

Capítulo 5: A Camada de Enlace: Enlaces, Redes de Acesso e LANs

Metas:

- apresentar os princípios em que se fundamentam os serviços da camada de enlace:
 - controle de erros
 - compartilhamento de um canal *broadcast*: acesso múltiplo
 - endereçamento na camada de enlace
 - redes locais:
Ethernet, VLANs
- implementação de várias tecnologias da camada de enlace

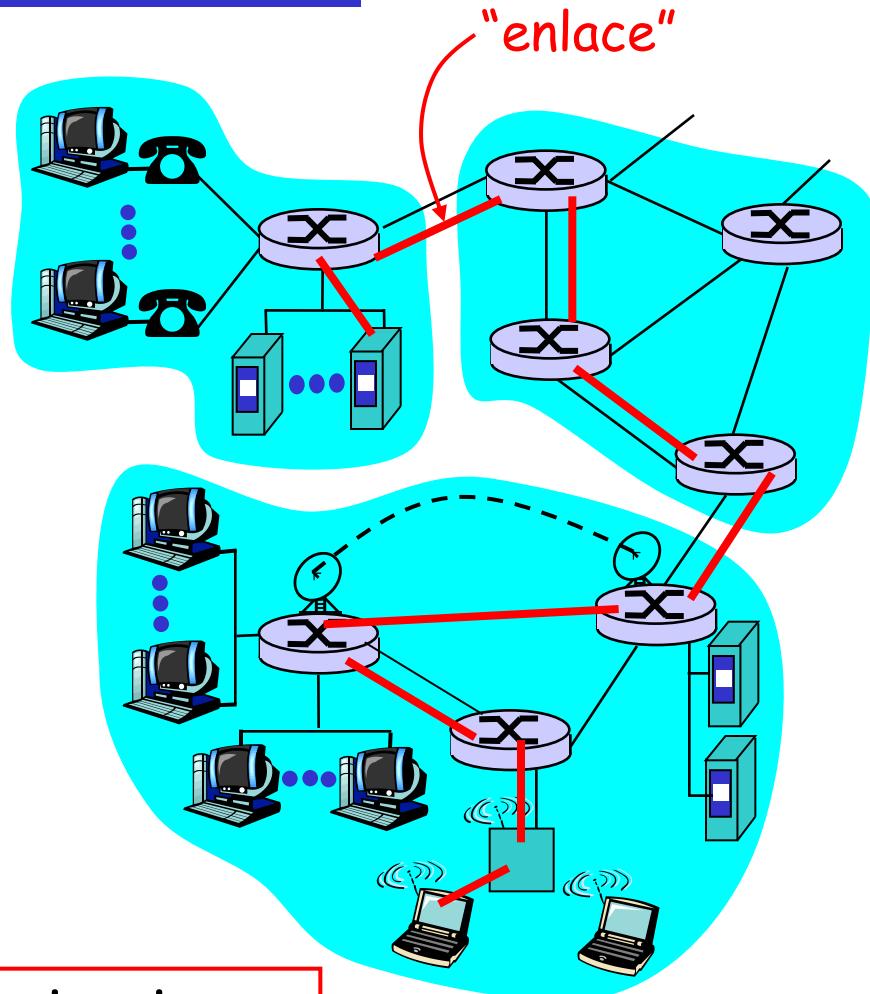
Resumo:

- introdução, serviços
- detecção e correção de erros
- protocolos de acesso
- LANs:
 - endereçamento na camada de enlace, ARP
 - Ethernet
 - Switches
 - VLANs
 - WLANs
- tecnologias específicas da camada de enlace:
 - virtualização de enlace: MPLS
 - ATM

A Camada de Enlace

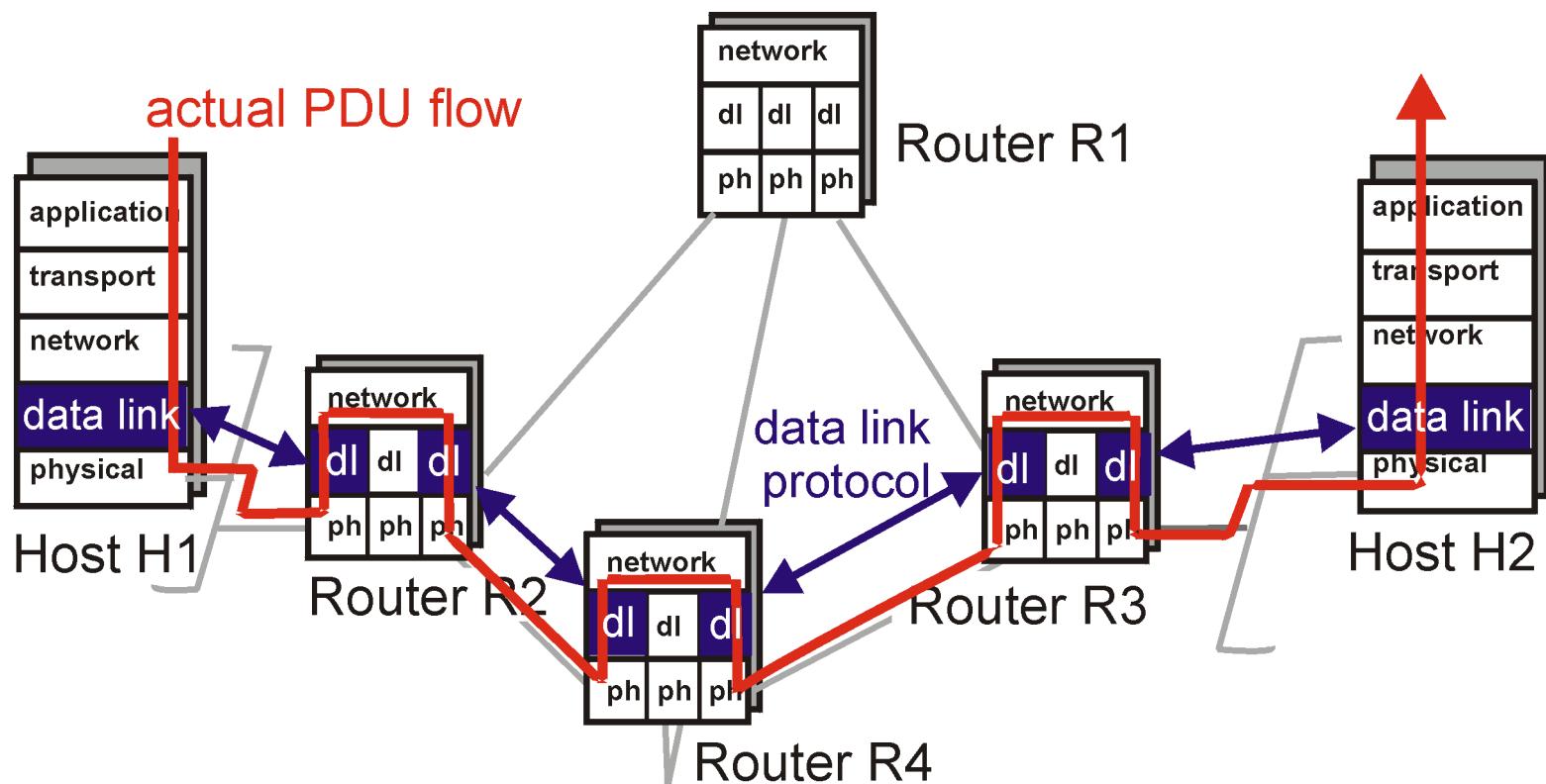
Terminologia:

- ❑ *hosts* e roteadores são **nós** da rede de comunicação.
- ❑ os canais de comunicação que interconectam nós adjacentes ao longo do caminho de comunicação são denominados **enlaces (links)**.
- ❑ o protocolo da camada de enlace define a 2-PDU que é denominada **quadro (frame)**.



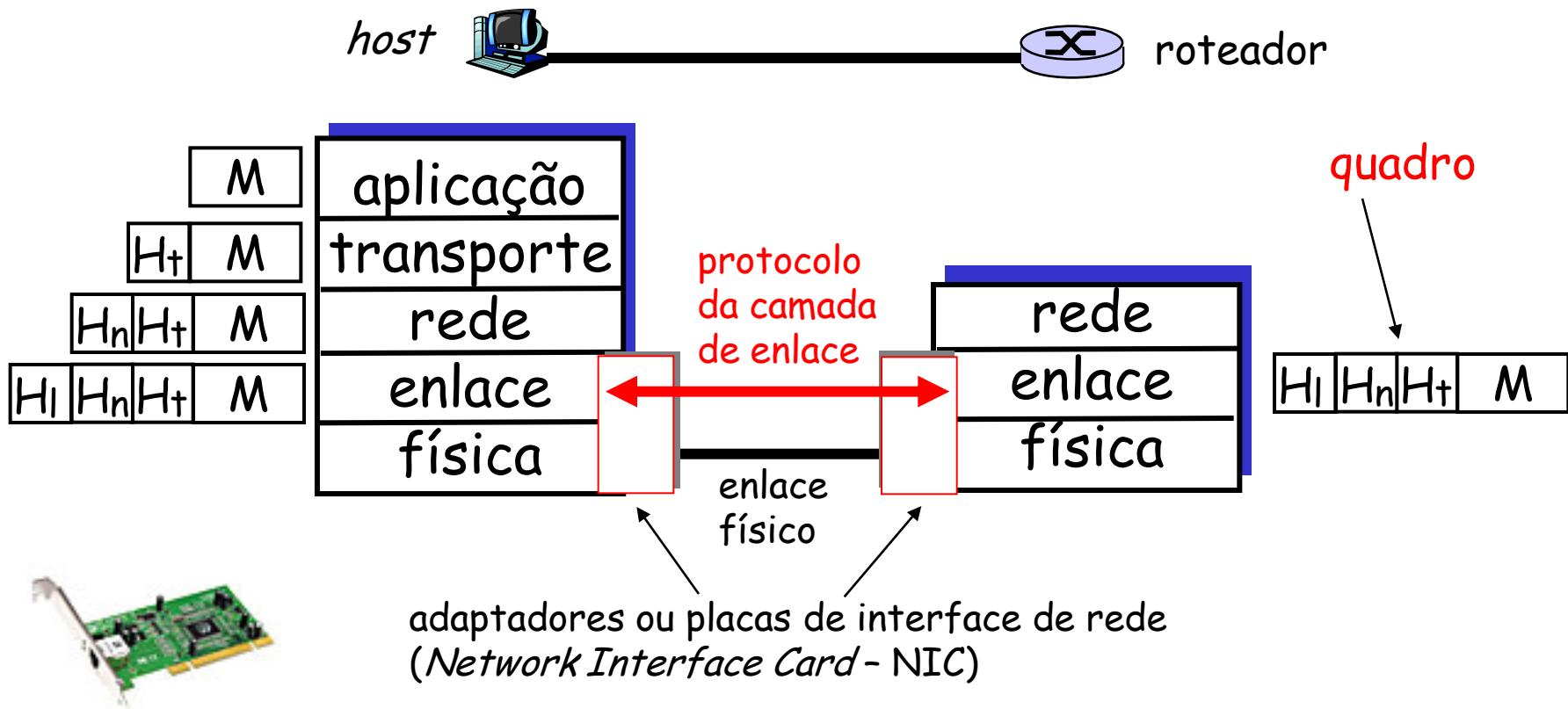
A **camada de enlace** é responsável pela transferência de datagramas de um nó a outro adjacente por meio de um enlace.

A Camada de Enlace

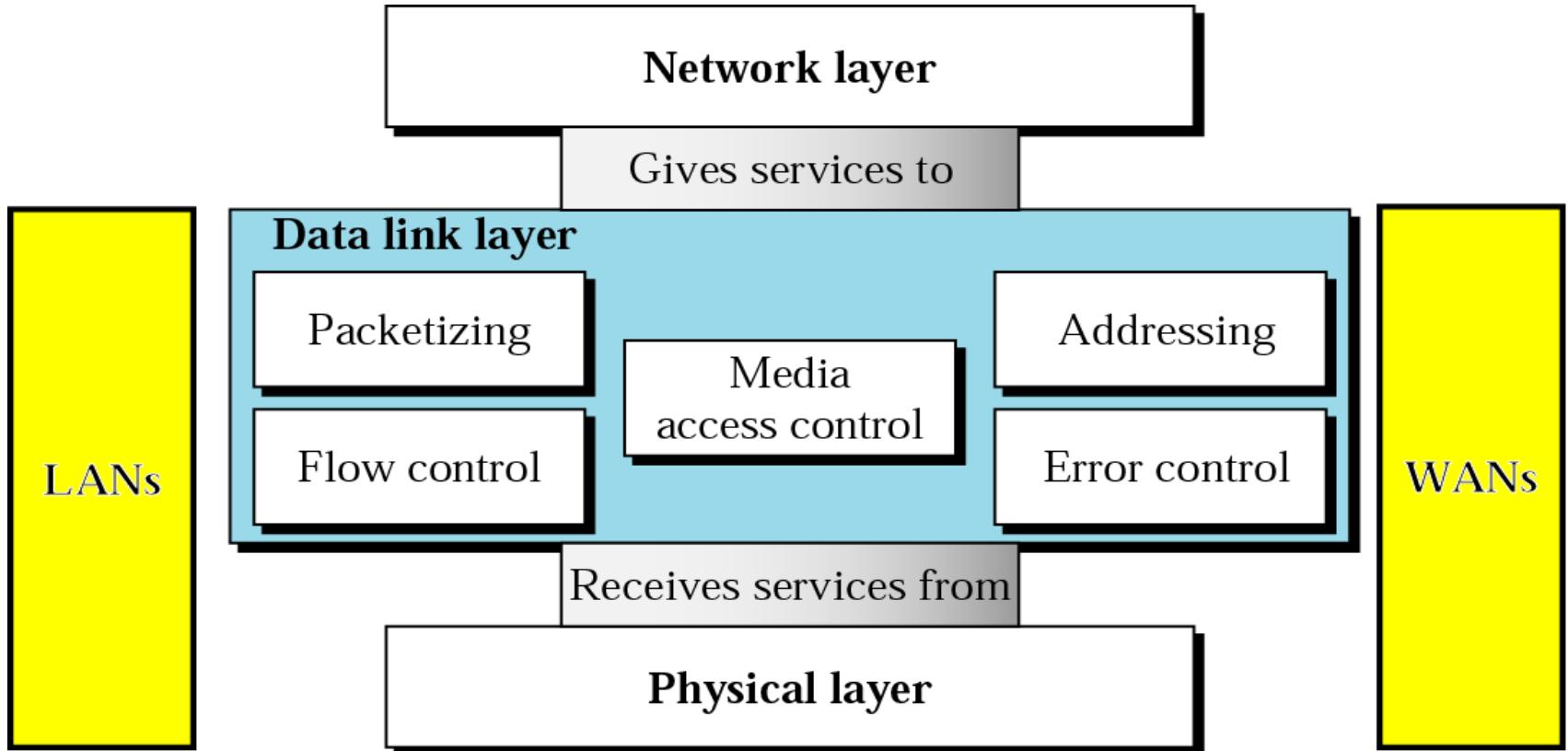


A Camada de Enlace

- dois nós (elementos de rede) **interconectados fisicamente**:
 - *host-roteador, roteador-roteador, host-host*
- unidade de dados trocada entre os nós: **quadro (frame)**



Serviços da Camada de Enlace



Serviços da Camada de Enlace

□ Enquadramento de dados:

- encapsulamento de um datagrama num quadro com uma série de campos de cabeçalho e de "trailer"

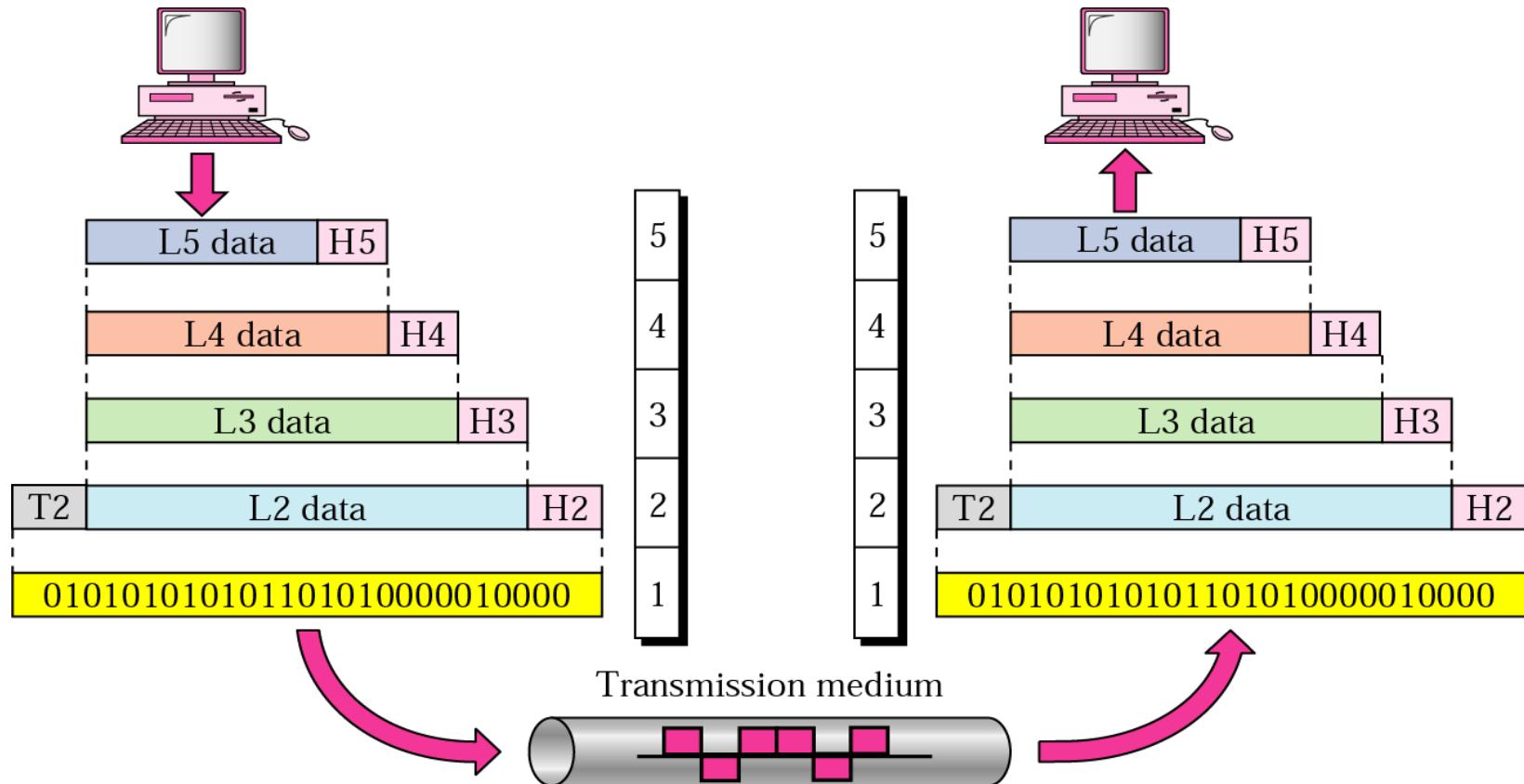
□ Acesso ao enlace:

- protocolo de controle de acesso ao meio (*medium access control protocol* - MAC)
- "endereços físicos" são usados nos cabeçalhos dos quadros para identificar os nós de origem e de destino

□ Entrega confiável:

- desnecessária com enlaces com BER (*Bit Error Rate*) muito reduzida
- frequentemente utilizada com enlaces de rádio (*wireless*), onde a correção local de erros evita a retransmissão fim a fim na camada de transporte

Serviços da Camada de Enlace



Serviços da Camada de Enlace (cont.)

Controle de fluxo:

- compatibiliza as taxas de envio e de recepção de quadros entre um nó remetente e um nó receptor.

Detecção de erros:

- os erros são causados pela atenuação do sinal e pelo ruído eletromagnético.
- o nó receptor deve detectar a ocorrência de erros no quadro recebido.
- um quadro com erros poderá ser retransmitido ou, simplesmente descartado.

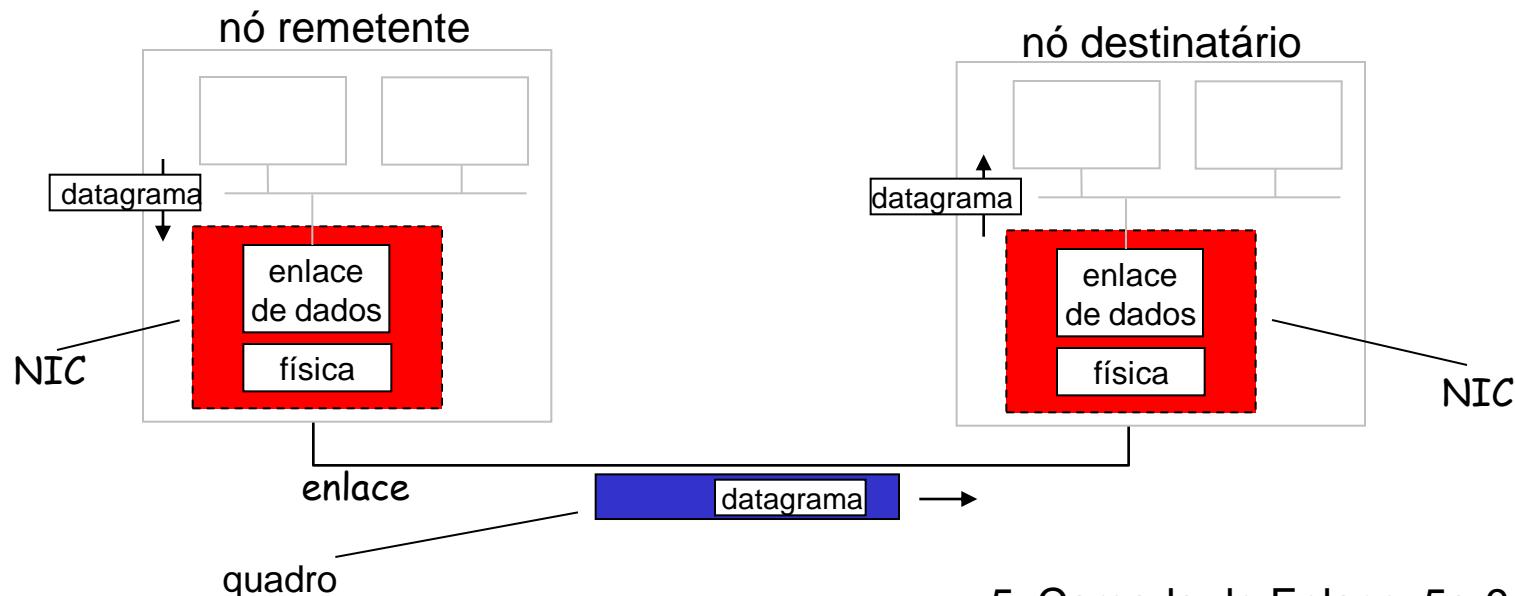
Correção de erros:

- alguns protocolos de camada de enlace realizam a detecção e a correção de erros (não requer a retransmissão do quadro).

Transmissão *Half-duplex* e *Full-duplex*

Protocolo da Camada de Enlace

- ☐ é implementado no **adaptador** (placa) de rede (ou NIC), que tipicamente inclui: RAM, circuitos DSP, interface com barramento do *host* e interface com o enlace de comunicação
- ☐ Na transmissão: o adaptador define o encapsulamento (bits de delimitação de quadro, número de seqüência, controle de erros, endereços, etc.), o controle de fluxo, o controle de acesso ao enlace, etc.
- ☐ Na recepção: o adaptador define o controle de fluxo e o controle de erros, a entrega de dados recebidos no quadro para a camada superior, etc.

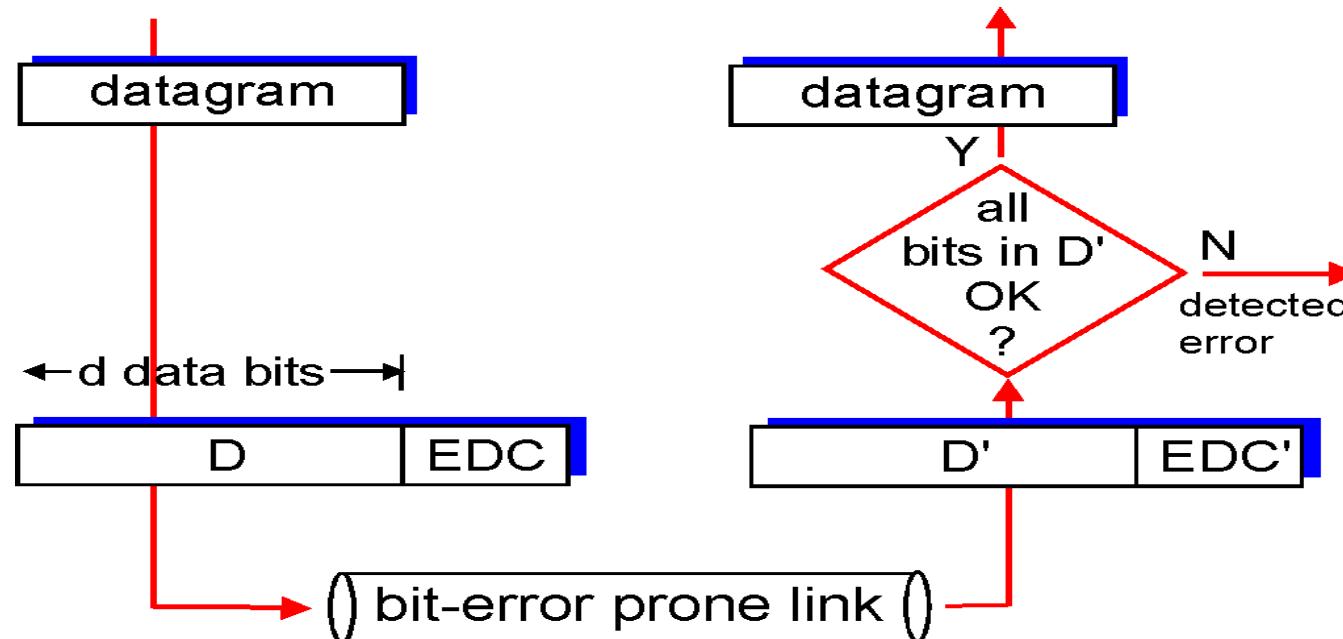


Técnicas de Detecção e Correção de Erros

EDC = bits de Detecção e Correção de Erros

D = bits de dados protegidos (podem incluir alguns campos do cabeçalho)

- ☐ a detecção de erros não é 100% perfeita
- ☐ a qualidade da detecção e/ou correção de erros depende da quantidade de bits de EDC



Bits de Paridade

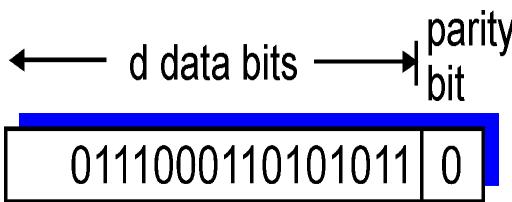
Paridade de 1 bit:

detecta erro em um único bit

Tipos:

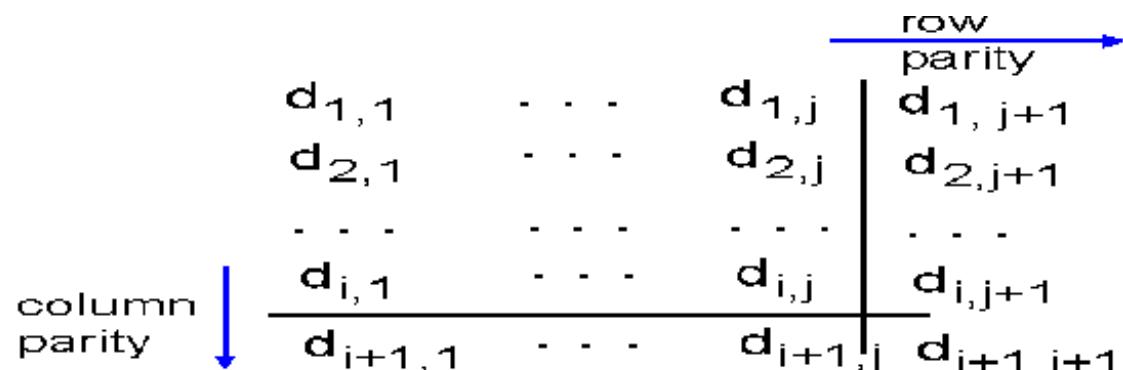
- Paridade Par
- Paridade Impar

Exemplo:



Paridade Bidimensional:

detecção e correção de erro em um único bit



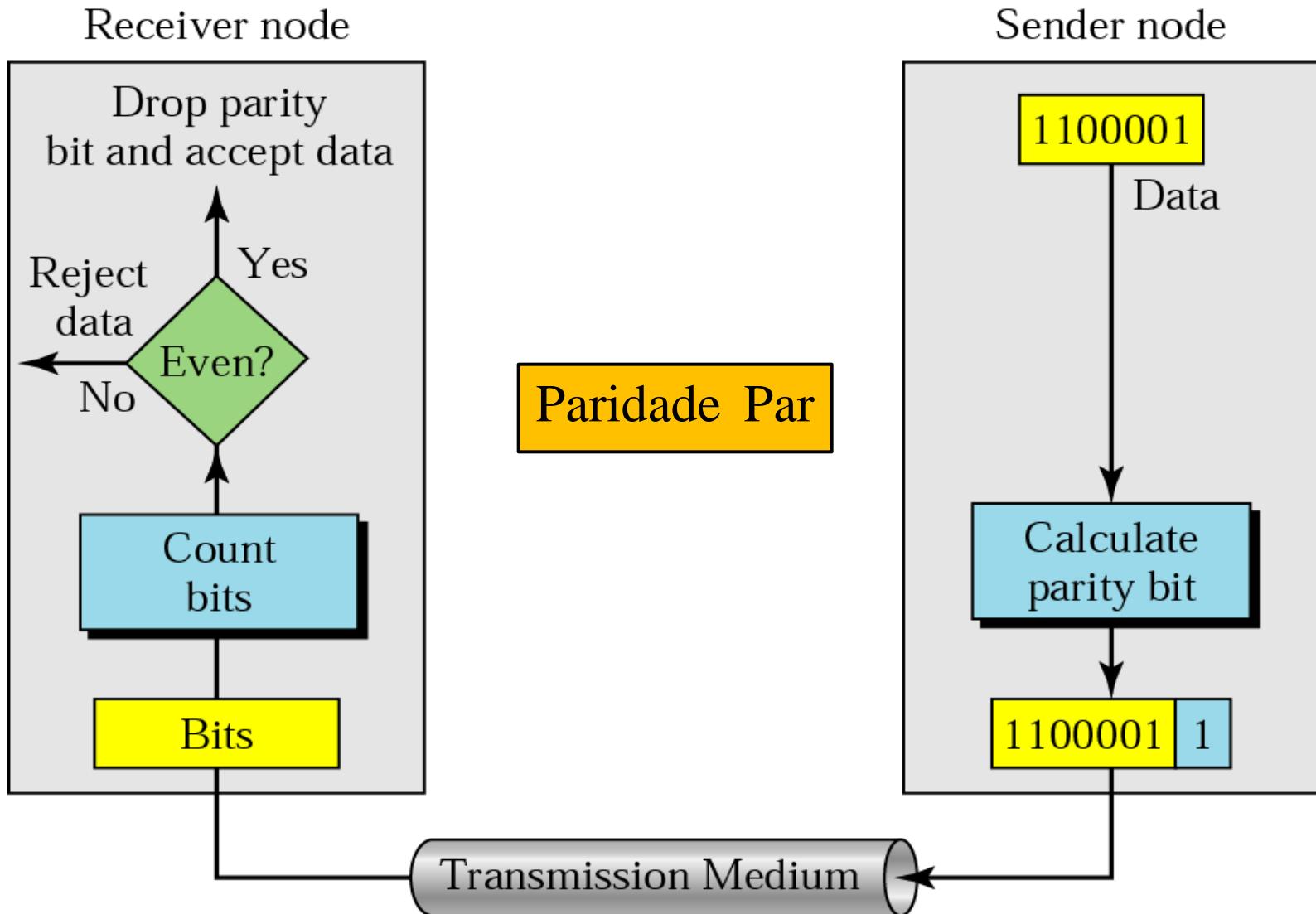
1 0 1 0 1 | 1
1 1 1 1 0 | 0
0 1 1 1 0 | 1
0 0 1 0 1 | 0
no errors

1 0 1 0 1 | 1
1 0 1 1 0 | 0
0 1 1 1 0 | 1
0 0 1 0 1 | 0
correctable single bit error

parity error

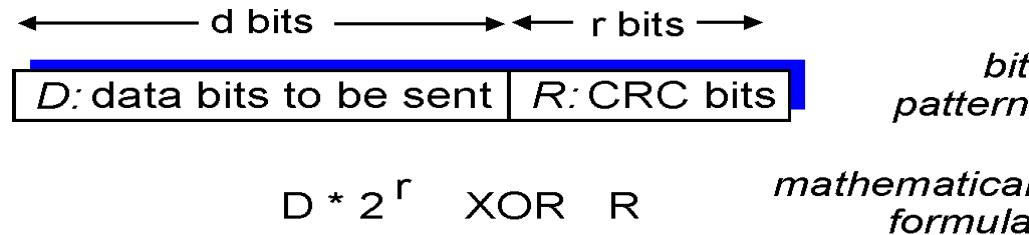
parity error

Bits de Paridade - exemplo

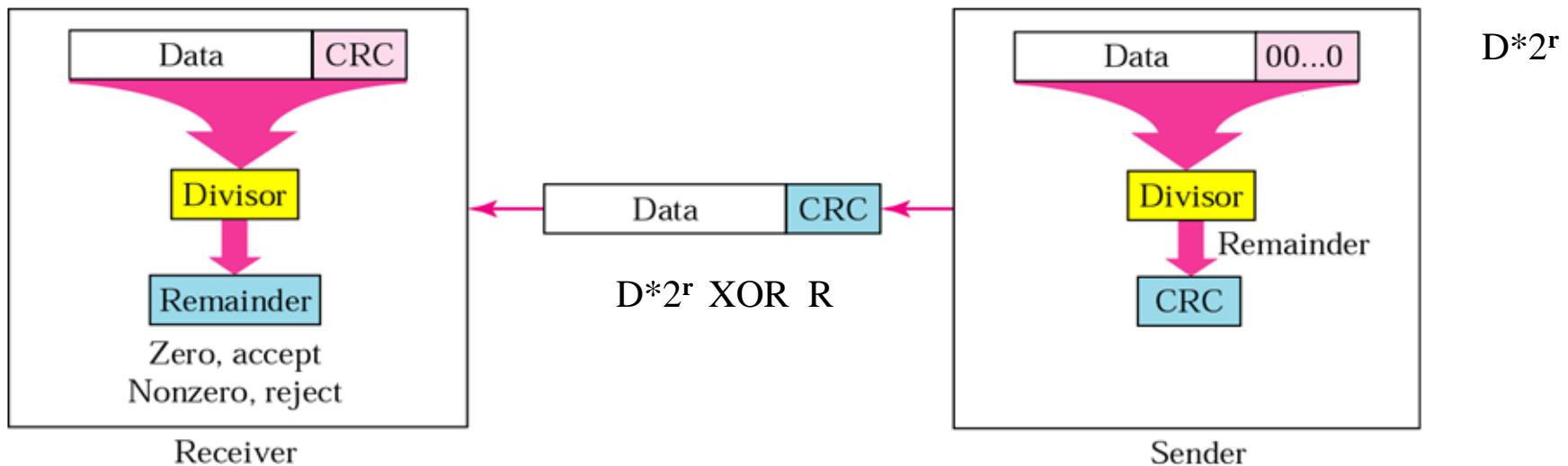


Técnicas de Detecção de Erros

- **Internet Checksum** : remetente trata os bytes de dados como inteiros de 16 bits e o complemento de 1 de sua soma forma o *checksum* do pacote; o receptor calcula o *checksum* sobre os dados recebidos e verifica se está de acordo com o valor no campo de *checksum* no pacote recebido.
- **CRC (Cyclic Redundancy Check):**
 - Os bits de dados, D, são considerados um número binário
 - Escolhe-se uma sequência padrão de $r+1$ bits, grau r , (Gerador), G
 - Usando aritmética módulo 2, divide-se $D * 2^r$ por G. A seguir, acrescenta-se o resto R da divisão anterior a $D * 2^r$. A nova seqüência $\langle D, R \rangle$ é, agora, divisível por G



Cálculo do CRC



Cálculo do CRC

Idéia básica: transformar a sequência D em outra (p/ transmitir), múltipla de G. Assim, deseja-se descobrir R tal que exista um n que:

$$D \cdot 2^r \text{ XOR } R = nG$$

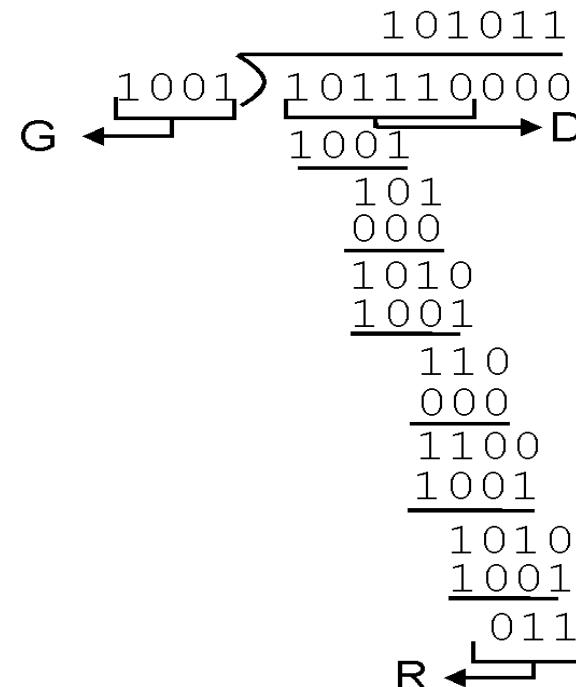
adicionando R em ambos os lados da equação acima:

$$D \cdot 2^r = nG \text{ XOR } R$$

ou seja, se dividirmos $D \cdot 2^r$ por G, o resto será exatamente R

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

Exemplo:



Bits a serem transmitidos: 101110011

Implementação do CRC

- O nó remetente realiza em tempo real, por hardware, a divisão da sequência D pela sequencia G e acrescenta o resto R desta divisão a D. Em seguida, transmite a sequencia $\langle D, R \rangle$
- O nó receptor divide a sequencia $\langle D, R \rangle$ recebida por G; se o resto for:
 - diferente de zero, então, **a transmissão sofreu erro**
 - igual a zero, **não houve erro**
- Padrões internacionais de sequências G de graus 8, 12, 15 e 32 já foram definidos
- HDLC utiliza CRC de 16 bits
- Protocolos de acesso IEEE 802 utilizam CRC de 32 bits
- ATM utiliza um CRC de 32 bits em AAL5

Protocolos de Acesso Múltiplo

□ Tipos de enlace:

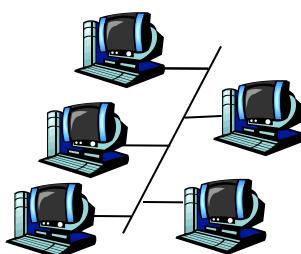
(a) ponto-a-ponto

(b) "broadcast" ou difusão total (enlace compartilhado;
p.ex., Ethernet, etc.)

(c) comutado ou "switched" (p.ex., Ethernet comutada, ATM etc.)

□ Enlaces "broadcast"

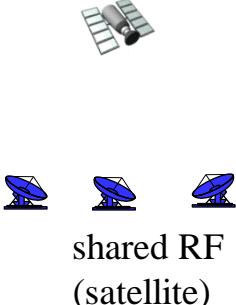
Desafio principal: controlar o acesso ao enlace compartilhado



shared wire (e.g.,
cabled Ethernet)



shared RF
(e.g., 802.11 WiFi)



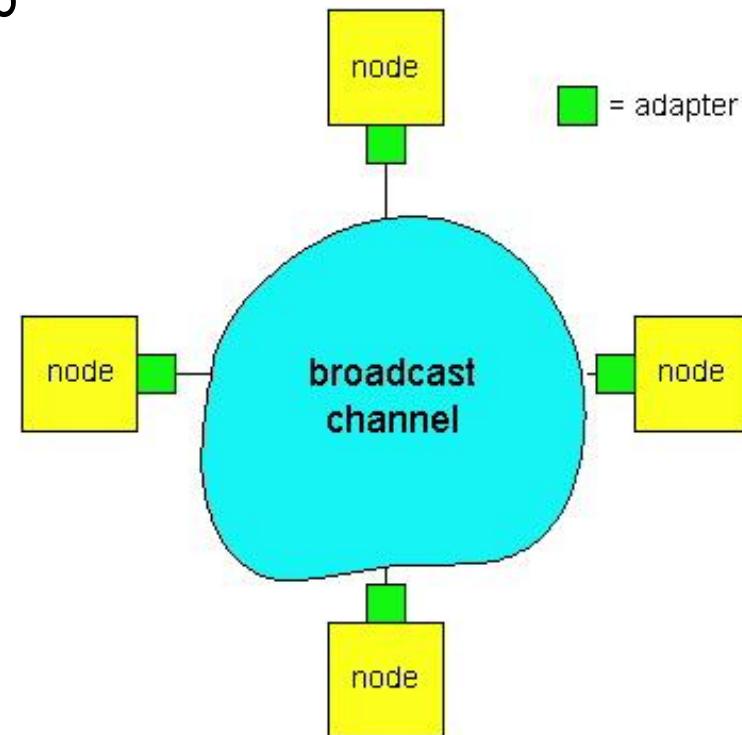
shared RF
(satellite)



humans at a
cocktail party
(shared air, acoustical)

Protocolos de Acesso Múltiplo

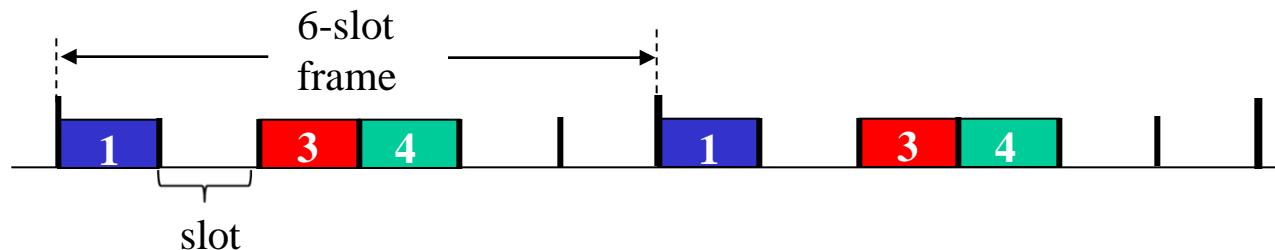
- Coordenam as transmissões dos nós sobre os enlaces compartilhados (canal "broadcast") a fim de minimizar/evitar colisões.
- Categorias de protocolos de acesso múltiplo:
 - (a) protocolos de divisão de canal
 - (b) protocolos de acesso aleatório
 - (c) protocolos de revezamento
- Metas:
 - eficiência
 - justiça
 - simplicidade
 - descentralização



Protocolos de Divisão de Canal: TDMA

TDMA (*Time Division Multiple Access*)

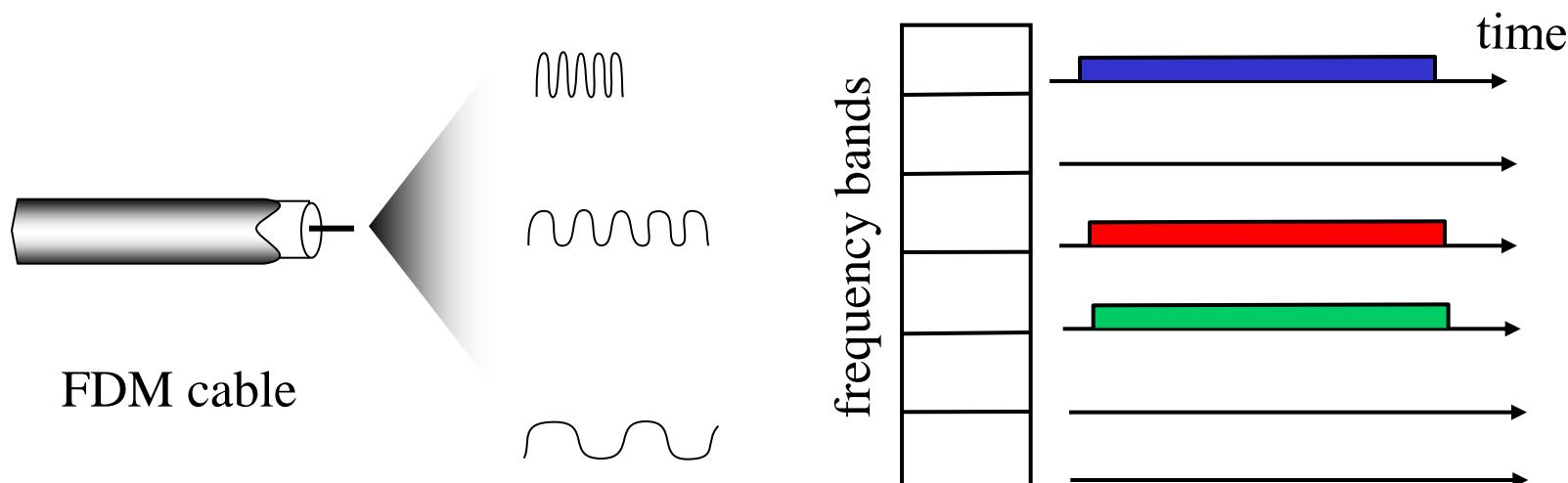
- Acesso ao canal é feito por "ciclos"
- Cada estação controla um "slot" de tamanho fixo (tamanho = tempo de transmissão de pacote) em cada turno
- Compartimentos ("slots") não usados são desperdiçados
- Exemplo: rede local com 6 estações: 1, 3, 4 têm pacotes, "slots" 2, 5, 6 ficam vazios



Protocolos de Divisão de Canal: FDMA

□ FDMA (*Frequency Division Multiple Access*)

- 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 desperdiçado
- Exemplo: rede local com 6 estações: 1, 3, 4 têm pacotes, as bandas de freqüência 2, 5, 6 ficam vazias

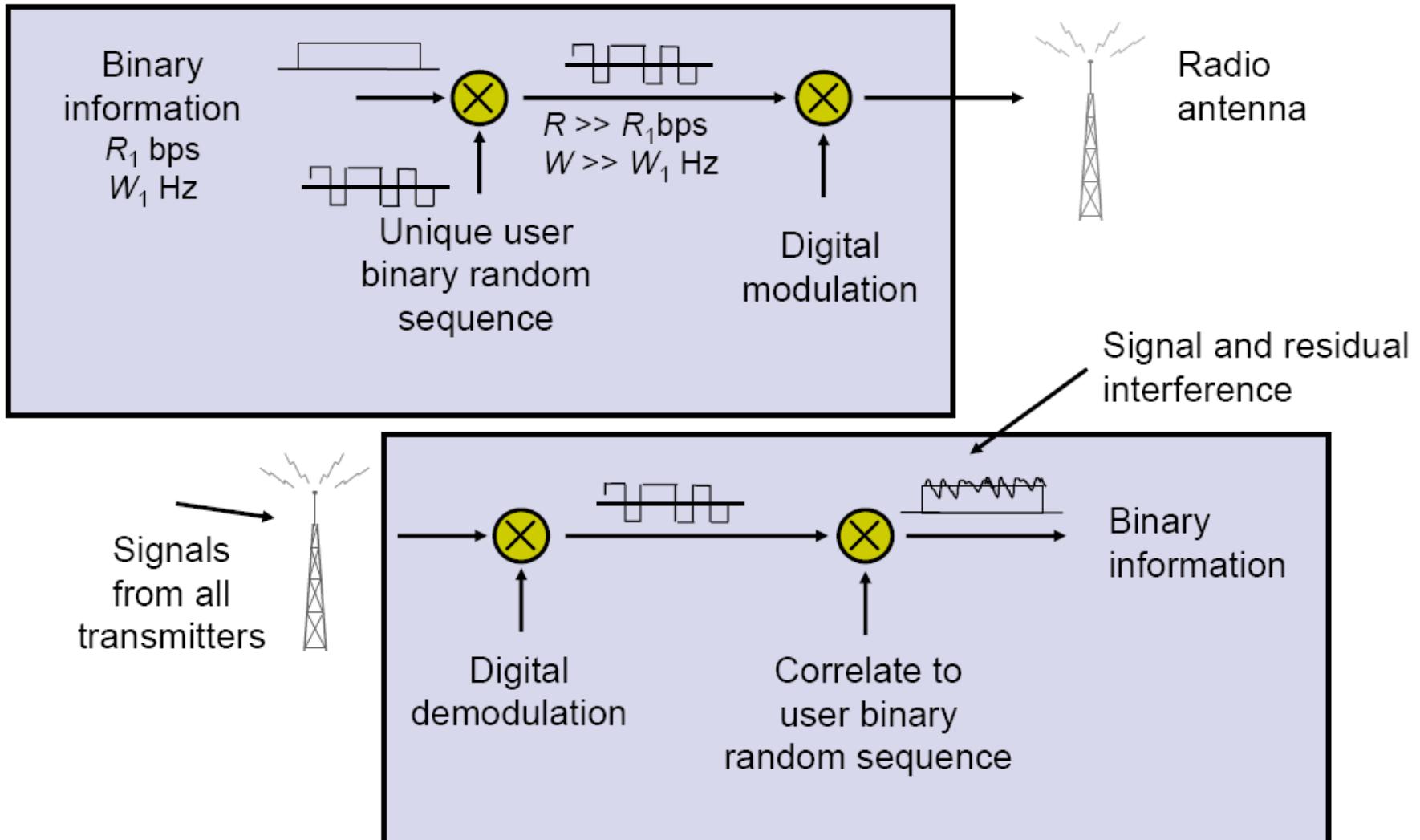


Protocolos de Divisão de Canal: CDMA

- ❑ CDMA (*Code Division Multiple Access*)
- ❑ um “código” único é associado a cada nó
- ❑ todos os nós compartilham a mesma banda passante, mas cada um tem a sua própria sequência de *chipping* (i.e., código)
- ❑ **sinal codificado** = (bit de dados) \times (sequência de *chipping*)
- ❑ **decodificação**: produto interno do sinal codificado e a sequência de *chipping* (o produto interno é a soma dos produtos componente-por-componente)
- ❑ permite que nós diferentes transmitam simultaneamente e, ainda assim, consigam que seus receptores respectivos recebam corretamente os bits codificados pelo remetente
- ❑ é mais usado em canais *wireless* (celular, satélite, etc.)

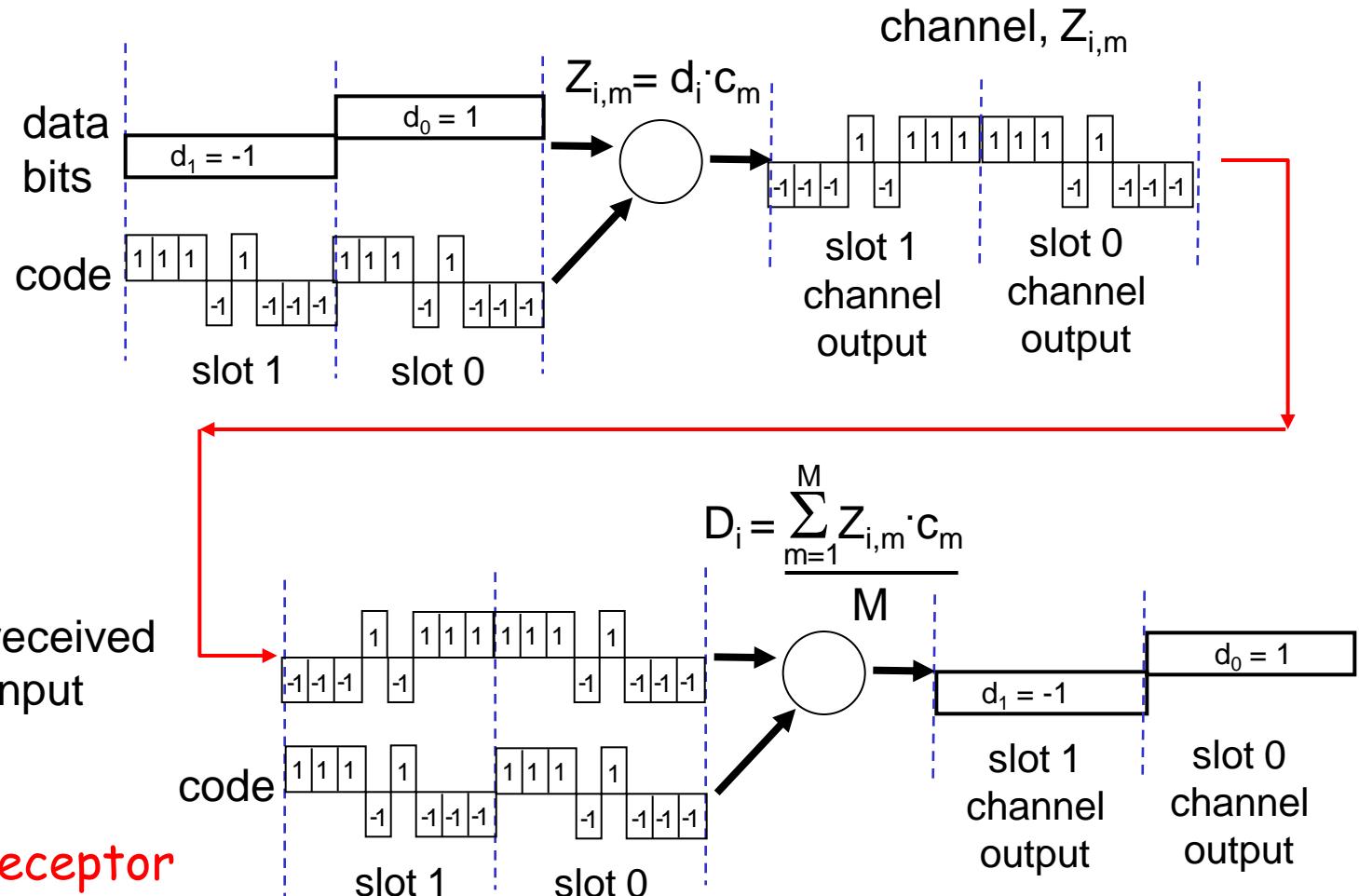
CDMA (Code Division Multiple Access)

Transmitter from one user



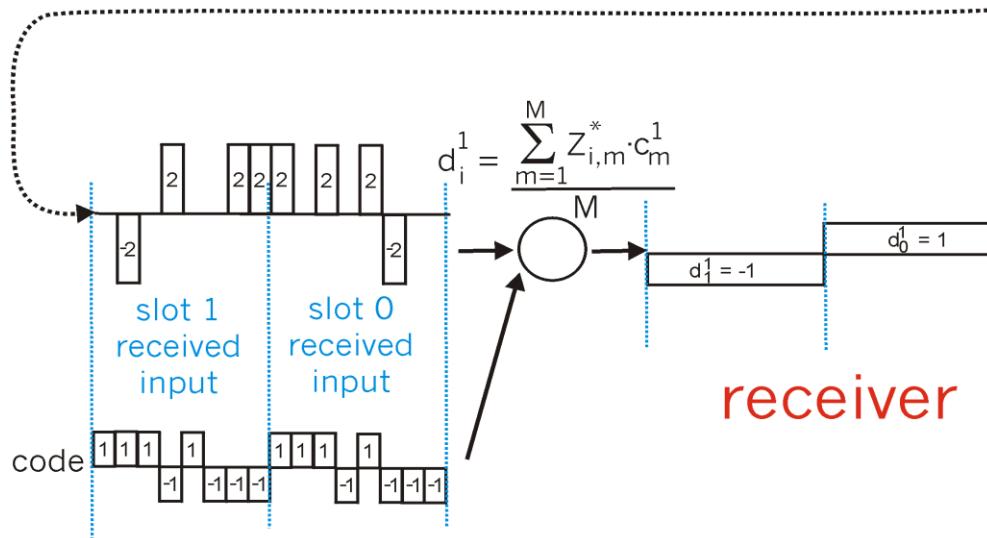
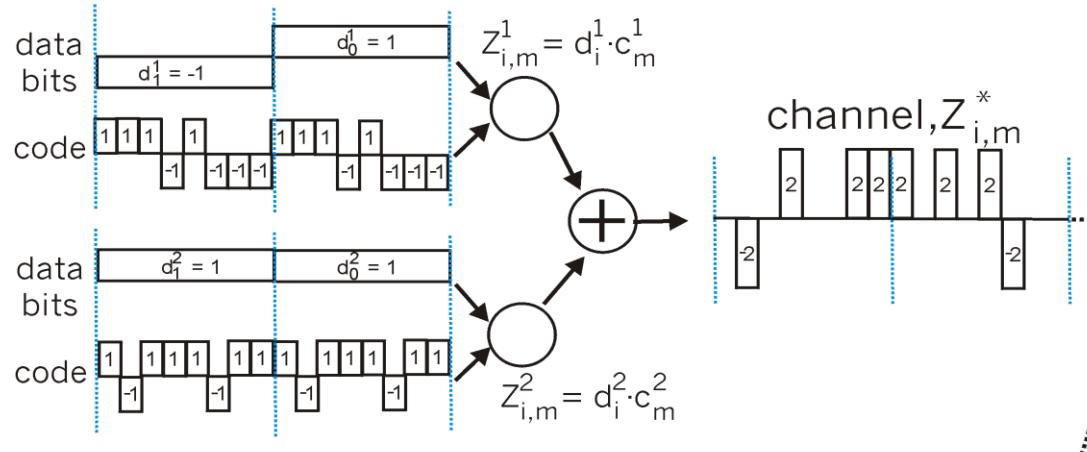
Protocolos de Divisão de Canal: CDMA (2)

Remetente



CDMA: interferência entre dois remetentes

senders

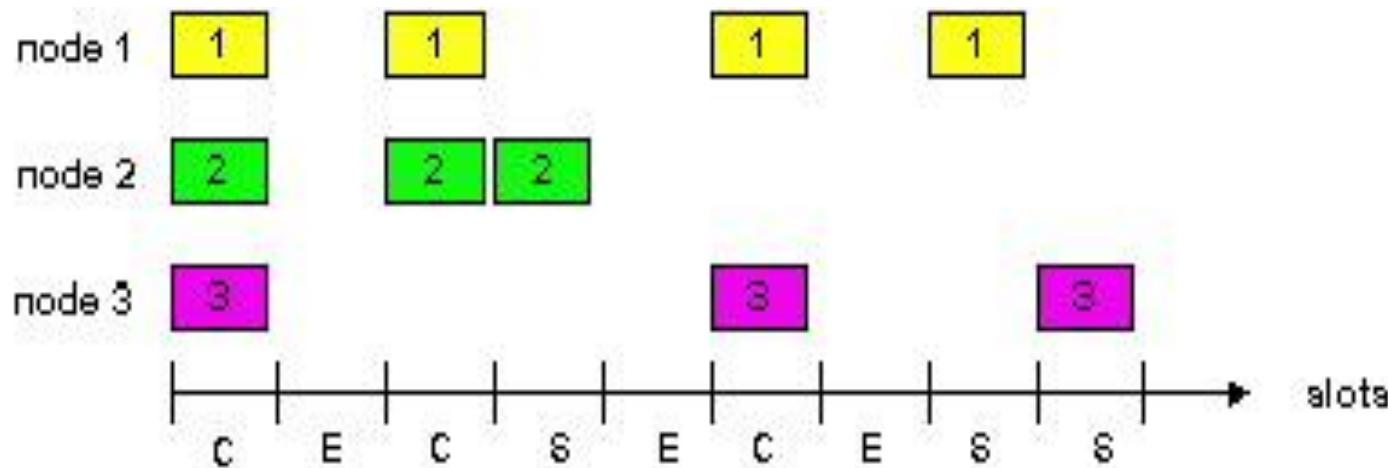


Protocolos de Acesso Aleatório

- O nó remetente transmite aleatoriamente (i.e., sem coordenação *a priori* entre os nós) ocupando toda a capacidade de transmissão do enlace
- Se houver “colisão” entre as transmissões de dois ou mais nós remetentes, eles retransmitem depois de um tempo aleatório de espera
- O protocolo de acesso aleatório especifica a detecção e a recuperação de colisões (por exemplo, através de retransmissões com atrasos aleatórios independentes)
- Exemplos de protocolos de acesso aleatório:
 - (a) Slotted Aloha
 - (b) Aloha
 - (c) CSMA e CSMA/CD

Slotted Aloha

- O tempo é dividido em *slots* de mesma duração (L/R segundos)
- Um nó remetente com quadro para enviar, tentará transmití-lo somente no início do *slot*
- Os nós são sincronizados
- Se houver **colisão**, o nó tentará retransmitir o quadro a cada *slot* subsequente com probabilidade p até conseguir sucesso



slots com sucesso (S), colisão (C), vazios (E)

Eficiência do Slotted Aloha

Supondo que haja N nós, e que cada um transmita com probabilidade p , a probabilidade de que um dado nó tenha sucesso é dada por:

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

A probabilidade de que qualquer um dos N nós consiga transmitir com sucesso num slot é dada por:

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

A eficiência máxima para um grande número de nós é obtida considerando o limite de S para $N \rightarrow \infty$ que é dado por $1/e \approx 0,37$

O canal é utilizado para transmissões úteis em apenas 37% do tempo!

Aloha puro (sem slots)

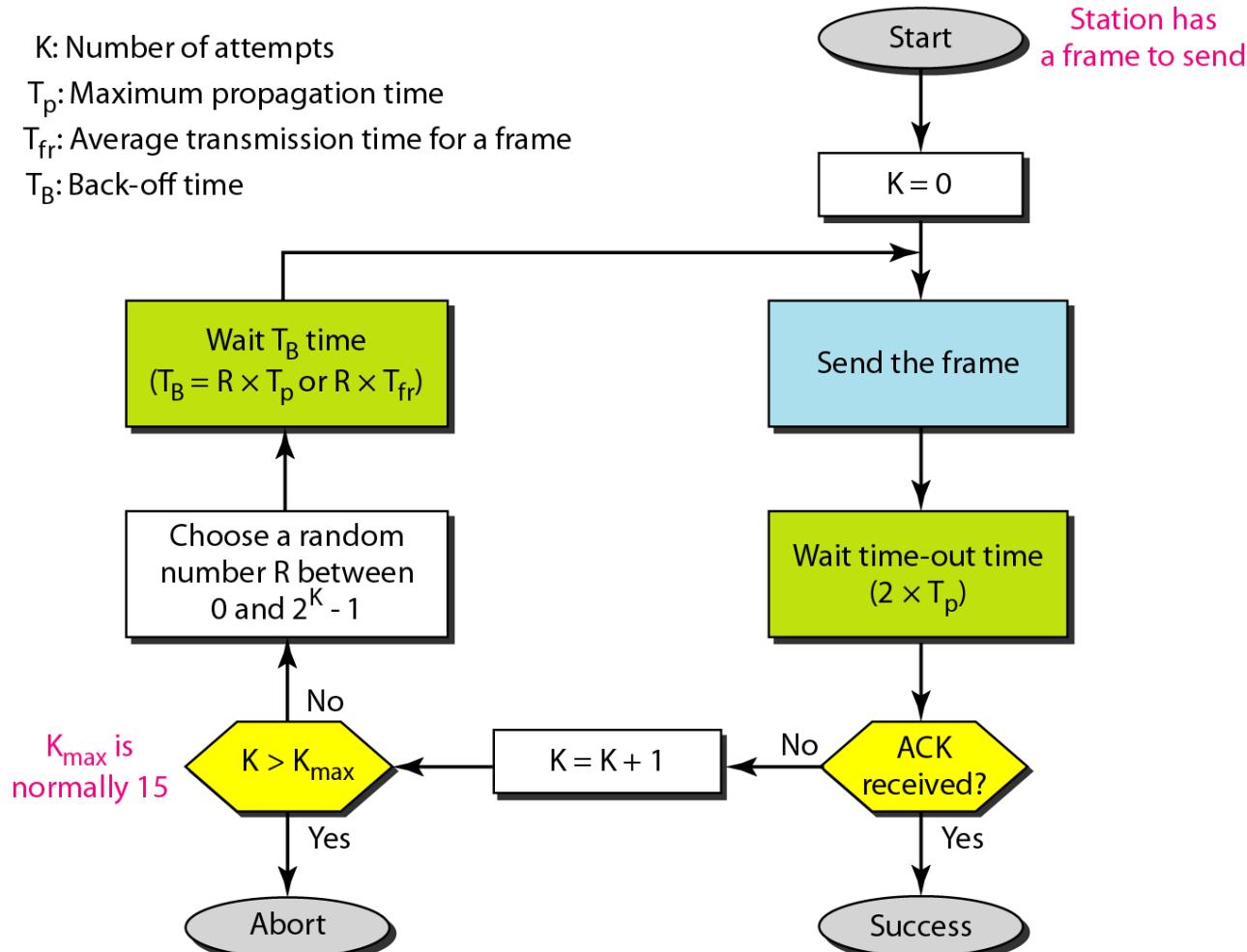
- Versão mais simples que o Slotted Aloha

K: Number of attempts

T_p : Maximum propagation time

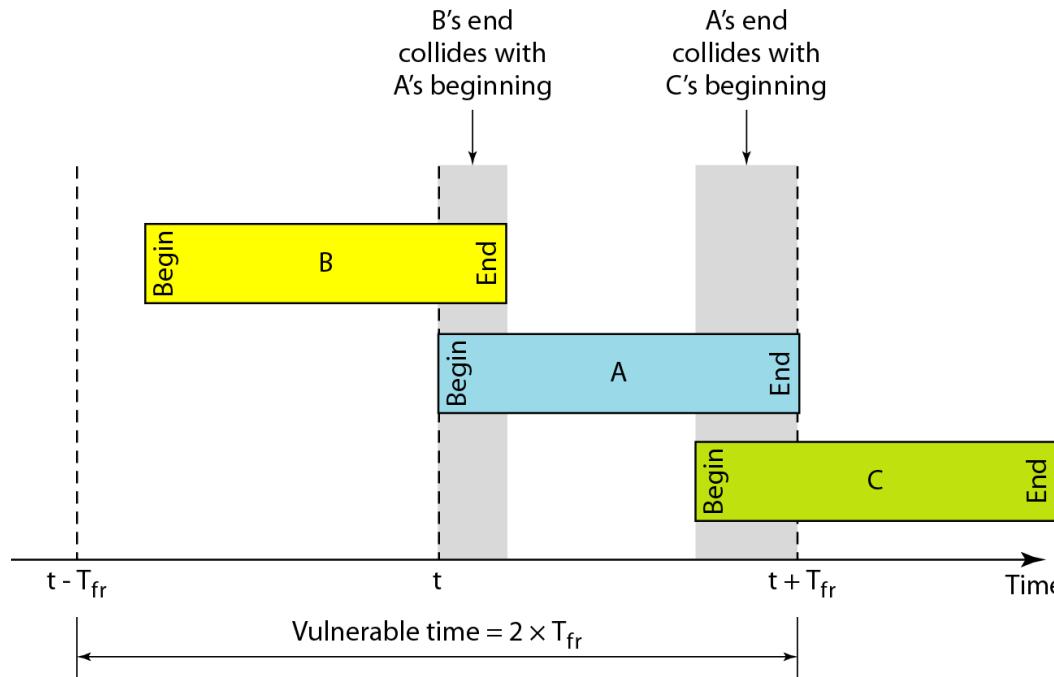
T_{fr} : Average transmission time for a frame

T_B : Back-off time



Aloha puro (sem slots)

- ☐ Aloha puro não requer *slots*
- ☐ Um nó transmite um quadro sem aguardar o início de um *slot*
- ☐ A probabilidade de colisão aumenta:
 - O quadro transmitido em t pode colidir com outros quadros transmitidos dentro de $[t - T_{fr}, t + T_{fr}]$

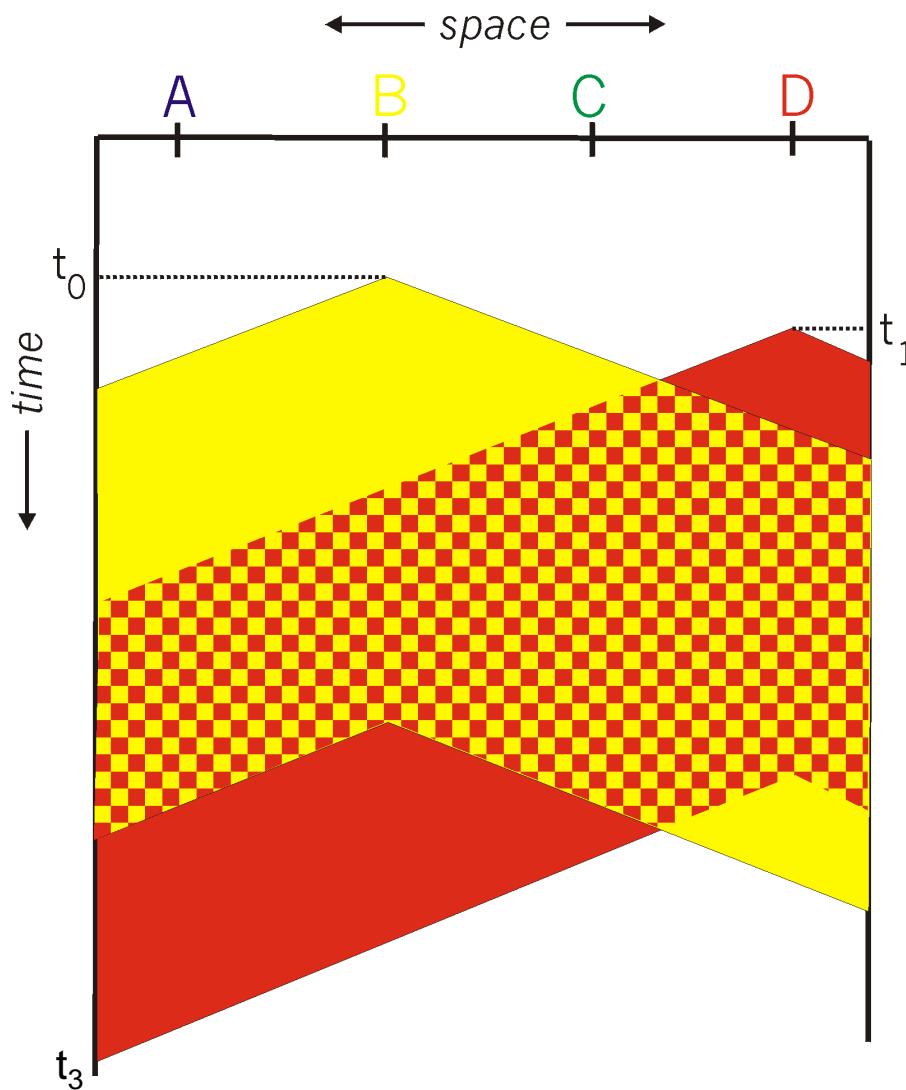


- ☐ A eficiência máxima do Aloha puro é de apenas $1/(2e) \approx 0,18$

CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

- **CSMA**: nó “escuta” (*carrier sensing*) o canal antes de transmitir
 - Se detecta o canal livre, transmite o quadro
 - Se detecta o canal ocupado:
 - **CSMA não persistente**: tenta transmitir novamente depois de um intervalo de tempo de espera aleatório
 - **CSMA 1-persistente**: assim que o canal se tornar ocioso, transmite imediatamente
 - **CSMA p -persistente**: assim que o canal se tornar ocioso, transmite imediatamente com probabilidade p , ou espera por um período equivalente ao d_{prop} máximo
- Pode ocorrer **colisão**, pois duas estações podem detectar o canal ocioso ao mesmo tempo (Note a influência do **atraso de propagação** do sinal na probabilidade de colisão.)
- No caso de **colisão**, todo o tempo de transmissão do quadro é desperdiçado

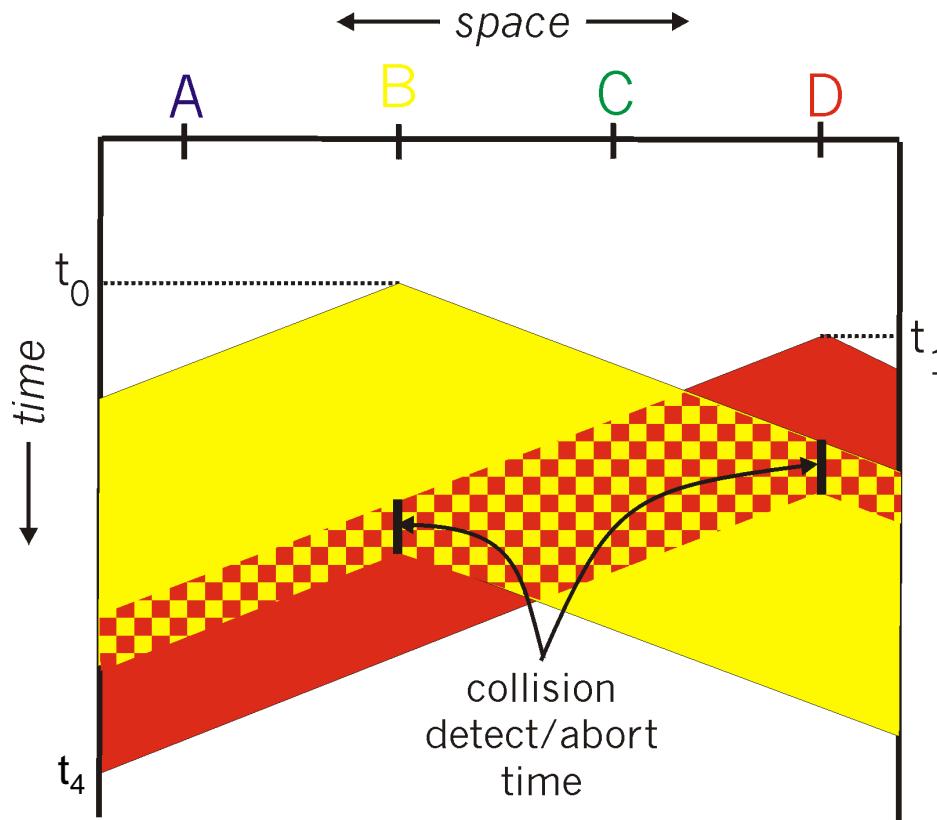
Diagrama espaço-tempo de dois nós CSMA com colisão de transmissões



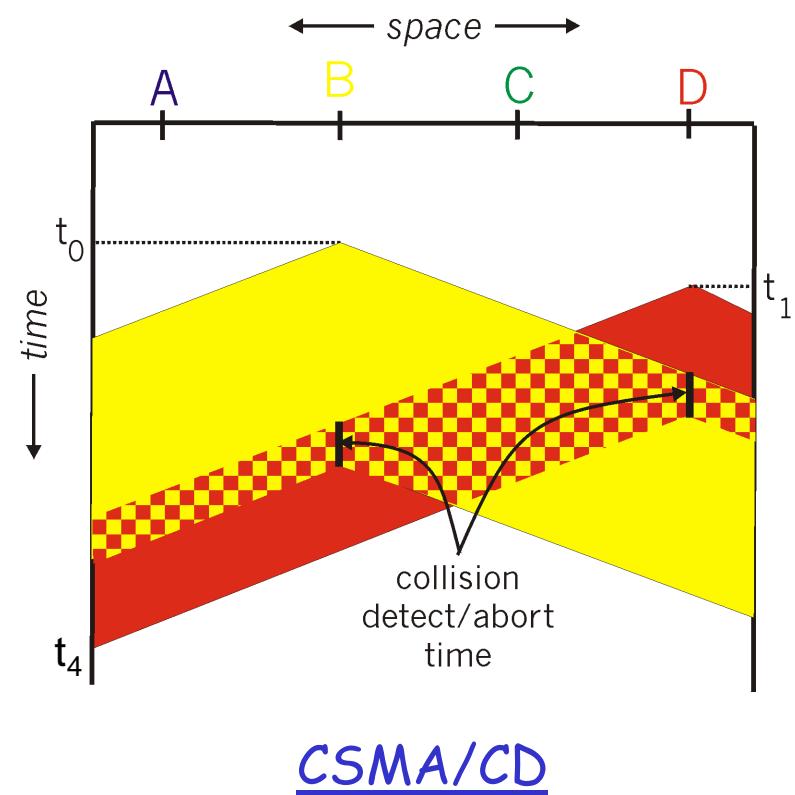
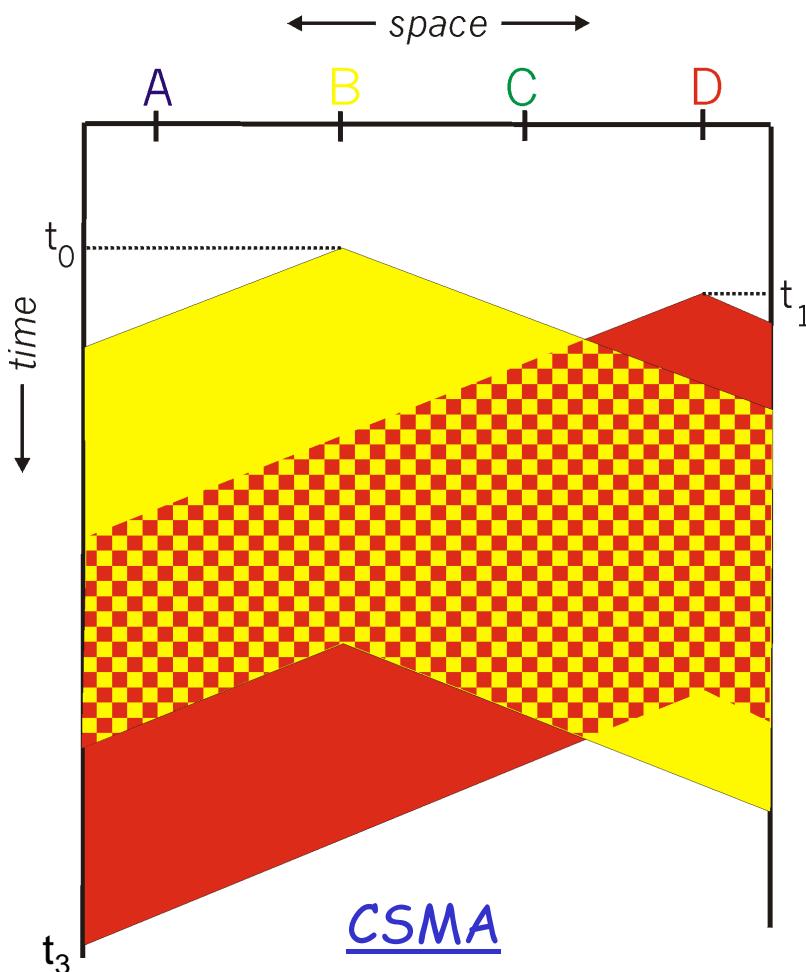
CSMA/CD (Collision Detection)

- **CSMA/CD**: “escuta” do enlace e adiamento como no CSMA
 - As colisões são detectadas rapidamente, em poucos “intervalos de bit”
 - A transmissão do quadro é então abortada, reduzindo consideravelmente o desperdício de capacidade do enlace
- Detecção de colisões:
 - Fácil em rede locais usando cabos metálicos: pode-se medir o nível DC, detectar violações de código, ou comparar sinais transmitidos e recebidos
 - Difícil em *wireless LANs* (o receptor local é desligado durante a transmissão, para evitar danificá-lo com excesso de potência)
- CSMA/CD pode conseguir utilização de canal próxima de 100% em redes locais (LANs)

CSMA com detecção de colisão - CSMA/CD



Comparação CSMA e CSMA/CD



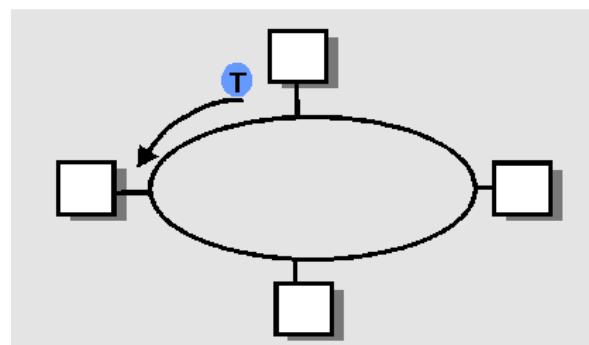
- Veremos mais detalhes sobre o CSMA/CD adiante ...

Protocolos de Revezamento

- Conseguem tanto justiça quanto acesso individual a toda a capacidade do enlace (**sem colisões**), ao custo de maior complexidade de controle

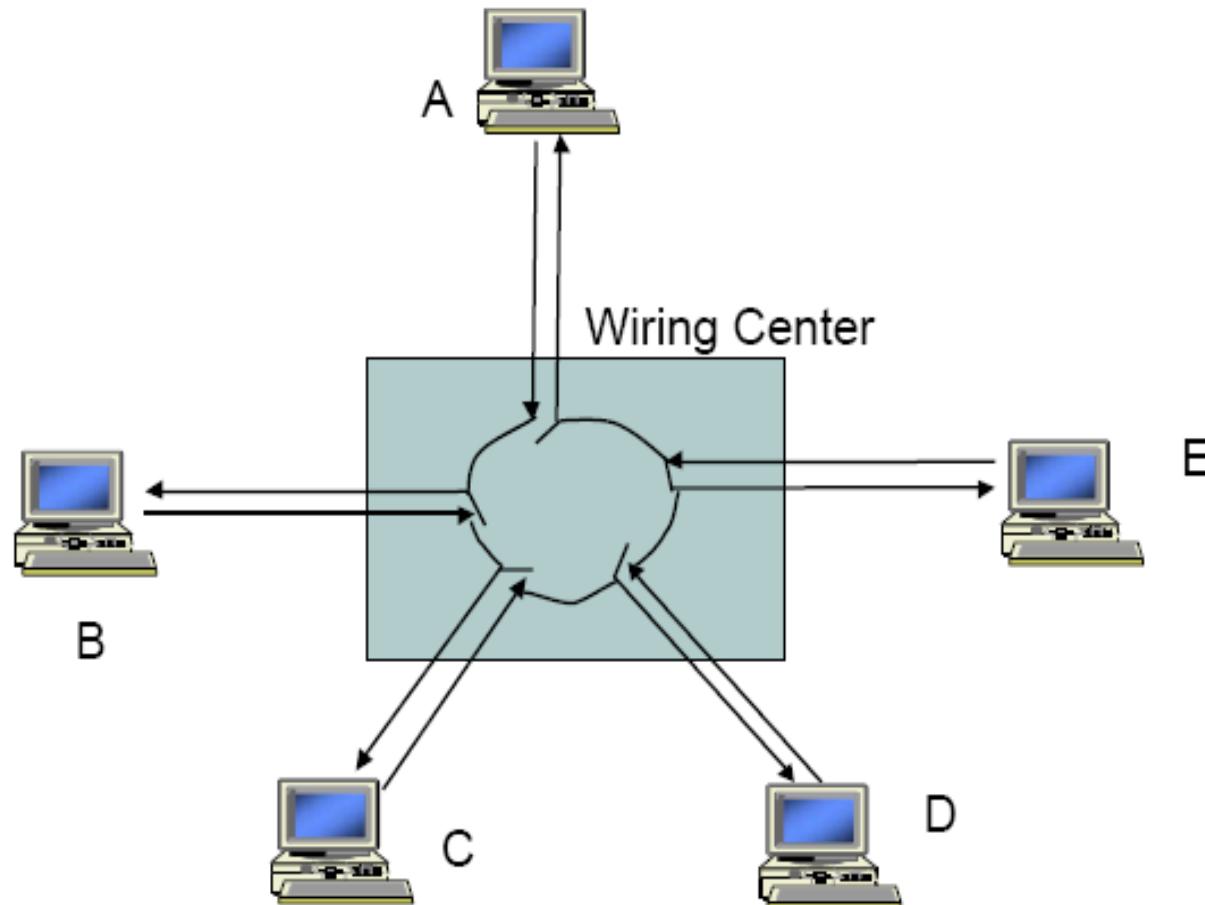
Polling : uma **estação mestre** “convida”, em sequência, as **estações escravas** a transmitir seus pacotes. Problemas: latência, *polling overhead*, ponto de falha na rede (estação mestre)

Passagem de Permissão: a permissão (*token*) é passada seqüencialmente de estação a estação. Problemas: latência, *token overhead*, perda de *token*, etc.



Rede Token Ring

Protocolos de Revezamento: *Token Ring*



Tecnologias de LANs

- **Ethernet**: emprega o protocolo CSMA/CD; 10 Mbps (IEEE 802.3 tipo 10Base-T), 100 Mbps (100Base-T) ou Fast Ethernet; 1.000 Mbps (1000Base-T) ou Gigabit Ethernet; 10 Gigabit Ethernet (IEEE 802.3ae); 40 Gigabit Ethernet e 100 Gigabit Ethernet (IEEE 802.3bg)
IEEE Get Program: <http://standards.ieee.org/about/get/index.html>
- **Token-Ring** : emprega o protocolo Passagem de Permissão no Anel (IEEE 802.5); FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*), até 200 estações, em 100 Mbps

