Capítulo 5: A Camada de Enlace

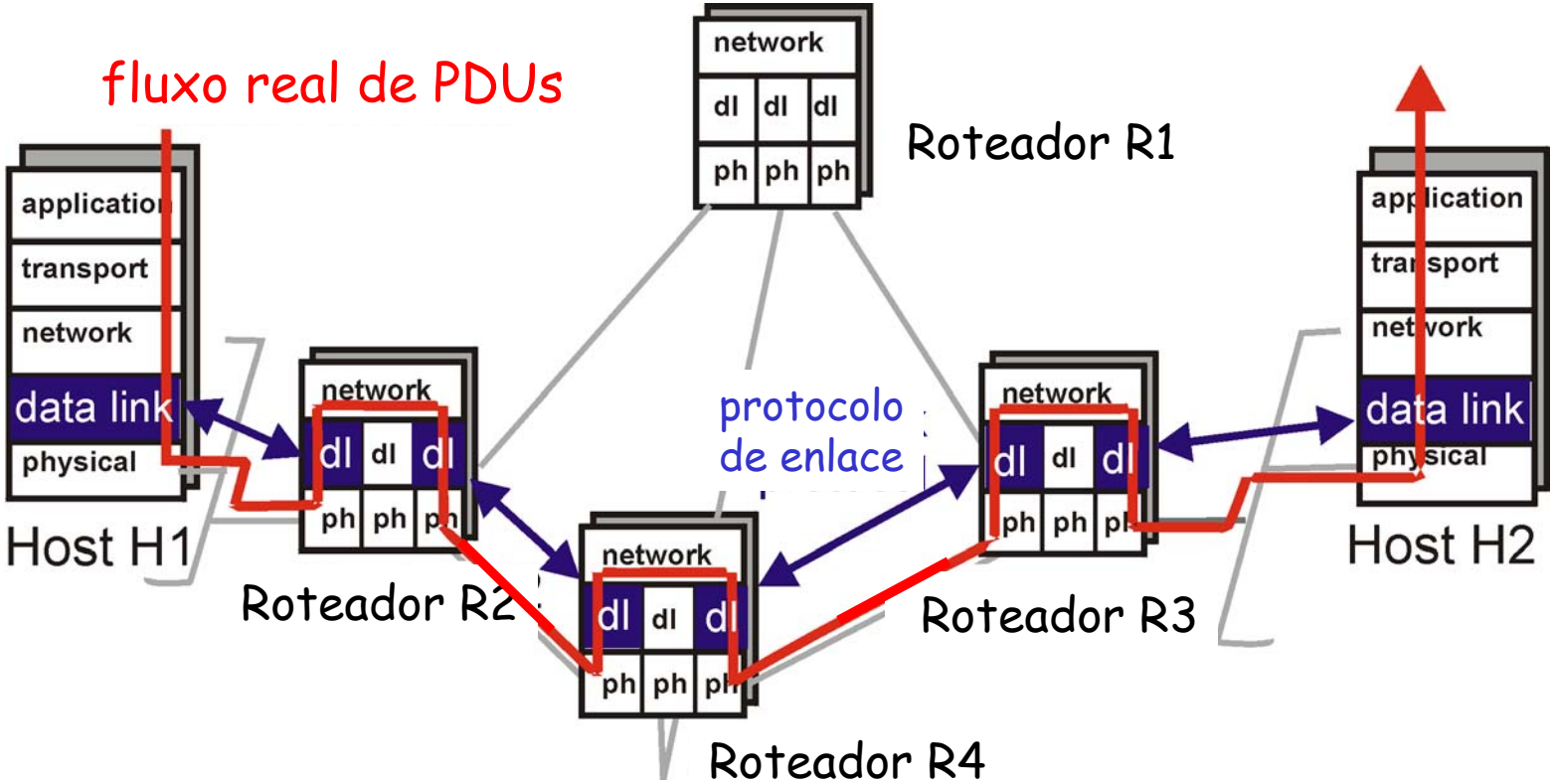
Nossos objetivos:

- entender os princípios por trás dos serviços da camada de enlace:
  - detecção de erros, correção
  - compartilhando um canal broadcast: acesso múltiplo
  - endereçamento da camada de enlace
  - trasnferência de dados confiável, controle de fluxo: *já visto!*
- instanciação e implementação de várias tecnologias da camada de enlace

Visão Geral:

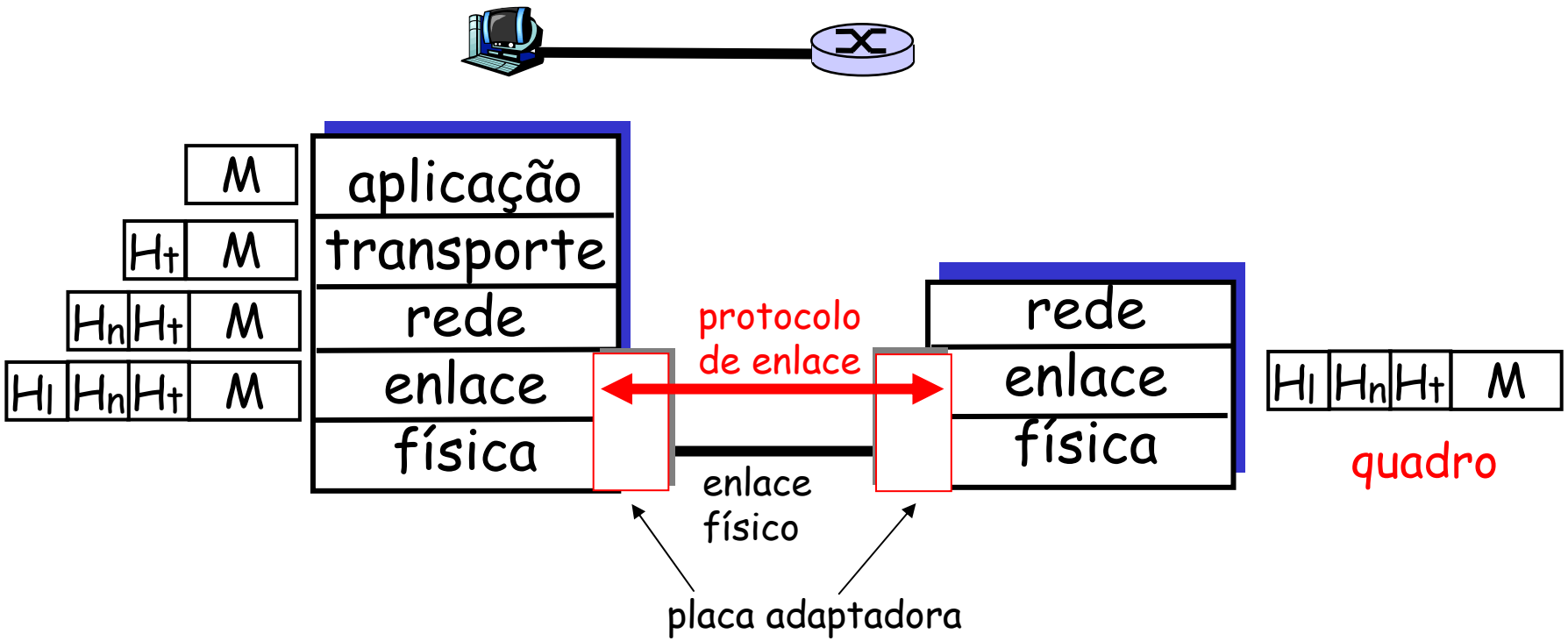
- serviços da camada de enlace
- detecção de erros, correção
- protocolos de acesso múltiplo e LANs
- endereçamento da camada de enlace, ARP
- tecnologias específicas da camada de enlace:
  - Ethernet
  - hubs, pontes, switches
  - IEEE 802.11 LANs
  - PPP
  - ATM

Camada de enlace: definindo o contexto



Camada de enlace: definindo o contexto

- dois elementos físicos *fisicamente conectados*:
  - host-roteador, roteador-roteador, host-host
- unidade de dados: *quadro (frame)*



Serviços da Camada de Enlace

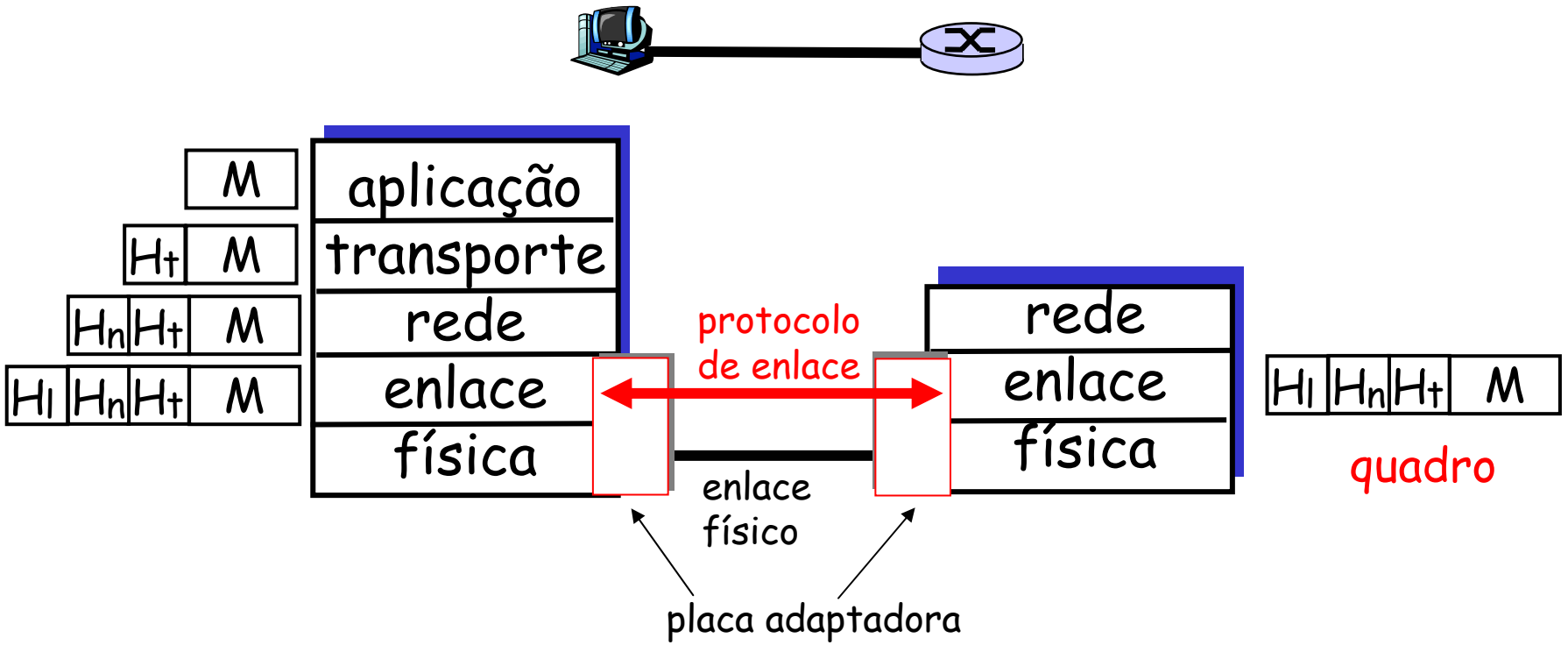
- Enquadramento, acesso ao enlace:
  - encapsula datagramas em quadros, acrescentando cabeçalhos e trailer
  - implementa acesso ao canal se o meio é compartilhado
  - 'endereços físicos' usados nos cabeçalhos dos quadros para identificar a fonte e o destino dos quadros
    - diferente do endereço IP !
- Entrega confiável entre dois equipamentos fisicamente conectados:
  - já aprendemos como isto deve ser feito (capítulo 3)!
  - raramente usado em enlaces com baixa taxa de erro (fibra, alguns tipos de par trançado)
  - enlaces sem-fio (wireless): altas taxas de erro
    - Q: porque prover confiabilidade fim-a-fim e na camada de enlace?

Serviços da Camada de Enlace (cont.)

- Controle de Fluxo:
  - limitação da transmissão entre transmissor e receptor
- *Detecção de Erros*:
  - erros causados pela atenuação do sinal e por ruídos.
  - o receptor detecta a presença de erros:
    - avisa o transmissor para reenviar o quadro perdido
- Correção de Erros:
  - o receptor identifica *e corrige* o bit com erro(s) sem recorrer à retransmissão

Implementação: Camada de Enlace

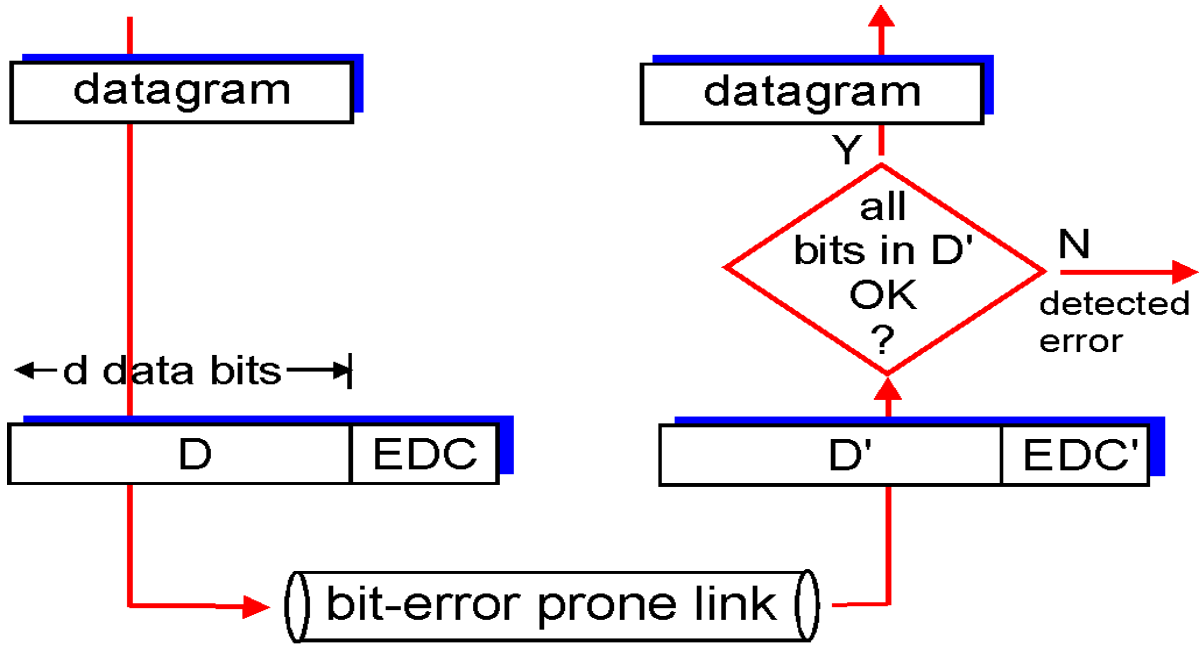
- implementado no "adaptador"
  - ex., placa PCMCIA, placa Ethernet
  - tipicamente inclui: RAM, chips DSP, interface com barramento do host, e interface do enlace



Detecção de Erros

EDC= Bits de Detecção e Correção de Erros (redundancia)
D = Dados protegidos pela verificação de erros, pode incluir os campos de cabeçalho

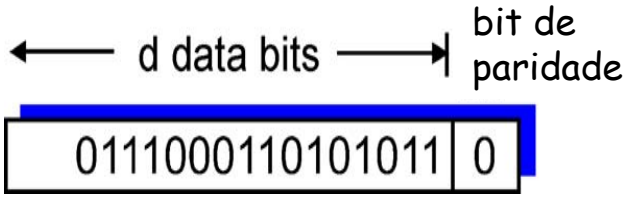
- A detecção de erros não é 100% confiável!
  - protocolos podem deixar passar alguns erros, mas é raro
  - Quanto maior o campo EDC melhor é a capacidade de detecção e correção de erros



Verificação de Paridade

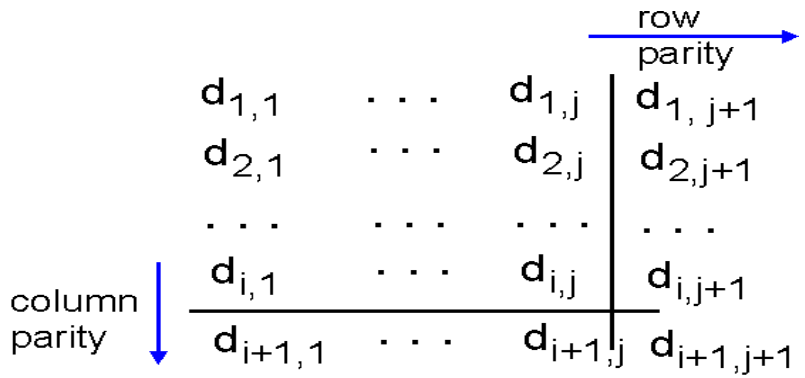
Paridade com Bit único:

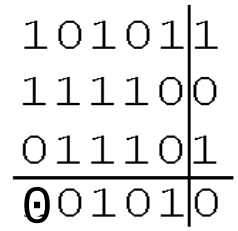
Detecta erro de um único bit



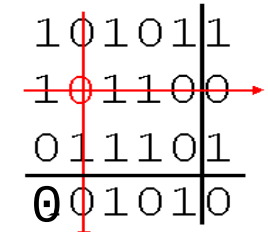
Paridade Bi-dimensional:

Detecta *e corrige* erros de um único bit





sem erros



erro de paridade

erro de paridade

erro de 1 bit corrigível

Checksum da Internet

Objetivo: detectar "erros" (ex. bits trocados) num segmento transmitido (nota: usado *apenas* na camada de trasnporte)

Sender:

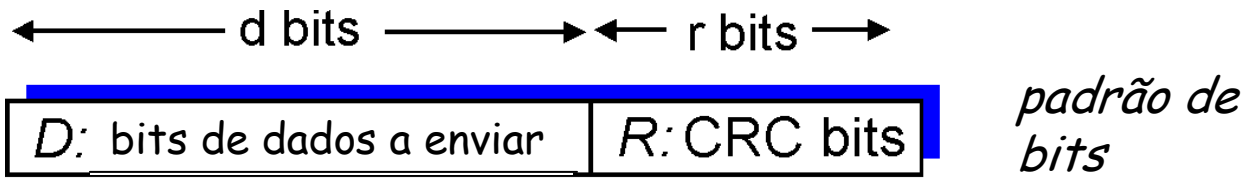
- trata o conteúdo de segmentos como seqüências de números inteiros de 16 bits
- checksum: adição (soma em complemento de um) do conteúdo do segmento
- transmissor coloca o valor do checksum no campo checksum do UDP

Receptor:

- computa o checksum do segmento recebido
- verifica se o checksum calculado é igual ao valor do campo checksum:
  - NÃO - erro detectaado
  - SIM - não detectou erro. *Mas talvez haja erros apesar disso?* Mais depois....

Verificação de Redundância Cíclica

- encara os bits de dados, D, como um número binário
- escolhe um padrão gerador de r+1 bits, G
- objetivo: escolhe r CRC bits, R, tal que
  - <D,R> é divisível de forma exata por G (módulo 2)
  - receptor conhece G, divide <D,R> por G. Se o resto é diferente de zero: erro detectado!
  - pode detectar todos os erros em seqüência (burst errors) com comprimento menor que r+1 bits
- largamente usado na prática (ATM, HDCL)



padrão de bits

$$D * 2^r \quad \text{XOR} \quad R$$

fórmula matemática

Exemplo de CRC

Desejado:

D·2r XOR R = nG

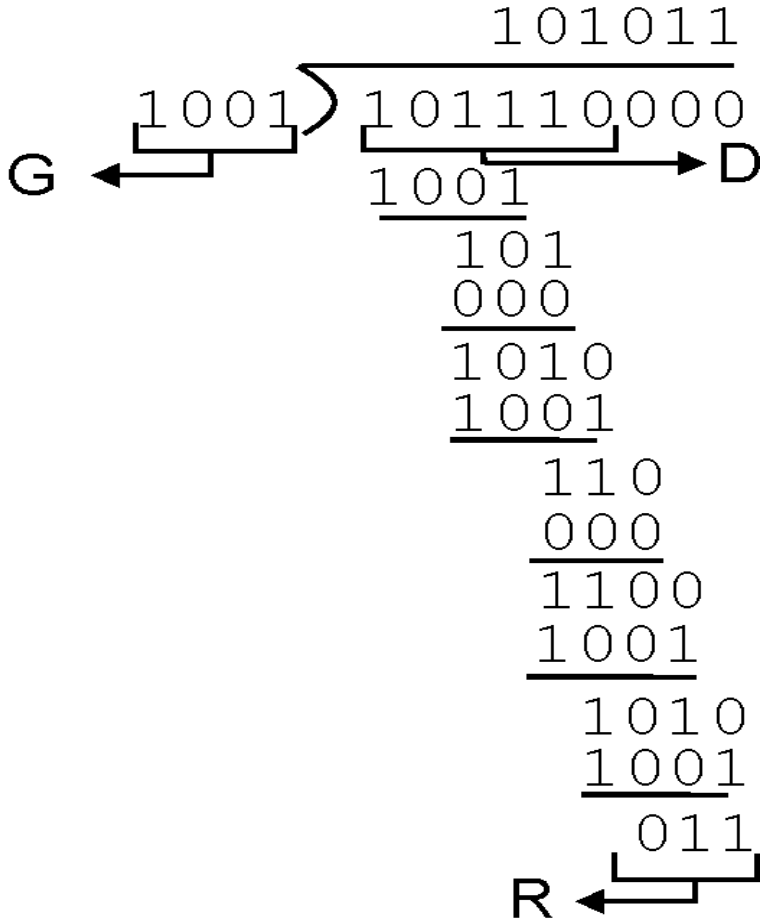
equivalente a:

D·2r = nG XOR R

equivalente a:

se nós dividimos D·2r por G, buscamos resto R

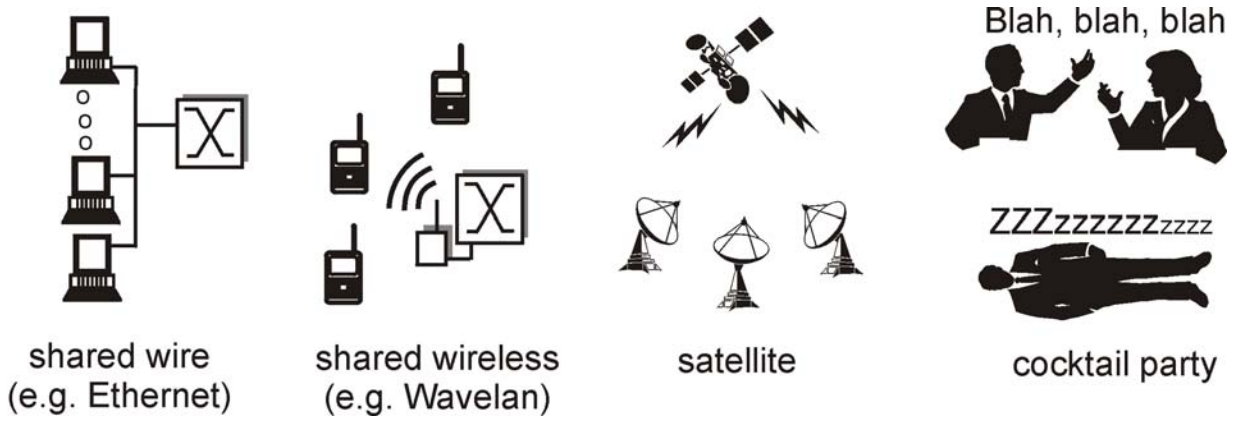
$$R = \text{resto}\left[\frac{D \cdot 2r}{G}\right]$$



Enlaces de Acesso Múltiplo e Protocolos

Três tipos de enlaces:

- pointo-a-pointo (fio único, ex. PPP, SLIP)
- broadcast (fio ou meio compartilhado; ex, Ethernet, Wavelan, etc.)



- switched (ex., switched Ethernet, ATM etc)

Protocolos de Acesso Múltiplo

- canal de comunicação único e compartilhado
- duas ou mais transmissões pelos nós: interferência
  - apenas um nó pode transmitir com sucesso num dado instante de tempo
- *protocolo de múltiplo acesso:*
  - algoritmo distribuído que determina como as estações compartilham o canal, isto é, determinam quando cada estação pode transmitir
  - comunicação sobre o compartilhamento do canal deve utilizar o própro canal!
  - o que procurar em protocolos de múltiplo acesso:
    - síncrono ou assíncrono
    - informação necessária sobre as outras estações
    - robustez (ex., em relação a erros do canal)
    - desempenho

Protocolos de Acesso Múltiplo

- tese: os humanos usam protocolos de múltiplo acesso todo o tempo
- classe pode "descobrir" protocolos de múltiplo acesso
  - protocolo multiacesso 1:
  - protocolo multiacesso 2:
  - protocolo multiacesso 3:
  - protocolo multiacesso 4:

Protocolos MAC: uma taxonomia

Três grandes classes:

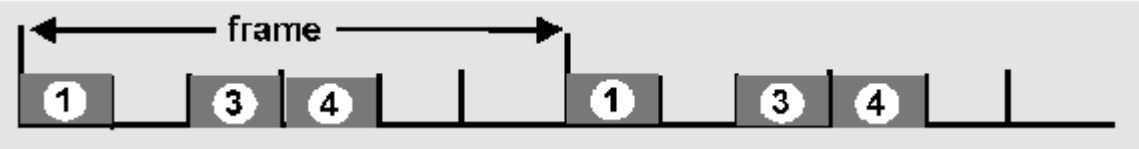
- Particionamento de canal
  - dividem o canal em pedaços menores (compartimentos de tempo, freqüência)
  - aloca um pedaço para uso exclusivo de cada nó
- Acesso Aleatório
  - permite colisões
  - "recuperação" das colisões
- Passagem de Permissão
  - compartilhamento estritamente coordenado para evitar colisões

Objetivo: eficiente, justo, simples, descentralizado

Protocolos MAC com Particionamento de Canal: TDMA

TDMA: acesso múltiplo por divisão temporal

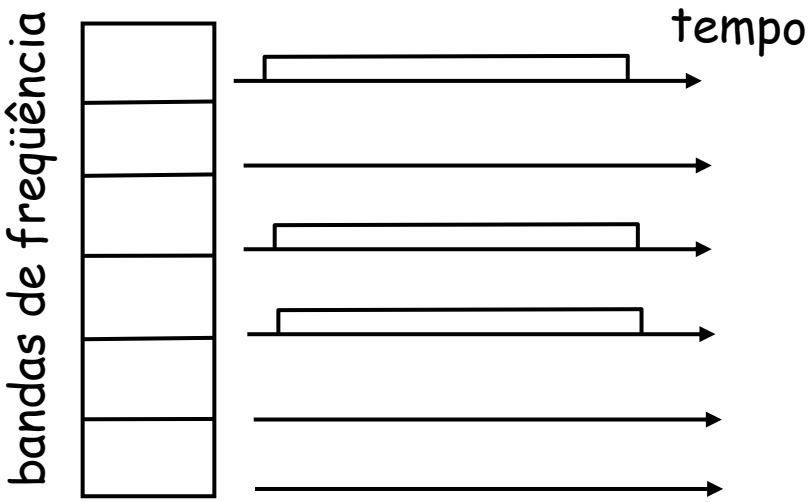
- acesso ao canal é feito por "turnos"
- cada estação controla um compartimento ("slot") de tamanho fixo (tamanho = tempo de transmissão de pacote) em cada turno
- compartimentos não usados são disperdiçados
- exemplo: rede local com 6 estações: 1,3,4 têm pacotes, compartimentos 2,5,6 ficam vazios



Protocolos MAC com Particionamento de Canal: FDMA

FDMA: acesso múltiplo por divisão de freqüência

- o espectro do canal é dividido em bandas de freqüência
- cada estação recebe uma banda de freqüência
- tempo de transmissão não usado nas bandas de freqüência é disperdiçado
- exemplo: rede local com 6 estações: 1,3,4 têm pacotes, as bandas de freqüência 2,5,6 ficam vazias

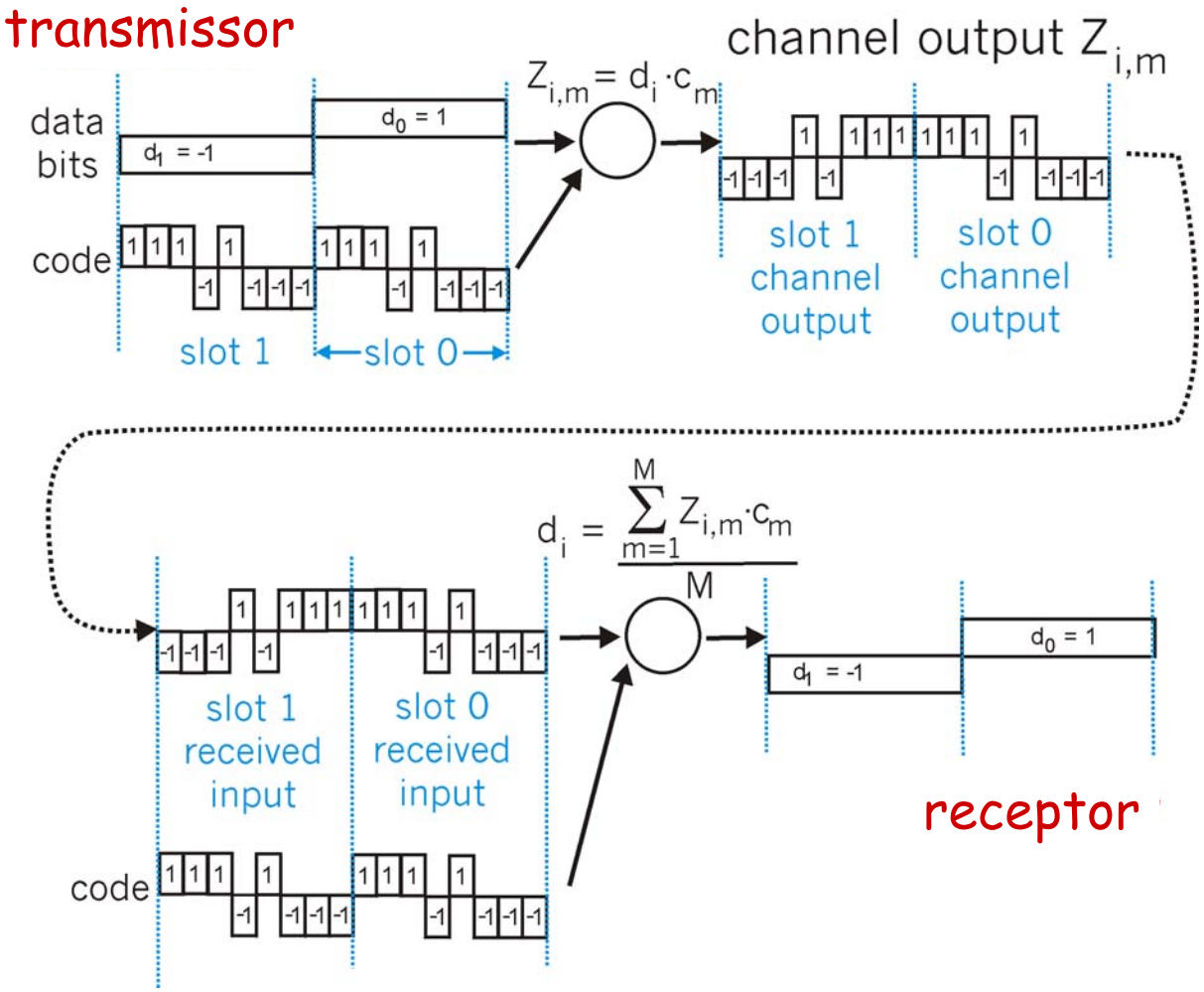


Particionamento de Canal (CDMA)

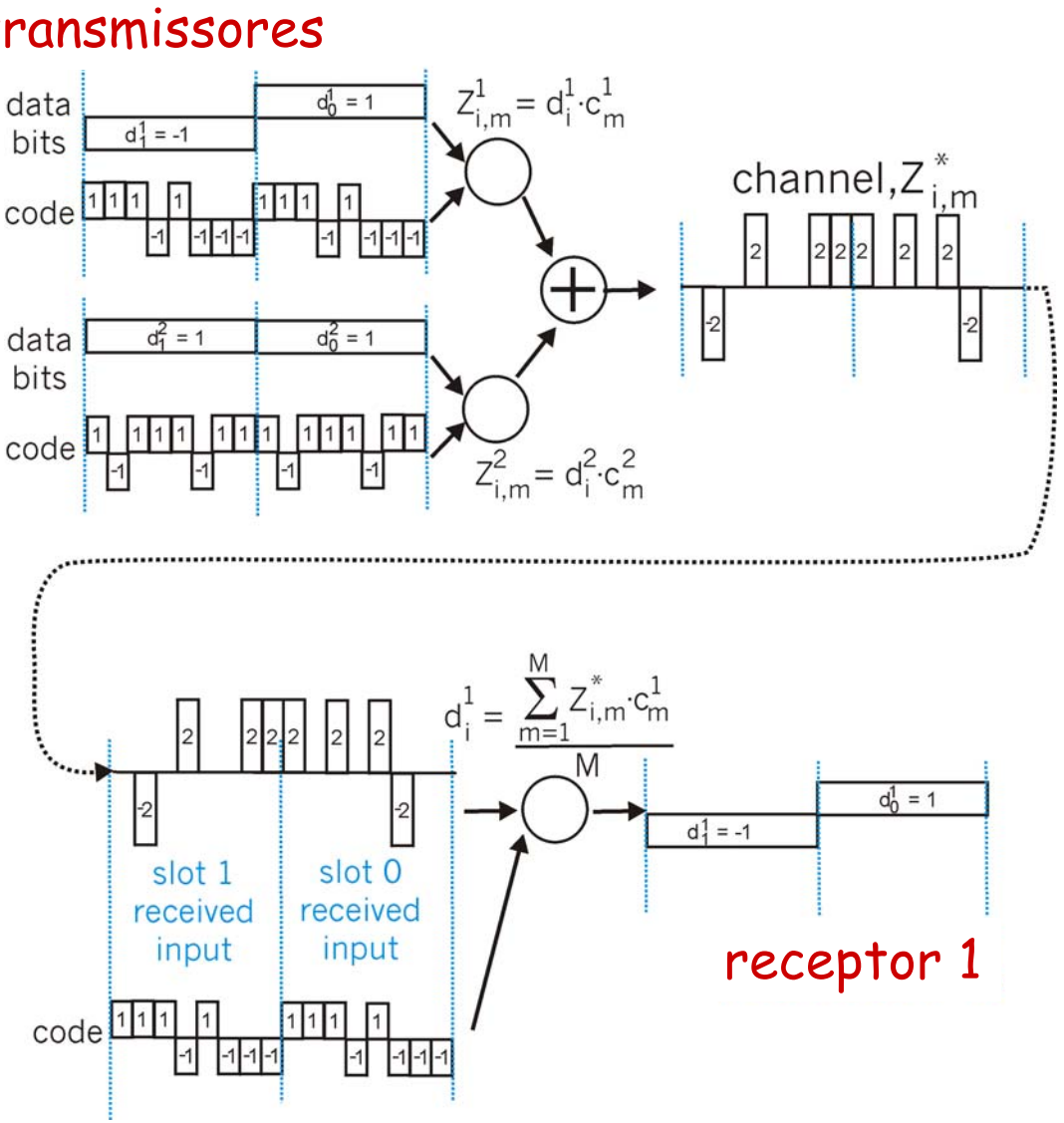
CDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Códigos)

- um código único é atribuído a cada usuário, isto é, o código define o particionamento
- muito usado em canais broadcast, sem-fio (celular, satelite,etc)
- todos os usuários usam a mesma freqüência, mas cada usuário tem a sua própria maneira de codificar os dados. Esta codificaçaõ é definida pelo código que o usuário recebe ("chipping sequence")
- *sinal codificado* = (dados originais) X (chipping sequence)
- *decodificação:* produto interno do sinal codificado e da seqüência de codificação ("chipping sequence")
- permite que múltiplos usuários "coexistam" e transmitam simultaneamente com mínima interferência (os códigos que minimizam a interferência são chamados "ortogonais")

CDMA Codificação e Decodificação



CDMA: interferência de dois transmissores

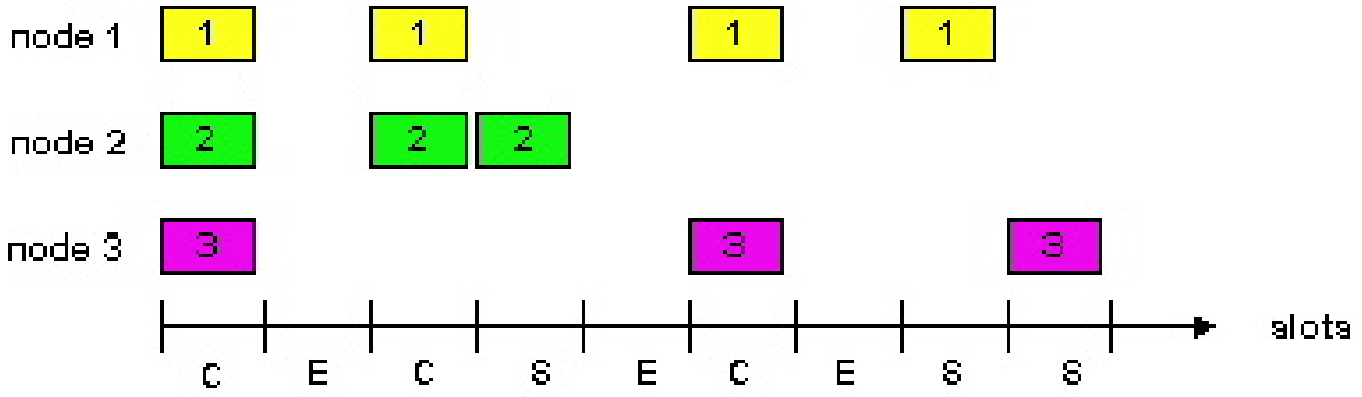


Protocolos de Acesso Aleatório

- Quando o nó tem um pacote a enviar:
  - transmite com toda a taxa do canal R.
  - não há uma regra de coordenação *a priori* entre os nós
- dois ou mais nós transmitindo -> "colisão",
- Protocolo MAC de acesso aleatório especifica:
  - como detectar colisões
  - como as estações se recuperam das colisões (ex., via retransmissões atrasadas)
- Exemplos de protocolos MAC de acesso aleatório:
  - slotted ALOHA
  - ALOHA
  - CSMA e CSMA/CD

Slotted Aloha

- tempo é dividido em compartimentos de tamanho igual (= tempo de transmissão de um pacote)
- nó com pacote pronto: transmite no início do próximo compartimento
- se houver colisão: retransmite o pacote nos futuros compartimentos com probabilidade p, até que consiga enviar.



Compartimentos: Sucesso (S), Colisão (C), Vazio (E)

Eficiência do Slotted Aloha

P: qual a máxima fração de compartimentos com sucesso?

R: Suponha que N estações têm pacotes para enviar

- cada uma transmite num compartimento com probabilidade *p*
- prob. sucesso de transmissão, *S*, é:

por um único nó: $S = p\,(1-p)^{(N-1)}$

por qualquer um dos N nós

S = Prob (apenas um transmite)

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

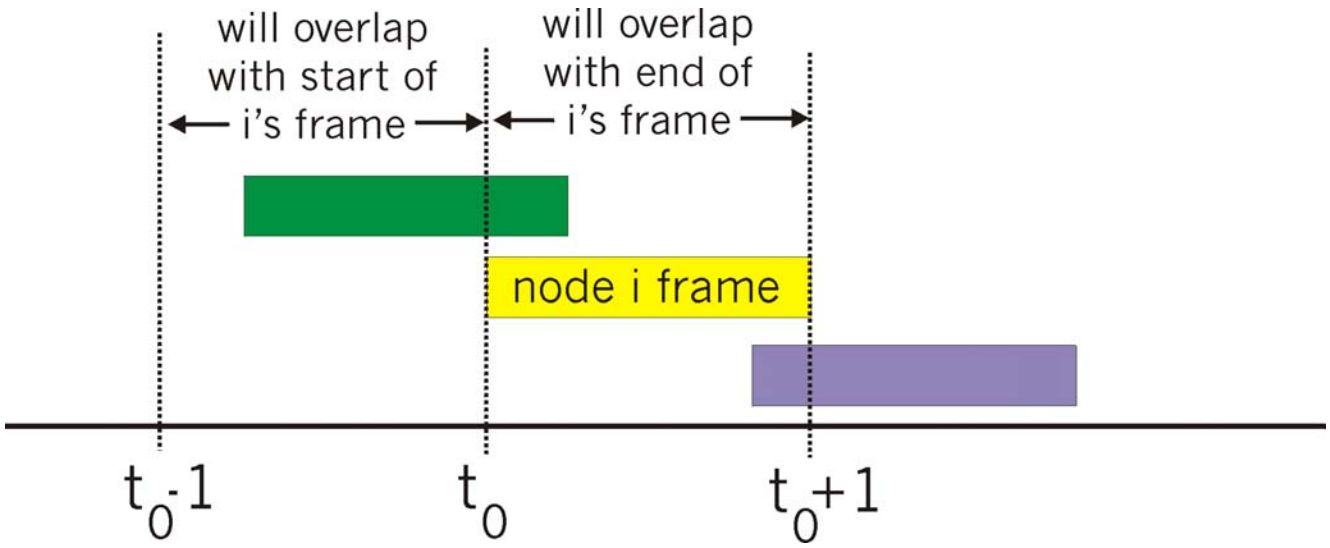
... escolhendo p ótimo quando N -> infinito ...

$= 1/e = .37$ *quando N -> infinito*

No máximo: uso do canal para envio de dados úteis: 37% do tempo!

ALOHA Puro (unslotted)

- unslotted Aloha: operãção mais simples, não há sincronização
- pacote necessita transmissão:
  - enviar sem esperar pelo início de um compartimento
- a probabilidade de colisão aumenta:
  - pacote enviado em t_0 colide com outros pacotes enviados em $[t_0-1, t_0+1]$



Aloha Puro (cont.)

P(sucesso por um dado nó) = P(nó transmite) ·

P(outro nó não transmite em $[t_0-1,t_0]$) ·

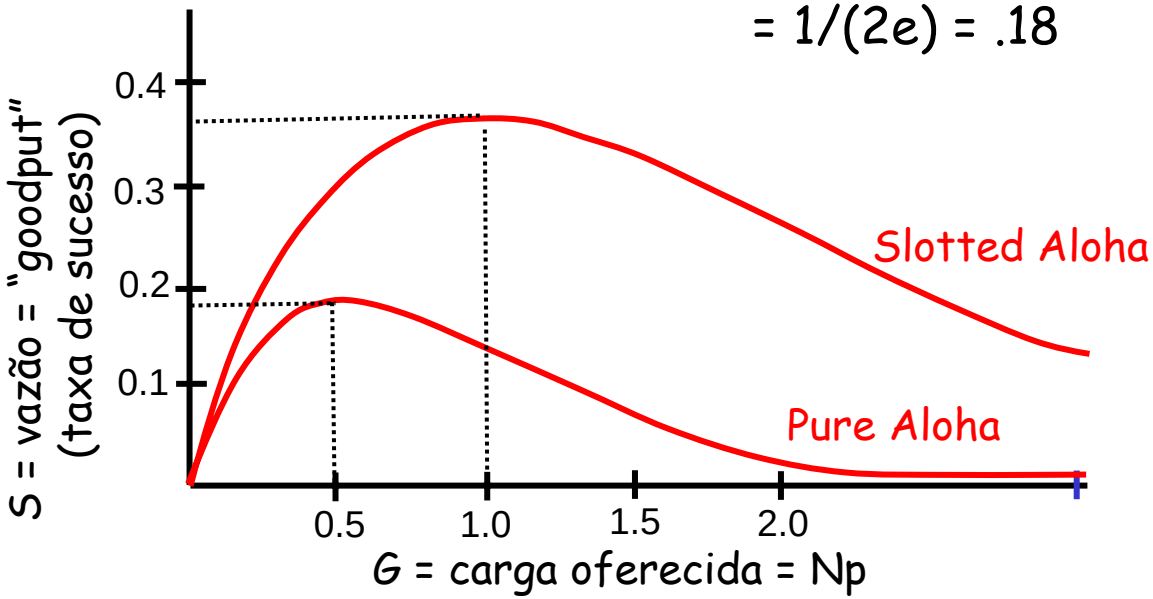
P(outro nó não transmite em $[t_0,t_0+1]$)

= p · (1-p) · (1-p)

P(sucesso por um qualquer dos N nós) = N p · (1-p) · (1-p)

... escolhendo p ótimo quando n -> infinito ...

= 1/(2e) = .18



protocolo limita a vazão efetiva do canal!

CSMA: Carrier Sense Multiple Access

CSMA: escuta antes de transmitir:

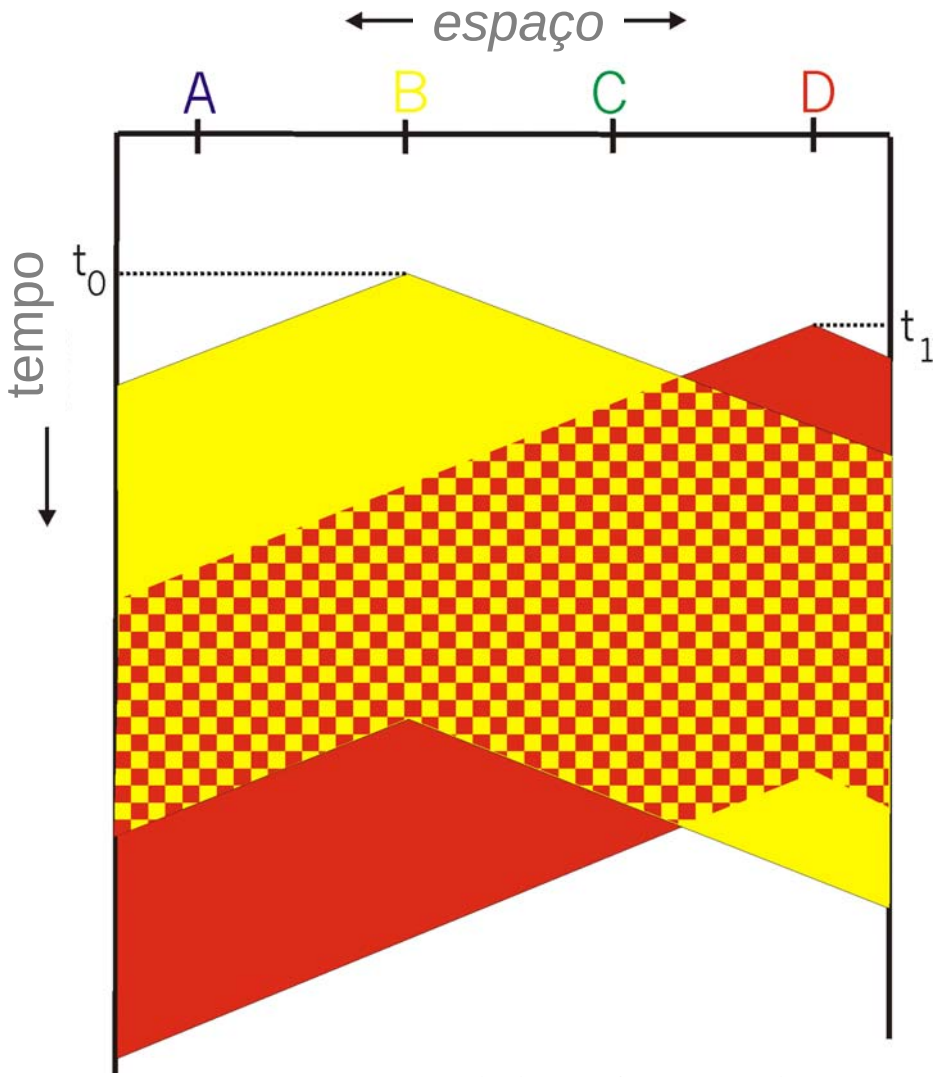
- Se o canal parece vazio: transmite o pacote
- Se o canal está ocupado, adia a transmissão
  - CSMA Persistente: tenta outra vez imediatamente com probabilidade p quando o canal se torna livre (pode provocar instabilidade)
  - CSMA Não-persistente: tenta novamente após um intervalo aleatório
- analogia humana: não interrompa os outros!

Colisões no CSMA

colisões *podem* ocorrer:
o atraso de propagação implica que dois nós podem não ouvir as transmissões de cada outro

colisão:
todo o tempo de transmissão do pacote é disperdiçado

nota:
papel da distância e do atraso de propagação na determinação da probabilidade de colisão.



arranjo espacial dos nós na rede

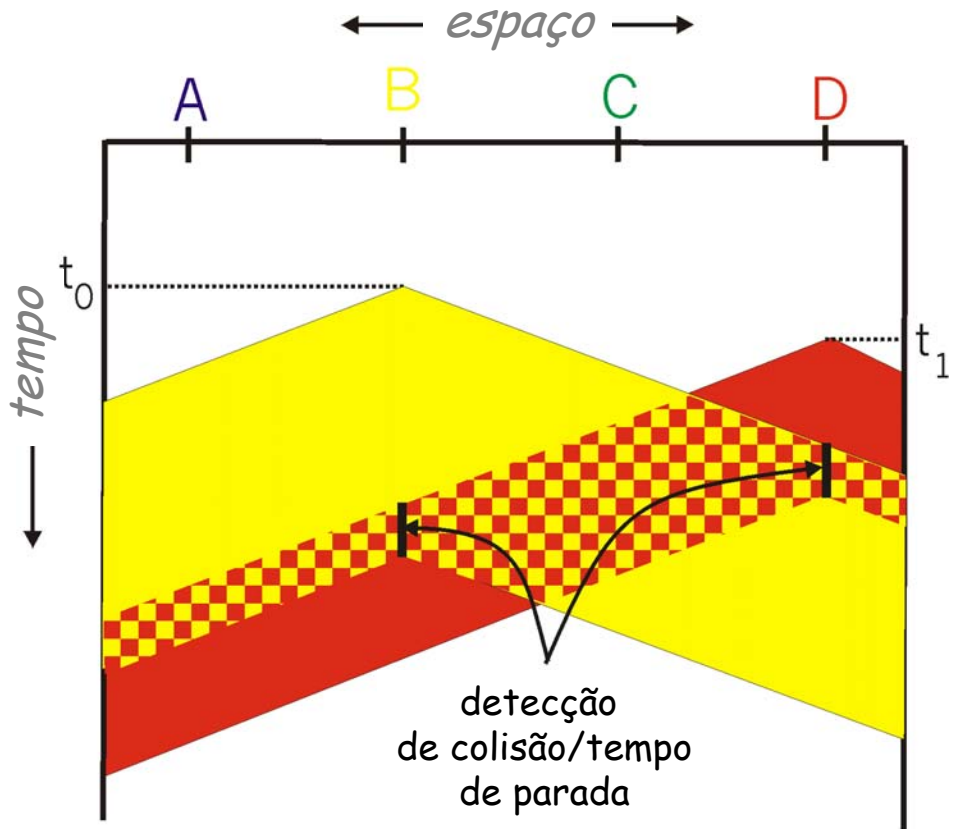
CSMA/CD (Detecção de Colisão)

CSMA/CD: detecção de portadora, deferência como no CSMA

- colisões *detectadas* num tempo mais curto
- transmissões com colisões são interrompidas, reduzindo o disperdício do canal
- retransmissões persistentes ou não-persistentes

- detecção de colisão:
  - fácil em LANs cabeadas: medição da intensidade do sinal, comparação dos sinais transmitidos e recebidos
  - difícl em LANs sem fio: receptor desligado enquanto transmitindo
- analogia humana: o "bom-de-papo" educado

CSMA/CD detecção de colisão



Protocolos MAC com Passagem de Permissão

Protocolos MAC com particionamento de canais:

- compartilham o canal eficientemente quando a carga é alta e bem distribuída
- ineficiente nas cargas baixas: atraso no acesso ao canal. A estação consegue uma banda de 1/N da capacidade do canal, mesmo que haja apenas 1 nó ativo!

Protocolos MAC de acesso aleatório

- eficiente nas cargas baixas: um único nó pode usar todo o canal
- cargas altas: excesso de colisões

Protocolos de passagem de permissão

buscam o melhor dos dois mundos!

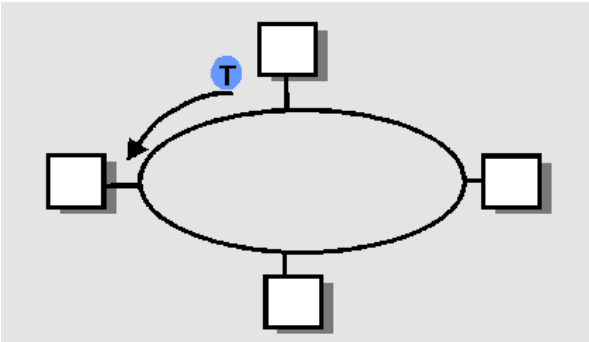
Protocolos MAC com Passagem de Permissão

Polling:

- nó mestre "convida" os escravos a transmitirem um de cada vez
- Mensagens Request to Send e Clear to Send
- problemas:
  - polling overhead
  - latência
  - ponto único de falha (mestre)

Token passing:

- controla um **token** passado de um nó a outro sequencialmente.
- mensagem token
- problemas:
  - token overhead
  - latência
  - ponto único de falha (token)



Protocolos de Reserva

Polling distribuído:

- O tempo é dividido em compartimentos ("slots")
- começa com N compartimentos de reserva, mais curtos
  - tempo do compartimento de reserva é igual ao atrso de propagação fim-a-fim do canal
  - estação com mensagem a enviar faz uma reserva
  - reserva é viata por todas as estações
- depois dos compartimentos de reserva ocorre a transmissão das mensagens ordenadas pelas reservas e pelas prioridades de transmissão