

Redes de Computadores

IC507

Prof. Marcio Nunes de Miranda

marcionmiranda@ufrj.br

Período: 2022.1

Bibliografia

Livro-texto:

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W., “Redes de Computadores e a Internet (Uma Abordagem Top-Down)”. 8^a Edição. Ed. Pearson, 2020.

Livros Complementares:

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W., “Redes de Computadores e a Internet (Uma Abordagem Top-Down)”. 6^a Edição. Addison Wesley (Pearson), 2014.

TANENBAUM, A. S., Redes de Computadores, 6^a edição, Ed. Pearson, Prentice-Hall.

Avaliações

- ✓ 2 provas
 - ✓ T - 1 seminário e trabalhos práticos (Wireshark)
 - ✓ listas de exercícios e testes (sem nota)
-
- P1:
 - P2:
 - Seminário:
 - Optativa: 20/09/2022

Composição da Média Final

- Média Final = $(2*P1 + 2*P2 + T) / 5;$
- P1 = P1 ou OPT
- P2 = P2 ou OPT
- T = média dos trabalhos

Capítulo 1: Introdução

Objetivo:

- Entender o contexto, visão geral e o que são redes
- Entender a terminologia utilizada
- Maior profundidade nos capítulos seguintes
- Abordagem:
 - uso da Internet como exemplo

Resumo do capítulo 1:

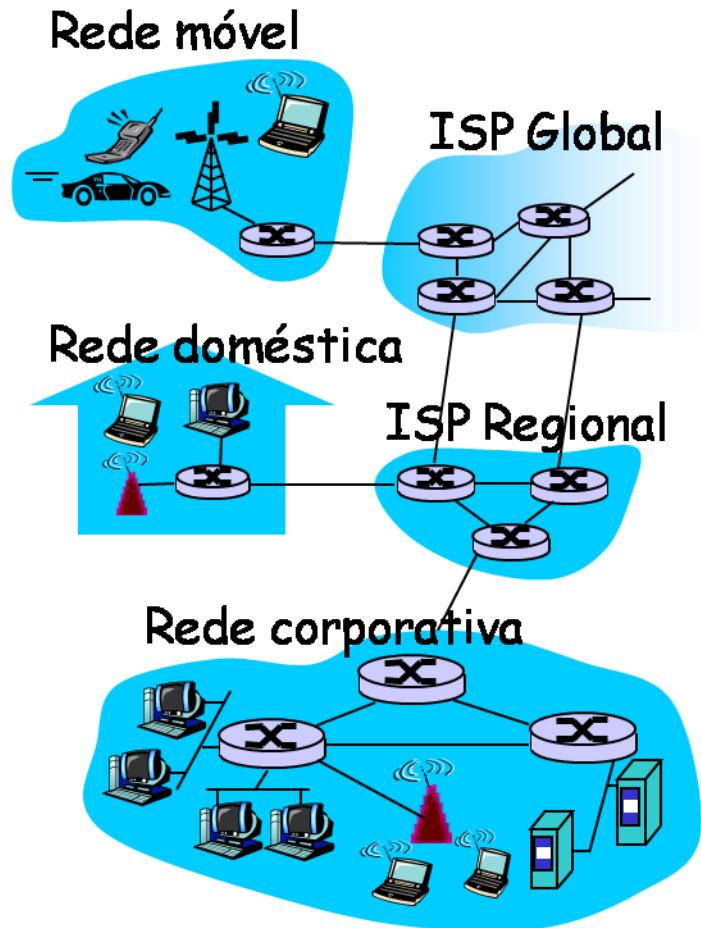
- O que é a Internet?
- O que é um protocolo?
- **a borda da rede:** hosts, rede de acesso, meios físicos de transmissão
- **núcleo da rede:** comutação de pacotes/circuitos, estrutura da Internet
- **desempenho:** perda, atraso, vazão
- segurança
- camadas de protocolos, modelos de serviços: pilha de protocolos TCP/IP

O que é a Internet: visão dos componentes



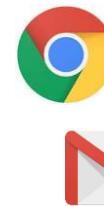
Bilhões de dispositivos computacionais conectados:
hosts (sistemas finais) rodando
aplicações de rede

- ***Enlaces de comunicação***
 - fibra, par trançado, radio, satélite
 - Taxa de transmissão:
largura de banda
- ***Roteadores e comutadores:***
dispositivos que encaminham pacotes (pedaços de dados)
- ***Rede:*** coleção de dispositivos, roteadores, enlaces: gerenciados por uma organização



Aplicações Populares

Navegação



Correio



Mensagens Instantâneas



Armazenamento de Arquivos



Jogos em rede



Voz e Vídeo



Redes Sociais



Trabalho Cooperativo



O que é a Internet: visão dos componentes

Internet: “rede de redes”

livremente hierárquica
ISPs interconectados

protocolos: controlam o envio e o
recebimento de mensagens

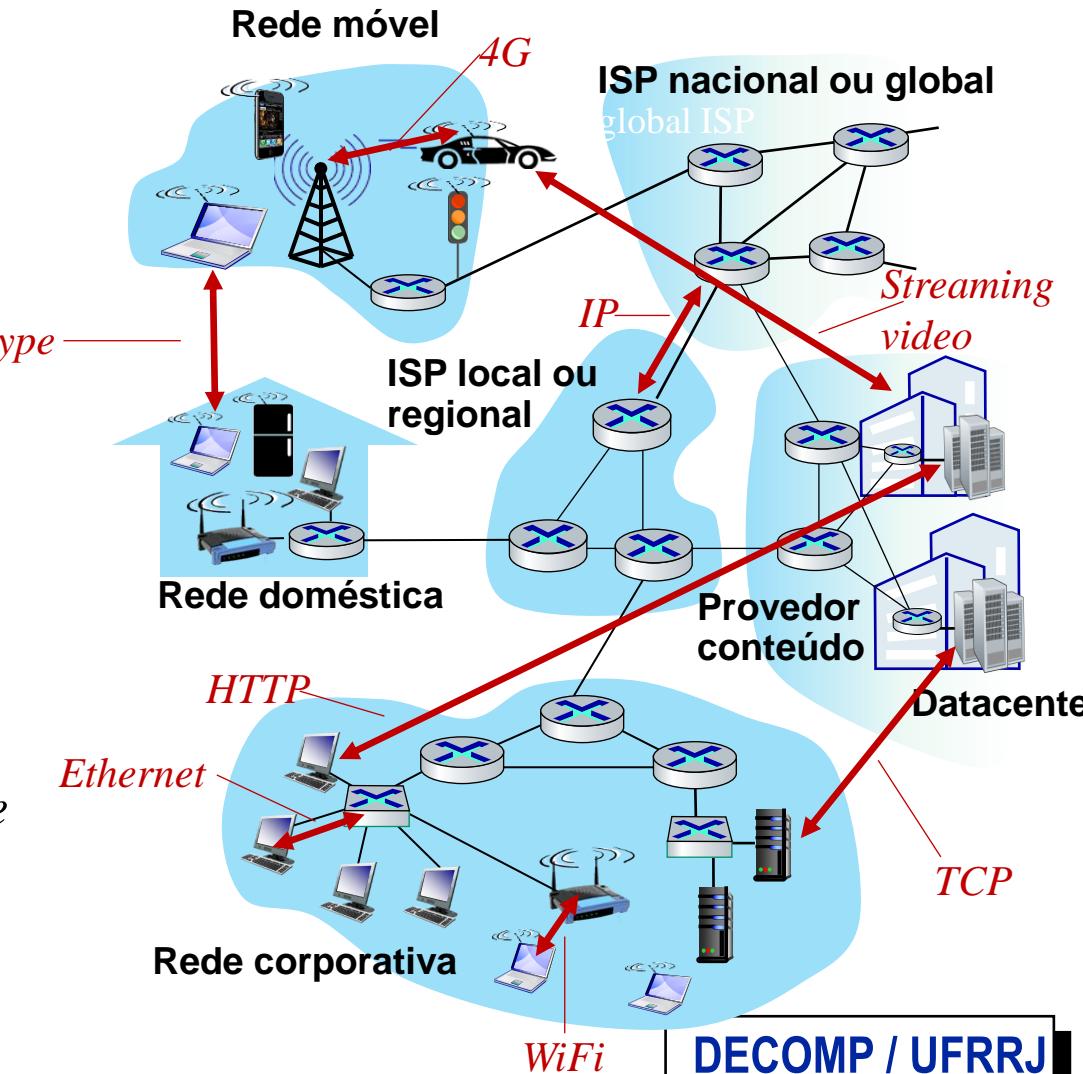
ex., TCP, IP, HTTP, Skype, Wi-fi, 4G,
Ethernet, *streaming* de vídeo

Padrões Internet

RFC: Request for comments

IETF: Internet Engineering Task Force

www.ietf.org



O que é a Internet: visão dos serviços

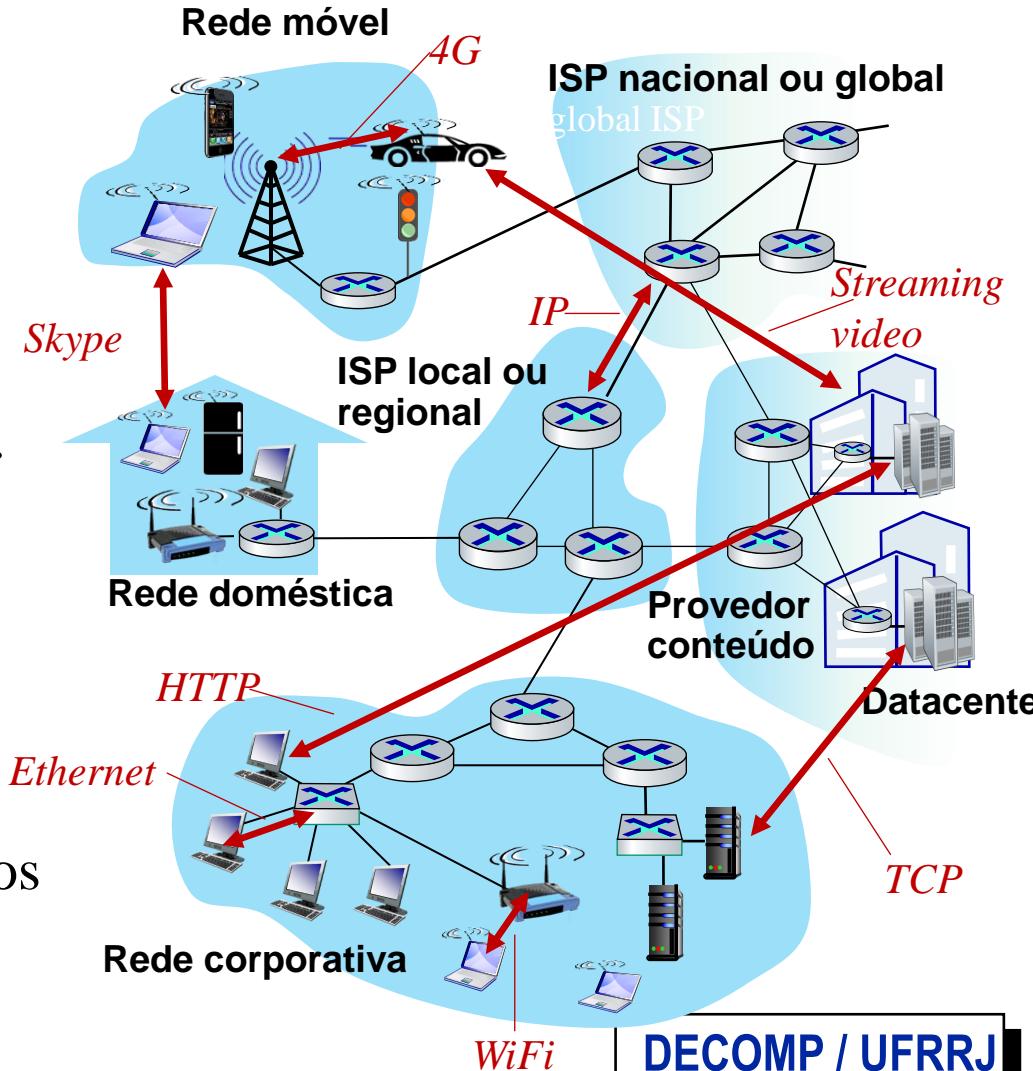
Infra-estrutura de comunicação que provê serviços que permitem o funcionamento das aplicações:

Web, email, streaming de vídeo, jogos, comércio eletrônico, teleconferências, redes sociais, ...

Provê uma interface de programação para as aplicações

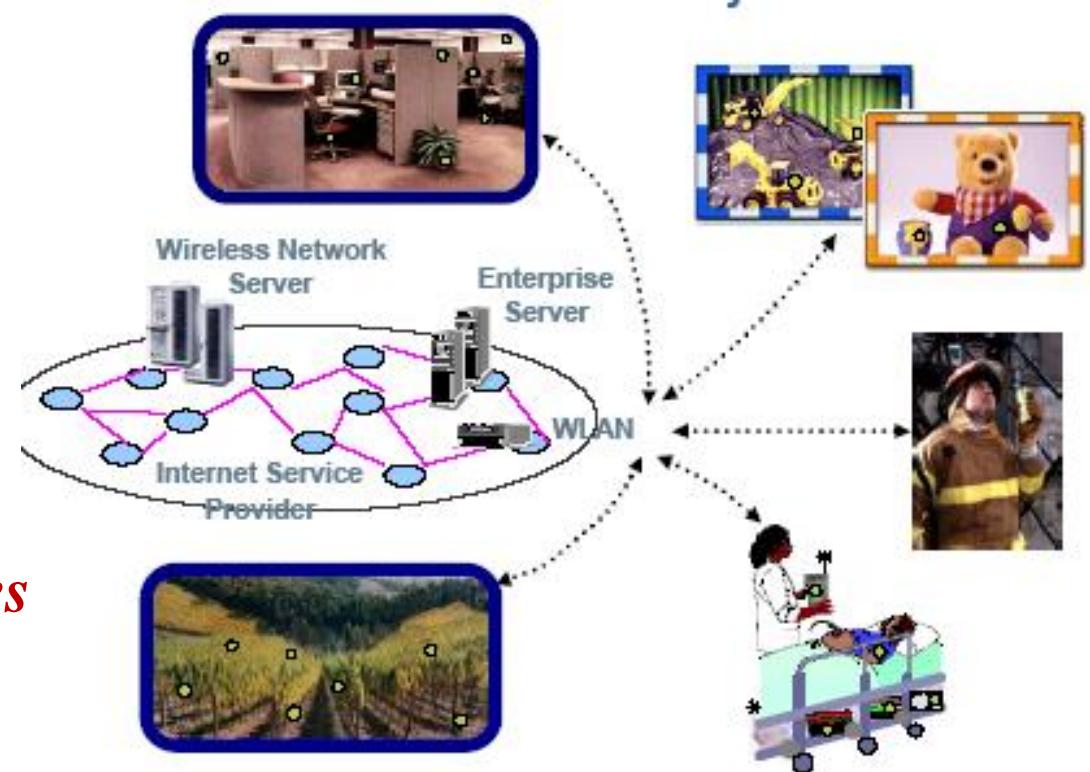
Permite que programas de apps se conectem à Internet

Provê serviços análogos aos Correios



Redes de Sensores e Internet das Coisas (IoT)

*Comunicação sem fio
interconectando dispositivos*



*Sensores-atuadores-processadores
de baixo custo habilitando
sensoriamento e atuação no
mundo real*

O que é um protocolo?

Protocolos humanos:

... msgs específicas são enviadas, segundo uma ordem pré-estabelecida

... ações específicas são realizadas quando as msgs são recebidas ou quando acontecem outros eventos

Ex: “Que horas são?”

Apresentações formais

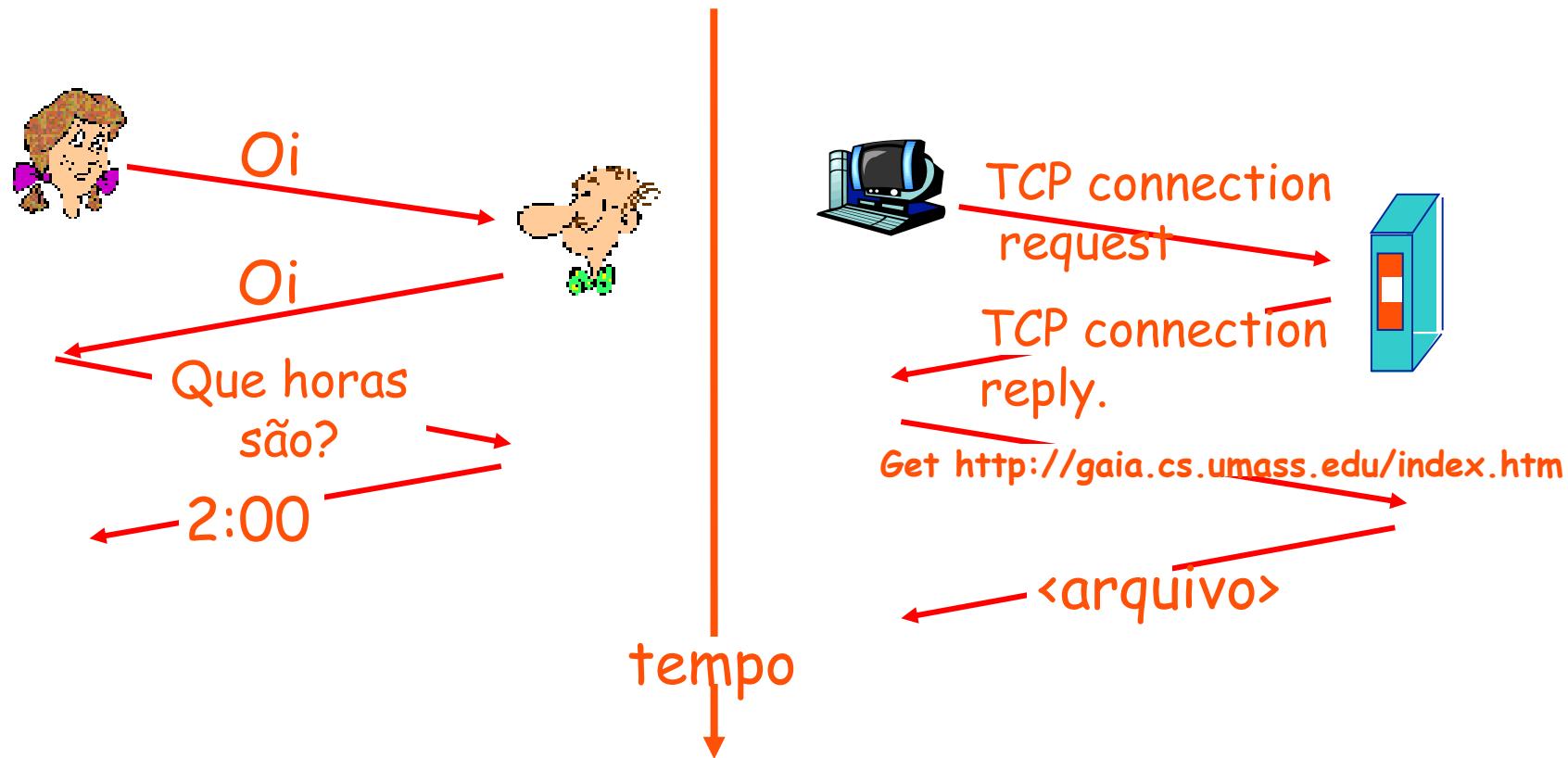
Protocolos de rede:

- máquinas ao invés de pessoas
- todas as atividades de comunicação na Internet são governadas por protocolos

Protocolos definem o formato e ordem das mensagens enviadas e recebidas pelas entidades da rede, bem como as ações tomadas quando da transmissão ou recepção destas mensagens

O que é um protocolo?

Um protocolo humano e um protocolo de rede:



Estrutura da rede

- **Borda da rede:**

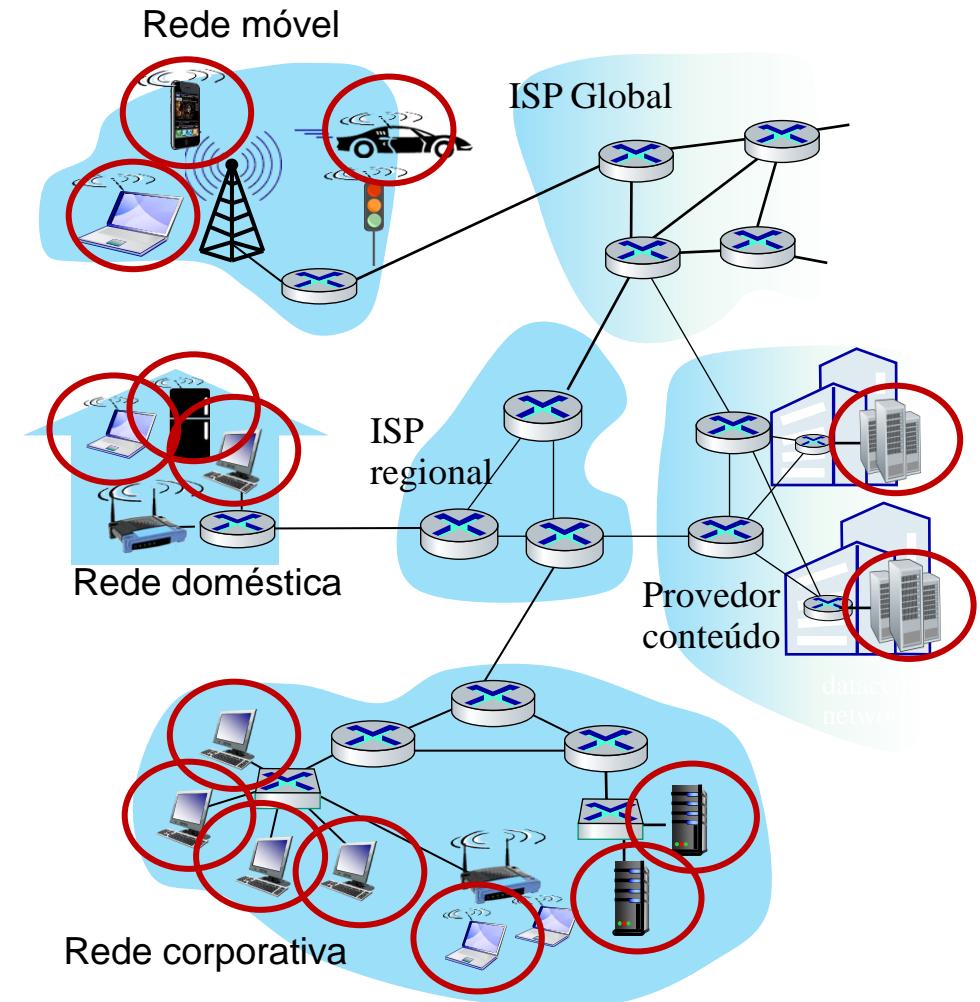
- ✓ aplicações e hospedeiros / **sistemas finais (hosts)**: rodam programas de aplicação na “extremidade da rede” - Web, e-mail, etc
- ✓ servidores em Data Centers, servidores Web, e-mail

- **Núcleo da rede:**

- ✓ roteadores interconectados
- ✓ rede de redes

- **Redes de acesso, meio físico:**

- ✓ enlaces de comunicação cabeados e sem fio



Redes de acesso e meios físicos

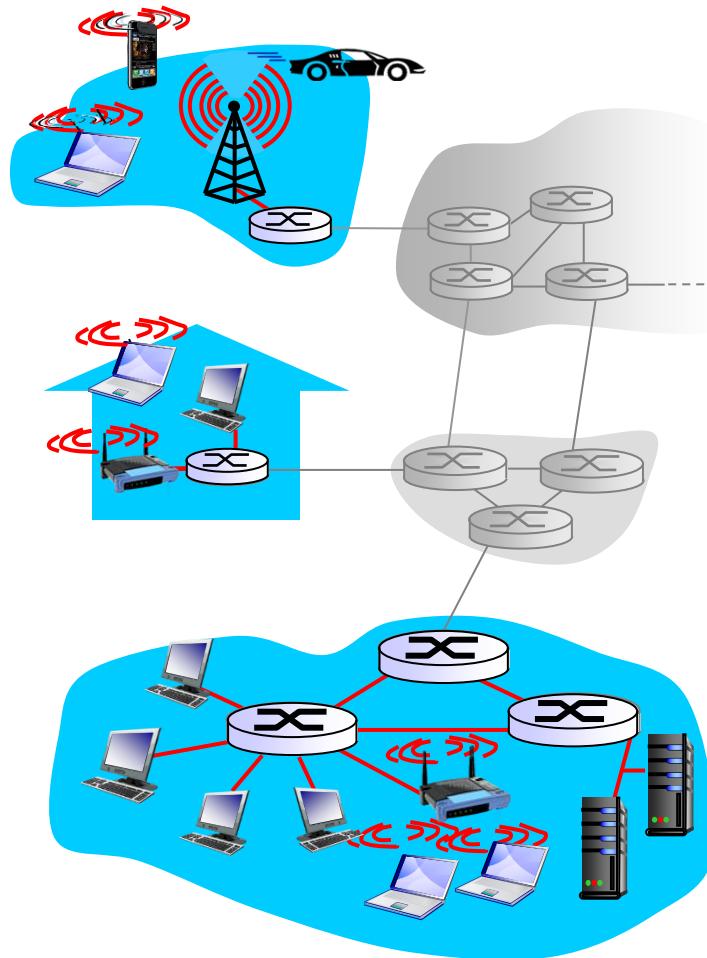
Como conectar os sistemas finais aos roteadores de borda?

R: redes de acesso - Rede física que conecta um sistema final ao primeiro roteador (**roteador de borda**) de um caminho partindo de um sistema final até outro qualquer.

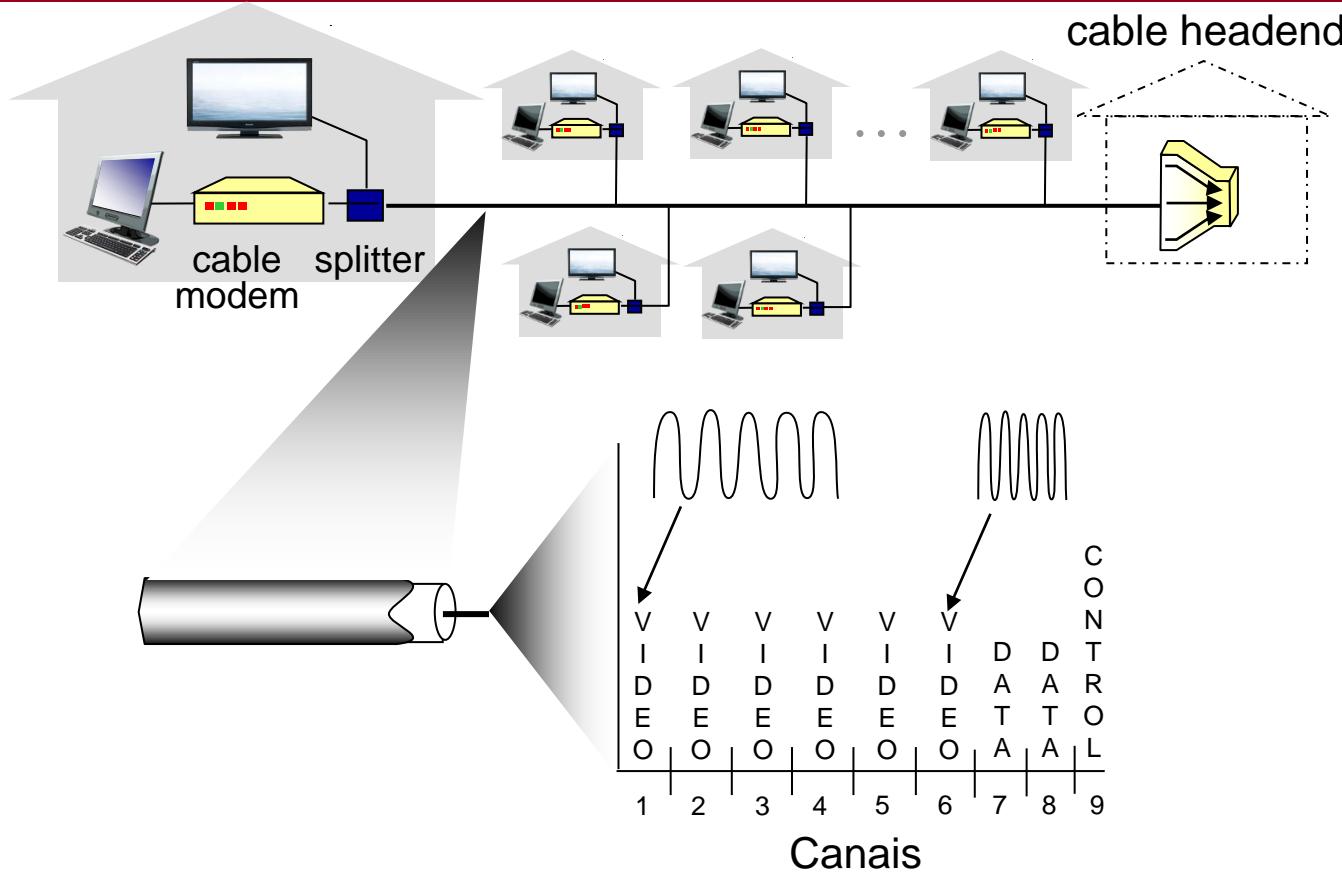
- ✓ redes de acesso residencial
- ✓ redes de acesso corporativo (escola, empresa)
- ✓ redes de acesso sem fio (Wifi, 4G/5G)

Questões a serem consideradas:

- ✓ largura de banda da rede de acesso (bits por segundo)
- ✓ compartilhada ou dedicada?



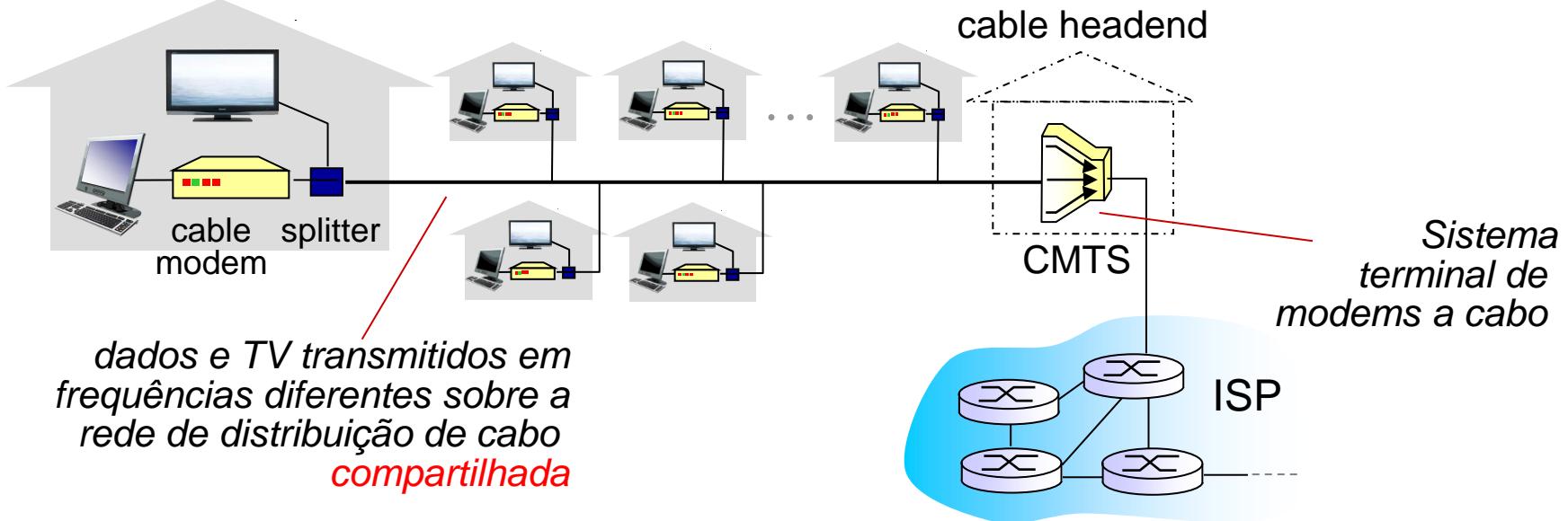
Redes de Acesso baseadas em cabo coaxial



multiplexação por divisão de frequência (FDM):

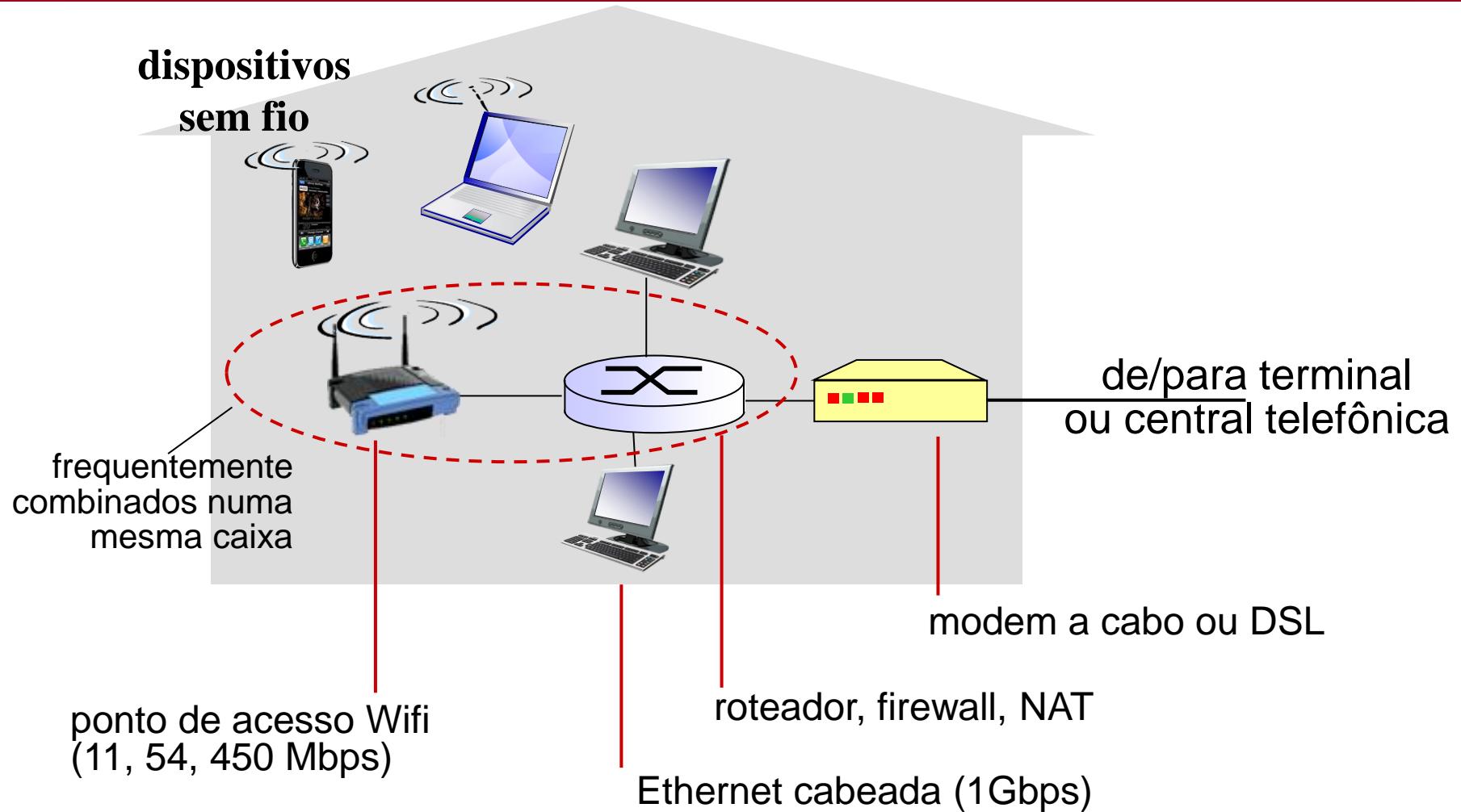
canais diferentes são transmitidos em diferentes faixas de frequência

Redes de acesso: TV a cabo

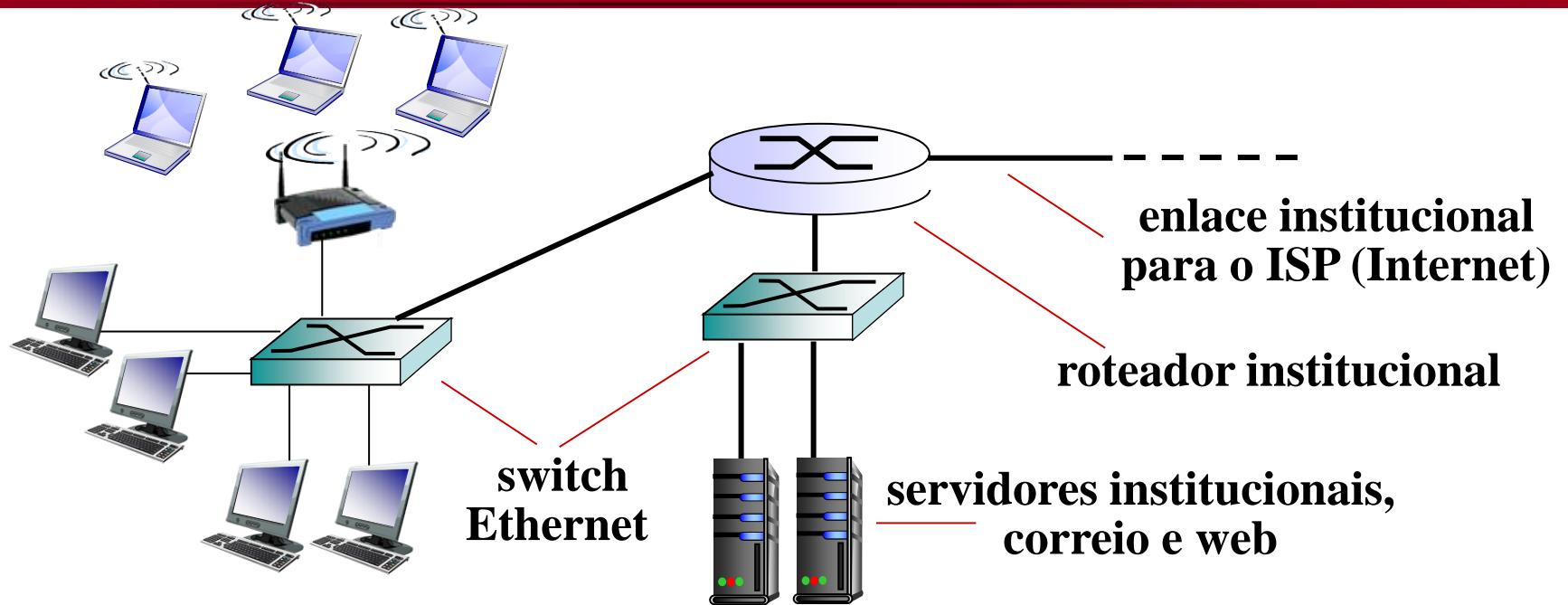


- HFC: híbrido coaxial/fibra
 - assimétrico: de 40M a 1.2 Gbps (*downstream*), 30 – 100 Mbps subida (*upstream*).
 - rede de cabos e fibra conectam as residências ao roteador do ISP
 - **acesso compartilhado** das residências ao sistema terminal do cabo

Redes de acesso: rede doméstica



Redes de acesso corporativas



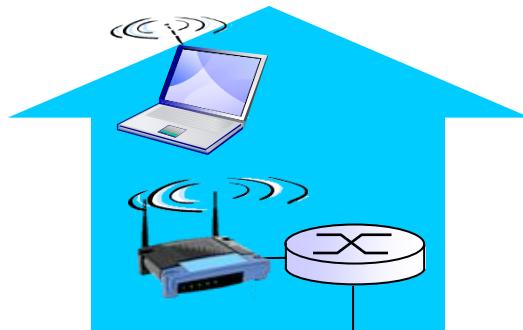
- ✓ usado tipicamente em empresas, universidades, etc.
- ✓ mistura de tecnologias com e sem fio conectando vários switches e roteadores:
 - Ethernet de 100Mbps, 1Gbps e 10Gbps
 - Pontos de acesso Wifi a 11, 54 e 450 Mbps

Redes de acesso sem fio (*wireless*)

- rede de acesso compartilhado *sem fio* conecta o sistema final ao roteador
Via *estação base* = “ponto de acesso” sem fio

LANs sem fio:

- dentro de um edifício (200 m)
- **802.11b/g/n/ac (WiFi):** taxas de transmissão de 11, 54, 450, 1.300 Mbps



para a Internet

Acesso sem fio de longa distância

- provido por uma operadora (celular), 10's km
- Dezenas de Mbps
- **3G, 4G: LTE, 4.5G, 5G**

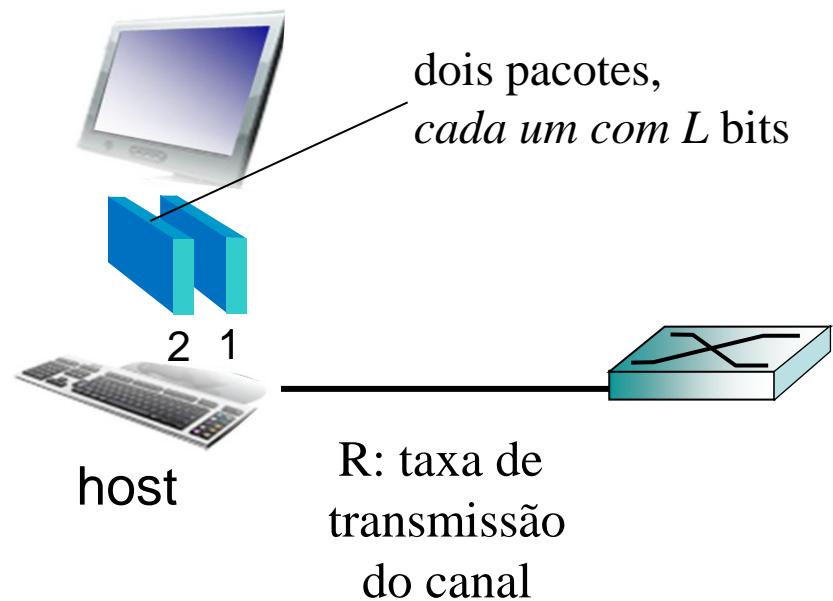


para a Internet

Hospedeiro (host): envia pacotes de dados

Função de transmissão do hospedeiro:

- pega msg da aplicação
- quebra em pequenos pedaços, conhecidos como *pacotes*, com L bits de comprimento
- transmite o pacote pela rede de acesso a uma *taxa de transmissão R*
 - R : taxa de transmissão do canal, ou *capacidade* do canal, ou *largura de banda do canal*



$$\text{atraso de transmissão do pacote} = \frac{\text{tempo necessário para transmitir um pacote de } L \text{ bits no canal}}{R \text{ (bits/sec)}}$$

Meios Físicos

bit: Propaga-se entre o transmissor e o receptor

enlace físico: o que está entre o transmissor e o receptor

meios guiados:

os sinais se propagam em meios sólidos: cobre, fibra, cabo coaxial

meios não guiados:

os sinais se propagam livremente.

ex. rádio terrestre e via satélite



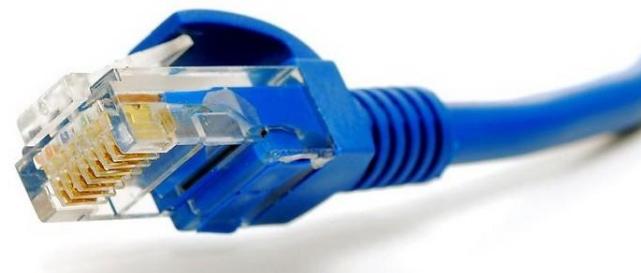
par trançado (TP - Twisted Pair)

dois fios de cobre isolados

Categoria 5: 100Mbps e 1 Gbps
Ethernet

Categoria 6: 10 Gbps

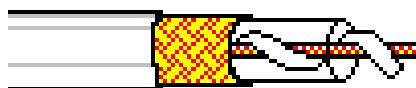
Categoria 8: 40 Gbps



Meios físicos: cabo coaxial, fibra

Cabo coaxial:

- ✓ fio (transporta o sinal) dentro de outro fio (blindagem)
- ✓ bidirecional
- ✓ banda larga (*broadband*):
 - ✓ múltiplos canais num cabo
 - ✓ Centenas de Mbps por canal



Cabo de fibra óptica:

- fibra de vidro transporta pulsos de luz
- opera em alta velocidade:
 - transmissão ponto a ponto de alta velocidade (ex., 10's a 100's Gbps)
- baixa taxa de erros:
 - repetidores mais afastados;
 - imune a ruído eletromagnético



Meios físicos: rádio

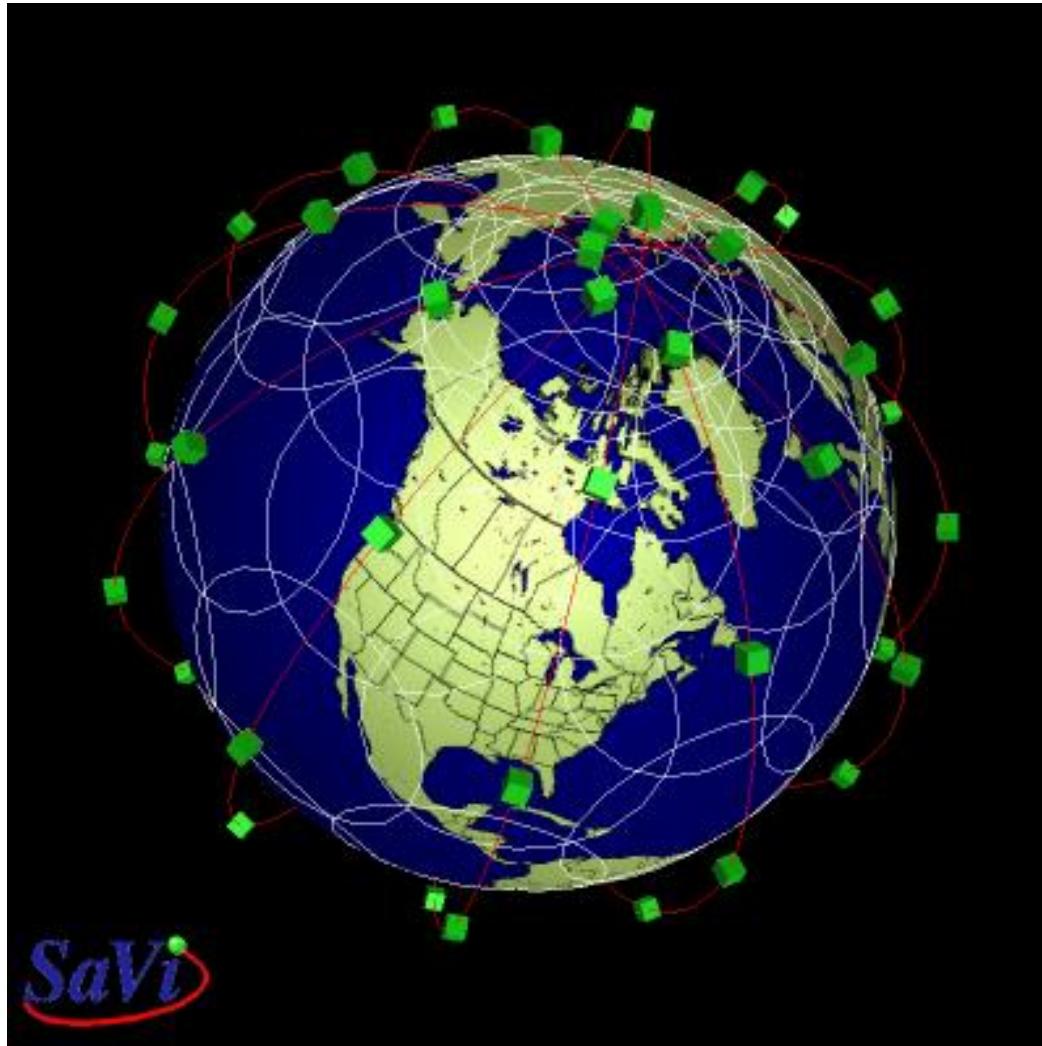
Características:

- sinal transportado em ondas eletromagnéticas
- não há “fio” físico
- bidirecional
- efeitos do ambiente de propagação:
 - reflexão
 - obstrução por objetos
 - interferência

Tipos de enlaces de rádio:

- **microondas**
 - ex.: canais de até 45 Mbps
- **LAN (ex., Wifi)**
 - Até 100s Mbps
- **longa distância (ex., celular)**
 - ex. 4G, ~ 10s Mbps
- **satélite**
 - canal de até 50Mbps (ou múltiplos canais menores)
 - atraso de propagação de 270 mseg (fim-a-fim)
 - geoestacionários versus de baixa altitude (LEOS)

Meios Físicos: Satélites de Baixa Órbita - Iridium



Projeto original:

77 satélites

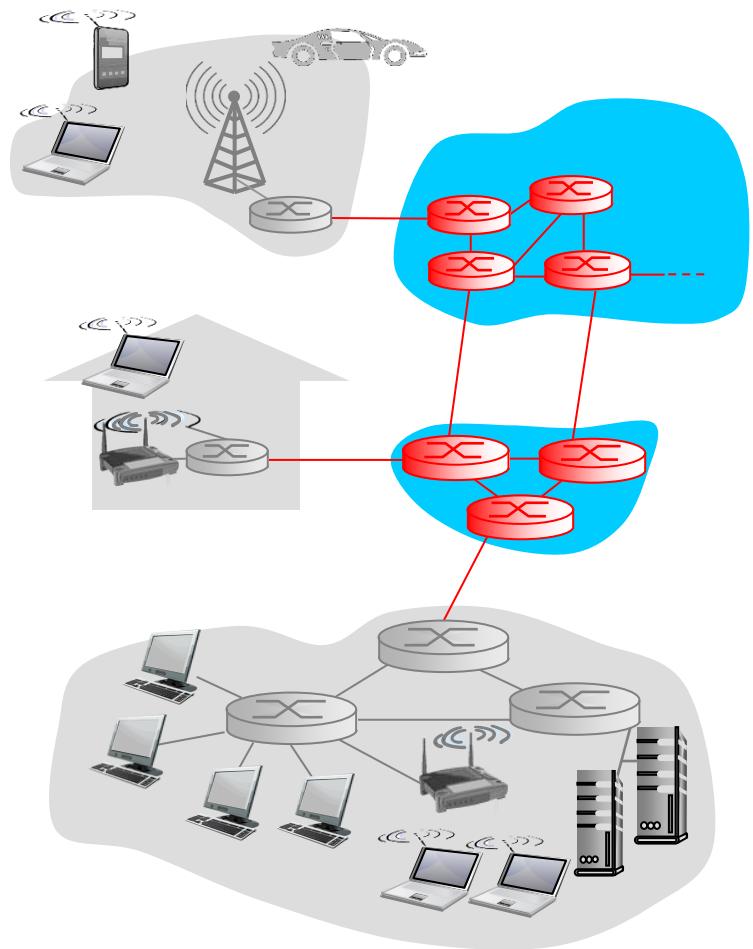
Nº atômico do Irídio

Projeto implementado:

66 satélites

O Núcleo da Rede

- *Malha de roteadores interconectados*
- *Comutação de pacotes: hospedeiros quebram mensagens da camada de aplicação em pacotes*
 - ✓ repassa os pacotes de um roteador para o próximo, através de enlaces no caminho da origem até o destino
 - ✓ cada pacote é transmitido na capacidade máxima do enlace.



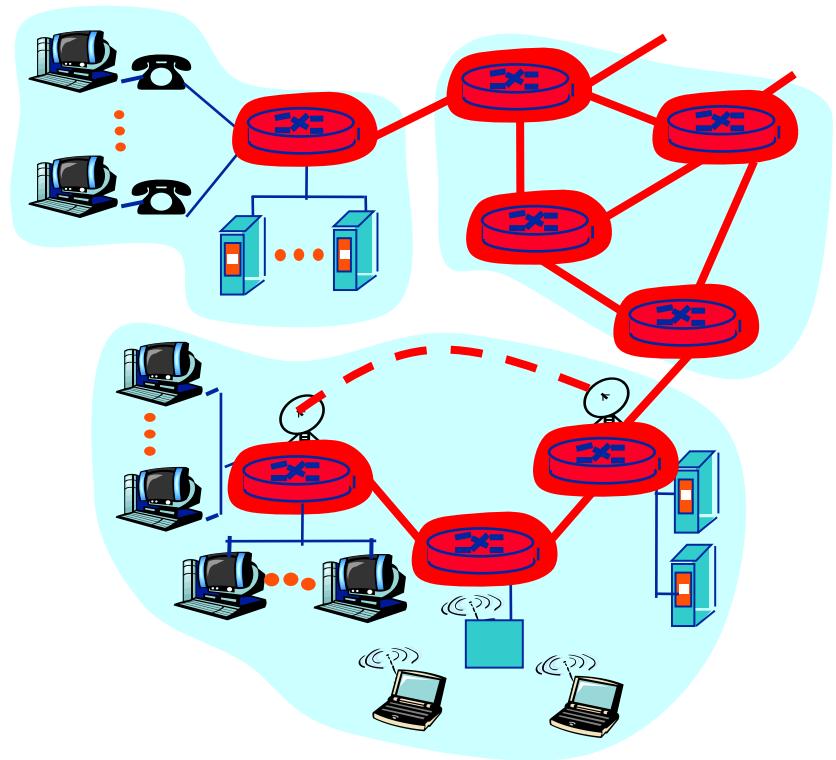
O Núcleo da Rede

Pergunta fundamental:

Como os dados são transferidos através da rede?

- **comutação de circuitos:** circuito dedicado para cada conexão. Ex: rede telefônica (normalmente não usada em redes de computadores)

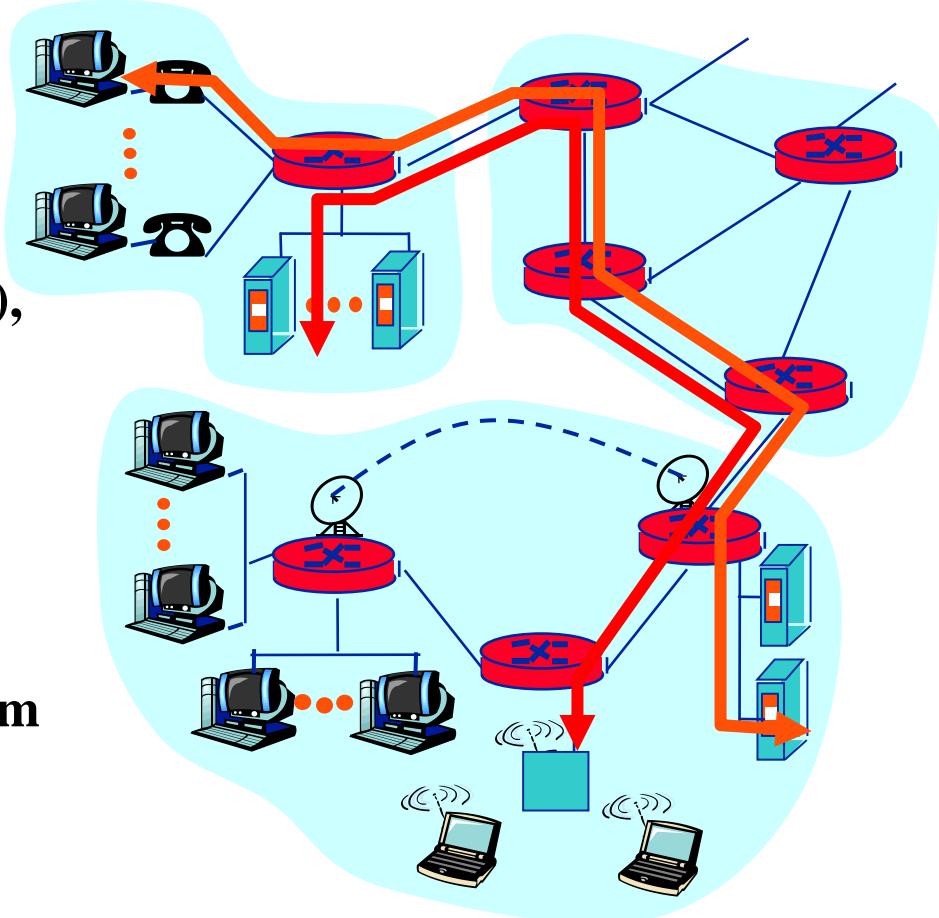
- **comutação de pacotes:** os dados são enviados através da rede em blocos (pedaços) de dados que podem seguir caminhos diferentes.



Comutação de Circuitos

Recursos fim a fim são reservados para a chamada.

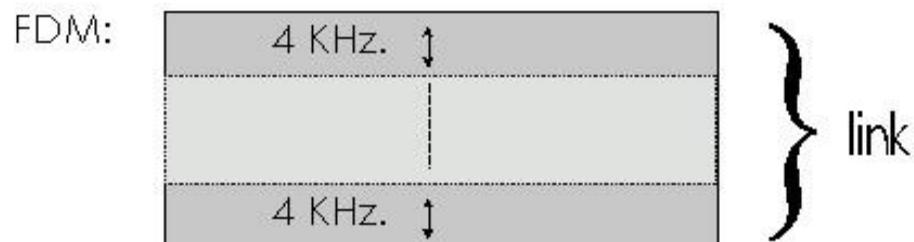
- banda do enlace (taxa de transmissão), capacidade dos comutadores
- recursos dedicados: sem compartilhamento
- desempenho (QoS) garantido (como em um circuito físico)
- necessita estabelecimento de conexão



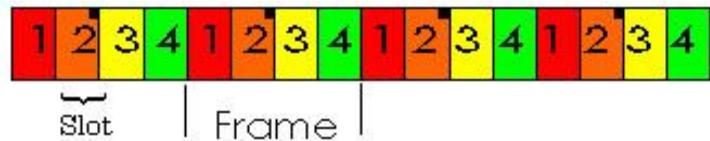
Comutação de Circuitos

Recursos da rede (por ex., banda) são divididos em “pedaços”

- pedaços alocados às chamadas
- o pedaço do recurso fica *ocioso* se não for usado pelo seu dono (*não há compartilhamento*)
- formas de divisão da banda de um canal em “pedaços” (*multiplexação*):
 - divisão de frequência (FDM)
 - divisão de tempo (TDM)



TDM:



All slots labelled **2** are dedicated to a specific sender-receiver pair.

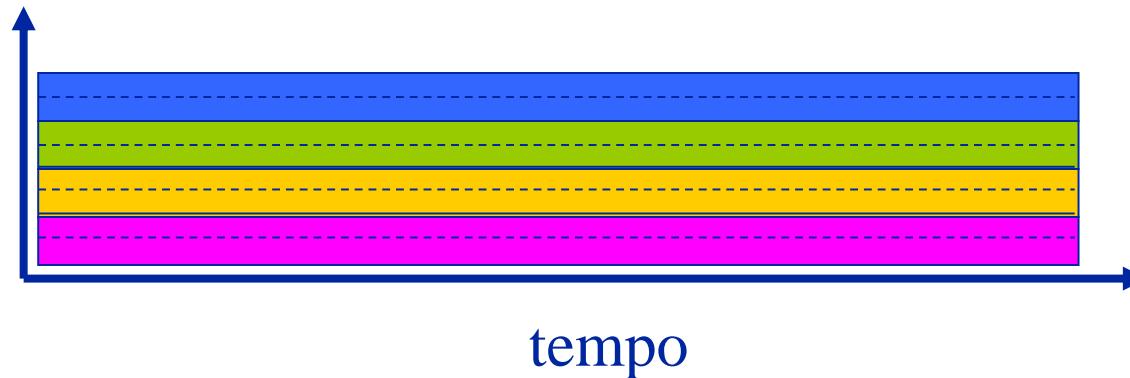
Comutação de Circuitos: FDM e TDM

FDM

freqüência

Exemplo:

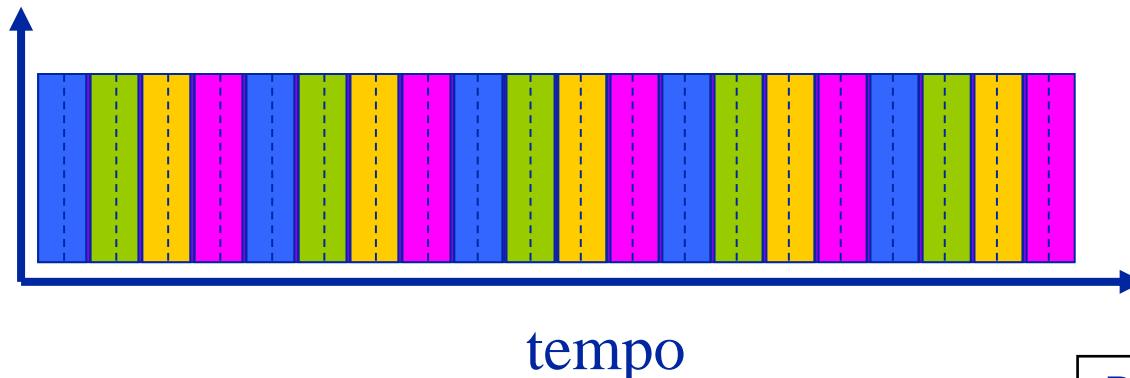
4 usuários



TDM

freqüência

tempo



Exemplo numérico

Quanto tempo leva para enviar um arquivo de 640K bits do hospedeiro A para o hospedeiro B numa rede de comutação de circuitos?

- ✓ Todos os enlaces possuem 1.536 Mbps
- ✓ Cada enlace utiliza TDM com 24 slots
- ✓ 500 mseg para estabelecer um circuito fim-a-fim.

Calcule!

Comutação de Pacotes

Cada fluxo de dados fim-a-fim é dividido em pacotes

- Os recursos da rede são compartilhados entre os usuários
- cada pacote usa toda a banda do canal
- recursos são usados *quando necessário*

Divisão da banda em “pedaços”

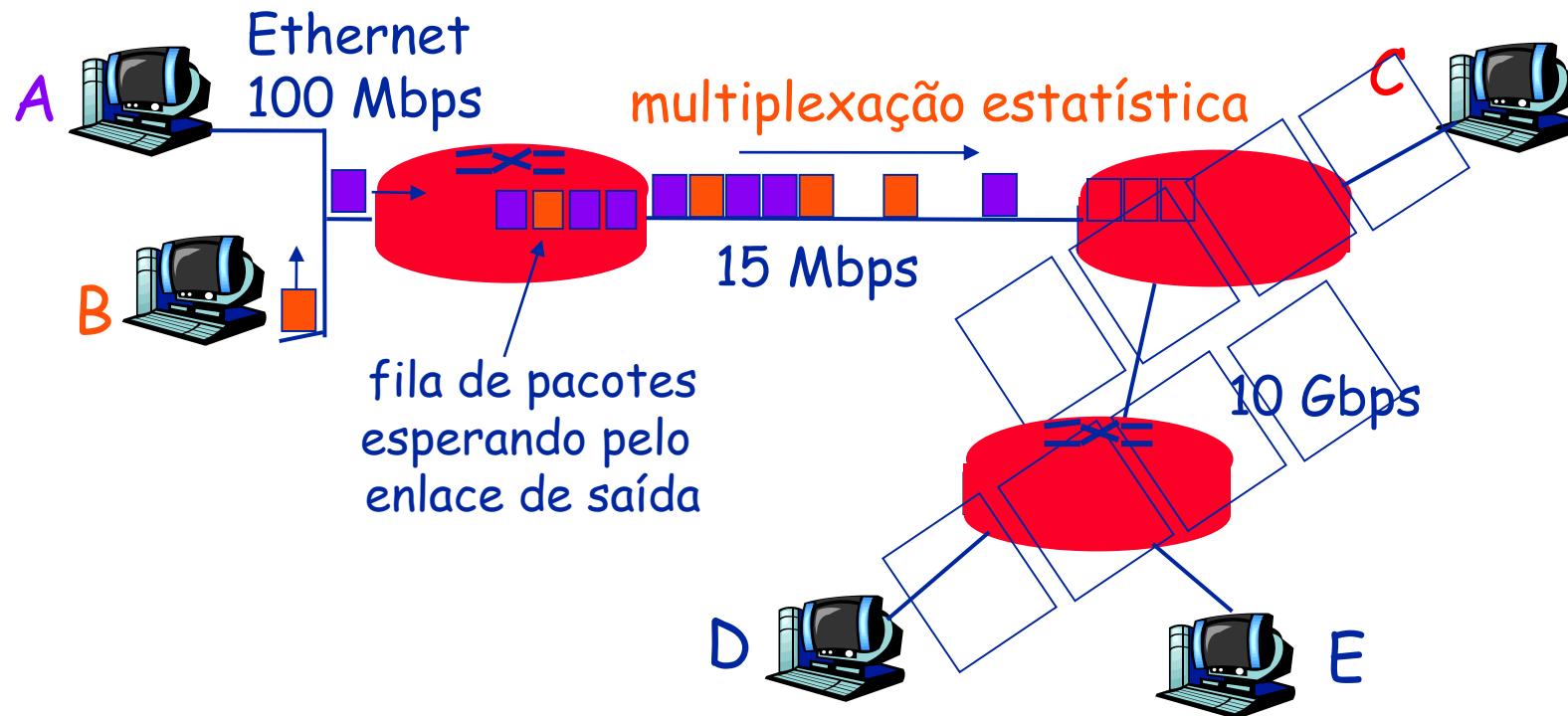
Alocação dedicada

Reserva de recursos

Disputa por recursos:

- a demanda total pelos recursos pode superar a quantidade disponível
- congestionamento: pacotes são enfileirados, esperando para usar o enlace
- armazena e retransmite: pacotes se deslocam um salto (*hop*) por vez
 - transmite num enlace
 - espera a vez no próximo enlace
 - o nó recebe o pacote completo antes de encaminhá-lo

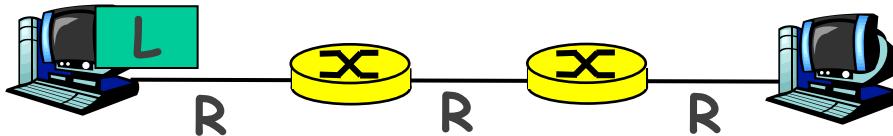
Comutação de Pacotes: Multiplexação Estatística



A seqüência de pacotes A e B não possui padrão constante
multiplexação estatística

Comutação de pacotes: existe analogia humana? Ex: correios

Comutação de Pacotes: armazena-e-reenvia



Leva L/R segundos para transmitir um pacote de L bits em um enlace de R bps

Todo o pacote deve chegar ao roteador antes que possa ser transmitido no próximo enlace: *armazena e reenvia*

$$\text{atraso} = 3L/R$$

(assumindo que o atraso de propagação e de processamento em cada nó sejam desprezíveis!)

Exemplo:

$$L = 7,5 \text{ Mbits}$$

$$R = 1,5 \text{ Mbps}$$

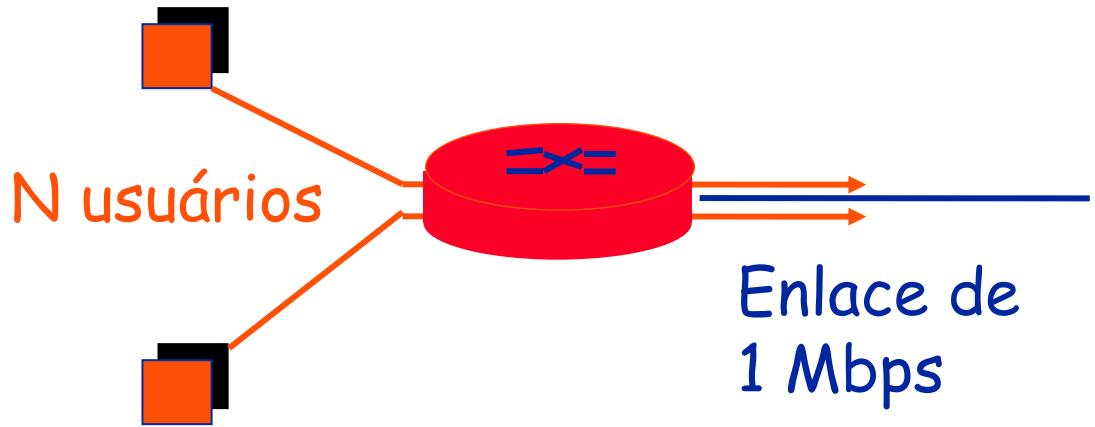
$$\text{atraso em cada etapa} = 5 \text{ seg}$$

$$\text{atraso fim-a-fim} = 15 \text{ seg}$$

Comutação de pacotes x Comutação de circuitos

A comutação de pacotes permite que mais usuários usem a rede!

- Enlace de 1 Mbps
- cada usuário:
 - 100Kbps quando “ativo”
 - ativo 10% do tempo
- comutação por circuitos:
 - 10 usuários
- comutação por pacotes:
 - com 35 usuários, probabilidade > 10 ativos menor que 0,0004



Comutação de pacotes x Comutação de circuitos

A comutação de pacotes é sempre mais vantajosa?

Ótima para dados em surtos

- melhor compartilhamento dos recursos
- não necessita estabelecimento de conexão

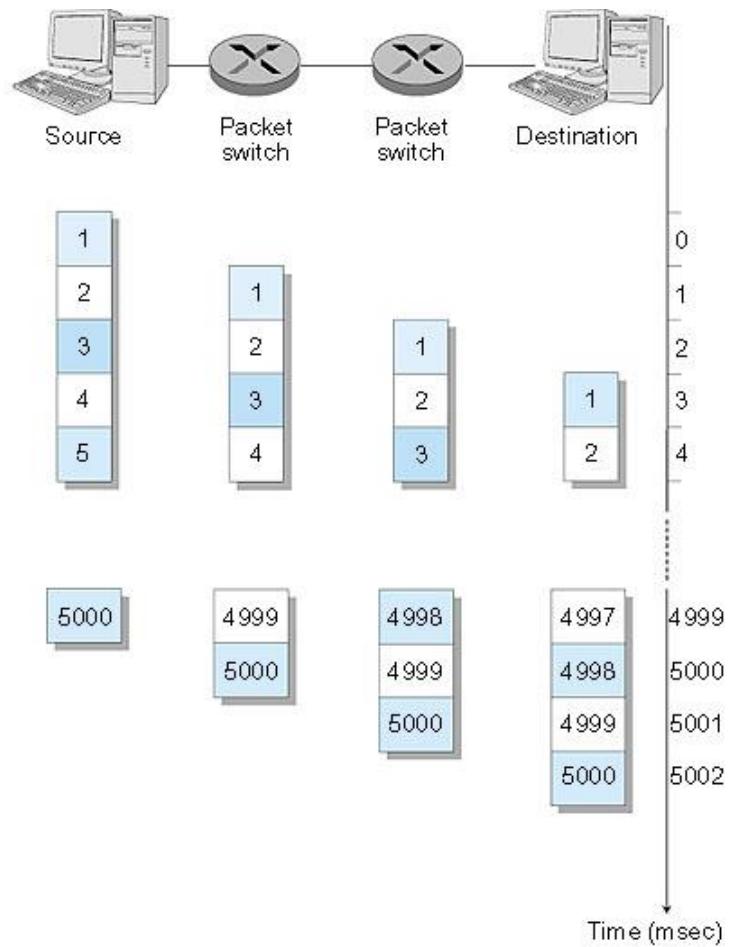
Quando o congestionamento é excessivo ⇒ atraso e perda de pacotes

- necessita de protocolos para transferência confiável de dados e controle de congestionamento

P: Como fornecer um comportamento do tipo circuito?

- ✓ São necessárias garantias de banda para aplicações de áudio e vídeo
- ✓ ainda é um problema a ser resolvido

Comutação de pacotes: Segmentação de mensagens



Quebre agora a mensagem em 5.000 pacotes

- Cada pacote com 1.500 bits
- 1 mseg para transmitir um pacote em um canal
- **Paralelismo (*pipelining*):** cada canal funciona em paralelo
- Atraso reduzido de 15 seg para 5,002 seg

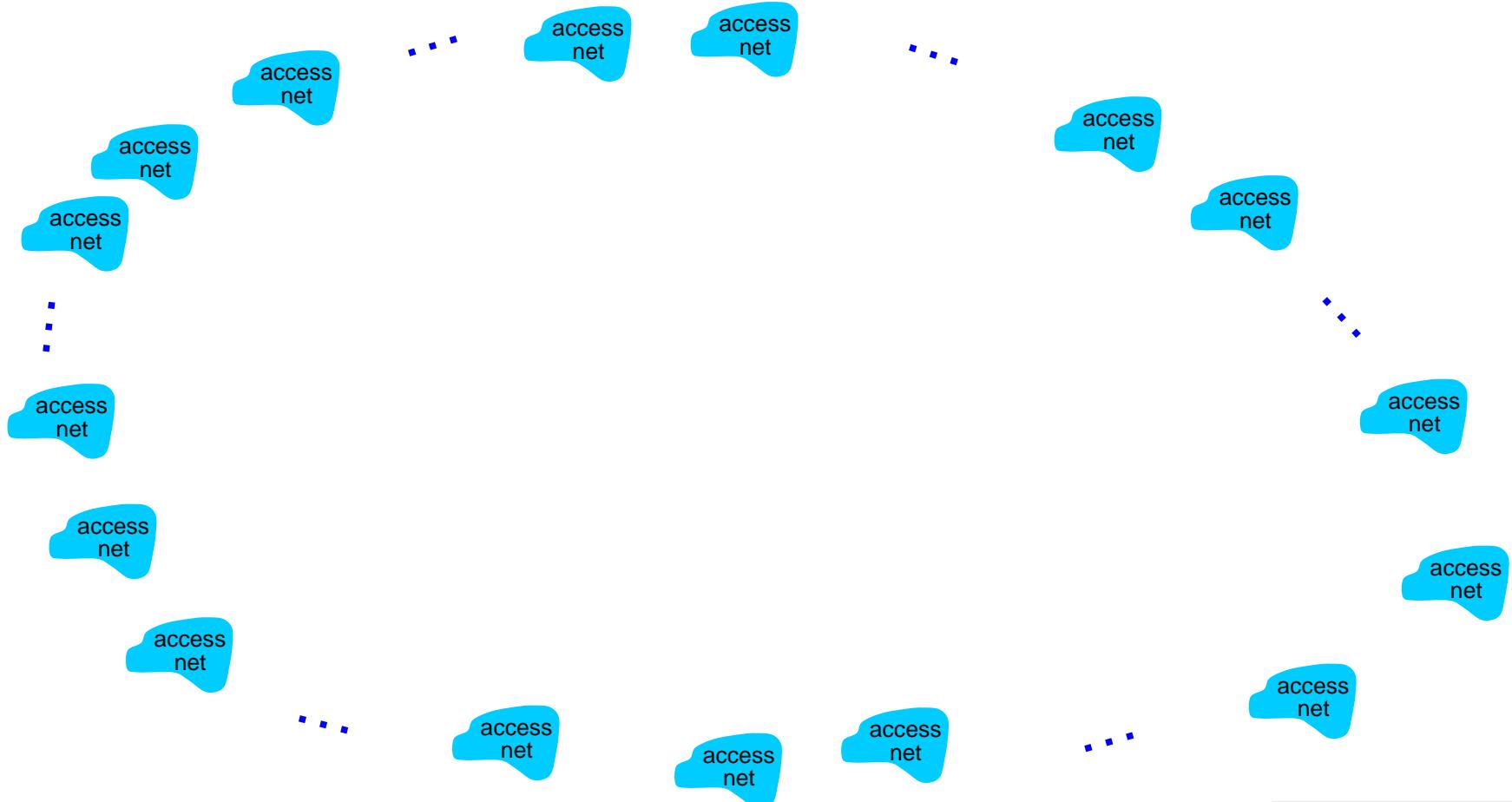
Estrutura da Internet: rede de redes

- Sistemas finais se conectam com a Internet via *pontos de acesso* (ISPs ou Internet Service Providers)
 - residenciais, de empresas ou ISPs de universidades
- Os ISPs, por sua vez, devem ser interconectados
 - tal que 2 hosts possam enviar pacotes um para o outro
- A rede de redes resultante é bem complexa
 - a evolução da estrutura da Internet “guiada” por aspectos econômicos e políticas nacionais

Vamos fazer uma abordagem gradual para descrever a estrutura atual da Internet

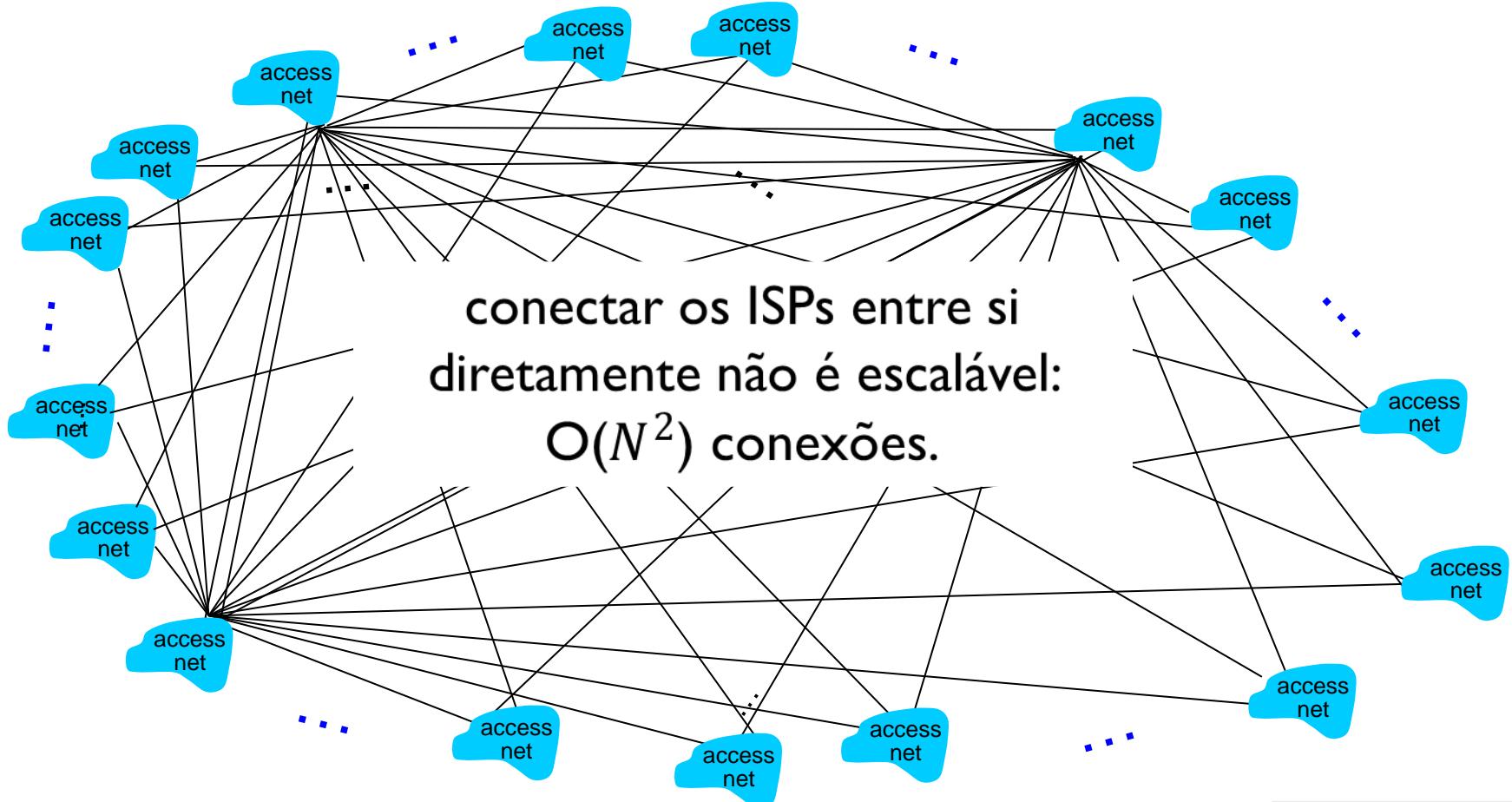
Estrutura da Internet: rede de redes

Pergunta: Dados milhões de ISPs, como conectá-los?



Estrutura da Internet: rede de redes

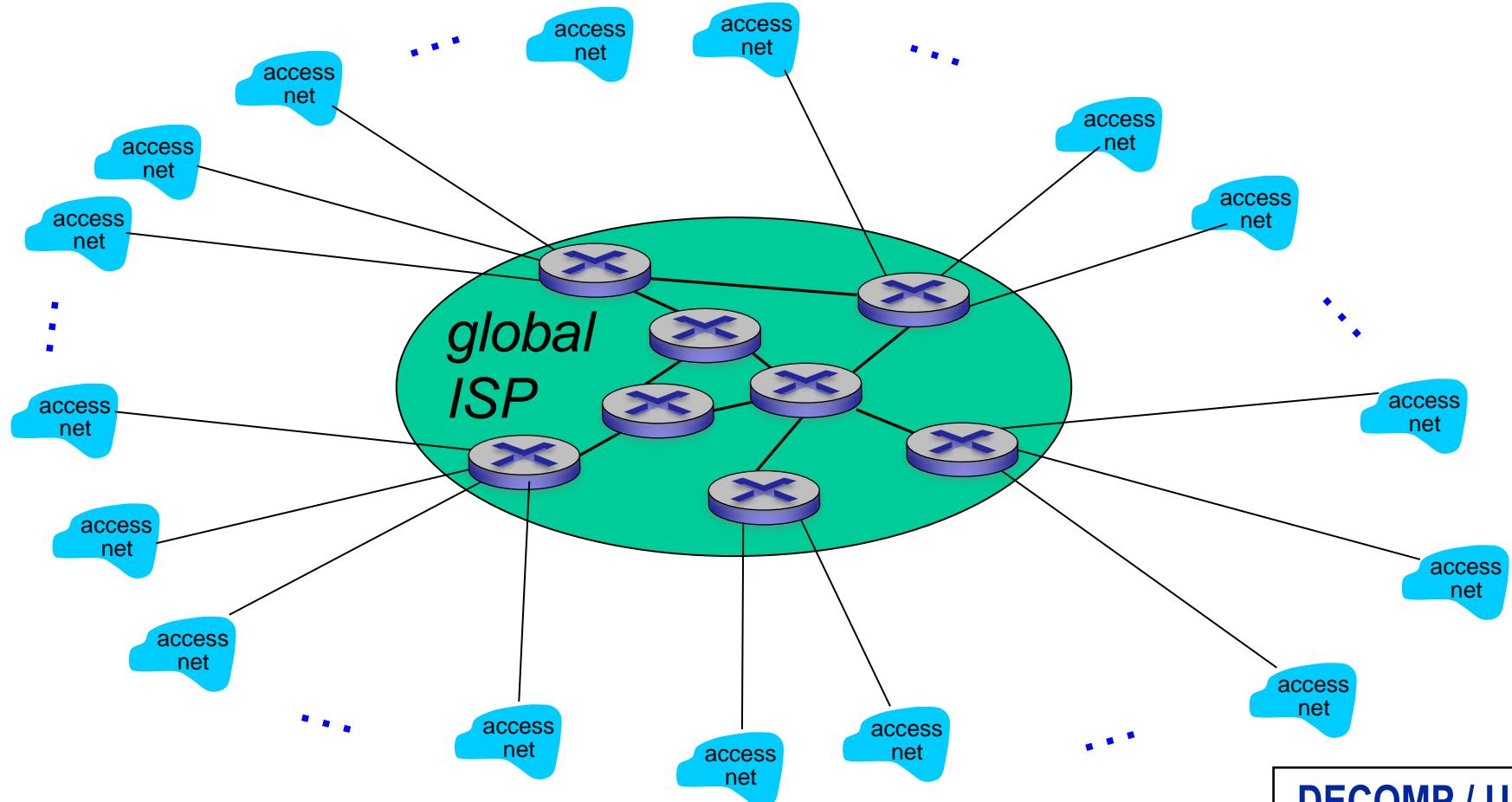
Opção: conectar cada ISP com todos os outros?



Estrutura da Internet: rede de redes

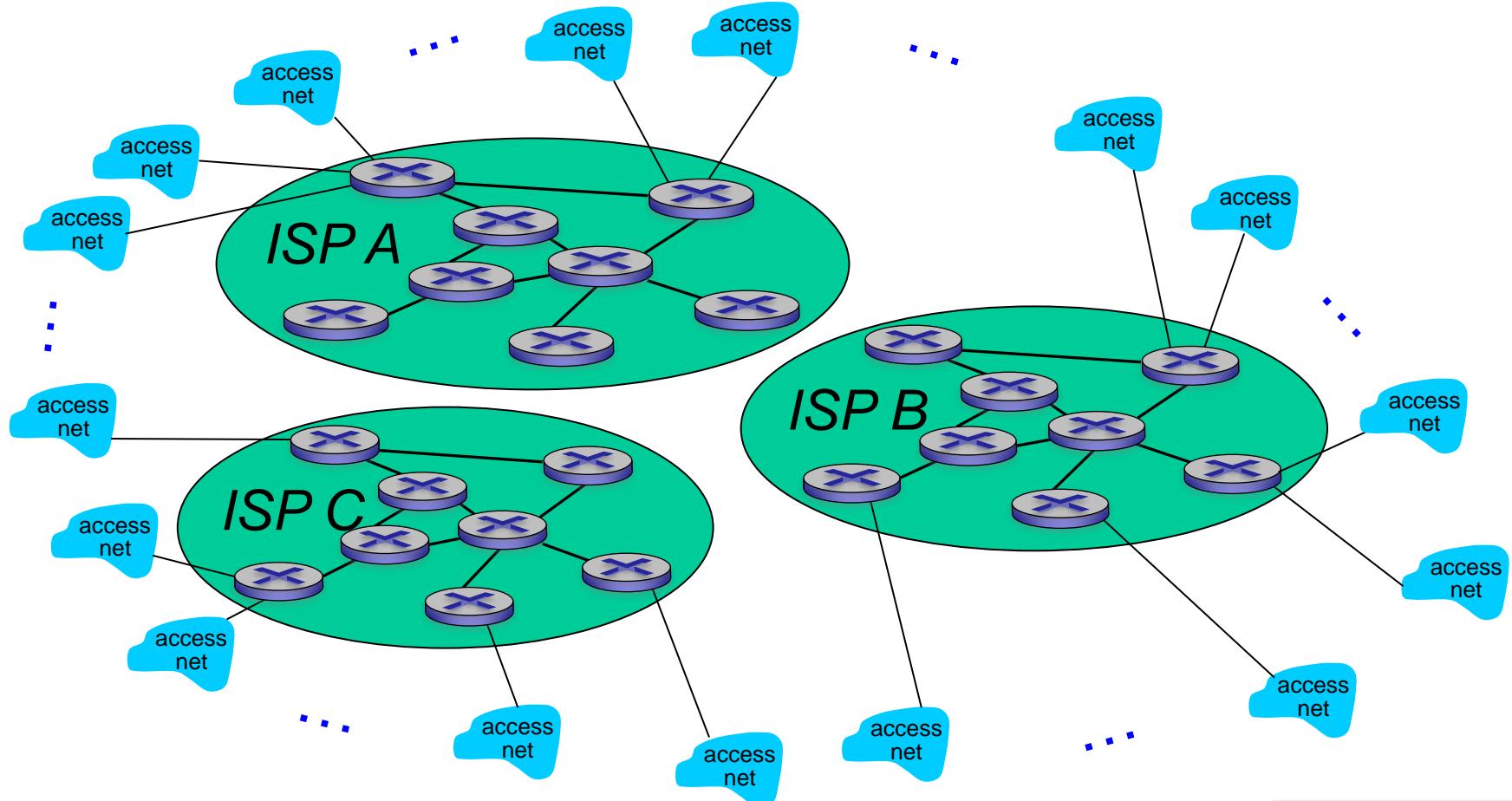
Alternativa: conectar cada ISP a um ISP de trânsito global?

Provedores dos clientes e provedores globais teriam acordo econômico...



Estrutura da Internet: rede de redes

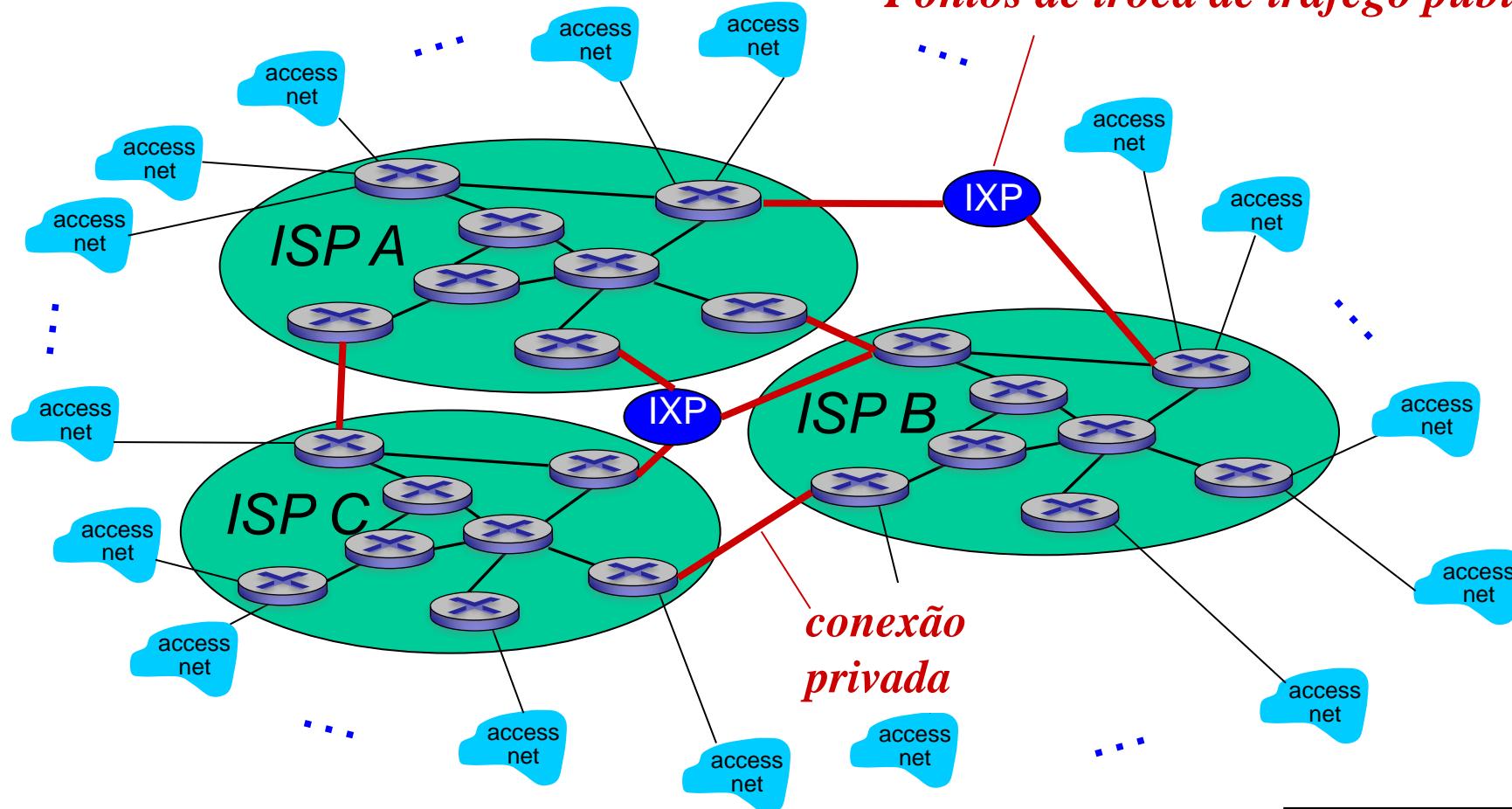
Mas se um ISP global for um negócio viável, haverá concorrentes...



Estrutura da Internet: rede de redes

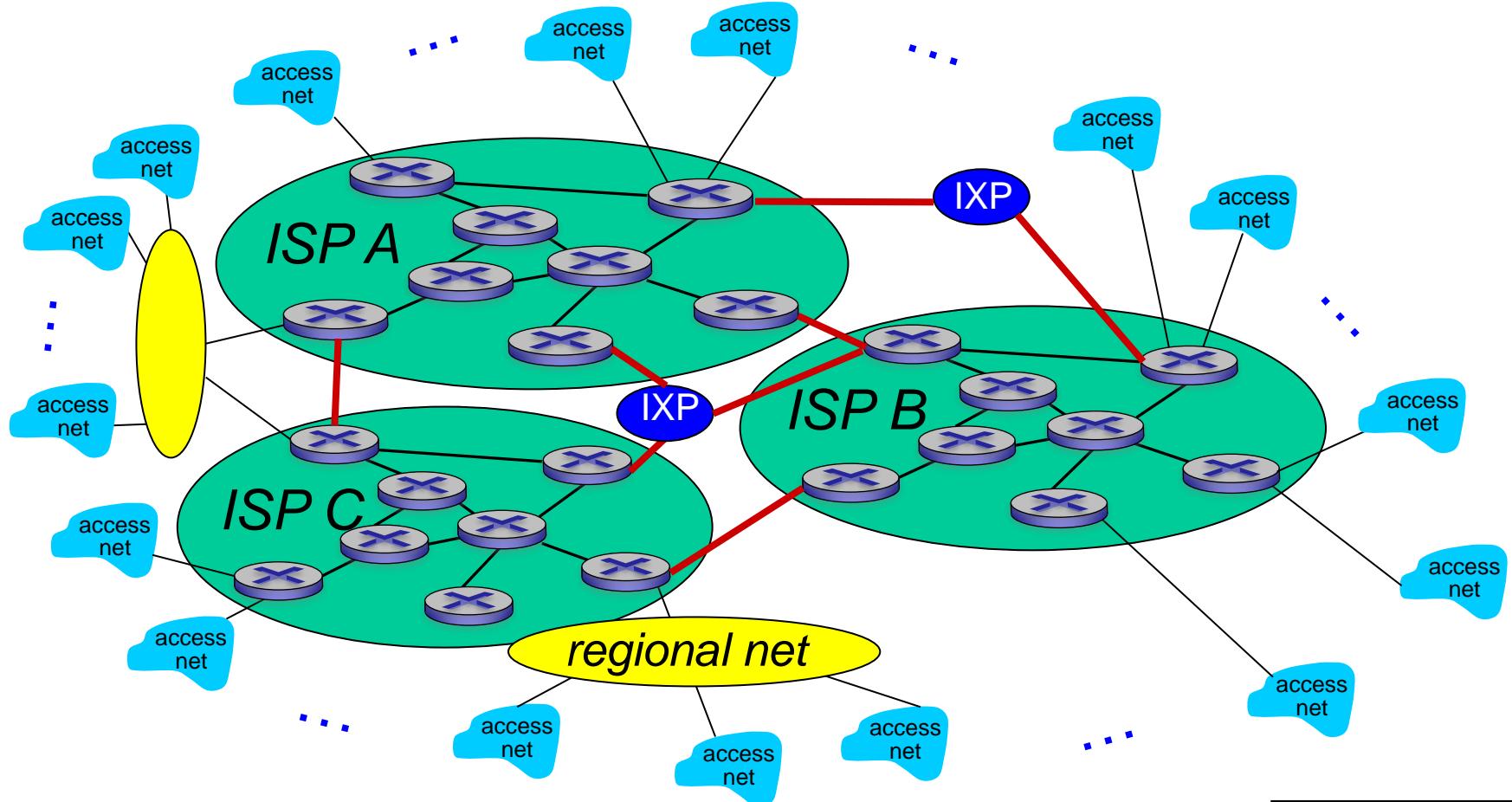
.... que devem ser interligados!

Pontos de troca de tráfego públicos



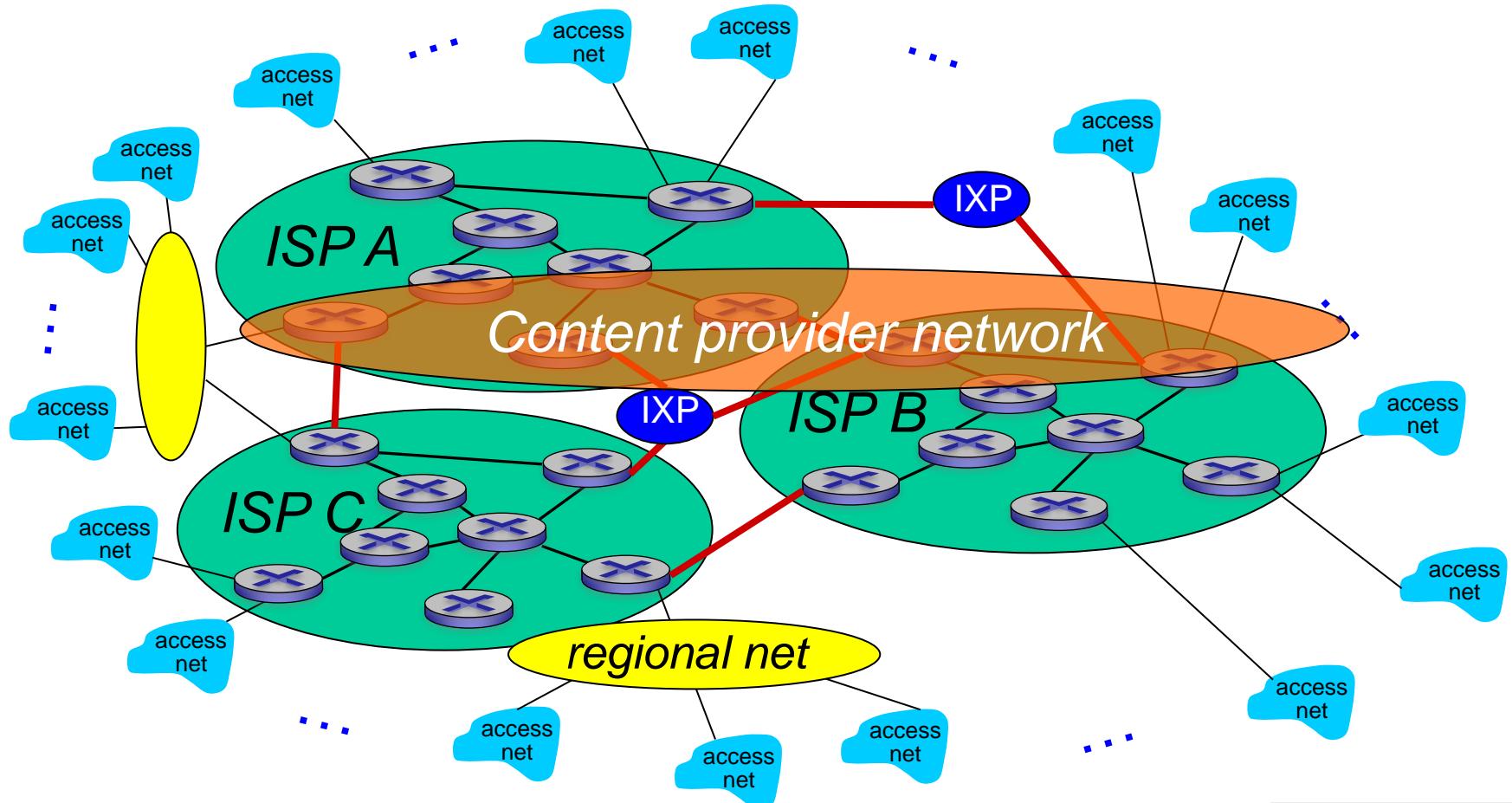
Estrutura da Internet: rede de redes

... e ISPs regionais podem surgir para conectar redes de acesso aos ISPs globais

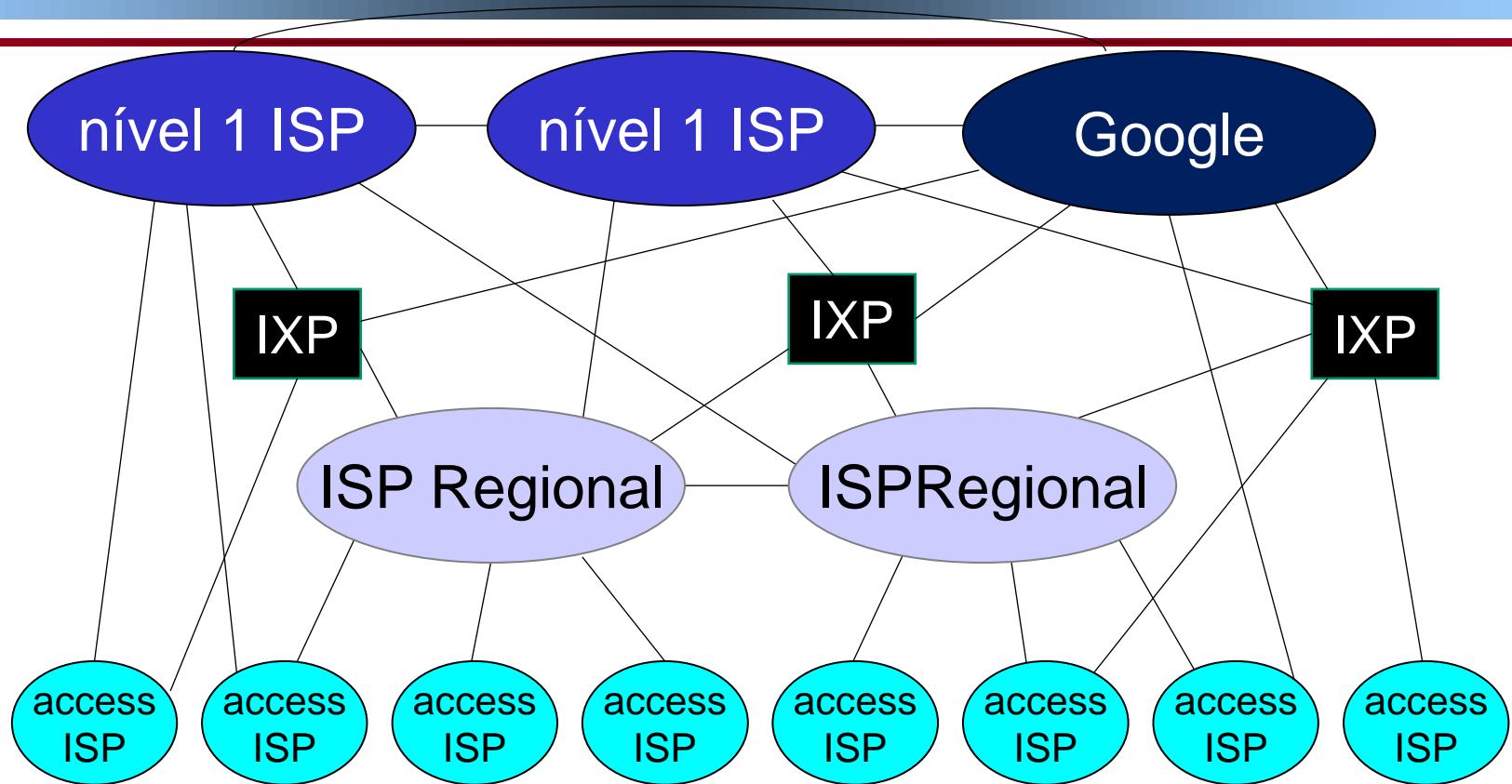


Estrutura da Internet: rede de redes

... e redes de provedores de conteúdo (por exemplo, Google, Microsoft) podem executar sua própria rede para trazer serviços e conteúdo próximo aos usuários finais



Estrutura da Internet: rede de redes



No centro: pequeno número de grandes redes bem conectadas

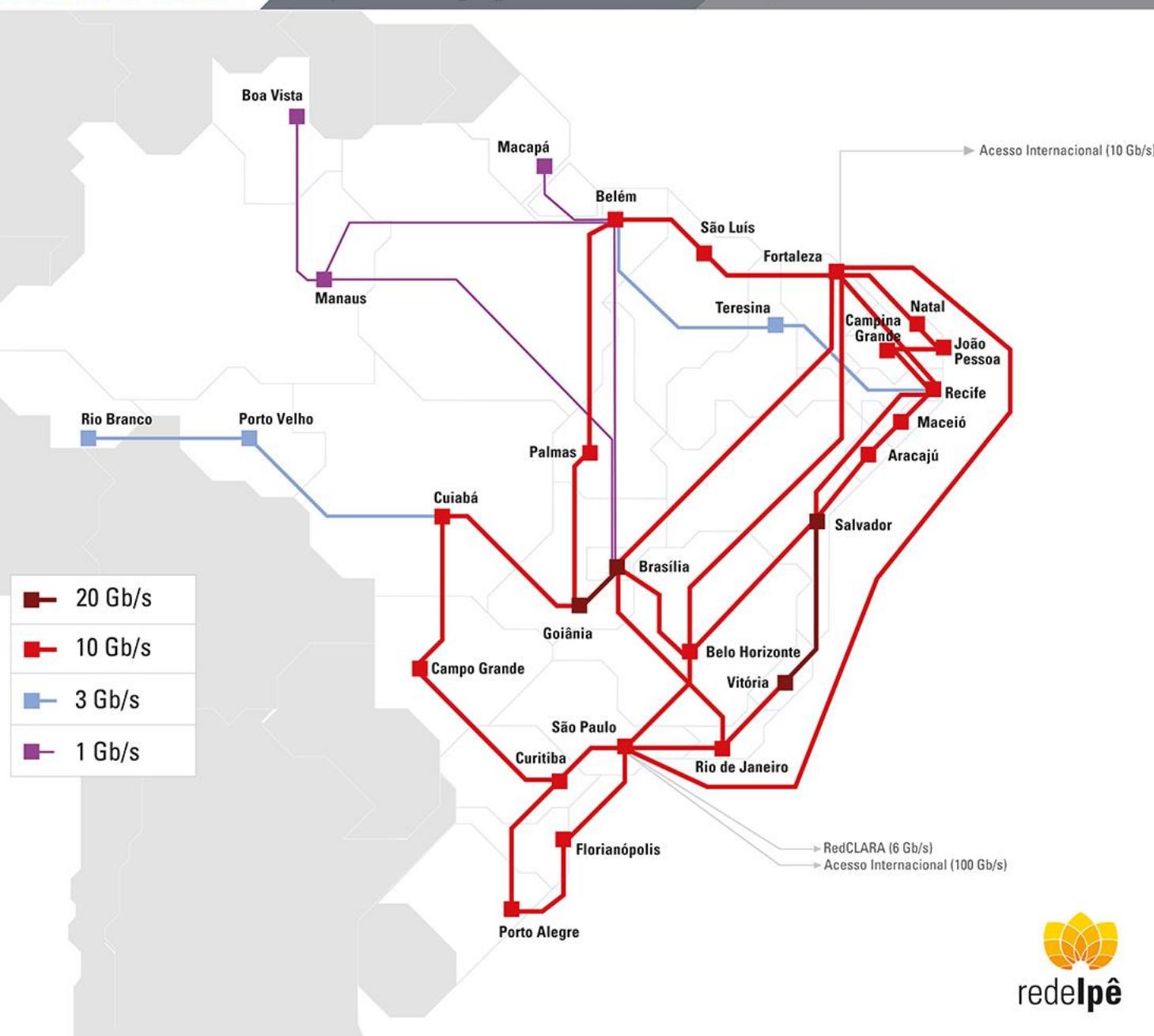
"tier-1" commercial ISPs (ex., Embratel, RNP, AT&T), cobertura nacional e internacional

content provider network (rede provedora de conteúdo, por ex., Google): rede privada que conecta os centros de dados à Internet, muitas vezes ignorando os ISPs de nível 1 e regionais

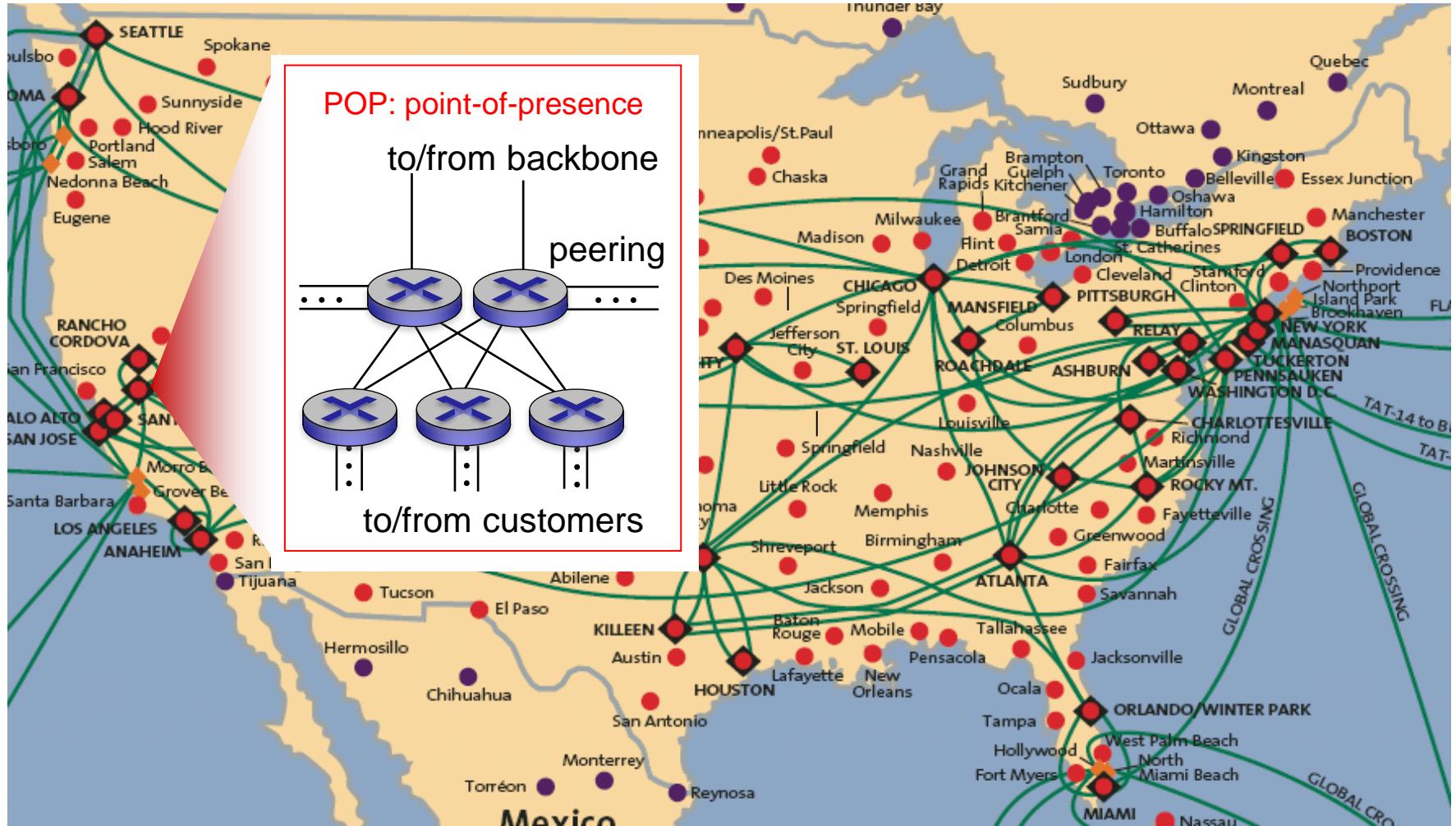
Conexão em 2016

capacidade agregada 347 Gb/s

capacidade internacional 116 Gb/s

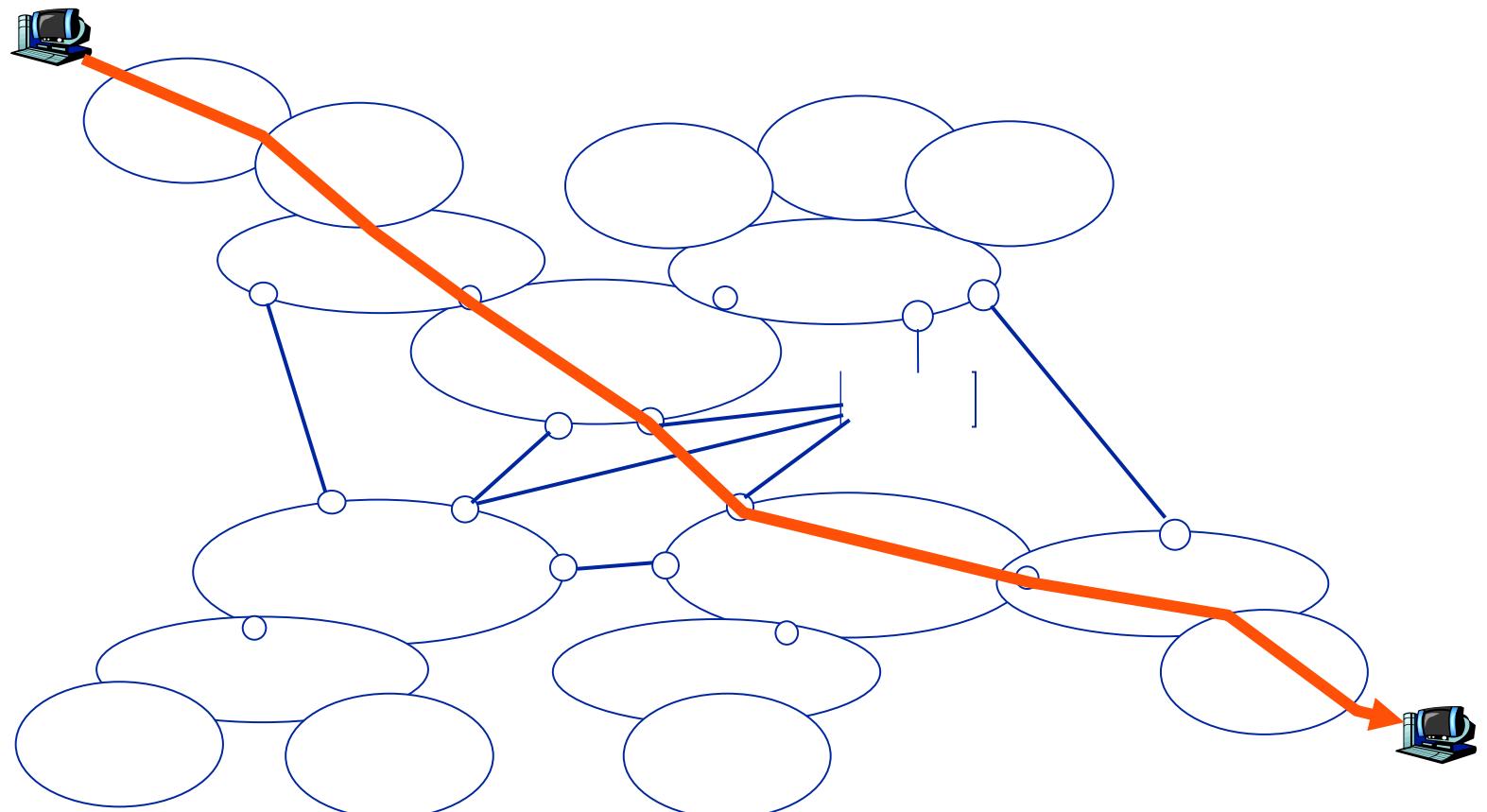


ISP de nível 1: por ex., Sprint (2019)



Estrutura da Internet: rede de redes

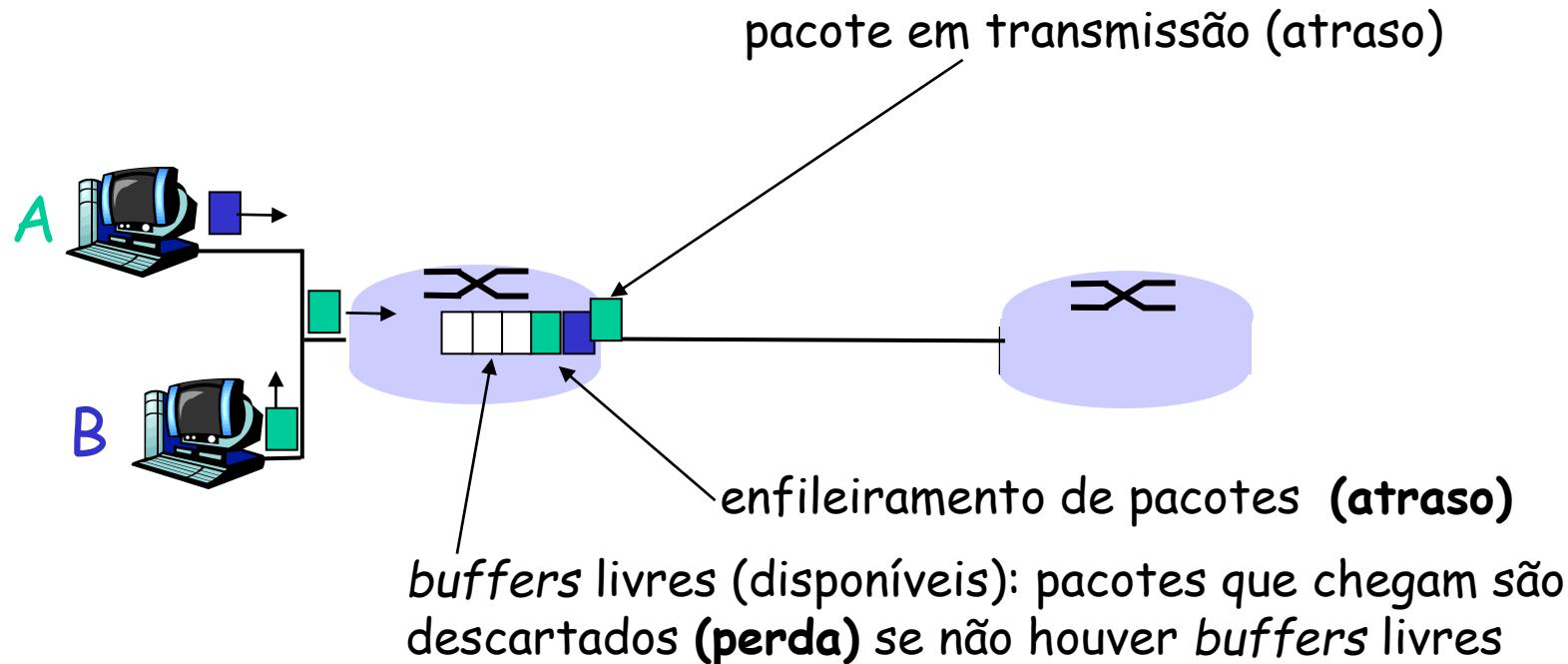
Um pacote passa através de várias redes!



Como ocorrem as perdas e atrasos?

Pacotes enfileiram nos buffers do roteador

- *taxa de chegada de pacotes ao enlace excede a capacidade do enlace de saída.*
- *pacotes enfileiram, esperam pela vez*



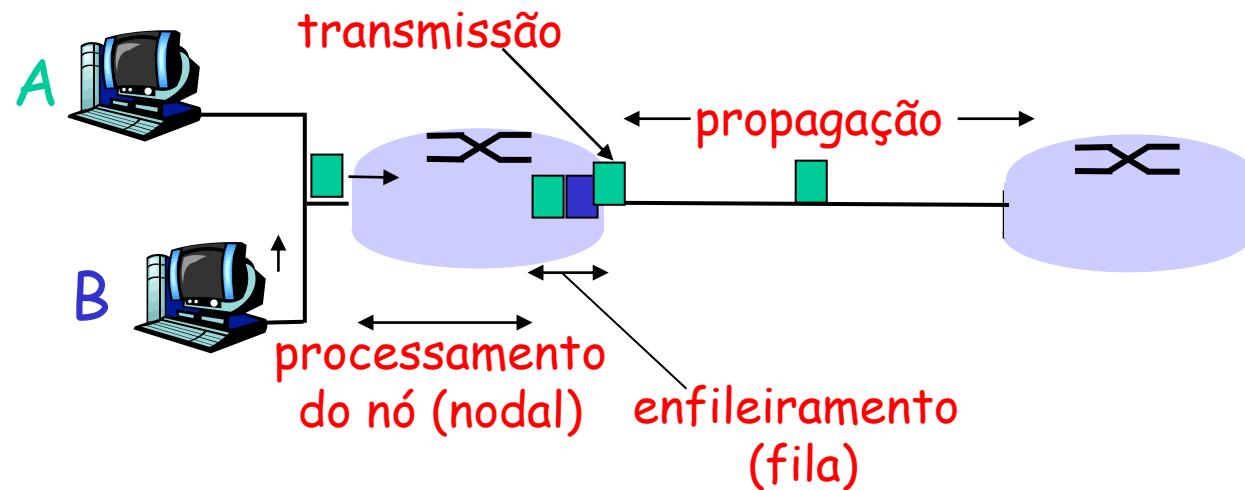
Atraso dos pacotes: quatro fontes

1. processamento do nó:

- verificação de bits errados
- identificação do enlace de saída
- tipicamente < mseg

2. Enfileiramento (duas filas)

- 1^a fila: tempo de espera no buffer do roteador até o seu processamento
- 2^a fila: tempo de espera no buffer de saída até ser transmitido
- depende do nível de congestionamento do roteador



Atraso em redes comutadas por pacotes

3. Atraso de transmissão:

R = largura de banda do enlace (bps)

L = compr. do pacote (bits)

L/R = tempo para enviar os bits no enlace

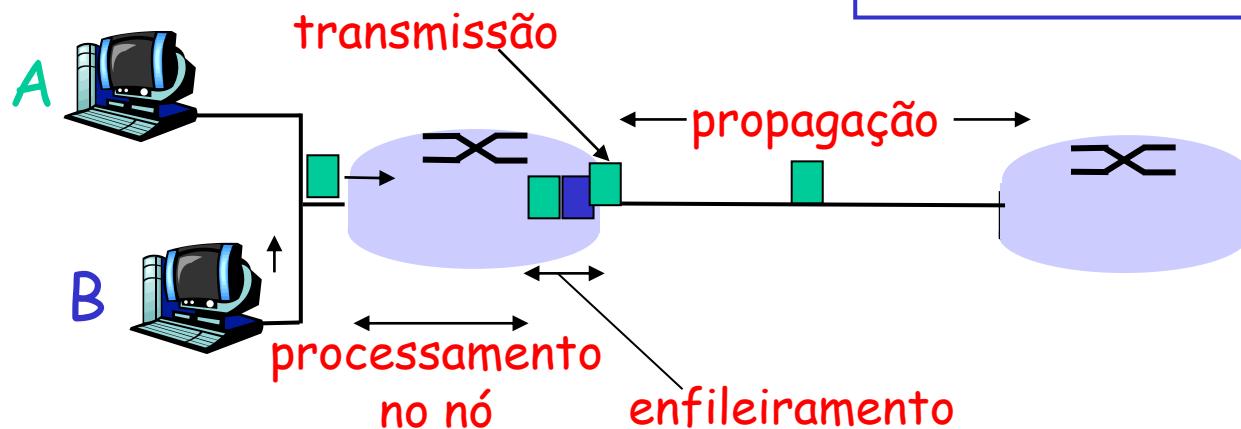
4. Atraso de propagação:

d = compr. do enlace

s = velocidade de propagação no meio ($\sim 2 \times 10^8$ m/seg)

d/s = atraso de propagação

Nota: s e R são valores muito diferentes!



Atraso fim-a-fim

Atraso em um nó

$$d_{nodal} = d_{proc} + d_{queue} + d_{trans} + d_{prop}$$

- d_{proc} - tipicamente alguns microsecs ou menos
- d_{queue} - depende do congestionamento
- $d_{trans} = L/R$, depende da largura de banda do enlace de saída. Pode ser significativo para enlaces de saída de baixa velocidade
- d_{prop} = poucos microsecs a dezenas de msec

Atraso fim-a-fim

$$d_{total} = N(d_{proc} + d_{trans} + d_{prop})$$

- **assumindo que o atraso de enfileiramento é desprezível (rede sem congestionamento)**
- pacote passa por $N-1$ roteadores intermediários

atraso de transmissão x atraso de propagação

Transmissão: quanto tempo se gasta para o transmissor colocar todos os bits no meio

- depende da taxa de transmissão do enlace e do tamanho do pacote

Propagação: quanto tempo um bit demora para chegar ao outro lado do enlace

- depende da distância entre origem e destino

P: *Qual dos dois será o fator dominante?*

Analisar duas situações especiais:

- pacotes muito longos e enlaces de curta distância
- pacotes curtos e enlaces de longa distância

atraso de transmissão x atraso de propagação

- pacotes muito longos e enlaces de curta distância:

atraso de transmissão domina

- pacotes curtos e enlaces de longa distância:

atraso de propagação domina

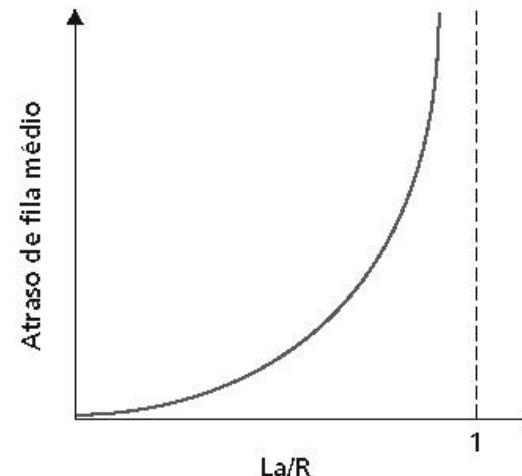
Atraso de enfileiramento

R = largura de banda do enlace (bps)

L = comprimento do pacote (bits)

a = taxa média de chegada de pacotes

intensidade de tráfego = La/R



- $La/R \sim 0$: pequeno atraso de enfileiramento
- $La/R \rightarrow 1$: grande atraso
- $La/R > 1$: chega mais “trabalho” do que a capacidade de atendimento, atraso médio infinito! (assumindo capacidade da fila infinita!)



$La/R \sim 0$



$La/R \rightarrow 1$

Atrasos e rotas reais na Internet

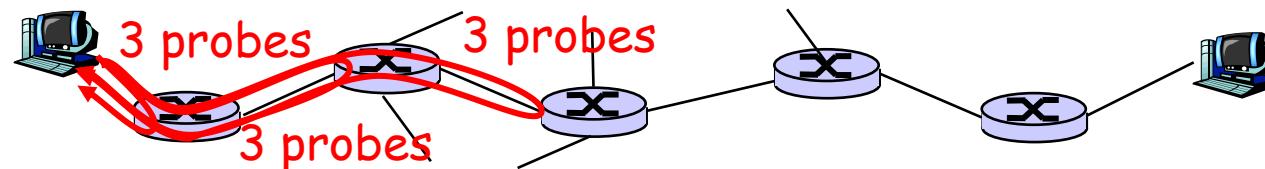
Como são os atrasos e as perdas reais da Internet?

Programa ***Traceroute*** :

fornece medições de atraso da fonte até os diversos roteadores ao longo do caminho fim-a-fim até o destino.

Para cada i :

- Envia três pacotes que alcançarão o roteador i no caminho até o destino (3 experimentos distintos)
- O roteador i devolverá os pacotes ao transmissor
- O transmissor calcula o intervalo de tempo decorrido entre a transmissão e a recepção das respostas



Atrasos e rotas “reais”

traceroute: gaia.cs.umass.edu para www.eurocom.fr

Três medições de atraso de
gaia.cs.umass.edu p/cs-gw.cs.umass.edu



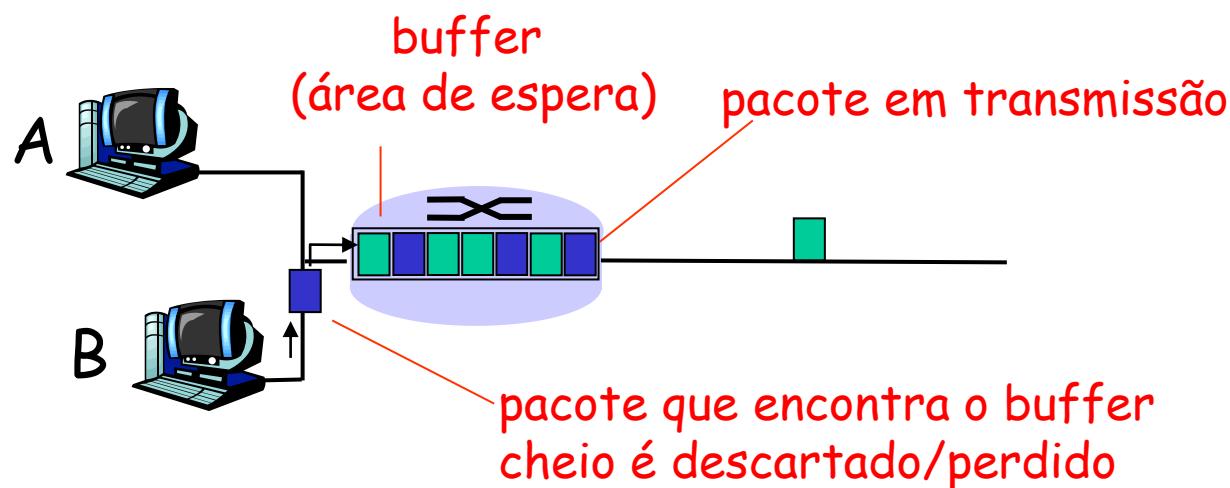
1	cs-gw (128.119.240.254)	1 ms	1 ms	2 ms
2	border1-rt-fa5-1-0.gw.umass.edu (128.119.3.145)	1 ms	1 ms	2 ms
3	cht-vbns.gw.umass.edu (128.119.3.130)	6 ms	5 ms	5 ms
4	jn1-at1-0-0-19.wor.vbns.net (204.147.132.129)	16 ms	11 ms	13 ms
5	jn1-so7-0-0-0.wae.vbns.net (204.147.136.136)	21 ms	18 ms	18 ms
6	abilene-vbns.abilene.ucaid.edu (198.32.11.9)	22 ms	18 ms	22 ms
7	nycm-wash.abilene.ucaid.edu (198.32.8.46)	22 ms	22 ms	22 ms
8	62.40.103.253 (62.40.103.253)	104 ms	109 ms	106 ms
9	de2-1.de1.de.geant.net (62.40.96.129)	109 ms	102 ms	104 ms
10	de.fr1.fr.geant.net (62.40.96.50)	113 ms	121 ms	114 ms
11	renater-gw.fr1.fr.geant.net (62.40.103.54)	112 ms	114 ms	112 ms
12	nio-n2.cssi.renater.fr (193.51.206.13)	111 ms	114 ms	116 ms
13	nice.cssi.renater.fr (195.220.98.102)	123 ms	125 ms	124 ms
14	r3t2-nice.cssi.renater.fr (195.220.98.110)	126 ms	126 ms	124 ms
15	eurecom-valbonne.r3t2.ft.net (193.48.50.54)	135 ms	128 ms	133 ms
16	194.214.211.25 (194.214.211.25)	126 ms	128 ms	126 ms
17	* * *			
18	* * *			
19	fantasia.eurecom.fr (193.55.113.142)	132 ms	128 ms	136 ms

* sem resposta (pacote perdido, roteador não responde)

link transoceânico

Perda de pacotes

- filas (buffers) dos roteadores possuem capacidade finita
- quando um pacote chega numa fila cheia, o pacote é descartado (perdido)
- o pacote perdido pode ser retransmitido pelo nó anterior, pelo sistema origem, ou não ser retransmitido
- é uma medida de desempenho da rede (juntamente com o atraso fim-a-fim)

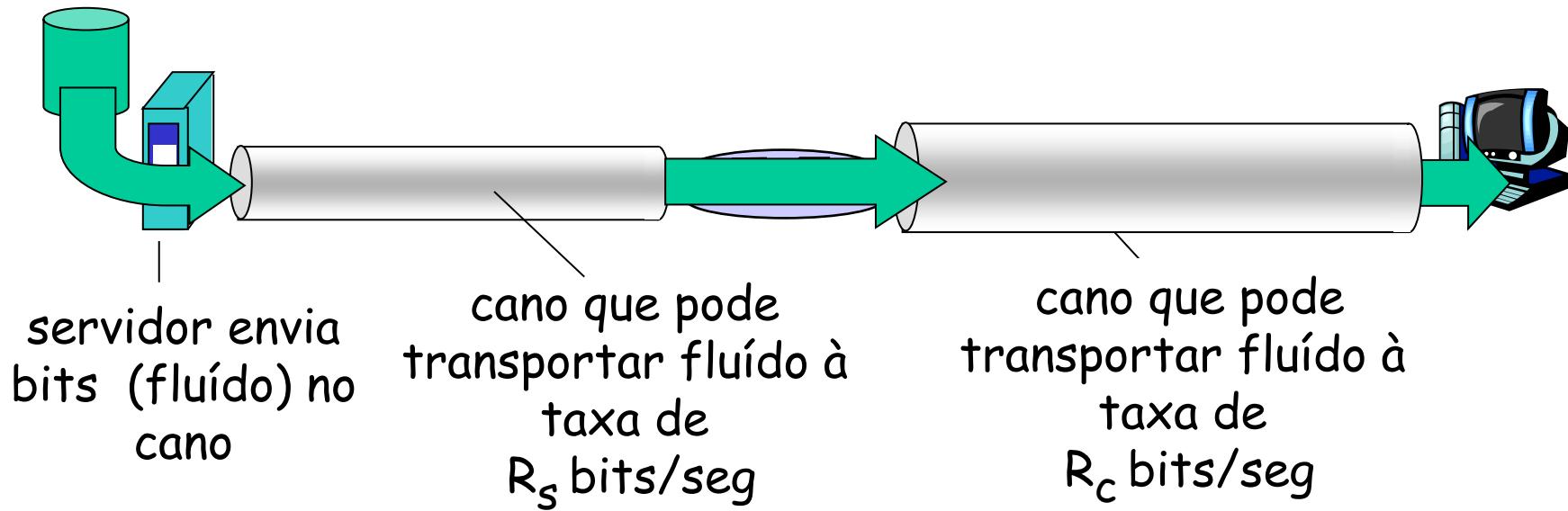


Vazão (*Throughput*)

vazão: taxa (bits/unidade de tempo) na qual os bits são transferidos entre o transmissor e o receptor

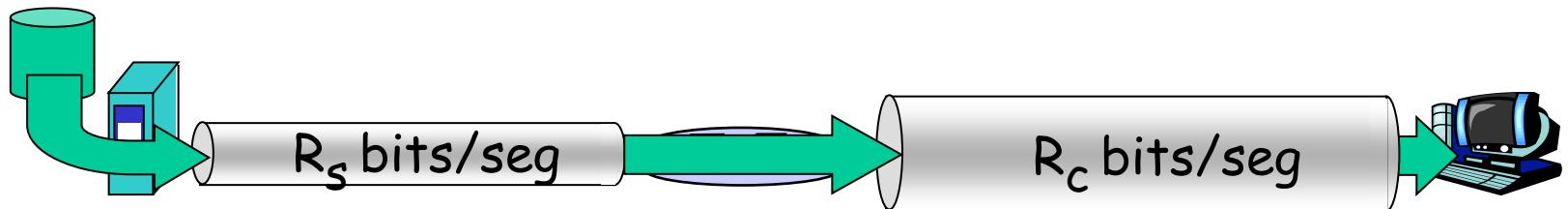
instantânea: taxa num certo instante de tempo

média: taxa num período de tempo mais longo

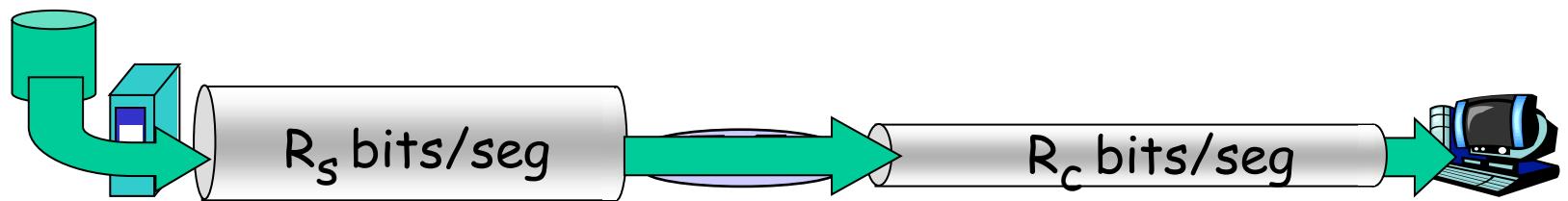


Vazão (mais)

$R_s < R_c$ Qual é a vazão média fim-a-fim?



$R_s > R_c$ Qual é a vazão média fim-a-fim?

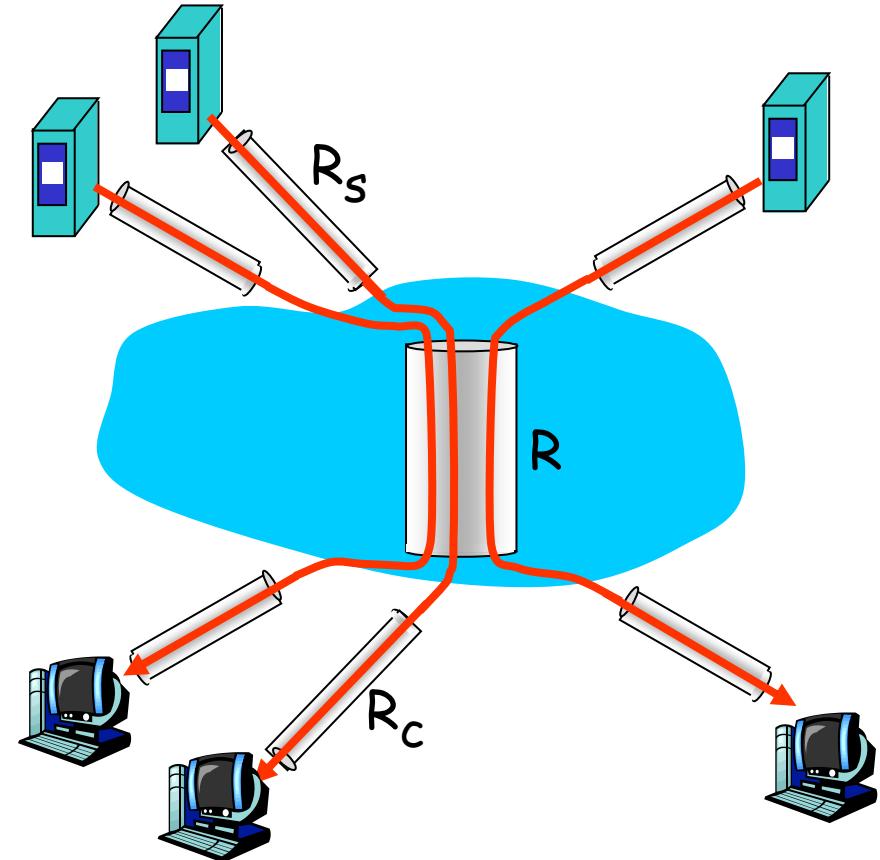


Enlace gargalo

enlace no caminho fim-a-fim que restringe a vazão fim-a-fim

Vazão: cenário da Internet

- vazão por conexão fim-a-fim: $\min(R_c, R_s, R/10)$
- na prática: R_c ou R_s são, frequentemente, o gargalo



10 conexões compartilham (de modo justo)
o enlace gargalo do backbone de R bits/seg

Camadas de Protocolos

As redes são complexas!

Muitos “pedaços”:

- *Hospedeiros*
- *Roteadores*
- *Enlaces de diversos meios*
- *Aplicações*
- *Protocolos*
- *hardware, software*

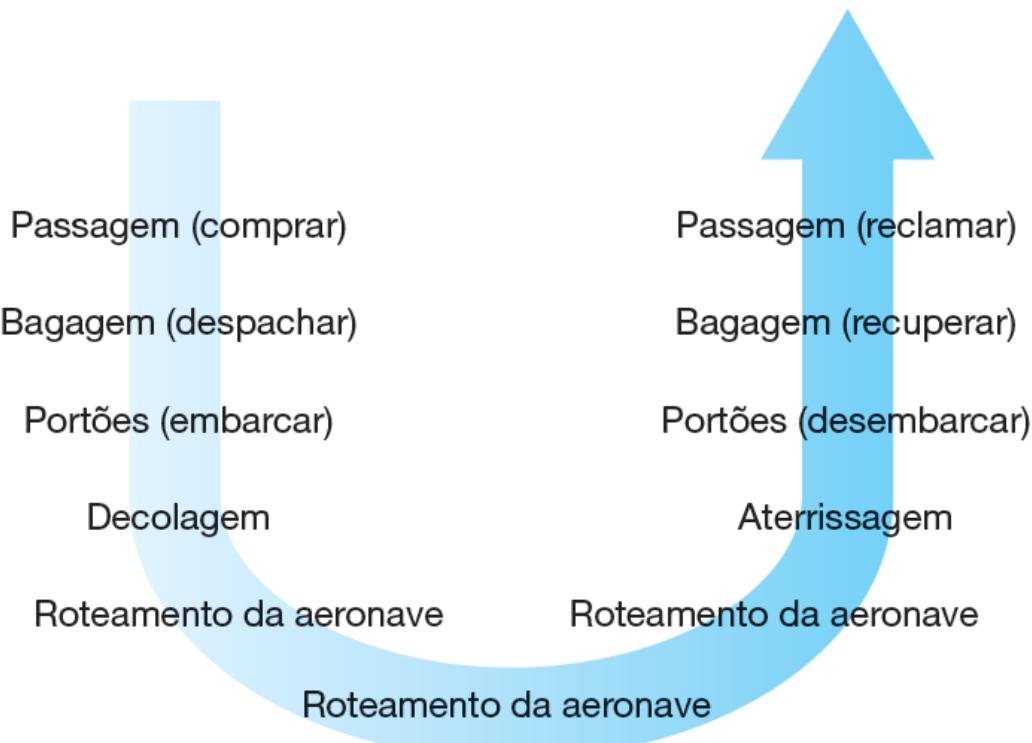
Pergunta:

Há alguma esperança em conseguirmos organizar a estrutura da rede?

Ou pelo menos a nossa discussão sobre redes?

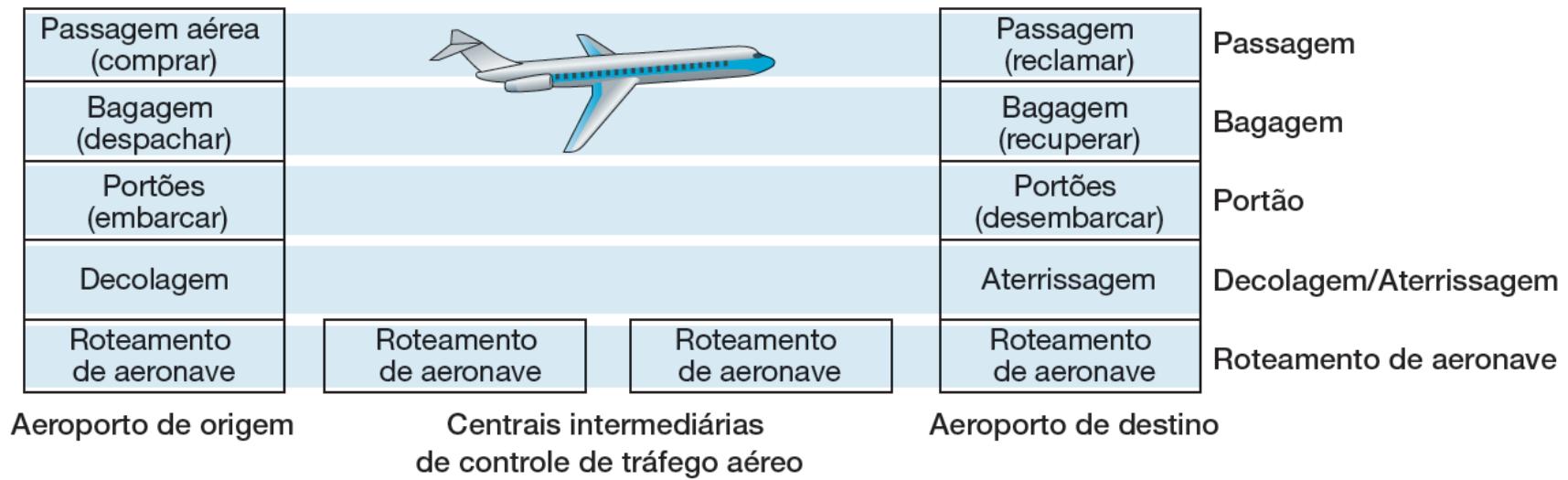
Arquitetura de camadas

.Exemplo: uma viagem de avião



Arquitetura de camadas

Camadas horizontais da funcionalidade de linha aérea



Por que dividir em camadas?

Lidar com sistemas complexos:

- ✓ **estrutura explícita permite a identificação e relacionamento entre as partes do sistema complexo**
 - *modelo de referência* em camadas para discussão
- ✓ **modularização facilita a manutenção e atualização do sistema**
 - mudança na implementação do serviço da camada é transparente para o resto do sistema
 - ex.: mudança no procedimento no portão não afeta o resto do sistema

Arquitetura de camadas

- A segunda figura dividiu a funcionalidade da linha aérea em camadas, provendo uma estrutura com a qual podemos discutir a viagem aérea.
- Cada camada, combinada com as que estão abaixo dela, implementa alguma funcionalidade, algum *serviço*.
- Uma *arquitetura de camadas* nos permite discutir uma parcela específica e bem definida de um sistema grande e complexo.

Arquitetura de Rede em camadas

Vantagens:

- A divisão em camadas proporciona um modo estruturado de discutir componentes de sistemas.
- A modularidade facilita a atualização de componentes de sistema.

.Obs: *Uma camada de protocolo pode ser executada em software, em hardware, ou em uma combinação dos dois.*

Pilha de protocolos Internet

aplicação: dá suporte a aplicações de rede.

FTP, SMTP, HTTP

transporte: transferência de dados processo a processo.

TCP, UDP

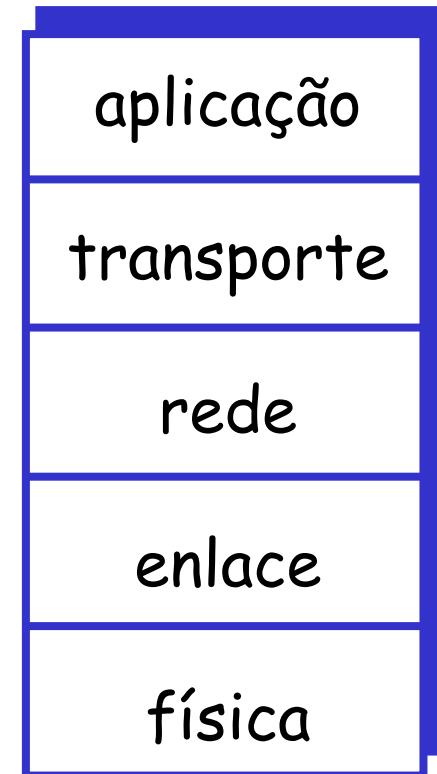
rede: repasse (encaminhamento) de datagramas da origem até o destino

IP, protocolos de roteamento

enlace: transferência de dados entre elementos de rede vizinhos

PPP, Ethernet, 802.11 (Wifi)

física: bits “no fio”



Encapsulamento

