

# 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

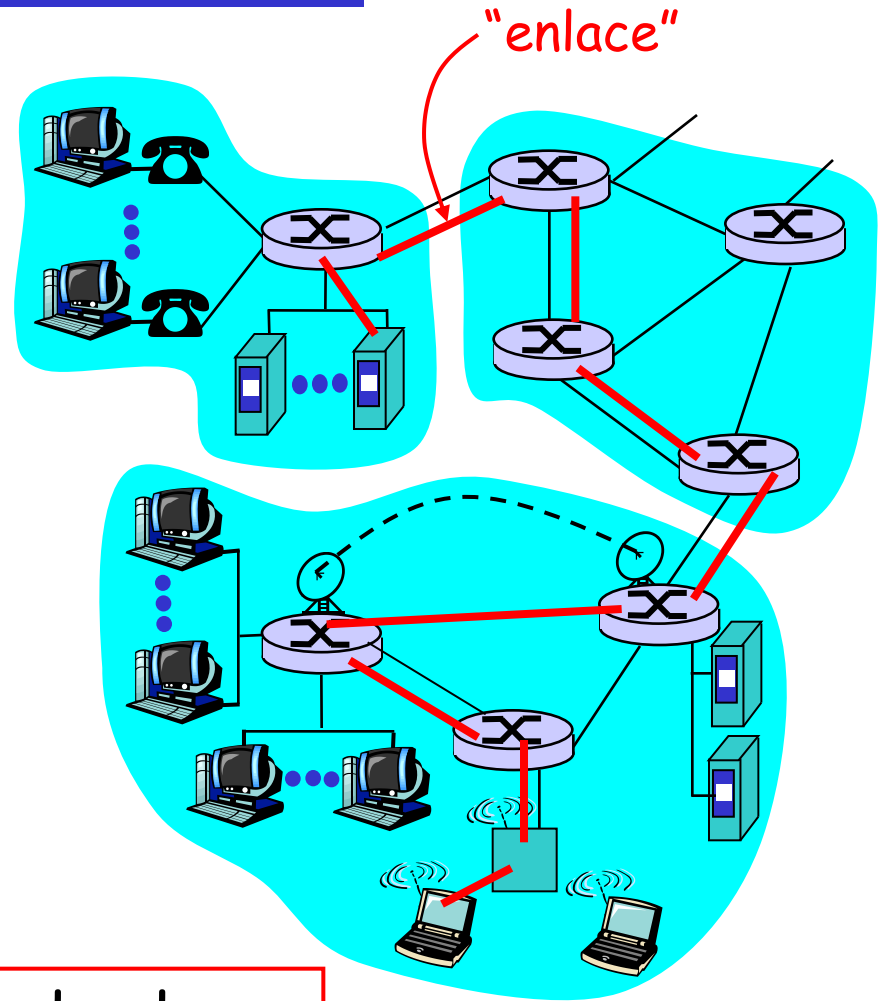
## Resumo:

- ❑ 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

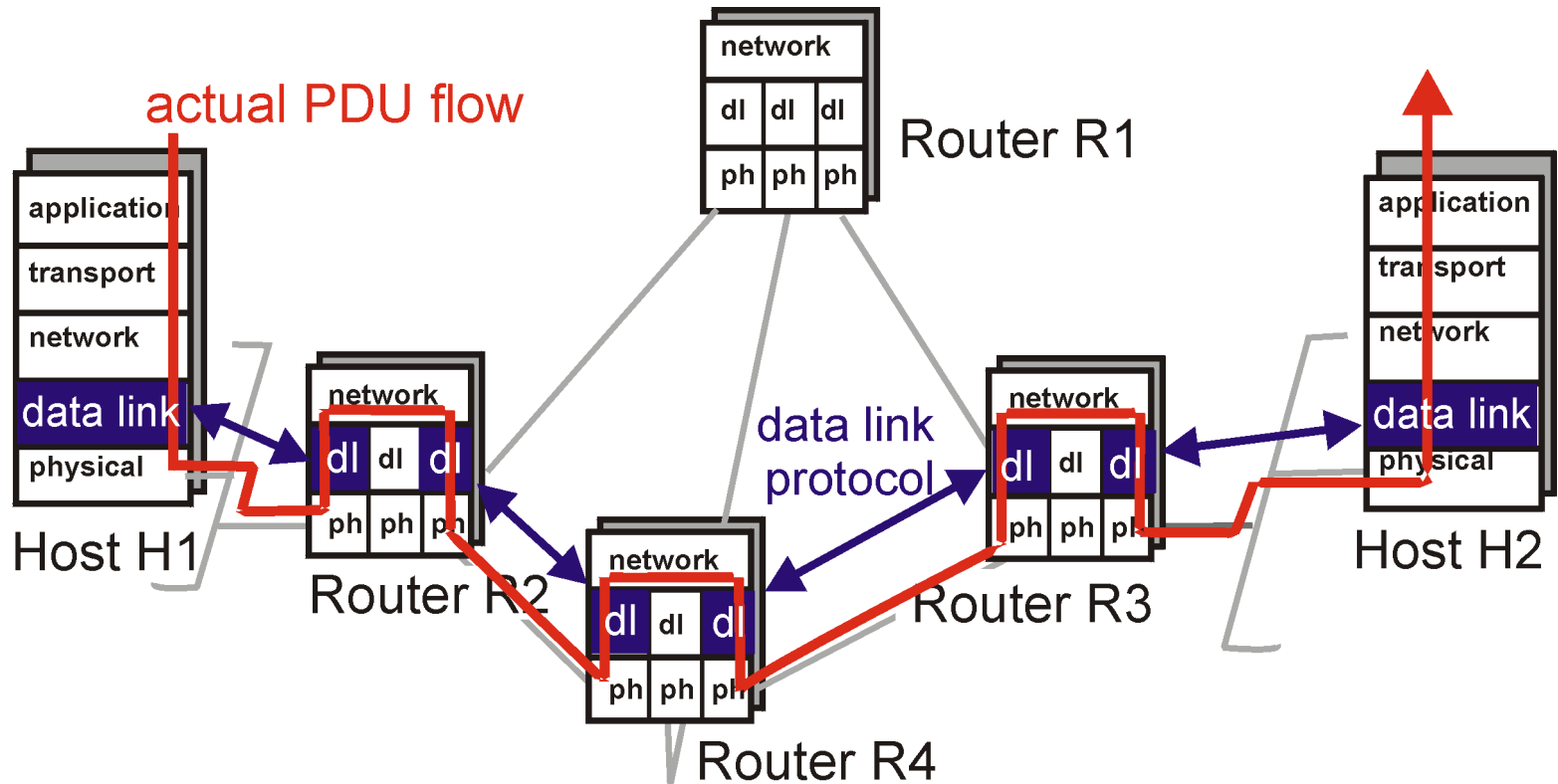
## Terminologia:

- ❑ *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*).



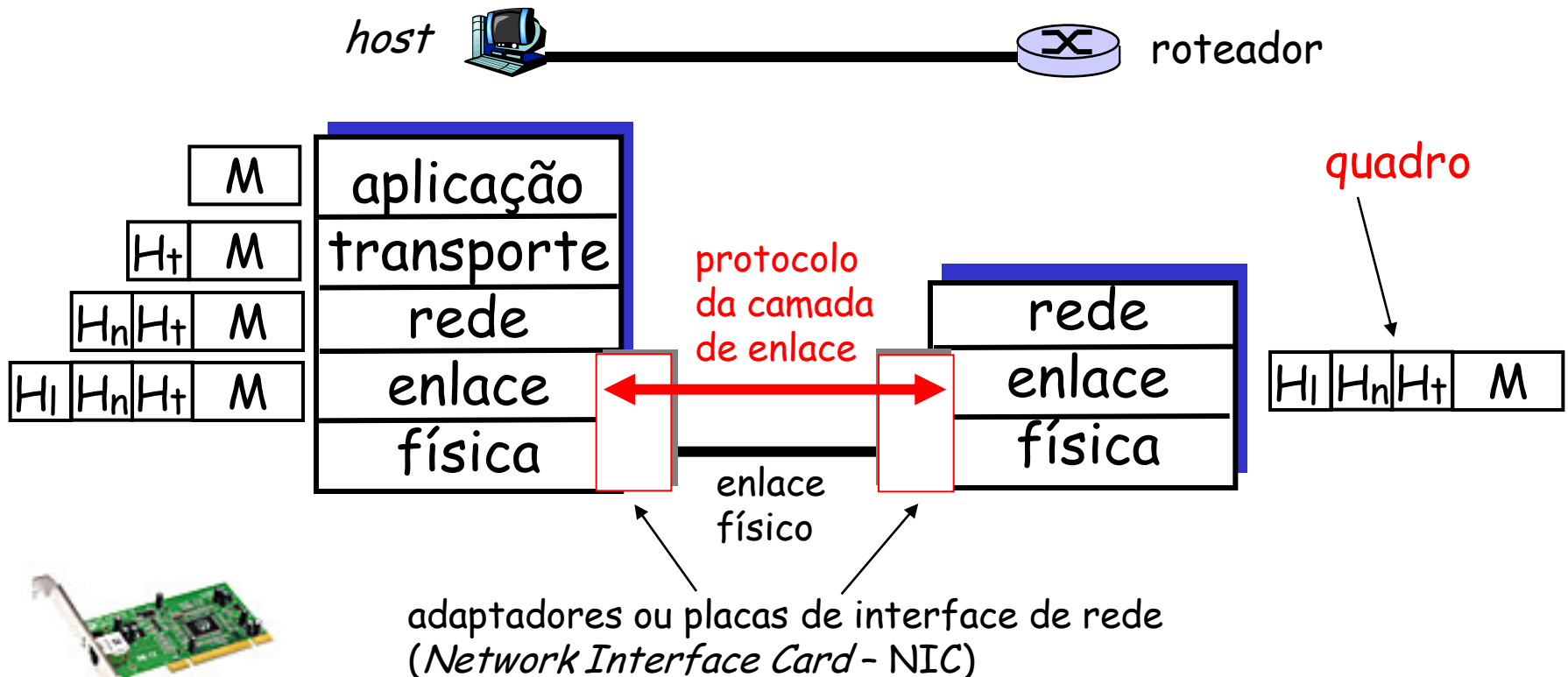
A **camada de enlace** é responsável pela transferência de datagramas de um nó a outro adjacente por meio de um enlace.

# A Camada de Enlace

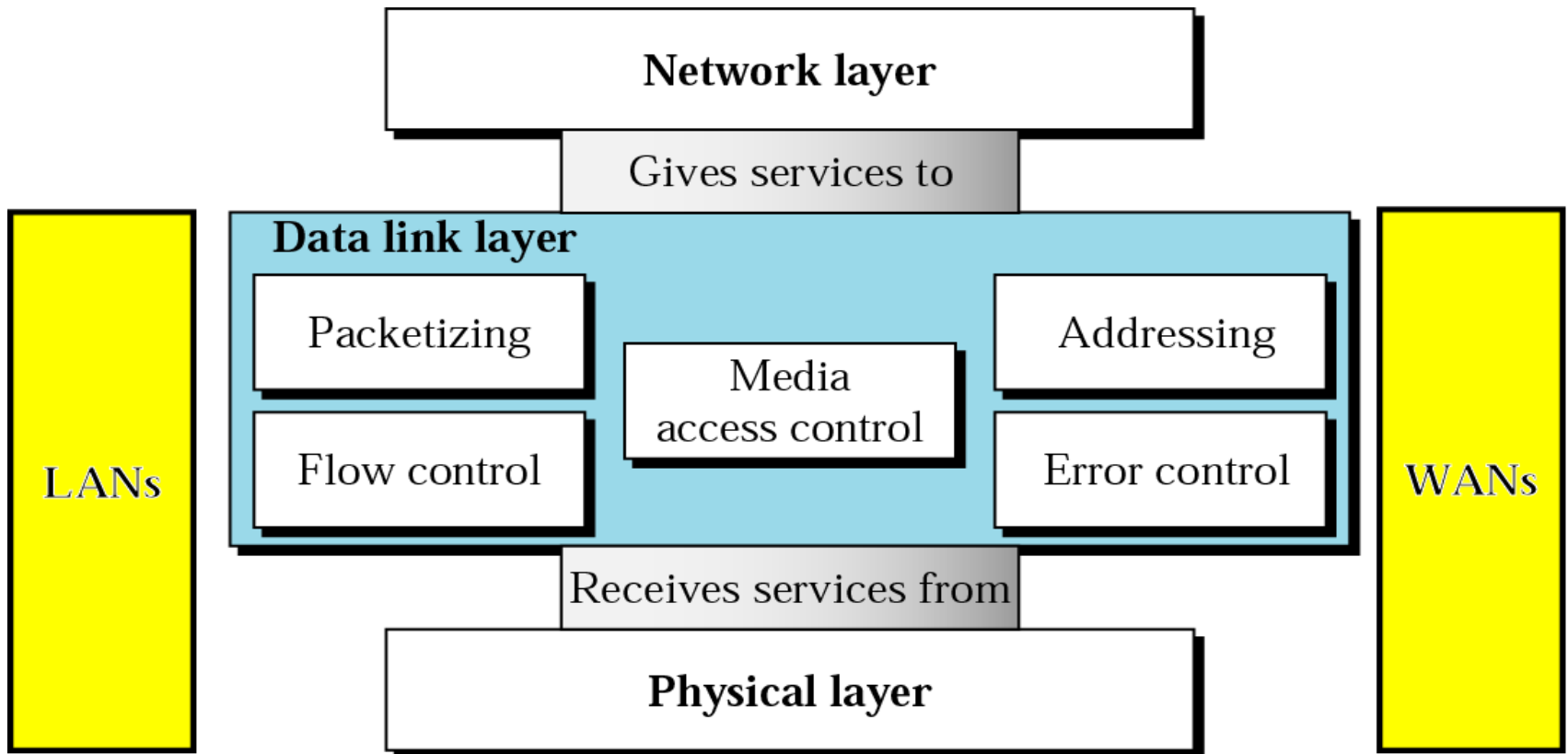


# A Camada de Enlace

- 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"

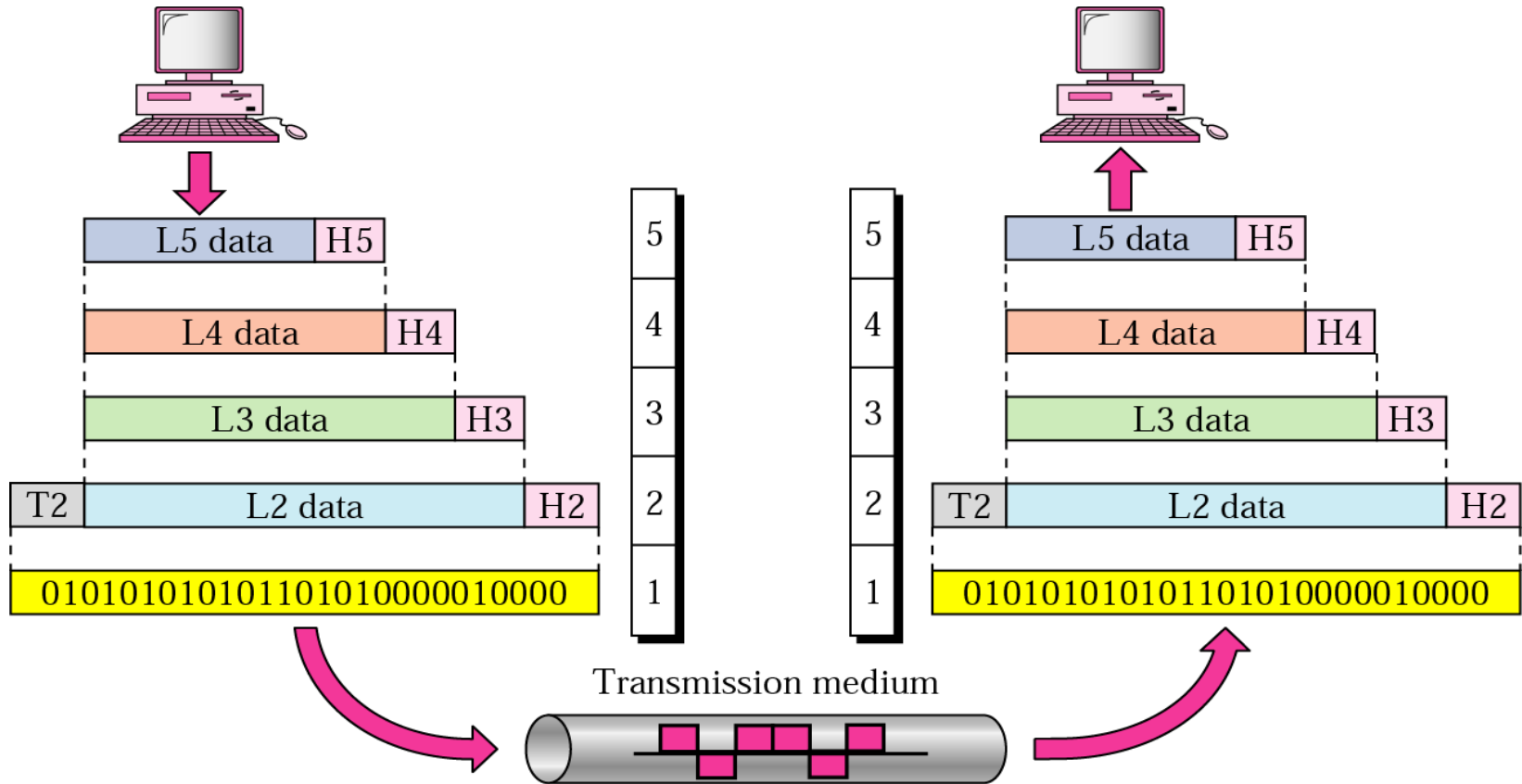
## ❑ Acesso ao enlace:

- 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:

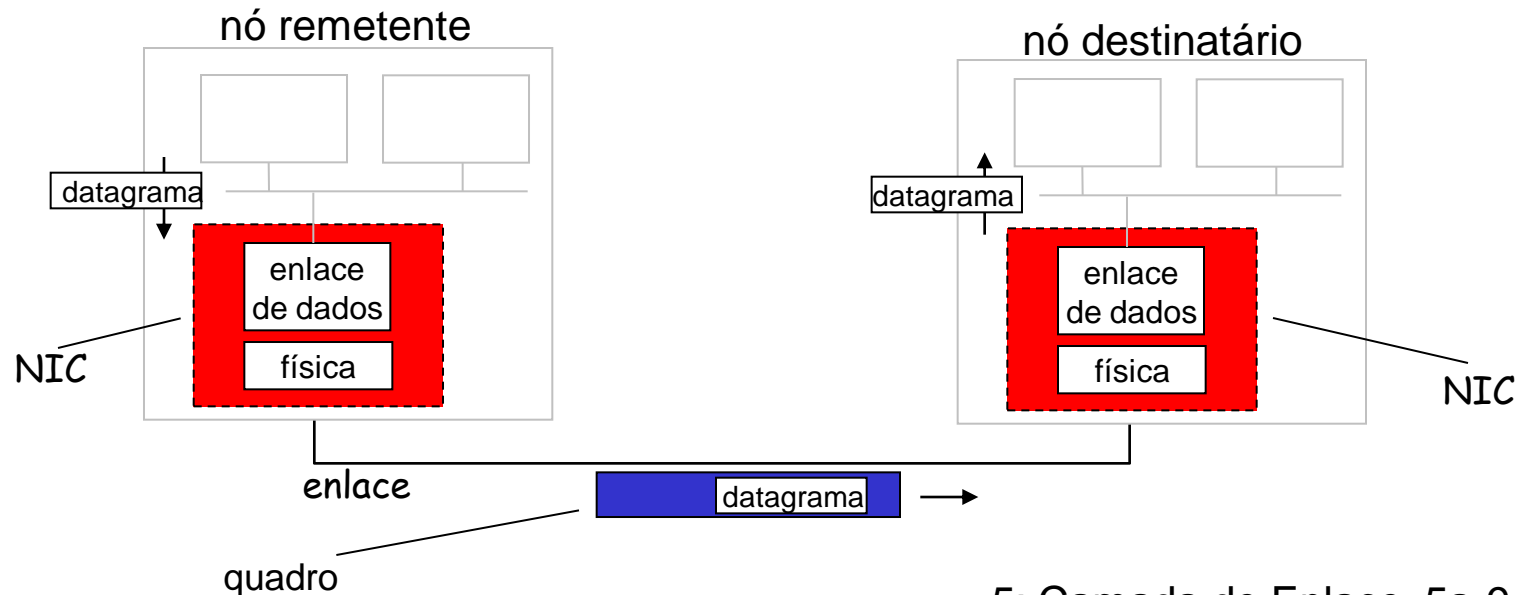
- alguns protocolos de camada de enlace realizam a detecção e a correção de erros (não requer a retransmissão do quadro).

## ❑ 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 sequência, 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.

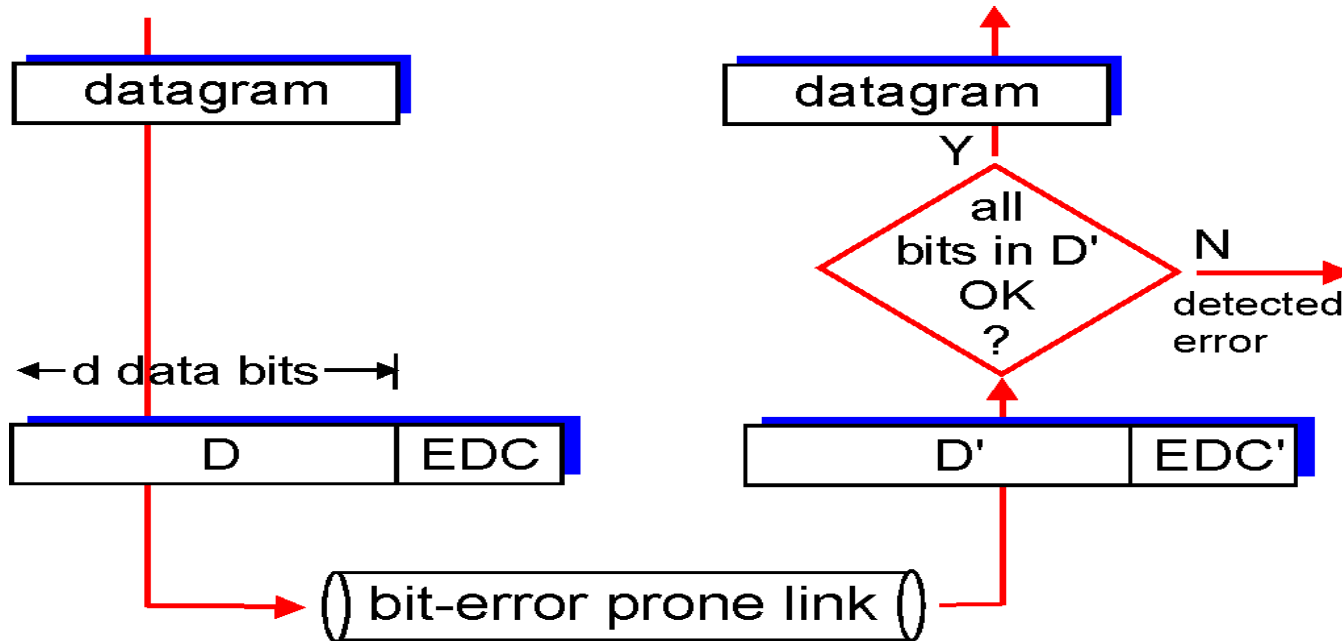


# Técnicas de Detecção e Correção de Erros

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

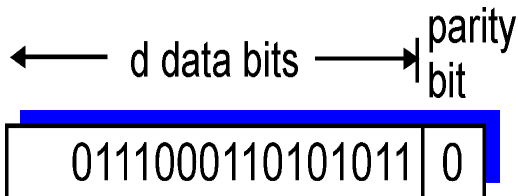
## Paridade de 1 bit:

detecta erro em um único bit

Tipos:

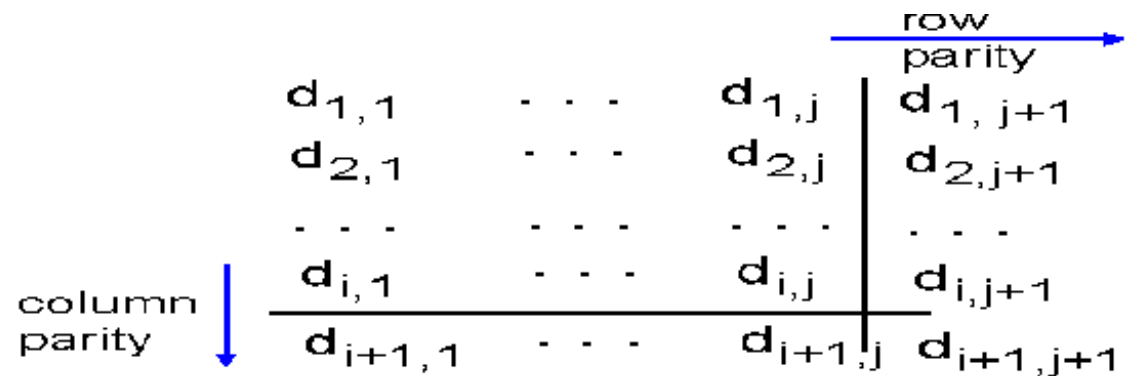
- Paridade Par
- Paridade Impar

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

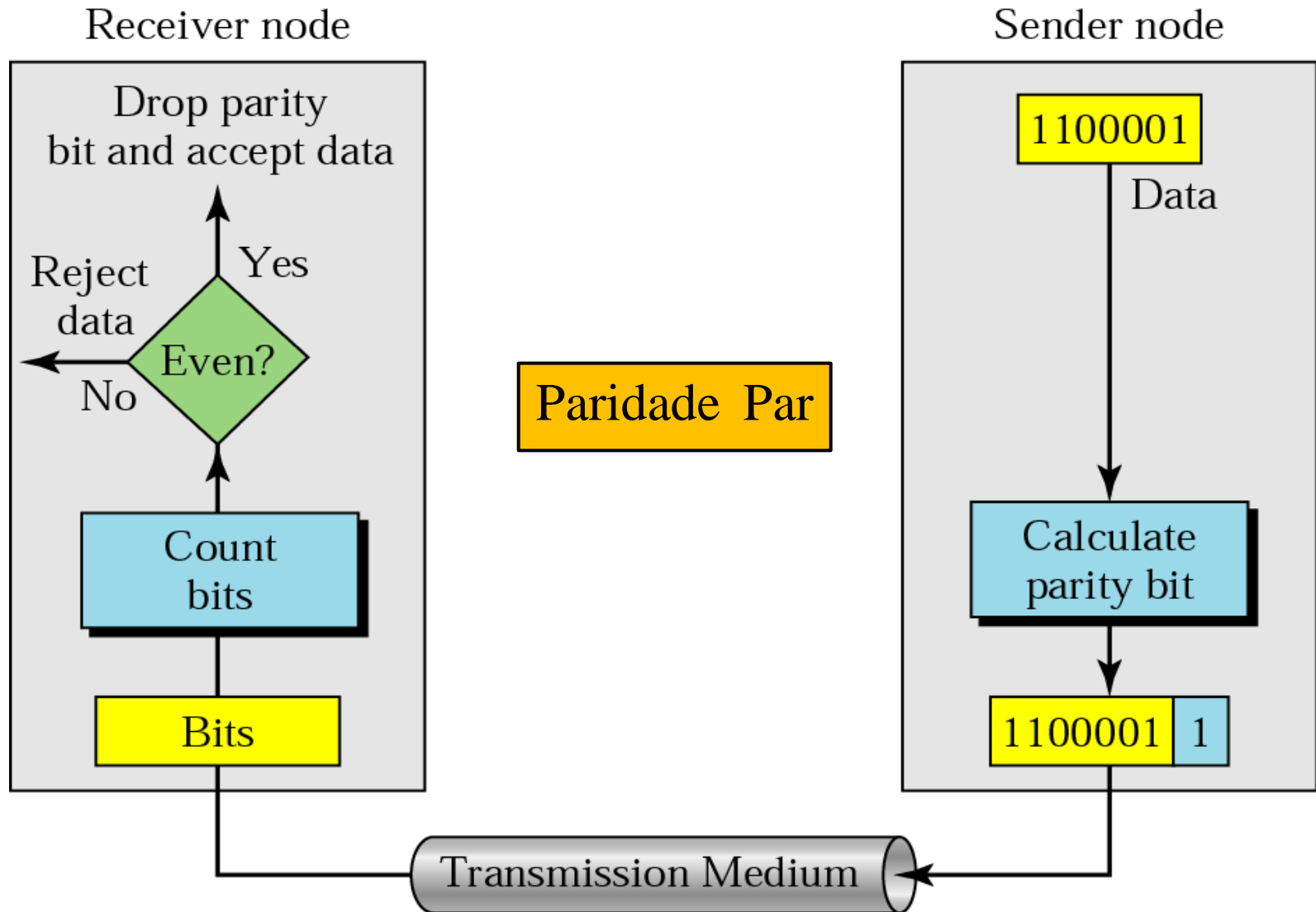
*no errors*

1	0	1	0	1	1
1	0	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0

parity error

*correctable single bit error*

# Bits de Paridade - exemplo

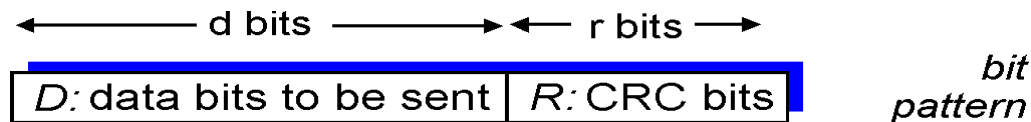


# Técnicas de Detecção de Erros

❑ **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):**

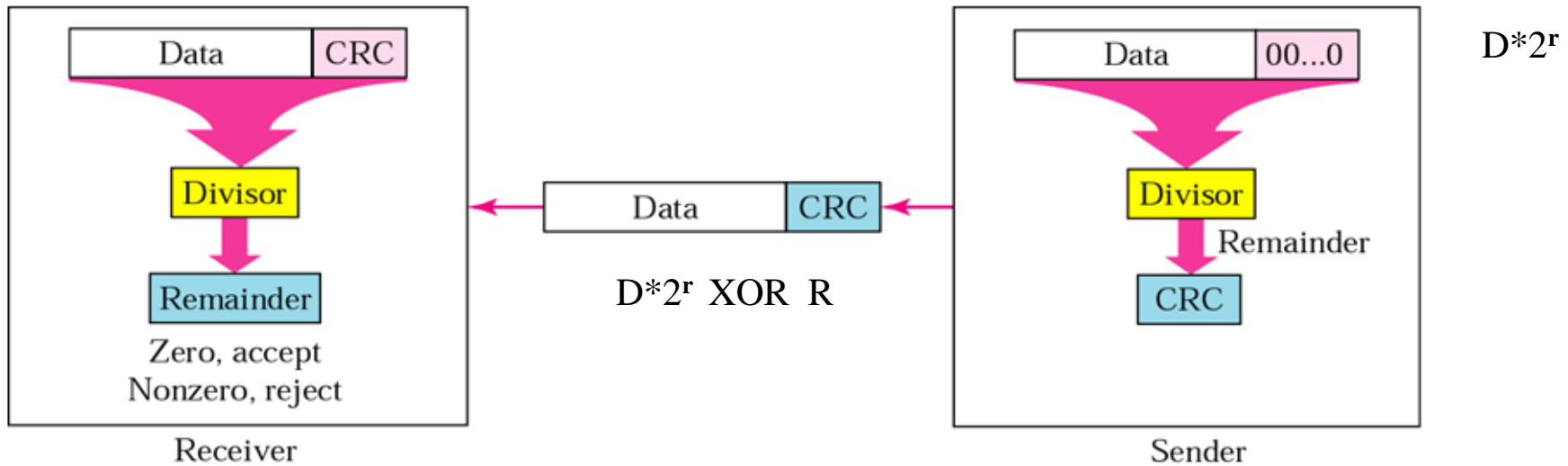
- Os bits de dados,  $D$ , são considerados um número binário
- Escolhe-se uma sequência padrão de  $r+1$  bits, grau  $r$ , (Gerador),  $G$
- Usando aritmética módulo 2, divide-se  $D \cdot 2^r$  por  $G$ . A seguir, acrescenta-se o resto  $R$  da divisão anterior a  $D \cdot 2^r$ . A nova sequência  $\langle D, R \rangle$  é, agora, divisível por  $G$



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

mathematical formula

# 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:

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

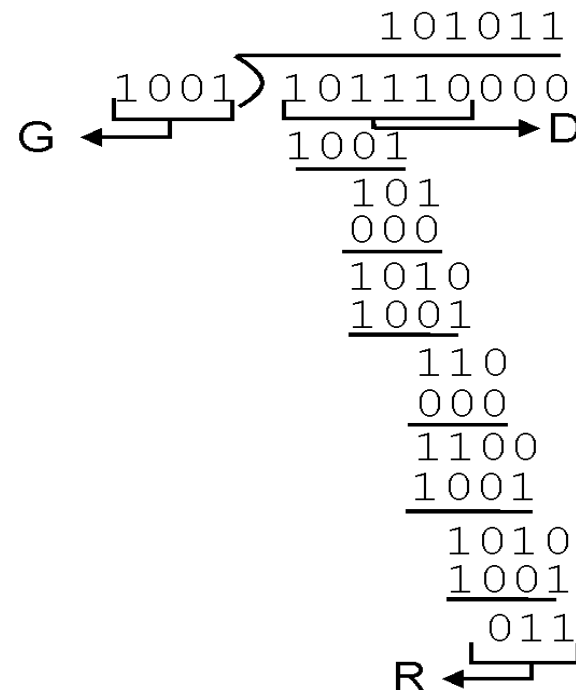
adicionando R em ambos os lados da equação acima:

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

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 sequência  $G$  e acrescenta o resto  $R$  desta divisão a  $D$ . Em seguida, transmite a sequência  $\langle D, R \rangle$
- ❑ O nó receptor divide a sequência  $\langle D, R \rangle$  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:

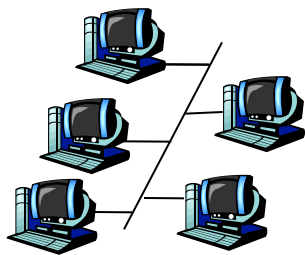
(a) ponto-a-ponto

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

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

## ❑ Enlaces "broadcast"

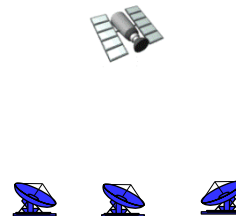
Desafio principal: controlar o acesso ao enlace compartilhado



shared wire (e.g.,  
cabled Ethernet)



shared RF  
(e.g., 802.11 WiFi)



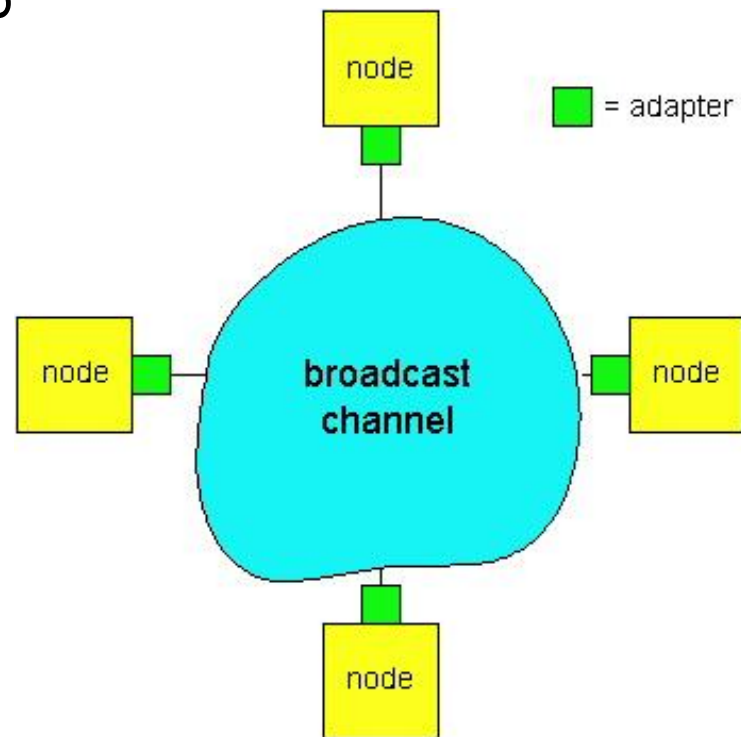
shared RF  
(satellite)



humans at a  
cocktail party  
(shared air, acoustical)

# Protocolos de Acesso Múltiplo

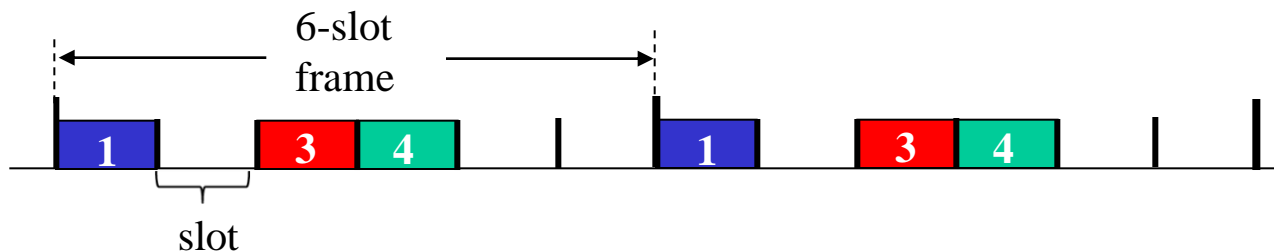
- ❑ Coordenam as transmissões dos nós sobre os enlaces compartilhados (canal "broadcast") a fim de minimizar/evitar colisões.
- ❑ Categorias de protocolos de acesso múltiplo:
  - (a) protocolos de divisão de canal
  - (b) protocolos de acesso aleatório
  - (c) protocolos de revezamento
- ❑ Metas:
  -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



# Protocolos de Divisão de Canal: TDMA

## □ TDMA (*Time Division Multiple Access*)

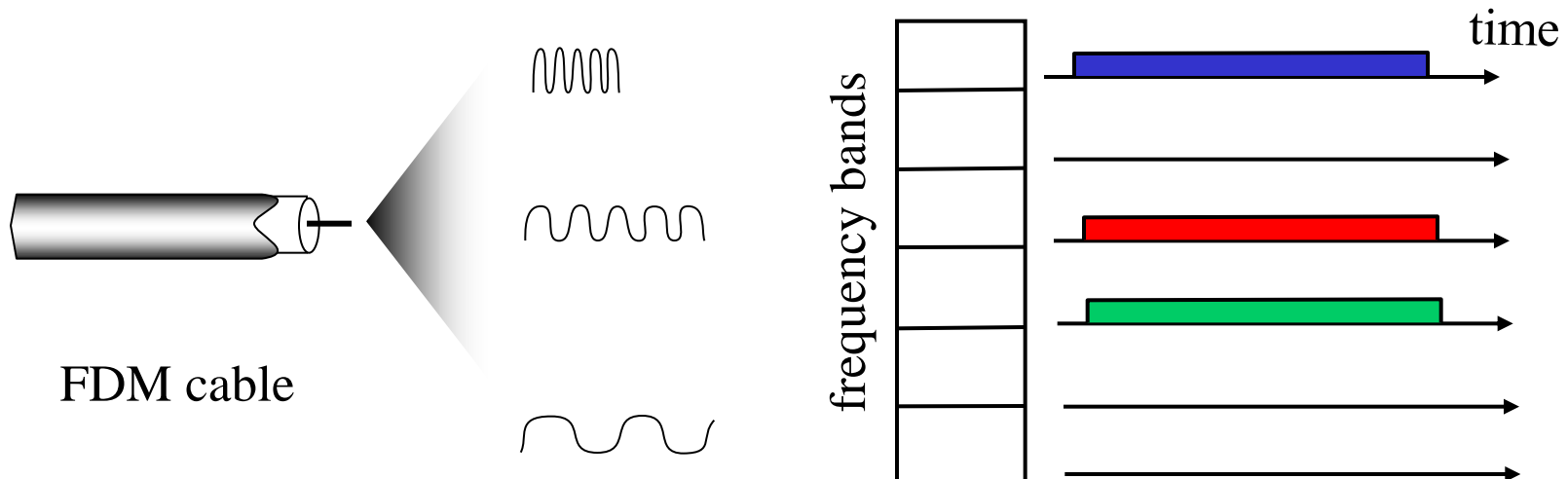
- Acesso ao canal é feito por "ciclos"
- Cada estação controla um "slot" de tamanho fixo (tamanho = tempo de transmissão de pacote) em cada turno
- Compartimentos ("slots") não usados são desperdiçados
- Exemplo: rede local com 6 estações: 1, 3, 4 têm pacotes, "slots" 2, 5, 6 ficam vazios



# Protocolos de Divisão de Canal: FDMA

## □ FDMA (*Frequency Division Multiple Access*)

- O espectro do canal é dividido em bandas de frequência
- Cada estação recebe uma banda de frequência
- Tempo de transmissão não usado nas bandas de frequência é desperdiçado
- Exemplo: rede local com 6 estações: 1, 3, 4 têm pacotes, as bandas de frequência 2, 5, 6 ficam vazias

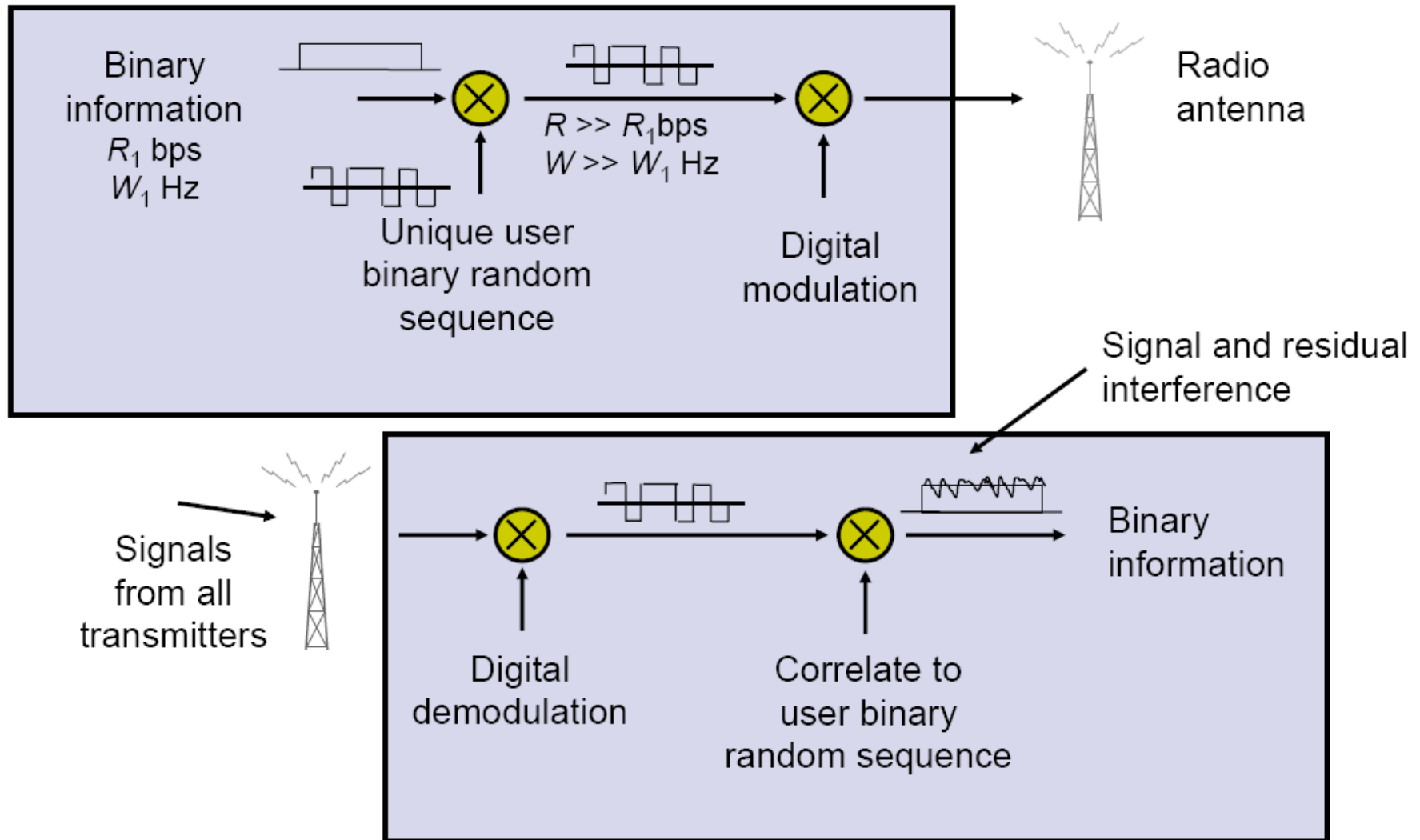


# Protocolos de Divisão de Canal: CDMA

- ❑ 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) X (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.)

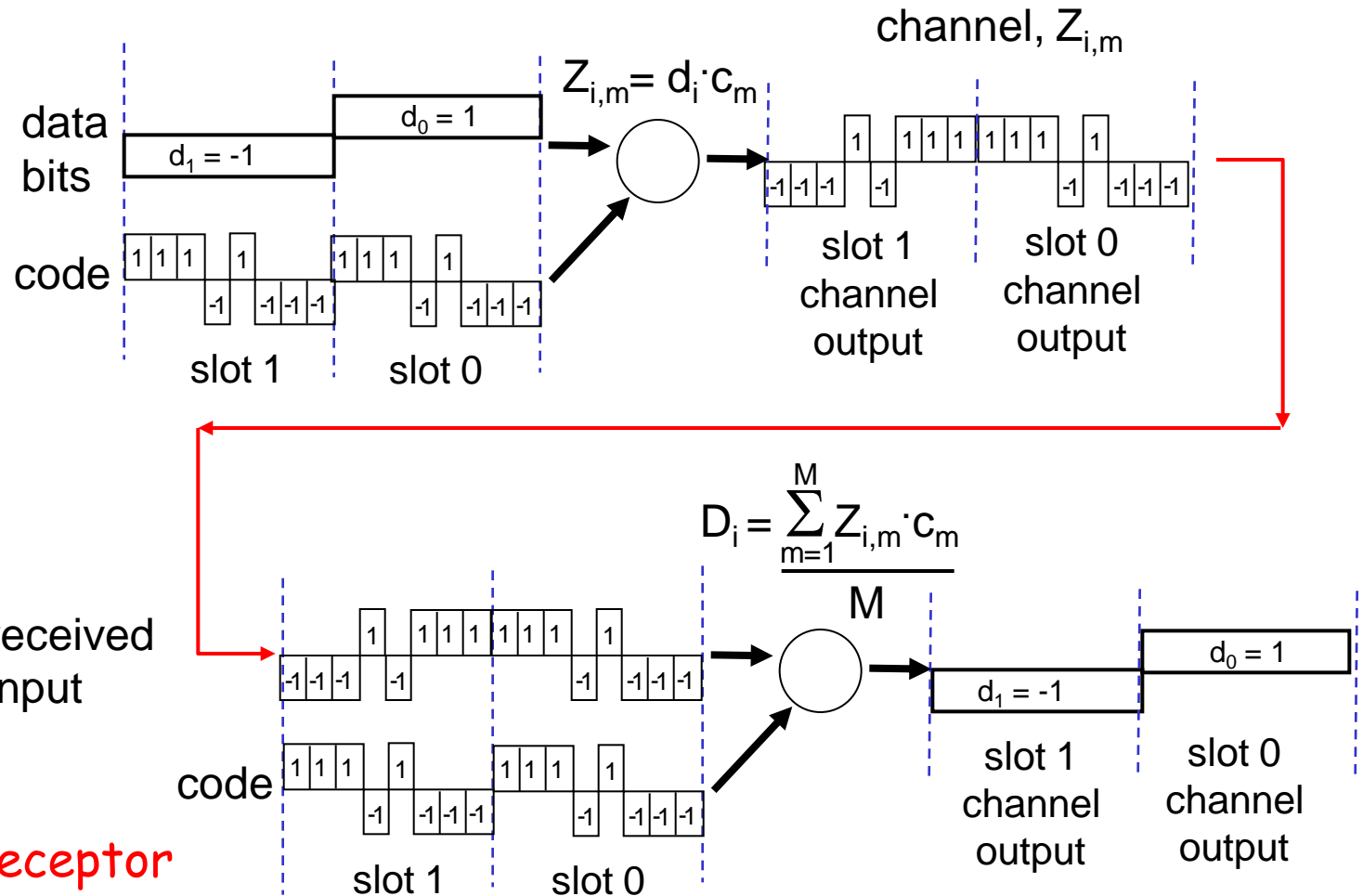
# CDMA (Code Division Multiple Access)

Transmitter from one user



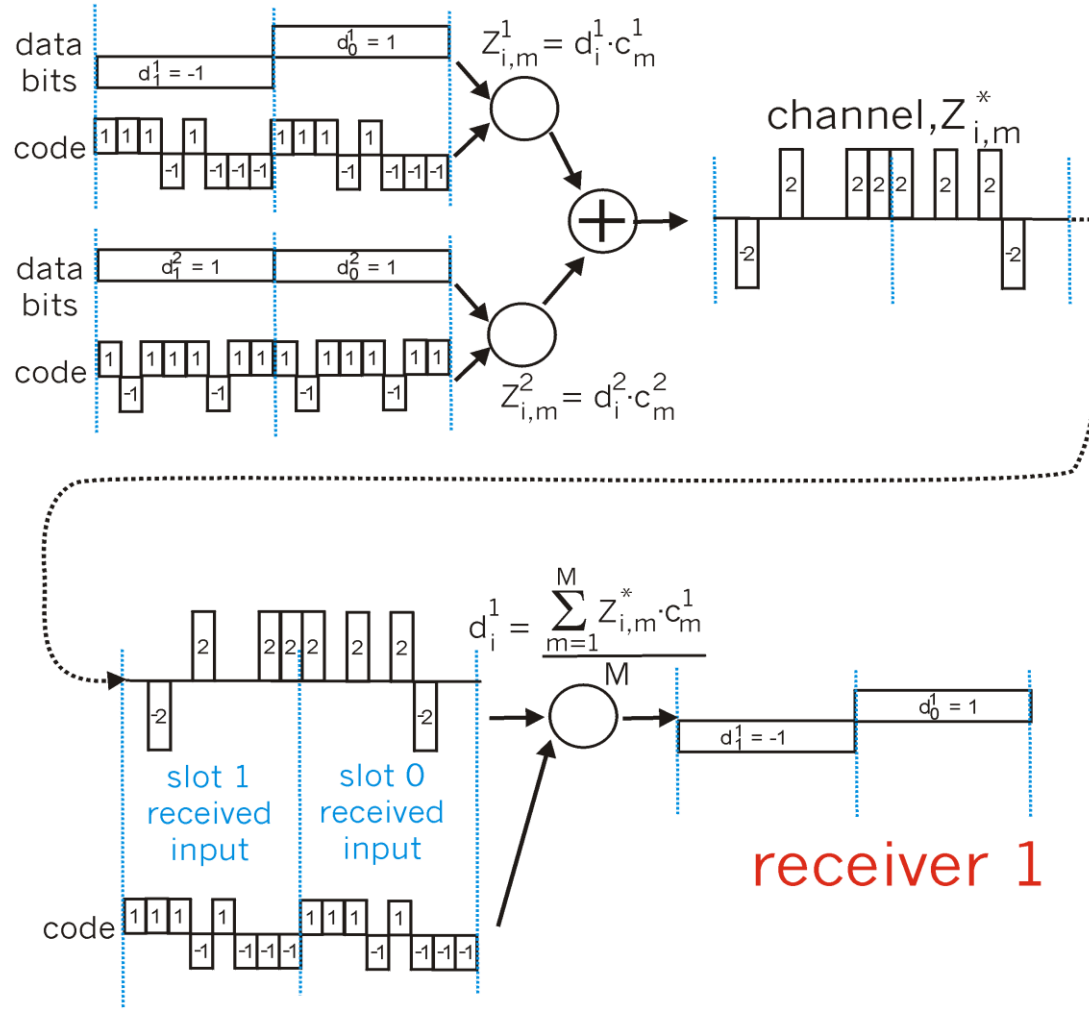
# Protocolos de Divisão de Canal: CDMA (2)

Remetente



# CDMA: interferência entre dois remetentes

senders



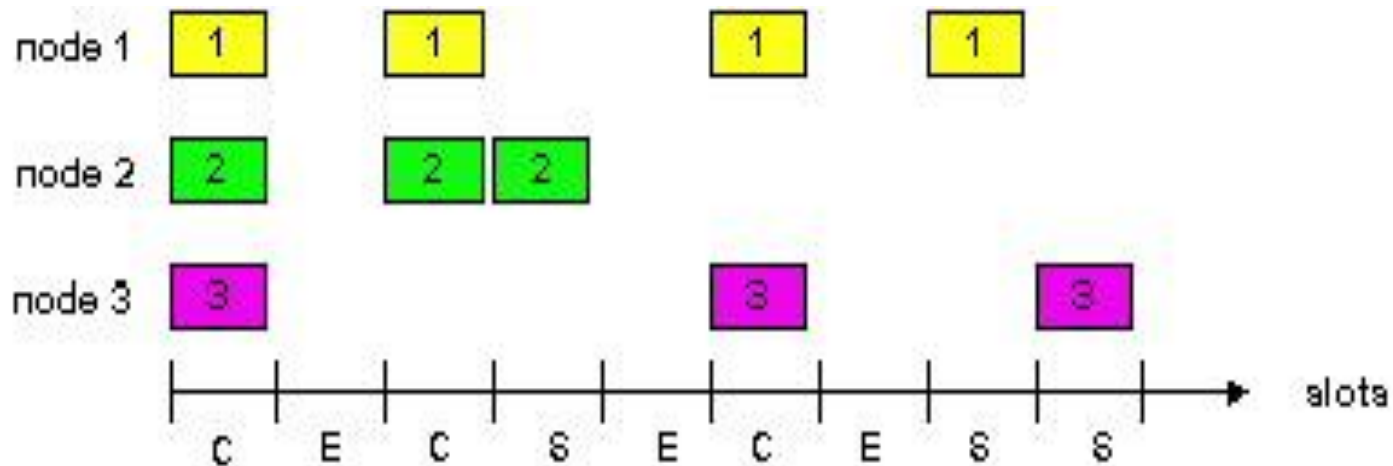


# Protocolos de Acesso Aleatório

- ❑ 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 transmiti-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:

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

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

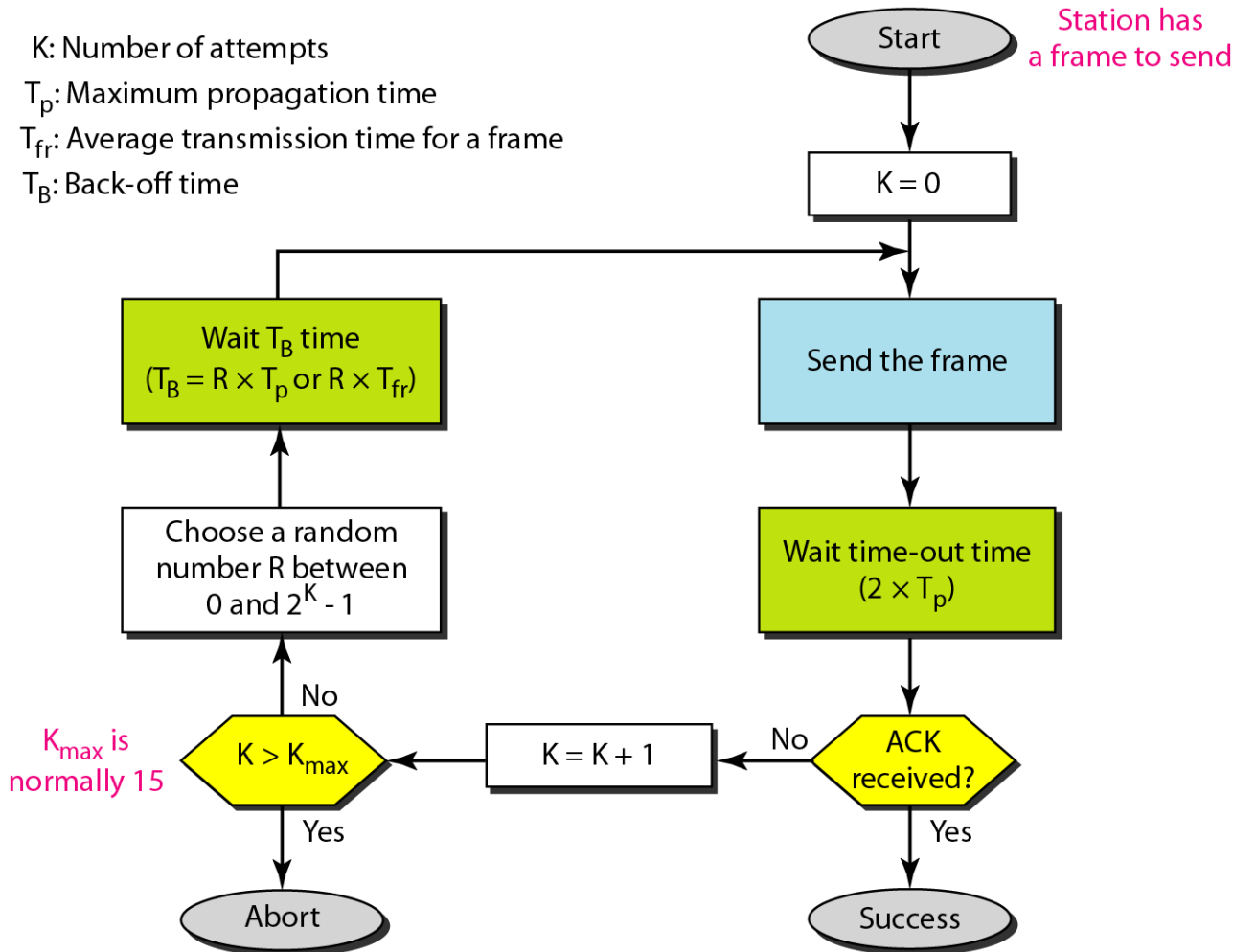
$$S = N.p.(1-p)^{N-1}$$

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!

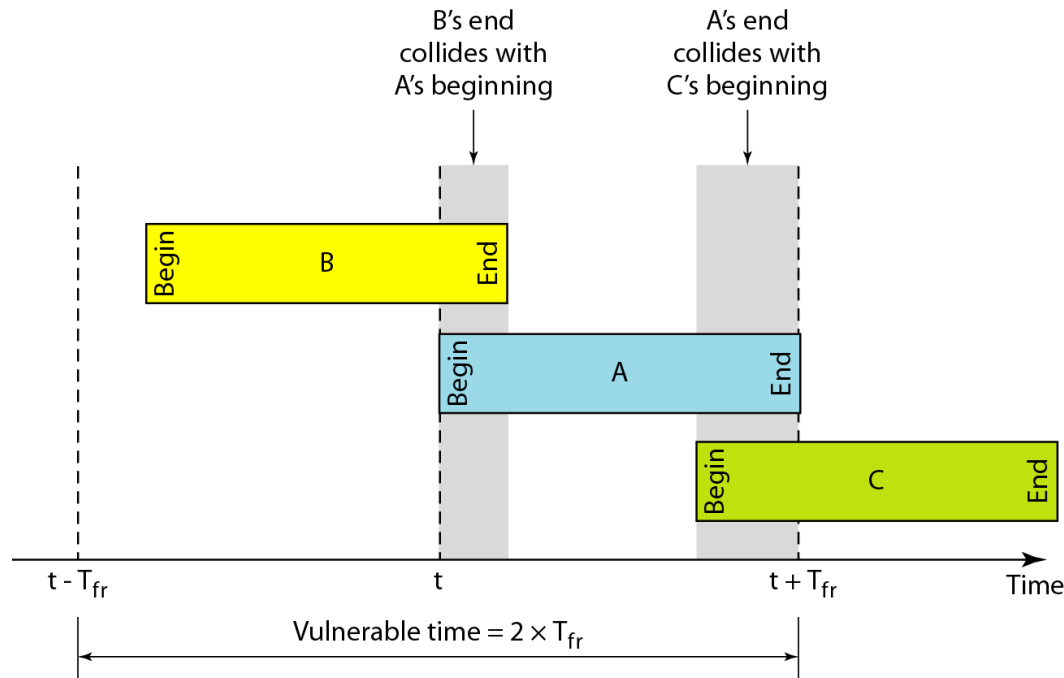
# Aloha puro (sem slots)

## ❑ Versão mais simples que o Slotted Aloha



# 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  $[t - T_{fr}, t + T_{fr}]$

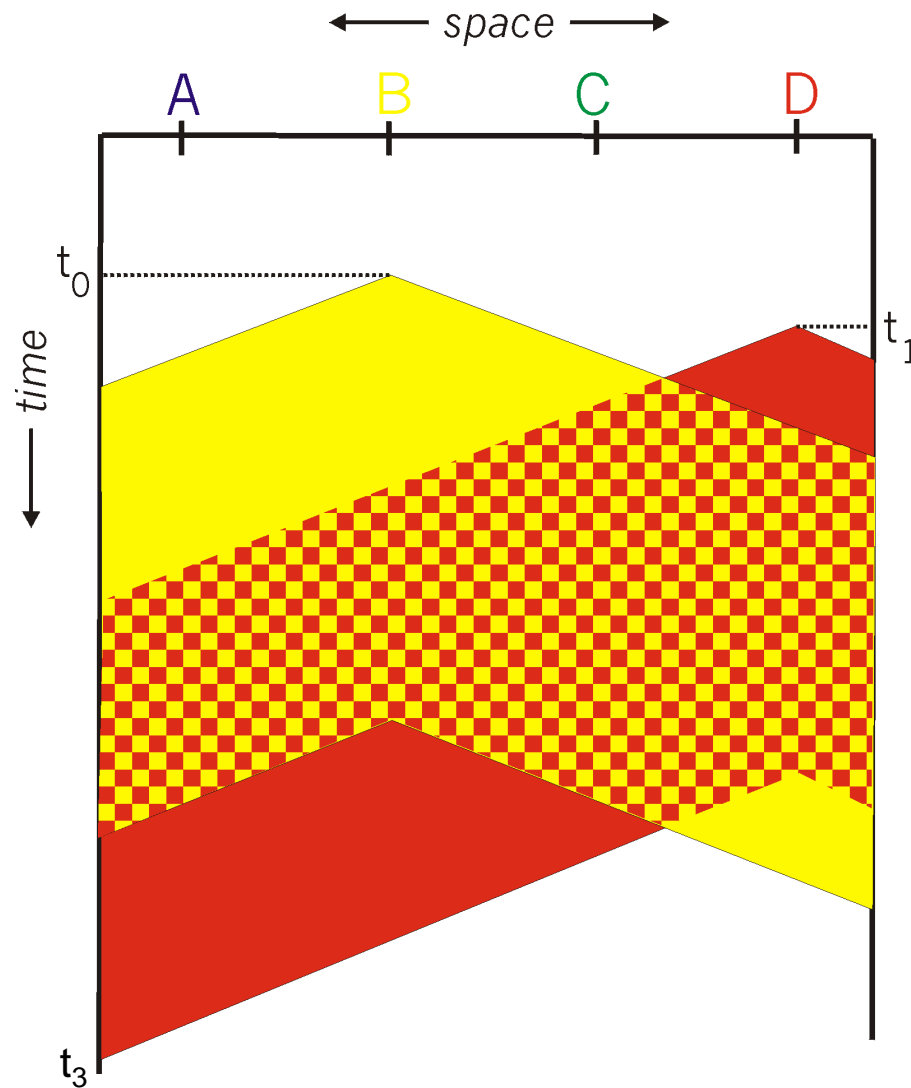


- ❑ A eficiência máxima do Aloha puro é de apenas  $1/(2e) \approx 0,18$

# 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  $d_{\text{prop}}$  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

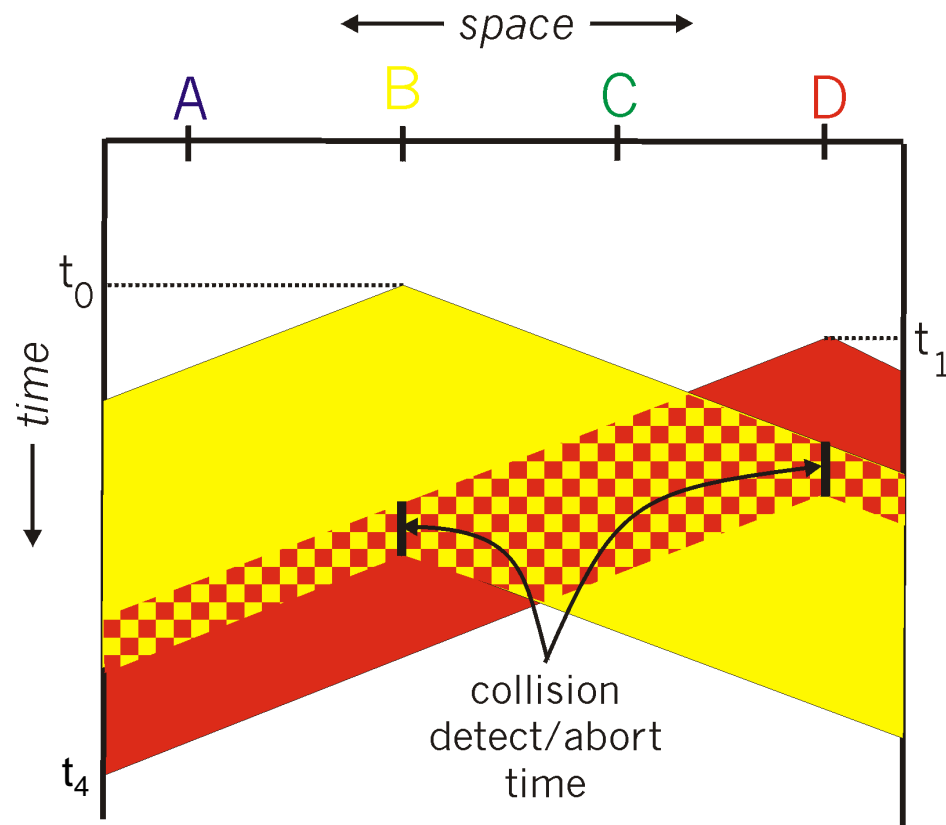


# CSMA/CD (*Collision Detection*)

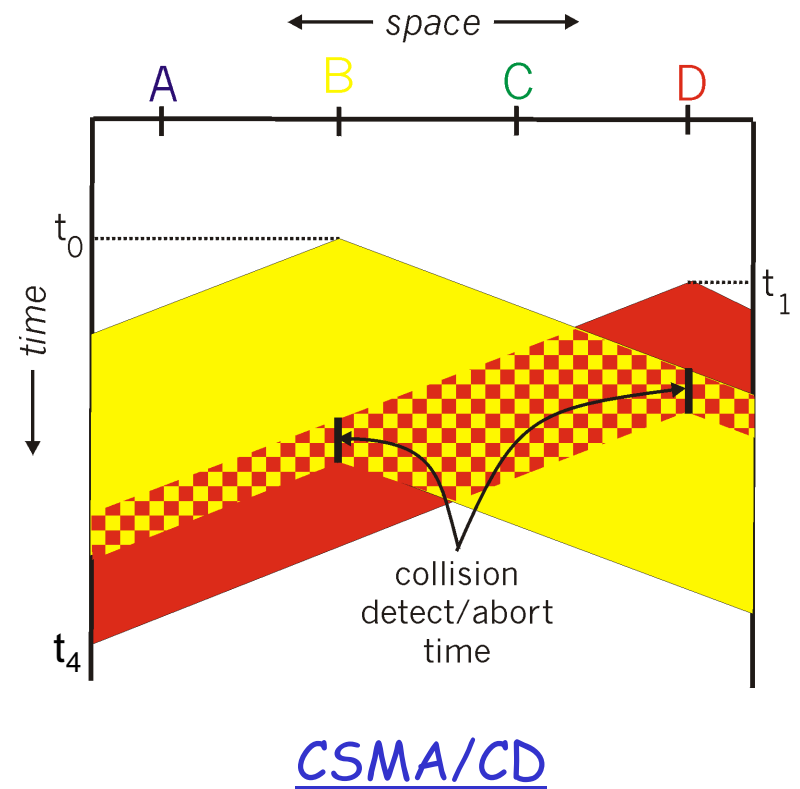
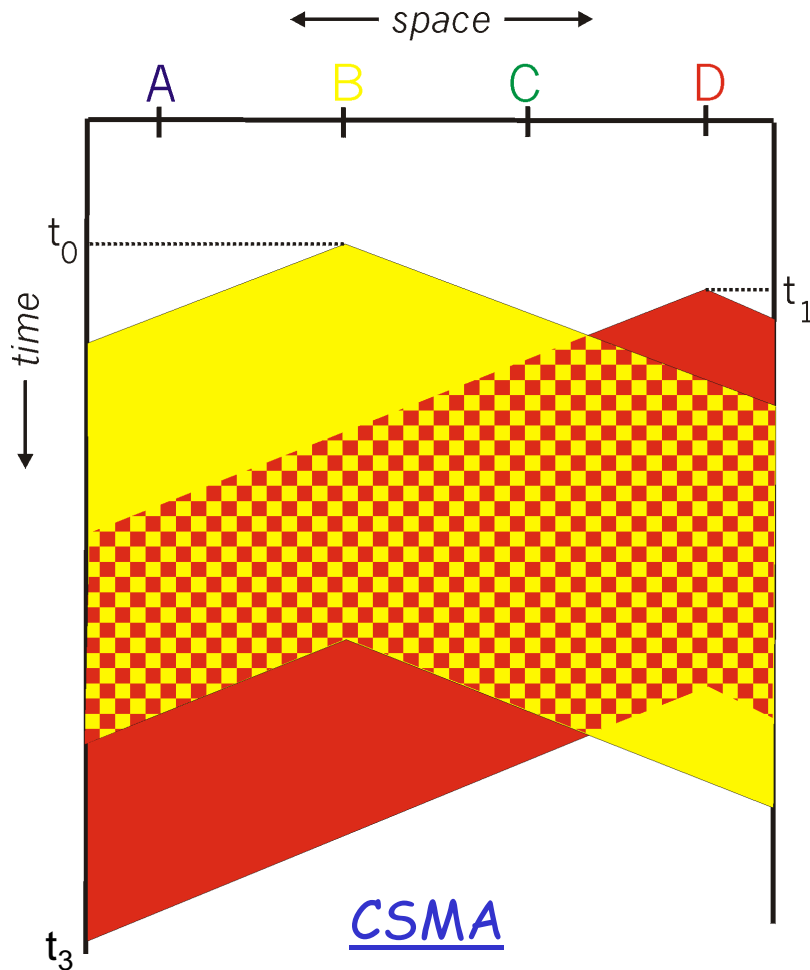
- ❑ **CSMA/CD**: “escuta” do enlace e adiamento como no CSMA
  - As colisões são detectadas rapidamente, em poucos “intervalos de bit”
  - A transmissão do quadro é então abortada, reduzindo consideravelmente o desperdício de capacidade do enlace
- ❑ Detecção de colisões:
  - Fácil em rede locais usando 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



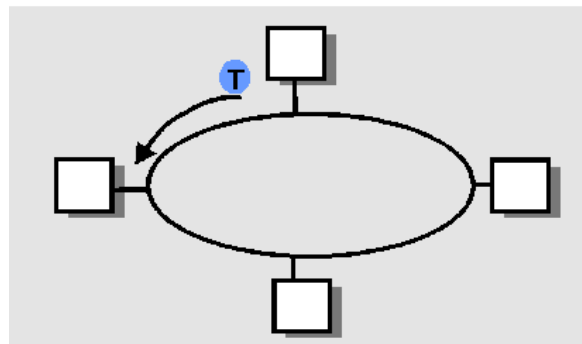
❑ Veremos mais detalhes sobre o CSMA/CD adiante ...

# Protocolos de Revezamento

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

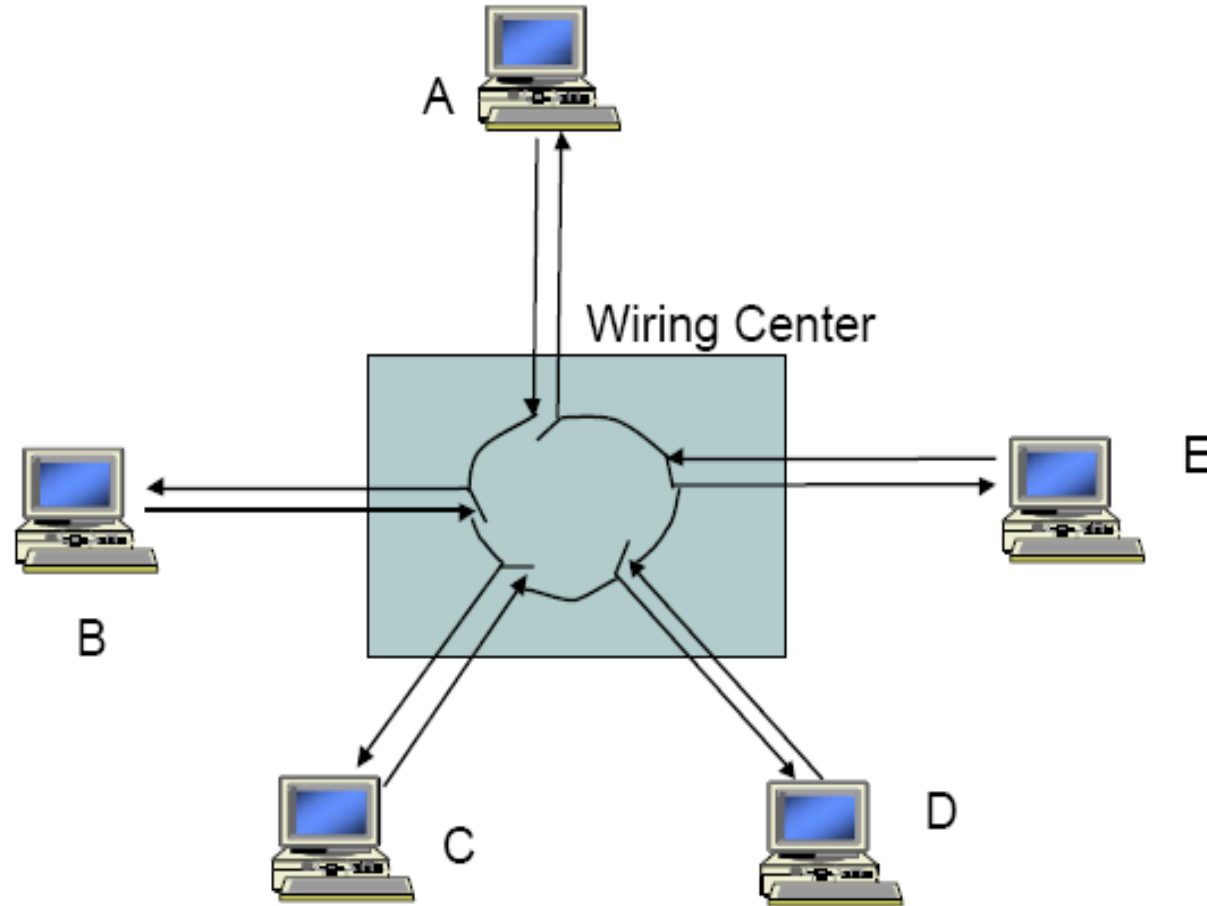
**Polling** : uma **estação mestre** "convida", em sequência, as **estações escravas** a transmitir seus pacotes. Problemas: latência, *polling overhead*, ponto de falha na rede (estação mestre)

**Passagem de Permissão**: a permissão (*token*) é passada sequencialmente 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

