



Camada de Enlace

Camada de enlace

Objetivos da aula:

- ❑ 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 tecnologias da camada de enlace

Camada de enlace

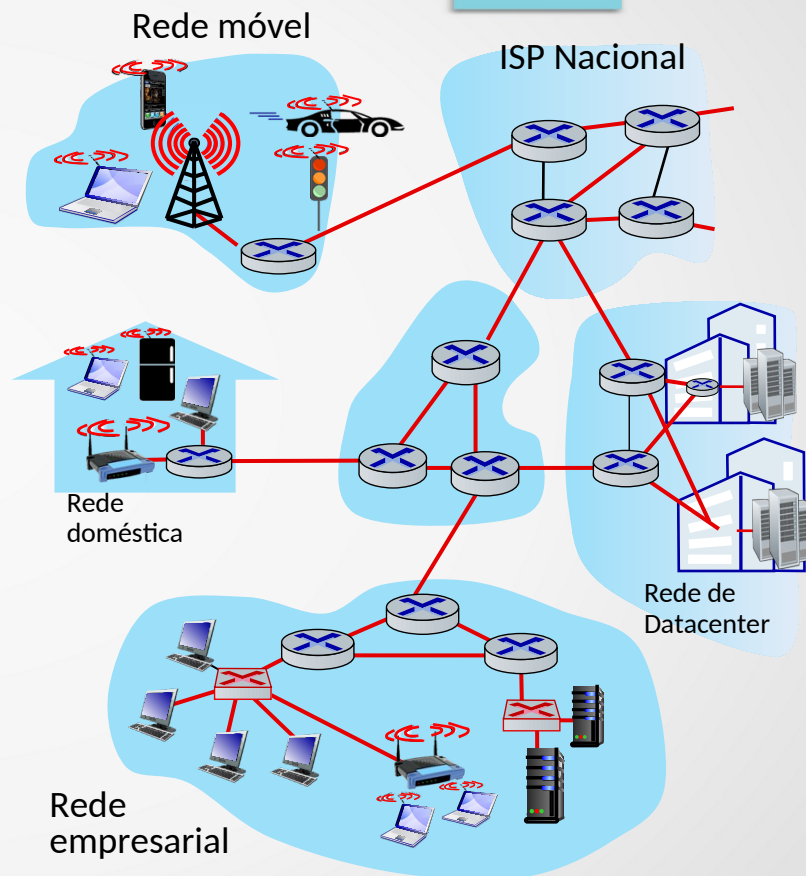
- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.3 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.4 Ethernet
- ❑ 5.5 CSMA

Camada de enlace: introdução

Alguma terminologia:

- Hosts, roteadores, switches e pontos de acesso são **nós**
- canais de comunicação que conectam nós adjacentes são **enlaces**
 - enlaces podem usar meios guiados ou não guiados de transmissão
- pacote na camada-2 é um **quadro (frame)** e encapsula datagrama

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



Camada de enlace: introdução

Um datagrama de um dos host sem fio enviado a um dos servidores percorrerá 6 enlaces:

1) Wi-Fi entre host origem e ponto de acesso (PA);

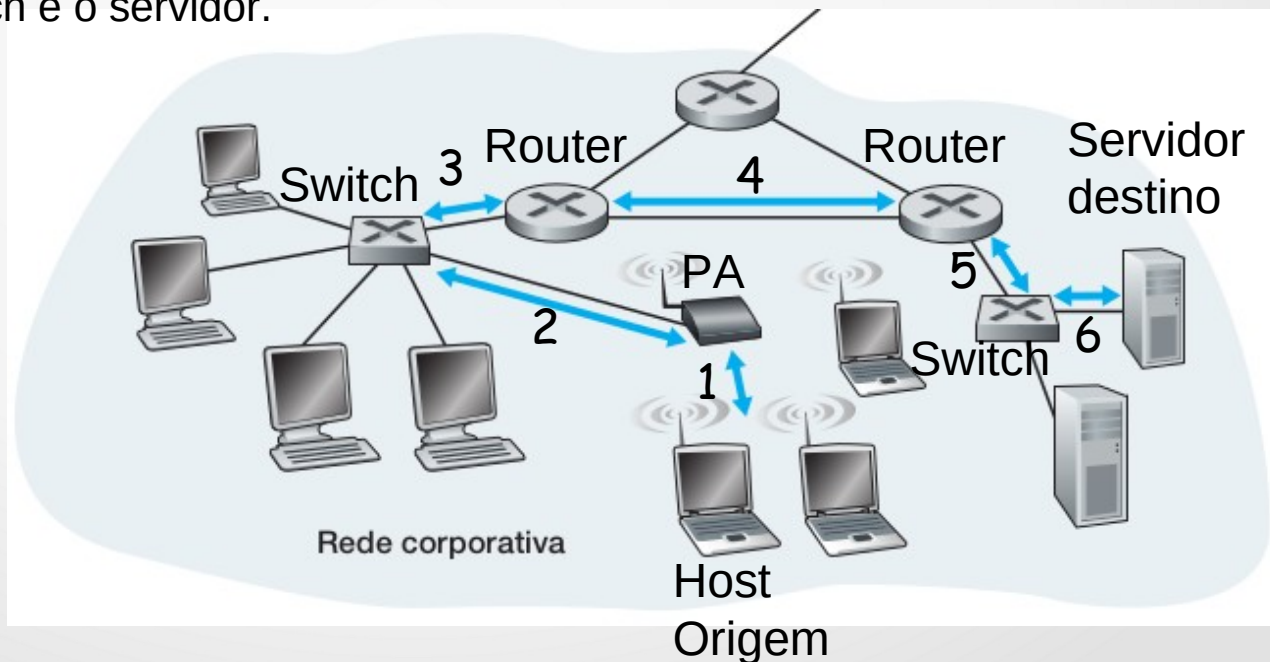
2) Ethernet entre PA e switch;

3) Ethernet entre switch e roteador;

4) Ethernet entre os 2 roteadores

5) Ethernet entre roteador e switch L2;

6) Ethernet entre o switch e o servidor.



Serviços da camada de enlace

- ❑ enquadramento (framing);
- ❑ acesso ao enlace;
- ❑ entrega confiável entre nós adjacentes;
- ❑ detecção de erro;
- ❑ correção de erro;
- ❑ half-duplex e full-duplex;

Serviços da camada de enlace

□ *Enquadramento*

- encapsula o datagrama em um quadro, incluindo cabeçalho.
- formato do quadro depende do protocolo utilizado.

□ *Acesso ao enlace*

- Quando o meio de transmissão é compartilhado usa um protocolo MAC (Medium access control ou controle de acesso ao meio), que define as regras para ter acesso ao canal compartilhado.
- Em redes ponto a ponto sem competição pelo canal, o protocolo MAC é muito simples, ou até inexistente.
- Endereços “MAC” (mac address, ex: endereço ethernet) usados nos cabeçalhos de quadro para identificar origem e destino.

Serviços da camada de enlace

□ *Entrega confiável entre nós adjacentes*

- Serviço que identifica erros e garante a entrega íntegra dos datagramas para a camada de rede.
- Raramente usado em enlace com pouco erro de bit (fibra, coaxial e par trançado), já que traz custo de tempo adicional.
- Aplicado em enlaces com altas taxas de erro, como as redes sem fio, já que corrigir o erro localmente reduz a necessidade de retransmissão, o que poderia aumentar mais os erros.
- Por quê possuir confiabilidade em nível de enlace se já existem a possibilidade de adotar em nível de transporte (fim a fim com o TCP)?

Serviços da camada de enlace

□ *Deteção e correção de erro*

- erros podem ser causados por atenuação de sinal, ruído.
- nó transmissor envia bits de detecção de erros no quadro.
- geralmente a detecção é realizada pelo hardware de enlace.
- receptor detecta presença de erros e pede ao remetente para retransmitir ou descarta quadro
 - Alguns métodos: EDC, Verificação de Paridade, Verificação de Redundância Cíclica
- Adicionalmente à detecção de erro, o receptor pode identificar *e corrigir* os erro(s) de bit sem realizar a retransmissão
- Visa reduzir a retransmissão de modo a reduzir os erros que ocorreriam por colisão

Serviços da camada de enlace

□ *Transmissão half-duplex ou full-duplex*

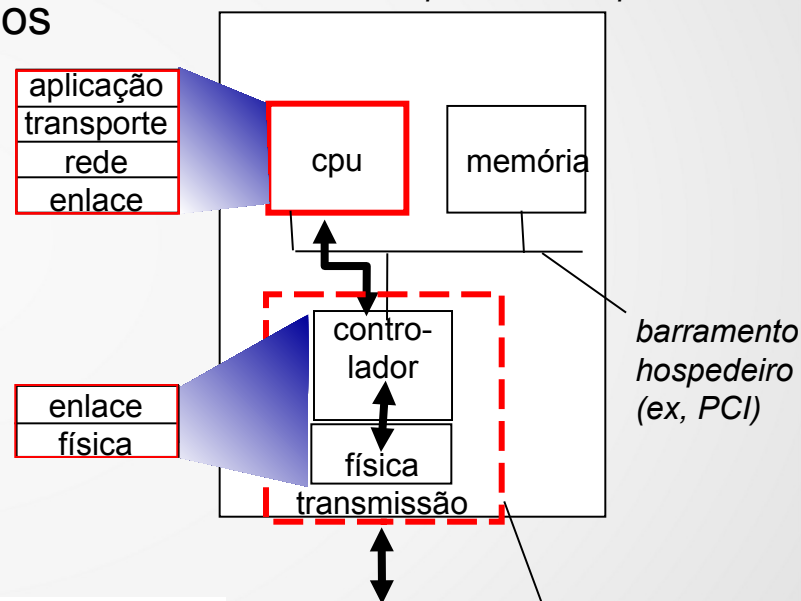
- Em redes de computadores a camada de enlace sempre provê transmissão bidirecional, porém, nem sempre é possível que isso ocorra simultaneamente
- Com **half-duplex** a transmissão é bidirecional, mas não ao mesmo tempo. Um host não recebe quadros enquanto está transmitindo e vice-versa. Isso ocorre em redes sem fio, por exemplo.
- Em **full-duplex**, a transmissão é bidirecional simultaneamente. Em redes com meios guiados que possuem frequências separadas para download e upload, é possível realizar transmissão e recepção ao mesmo tempo.

Onde a camada é implementada?

- É implementada em todos os hosts no “adaptador”
(ou *placa de interface de rede*, NIC)
 - Ex: placa Ethernet e 802.11 (wi-fi)
- Adaptador conecta o meio de transmissão aos barramentos internos do host.
- Combinação de hardware, software, firmware



esquema do hospedeiro



placa adaptadora de rede

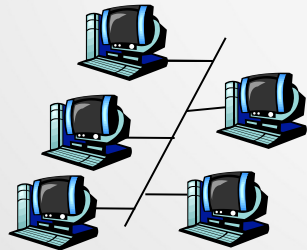
Camada de enlace

- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.3 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.4 Ethernet
- ❑ 5.5 CSMA

Enlaces e protocolos de acesso múltiplo

Dois tipos de “enlaces”:

- ❑ **ponto a ponto**: um único remetente e receptor em cada ponta do enlace
 - PPP (protocolo ponto a ponto) para acesso discado
 - Enlace ponto a ponto entre computador Ethernet (switch) e host
- ❑ **broadcast** (difusão): meio de transmissão compartilhado por vários hosts
 - Ethernet à moda antiga (com hub)
 - LAN sem fio 802.11 (Wi-Fi)
 - Exemplos:



cabo compartilhado (ex:
Ethernet antiga)



RF compartilhada
(ex: WiFi 802.11)



RF compartilhada
(satélite)



humanos em uma festa
(ar e acústica compartilhados)

Protocolos de acesso múltiplo

- ❑ Quando um único canal de difusão é compartilhado e ocorrem duas ou mais transmissões simultâneas, há interferência.
 - Há colisão se o nó recebe dois ou mais sinais ao mesmo tempo
- ❑ Protocolo de acesso múltiplo é um algoritmo que determina como os nós compartilham o canal, ou seja, quando cada nó pode transmitir.
- ❑ Comunicação sobre compartilhamento utiliza o próprio canal!
 - Não há canal fora-de-banda para coordenação!
- ❑ Chamado de Protocolo MAC (Medium Access Control)
- ❑ 3 principais tipos:
 - Divisão de Canal, Acesso Aleatório e Revezamento.

Protocolos MAC: Divisão de Canal

□ Divisão de canal

- divide o canal em “pedaços menores” e aloca um pedaço ao nó para uso exclusivo:
 - Multiplexação por divisão de tempo - TDM (Time division multiplexing);
 - Multiplexação por divisão de frequência - FDM (Frequency division multiplexing);
 - Acesso múltiplo por divisão de código - CDMA (Code division multiple access).
- Pode ser ineficiente com baixa carga, pois os recursos dos nós que não estão transmitindo são subutilizados

Protocolos MAC: 3 categorias principais

□ Divisão de canal

- divide o canal em “pedaços menores” e aloca um pedaço ao nó para uso exclusivo:
 - Multiplexação por divisão de tempo - TDM (Time division multiplexing);
 - Multiplexação por divisão de frequência - FDM (Frequency division multiplexing);
 - Acesso múltiplo por divisão de código - CDMA (Code division multiple access).
- Pode ser ineficiente com baixa carga (meios ficam subutilizados)

□ Acesso aleatório

- O canal não é “dividido em pedaços” e, portanto, permite colisões
- Deve ter um mecanismo para “recuperação” de colisões

□ Revezamento

- os nós se revezam
- nós com mais a enviar podem receber mais tempo

Protocolos MAC: Acesso Aleatório

- ❑ Não há divisão do canal, quando apenas um nó tem dados a enviar:
 - Transmite na velocidade de dados total do canal.
 - Sem coordenação *a priori* entre os nós
- ❑ Se há 2 ou mais nós transmitindo simultaneamente ocorrerá “colisão”, e deverá haver a retransmissão
- ❑ **Protocolo MAC de acesso aleatório** especifica:
 - como detectar colisões
 - como recuperar-se de colisões (ex: retransmissões adiadas)
- ❑ Exemplos de protocolos MAC de acesso aleatório:
 - ALOHA, slotted ALOHA
 - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

Protocolos MAC: Revezamento

- Em protocolos de revezamento, os hosts são organizados para utilizar alternadamente o meio de transmissão. 2 tipos se destacam.
- **Polling (seleção):** aplicado por ex no Bluetooth (IEEE 802.15):
 - Define um dos hosts como o “nó mestre” (que se falhar, tornará o canal inoperante até a seleção de outro mestre)
 - Mestre seleciona os outros hosts por alternância circular e notifica o direito de transmitir. O tempo de seleção gera um atraso que torna o canal ocioso.
- **Passagem de permissão:** usado em redes Token-Ring (IEEE802.5) e FDDI (Fiber Distributed Data Interface).
 - Não há um nó mestre. Um quadro específico (token) serve de permissão e é passado de um nó para o próximo sequencialmente.
 - Se o nó precisa transmitir, retém o token e transmite, repassando a seguir o token. Senão precisa transmitir, repassa imediatamente.
 - Preocupações: sobrecarga da permissão e a latência, especialmente quando nós tem que esperar grandes transmissões de outros nós.

Camada de enlace

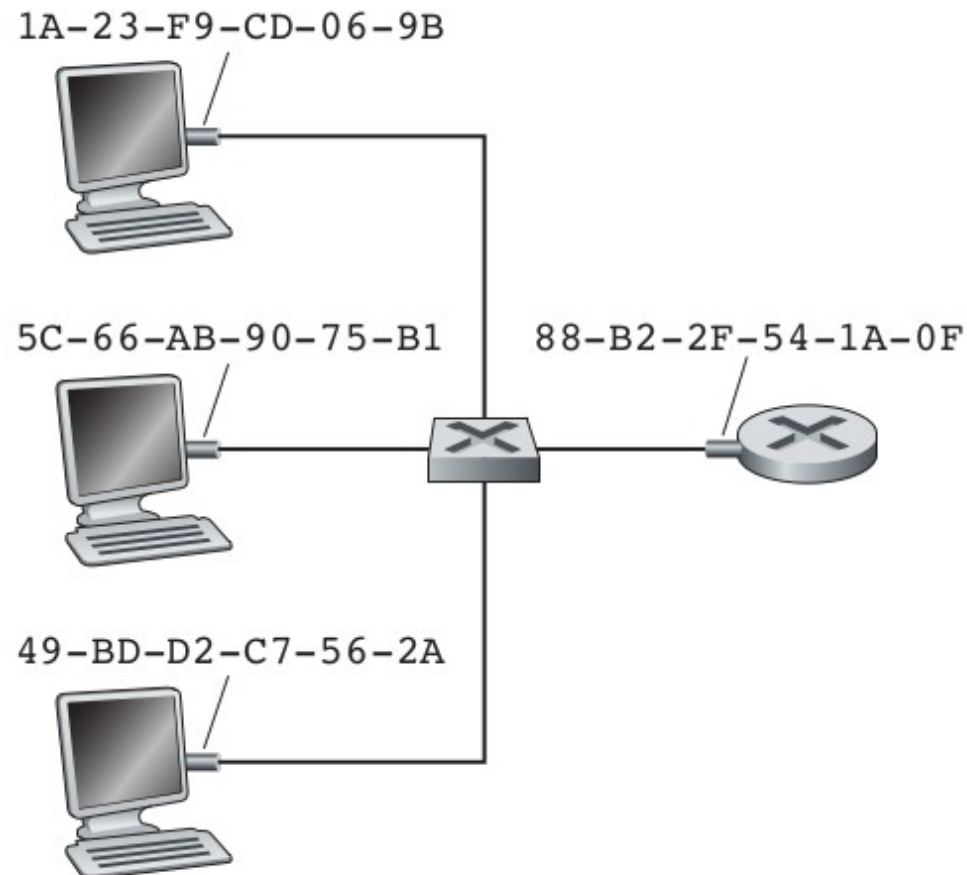
- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.3 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.4 Ethernet
- ❑ 5.5 CSMA

Endereços de LAN

- ❑ Endereço IP da camada de rede possui 32bits ou 128bits.
 - endereço utilizado para obter datagrama até sub-rede IP de destino
- ❑ Endereço MAC (LAN, físico ou Ethernet) :
 - função: *levar quadro de uma interface para outra interface conectada fisicamente (na mesma rede)*
 - Endereço MAC de 48 bits representados em 12 números hexadecimais. Gravado na ROM da placa de rede, às vezes configurável por software
 - A alocação de endereços MAC é administrada pelo IEEE
 - Fabricante tem que adquirir parte do espaço de endereços MAC
- ❑ Analogia: MAC é como o CPF; IP como o endereço postal
 - MAC tem portabilidade e não se altera ao mudar de uma LAN para outra
 - endereço IP não é portátil, e é vinculado à sub-rede IP em que o nó está conectado no momento.

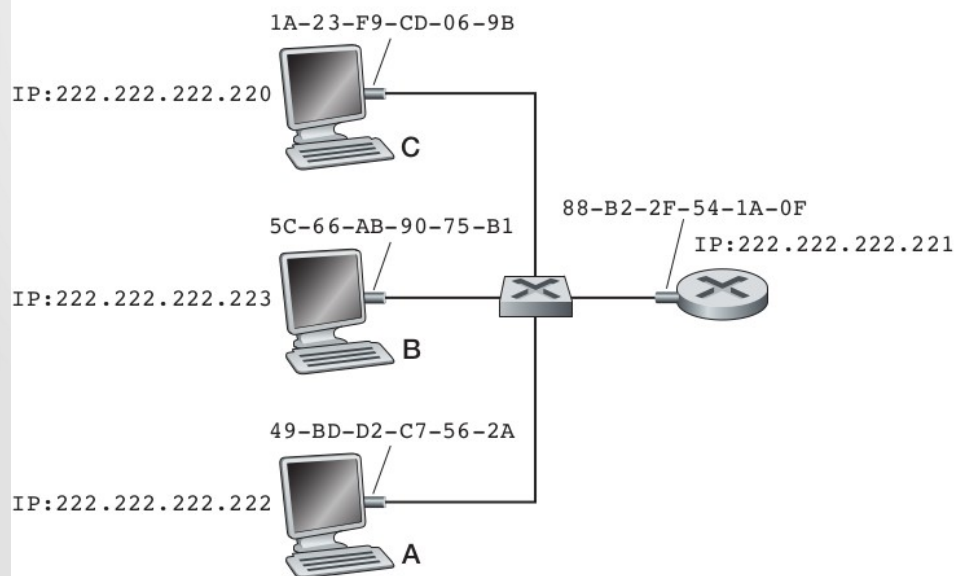
Endereços de LAN e ARP

CADA INTERFACE CONECTADA À LAN TEM UM ENDEREÇO MAC EXCLUSIVO



ARP: Address Resolution Protocol

Como determinar endereço
MAC de B sabendo o
endereço IP de B?



- ❑ Cada nó IP na LAN tem uma tabela **ARP**
- ❑ Tabela ARP: mapeamentos de endereço IP/MAC para alguns nós da LAN

<endereço IP; endereço MAC; TTL>

- TTL (Time To Live): tempo após o qual o mapeamento de endereço será esquecido

Ex de tabela ARP para o host C:

Endereço IP	Endereço MAC	TTL
222.222.222.221	88-B2-2F-54-1A-0F	13:45:00
222.222.222.223	5C-66-AB-90-75-B1	13:52:00

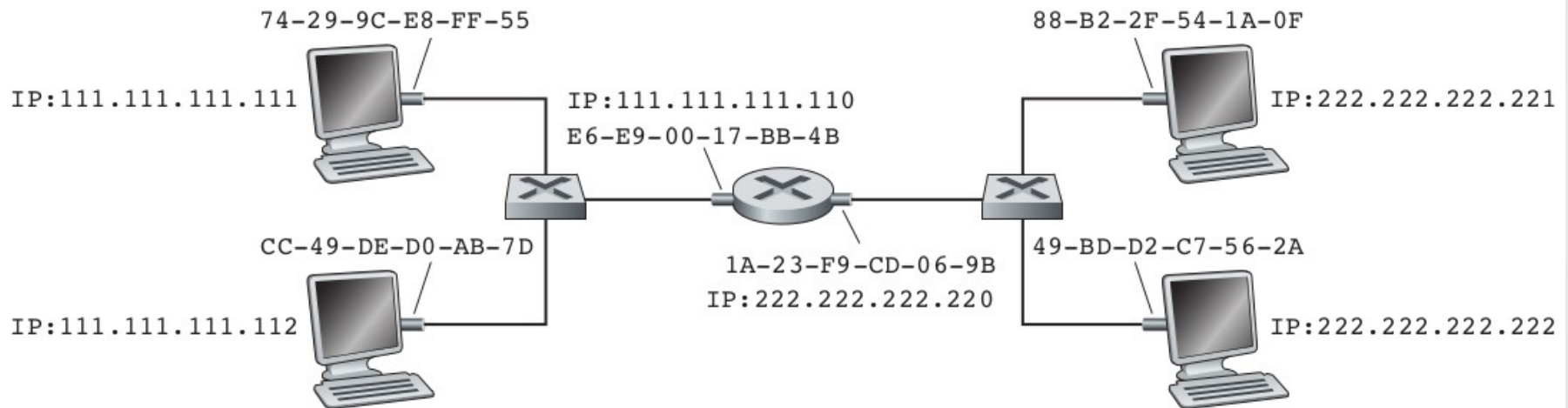
Protocolo ARP: mesma LAN (rede)

- ❑ A enviará datagrama a B, e endereço MAC de B não está na tabela ARP de A.
- ❑ A envia por **broadcast** pacote de consulta ARP, contendo endereço IP de B
 - endereço MAC de destino = FF-FF-FF-FF-FF-FF
 - todas as máquinas na LAN recebem consulta ARP
- ❑ B recebe pacote ARP, responde para A com seu endereço MAC (de B)
 - quadro enviado ao endereço MAC de A
- ❑ A salva em cache par de endereços IP-para-MAC em sua tabela ARP até a informação expirar (desaparecerá da tabela se não for renovada)
- ❑ ARP é “plug-and-play”: nós criam suas tabelas ARP *sem intervenção do administrador de rede*

Endereçamento: roteando p/ outra LAN

acompanhamento: **enviar datagrama de A para B via R**

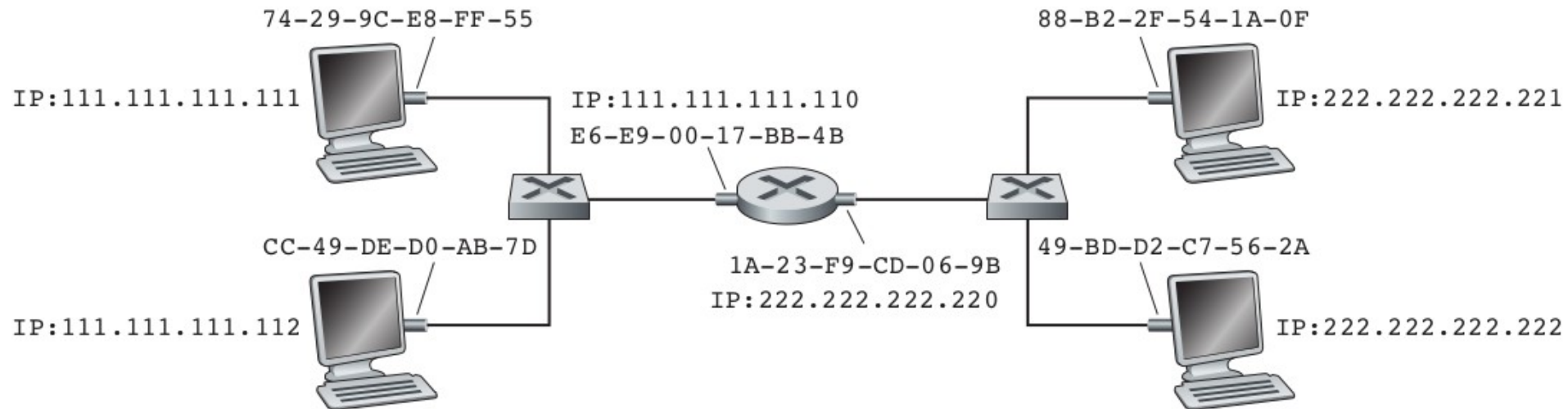
supondo que A saiba o endereço IP de B



- duas tabelas ARP no roteador, uma para cada rede IP (LAN)

Exemplo: Sequência na prática

- ❑ A cria datagrama IP com origem A, destino B
- ❑ A usa ARP para obter endereço MAC de R para 111.111.111.110
- ❑ A cria quadro da camada de enlace com endereço MAC de R como destino, quadro contém datagrama IP A-para-B
- ❑ NIC de A envia quadro
- ❑ NIC de R recebe quadro
- ❑ R remove datagrama IP do quadro Ethernet, vê que o seu destino B
- ❑ R usa ARP para obter endereço MAC de B
- ❑ R cria quadro contendo datagrama IP A-para-B e envia para B

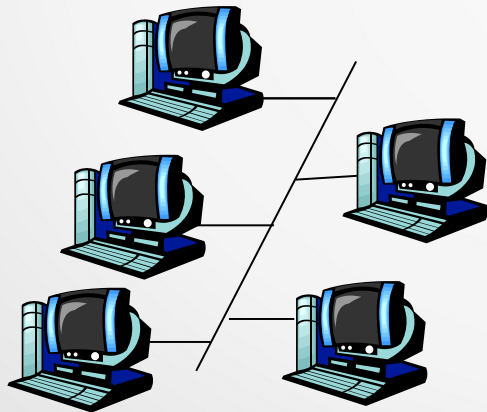


Camada de enlace

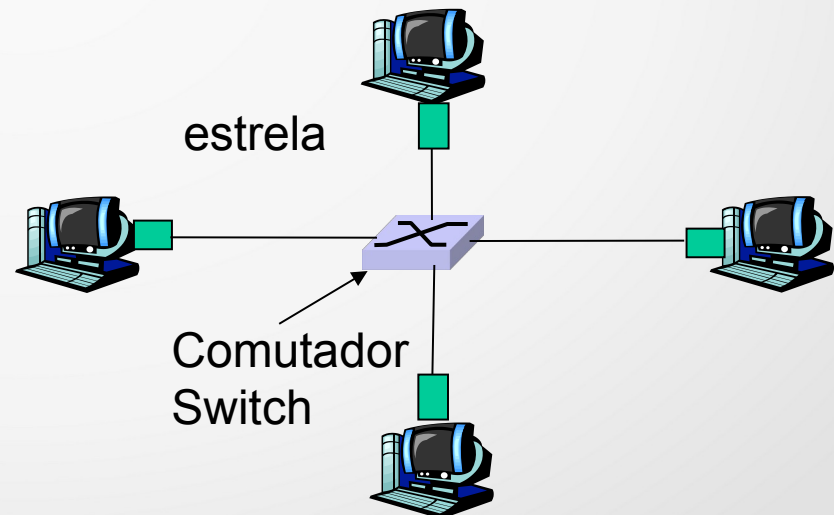
- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.3 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.4 Ethernet
- ❑ 5.5 CSMA

Topologia física

- topologia barramento era popular até os anos 90
 - todos os nós no mesmo domínio de colisão (podem colidir uns com os outros)
- hoje: topologia de estrela prevalece
 - **comutador** ativo no centro
 - cada “ponta” roda um protocolo Ethernet (separado) – nós não colidem uns com os outros



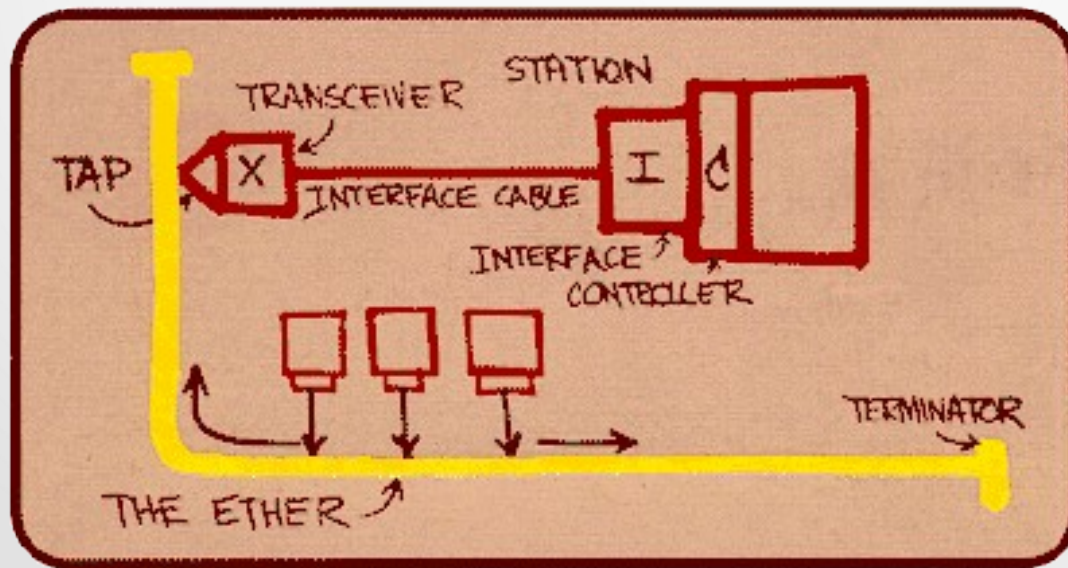
barramento: cabo coaxial



Ethernet

Tecnologia “dominante” de LAN com fio.

- ❑ mais simples e barata que LANs com Token e ATM (NIC +-R\$40)
- ❑ primeira tecnologia de LAN utilizada em larga escala
- ❑ acompanhou corrida da velocidade: desde 2Mbps até 800Gbps (IEEE 802.3df-2024). Previsto atingir 1,6Tbps (IEEE 802.3dj) em 2026.



Projeto original da Ethernet de Metcalfe

Ethernet: não confiável, sem conexão

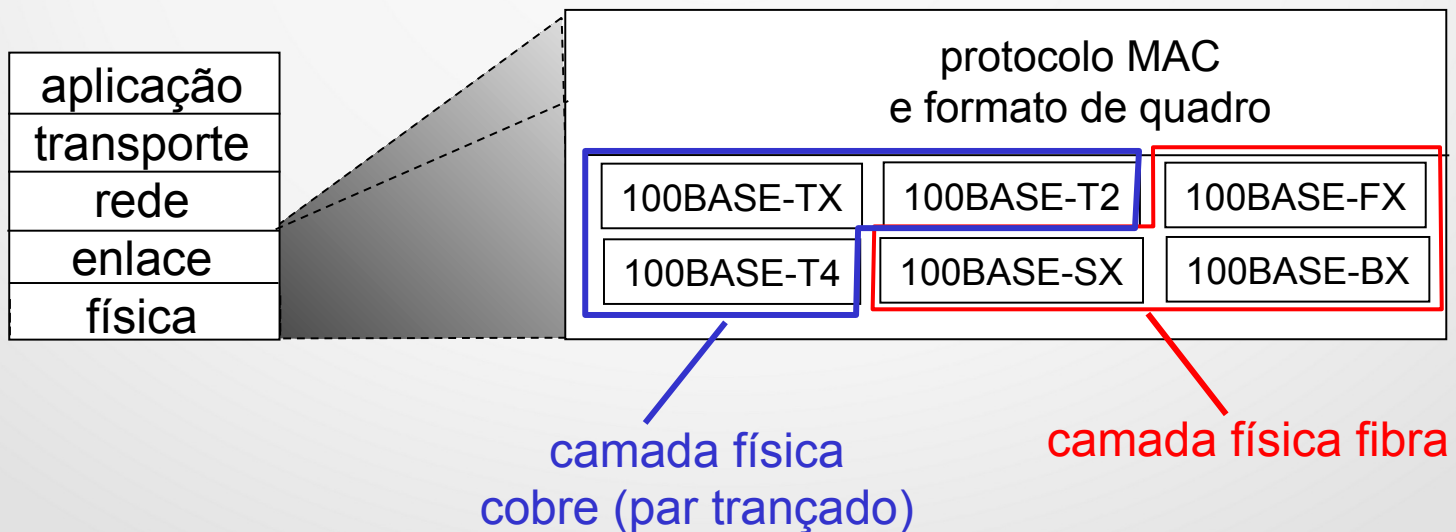
- ❑ **sem conexão:** sem apresentação entre NICs de origem e destino
- ❑ **não confiável:** NIC de destino não envia confirmações ou não confirmações à NIC de origem
 - fluxo de datagramas passados à camada de rede pode ter lacunas (datagramas faltando)
 - lacunas serão preenchidas se aplicação estiver usando TCP, caso contrário, aplicação verá lacunas
- ❑ Protocolo MAC da Ethernet: **CSMA/CD**

Estrutura do quadro Ethernet

Preâmbulo 8 bytes	Endereço MAC de Destino 6 bytes	Endereço MAC de Origem 6 bytes	Tipo 2 bytes	Dados 46 a 1500 bytes	CRC 4 bytes
Desperta o receptor e sincroniza os clock rates			Identifica o protocolo da camada de rede	Carrega o datagrama. Preenche com bits se for menor que 46bytes	Verificação de erros

Padrões Ethernet 802.3: camadas de enlace e física

- *muitos* padrões Ethernet diferentes
 - protocolo MAC e formato de quadro comuns
 - diferentes velocidades: de 2Mbps até 800Gbps.
 - diferentes meios da camada física: fibra, par trançado, coaxial.



Camada de enlace

- ❑ 5.1 Introdução e serviços
- ❑ 5.2 Protocolos de acesso múltiplo
- ❑ 5.3 Endereçamento na camada de enlace
- ❑ 5.4 Ethernet
- ❑ 5.5 CSMA

CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

CSMA: opera no esquema “ouça antes de falar”:

- Se perceber que o canal está ocioso: transmite quadro inteiro
- Se perceber canal ocupado, adia transmissão
- ❑ Analogia humana: não interrompa os outros!
- ❑ Colisões ainda podem ocorrer se 2 ou mais nós verificarem que o canal está livre e iniciarem as transmissões simultaneamente
- ❑ Principais utilizações:
 - CSMA/CD em redes Ethernet – CSMA com detecção de colisão
 - CSMA/CA em redes 802.11 – CSMA com prevenção de colisão

CSMA/CD (Collision Detection)

CSMA/CD: detecção de portadora, adiada como no CSMA, com um mecanismo para detecção de colisão mais eficiente.

- Colisões detectadas mais rapidamente e, quando identificadas, a transmissão é abortada, o que reduz desperdício do canal
- Após colisão, os hosts aguardam um tempo aleatório para retransmitir.

□ detecção de colisão:

- fácil em LANs com fio: mede intensidades de sinal, compara sinais transmitidos e recebidos
- difícil nas LANs sem fio: receptor pode ficar desligado enquanto transmitindo

CSMA/CA (Collision Avoidance)

- ❑ **CSMA/CA** - Acesso múltiplo com verificação de portadora e prevenção de colisão.
- ❑ Apresenta um grau de ordenação maior que o CSMA/CD e é adotado em redes wireless para reduzir a ocorrência de colisões, que são detectadas pelo aumento do sinal de radiofrequência no meio.
- ❑ Antes de iniciar a transmissão, o host avisa que irá iniciar, bem como o tempo estimado.
 - Para isso utiliza pacotes RTS (Request To Send).
 - Outros hosts respondem com um pacote CTS (Clear To Send).
- ❑ Os outros hosts, cientes da transmissão, não irão tentar enviar evitando a verificação do sinal.
 - Isso auxilia também na economia de energia.

Capítulo 6

Camada de enlace e redes locais

Adaptado do material oficial do livro Redes de Computadores e a Internet. 8ª Ed.

J. F Kurose e K. W. Ross, Todos os direitos reservados

