

# Capítulo 5 Camada de enlace e redes locais

## Nota sobre o uso destes slides ppt:

Estamos disponibilizando estes slides gratuitamente a todos (professores, alunos, leitores). Eles estão em formato do PowerPoint para que você possa incluir, modificar e excluir slides (incluindo este) e o conteúdo do slide, de acordo com suas necessidades. Eles obviamente representam muito trabalho da nossa parte. Em retorno pelo uso, pedimos apenas o seguinte:

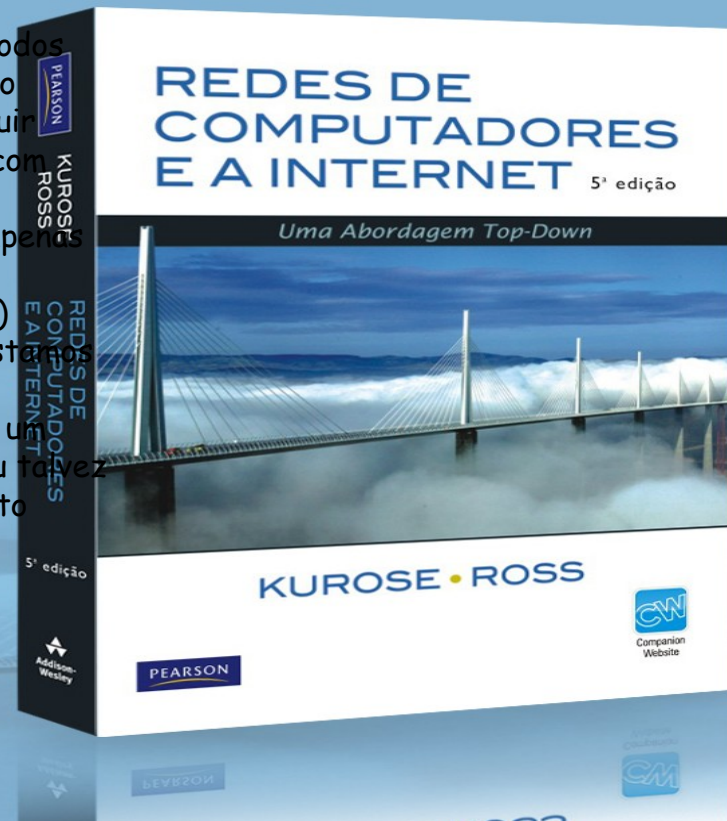
Se você usar estes slides (por exemplo, em sala de aula) sem muita alteração, que mencione sua fonte (afinal, gostamos que as pessoas usem nosso livro!).

Se você postar quaisquer slides sem muita alteração em um site Web, que informe que eles foram adaptados dos (ou talvez idênticos aos) nossos slides, e inclua nossa nota de direitos autorais desse material.

Obrigado e divirta-se! JFK/KWR

Todo o material copyright 1996-2009

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

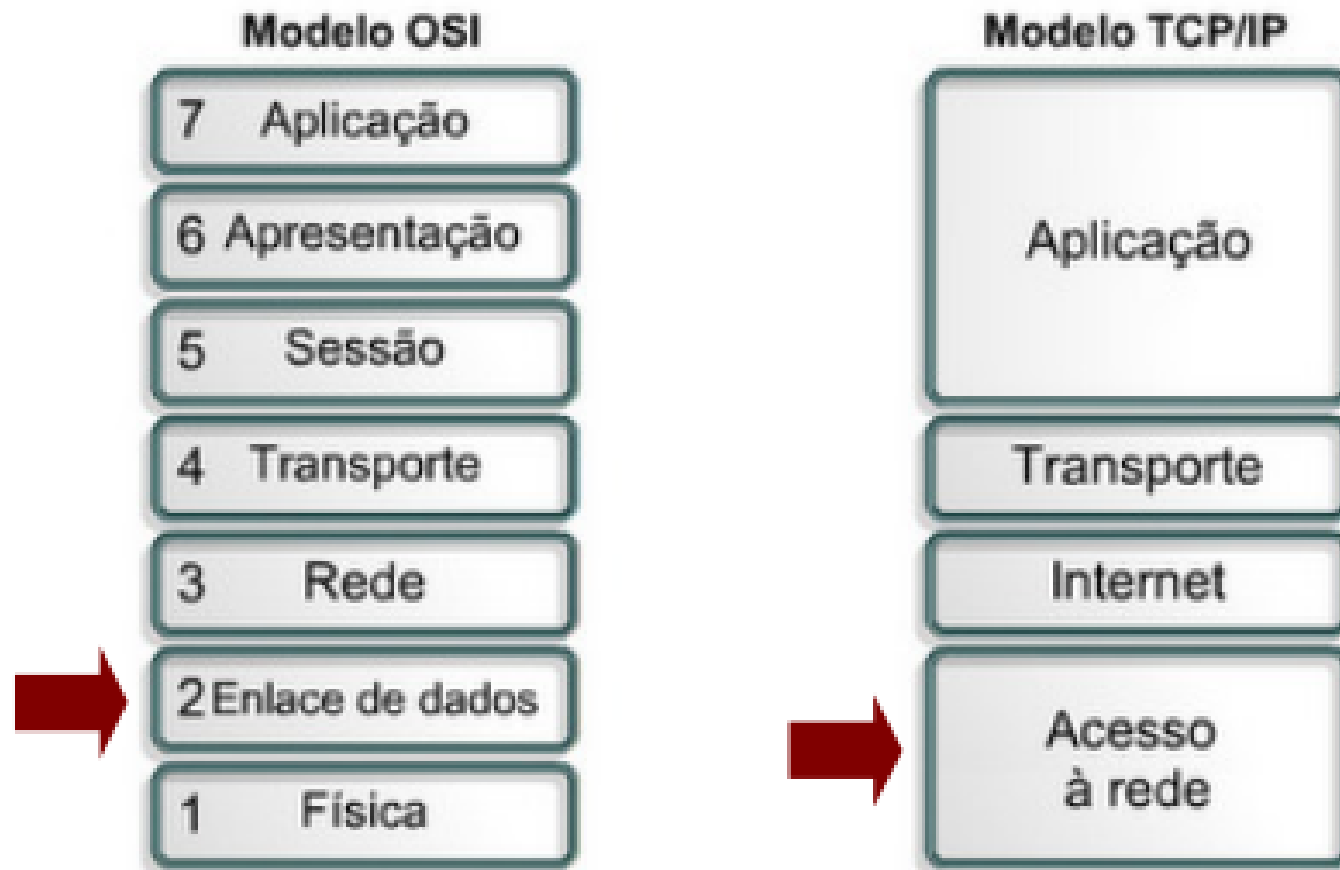


# Camada de enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Protocolos de acesso múltiplo
- 5.3 Endereçamento na camada de enlace
- 5.4 802.11
- 5.4 Ethernet (802.3)
- 5.5 Um dia na vida de uma solicitação de página Web



# Camada de Enlace

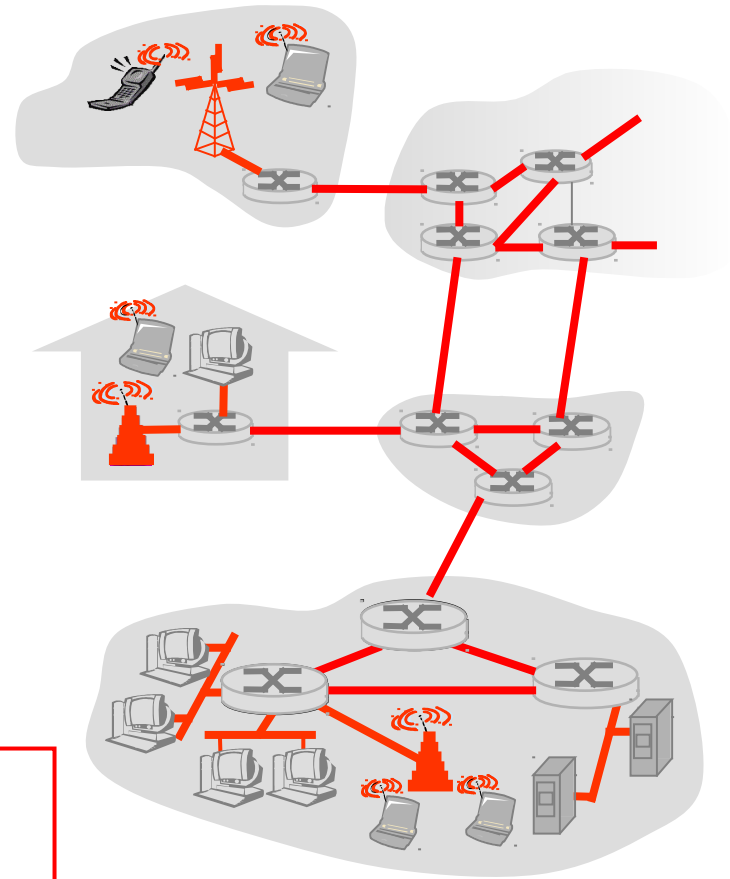


# Camada de enlace: introdução

## Alguma terminologia:

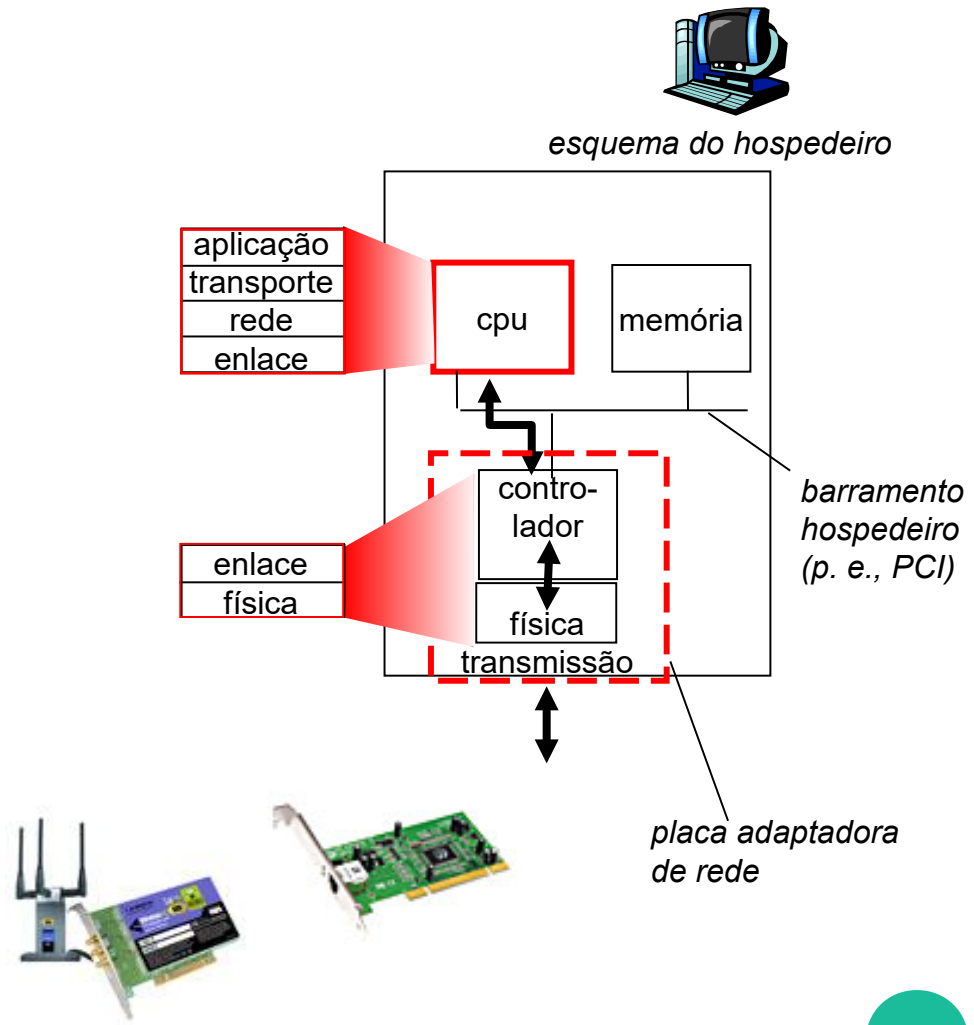
- hospedeiros e roteadores são **nós**
- canais de comunicação que se conectam a nós adjacentes pelo caminho de comunicação são **enlaces**
  - enlaces com fio
  - enlaces sem fio
  - LANs
- pacote na camada-2 é um **quadro**, encapsula datagrama

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

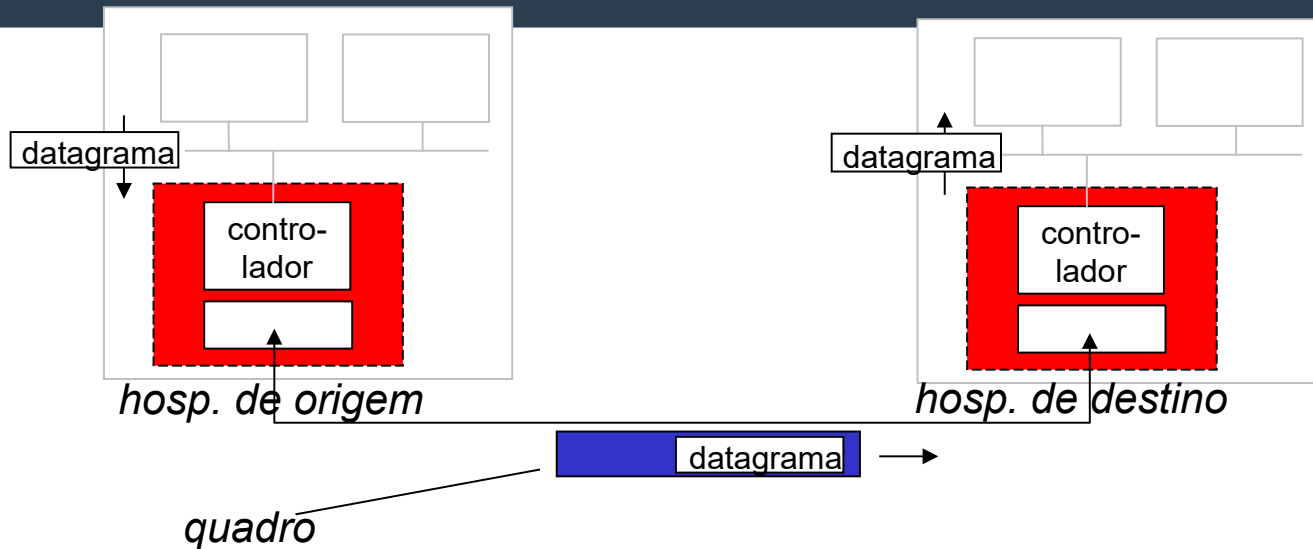


# Onde é implementada a camada de enlace?

- 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, 802.3
  - implementa camada de enlace, física
- conecta aos barramentos de sistema do hospedeiro
- combinação de hardware, software, firmware



# Comunicação entre adaptadores



- **lado emissor:**

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

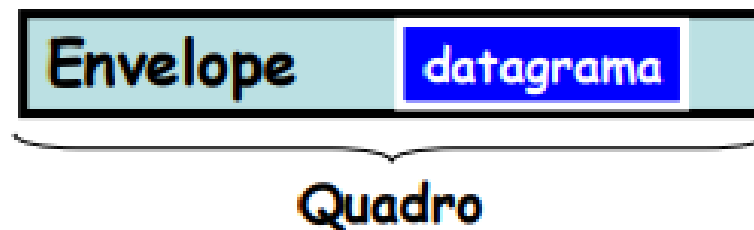
- **lado receptor**

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



# Camada de Enlace

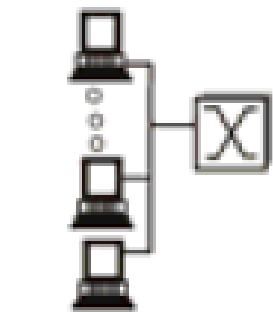
- Presta serviço para a camada de rede
  - **Serviço básico:** Prover comunicação eficiente e confiável de unidades de informação entre dois nós adjacentes
    - **Unidade de informação:** Pacote de camada de enlace, também chamado de quadro (*frame*)
      - Quadros encapsulam datagramas da camada de rede
    - **Nós adjacentes:** Nós conectados fisicamente por um canal de comunicação, também chamado de enlace
      - Enlace entrega bits ao destinatário na mesma ordem de envio



# Enlaces de Acceso Múltiplo e Protocolos

tipos de enlaces:

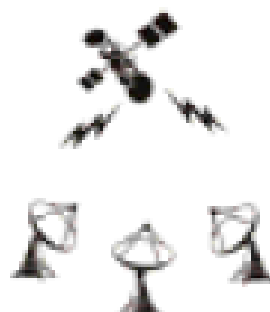
- ❑ ponto-a-ponto (fio único, ex. PPP, SLIP)
- ❑ **broadcast** (fio ou meio compartilhado; ex, Ethernet, Wavelan, etc.)



shared wire  
(e.g. Ethernet)



shared wireless  
(e.g. Wavelan)



satellite





# Enlaces de Acceso Múltiplo e Protocolos

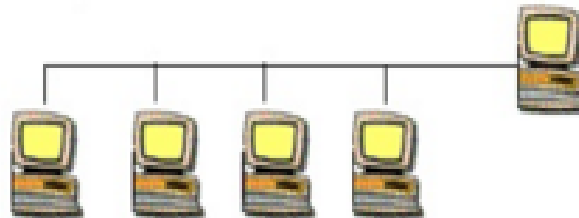
## Enlace Ponto-a-Ponto

- ⇒ Enlace direto
- ⇒ Somente 2 dispositivos compartilham o enlace



## Enlace Multiponto

- ⇒ Mais de dois dispositivos compartilham o enlace



# Endereçamento MAC e ARP

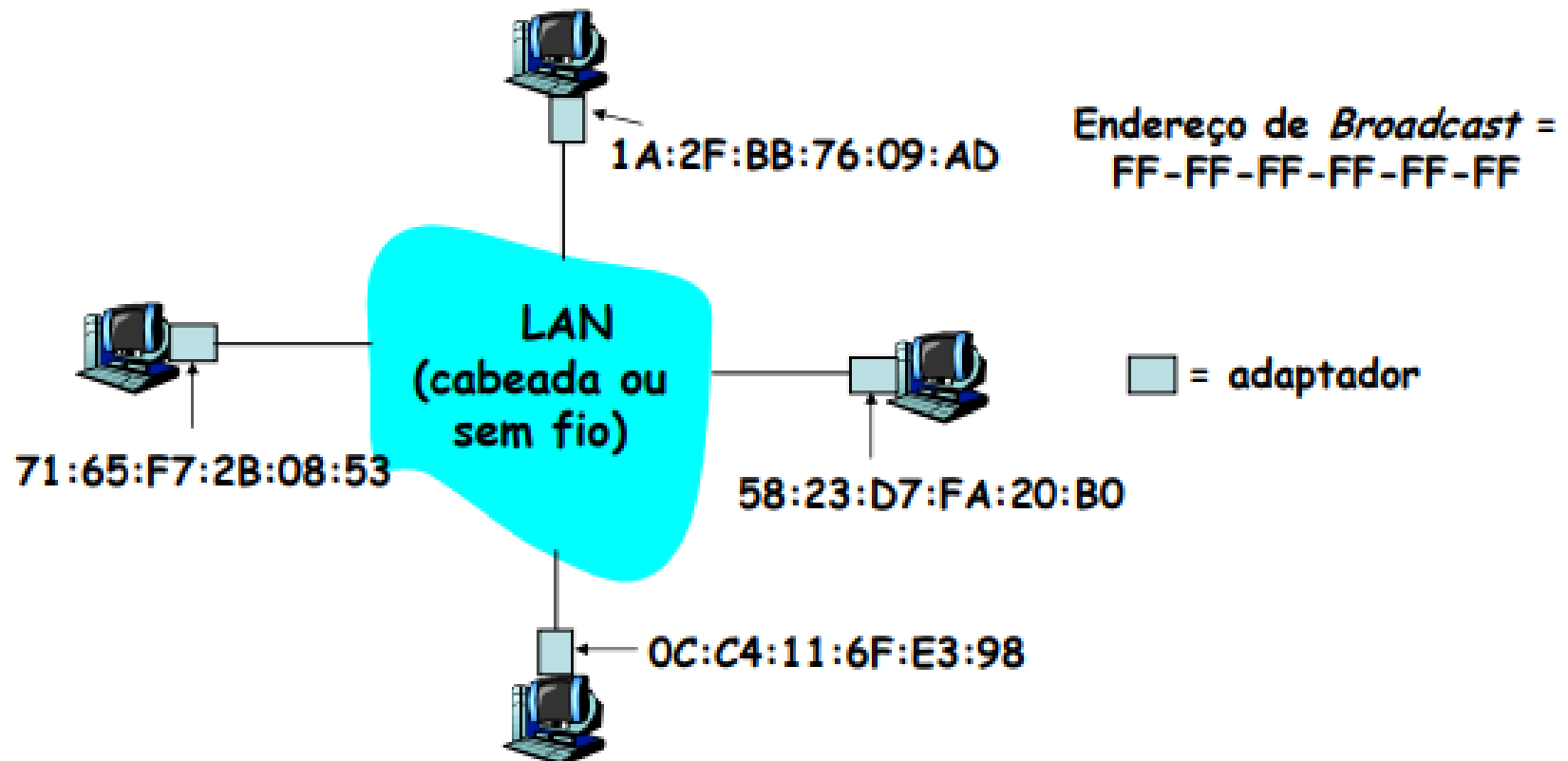
## Endereço MAC (ou LAN ou físico ou Ethernet) : 48 bits

- função: *levar quadro de uma interface para outra interface conectada fisicamente (na mesma rede)*
- Endereço MAC de 48 bits (para maioria das LANs)
  - Representados por 12 dígitos hexadecimais agrupados 2 a 2 (Ex.: 1A:2F:BB:76:09:AD)
  - queimado na ROM da NIC, às vezes também configurável por software



# Endereçamento MAC e ARP

Cada adaptador na LAN possui um **endereço MAC único**



# Ferramentas:

getmac

arp -a



# ARP: Address Resolution Protocol

Protocolo de resolução de endereços (*Address Resolution Protocol*), RFC 826

- Faz a tradução de endereços IP para endereços MAC da maioria das redes IEEE 802
- Cada nó (estação ou roteador) possui uma tabela ARP
  - Contém endereço IP, endereço MAC e TTL
- ARP é "plug-and-play":
  - nós criam suas tabelas ARP *sem intervenção do administrador de rede*



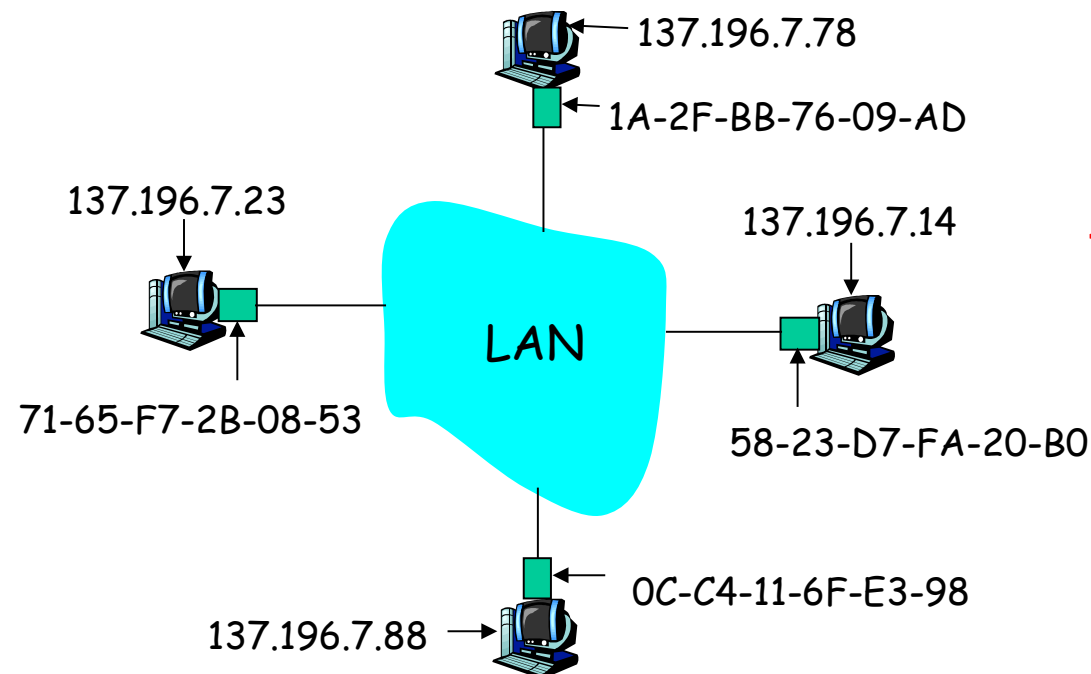
# ARP: Address Resolution Protocol

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

- Cada nó IP (hosp., roteador) na LAN tem tabela **ARP**
- Tabela ARP: mapeamentos de endereço IP/MAC para alguns nós da LAN

**<endereço IP; endereço MAC; TTL>**

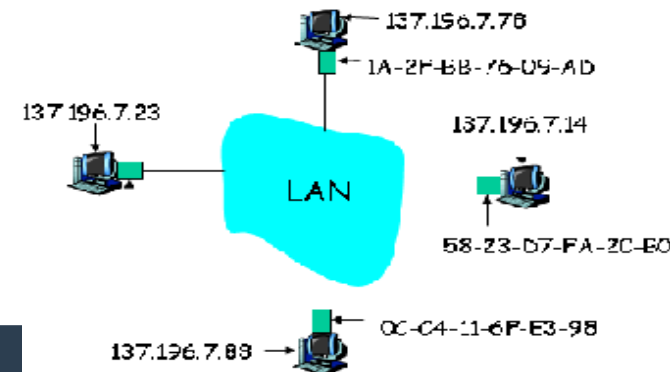
- TTL (Time To Live): tempo após o qual o mapeamento de endereço será esquecido (normalmente, 20 min)



# Funcionamento do ARP na Mesma Rede

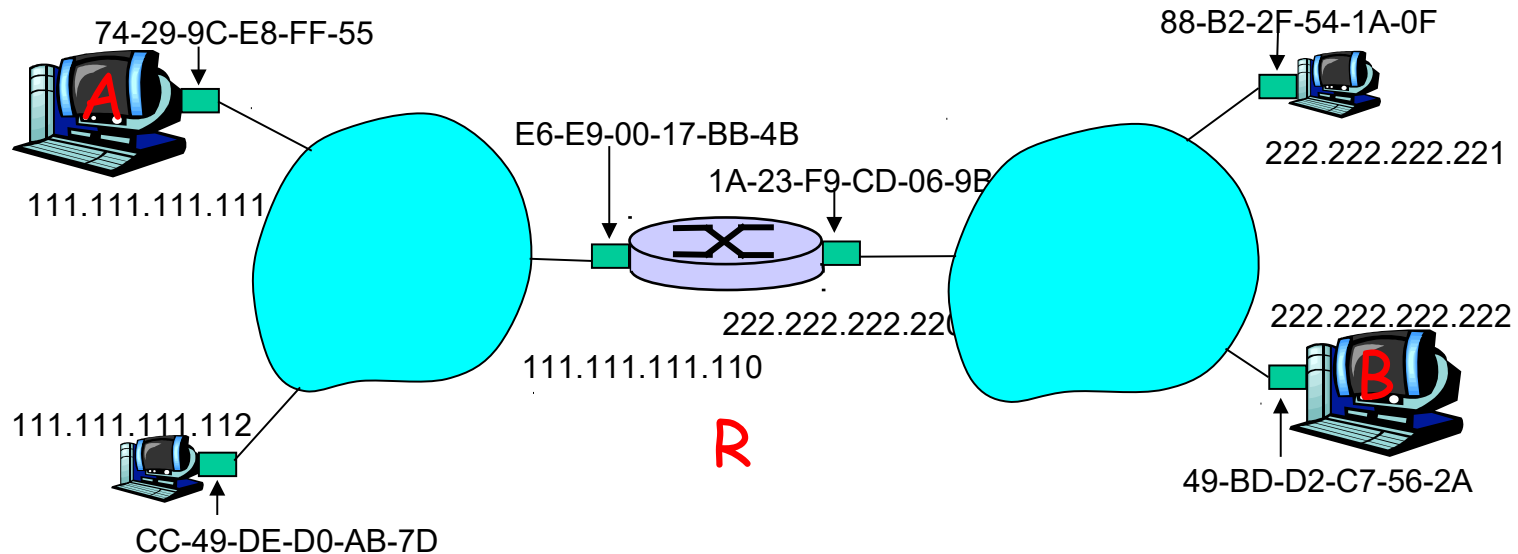
**A** deseja enviar datagrama para **B**, mas o endereço MAC de **B** **não** está na tabela ARP...

- Para descobrir o endereço MAC de **B**, **A** **difunde** um pacote de solicitação ARP com o endereço IP de **B**
  - Endereço MAC destino = FF-FF-FF-FF-FF-FF
  - Todas as máquinas na LAN recebem a consulta do ARP
- **B** **então** recebe o pacote ARP com a solicitação e responde a **A** com o seu endereço MAC
  - Quadro de resposta é enviado para o endereço MAC (unicast) de **A**



# Funcionamento entre Redes Diferentes

Envio de datagrama de **A** para **B** através de **R**



O Roteador **R** possui duas tabelas ARP

- Uma para cada rede local

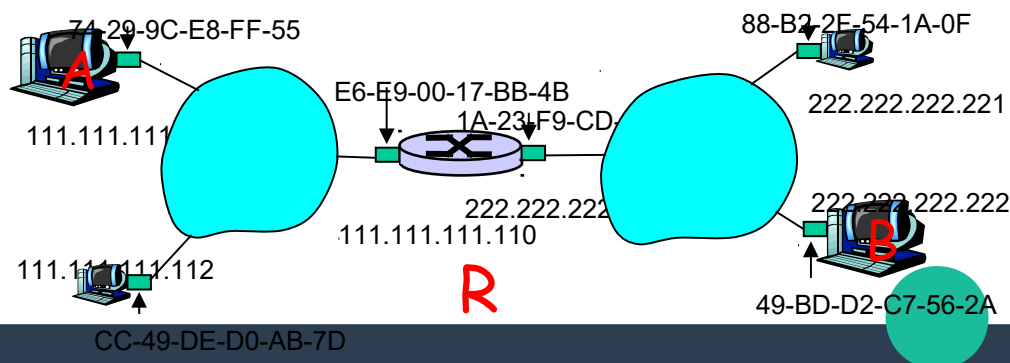




# Funcionamento entre Redes Diferentes

**A** cria o datagrama com endereço IP de fonte **A** e de destino **B**

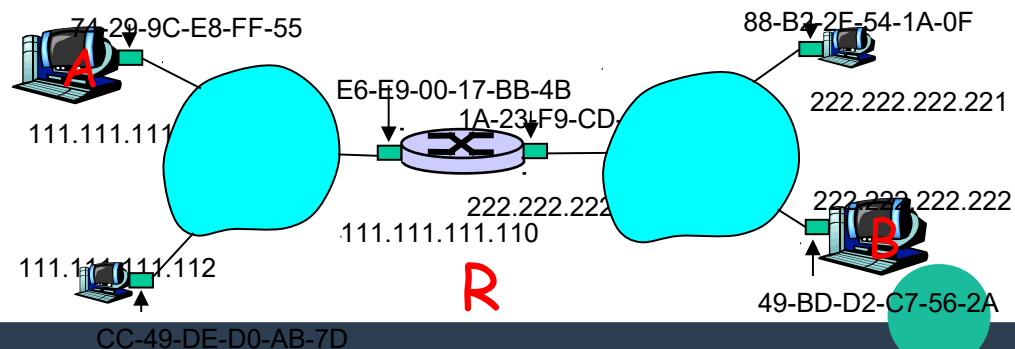
- **A** consulta a tabela de roteamento e obtêm **R** como próximo salto
- **A** usa o ARP para obter o endereço MAC de **R**
- **A** cria um quadro com endereço MAC de destino **R** e o datagrama de **A** para **B** na carga útil
- Adaptador de **A** envia o quadro para **R**
- Adaptador de **R** recebe o quadro



# Funcionamento entre Redes Diferentes

**R** remove o datagrama IP do quadro Ethernet e verifica que é destinado a **B**

- **R** consulta a tabela de roteamento
- **R** usa o ARP para obter o endereço MAC de **B**
- **R** cria o quadro contendo o datagrama de **A** para **B**
- Adaptador de **R** envia o quadro para **B**
- Adaptador de **B** recebe o quadro



# 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



# CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

CSMA: ouça antes de falar:

se perceber canal ocioso: transmite quadro inteiro

- se perceber canal ocupado, adia transmissão
- Inicia um temporizador para uma nova tentativa
- analogia humana: não interrompa os outros!

<https://www.youtube.com/watch?v=IAKncL67Pp4>



# CSMA (Carrier Sense Multiple Access)



# CSMA (Carrier Sense Multiple Access)



# CSMA (Carrier Sense Multiple Access)



# Colisões CSMA

*colisões ainda podem ocorrer:*

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

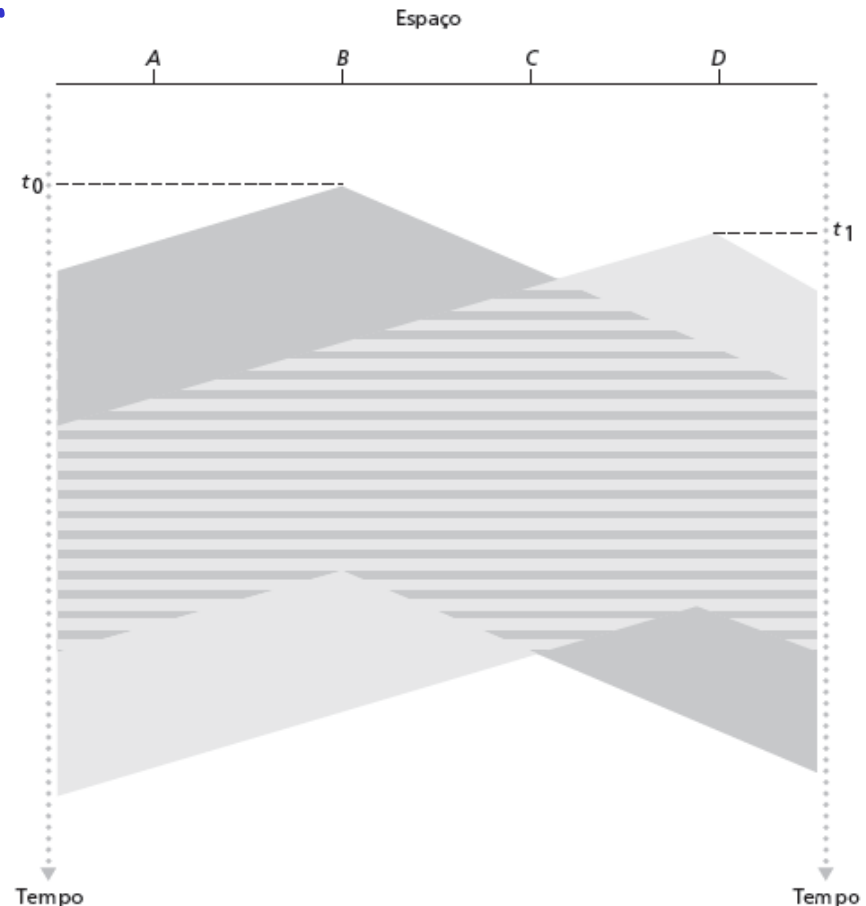
*colisão:*

tempo de transmissão de pacote inteiro desperdiçado

*nota:*

papel da distância & atraso de propagação determinando probabilidade de colisão

layout espacial dos nós





# CSMA/CD (Collision Detection)

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

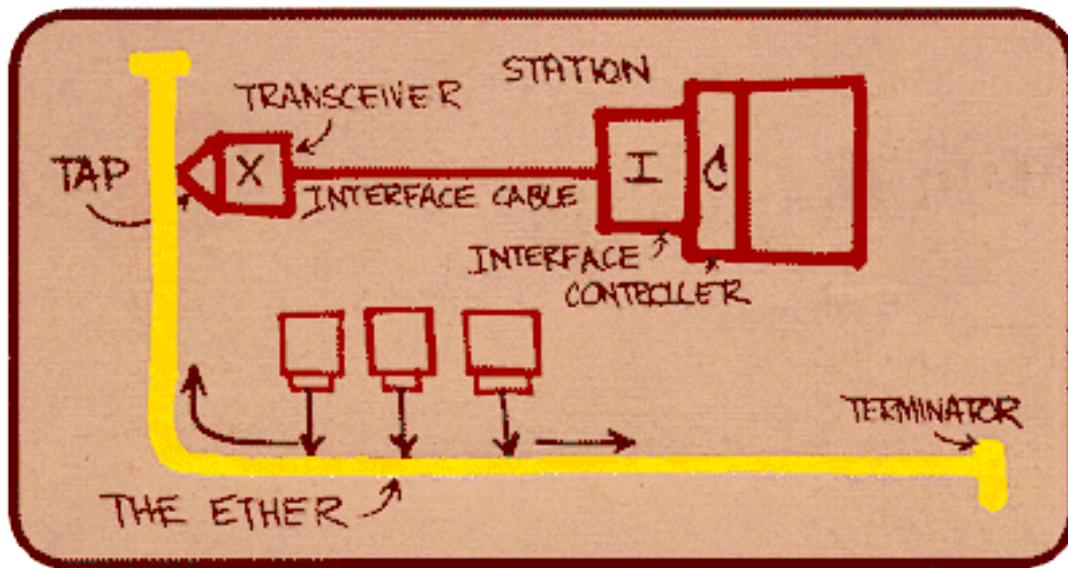
- colisões *detectadas* dentro de pouco tempo
- transmissões colidindo abortadas, reduzindo desperdício do canal
- **detecção de colisão (802.3):**
  - fácil em LANs com fio: mede intensidades de sinal, compara sinais transmitidos, recebidos
  - difícil nas LANs sem fio: intensidade do sinal recebido abafada pela intensidade da transmissão local
- **analogia humana: o interlocutor educado**



# Ethernet

## Tecnologia de LAN com fio “dominante”:

- barata: US\$ 20 para NIC
- primeira tecnologia de LAN utilizada em larga escala
- mais simples e mais barata que as LANs de permissão e ATM
- acompanhou corrida da velocidade: 10 Mbps – 10 Gbps



Projeto original da Ethernet de Robert Metcalfe e David Boggs



# Lei de Metcalfe

Lei de Metcalfe é uma lei formulada pelo estadunidense Robert Metcalfe. A lei trata do valor de sistemas de comunicação.

Seu enunciado é o seguinte:

O valor de um sistema de comunicação cresce na razão do quadrado do número de usuários do sistema; Isso pode ser traduzido matematicamente como:

$$\frac{n(n - 1)}{2}$$

## Prêmios

Grace Murray Hopper (1980), Medalha Alexander Graham Bell IEEE (1988), Medalha de Honra IEEE (1996), Medalha Nacional de Tecnologia e Inovação (2003), National Inventors Hall of Fame (2007), Internet Hall of Fame (2013)



# Algoritmo CSMA/CD da Ethernet

1. NIC recebe datagrama da camada de rede e cria quadro
2. Se NIC sentir canal ocioso, inicia transmissão do quadro; canal ocupado, espera até estar ocioso, depois transmite
3. Se NIC transmitir quadro inteiro sem detectar outra transmissão, NIC terminou com o quadro!
4. Se NIC detectar outra transmissão enquanto transmite, aborta e envia sinal de congestionamento
5. Depois de abortar, NIC entra em **backoff exponencial**: após  $m$  colisões, NIC escolhe  $K$  aleatoriamente dentre  $\{0, 1, 2, \dots, 2^{m-1}\}$ . NIC espera  $K \cdot 512$  tempos de bit, retorna à Etapa 2



# CSMA/CD da Ethernet (mais)

**Sinal de congestionamento:** cuide para que todos os outros transmissores saibam da colisão; 48 bits

**Tempo de bit:** 0,1  $\mu$ s para Ethernet de 10 Mbps;  
para  $K = 1023$ , tempo de espera cerca de 50 ms

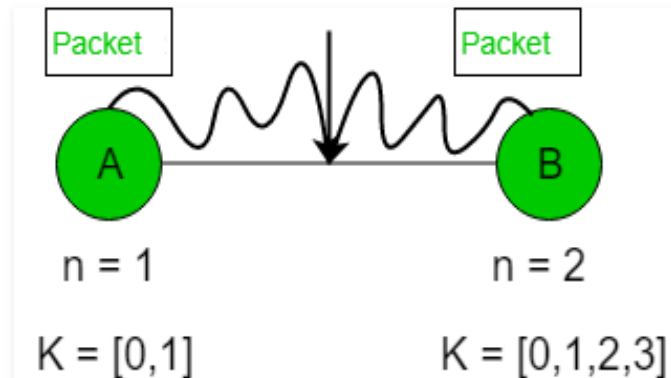
## Backoff exponencial:

- *Objetivo:* adaptar tentativas de retransmissão à carga estimada
  - carga pesada: espera aleatória será maior
- primeira colisão: escolha  $K$  a partir de  $\{0,1\}$ ; atraso é  $K \cdot 512$  tempos de transmissão de bit
- após segunda colisão: escolha  $K$  dentre  $\{0,1,2,3\}$ ...
- após dez colisões, escolha  $K$  dentre  $\{0,1,2,3,4,\dots,1023\}$



# CSMA/CD da Ethernet (mais)

Waiting time = back-off time  
Let  $n$  = collision number  
Then,  
Waiting time =  $K * T_{slot}$   
where  $K = [0, 2^n - 1]$



A:  $K = 1$      $A = 1 * T_{slot} = T_{slot}$   
B:  $K = 2$      $B = 2 * T_{slot} = T_{slot}$   
                   $2 \times 51.2 \mu\text{sec}$

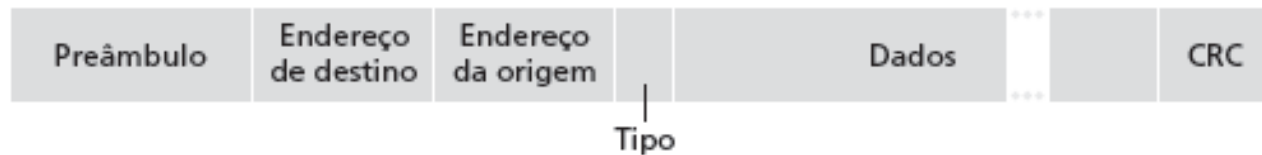
O slot time é definido como sendo duas vezes o tempo que um pulso eletrônico (OSI nível 1) leva para atravessar a distância máxima entre dois nós da rede.

Speed	Slot time*	Time Interval
10 Mbit/s	512 bit times	51.2 microseconds
100 Mbit/s	512 bit times	5.12 microseconds
1 Gbit/s	4096 bit times	4.096 microseconds
10 Gbit/s	Not applicable	Not applicable

Ethernet: taxa de transmissão de 10Mbps  
Tamanho mínimo dos frames foi fixado em 512 bits (64 bytes), o que corresponde a um tempo de transmissão de 51,2 microssegundos;  
Esse tamanho de quadro é uma decisão histórica e, na prática, impraticável a sua alteração.

# Estrutura do quadro Ethernet

Adaptador enviando encapsula datagrama IP (ou outro pacote de protocolo da camada de rede) no **quadro Ethernet**



- **Tipo:** indica protocolo da camada mais alta (principalmente IP, mas outros são possíveis, p. e., Novell IPX, AppleTalk)
- **CRC:** verificado no receptor, se detectar erro, quadro é descartado



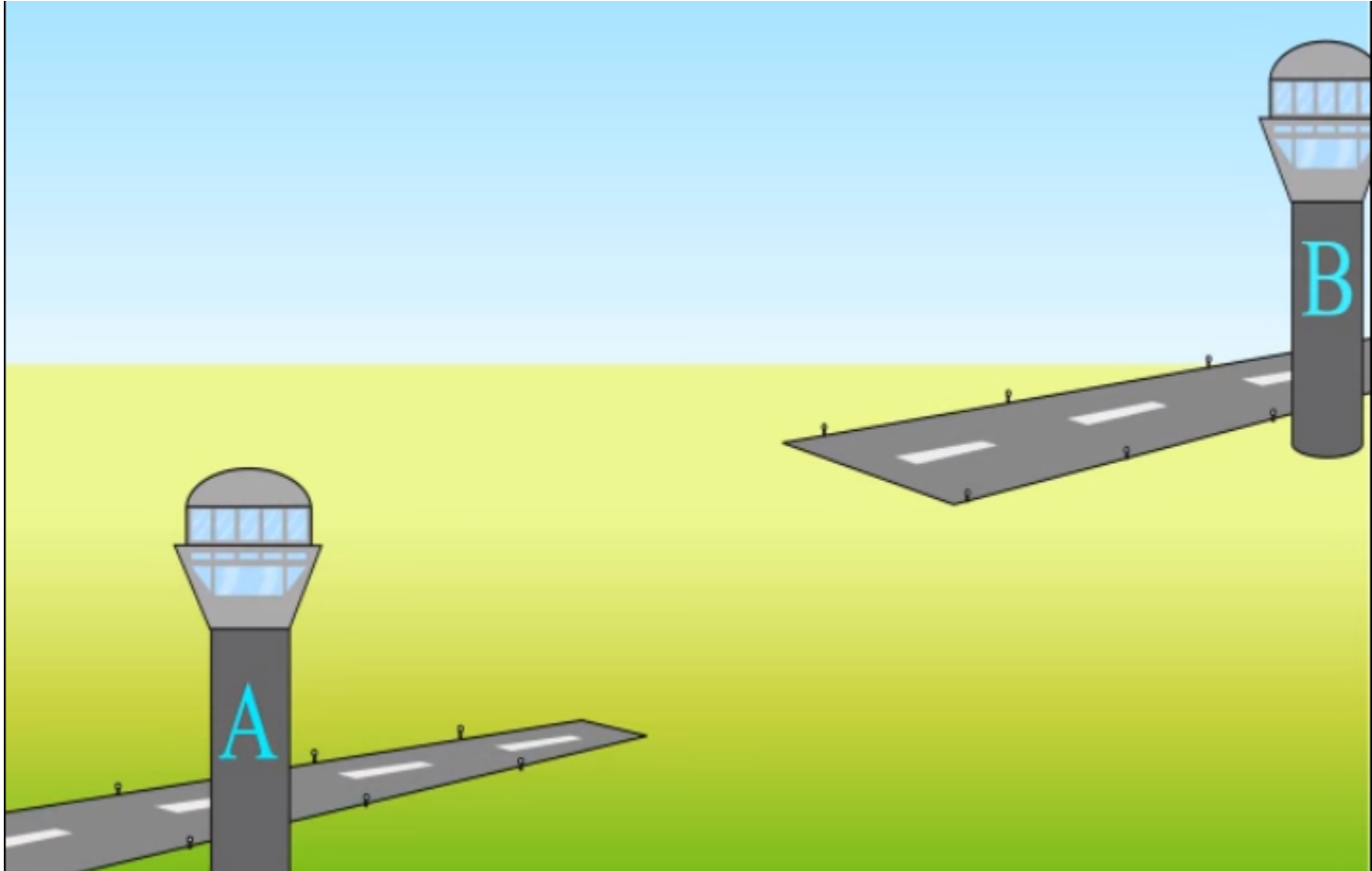
# Ethernet: não confiável, sem conexão

- **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

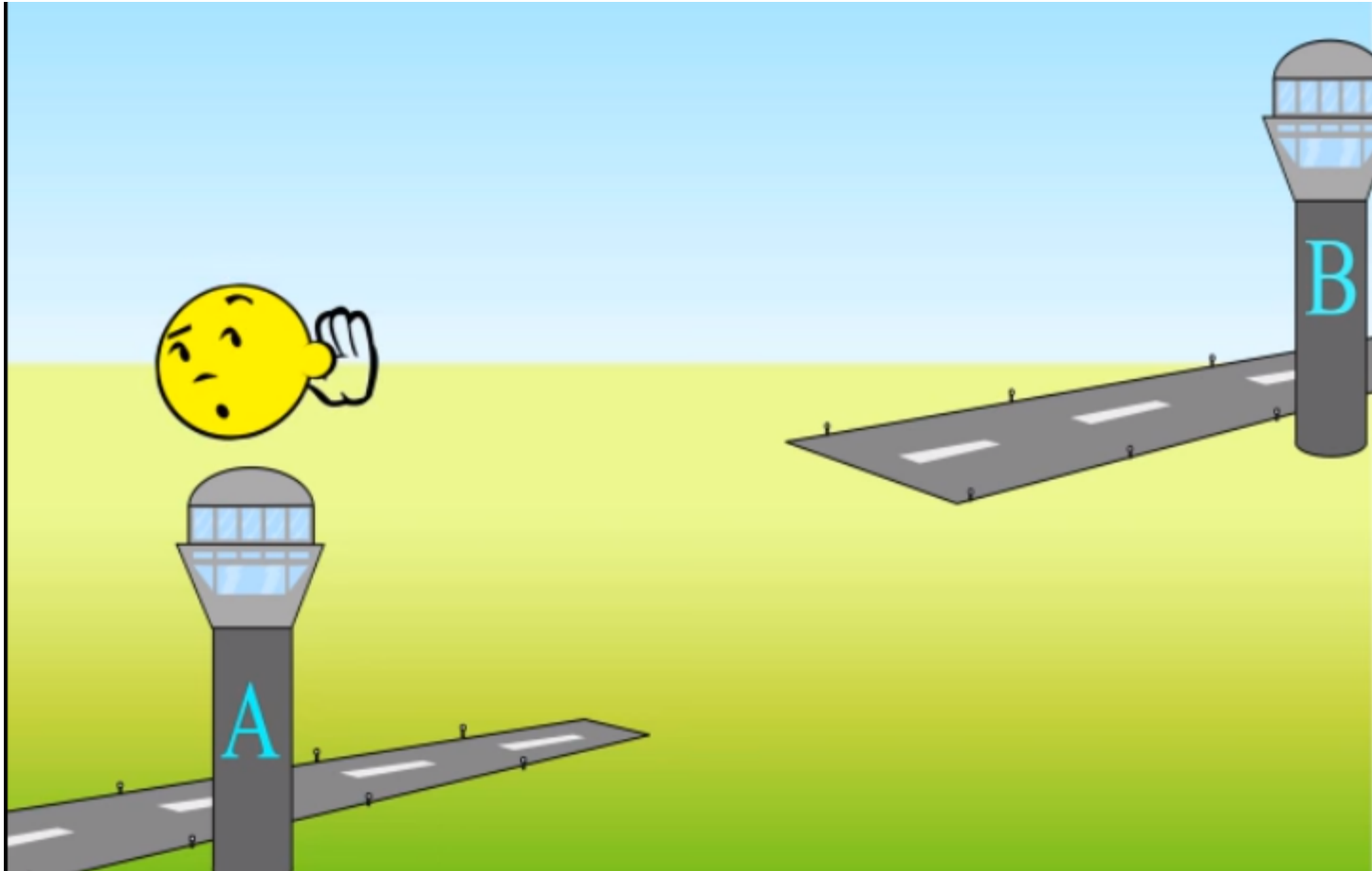




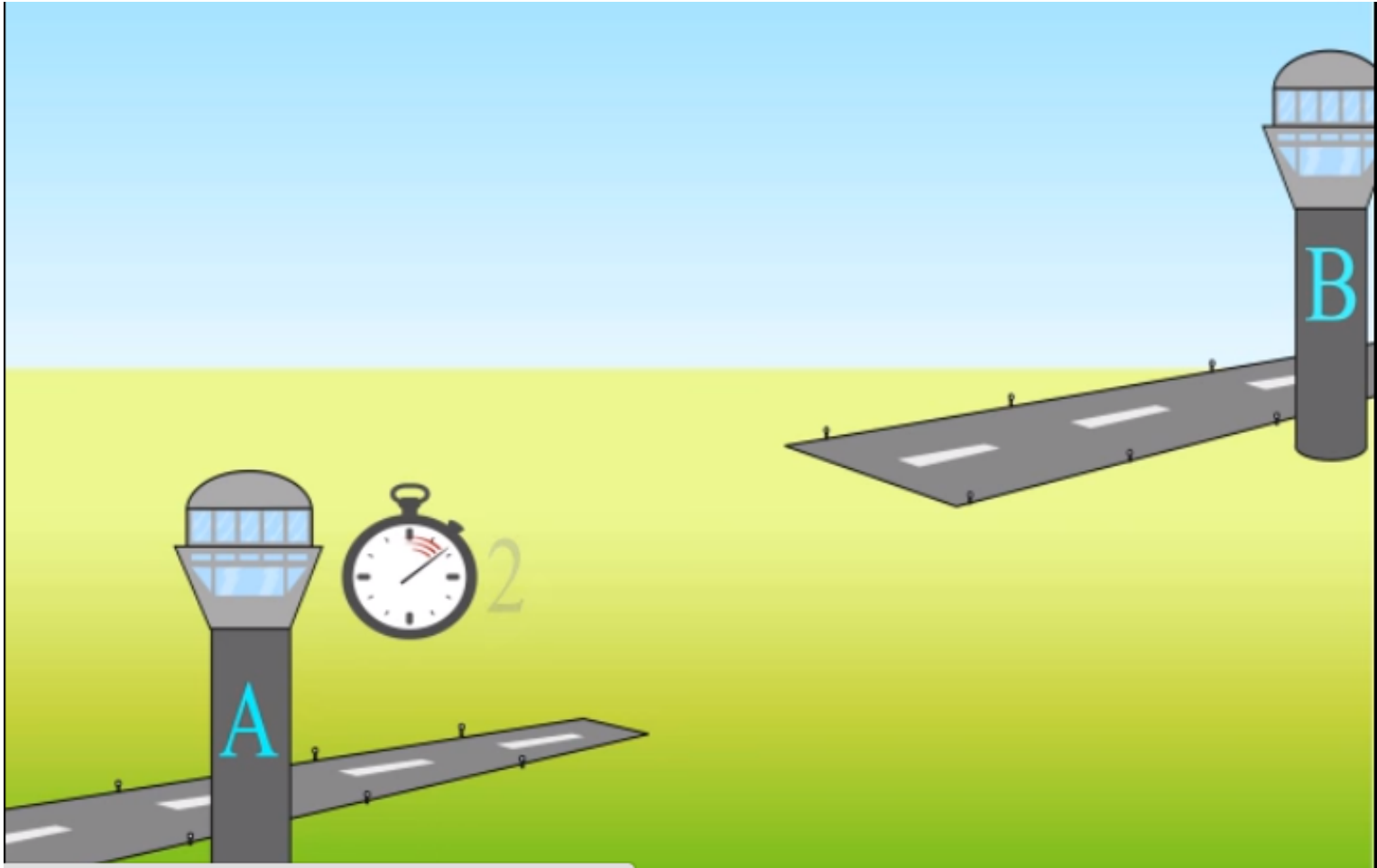
# IEEE 802.11 Protocollo MAC: CSMA/CA



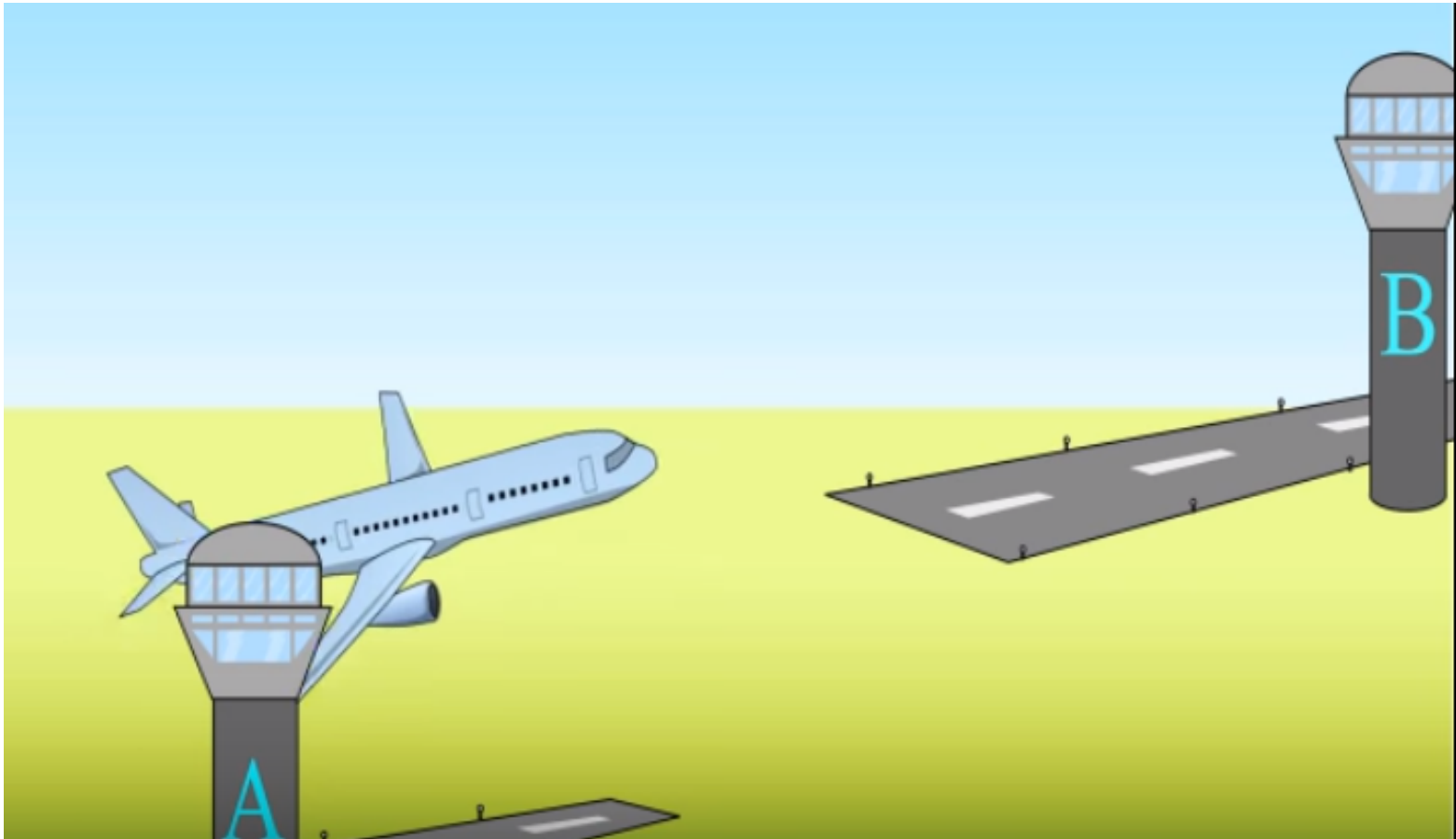
# IEEE 802.11 Protocollo MAC: CSMA/CA



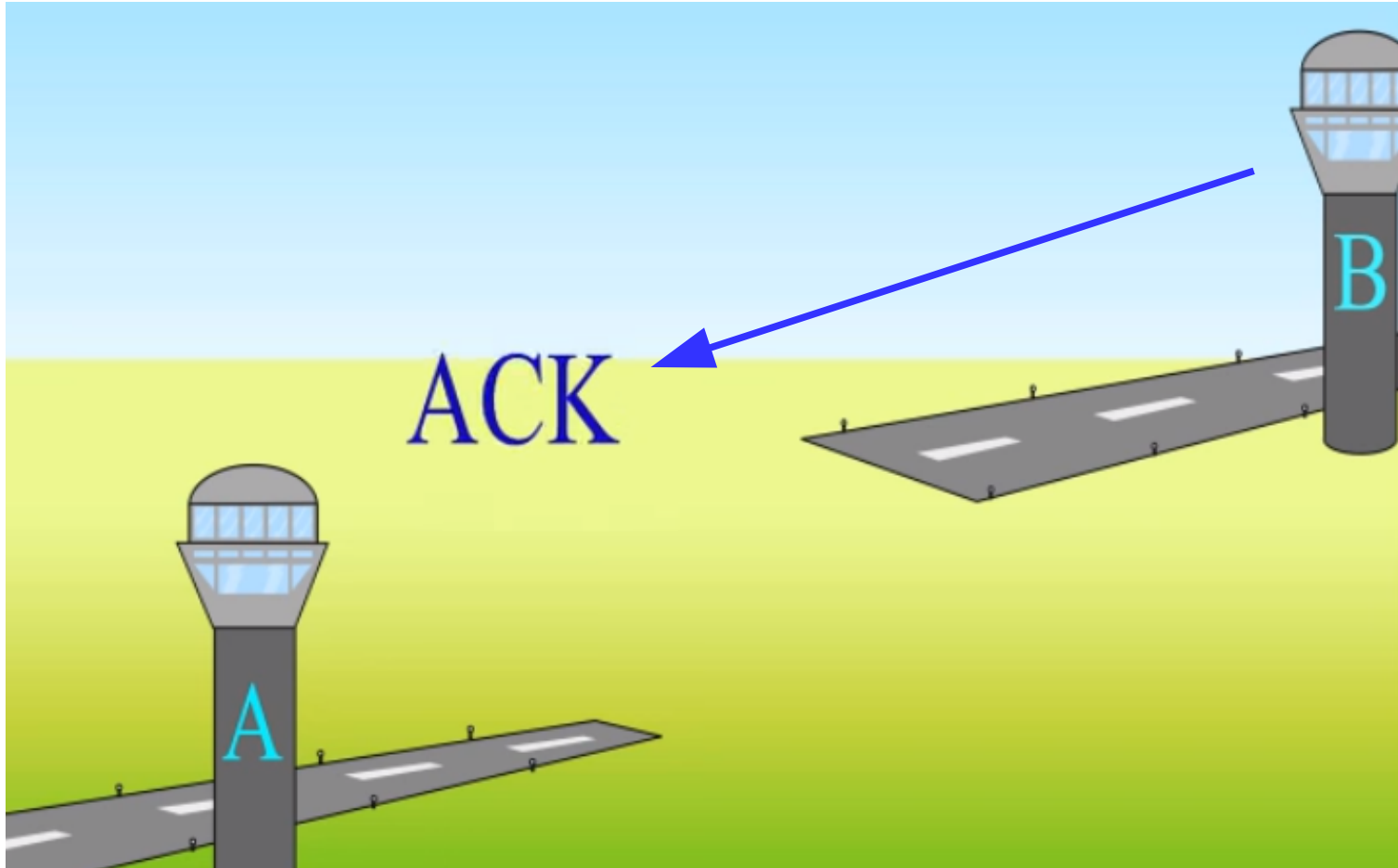
# IEEE 802.11 Protocollo MAC: CSMA/CA



# IEEE 802.11 Protocollo MAC: CSMA/CA



# IEEE 802.11 Protocollo MAC: CSMA/CA



# IEEE 802.11 Protocolo MAC:

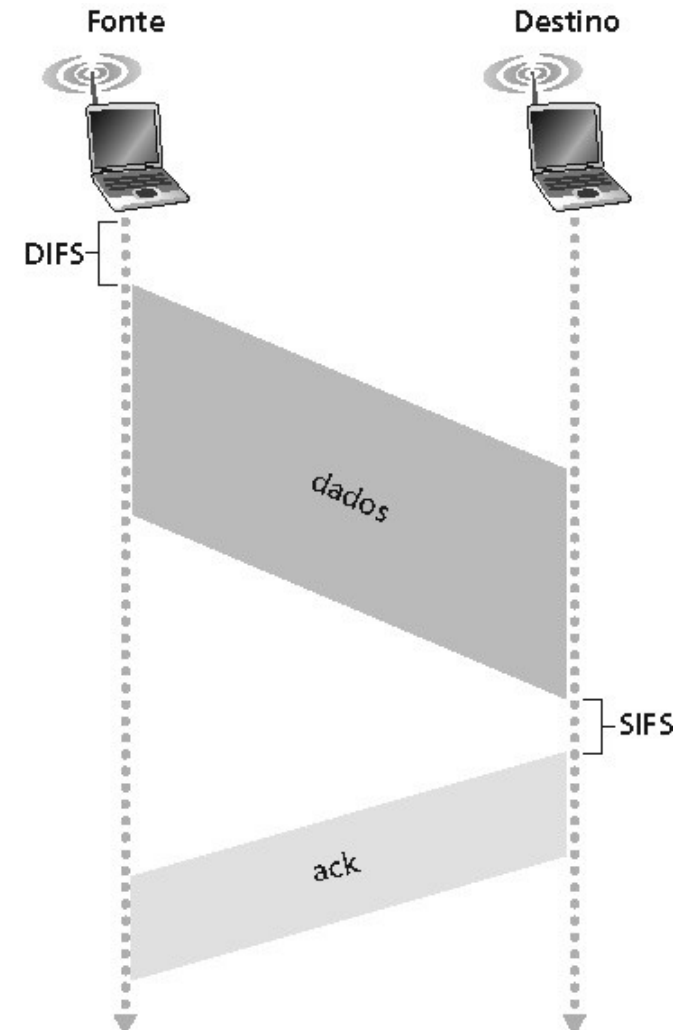
## CSMA/CA *Multiple Access with Collision Avoidance*

### Transmissor 802.11

1. Se o canal é percebido quieto (idle) por Distributed Inter-Frame Space (DIFS), então
  - Transmite o quadro inteiro (sem CD)
2. Se o canal é percebido ocupado, então
  - Inicia um tempo de backoff aleatório
  - Temporizador conta para baixo enquanto o canal está quieto
  - Transmite quando temporizador expira.  
Se não vem ACK, aumenta o intervalo de backoff aleatório, repete 2

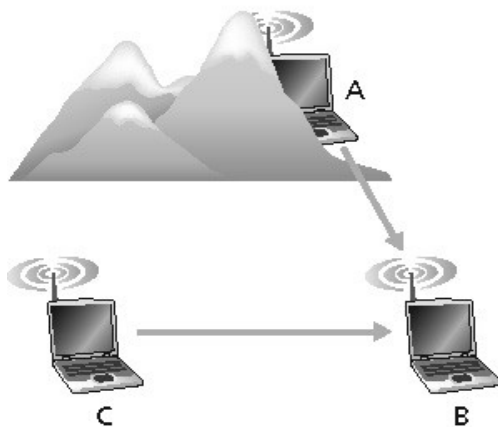
### Receptor 802.11

- Se o quadro é recebido OK  
retorna ACK depois de Short Inter-Frame Spacing (SIFS) (ACK é necessário devido ao problema do terminal oculto)

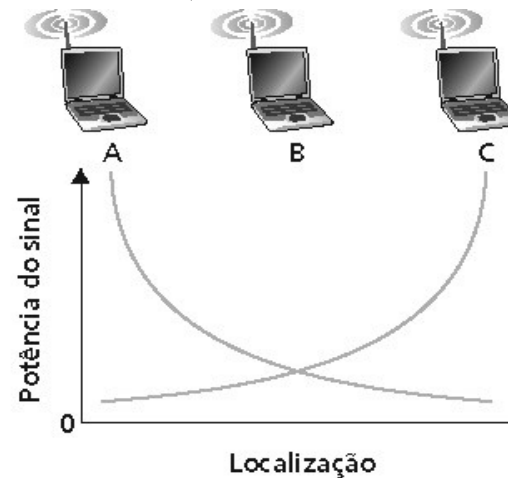


# IEEE 802.11: acesso múltiplo

- Evita colisões: 2 ou mais nós transmitindo ao mesmo tempo
- 802.11: CSMA - escuta antes de transmitir
- Não colide com transmissões em curso de outros nós
- 802.11: não faz detecção de colisão!
- Difícil de receber (sentir as colisões) quando transmitindo devido ao fraco sinal recebido (desvanecimento)
- Pode não perceber as colisões: terminal oculto, fading
- Meta: **evitar colisões**: CSMA/C(collision)A(avoidance)



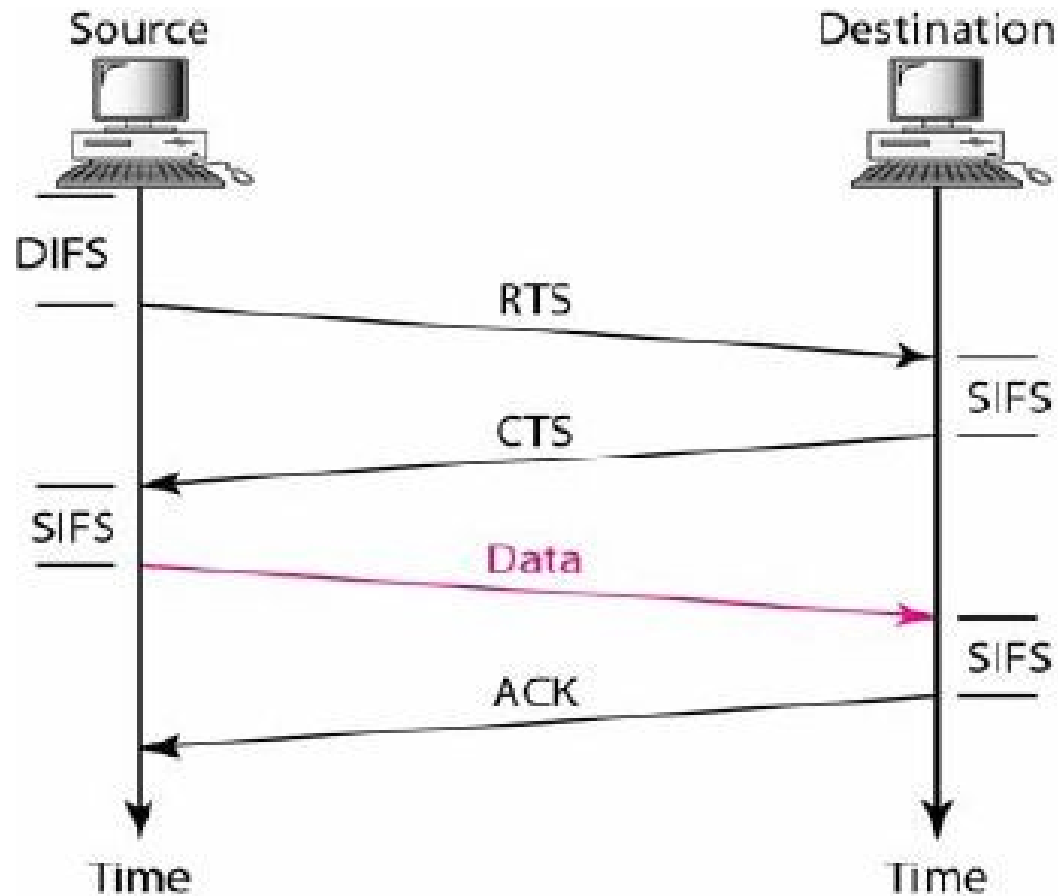
a.



b.



# Evitando colisões

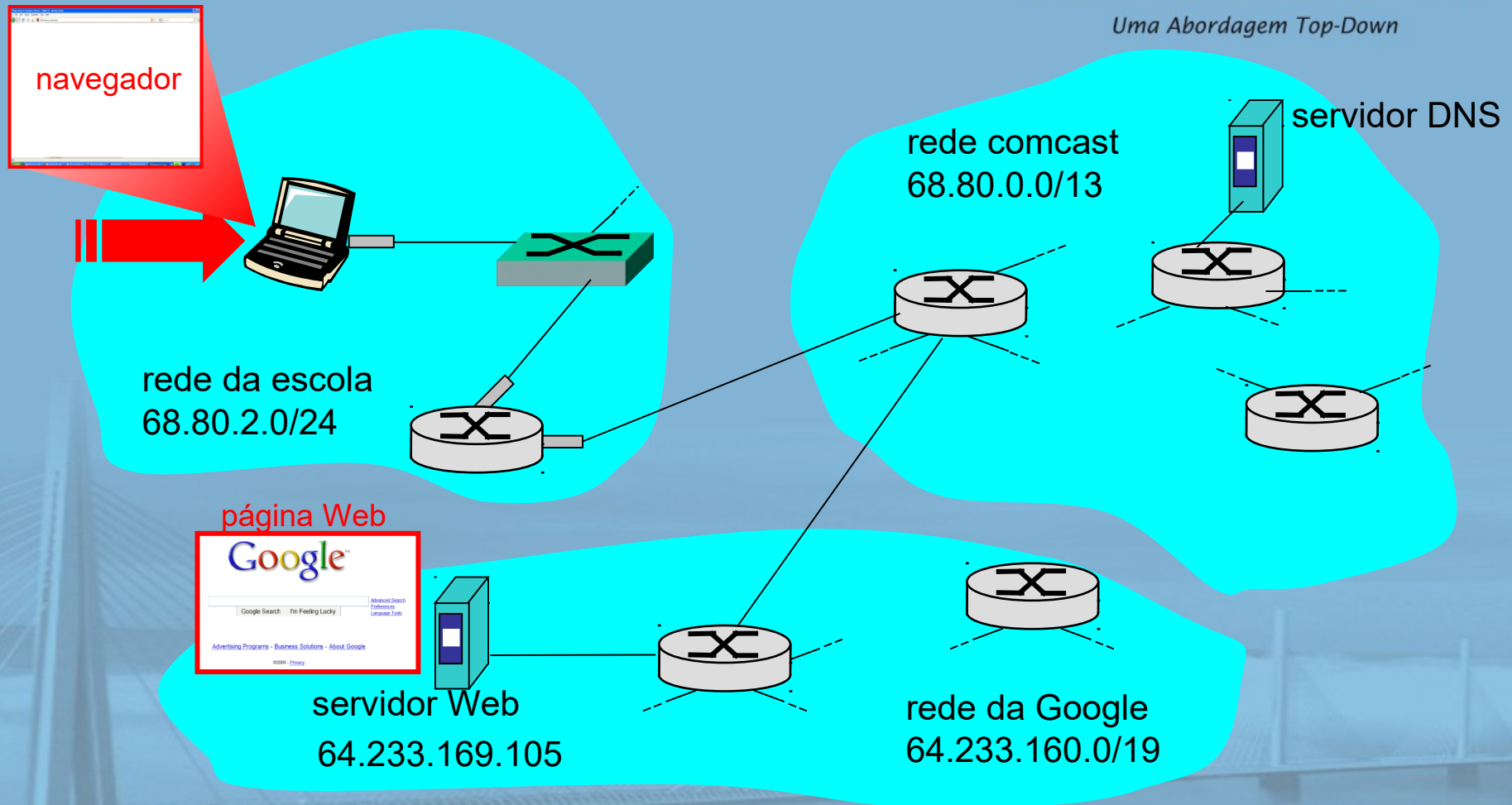




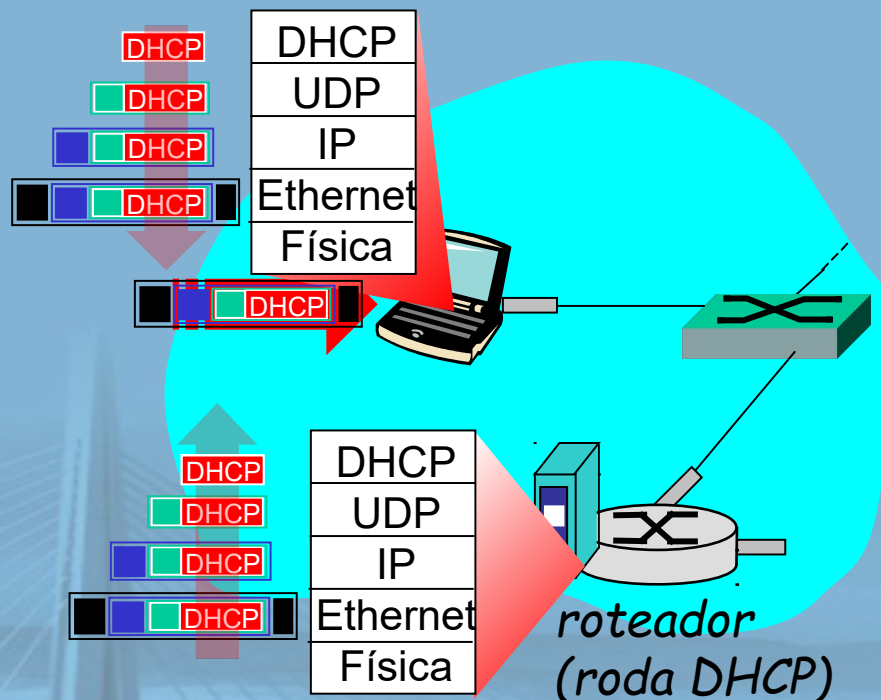
# Síntese: um dia na vida de uma solicitação Web

- viagem pela pilha de protocolos completa!
  - aplicação, transporte, rede, enlace
- juntando tudo: síntese!
  - **objetivo:** identificar, analisar, entender os protocolos (em todas as camadas) envolvidos no cenário aparentemente simples: solicitar página WWW
  - **cenário:** aluno conecta laptop à rede do campus, solicita/recebe [www.google.com](http://www.google.com)

## Um dia na vida: cenário



# Um dia na vida... conectando à Internet

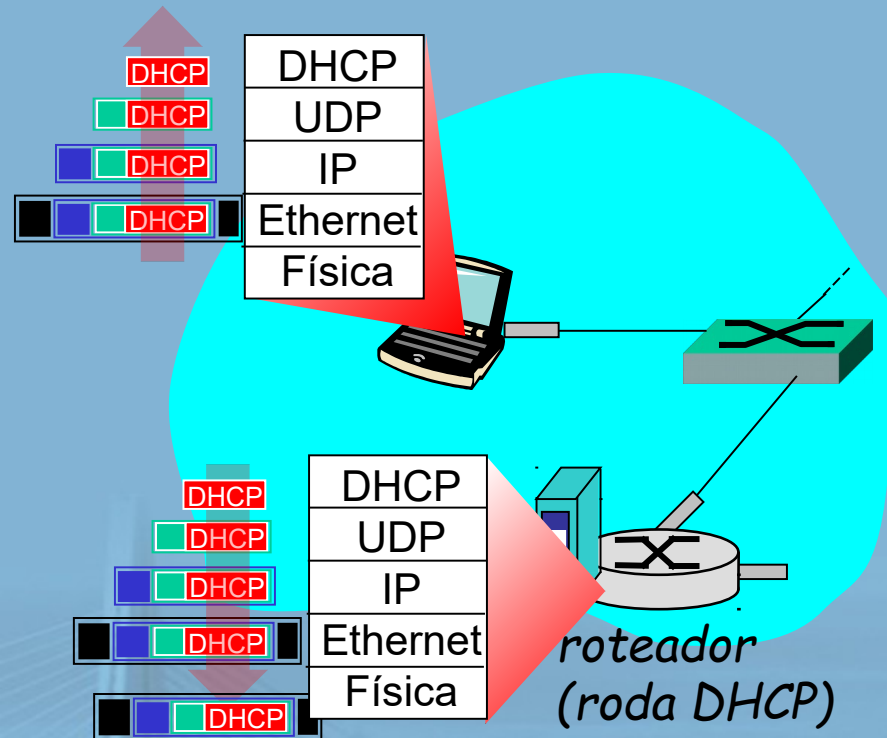


- o laptop conectando precisa obter seu próprio endereço IP, end. do roteador do 1º salto e do servidor DNS: use **DHCP**
- Solicitação DHCP **encapsulada** no **UDP**, encapsulada no **IP**, encapsulada na Ethernet **802.1**
- Quadro Ethernet enviado por **broadcast** (dest.: FFFFFFFFFFFFFFFF) na LAN, recebido no roteador rodando servidor **DHCP**
- Ethernet **demultiplexado** para IP demultiplexado, UDP demultiplexado para DHCP

# REDES DE COMPUTADORES E A INTERNET

5ª edição

Uma Abordagem Top-Down

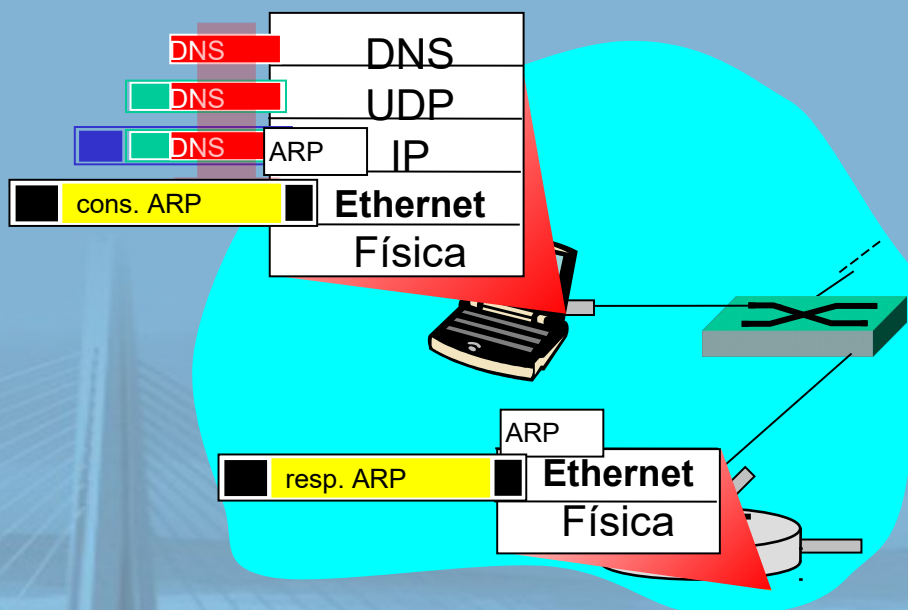


- ❑ Servidor DHCP formula **ACK DHCP** contendo endereço IP do cliente, IP do roteador no 1º salto para cliente, nome & endereço IP do servidor DNS
- ❑ Encapsulamento no servidor DHCP, quadro repassado (*aprendizagem do comutador*) através da LAN, demultiplexando no cliente
- ❑ Cliente DHCP recebe resposta ACK do DHCP

*Cliente agora tem endereço IP, sabe nome e endereço do servidor DNS, endereço IP do seu roteador no primeiro salto*

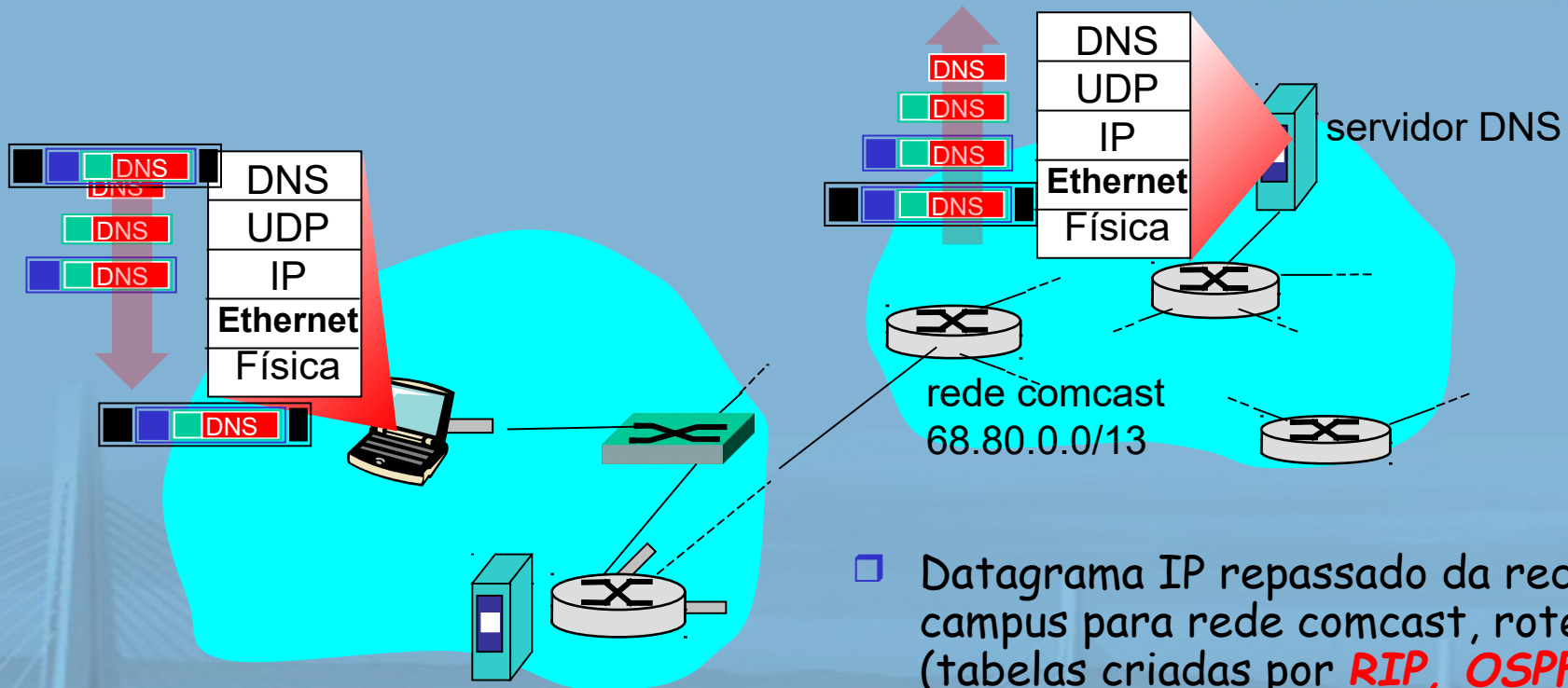


# Um dia na vida... ARP (antes do DNS, antes do HTTP)



- Antes de enviar solicitação **HTTP**, precisa de endereço IP de **www.google.com**: **DNS**
- Consulta DNS criada, encap. no UDP, no IP, na Ethernet. Para enviar quadro ao roteador, precisa de endereço MAC da interface do roteador: **ARP**
- Broadcast da **consulta ARP**, recebido pelo roteador, que responde com **resposta ARP** dando endereço MAC da interface do roteador
- cliente agora sabe endereço MAC do roteador no 1º salto, e agora pode enviar quadro contendo consulta DNS

# Um dia na vida... usando DNS



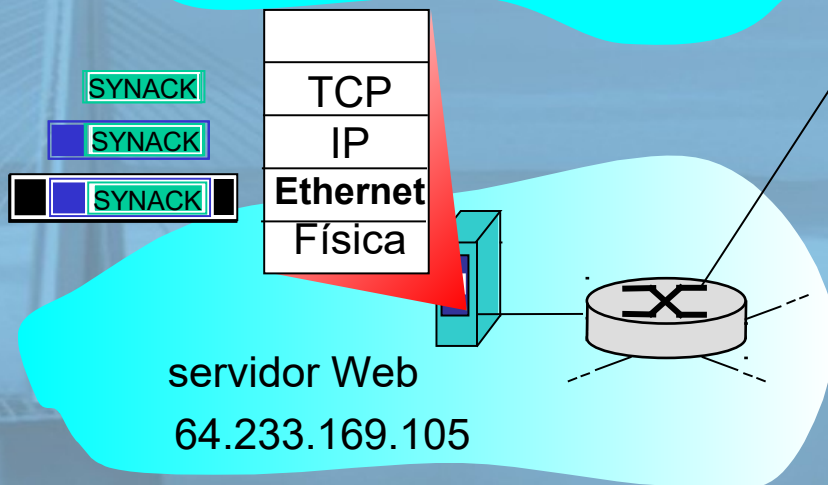
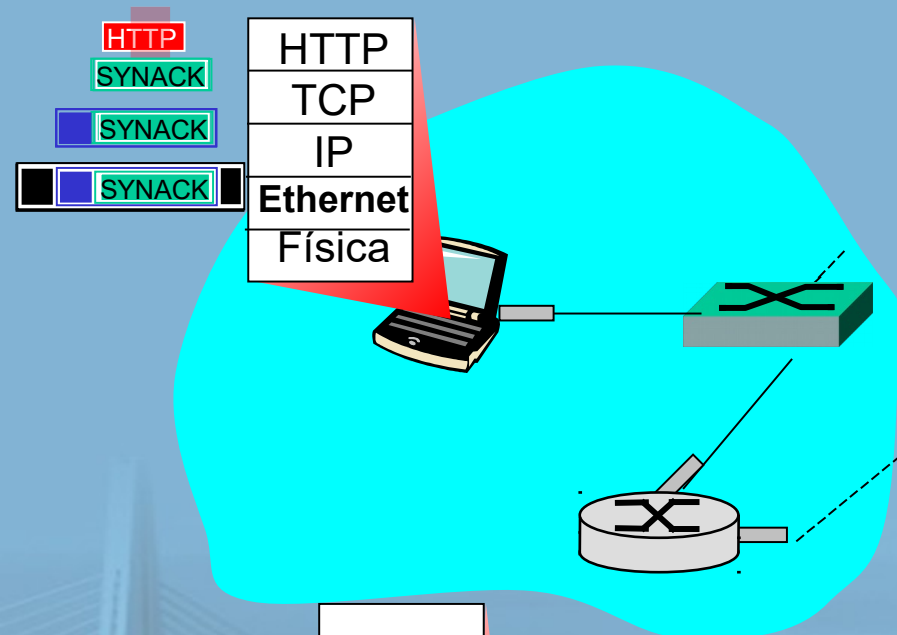
- Datagrama IP contendo consulta DNS repassada via comutador da LAN do cliente ao roteador do 1º salto

- Datagrama IP repassado da rede do campus para rede comcast, roteado (tabelas criadas por **RIP**, **OSPF**, **IS-IS** e/ou protocolos de roteamento **BGP**) ao servidor DNS
- demultiplexado ao servidor DNS
- Servidor DNS responde ao cliente com endereço IP de [www.google.com](http://www.google.com)

# Um dia na vida... conexão TCP transportando HTTP

REDES DE  
COMPUTADORES  
E A INTERNET 5ª edição

*Uma Abordagem Top-Down*



- para enviar solicitação HTTP, cliente primeiro abre **socket TCP** com servidor Web
- **segmento SYN** TCP (etapa 1 na apresentação de 3 vias) **roteado interdomínio** com servidor Web
- servidor Web responde com **SYNACK TCP** (etapa 2 na apresentação de 3 vias)
- **Conexão TCP estabelecida!**

# Um dia na via... solicitação/ resposta HTTP

REDES DE  
COMPUTADORES  
E A INTERNET 5ª edição

Uma Abordagem Top-Down

□ página Web **finalmente (!!!)**  
exibida

- **solicitação HTTP**  
enviada ao socket TCP
- datagrama IP contendo  
solicitação HTTP roteado  
para `www.google.com`
- servidor Web responde  
com **resposta HTTP**  
(contendo página Web)
- datagrama IP contendo  
resposta HTTP roteada de  
volta ao cliente

