

Capítulo 5: A camada de enlace

Objetivos do capítulo:

- ❑ entender os princípios por trás dos serviços da camada de enlace de dados:
 - detecção e correção de erro
 - Compartilhamento de um canal de broadcast: acesso múltiplo
 - endereçamento da camada de enlace
 - transferência de dados confiável, controle de fluxo.
- ❑ instanciação e implementação de várias tecnologias da camada de enlace

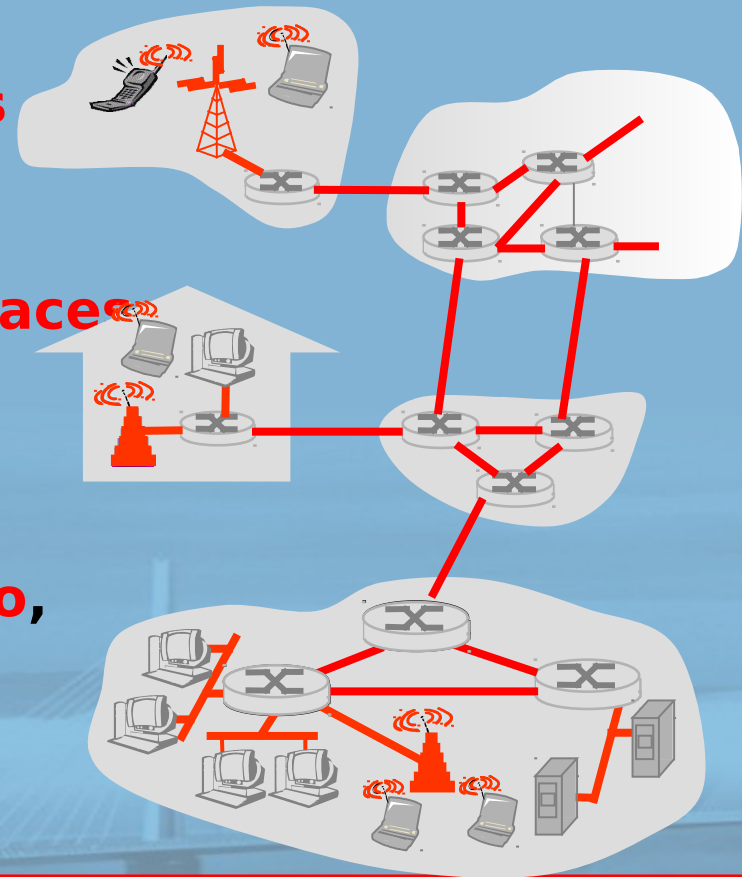
Camada de enlace

- ❑ 5.1 **Introdução e serviços**
- ❑ 5.2 Detecção e correção de erros
- ❑ 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.5 Ethernet
- ❑ 5.6 Comutadores de camada de enlace
- ❑ 5.7 PPP
- ❑ 5.8 Virtualização de enlace: MPLS
- ❑ 5.9 Um dia na vida de uma solicitação de página Web

Camada de enlace: introdução

Alguma terminologia:

- hospedeiros e roteadores são **nós**
- canais de comunicação que se conectam a nós adjacentes pelo caminho de comunicação são **enlaces**
 - enlaces com fio
 - enlaces sem fio
 - LANs
- pacote na camada-2 é um **quadro**, encapsula datagrama



Camada de enlace de dados tem a responsabilidade de transferir um datagrama de um nó ao nó adjacente por um enlace.

Serviços da camada de enlace

□ *enquadramento, acesso ao enlace:*

- encapsula datagrama no quadro, incluindo cabeçalho, trailer
- acesso ao canal de meio compartilhado
- endereços “MAC” usados nos cabeçalhos de quadro para identificar origem, destino
 - diferente do endereço IP!

□ *entrega confiável entre nós adjacentes*

- já aprendemos a fazer isso (Capítulo 3)!
- raramente usado em enlace com pouco erro de bit (fibra, alguns pares trançados)
- enlaces sem fio: altas taxas de erro
 - P: Por que confiabilidade em nível de enlace e fim a fim?

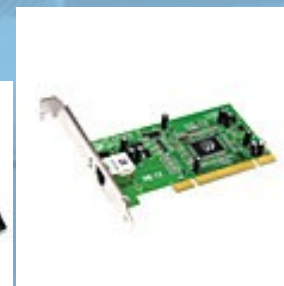
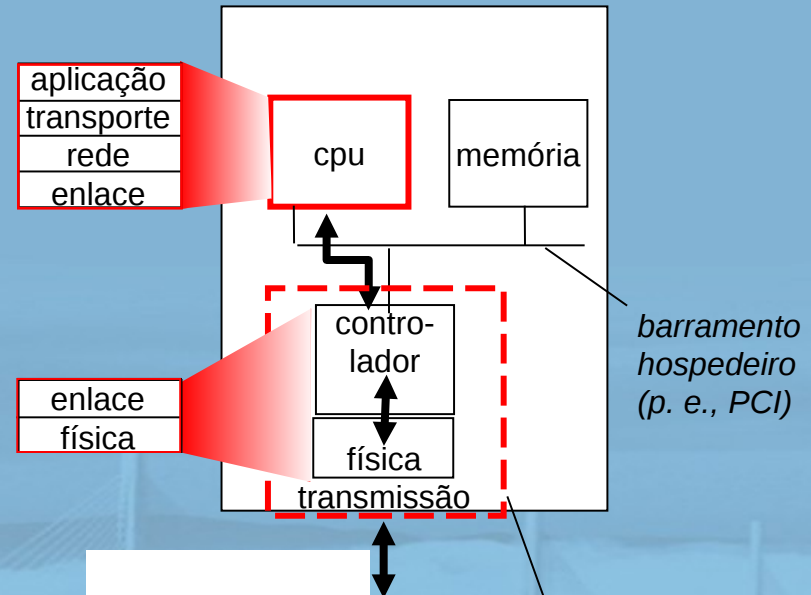
- ❑ *controle de fluxo:*
 - controle entre nós de emissão e recepção adjacentes
- ❑ *detecção de erro:*
 - erros causados por atenuação de sinal, ruído.
 - receptor detecta presença de erros:
 - pede ao remetente para retransmitir ou descarta quadro
- ❑ *correção de erro:*
 - receptor identifica *e corrige* erro(s) de bit sem lançar mão da retransmissão
- ❑ *half-duplex e full-duplex*
 - com *half-duplex*, os nós nas duas extremidades do enlace podem transmitir, mas não ao mesmo tempo

Onde é implementada a camada de enlace?

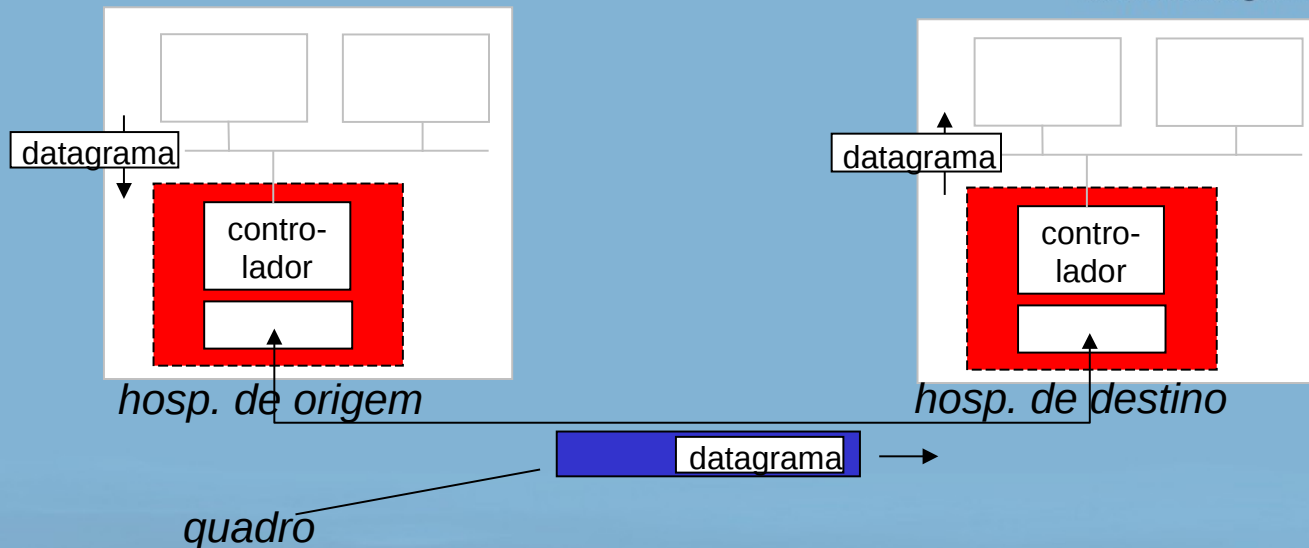
- em todo e qualquer hosp.
- camada de enlace implementada no “adaptador” (ou *placa de interface de rede*, NIC)
 - placa Ethernet, placa PCMCIA, placa 802.11
 - implementa camada de enlace, física
- conecta aos barramentos de sistema do hospedeiro
- combinação de hardware, software, firmware



esquema do hospedeiro



Comunicação entre adaptadores



❑ lado emissor:

- encapsula datagrama no quadro
- inclui bits de verificação de erro, rdt, controle de fluxo etc.

❑ lado receptor

- procura erros, rdt, controle de fluxo etc.
- extrai datagrama, passa para camada superior no lado receptor

Camada de enlace

- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Detecção e correção de erros
- ❑ 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.5 Ethernet
- ❑ 5.6 Comutadores de camada de enlace
- ❑ 5.7 PPP
- ❑ 5.8 Virtualização de enlace: MPLS
- ❑ 5.9 Um dia na vida de uma solicitação de página Web

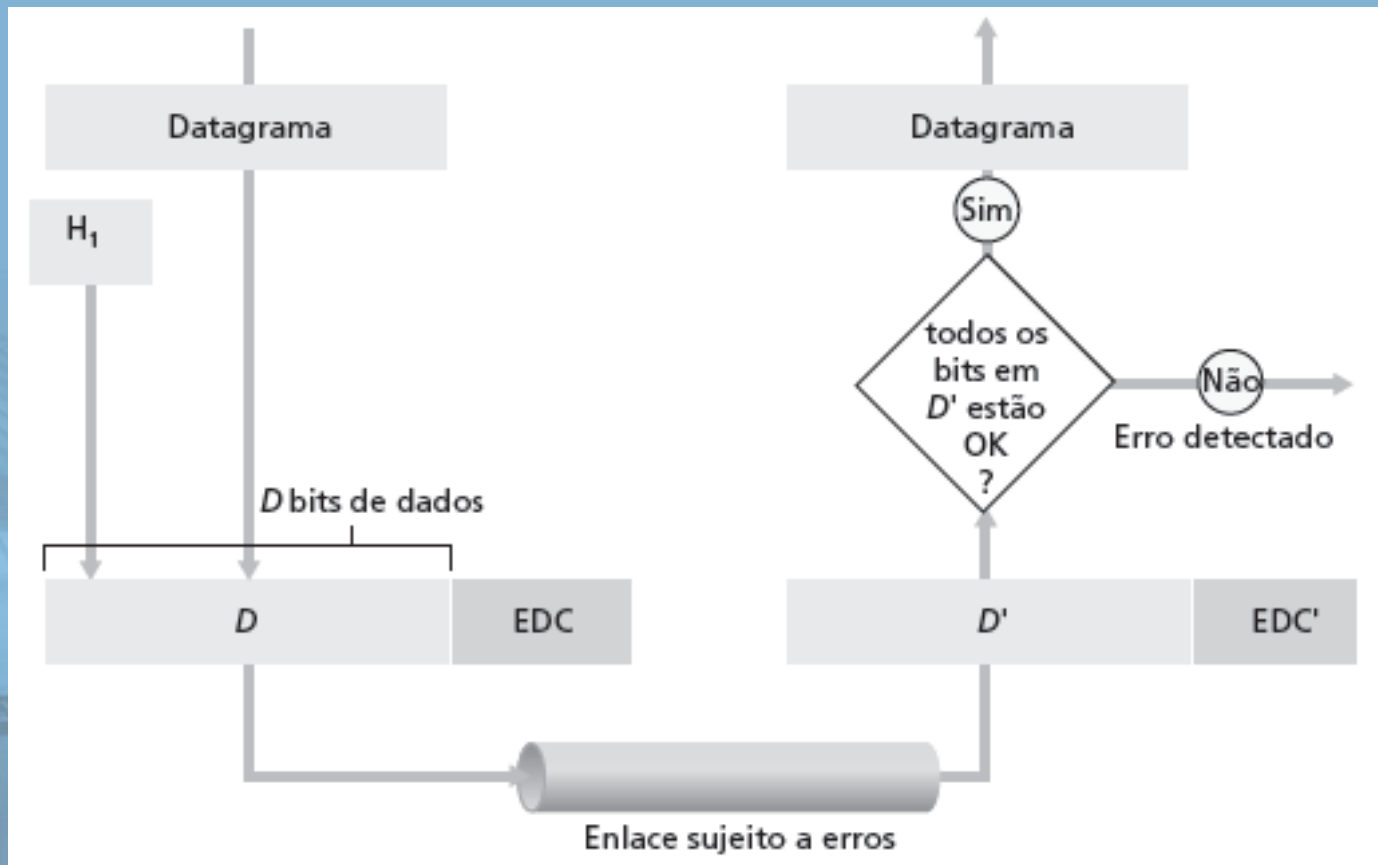
Detecção de erros

EDC = Bits de detecção e correção de erros (redundância)

D = Dados protegidos por verificação de erro, podem incluir campos de cabeçalho

Detecção de erro não 100% confiável!

- protocolo pode perder alguns erros, mas raramente
- maior campo EDC gera melhor detecção e correção



Verificação de paridade

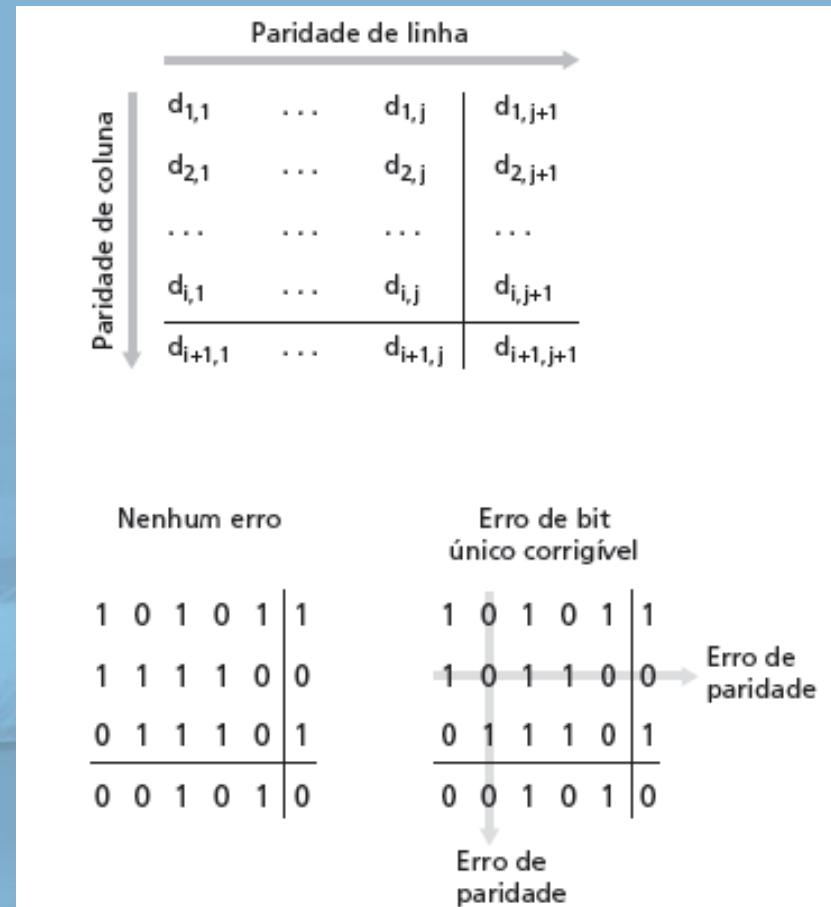
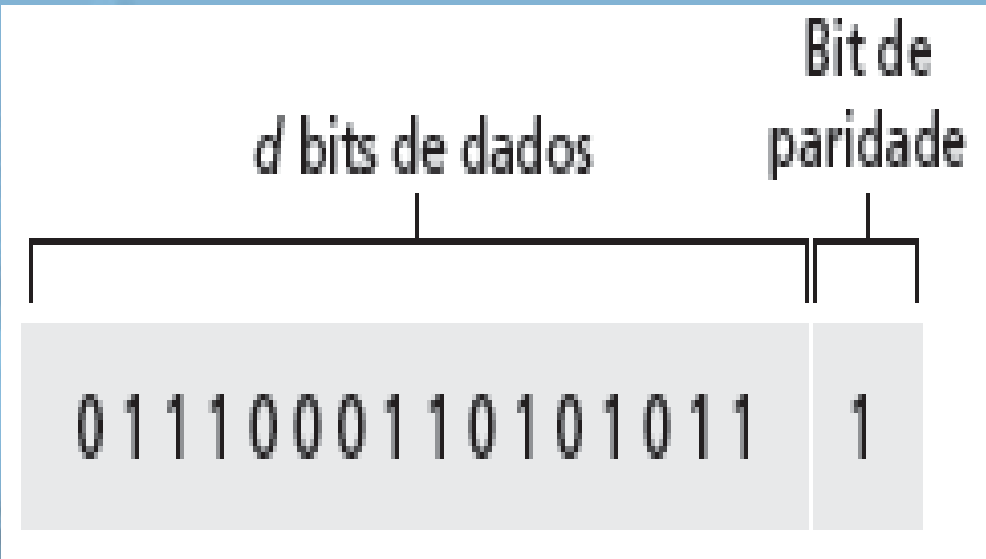
Paridade bidimensional:

Detecta e corrige erros de único bit

Paridade de único

bit:

Detecta erros de único bit



Soma de verificação da Internet (análise)

Objetivo: detectar “erros” (p. e., bits invertidos) no pacote transmitido (nota: usada *somente* na camada de transporte)

Emissor:

- ❑ trata conteúdo do segmento como sequência de inteiros de 16 bits
- ❑ soma de verificação: adição (soma no complemento de 1) do conteúdo do segmento
- ❑ emissor coloca valor da soma de verificação no campo de soma de verificação UDP

Receptor:

- ❑ calcula soma de verificação do segmento recebido
- ❑ verifica se soma de verificação calculada é igual ao valor do campo de soma de verificação:
 - NÃO – erro detectado
 - SIM – nenhum erro detectado. *Mas pode haver erros, apesar disso?*

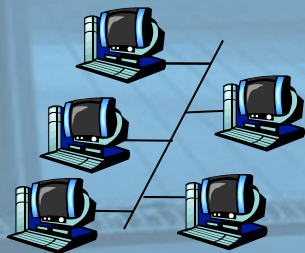
Camada de enlace

- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Detecção e correção de erros
- ❑ 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.5 Ethernet
- ❑ 5.6 Comutadores de camada de enlace
- ❑ 5.7 PPP
- ❑ 5.8 Virtualização de enlace: MPLS
- ❑ 5.9 Um dia na vida de uma solicitação de página Web

Enlaces e protocolos de acesso múltiplo

Dois tipos de “enlaces”:

- ponto a ponto
 - PPP para acesso discado
 - enlace ponto a ponto entre comutador Ethernet e hospedeiro
- **broadcast** (fio ou meio compartilhado)
 - Ethernet à moda antiga
 - HFC anterior
 - LAN sem fio 802.11



fio compartilhado (p. e.,
Ethernet cabeado)



RF compartilhada
(p. e., WiFi 802.11)



RF compartilhada
(satélite)



humanos em uma festa
(ar e acústica
compartilhados)

Protocolos de acesso múltiplo

- ❑ único canal de broadcast compartilhado
- ❑ duas ou mais transmissões simultâneas por nós: interferência
 - **colisão** se o nó recebe dois ou mais sinais ao mesmo tempo

protocolo de acesso múltiplo

- ❑ algoritmo distribuído que determina como os nós compartilham canal, ou seja, determinam quando o nó pode transmitir
- ❑ comunicação sobre compartilhamento de canal deve usar o próprio canal!
 - nenhum canal fora-de-banda para coordenação

Protocolo de acesso múltiplo ideal

Canal de broadcast de velocidade R bps

1. quando um nó quer transmitir, ele pode enviar na velocidade R.
2. quando M nós querem transmitir, cada um pode enviar na velocidade média de transmissão R/M
3. totalmente descentralizado:
 - nenhum nó especial para coordenar transmissões
 - nenhuma sincronização de clocks, intervalos
4. simples

Protocolos MAC: uma taxonomia

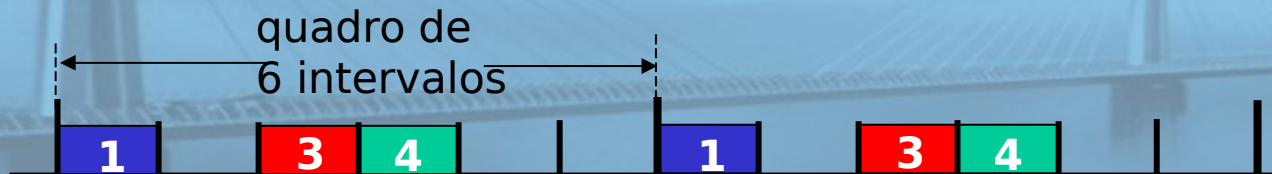
Três classes gerais:

- ❑ **Particionamento de canal**
 - divide o canal em “pedaços menores” (intervalos de tempo, frequência, código)
 - aloca pedaço ao nó para uso exclusivo
- ❑ **Acesso aleatório**
 - canal não dividido, permite colisões
 - “recupera” de colisões
- ❑ **“Revezando”**
 - os nós se revezam, mas os nós com mais a enviar podem receber mais tempo

Protocolos MAC de particionamento de canal: TDMA

TDMA: Time Division Multiple Access

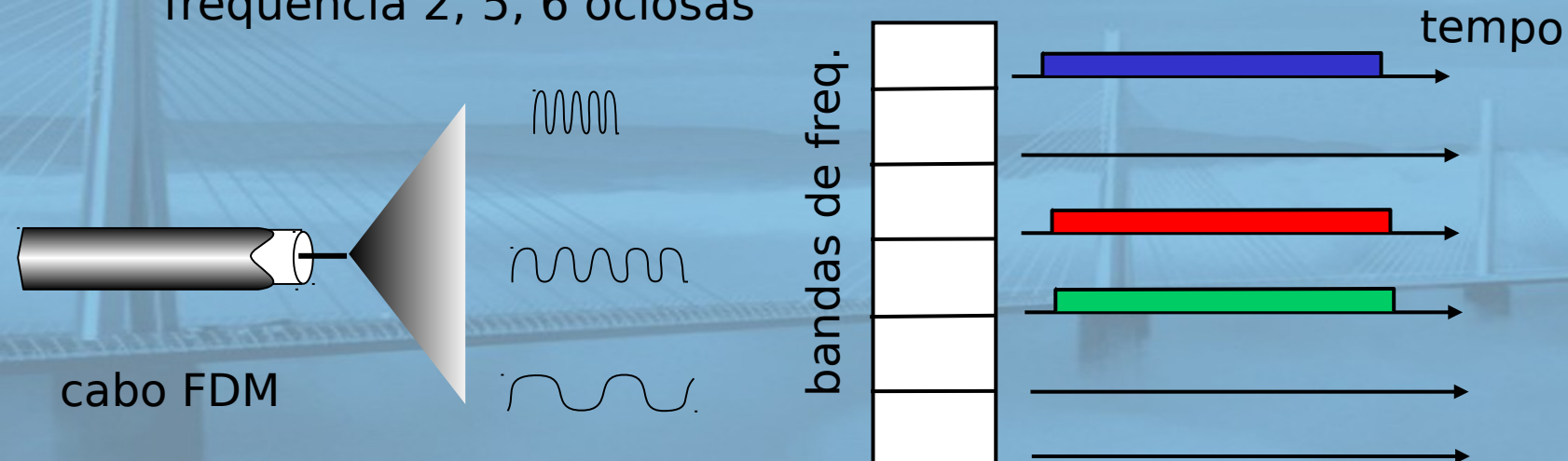
- ❑ acesso ao canal em “rodadas”
- ❑ cada estação recebe intervalo de tamanho fixo (tamanho = tempo transm. pacote) a cada rodada
- ❑ intervalos não usados ficam ociosos
- ❑ exemplo: LAN de 6 estações, 1, 3, 4 têm pacote, intervalos 2, 5, 6 ociosos



Protocolos MAC de particionamento de canal: FDMA

FDMA: Frequency Division Multiple Access

- espectro do canal dividido em bandas de frequência
- cada estação recebe banda de frequência fixa
- tempo de transmissão não usado nas bandas de frequência fica ocioso
- exemplo: LAN de 6 estações, 1, 3, 4 têm pacote, bandas de frequência 2, 5, 6 ociosas



Protocolos de acesso aleatório

- ❑ Quando o nó tem um pacote a enviar
 - transmite na velocidade de dados R total do canal.
 - sem coordenação *a priori* entre os nós
- ❑ dois ou mais nós transmitindo → “colisão”,
- ❑ **protocolo MAC de acesso aleatório** especifica:
 - como detectar colisões
 - como recuperar-se de colisões (p. e., via retransmissões adiadas)
- ❑ Exemplos de protocolos MAC de acesso aleatório:
 - slotted ALOHA
 - ALOHA
 - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

CSMA: ouça antes de falar:

se perceber canal ocioso: transmite quadro inteiro

- ❑ se perceber canal ocupado, adia transmissão
- ❑ analogia humana: não interrompa os outros!

Colisões CSMA

colisões ainda *podem* ocorrer:

atraso de propagação significa que dois nós podem não ouvir a transmissão um do outro

colisão:

tempo de transmissão de pacote inteiro desperdiçado

nota:

papel da distância & atraso de propagação determinando probabilidade de colisão

CSMA/CD (Collision Detection)

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

- colisões *detectadas* dentro de pouco tempo
- transmissões colidindo abortadas, reduzindo desperdício do canal
- detecção de colisão:
 - fácil em LANs com fio: mede intensidades de sinal, compara sinais transmitidos, recebidos
 - difícil nas LANs sem fio: intensidade do sinal recebido abafada pela intensidade da transmissão local
- analogia humana: o interlocutor educado

“Revezando” protocolos MAC

protocolos MAC de particionamento de canal:

- compartilham canal de modo *eficaz e justo* com alta carga
- ineficaz com baixa carga: atraso no acesso ao canal, $1/N$ largura de banda alocada mesmo que apenas 1 nó ativo!

Protocolos MAC de acesso aleatório

- eficaz com baixa carga: único nó pode utilizar o canal totalmente
- alta carga: sobrecarga de colisão

“revezando” protocolos

procure o melhor dos dois mundos!

Polling (seleção):

- ❑ nó mestre “convida” nós escravos a alterarem a transmissão
- ❑ normalmente usado com dispositivos escravos “burros”
- ❑ preocupações:
 - sobrecarga da seleção
 - latência
 - único ponto de falha (mestre)



Passagem de permissão:

- ❑ **permissão** de controle passada de um nó para o próximo sequencialmente.
- ❑ mensagem de permissão
- ❑ preocupações:
 - sobrecarga da permissão
 - latência
 - único ponto de falha (permissão)



Resumo de protocolos MAC

- ❑ *particionamento de canal*, por tempo, frequência ou código
 - Time Division, Frequency Division
- ❑ *acesso aleatório* (dinâmico),
 - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
 - percepção de portadora: fácil em algumas tecnologias (com fio), difícil em outras (sem fio)
 - CSMA/CD usado na Ethernet
 - CSMA/CA usado na 802.11
- ❑ *revezamento*
 - polling do site central, passagem de permissão
 - Bluetooth, FDDI, IBM Token Ring

Camada de enlace

- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Detecção e correção de erros
- ❑ 5.3 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.4 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.5 Ethernet
- ❑ 5.6 Comutadores de camada de enlace
- ❑ 5.7 PPP
- ❑ 5.8 Virtualização de enlace: MPLS
- ❑ 5.9 Um dia na vida de uma solicitação de página Web