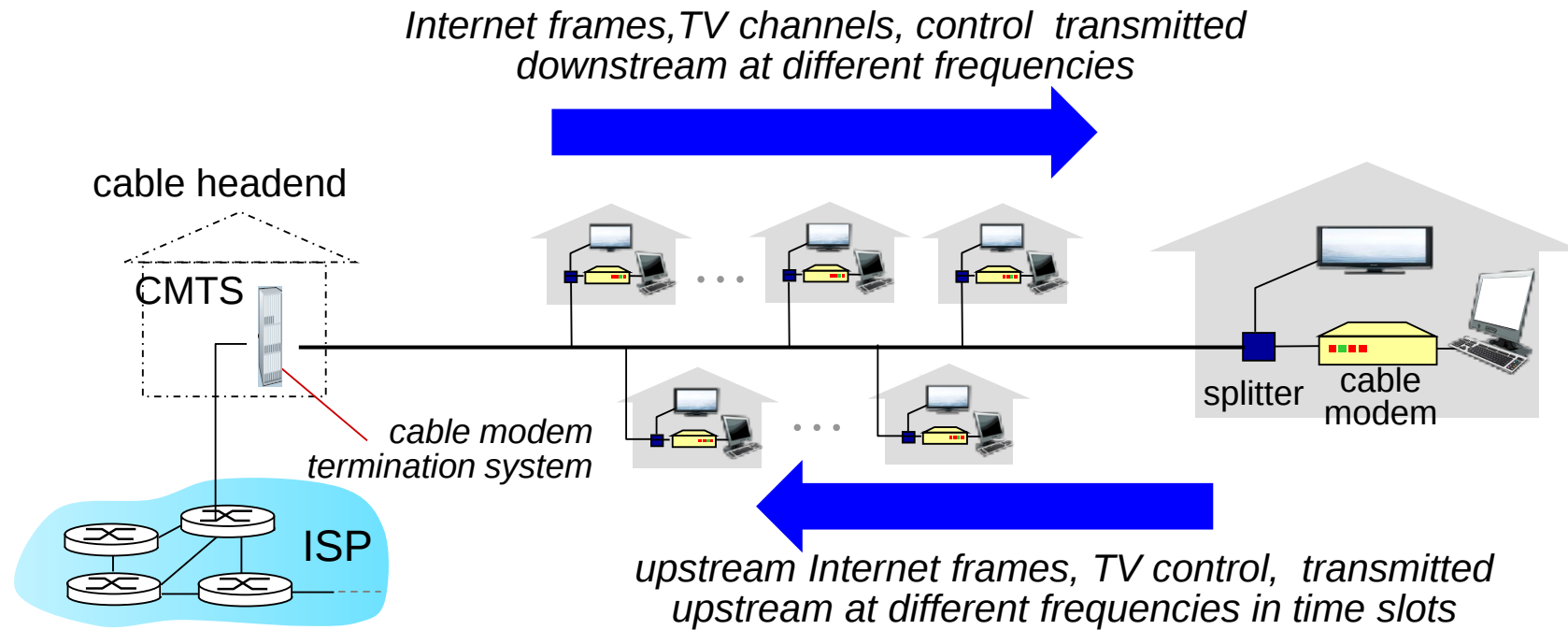
# Acesso Alternado: Passagem de Token

- 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.



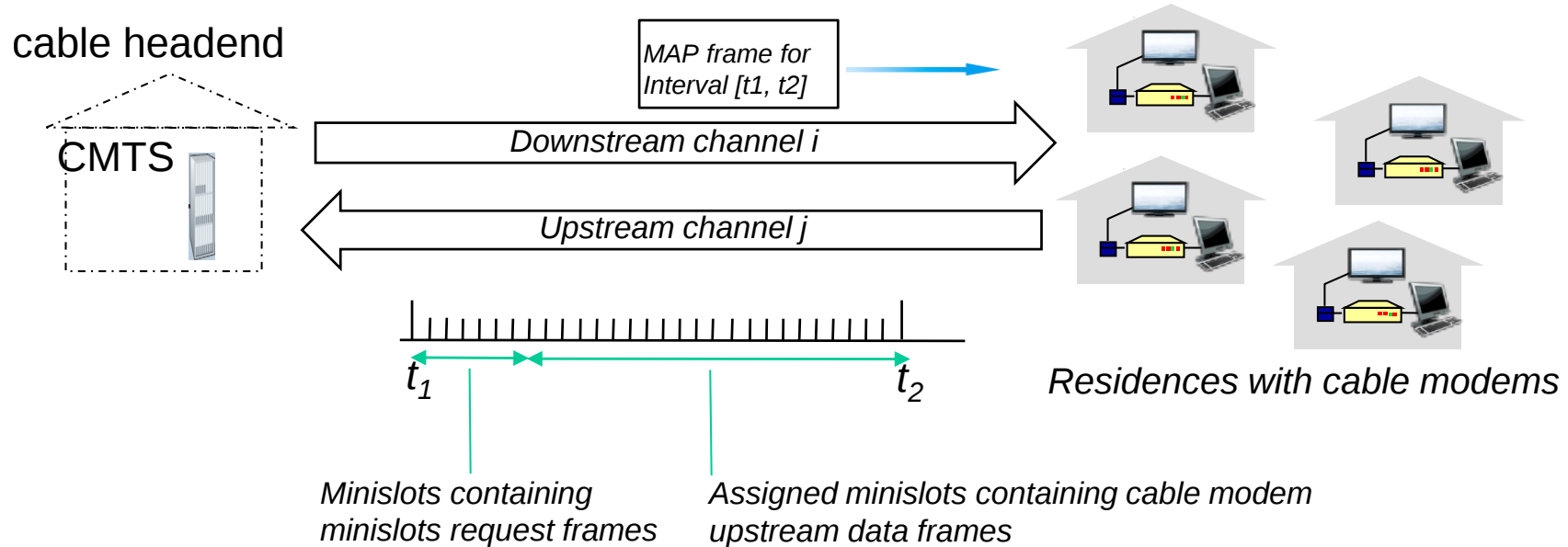
# DOCSIS (I)

- 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 julgarem 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?
    - Diferenças para o endereçamento IP.
  - ARP.
    - Como fazer endereçamentos co-existirem?
    - Como o protocolo funciona?
  - Ethernet.
    - O padrão para LANs.
    - Histórico, características, funcionamento, ...