

Redes de Computadores

Introdução

Nota: a maioria dos slides dessa apresentação são traduzidos ou adaptados dos slides disponibilizados gratuitamente pelos autores do livro [KUROSE, James F. e ROSS, Keith W. *Computer Networking: A Top-Down Approach*. 8th Edition Pearson, 2020.](#) Todo o material pertencente aos seus respectivos autores está protegido por direito autoral.

Capítulo 1: introdução

Objetivo do capítulo:

- Obter “sensação”, “visão geral”, introdução à terminologia
 - mais profundidade, detalhes *mais tarde* no curso



Visão geral / roteiro :

- O que é a Internet? O que é um protocolo?
- **Borda da rede:** hospedeiros, rede de acesso, mídia física
- **Núcleo da rede:** comutação de pacotes/circuitos, estrutura da internet
- **Desempenho:** perda, atraso, vazão
- Camadas de protocolo, modelos de serviço
- Segurança
- História

A Internet: uma visão básica



Bilhões de *dispositivos* de computação conectados:

- *hospedeiros* = sistemas finais
- executando *aplicações* de rede na “borda” da Internet

Comutadores de pacotes: encaminham pacotes (pedaços de dados)

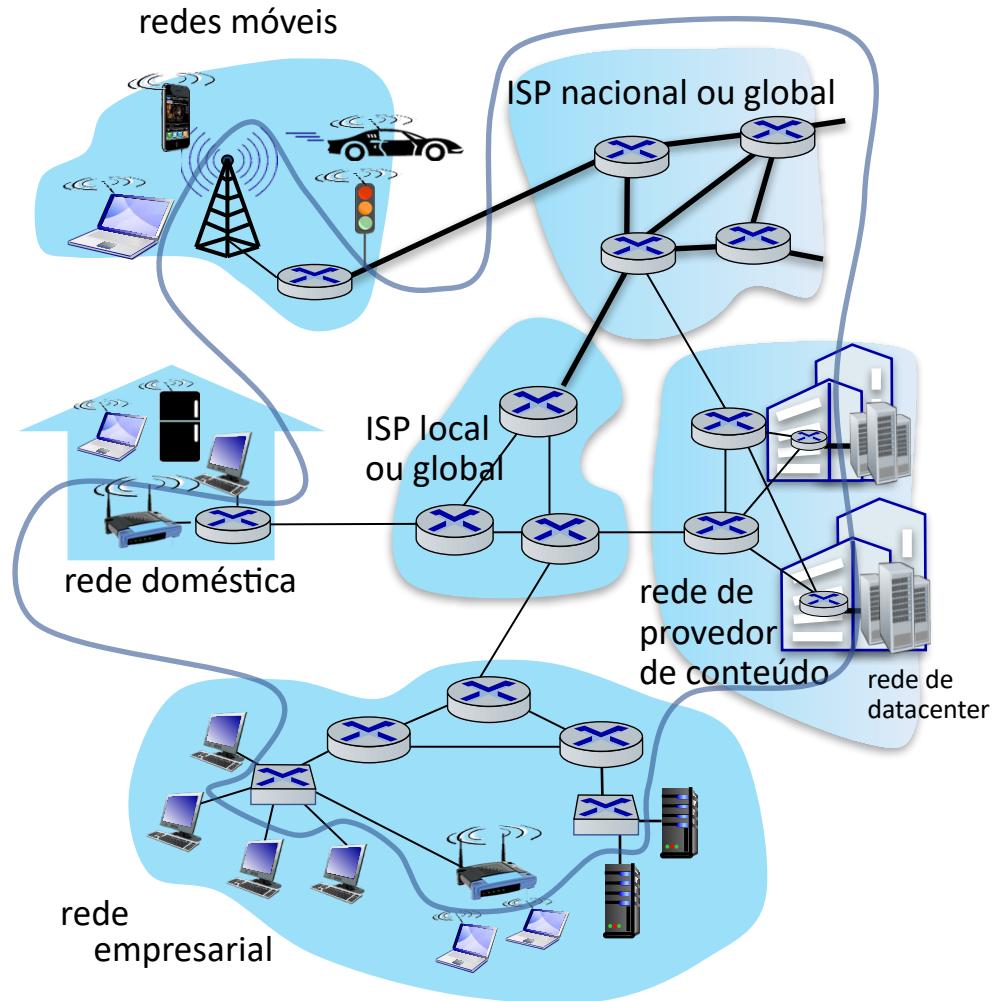
- roteadores, switches

Enlaces de comunicação

- fibra, cobre, rádio, satélite
- taxa de transmissão: *largura de banda*

Redes

- coleção de dispositivos, roteadores, enlaces: gerenciados por uma organização



Dispositivos “legais” conectados à Internet



Amazon Echo



Porta Retratos IP



Geladeira com Internet



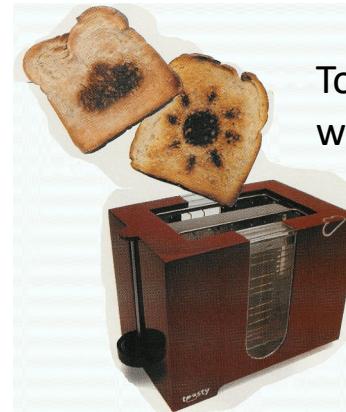
Internet phones



Dispositivos de jogos



Marcapasso e monitor



Torradeira habilitada para web + previsão do tempo



dispositivos de Realidade Aumentada



colchões com sensores



Fitbit



fraldas



Tweet-a-watt:
monitors uso de energia

bicicletas



carros

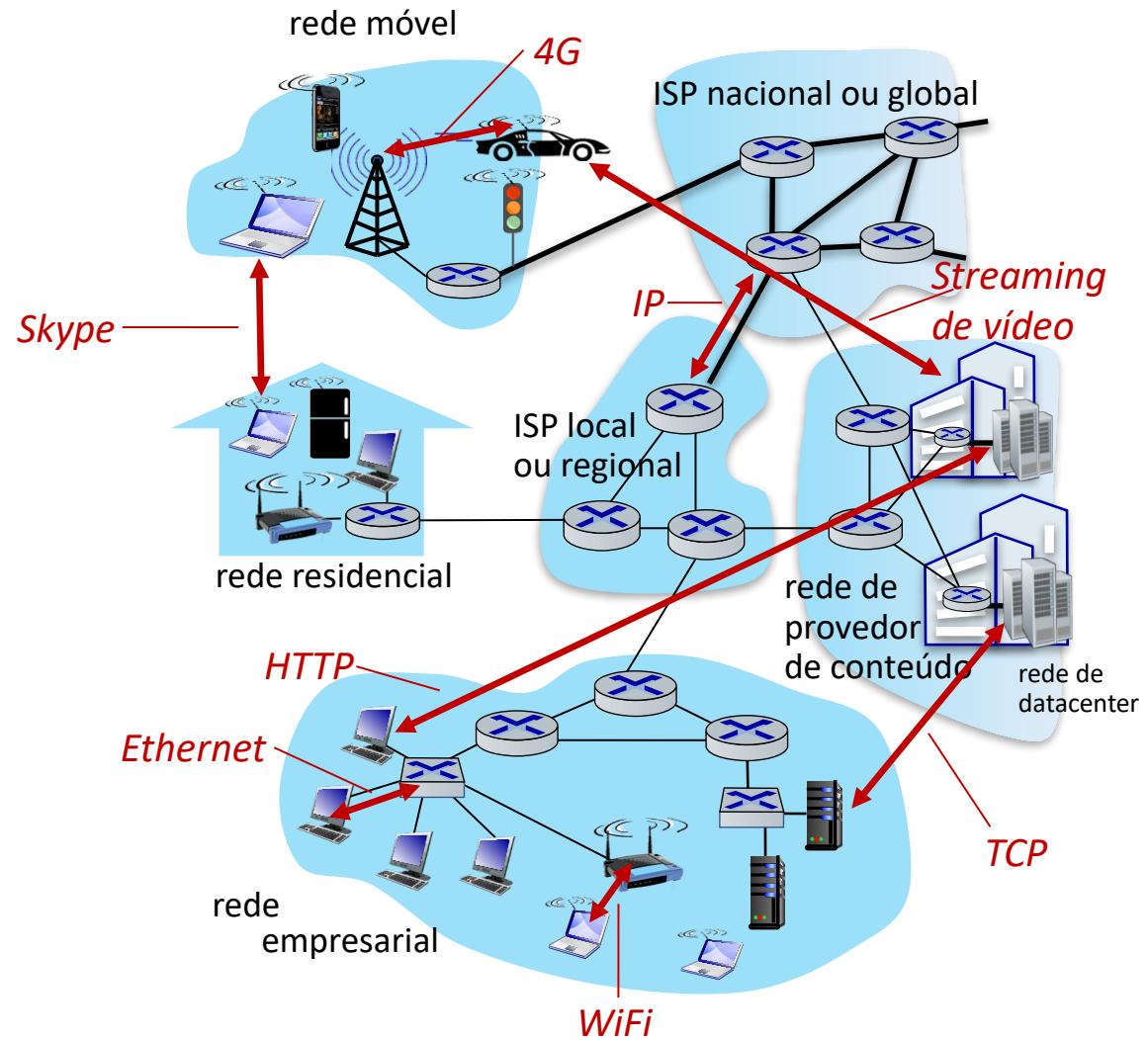


scooters

Outros?

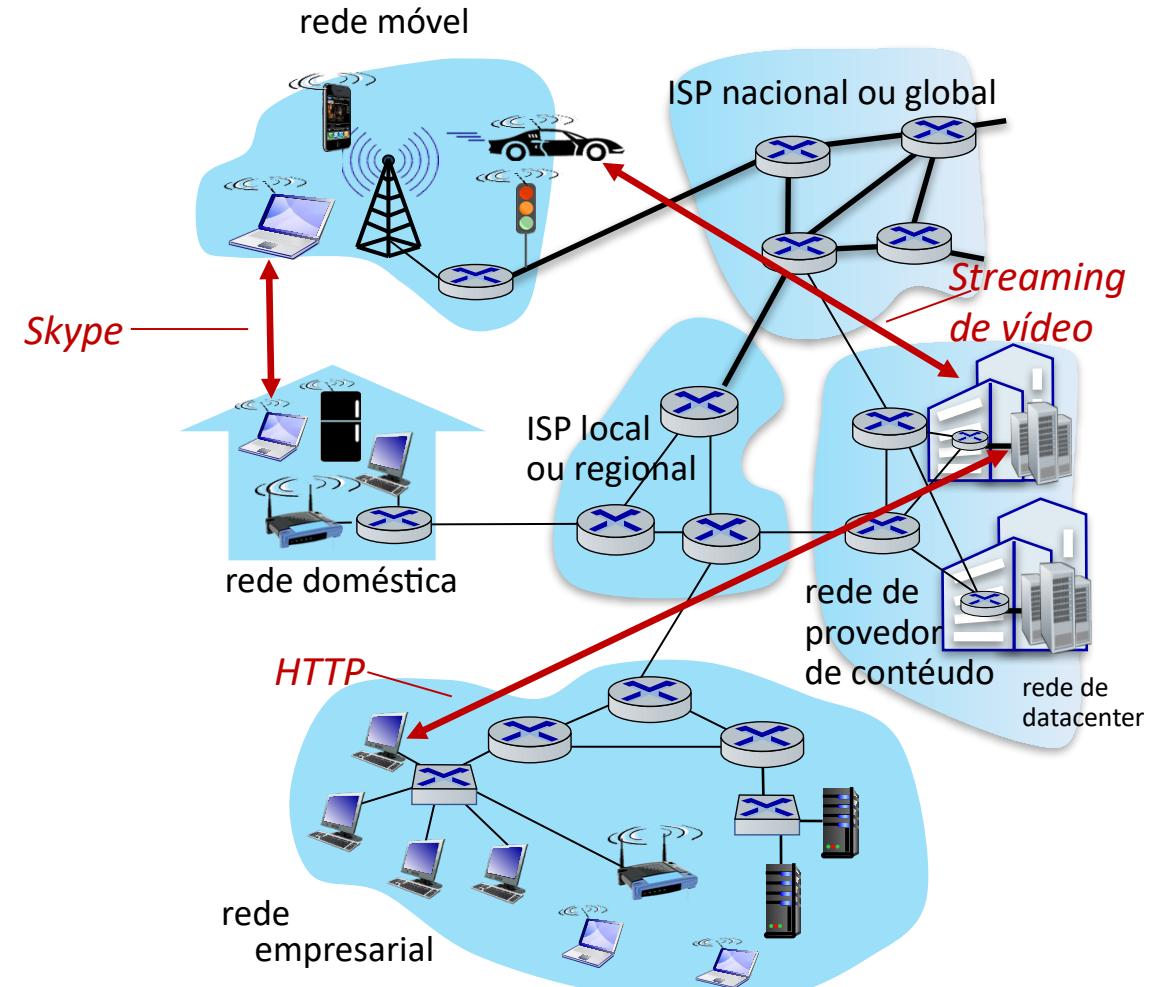
A Internet: uma visão básica

- *Internet: “rede de redes”*
 - ISPs interconectados
- *protocolos* estão *em todo lugar*
 - controle de envio e recebimento de mensagens
 - ex.: HTTP (Web), streaming de vídeo, Skype, TCP, IP, WiFi, 4G/5G, Ethernet
- *Padrões de Internet*
 - RFC: Request for Comments
 - IETF: Internet Engineering Task Force



A Internet: uma visão de “serviços”

- *Infraestrutura* que fornece serviço para aplicativos:
 - Web, streaming de vídeo, teleconferência multímidia, email, jogos, comércio eletrônico, mídia social, aparelhos interconectados, ...
- fornece uma *interface de programação* para aplicações distribuídas:
 - “ganchos” que permitem que aplicativos que enviam/recebem dados se “conectem” para usar o serviço de transporte da Internet
 - oferece opções de serviço, análogas ao serviço postal



O que é um protocolo?

Protocolos humanos:

- “que horas são?”
- “tenho uma pergunta”
- apresentações de pessoas

Regras para:

- ... mensagens específicas envia
- ... ações específicas tomadas quando uma mensagem ou outros eventos são recebidos

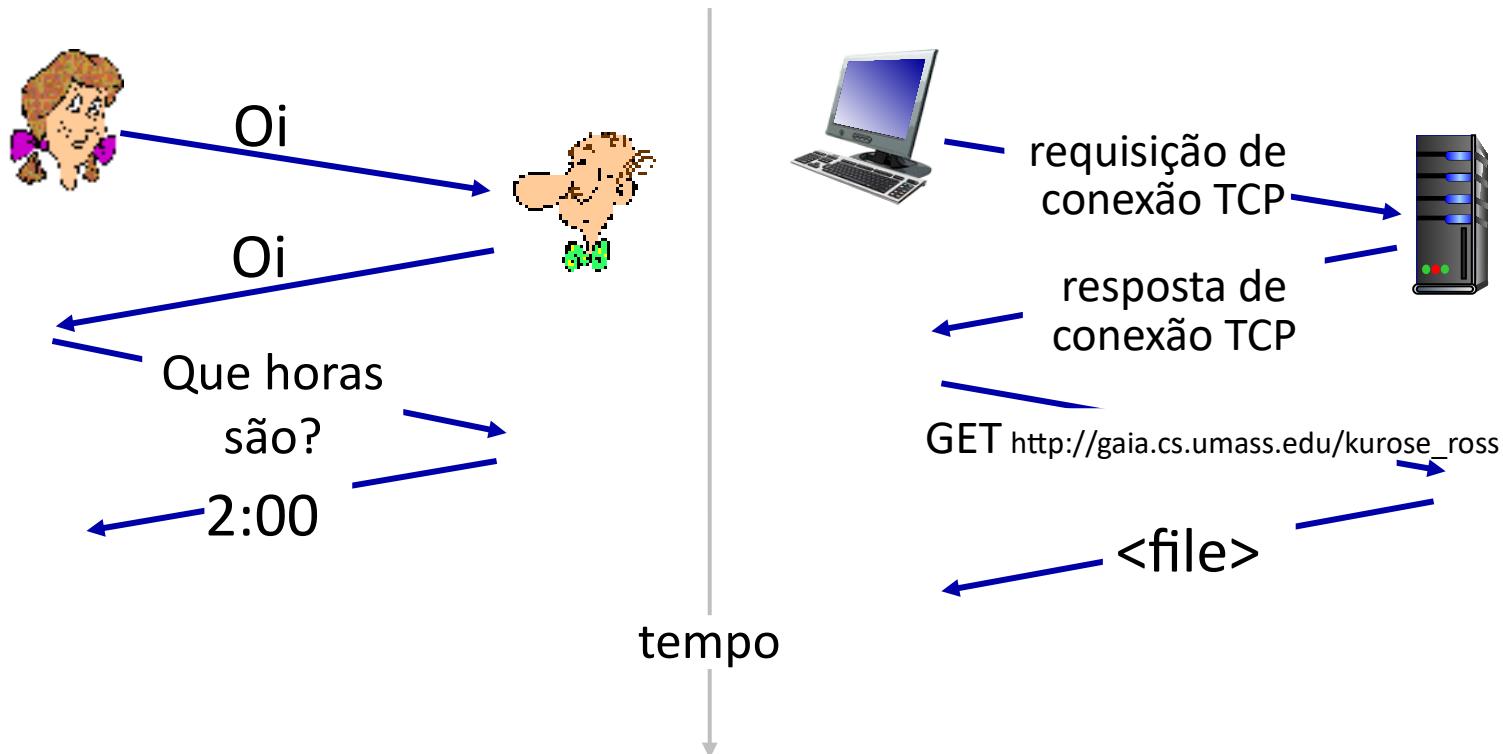
Protocolos de rede:

- computadores (dispositivos) em vez de humanos
- todas as atividades de comunicação na Internet regidas por protocolos

Protocolos definem o formato e ordem de mensagens enviadas e recebidas entre entidades de rede, e ações tomadas na transmissão e recepção de mensagens

O que é um protocolo?

Um protocolo humano e um protocolo de redes de computadores:



Q: outros protocolos humanos?

Capítulo 1: roteiro

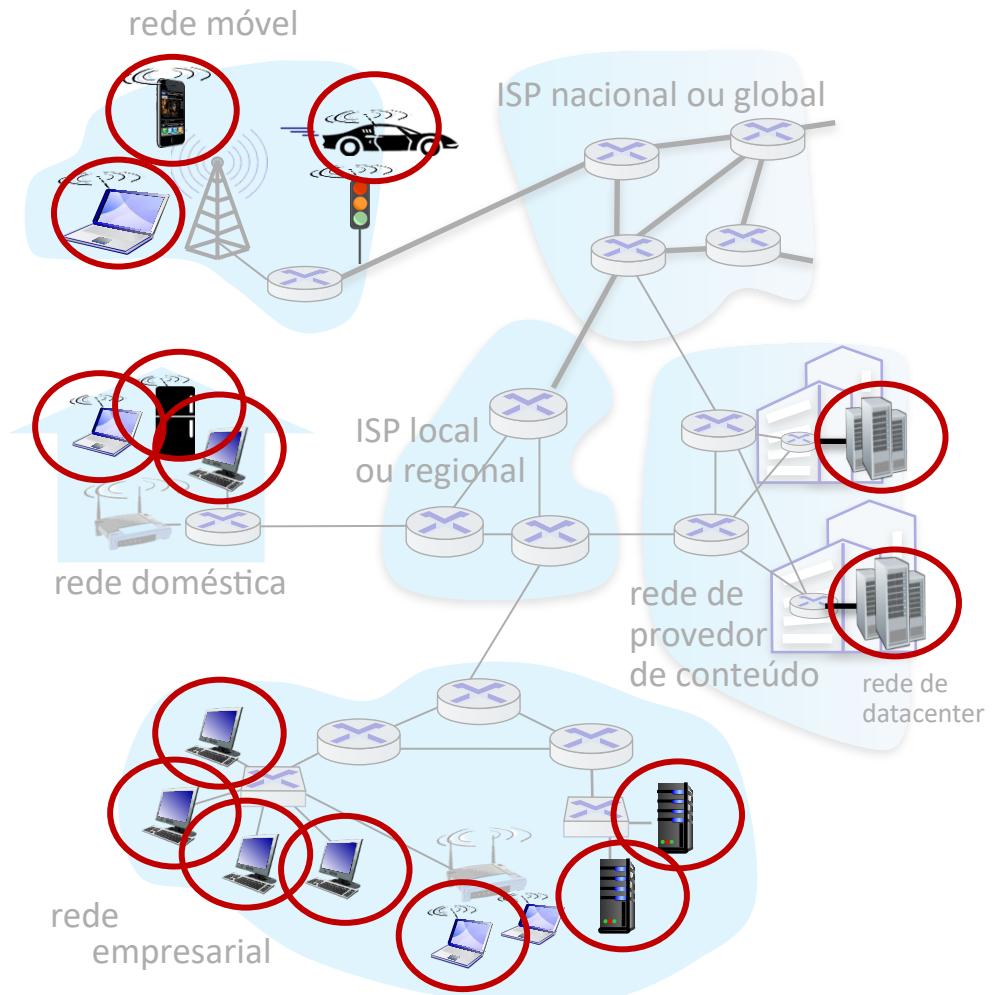
- O que é a Internet?
- O que é um protocolo?
- **Borda da rede:** hospedeiros, rede de acesso, mídia física
- Núcleo da rede: comutação de pacote/circuito, estrutura da Internet
- Desempenho: perda, atraso, vazão
- Segurança
- Camadas de protocolo, modelos de serviço
- História



Um olhar mais atento sobre a estrutura da Internet

Borda da rede :

- hospedeiros: clientes e servidores
- servidores frequentemente em *data centers*



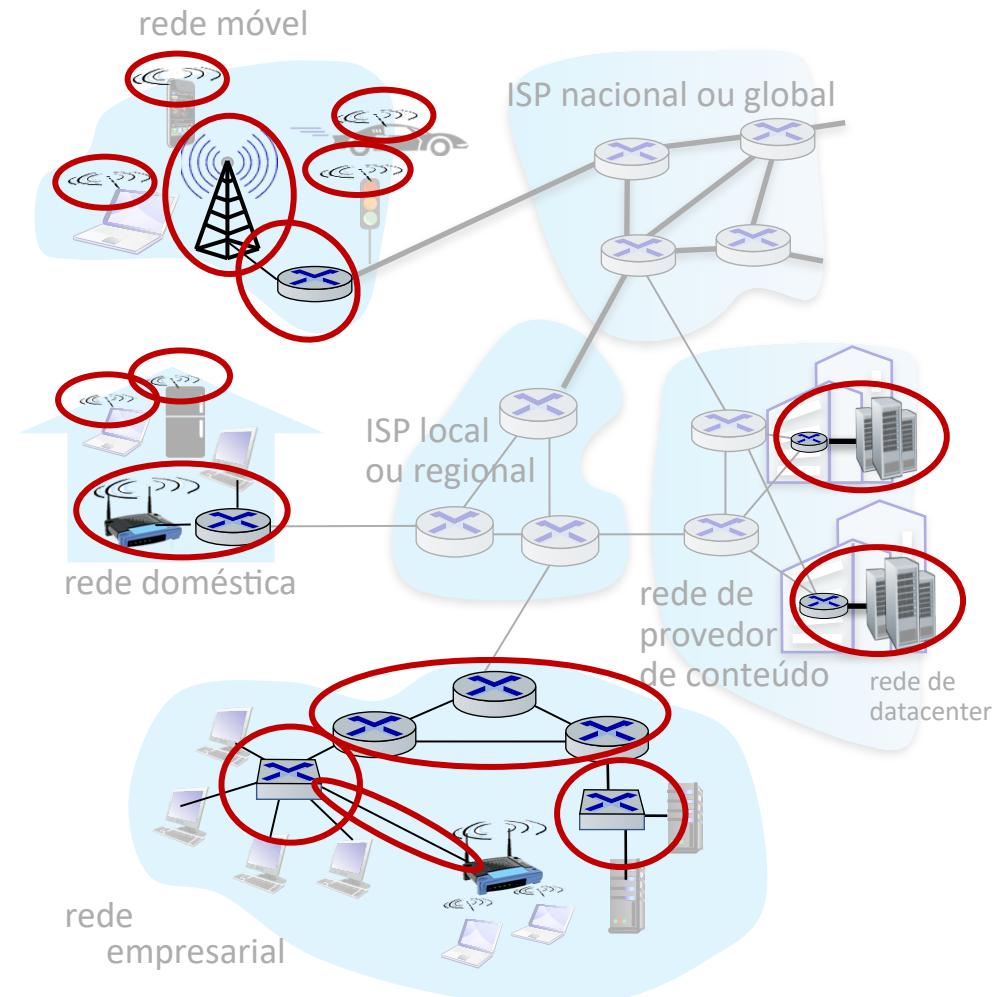
Um olhar mais atento sobre a estrutura da Internet

Borda da rede :

- hospedeiros: clientes e servidores
- servidores frequentemente em *data centers*

Redes de acesso, mídia física:

- enlaces de comunicação com e sem fio



Um olhar mais atento sobre a estrutura da Internet

Borda da rede :

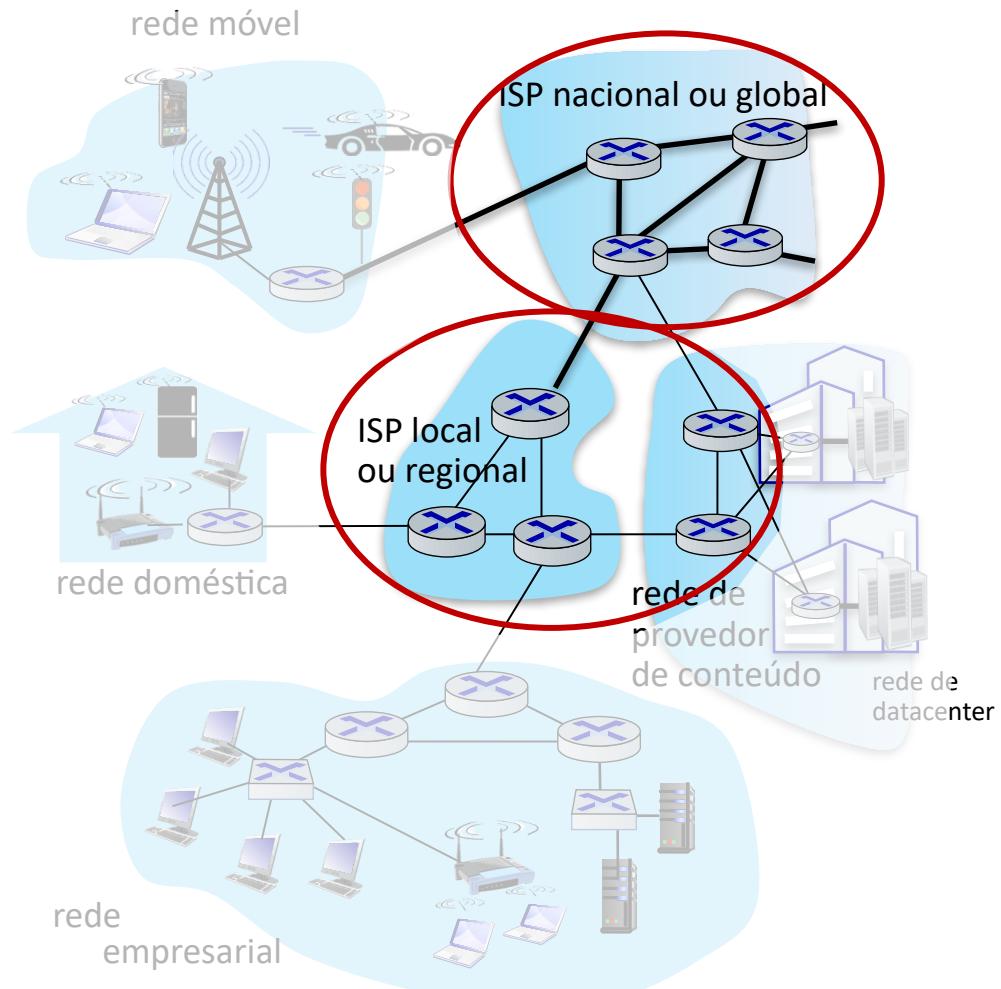
- hospedeiros: clientes e servidores
- servidores frequentemente em *data centers*

Redes de acesso, mídia física:

- enlaces de comunicação com e sem fio

Núcleo da rede:

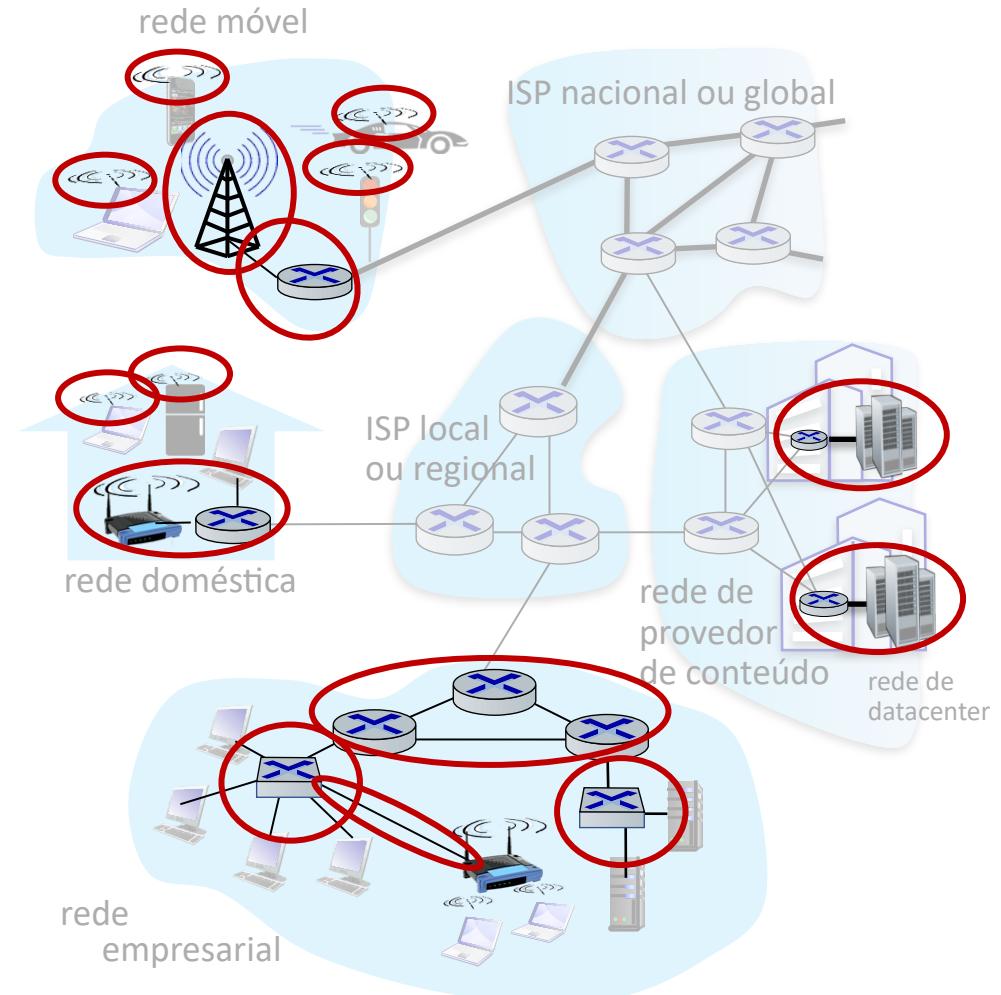
- roteadores interconectados
- rede de redes



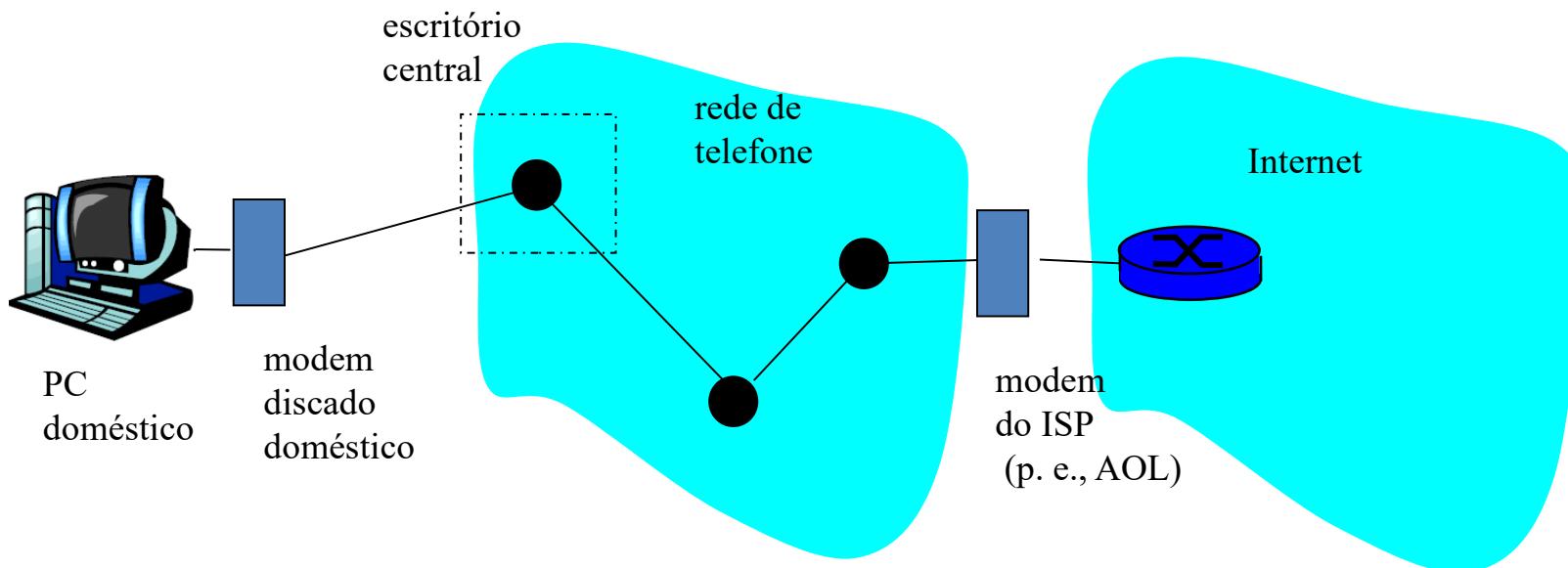
Redes de acesso e mídia física

Q: Como conectar sistemas finais ao roteador de borda?

- redes de acesso residencial
- redes de acesso institucional (escola, empresa)
- redes de acesso móvel (WiFi, 4G/5G)



Acesso a rede: Modem discado



- ❖ usa infraestrutura de telefonia existente
 - ❖ casa conectada ao **escritório central**
- ❖ até 56 kbps de acesso direto ao roteador (geralmente menos)
- ❖ não pode navegar e telefonar ao mesmo tempo:
não está “**sempre ligado**”

v.90: até 56 Kbps de *downstream* e 33,6 Kbps de *upstream*
v.92: até 56 Kbps de *downstream* e 48 Kbps de *upstream*



Placa de Fax Modem U.S. Robotics
ISA - 33,6 Kbps

Fonte:

https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-862105012-placa-fax-modem-us-robotic-isa-336-kbps-usado-_JM



Fax Modem Externo U.S. Robotics
33,6 Kbps – Conexão Serial

Fonte:

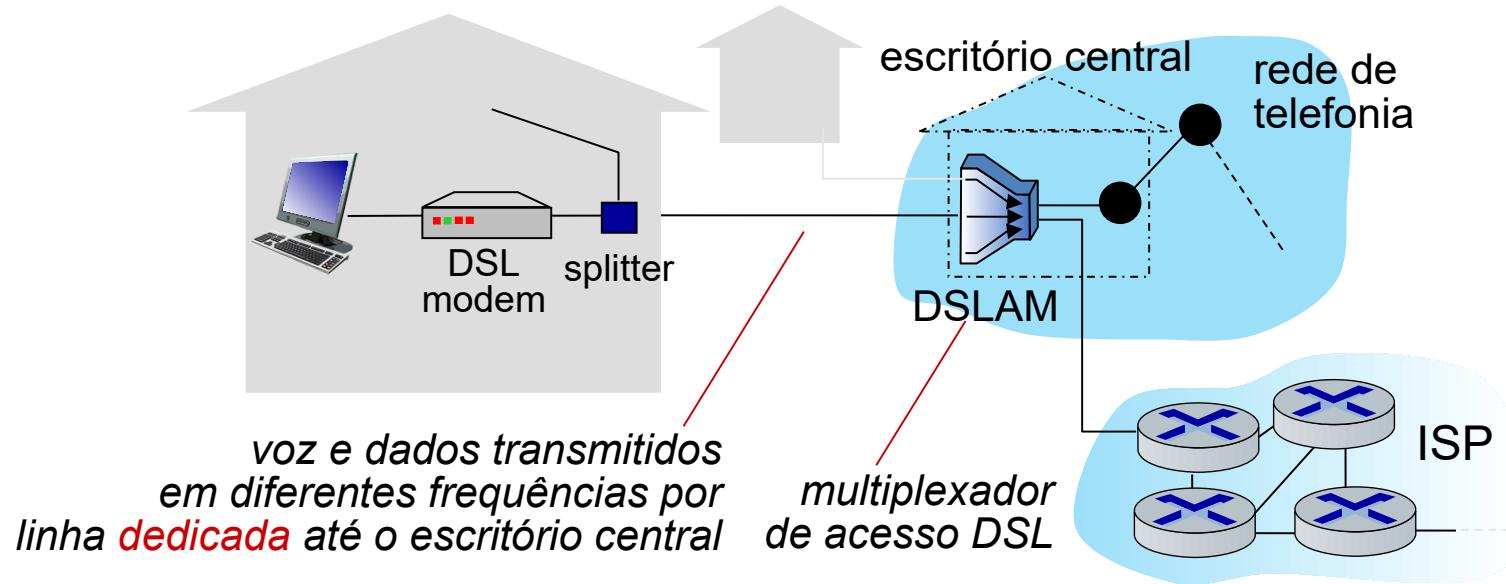
<https://www.amazon.com/Robotics-Sportster-33-6K-External-000839-09/dp/B00004Z7Y4>



Fax Modem Externo 3Com OfficeConnect
56K Business Modem
Conexão USB

Fonte: arquivo pessoal

Redes de acesso: digital subscriber line (DSL)



- usa a linha telefônica *existente* até o DSLAM do escritório central
 - dados sobre a linha telefônica DSL vão para a Internet
 - voz sobre a linha telefônica DSL vai para rede telefônica
- taxa de transmissão downstream dedicada de 24-52 Mbps
- taxa de upstream dedicada de 3.5-16 Mbps



Splitter ADSL

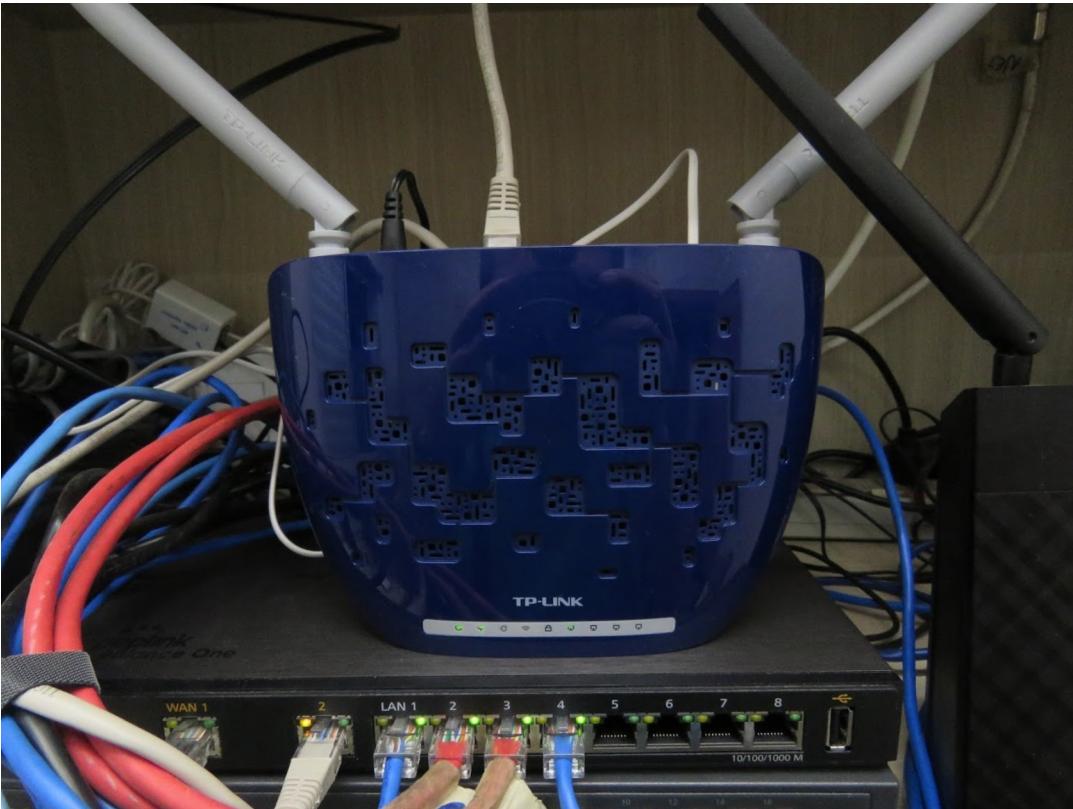
Fonte: arquivo pessoal



Modem ADSL2+ Datacom DM2270

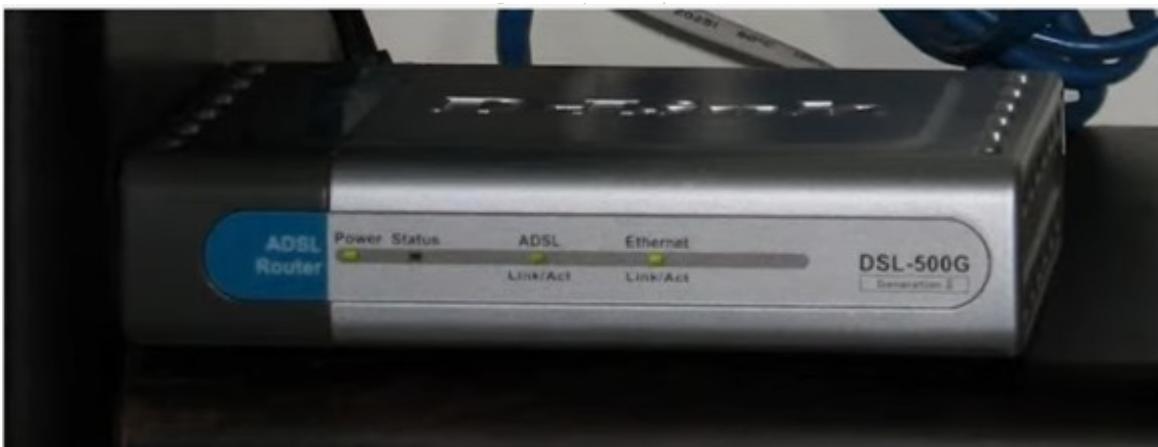
(inclui funções de roteador e WiFi)

Fonte: arquivo pessoal



Modem ADSL2+ TP-Link TD-W8960N

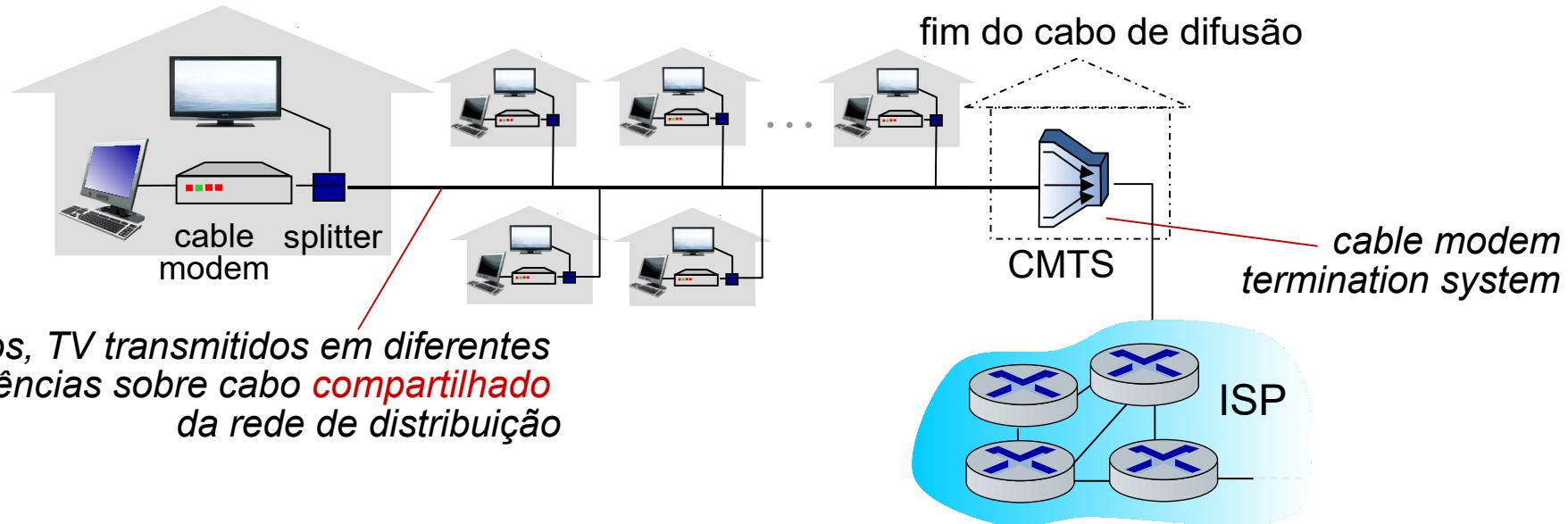
(inclui funções de roteador e WiFi)



Modem ADSL D-Link DSL-500G

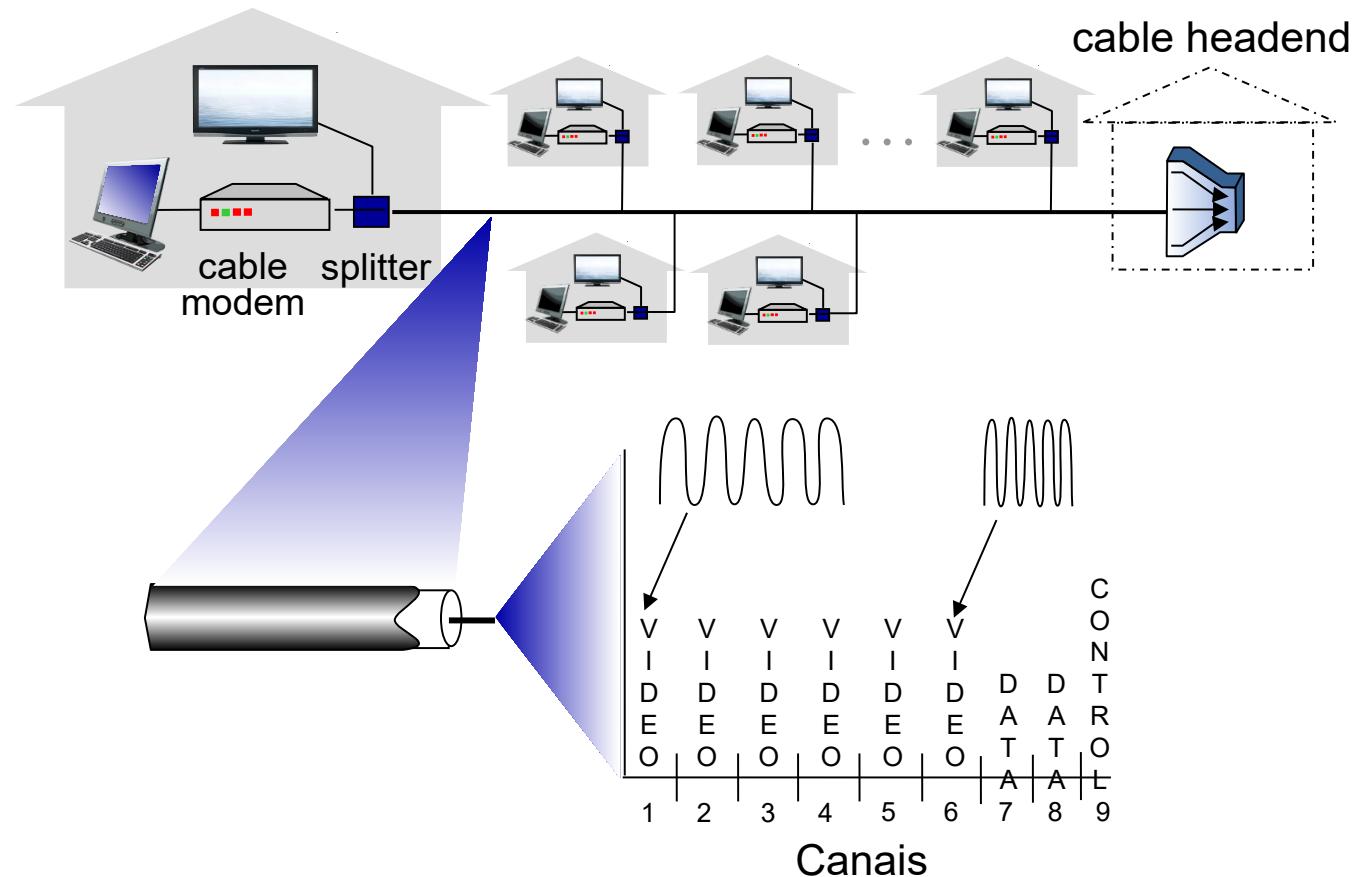
Fonte: arquivo pessoal

Redes de acesso: acesso baseado em cabo



- HFC: hybrid fiber coax
 - assimétrico: até 40 Mbps – 1.2 Gbps de taxa de transmissão *downstream*, 30-100 Mbps de taxa de transmissão *upstream*
- rede de cabos e fibras anexam casas ao roteador do ISP
 - casas **compartilham a rede de acesso** até o fim do cabo de difusão

Redes de acesso: acesso baseado em cabo



multiplexação por divisão de frequência (frequency division multiplexing - FDM): diferentes canais transmitidos em diferentes bandas de frequência

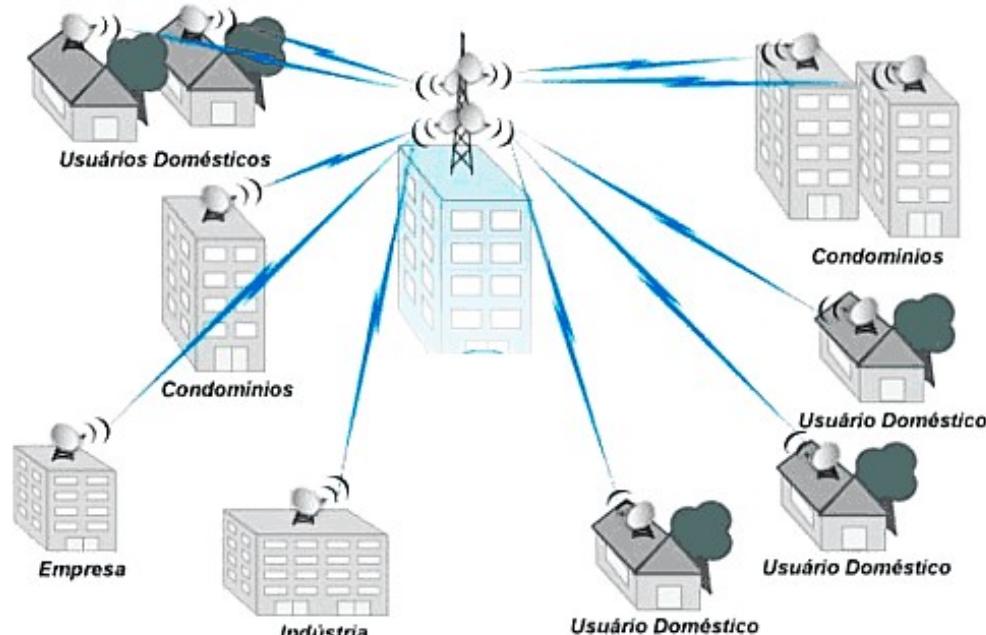


Cable Modem Thomson
(inclui *gateway* de VoIP)

Fonte: arquivo pessoal

Acesso à rede via Rádio

- Utiliza os protocolos da família IEEE 802.11 (WiFi), porém com antenas externas
 - Frequências de 2,4 GHz e 5 GHz
 - Clientes com antenas direcionais
 - Só funciona com linha de visada direta (sem obstáculos)
- Uso se tornou bastante comum em cidades do interior do Brasil, pelo baixo custo de implantação
 - *Downstream e upstream*: tipicamente < 5 Mbps
 - Vem sendo substituído por FTTH e FTTx





Rádio WiFi Externo USB, com *pigtail* para conexão de antena externa

Fonte: arquivo pessoal

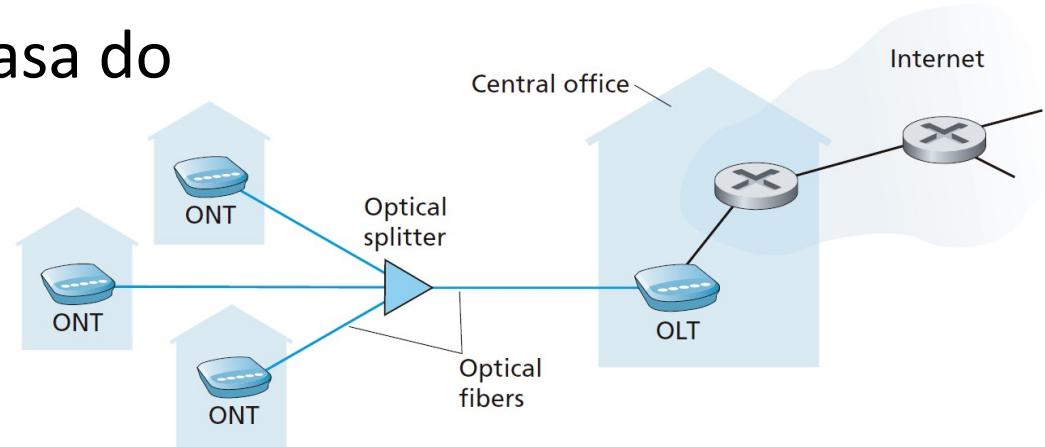


Rádio WiFi acoplado diretamente na Antena Externa e Cabo Ethernet PoE (*Power over Ethernet*)

Fonte: arquivo pessoal

FTTH (Fiber To The Home)

- Tecnologia que leva a fibra óptica até a casa do cliente
 - Arquiteturas competindo:
 - AON (*Active Optical Networks*)
 - PON (*Passive Optical Networks*)
- PON
 - Cada casa tem um ONT (*Optical Network Terminator*), conectado por uma fibra dedicada em um *splitter* na vizinhança.
 - *Splitter* combina o sinal de várias casas (<100) em uma única fibra que vai até o OLT (*Optical Line Terminator*) no provedor



FTTH (Fiber To The Home)

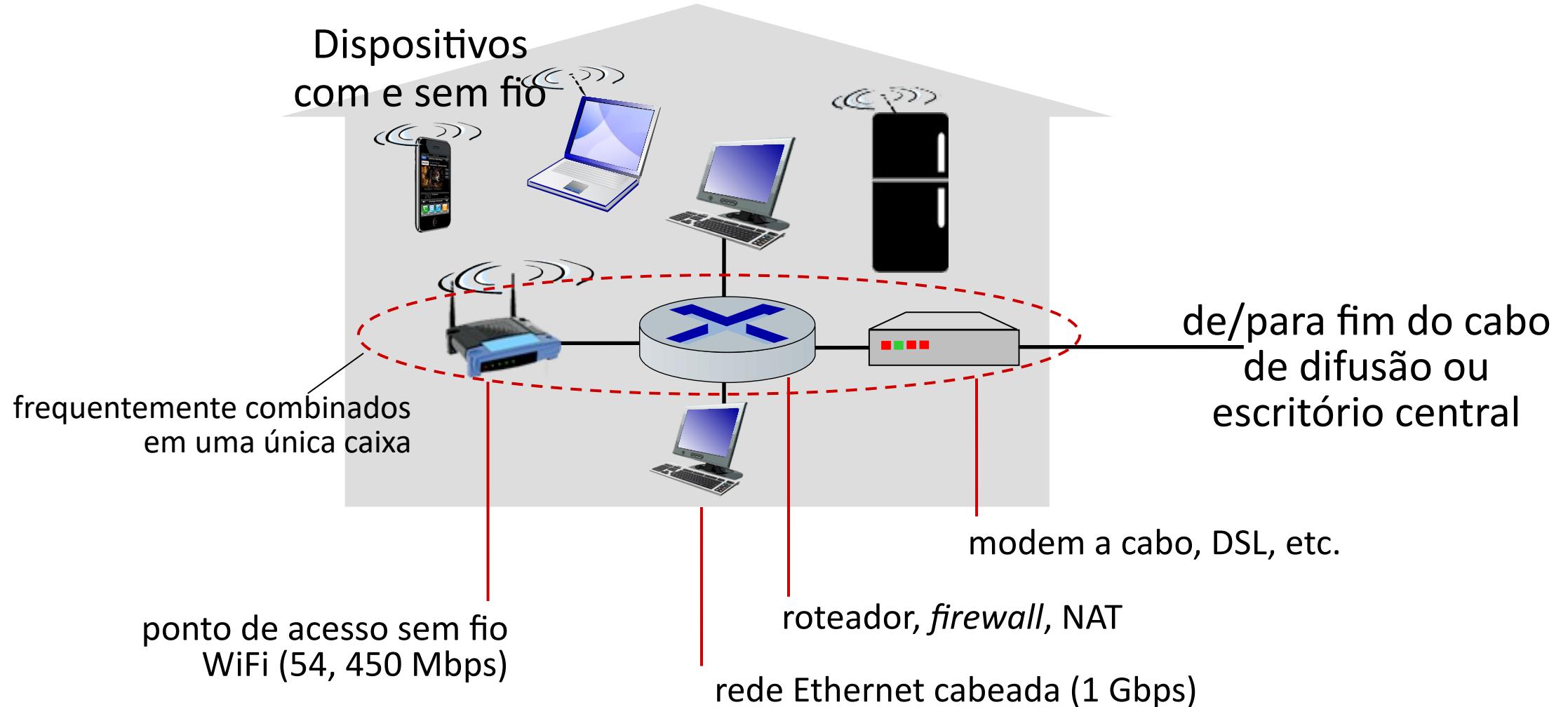
- Vem sendo adotado por grandes e pequenos provedores
 - Substituindo rádio e ADSL, suprindo a demanda por mais largura de banda que tais tecnologias não conseguem atender
 - *Downstream* e *upstream* tipicamente < 1 Gbps
 - GPON (Gigabit PON) permite até 2,5Gbps
 - Pode integrar TV (IPTV) e telefone (VoIP)
 - Alternativamente leva-se a fibra até próximo da casa do usuário (até um armário próximo, até o prédio, etc.), usando cobre na parte final
 - Chamados genericamente de FTTx



ONT GPON Askey RTF3505VW-N1
(inclui funcionalidades de roteador, ponto de acesso WiFi e VoIP)

Fonte: arquivo pessoal

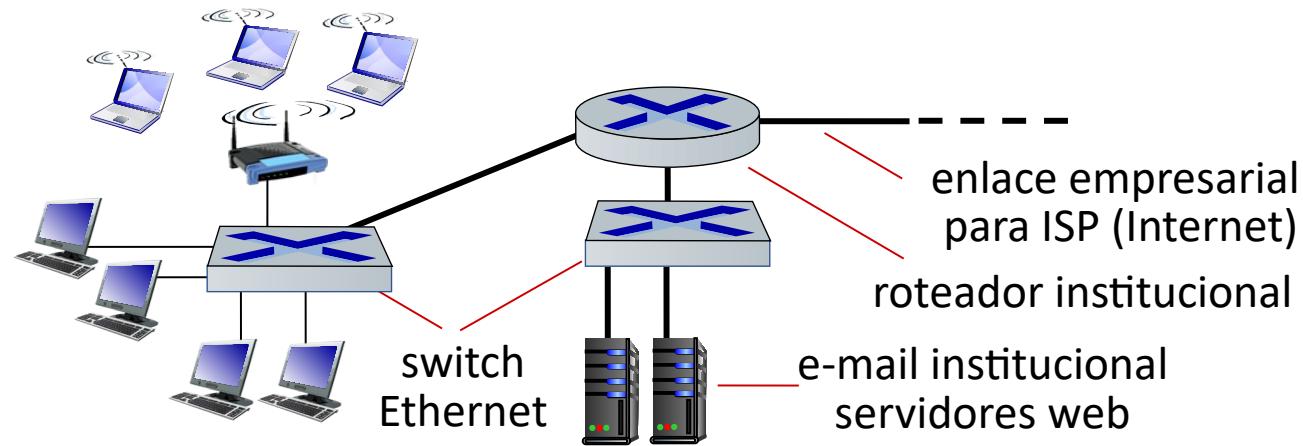
Redes de acesso: redes domésticas



Roteador ASUS RT-AC86U
com Gigabit Ethernet e Wireless-AC2900 Dual Band
Fonte: arquivo pessoal



Redes de acesso: redes empresariais



- empresas, universidades, etc.
- mistura de tecnologias de enlace com fio e sem fio, conectando uma mistura de switches e roteadores (vamos cobrir as diferenças em breve)
 - Ethernet: acesso com fio a 100 Mbps, 1 Gbps, 10 Gbps
 - WiFi: pontos de acesso sem fio a 11, 54, 450 Mbps

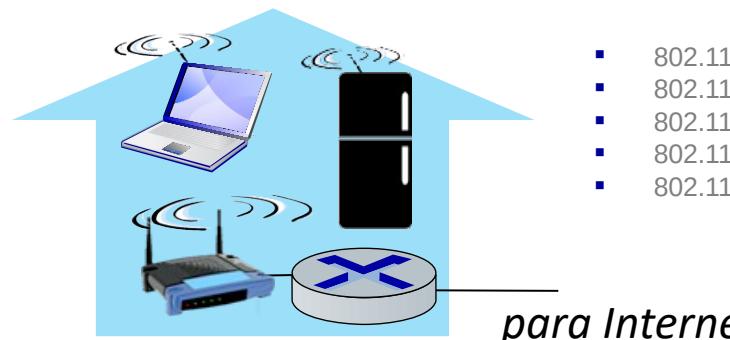
Rede de acesso sem fio

Rede de acesso *sem fio* compartilhada conecta o sistema final ao roteador

- via estação base, também chamada de “ponto de acesso” (*access point*)

Redes locais sem fio - *Wireless local area networks* (WLANS)

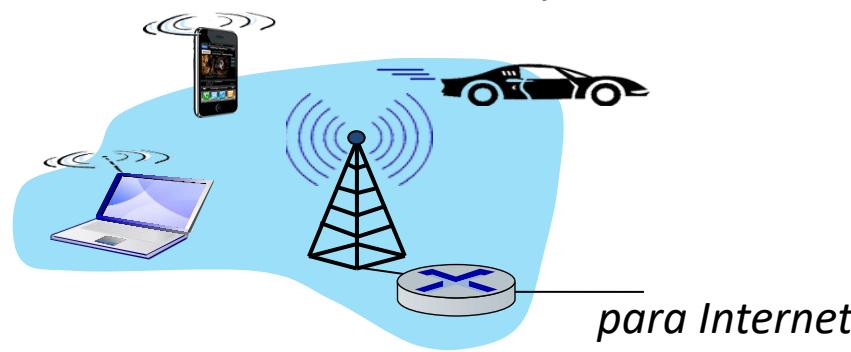
- normalmente dentro ou ao redor do prédio (cerca de 30 metros)
- 802.11b/g/n (WiFi): Taxa de transmissão de 11, 54, 450 Mbps



- 802.11b: 11 Mbps
- 802.11a/g: 54 Mbps
- 802.11n: até 600 Mbps
- 802.11ac: até 6,8 Gbps
- 802.11ax: até 9,6 Gbps

Redes de acesso celular de área ampla - *Wide-area cellular access networks*

- fornecido por operadora de rede de telefonia móvel celular (10's km)
- 10's Mbps
- redes celulares 4G/5G

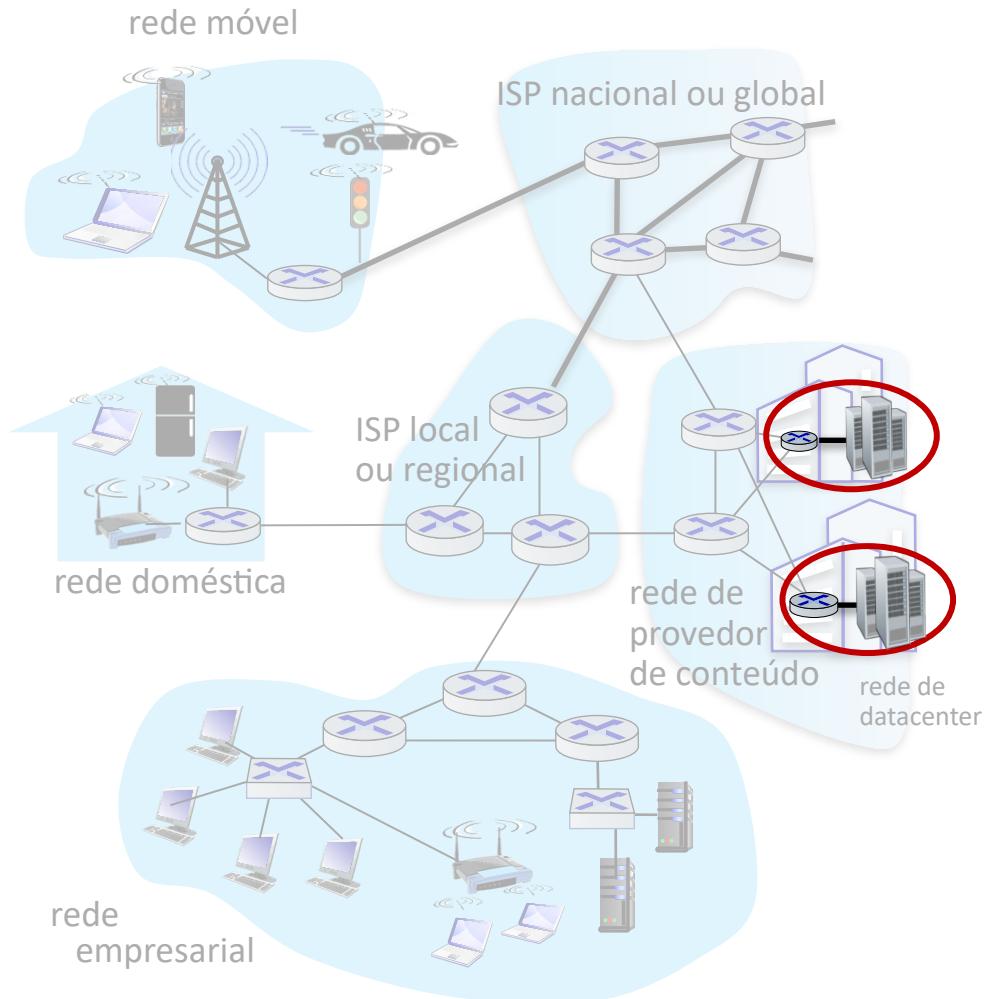


Redes de acesso: redes de *data centers*

- enlaces de alta largura de banda (10s a 100s Gbps) conectam centenas a milhares de servidores juntos e à Internet



Cortesia: Massachusetts Green High Performance Computing Center
(mghpcc.org)

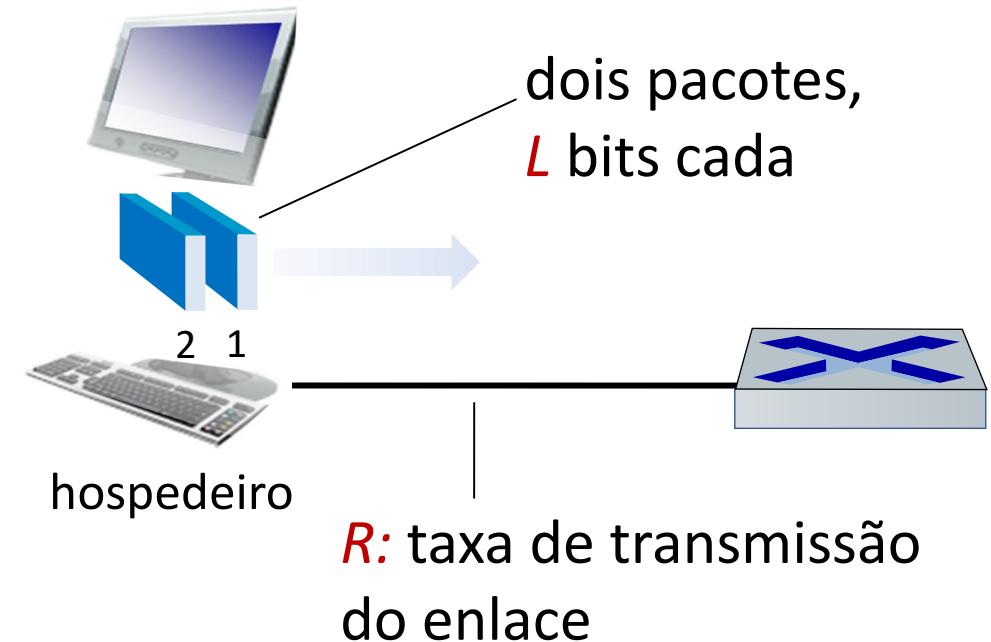


Hospedeiro: envia pacotes de dados

função de envio do hospedeiro:

- pega a mensagem da aplicação
- quebra em pedaços menores, conhecidos como *pacotes*, de tamanho L bits
- transmite pacote para a rede de acesso com *taxa de transmissão R*
 - taxa de transmissão do enlace, também chamada *capacidade do enlace ou largura de banda do enlace*

$$\text{atraso na transmissão do pacote} = \frac{\text{tempo necessário para transmitir o pacote de } L\text{-bits no enlace}}{R \text{ (bits/s)}}$$

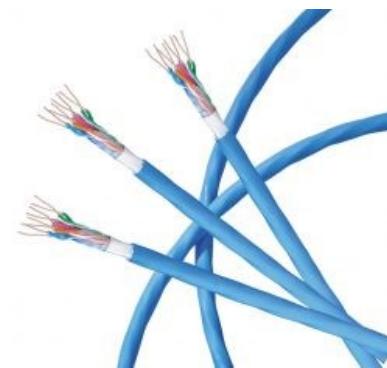


Enlaces: mídia física

- **bit:** se propaga entre pares transmissor/receptor
- **enlace físico:** o que existe entre transmissor e receptor
- **mídia guiada:**
 - sinais se propagam em mídia sólida: cobre, fibra, coaxial
- **mídia não guiada:**
 - sinais se propagam livremente, por exemplo, rádio

Par Trançado (Twisted pair - TP)

- dois fios de cobre isolados
 - Categoria 5: Ethernet 100 Mbps, 1 Gbps
 - Categoria 6: Ethernet 10Gbps



Par Trançado

- Existem basicamente dois tipos: sem blindagem (UTP – *Unshielded Twisted Pair*) e com blindagem (STP – *Shielded Twisted Pair*)
- Esse tipo de cabo utiliza o conector chamado RJ-45
- Técnica de cancelamento: cada par transmite o mesmo sinal nos dois fios, porém com polaridade invertida.

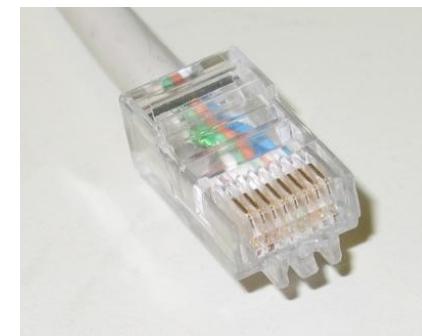
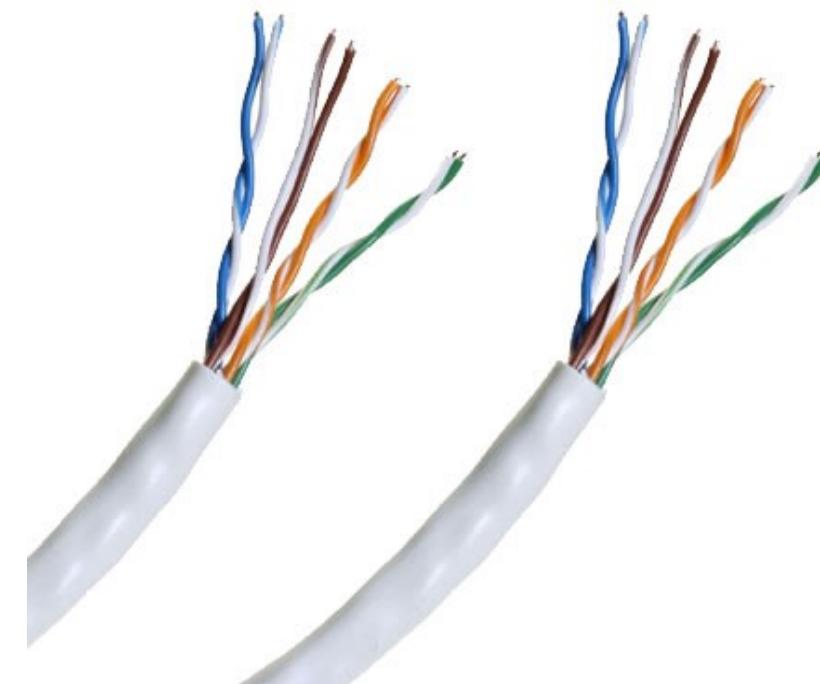


Foto CAT5e vs. CAT6 extraída de :
<https://www.blackbox.com.br/pt-br/page/43870/Recursos/Suporte-Tecnico/black-box-explica/Copper-Cable/Categorias-5e-e-6>

CAT5e

CAT6

Enlaces: mídia física

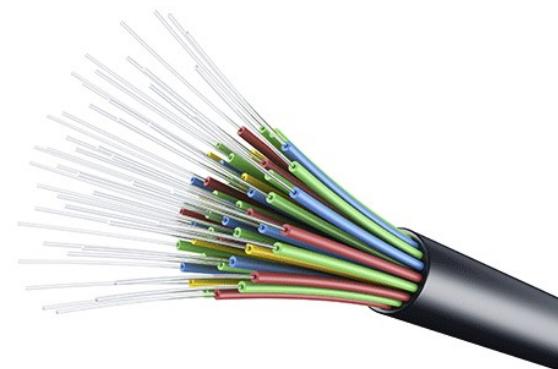
Cabo coaxial:

- dois condutores de cobre concêntricos
- bidirecional
- Banda larga:
 - vários canais de frequência no cabo
 - 100's Mbps por canal



Cabo de fibra óptica:

- fibra de vidro carregando pulsos de luz, cada pulso é um bit
- operação de alta velocidade:
 - transmissão ponto a ponto de alta velocidade (10's-100's Gbps)
- baixa taxa de erro:
 - repetidores bem espaçados
 - imune a ruído eletromagnético



Enlaces: mídia física

Rádio sem fio

- sinal transportado em várias “bandas” no espectro eletromagnético
- nenhum “fio” físico
- difusão, “half-duplex” (emissor para receptor)
- efeitos do ambiente na propagação:
 - reflexão
 - obstrução por objetos
 - interferência/ruído

Tipos de enlaces de rádio:

- **Wireless LAN (WiFi)**
 - 10-100's Mbps; 10's de metros
- **área ampla** (ex.: celular 4G/5G)
 - 10's Mbps (4G) por ~10 Km
- **Bluetooth:** substituto de cabos
 - curtas distâncias, taxas limitadas
- **microondas terrestre**
 - ponto-a-ponto; canais de 45 Mbps
- **satélite**
 - até <100 Mbps (Starlink) de *downlink*
 - 270 ms de atraso fim a fim (geoestacionário)

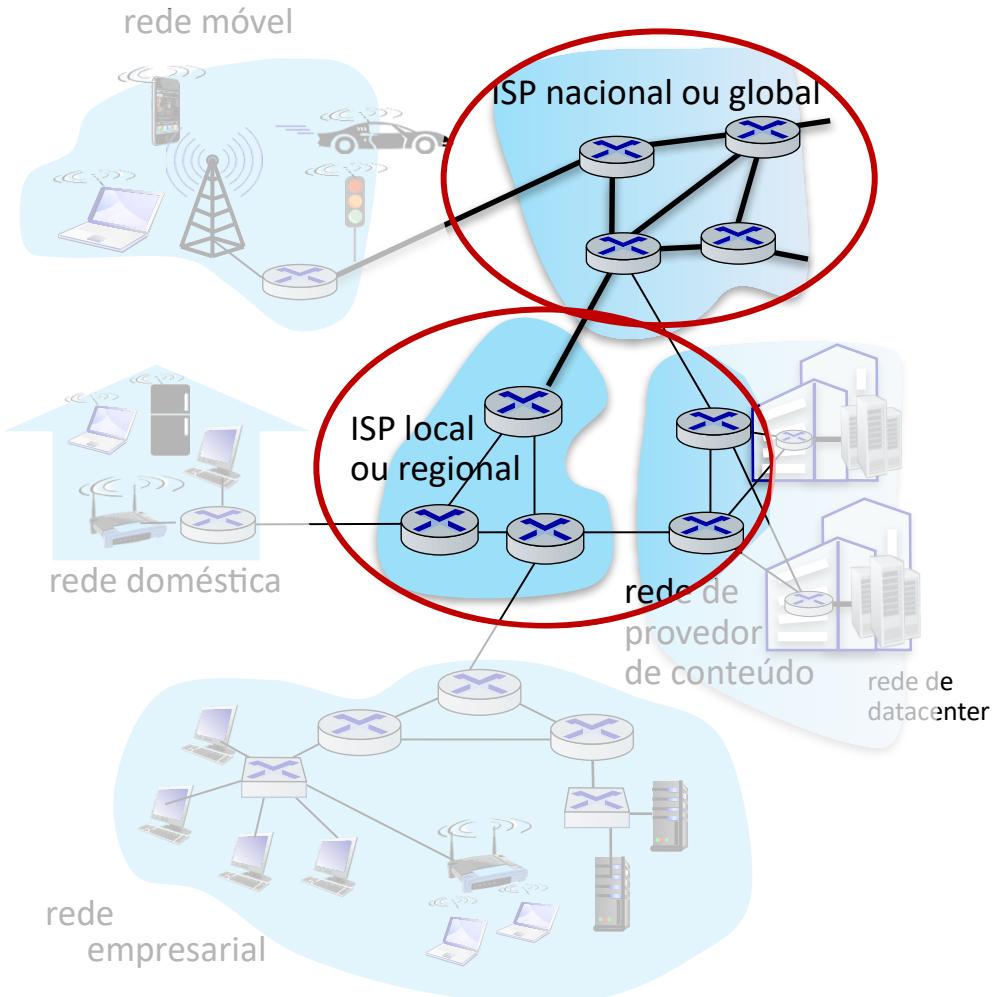
Capítulo 1: roteiro

- O que é a Internet?
- O que é um protocolo?
- Borda da rede: hospedeiros, rede de acesso, mídia física
- **Núcleo da rede:** comutação de pacote/círculo, estrutura da Internet
- Desempenho: perda, atraso, vazão
- Segurança
- Camadas de protocolo, modelos de serviço
- História

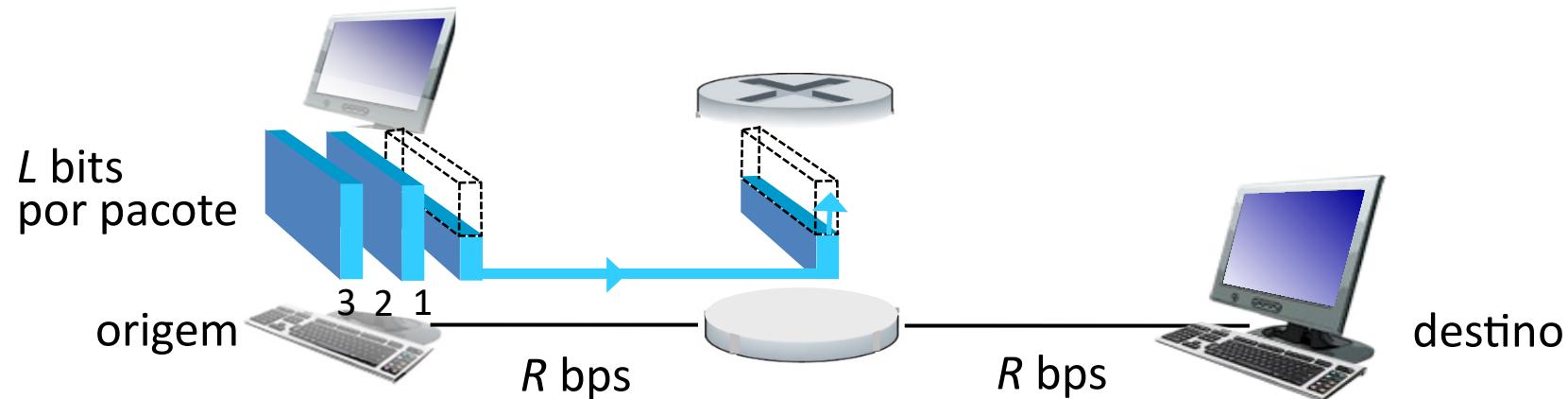


O núcleo da rede

- malha de roteadores interconectados
- **comutação de pacotes:** hospedeiro quebra mensagens da camada de aplicação em *pacotes*
 - rede **encaminha pacotes** de um roteador para o próximo, através dos enlaces do caminho da **origem ao destino**



Comutação de pacotes: armazenar e encaminhar

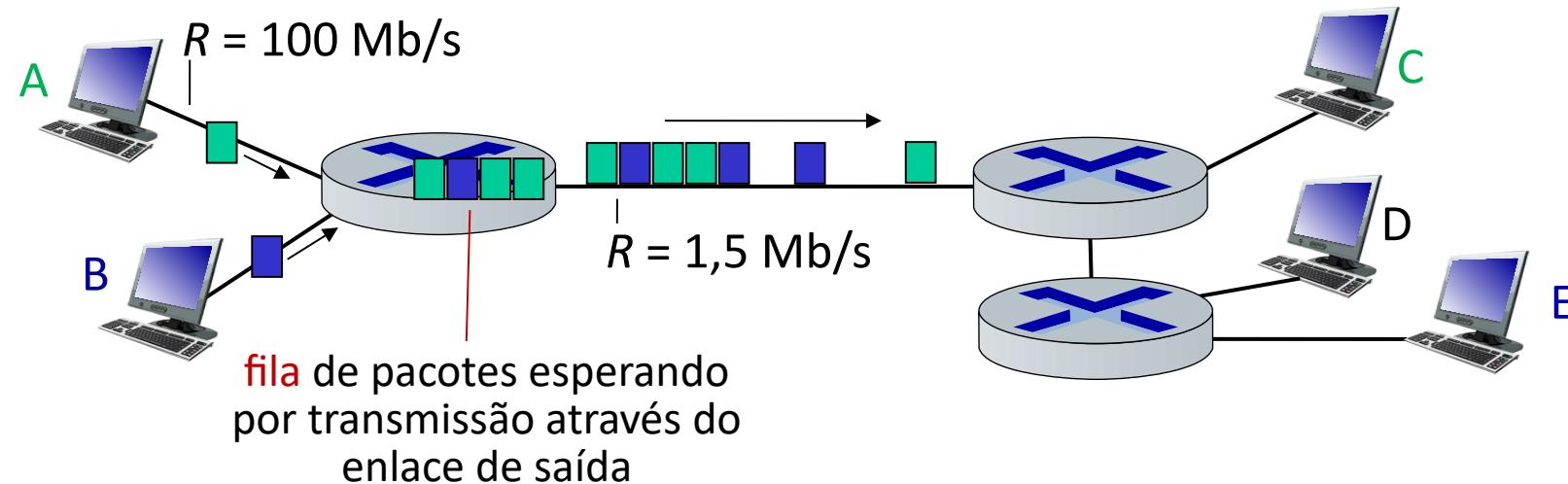


- **atraso na transmissão do pacote:** leva L/R segundos para transmitir (empurrar para fora) o pacote de L bits para o enlace de R bps
- **armazenar e encaminhar:** o pacote *inteiro* precisa chegar no roteador antes de ser transmitido no próximo enlace

Exemplo numérico de um salto:

- $L = 10$ Kbits
- $R = 100$ Mbps
- atraso de transmissão de um salto = 0,1 ms

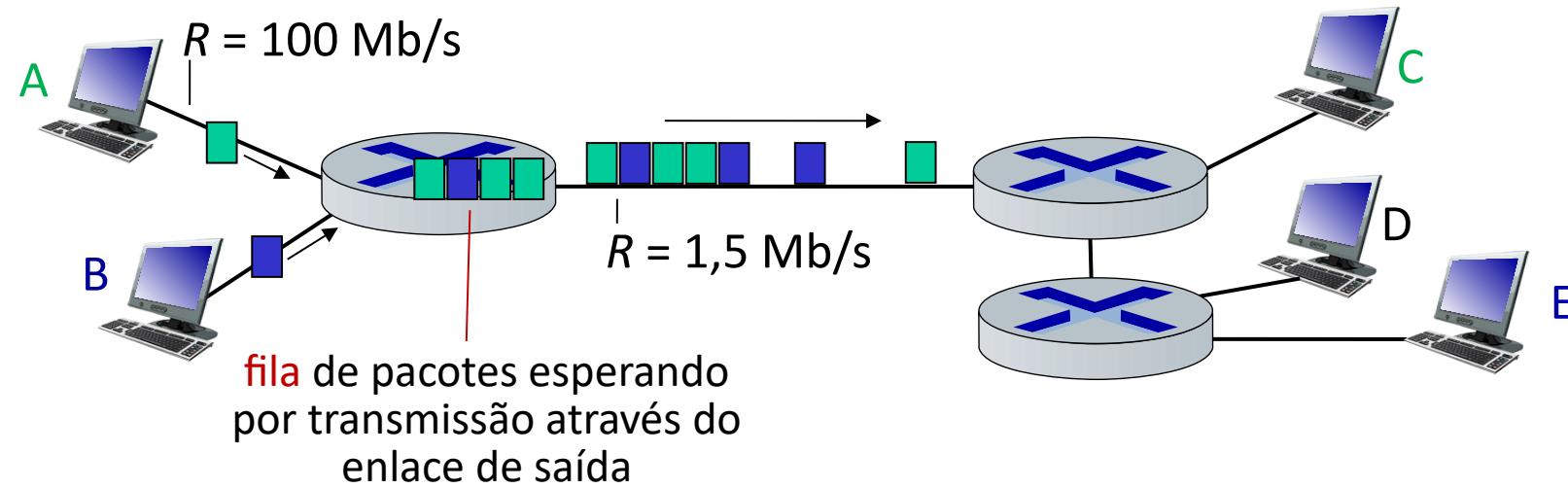
Comutação de pacotes: enfileiramento



Enfileiramento ocorre quando o trabalho chega mais rápido do que pode ser atendido :



Comutação de pacotes: enfileiramento



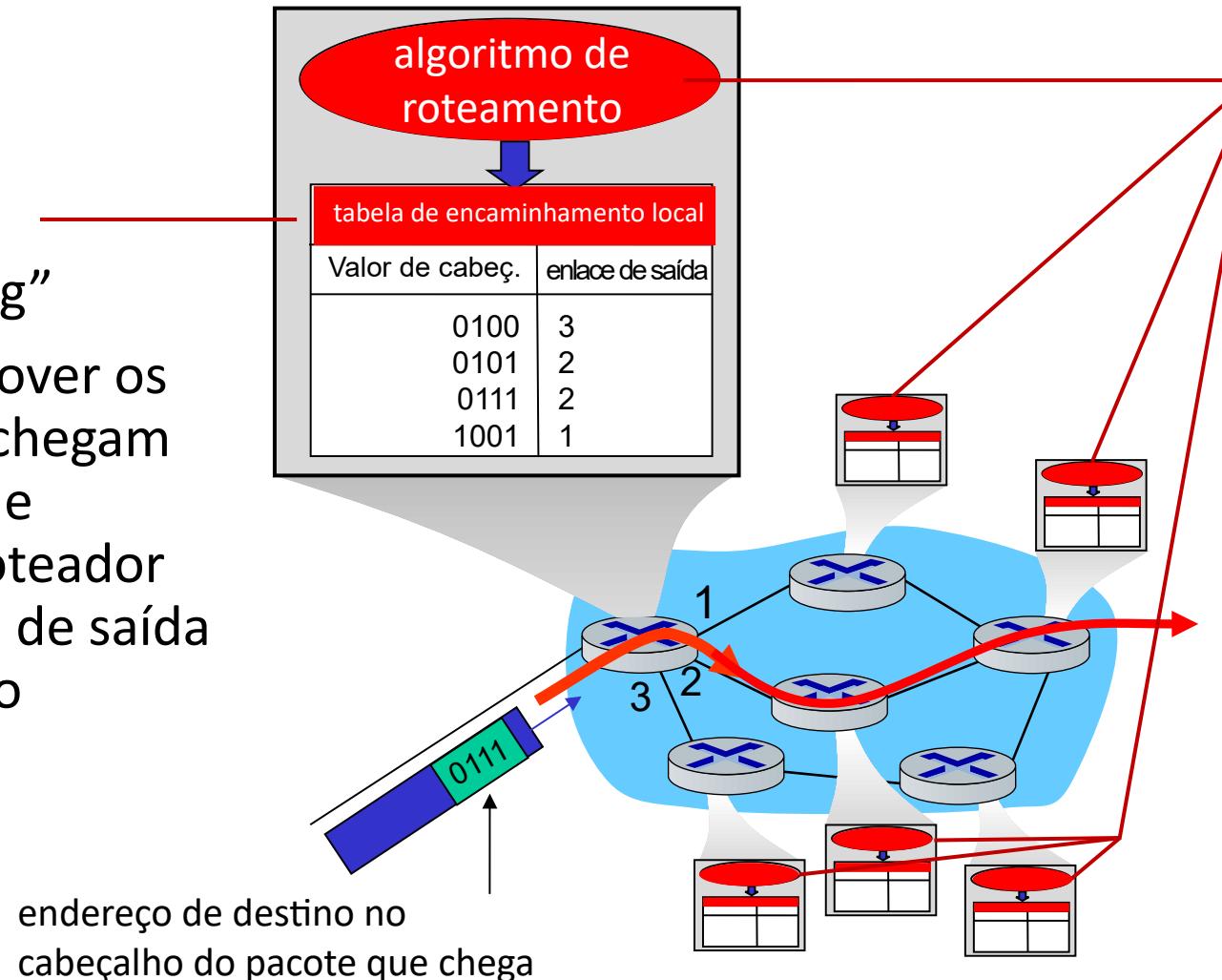
Enfileiramento e perda de pacotes: se a taxa de chegada (em bps) para o enlace exceder a taxa de transmissão (bps) do enlace por algum período de tempo:

- os pacotes ficarão na fila, esperando para serem transmitidos no enlace de saída
- pacotes podem ser descartados (perdidos) se a memória (buffer) no roteador ficar cheia

Duas funções principais do núcleo da rede

Encaminhar:

- aka “switching”
- ação *local*: mover os pacotes que chegam nos enlaces de entrada do roteador para o enlace de saída apropriado do roteador



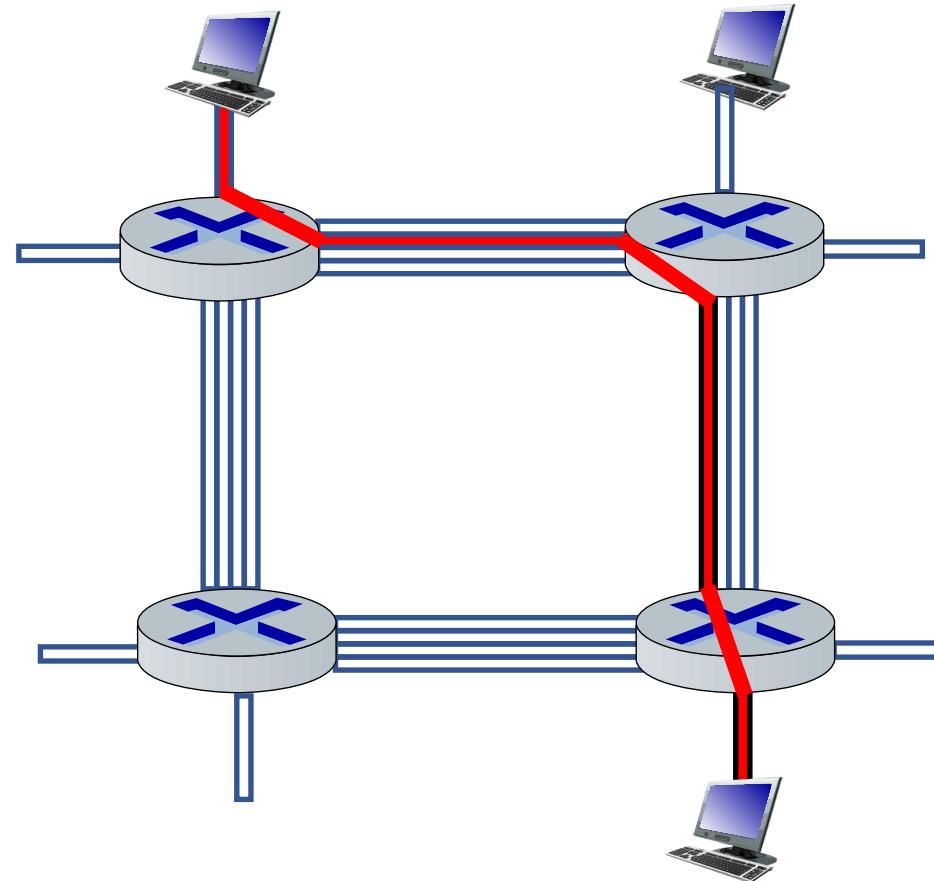
Roteamento:

- ação *global*: determinar os caminhos de origem a destino a serem percorridos pelos pacotes
- algoritmos de roteamento

Alternativa para comutação de pacotes: comutação de circuitos

recursos fim-fim alocados (reservados)
para “chamada” entre a origem e o destino

- no diagrama, cada enlace tem quatro circuitos.
 - a chamada obtém o 2º circuito no enlace superior e o 1º circuito no enlace direito.
- recursos dedicados: sem compartilhamento
 - desempenho tipo circuito (garantido)
- segmento de circuito inativo se não for usado por chamada (**sem compartilhamento**)
- Foi comumente usado em redes telefônicas tradicionais (atualmente é comut. de pacotes)



* Confira os exercícios interativos online para mais exemplos: http://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/interactive

Comutação de circuitos: FDM e TDM

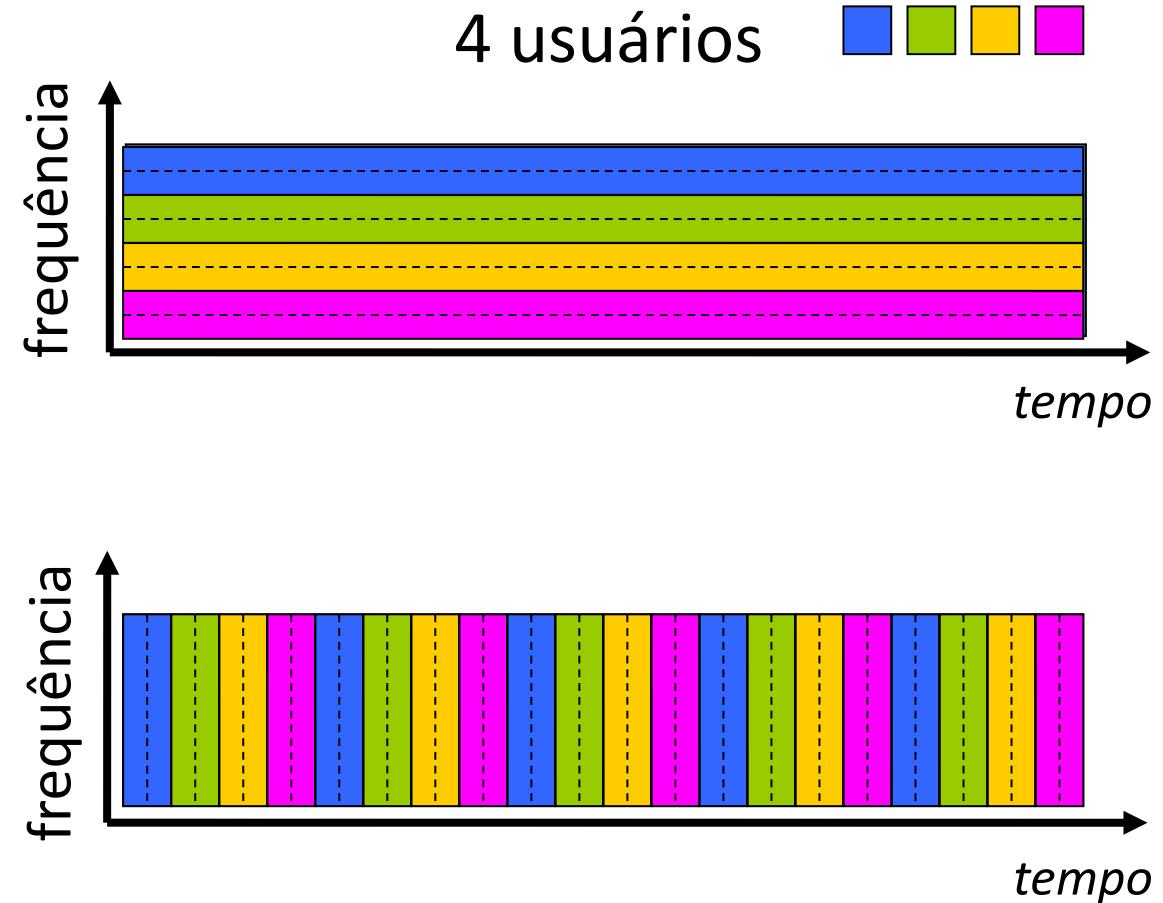
Frequency Division Multiplexing (FDM)

– Multiplexação por Divisão de Frequência

- frequências ópticas eletromagnéticas divididas em bandas de frequência (estreitas)
- cada chamada alocada em sua própria banda, pode transmitir na taxa máxima dessa banda estreita

Time Division Multiplexing (TDM) – Multiplexação por divisão de tempo

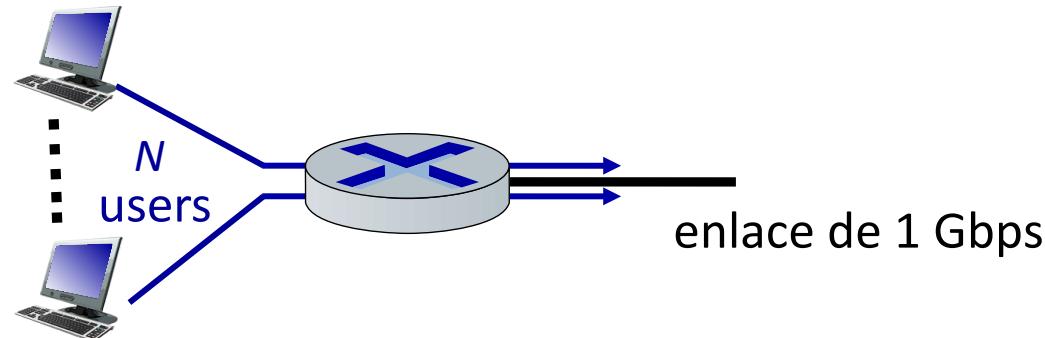
- tempo dividido em slots
- para cada chamada é (são) alocado(s) slot(s) periódico(s), pode transmitir na taxa máxima da banda de frequência (mais ampla) (apenas) durante seu(s) intervalo(s) de tempo



Comutação de pacotes versus comutação de circuitos

exemplo:

- enlace de 1 Gb/s
- cada usuário:
 - 100 Mb/s quando “ativo”
 - ativo 10% do tempo



Q: quantos usuários podem usar esta rede em comutação de circuitos e comutação de pacotes?

- *comutação de circuitos:* 10 usuários
- *comutação de pacotes:* com 35 usuários, probabilidade de > 10 ativos ao mesmo tempo é menor que 0,0004 *

* Confira os exercícios interativos online para mais exemplos: http://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/interactive

Comutação de pacotes versus comutação de circuitos

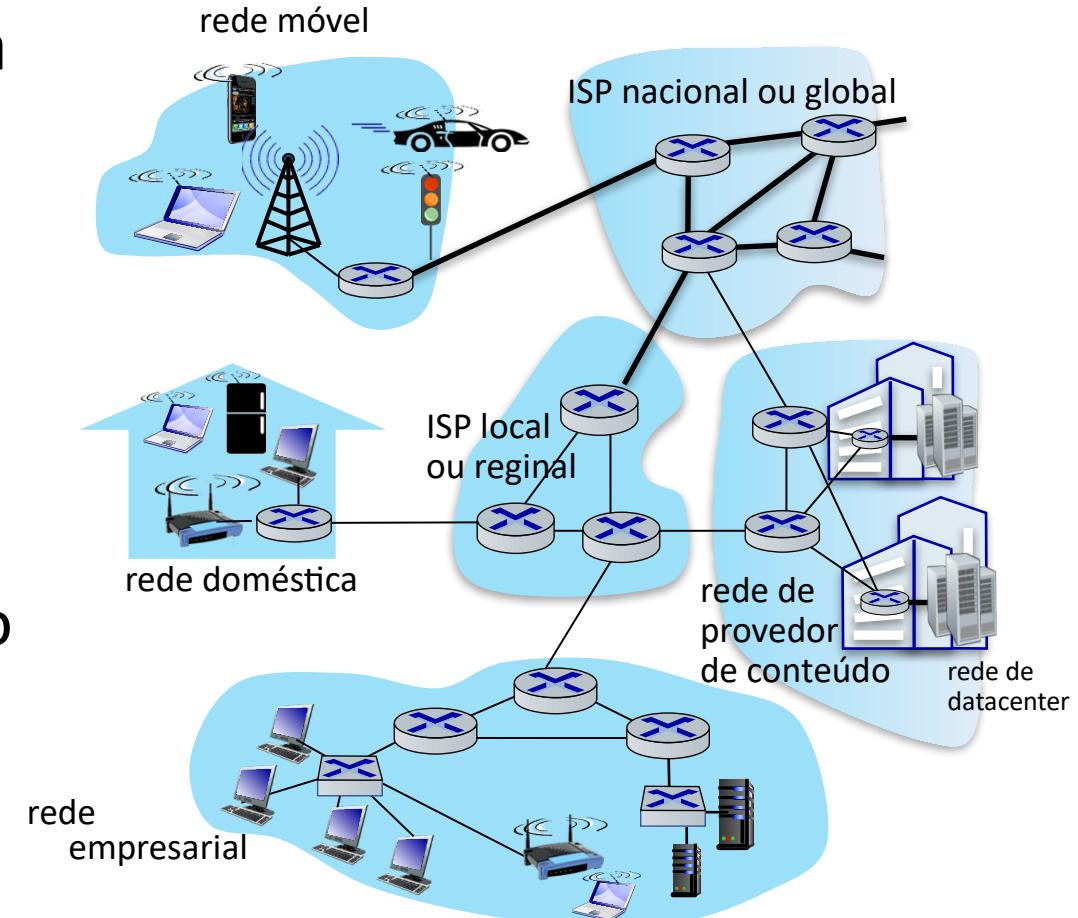
A comutação de pacote é a grande vencedora?

- ótima para dados “intermitentes” - às vezes há dados para enviar, mas outras vezes não há
 - compartilhamento de recursos
 - mais simples, sem configuração de chamada
- **congestionamento excessivo possível:** atraso e perda de pacote devido a estouro de buffer
 - protocolos necessários para transferência confiável de dados e controle de congestionamento
- **Q: Como fornecer comportamento semelhante ao de um circuito com comutação de pacotes?**
 - “É complicado.” Vamos estudar várias técnicas que tentam tornar a comutação de pacotes o mais “semelhante a um circuito” possível.

Q: analogias humanas de recursos reservados (comutação de circuitos) versus alocação sob demanda (comutação de pacotes)?

Estrutura da Internet: uma “rede de redes”

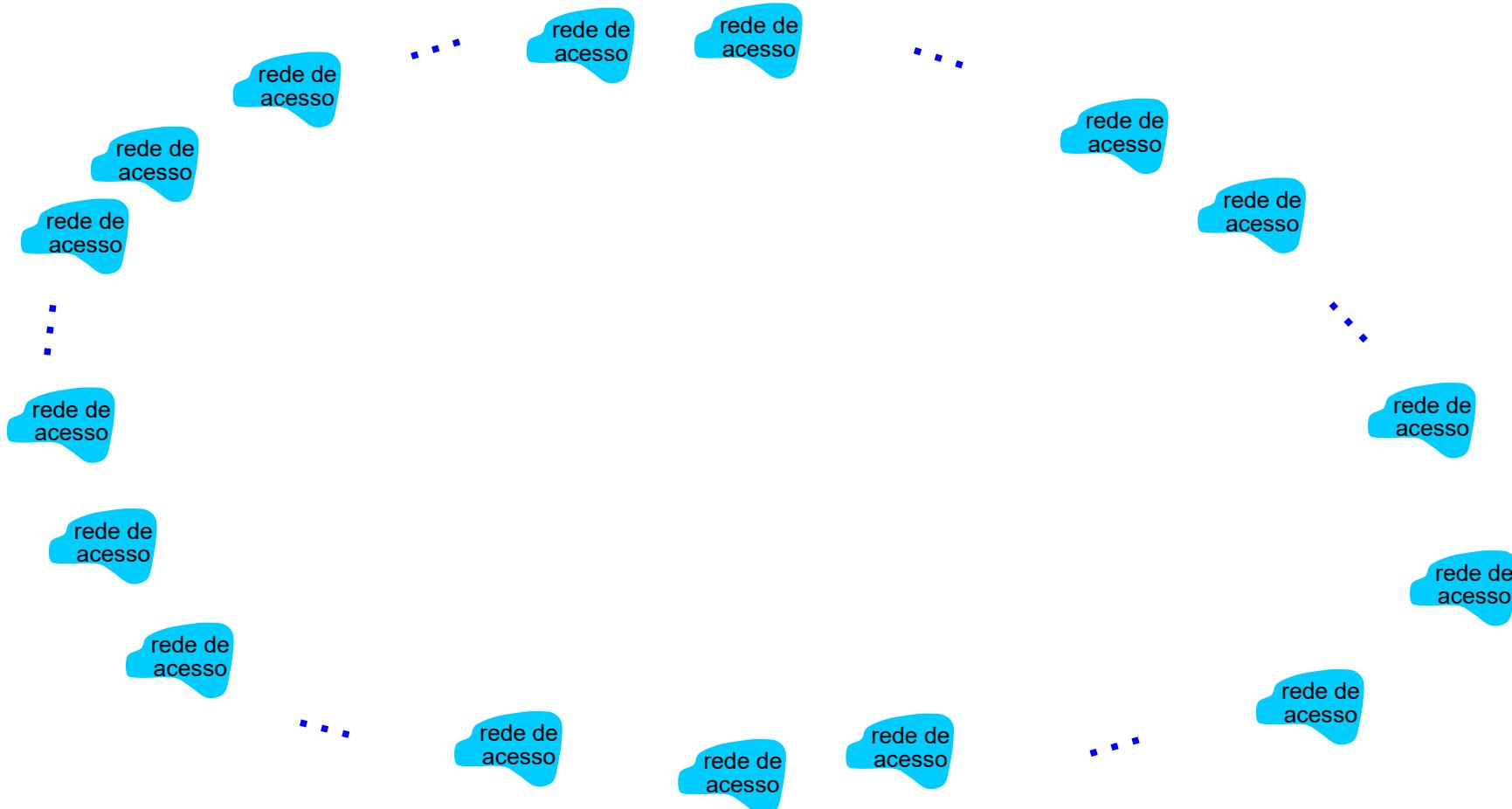
- hospedeiros se conectam à Internet via Provedores de **acesso** (**access** Internet Service Providers - ISPs)
- ISPs de acesso, por sua vez, devem estar interconectados
 - de modo que *quaisquer* dois hospedeiros (*em qualquer lugar!*) possam enviar pacotes um para o outro
- a rede de redes resultante é muito complexa
 - evolução dirigida por **economia** e **políticas nacionais**



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

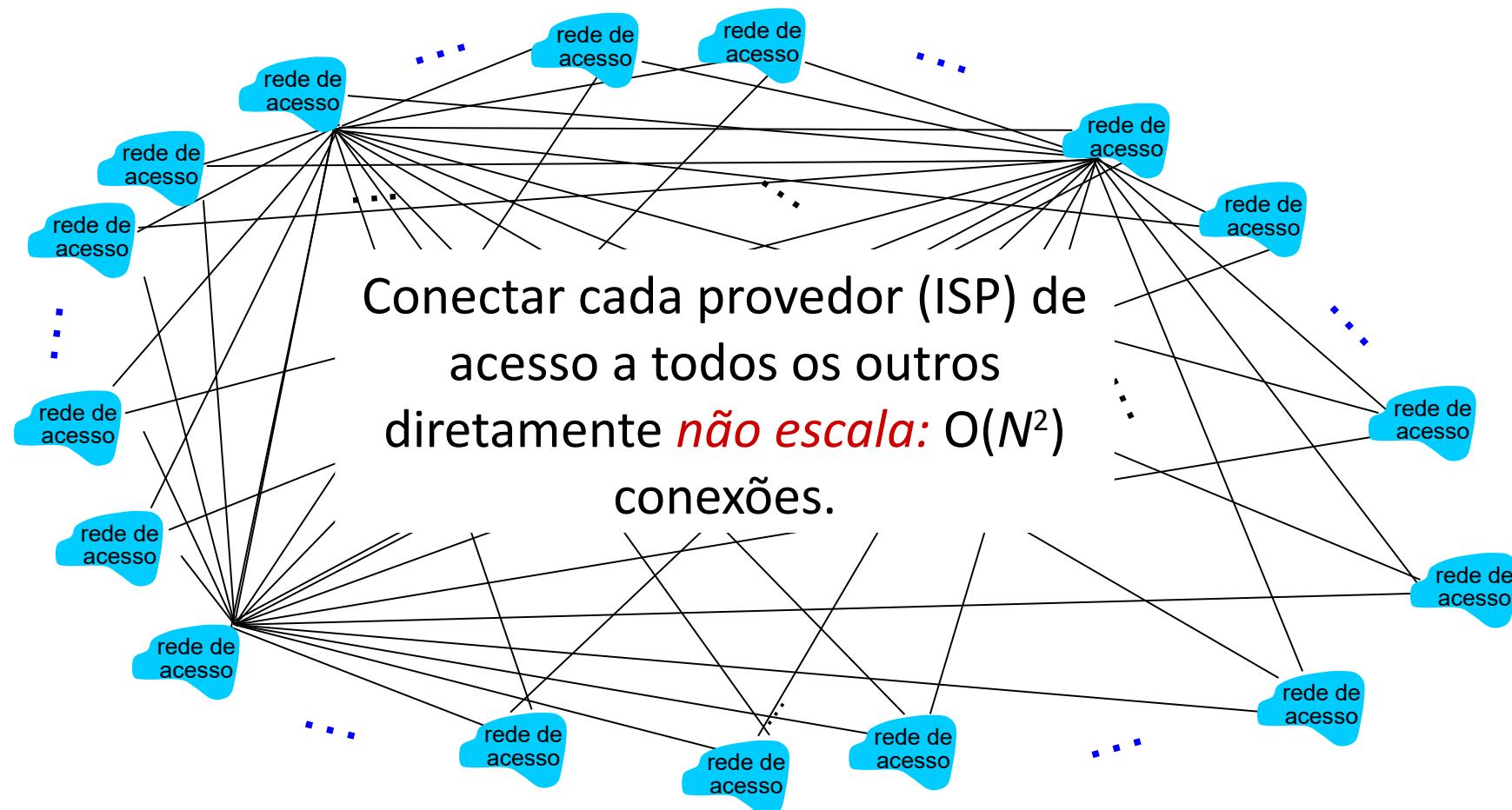
Estrutura da Internet: uma “rede de redes”

Questão: dados *milhões* de provedores (ISPs) de acesso, como conecta-los?



Estrutura da Internet: uma “rede de redes”

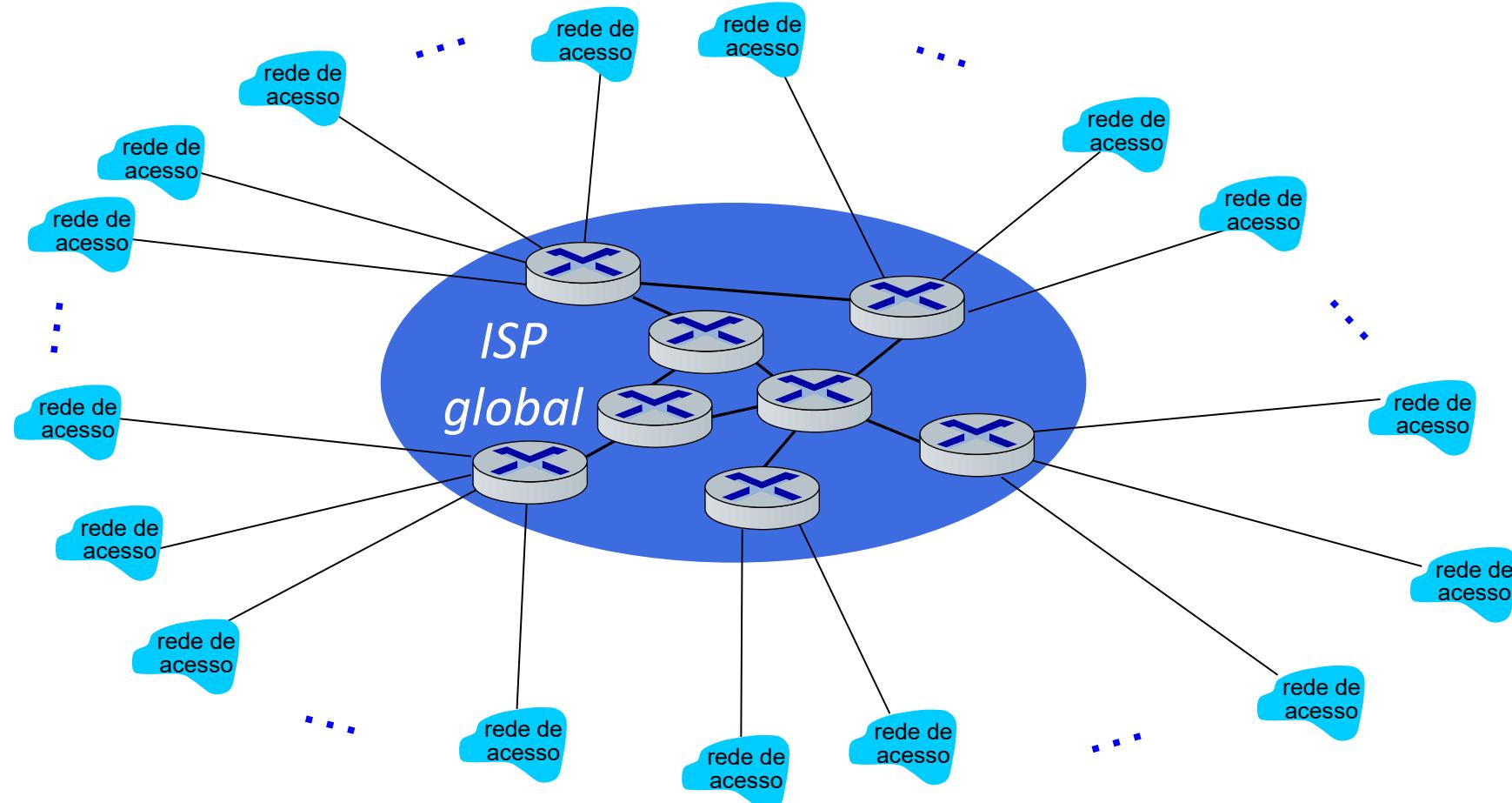
Questão: dados *milhões* de provedores (ISPs) de acesso, como conecta-los?



Estrutura da Internet: uma “rede de redes”

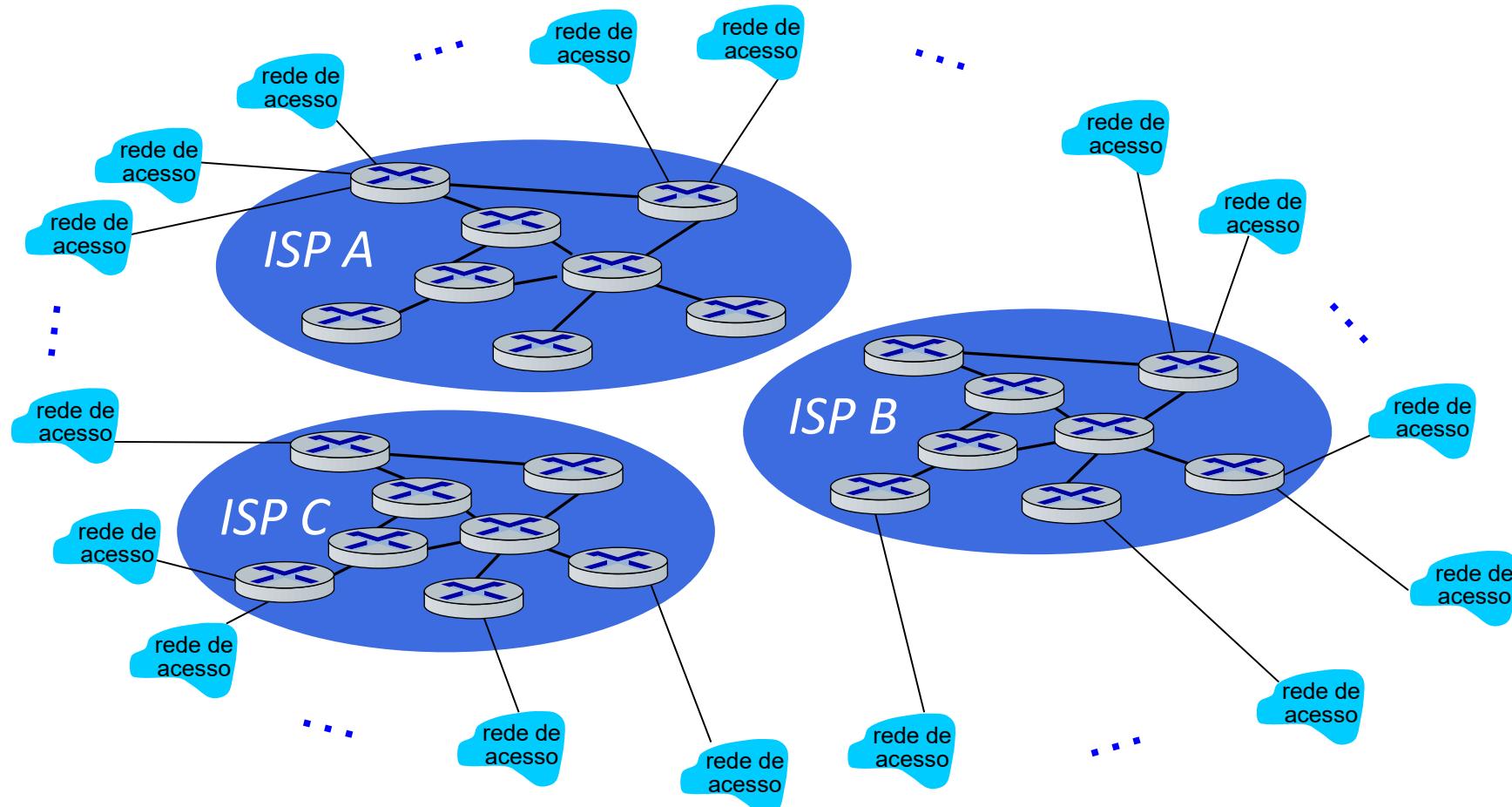
Opção: conectar cada provedor (ISP) de acesso a um ISP de trânsito global.

Provedores (ISPs) clientes e fornecedores tem um acordo econômico.



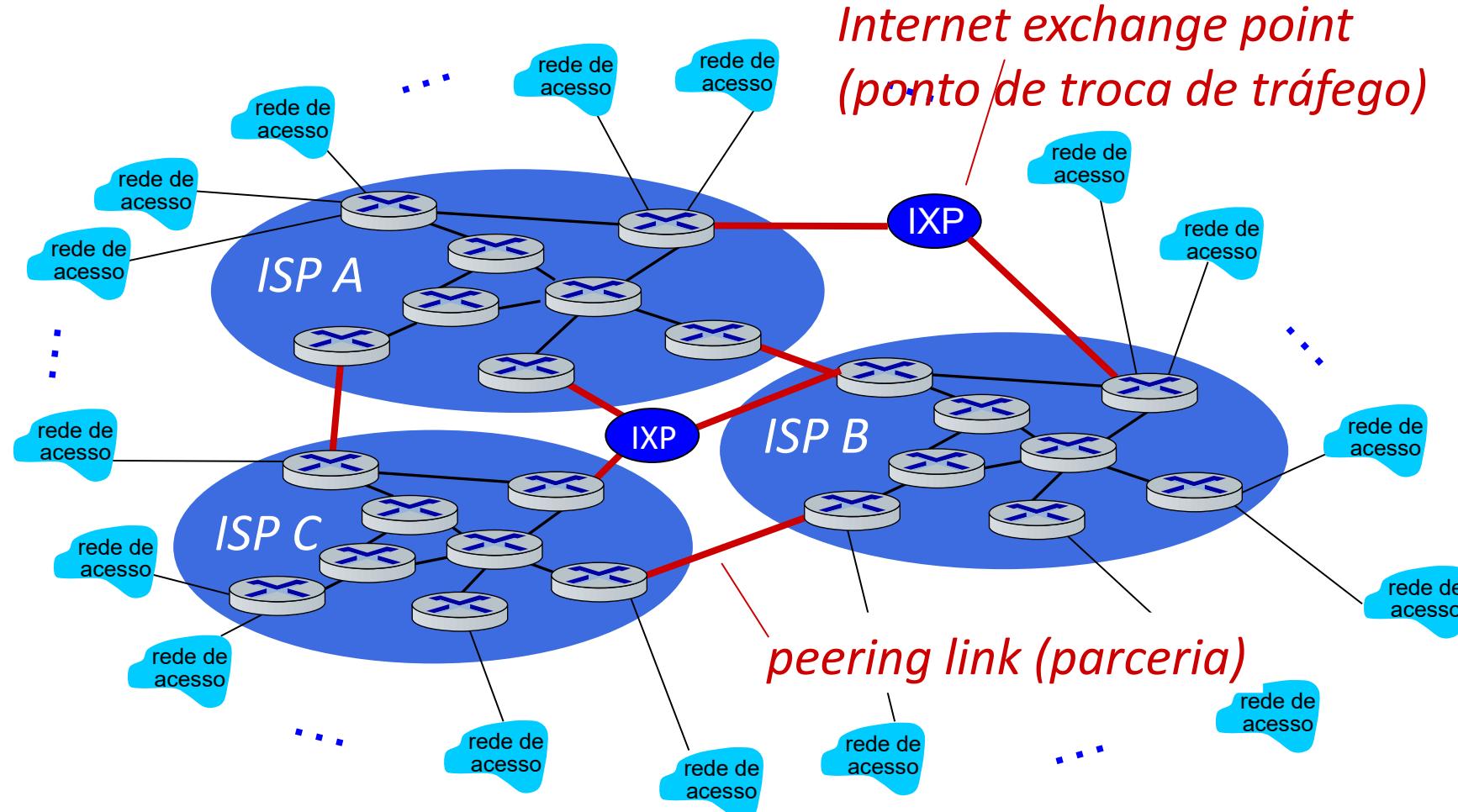
Estrutura da Internet: uma “rede de redes”

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



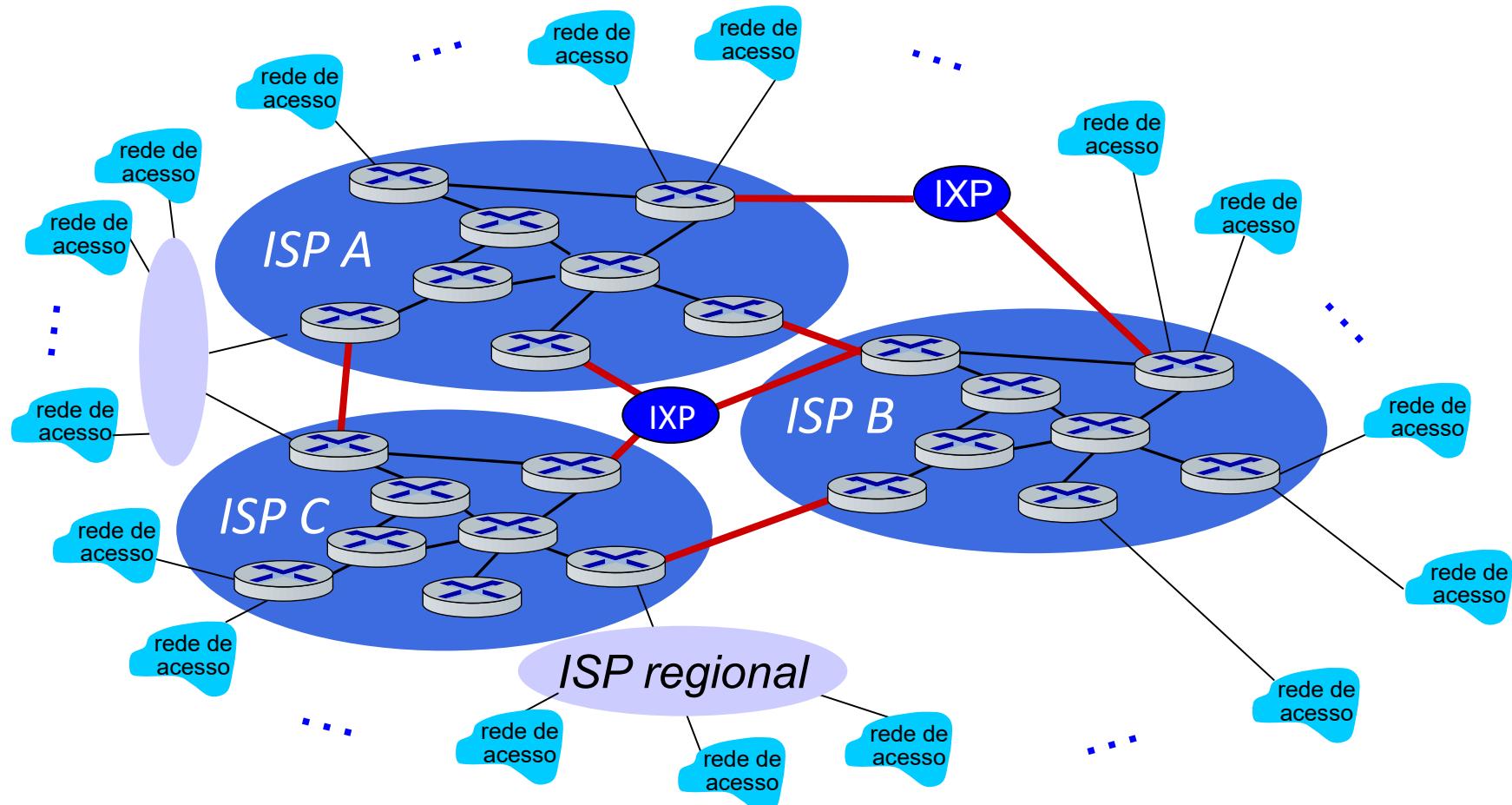
Estrutura da Internet: uma “rede de redes”

Mas se um ISP global for um negócio viável, haverá concorrentes que vão querer estar conectados



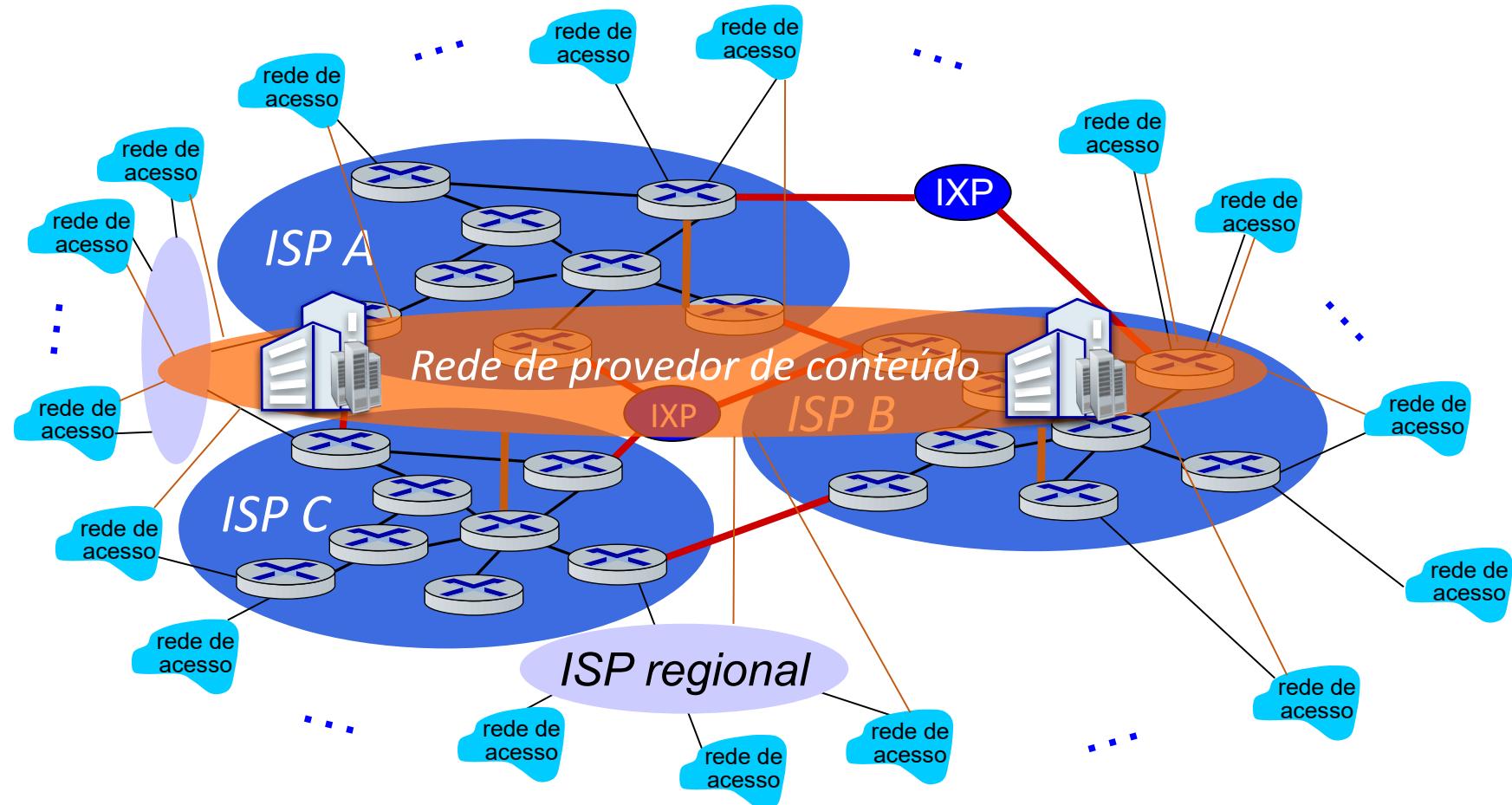
Estrutura da Internet: uma “rede de redes”

... e redes regionais podem surgir para conectar redes de acesso a ISPs

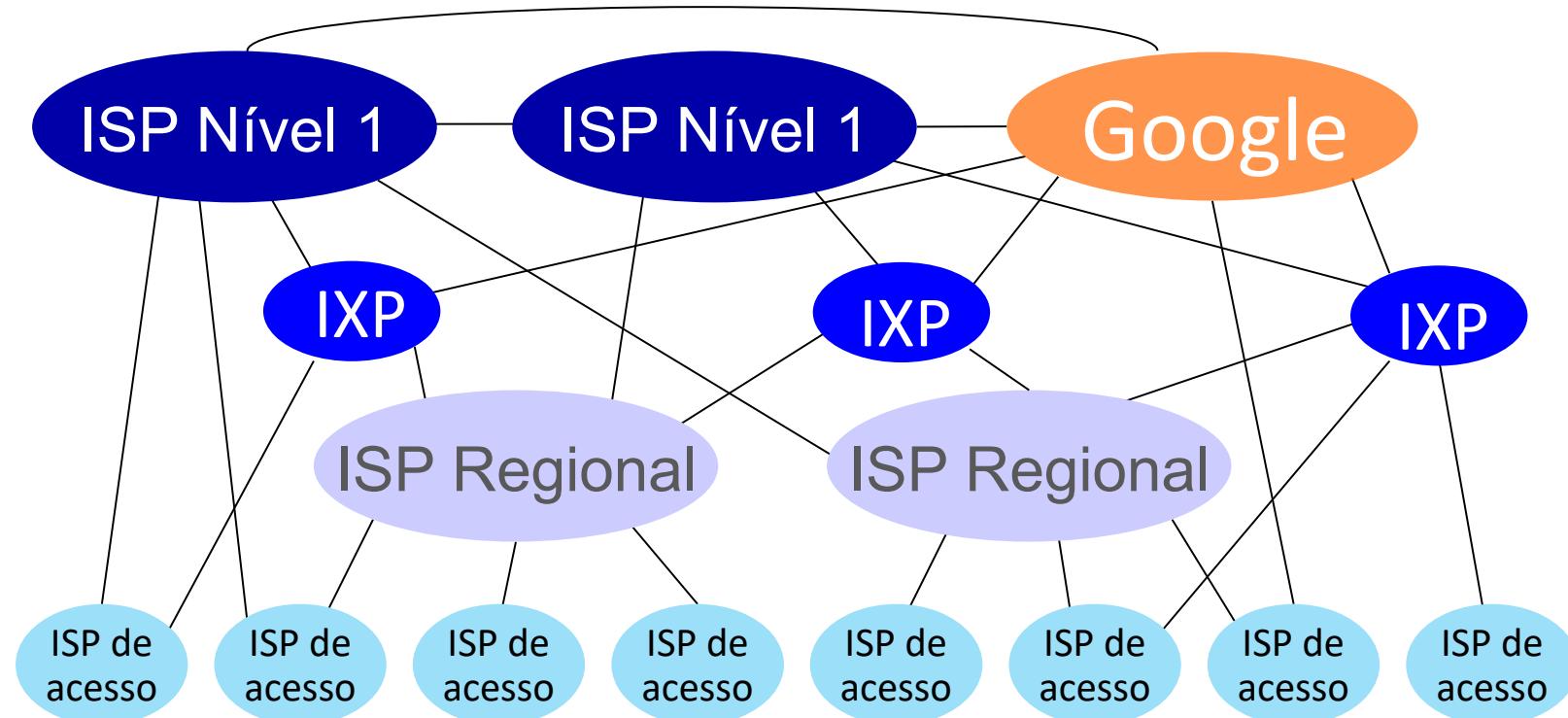


Estrutura da Internet: uma “rede de redes”

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



Estrutura da Internet: uma “rede de redes”

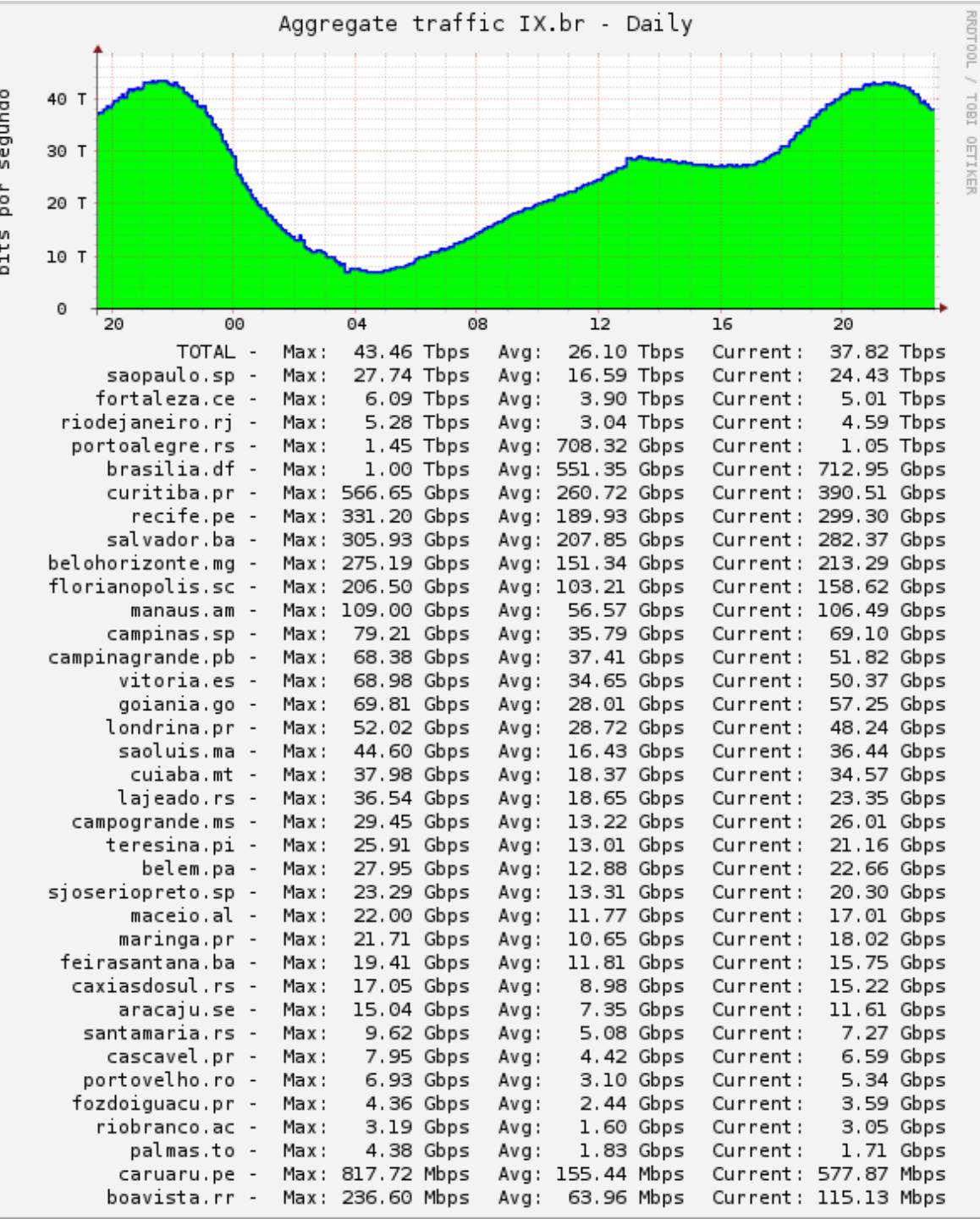


No “centro”: número pequeno de grandes redes bem conectadas

- **provedores comerciais “nível 1”** (ex: Level 3, Sprint, AT&T, NTT), cobertura nacional e internacional
- **redes de provedores de conteúdo** (ex.: Google, Facebook): rede privada que conecta seus data centers à Internet, muitas vezes ignorando provedores de nível 1 e regionais

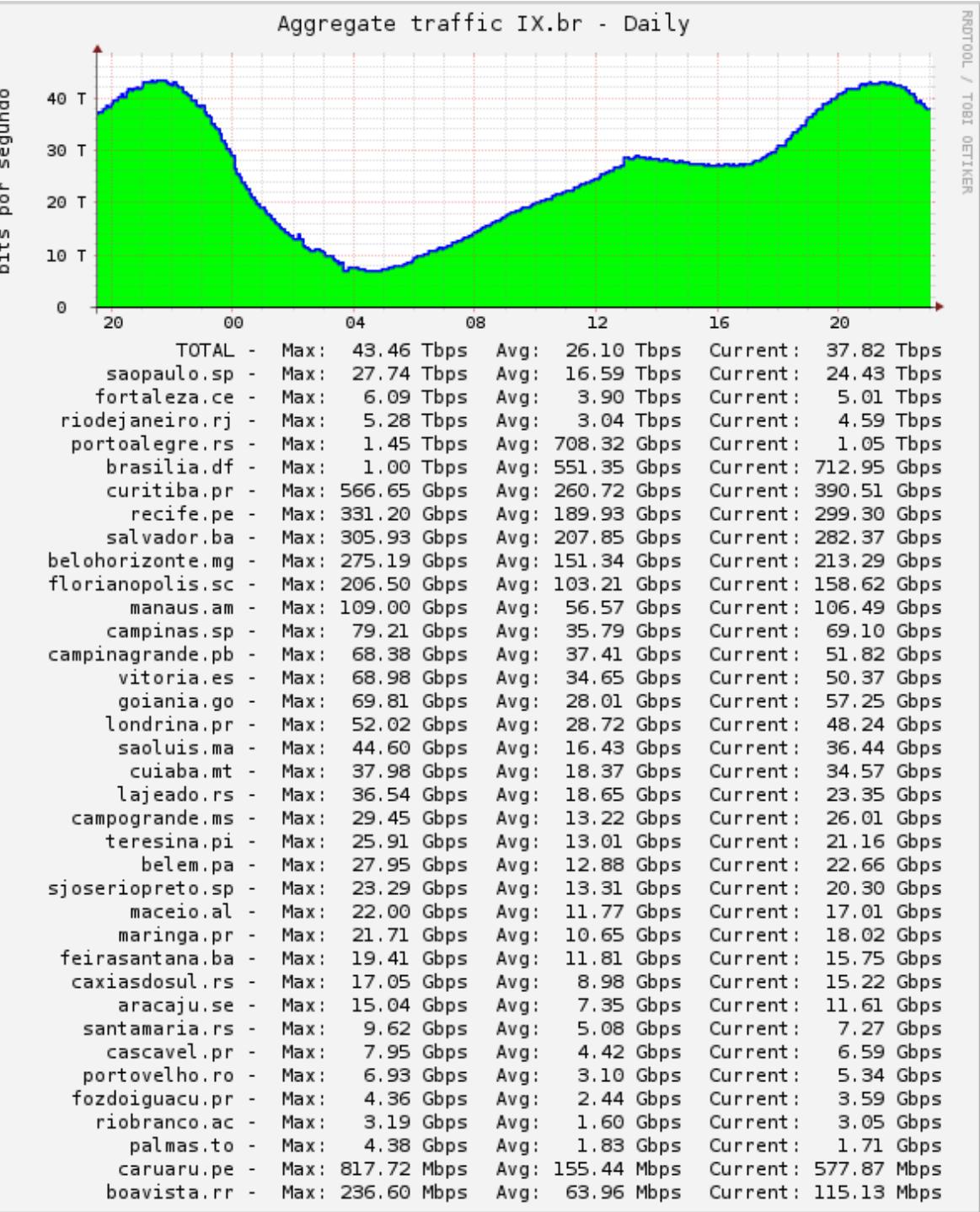
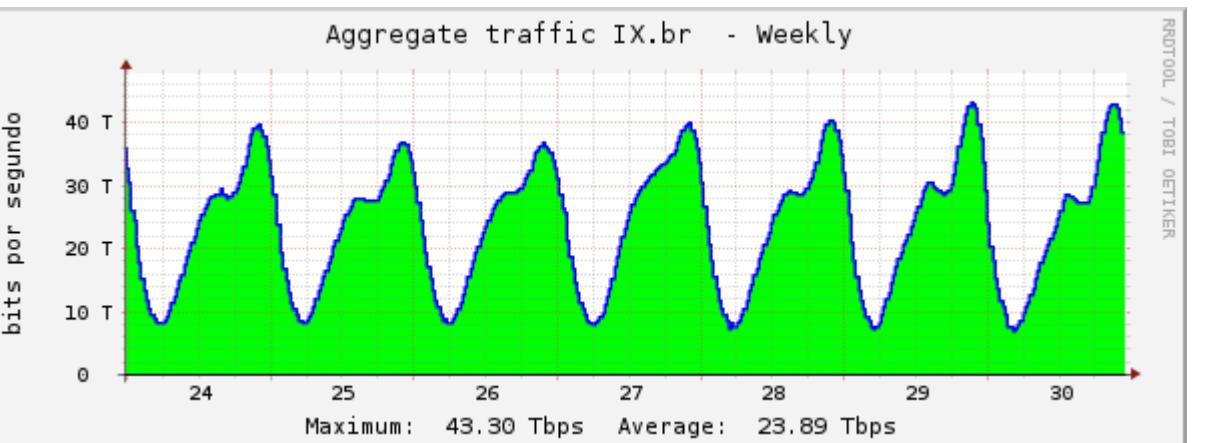
Tráfego agregado no Brasil

- <https://ix.br/agregado/>



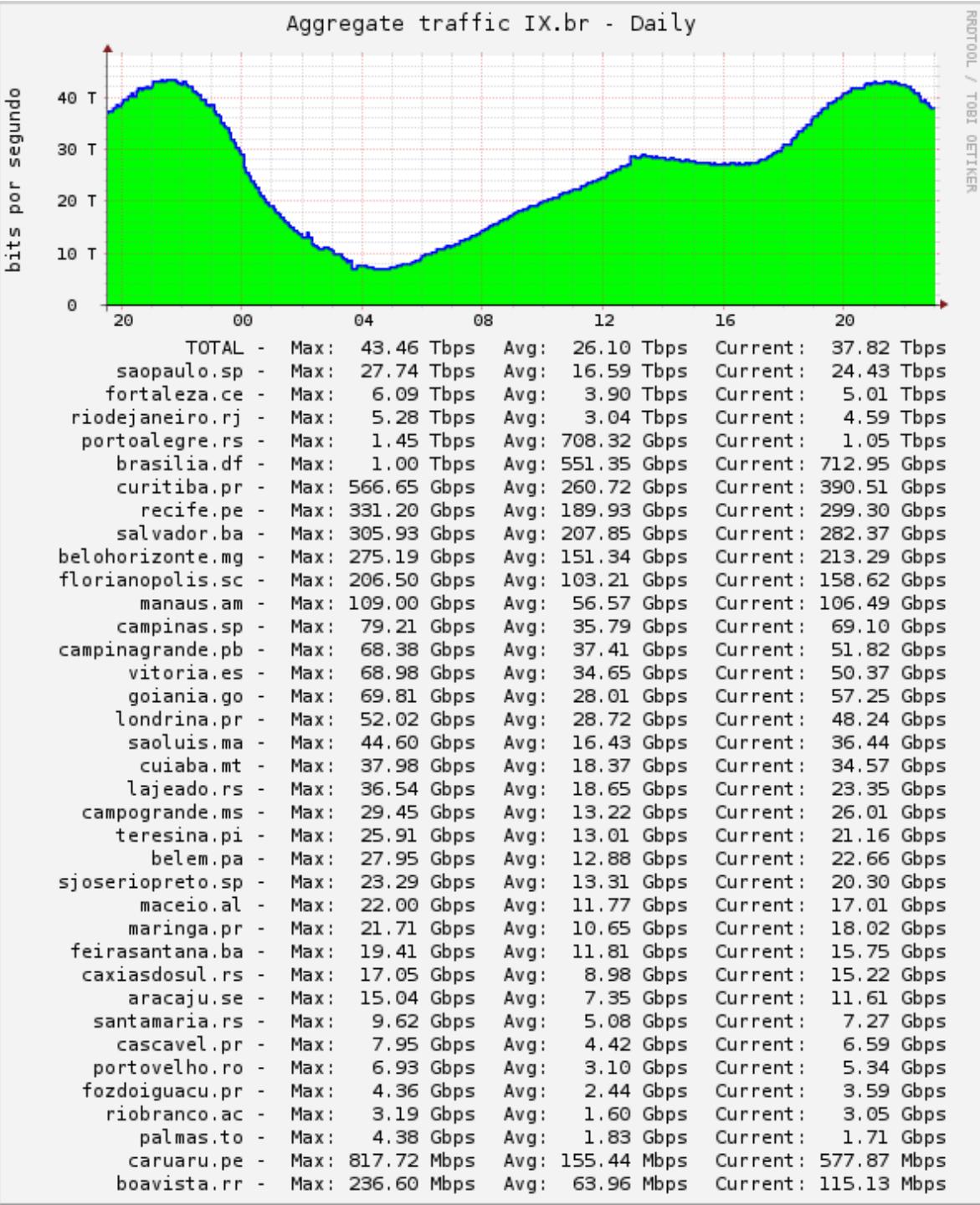
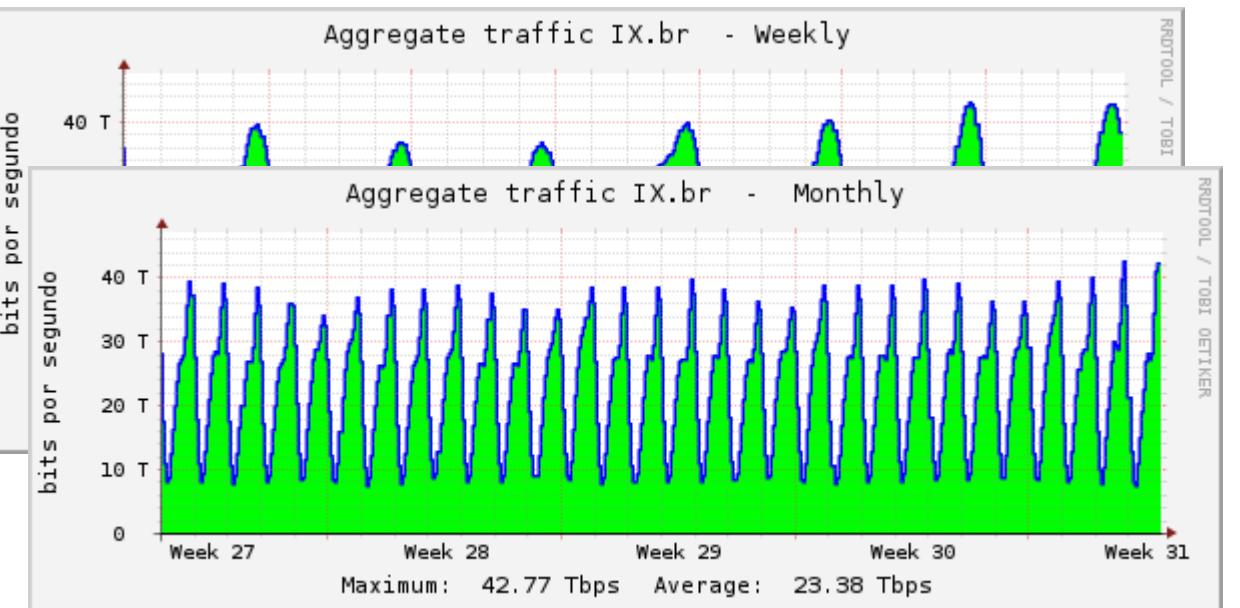
Tráfego agregado no Brasil

- <https://ix.br/agregado/>



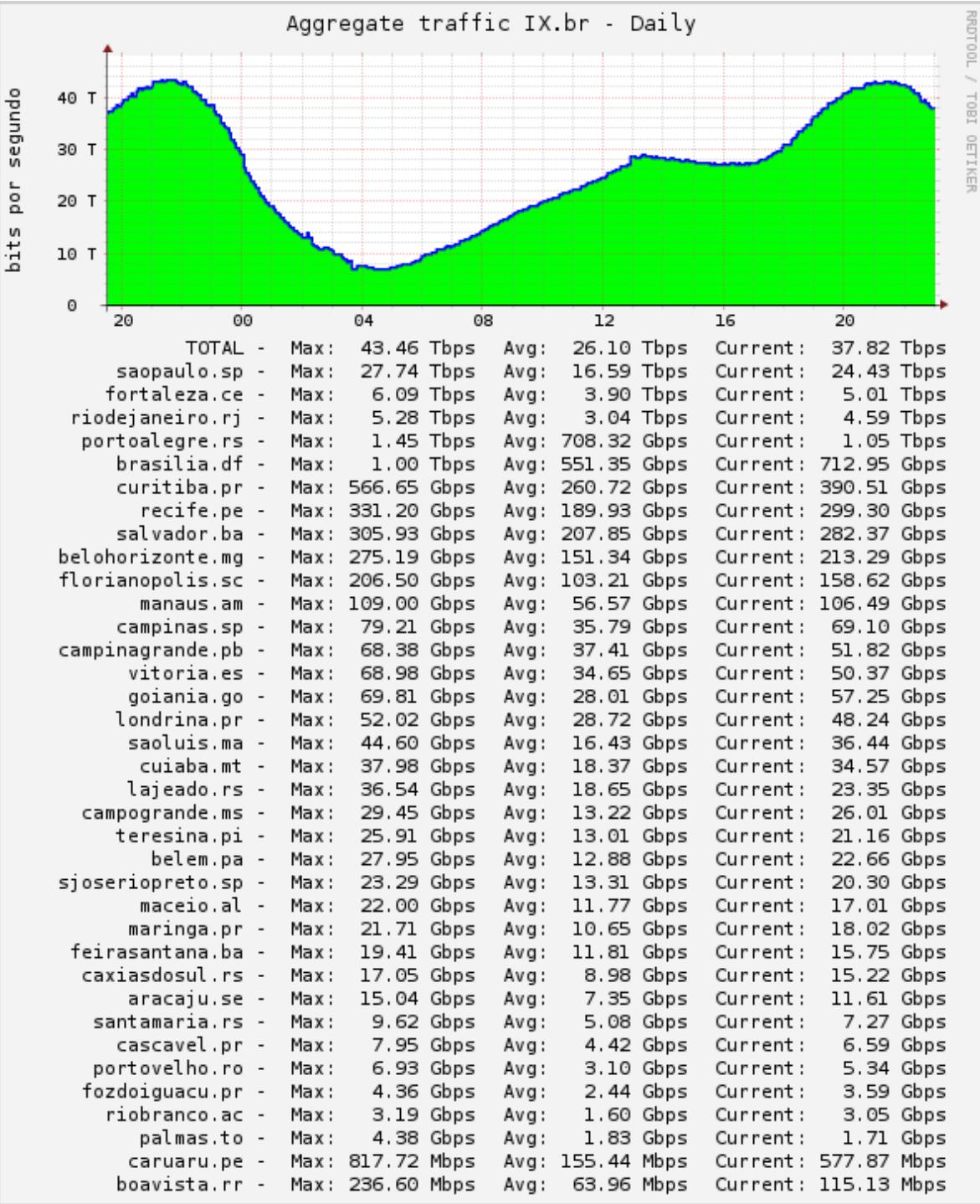
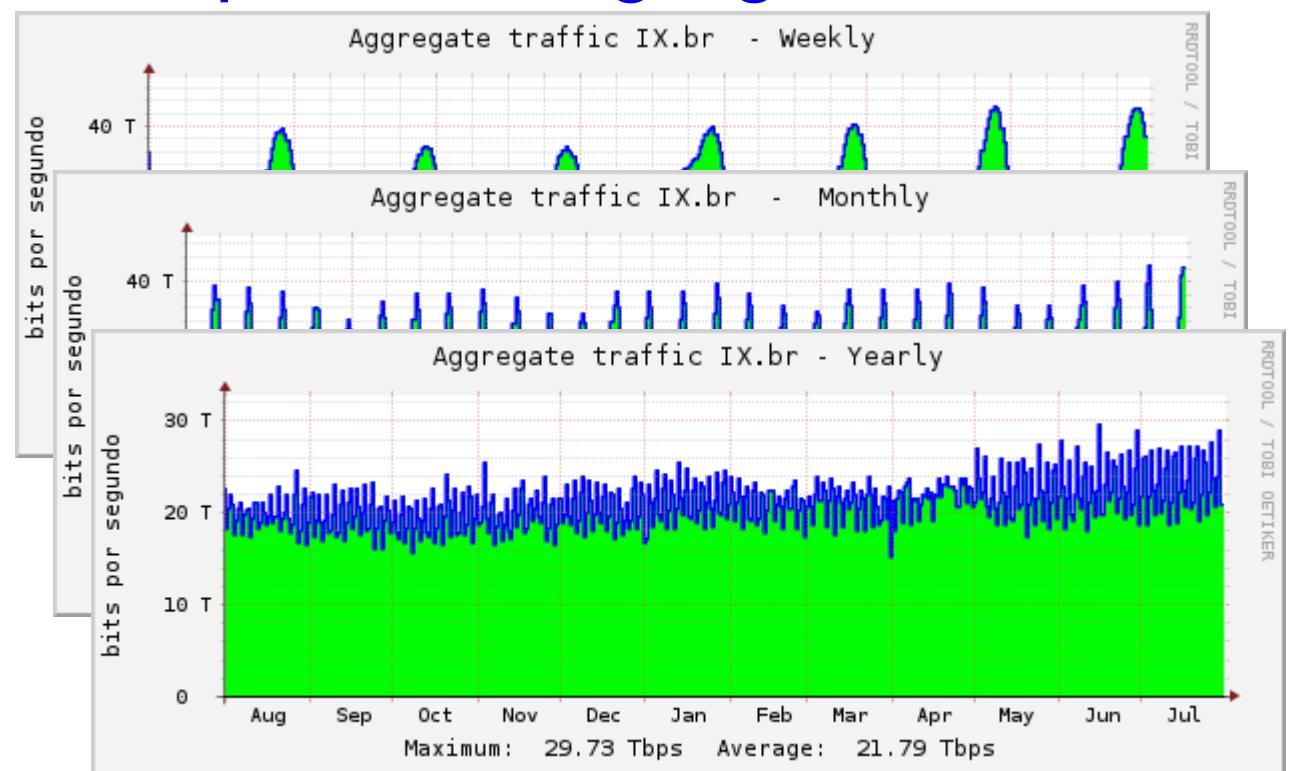
Tráfego agregado no Brasil

- <https://ix.br/agregado/>



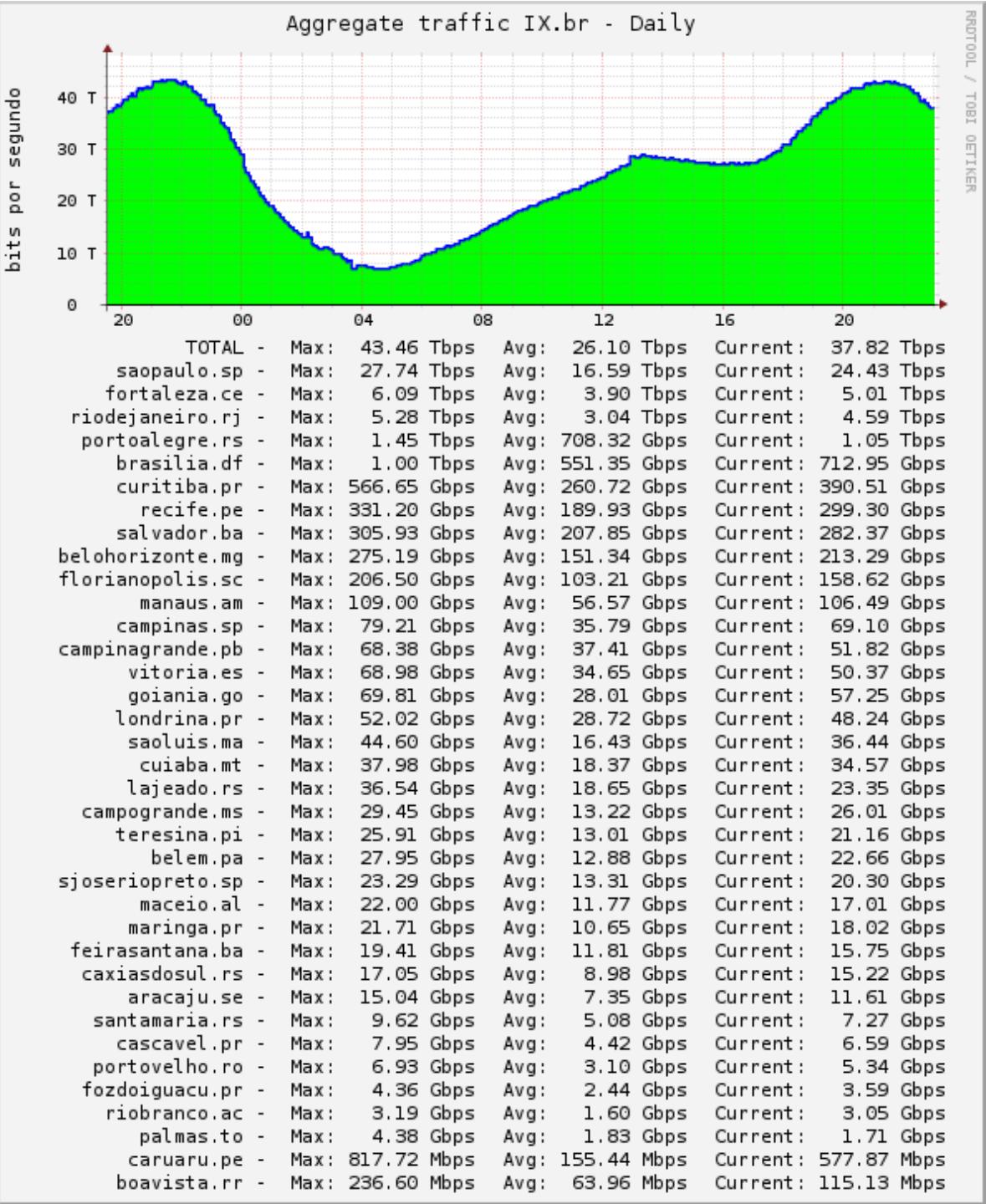
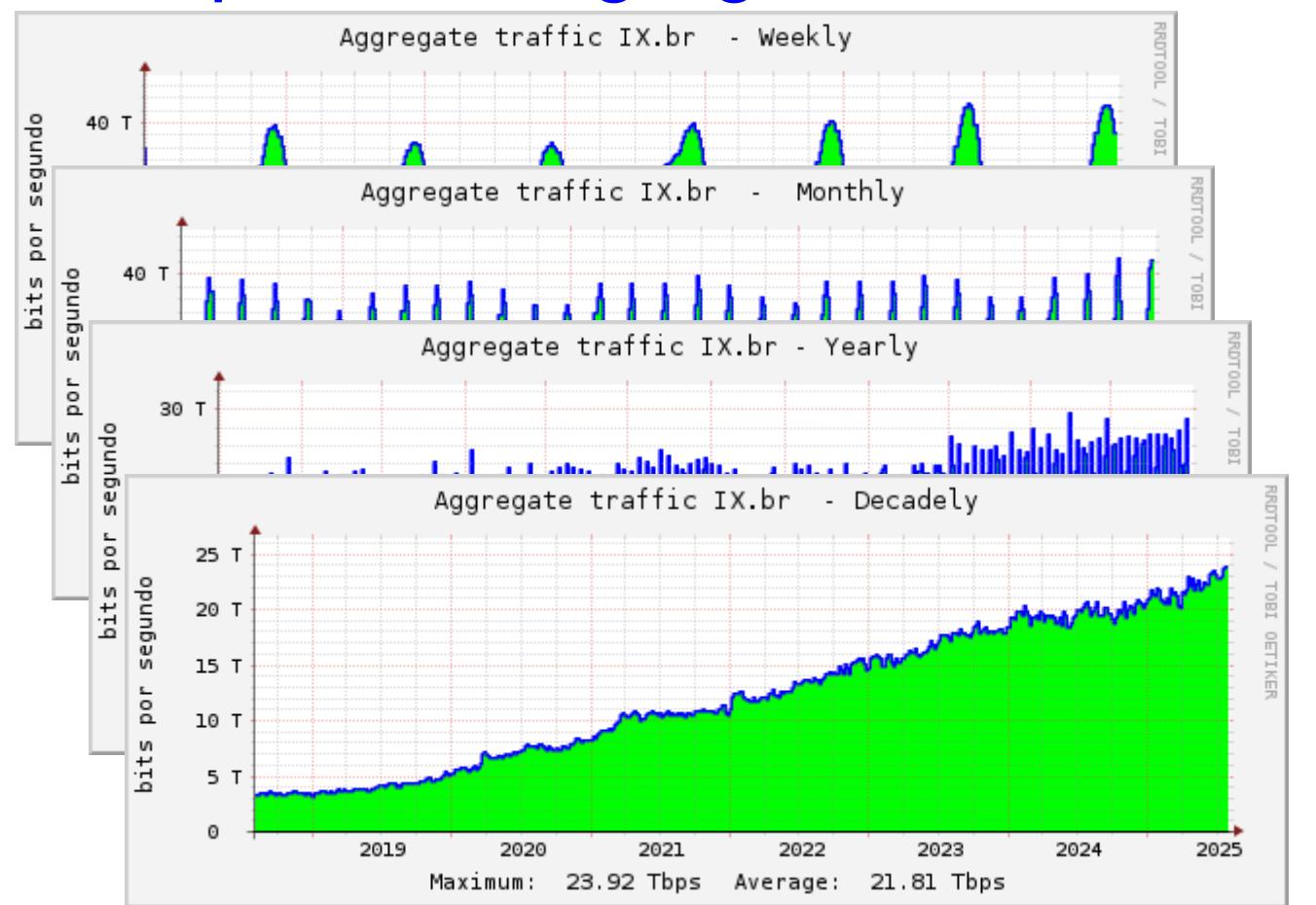
Tráfego agregado no Brasil

- <https://ix.br/agregado/>



Tráfego agregado no Brasil

- <https://ix.br/agregado/>



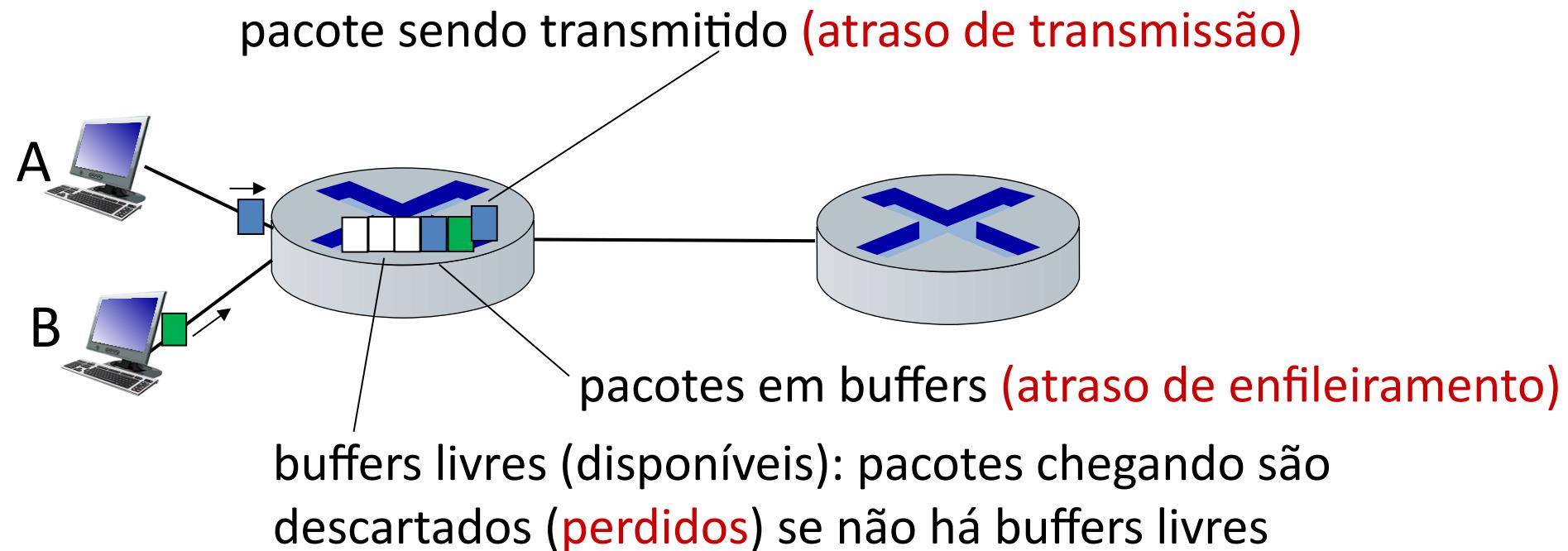
Capítulo 1: roteiro

- O que é a Internet?
- O que é um protocolo?
- Borda da rede: hospedeiros, rede de acesso, mídia física
- Núcleo da rede: comutação de pacote/circuito, estrutura da Internet
- Desempenho: perda, atraso, vazão
- Segurança
- Camadas de protocolo, modelos de serviço
- História

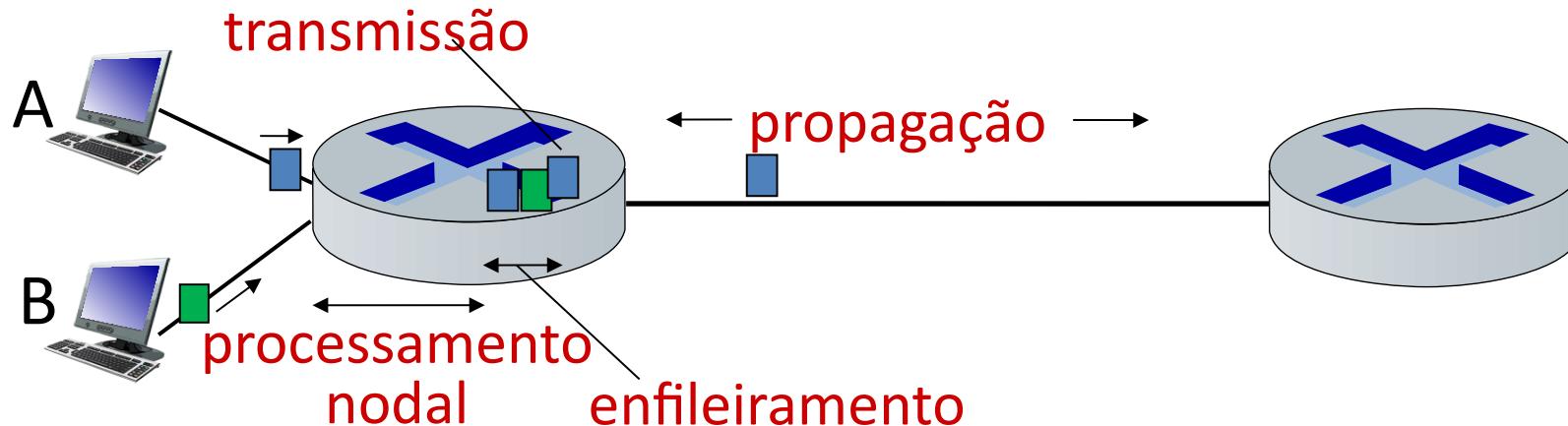


Como ocorre o atraso e a perda de pacotes?

- pacotes *enfileiram* nos buffers do roteador, aguardando a vez para a transmissão
 - o comprimento da fila aumenta quando a taxa de chegada ao enlace (temporariamente) excede a capacidade do enlace de saída
- *perda* de pacote ocorre quando a memória que armazena os pacotes enfileirados se enche



Atraso de pacotes: quatro fontes



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

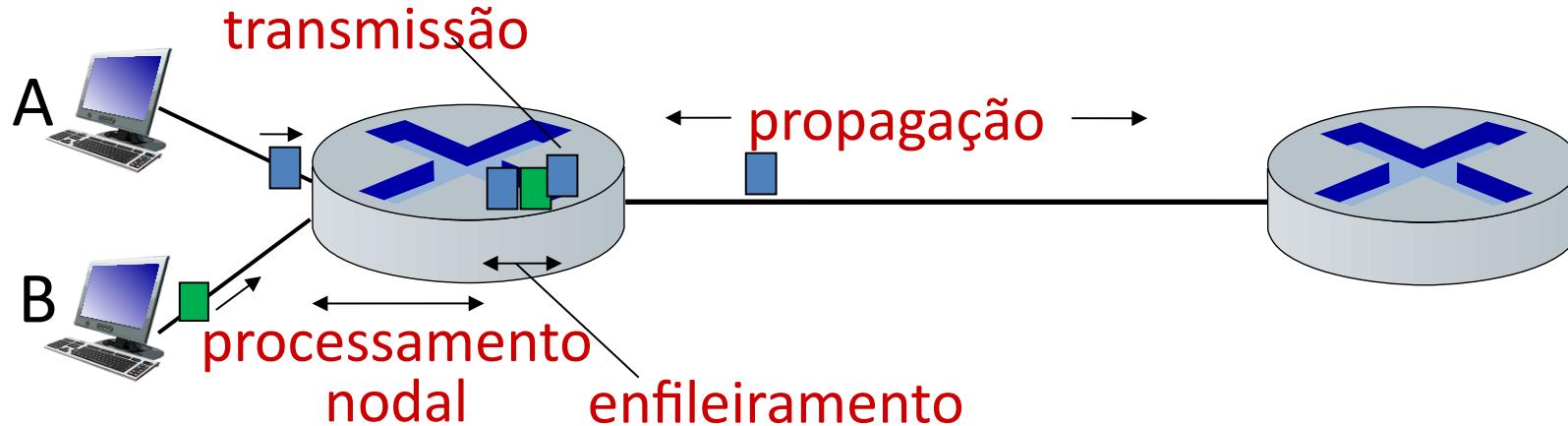
d_{proc} : processamento nodal

- checa erros de bits
- determina enlace de saída
- tipicamente < microsegundos

d_{queue} : atraso de enfileiramento

- tempo esperando no enlace de saída para transmissão
- depende do nível de congestionamento do roteador

Atraso de pacotes: quatro fontes



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

d_{trans} : atraso de transmissão:

- L : tamanho do pacote (bits)
- R : taxa de transmissão do enlace (bps)

■ $d_{\text{trans}} = L/R$

d_{prop} : atraso de propagação:

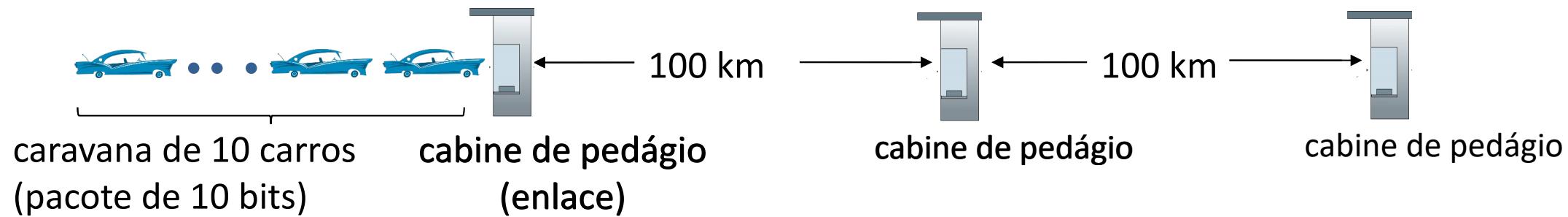
- d : tamanho do enlace físico
- s : velocidade de propagação ($\sim 2 \times 10^8$ metros/segundo)

■ $d_{\text{prop}} = d/s$

d_{trans} e d_{prop}

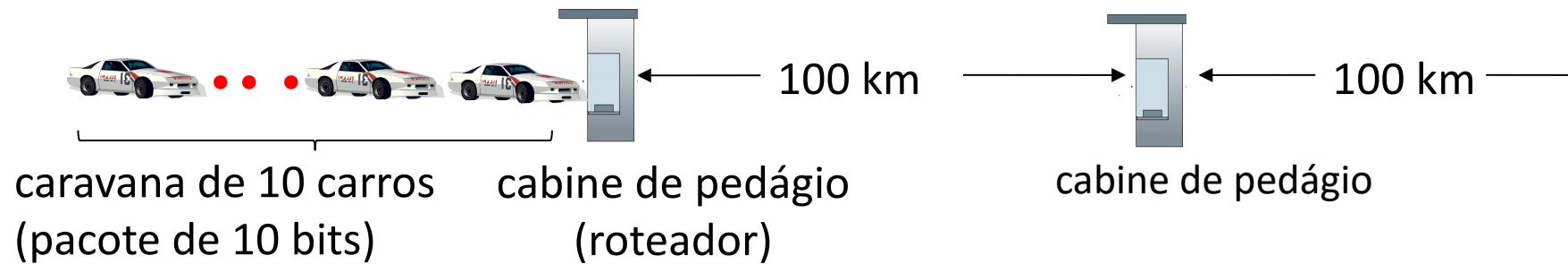
muito diferentes

Analogia da caravana



- carro ~ bit; caravana ~ pacote; serviço de pedágio ~ enlace de transmissão
- cabine de pedágio leva 12 segundos para atender um carro (tempo de transmissão de bits)
- carros “propagam” a 100 km/h
- **Q:** Quanto tempo até a caravana estar alinhada antes da segunda cabine de pedágio?
 - tempo de “empurrar” a caravana inteira através da cabine de pedágio para a rodovia = $12 \times 10 = 120$ seg
 - tempo para o último carro se propagar da 1^a para a 2^a cabine de pedágio: $100\text{km} / (100\text{km} / \text{h}) = 1$ hora
 - **R:** 62 minutos

Analogia da caravana

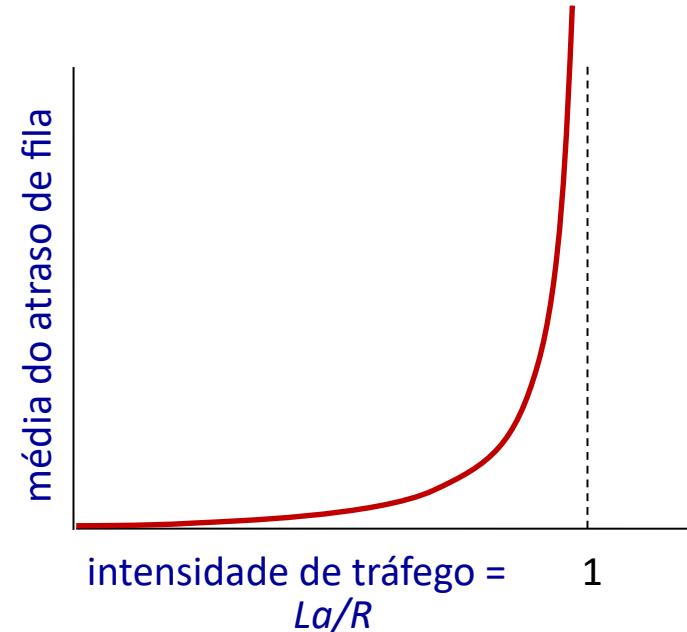


- suponha que os carros agora “propaguem-se” a 1000 km/h
 - e suponha que a cabine de pedágio agora leve um minuto para atender um carro
 - *Q: Algum carro chegará à segunda cabine antes que todos os carros tenham sido atendidos na primeira cabine?*
- R: Sim!* após 7 min, o primeiro carro chega à segunda cabine; três carros ainda estão na primeira cabine.

Atraso de enfileiramento de pacotes (revisitado)

- a : taxa média de chegada de pacotes
- L : comprimento do pacote (bits)
- R : largura de banda do enlace (taxa de transmissão de bits)

$$\frac{L \cdot a}{R} : \frac{\text{taxa de chegada de bits}}{\text{taxa de atendimento de bits}} \quad \text{"intensidade do tráfego"}$$



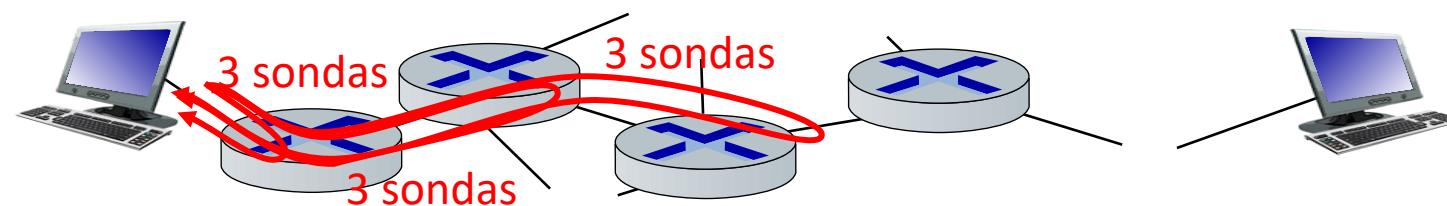
- $La/R \sim 0$: média do atraso de fila pequeno
- $La/R \rightarrow 1$: média do atraso de fila grande
- $La/R > 1$: “trabalho” chegando é maior do que o que pode ser atendido – atraso médio infinito!



$La/R \rightarrow 1$

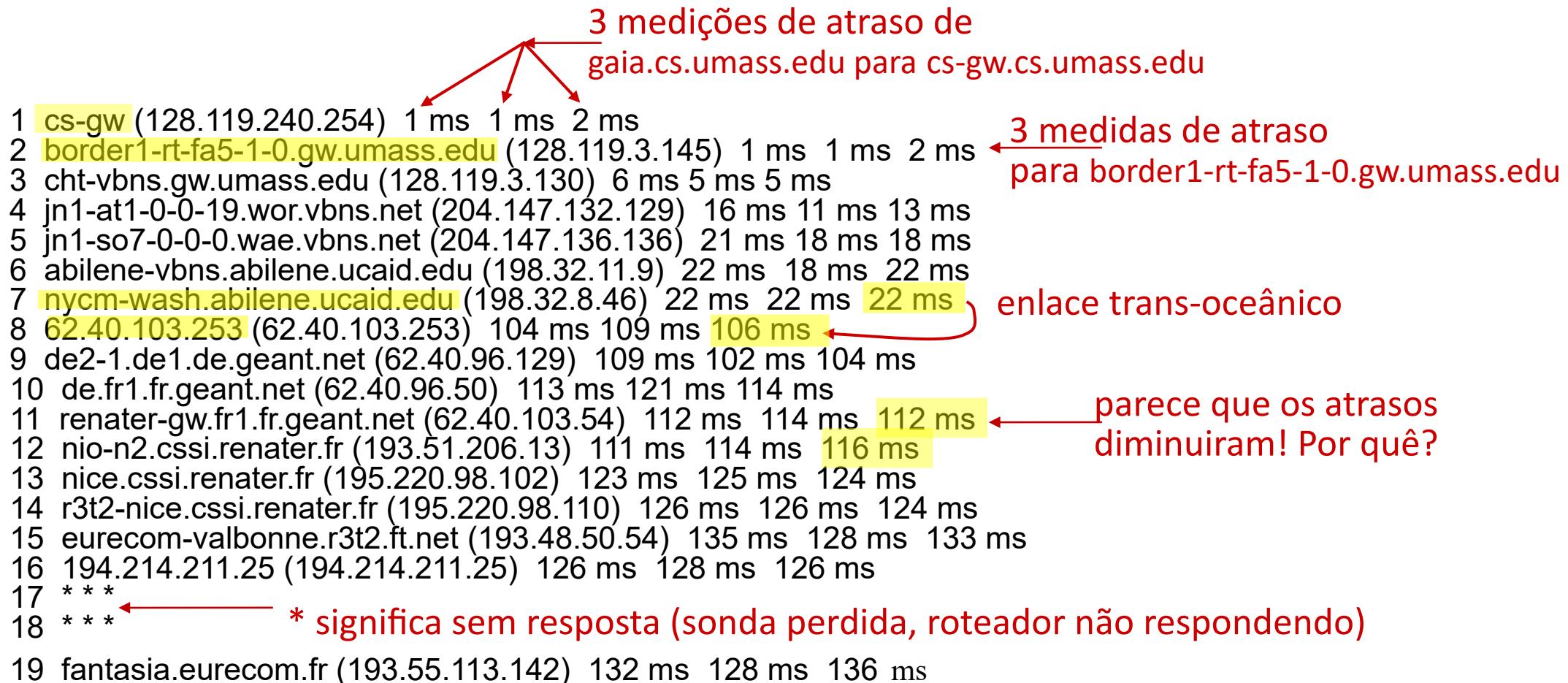
Atrasos e rotas “reais” da Internet

- como são os atrasos e perdas “reais” na Internet?
- programa **traceroute**: fornece medição de atraso da origem até todos os roteadores ao longo do caminho fim a fim da Internet em direção ao destino. Para todo i :
 - envia três pacotes que alcançarão o roteador i no caminho para o destino (com um valor do campo time-to-live de i)
 - roteador i irá retornar pacotes para o remetente
 - remetente mede o intervalo de tempo entre a transmissão e a resposta



Atrasos e rotas reais da Internet

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



* Faça alguns traceroutes a partir de países exóticos em www.traceroute.org

Windows PowerShell

X + | v

- □ X

PS C:\Users\fbrev> tracert www.unesp.br

Rastreando a rota para www.unesp.br [200.145.6.98]
com no máximo 30 saltos:

1	<1 ms	<1 ms	<1 ms	RT-AX86U-F5C0 [192.168.50.1]
2	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
3	6 ms	4 ms	5 ms	152-255-177-126.user.vivozap.com.br [152.255.177.126]
4	5 ms	7 ms	5 ms	152-255-178-52.user.vivozap.com.br [152.255.178.52]
5	*	11 ms	11 ms	152-255-212-124.user.vivozap.com.br [152.255.212.124]
6	8 ms	5 ms	8 ms	as1916.saopaulo.sp.ix.br [187.16.216.4]
7	8 ms	9 ms	6 ms	popsp-csp1.bkb.rnp.br [170.79.214.39]
8	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
9	8 ms	8 ms	9 ms	rt-asr.net.unesp.br [200.145.0.253]
10	8 ms	9 ms	9 ms	groob.reitoria.unesp.br [200.145.6.98]

Rastreamento concluído.

PS C:\Users\fbrev> |

```
PS C:\Users\fbrev> tracert www.ualberta.ca
```

Rastreando a rota para prod.cds.ualberta.cloud [65.8.214.73]
com no máximo 30 saltos:

1	<1 ms	<1 ms	<1 ms	RT-AX86U-F5C0 [192.168.50.1]
2	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
3	5 ms	5 ms	3 ms	187-100-198-50.dsl.telesp.net.br [187.100.198.50]
4	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
5	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
6	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
7	12 ms	17 ms	15 ms	52.93.146.143
8	8 ms	17 ms	9 ms	150.222.70.151
9	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
10	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
11	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
12	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
13	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
14	10 ms	9 ms	7 ms	server-65-8-214-73.gru3.r.cloudfront.net [65.8.214.73]

Rastreamento concluído.
PS C:\Users\fbrev> |

Windows PowerShell

X + | -

- □ X

PS C:\Users\fbrev> tracert www.google.com

Rastreando a rota para www.google.com [2800:3f0:4001:810::2004]
com no máximo 30 saltos:

1	<1 ms	<1 ms	<1 ms	RT-AX86U-F5C0 [2804:431:c7d2:b409::1]
2	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
3	3 ms	6 ms	5 ms	2001:12e0:100:2008:a006:2008:a061:6
4	6 ms	3 ms	4 ms	2001:12e0:100:2009:a002:2008:a006:0
5	*	7 ms	8 ms	2001:12e0:100:1017:a001:2009:a002:a
6	10 ms	9 ms	9 ms	2001:4860:1:1::d84
7	9 ms	8 ms	10 ms	2800:3f0:8040::1
8	9 ms	*	10 ms	2001:4860:0:1::4180
9	10 ms	8 ms	9 ms	2001:4860:0:1::295d
10	9 ms	8 ms	6 ms	2800:3f0:4001:810::2004

Rastreamento concluído.

PS C:\Users\fbrev> |

Windows PowerShell

X + | v

- □ X

PS C:\Users\fbrev> tracert www.facebook.com

Rastreando a rota para star-mini.c10r.facebook.com [2a03:2880:f105:283:face:b00c:0:25de]
com no máximo 30 saltos:

1	<1 ms	<1 ms	<1 ms	RT-AX86U-F5C0 [2804:431:c7d2:b409::1]
2	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
3	7 ms	9 ms	9 ms	2001:12e0:100:2008:a006:2008:a061:6
4	8 ms	6 ms	5 ms	2001:12e0:100:2009:a002:2008:a006:4
5	8 ms	8 ms	11 ms	2001:12e0:100:2009:a002:1025:a001:1
6	24 ms	21 ms	10 ms	2804:7f4:2000:2004:2280::1
7	9 ms	9 ms	9 ms	po103.asw01.gru1.tfbnw.net [2620:0:1cff:dead:beef::2dd0]
8	8 ms	9 ms	9 ms	po252.psw02.gru2.tfbnw.net [2620:0:1cff:dead:beef::5c79]
9	8 ms	8 ms	9 ms	po2.mswlal.02.gru2.tfbnw.net [2a03:2880:f005:ffff::24b]
10	9 ms	8 ms	9 ms	edge-star-mini6-shv-02-gru2.facebook.com [2a03:2880:f105: 283:face:b00c:0:25de]

Rastreamento concluído.

PS C:\Users\fbrev> |

PS C:\Users\fbrev> tracert www.surrey.ac.uk

Rastreando a rota para www9.surrey.ac.uk [131.227.132.127]

com no máximo 30 saltos:

1	<1 ms	<1 ms	<1 ms	RT-AX86U-F5C0 [192.168.50.1]
2	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
3	6 ms	4 ms	7 ms	187-100-198-50.dsl.telesp.net.br [187.100.198.50]
4	*	3 ms	4 ms	152-255-178-46.user.vivozap.com.br [152.255.178.46]
5	*	5 ms	5 ms	152-255-212-126.user.vivozap.com.br [152.255.212.126]
6	6 ms	22 ms	34 ms	akamai-ae2-grtvapem3.net.telefonicaglobalsolutions.com [213.140.50.116]
7	115 ms	116 ms	*	5.53.5.99
8	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
9	*	*	206 ms	ae1.3108.ear3.London2.level3.net [4.69.143.198]
10	202 ms	202 ms	216 ms	JANET.ear3.London2.Level3.net [212.187.216.238]
11	200 ms	201 ms	204 ms	ae24.londtt-sbr1.ja.net [146.97.35.193]
12	202 ms	205 ms	203 ms	ae28.londtw-sbr2.ja.net [146.97.33.62]
13	203 ms	205 ms	204 ms	ae30.londpg-sbr2.ja.net [146.97.33.5]
14	203 ms	204 ms	204 ms	ae23.aldess-rbr1.ja.net [146.97.37.250]
15	202 ms	202 ms	207 ms	ae4-1000.stonss-rbr1.ja.net [146.97.68.45]
16	208 ms	206 ms	207 ms	146.97.147.241
17	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
18	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
19	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
20	208 ms	205 ms	205 ms	libweb.surrey.ac.uk [131.227.132.127]

Rastreamento concluído.

PS C:\Users\fbrev> |

Rastreando a rota para www.zoom.co.jp [139.162.106.88]

com no máximo 30 saltos:

1	<1 ms	<1 ms	<1 ms	RT-AX86U-F5C0 [192.168.50.1]
2	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
3	3 ms	5 ms	9 ms	187-100-189-86.dsl.telesp.net.br [187.100.189.86]
4	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
5	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
6	10 ms	9 ms	9 ms	84.16.7.228
7	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
8	*	*	122 ms	213.140.43.206
9	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
10	117 ms	117 ms	120 ms	be3087.ccr22.mia01.atlas.cogentco.com [154.54.88.233]
11	149 ms	150 ms	149 ms	be3570.ccr42.iah01.atlas.cogentco.com [154.54.84.1]
12	164 ms	167 ms	167 ms	be3851.ccr22.elp02.atlas.cogentco.com [154.54.2.6]
13	171 ms	170 ms	169 ms	be3872.ccr32.phx01.atlas.cogentco.com [154.54.26.53]
14	185 ms	185 ms	188 ms	be2932.ccr42.lax01.atlas.cogentco.com [154.54.45.162]
15	185 ms	236 ms	184 ms	be3360.ccr41.lax04.atlas.cogentco.com [154.54.25.150]
16	282 ms	281 ms	280 ms	be2894.ccr72.tyo01.atlas.cogentco.com [154.54.1.22]
17	283 ms	282 ms	280 ms	be3929.ccr71.tyo01.atlas.cogentco.com [154.54.83.189]
18	281 ms	292 ms	288 ms	204.68.252.109
19	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
20	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
21	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
22	286 ms	286 ms	284 ms	li1590-88.members.linode.com [139.162.106.88]

Rastreamento concluído.

PS C:\Users\fbrev> |

PS C:\Users\fbrev> tracert www.tsinghua.edu.cn

Rastreando a rota para www.tsinghua.edu.cn [2402:f000:1:404:166:111:4:100]
com no máximo 30 saltos:

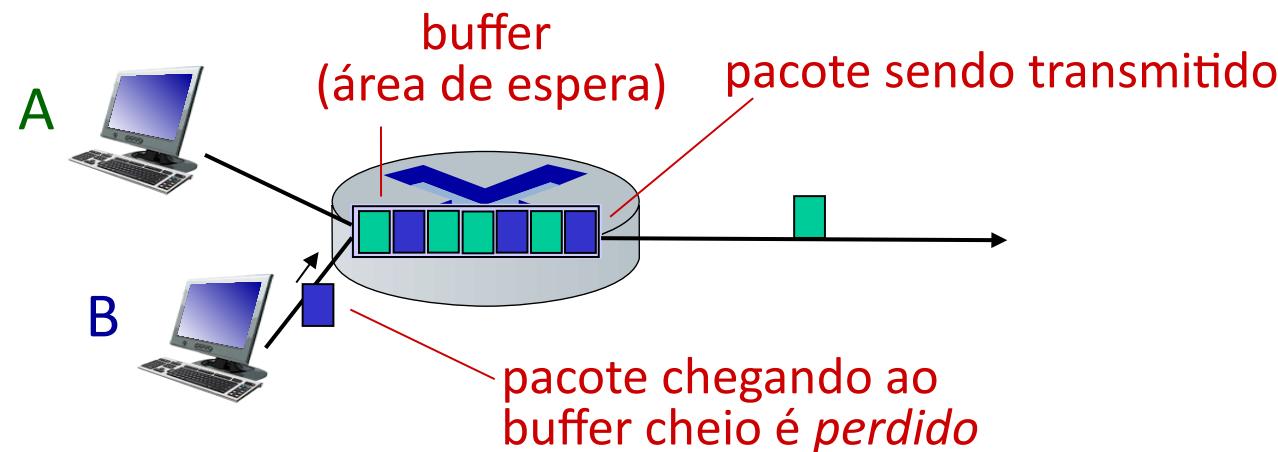
1	<1 ms	<1 ms	<1 ms	RT-AX86U-F5C0 [2804:431:c7d2:b409::1]
2	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
3	6 ms	3 ms	5 ms	2001:12e0:100:2008:a006:2008:a061:6
4	6 ms	3 ms	7 ms	2001:12e0:100:2009:a002:2008:a006:2
5	*	8 ms	9 ms	2001:12e0:100:1017:a001:2009:a002:e
6	9 ms	10 ms	9 ms	2001:1498:1:957:8000::751
7	*	125 ms	124 ms	2001:1498:1::32:146
8	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
9	*	155 ms	153 ms	port-channel1.core2.hou1.he.net [2001:470:0:2d3::2]
10	155 ms	156 ms	152 ms	ve954.core2.hou2.he.net [2001:470:0:3ed::2]
11	157 ms	158 ms	160 ms	e0-34.core1.sat1.he.net [2001:470:0:4af::1]
12	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
13	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
14	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
15	*	*	*	Esgotado o tempo limite do pedido.
16	372 ms	*	371 ms	cernet1-100g.hkix.net [2001:7fa:0:1::ca28:a1be]
17	372 ms	371 ms	370 ms	cernet2.net [2001:252:0:109::1]
18	358 ms	355 ms	356 ms	cernet2.net [2001:252:0:1::1]
19	357 ms	355 ms	356 ms	2001:da8:257:0:101:4:116:82
20	358 ms	357 ms	358 ms	cernet2.net [2001:da8:a0:1003::2]
21	374 ms	374 ms	374 ms	2402:f000:0:44c::78
22	372 ms	373 ms	373 ms	2402:f000:0:24c::78
23	358 ms	356 ms	357 ms	2402:f000:0:804::6
24	356 ms	357 ms	356 ms	2402:f000:1:404:166:111:4:100

Rastreamento concluído.

PS C:\Users\fbrev> |

Perda de pacote

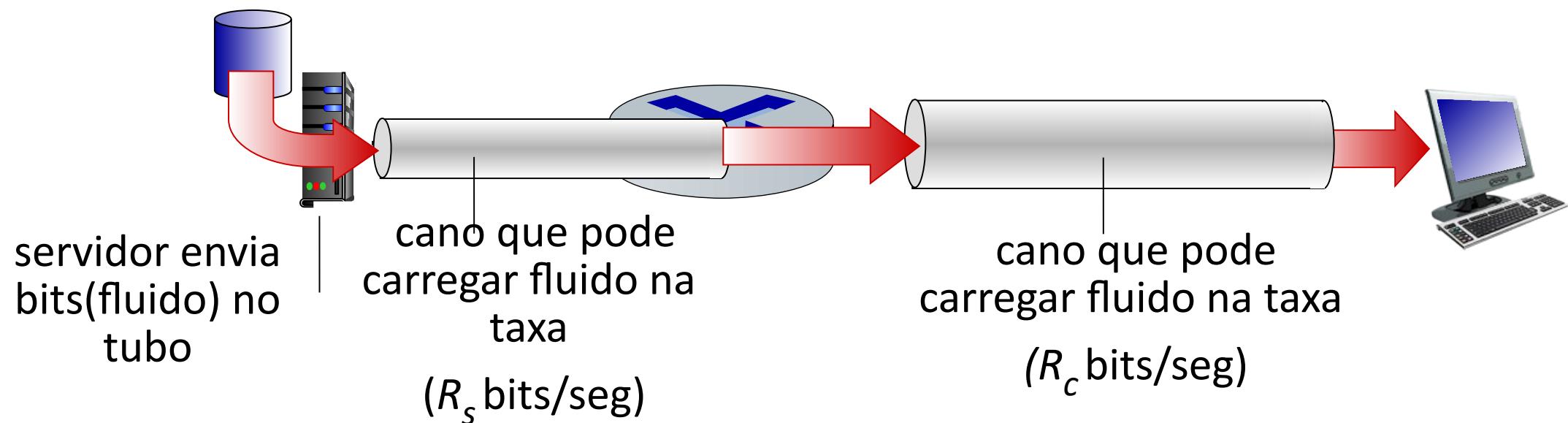
- fila (buffer) que precede o enlace tem capacidade finita
- pacote que chega à fila cheia é descartado (perdido)
- o pacote perdido pode ser retransmitido pelo nó anterior, pelo sistema final de origem ou não ser retransmitido



* Confira o applet Java para uma animação interativa (no site da editora) de enfileiramento e perda

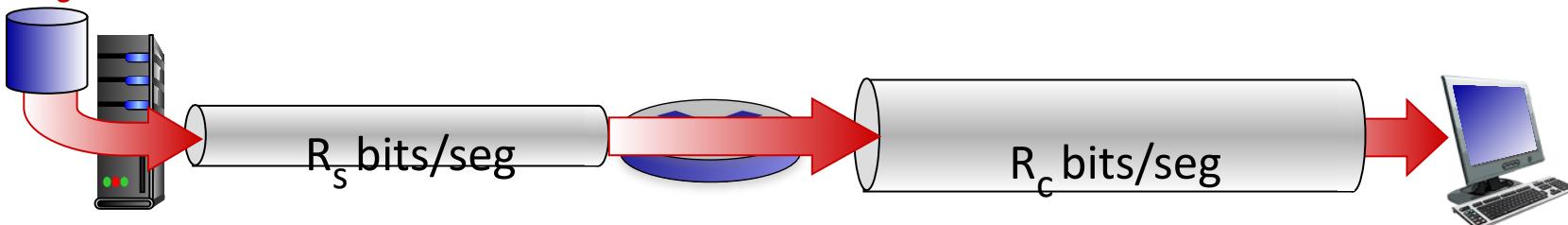
Vazão

- **vazão:** taxa (bits / unidade de tempo) na qual os bits estão sendo enviados do emissor para o receptor
 - *instantânea:* taxa em determinado momento
 - *média:* taxa por um período mais longo de tempo

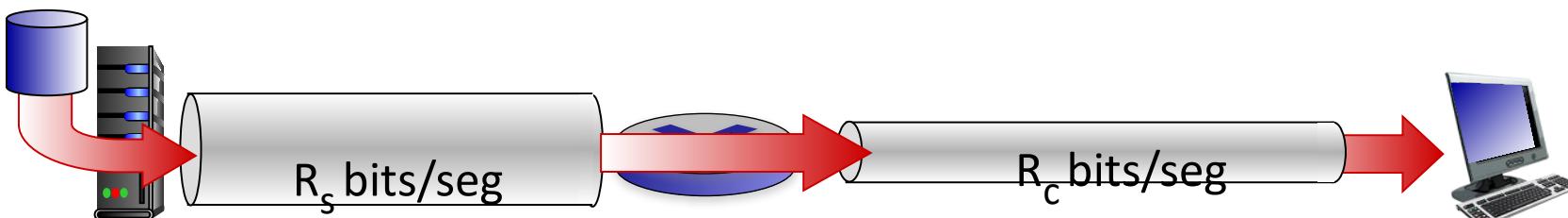


Vazão

$R_s < R_c$ Qual é a taxa de transferência fim a fim média?



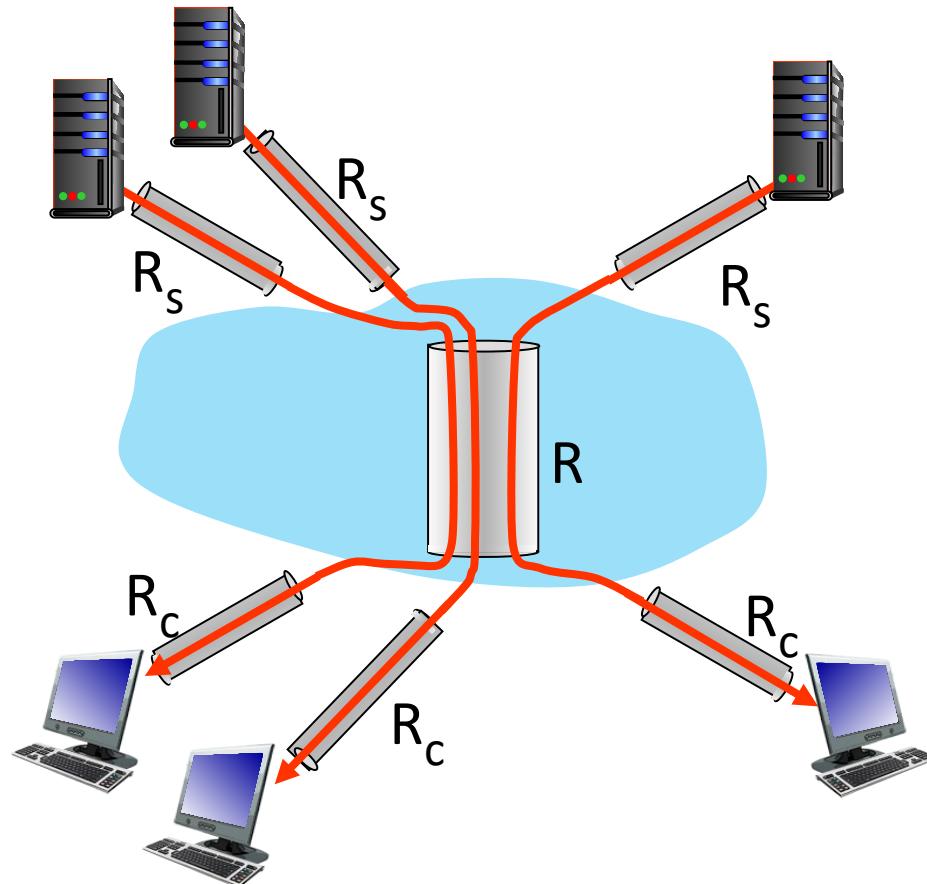
$R_s > R_c$ Qual é a taxa de transferência fim a fim média?



enlace de gargalo

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

Taxa de transferência: cenário de rede



10 conexões (razoavelmente)
compartilham enlace de gargalo de
backbone de R bits/seg

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

* Confira os exercícios interativos online para mais exemplos: http://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/

Capítulo 1: roteiro

- O que é a Internet?
- O que é um protocolo?
- Borda da rede: hospedeiros, rede de acesso, mídia física
- Núcleo da rede: comutação de pacote/circuito, estrutura da Internet
- Desempenho: perda, atraso, vazão
- Segurança
- Camadas de protocolo, modelos de serviço
- História



“Camadas” de protocolo e modelos de referência

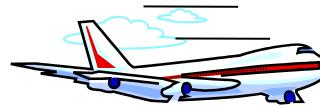
Redes são complexas, com muitas “peças”:

- hospedeiros
- roteadores
- enlaces de várias mídias
- aplicações
- protocolos
- hardware, software

Questão: existe alguma esperança de *organizar* a estrutura das redes?

- e/ou nossa *discussão* de redes?

Exemplo: organização de viagens aéreas



— Transferência ponta a ponta de pessoa mais bagagem →

ticket (comprar)

bagagem (despachar)

portões (embarcar)

pista (decolar)

aeronave em rota

ticket (reclamar)

bagagem (retirar)

portões (desembarcar)

pista (pousar)

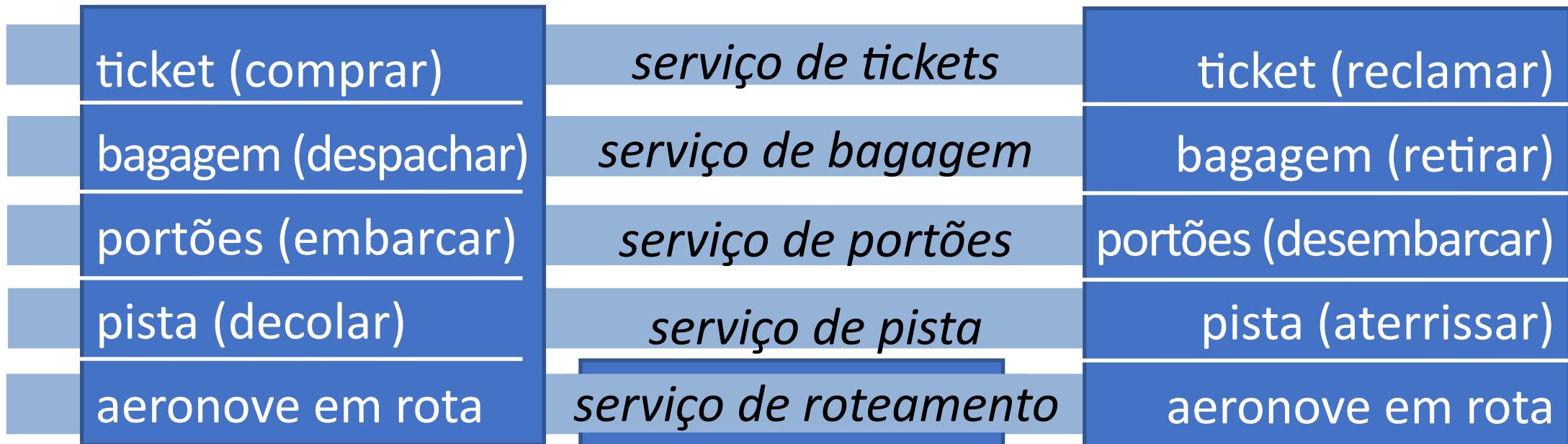
aeronave em rota

aeronave em rota

Como você *definiria/discutiria* o sistema de viagens aéreas?

- uma série de etapas, envolvendo muitos serviços

Exemplo: organização de viagens aéreas



camadas: cada camada implementa um serviço

- por meio de suas próprias ações de camada interna
- contando com os serviços fornecidos pela camada abaixo

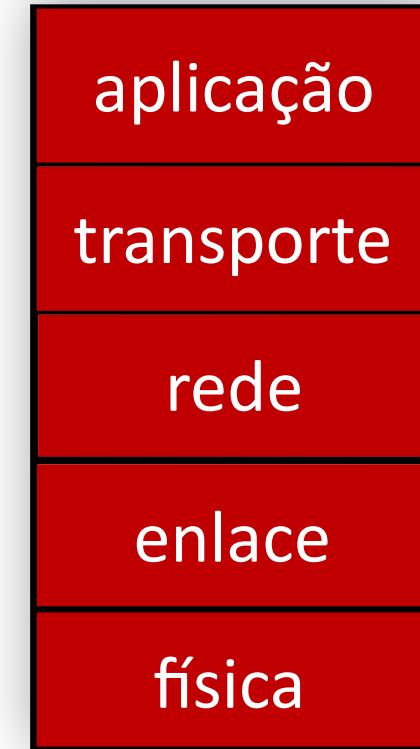
Por que camadas?

Abordagem para projetar/discutir sistemas complexos:

- estrutura explícita permite a identificação e a relação das peças do sistema
 - *modelo de referência* de camadas para discussão
- modularização facilita a manutenção e atualização do sistema
 - mudança na implementação de serviço da camada: transparente para o resto do sistema
 - por exemplo, a mudança no procedimento de embarque não afeta o resto do sistema

Pilha de camadas de protocolos de Internet

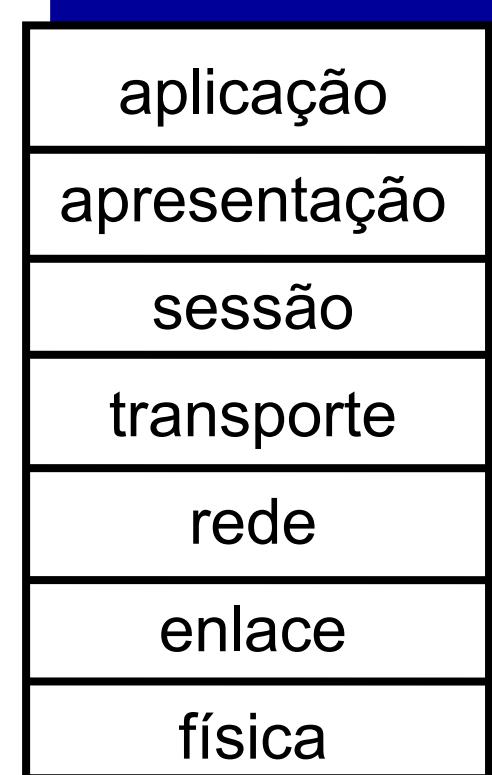
- *aplicação*: suporte a aplicações de rede
 - HTTP, IMAP, SMTP, DNS
- *transporte*: transferência de dados processo a processo
 - TCP, UDP
- *rede*: roteamento de datagramas da origem ao destino
 - IP, protocolos de roteamento
- *enlace*: transferência de dados entre elementos vizinhos
 - Ethernet, 802.11 (WiFi), PPP
- *física*: bits “no fio”



Modelo de referência ISO/OSI

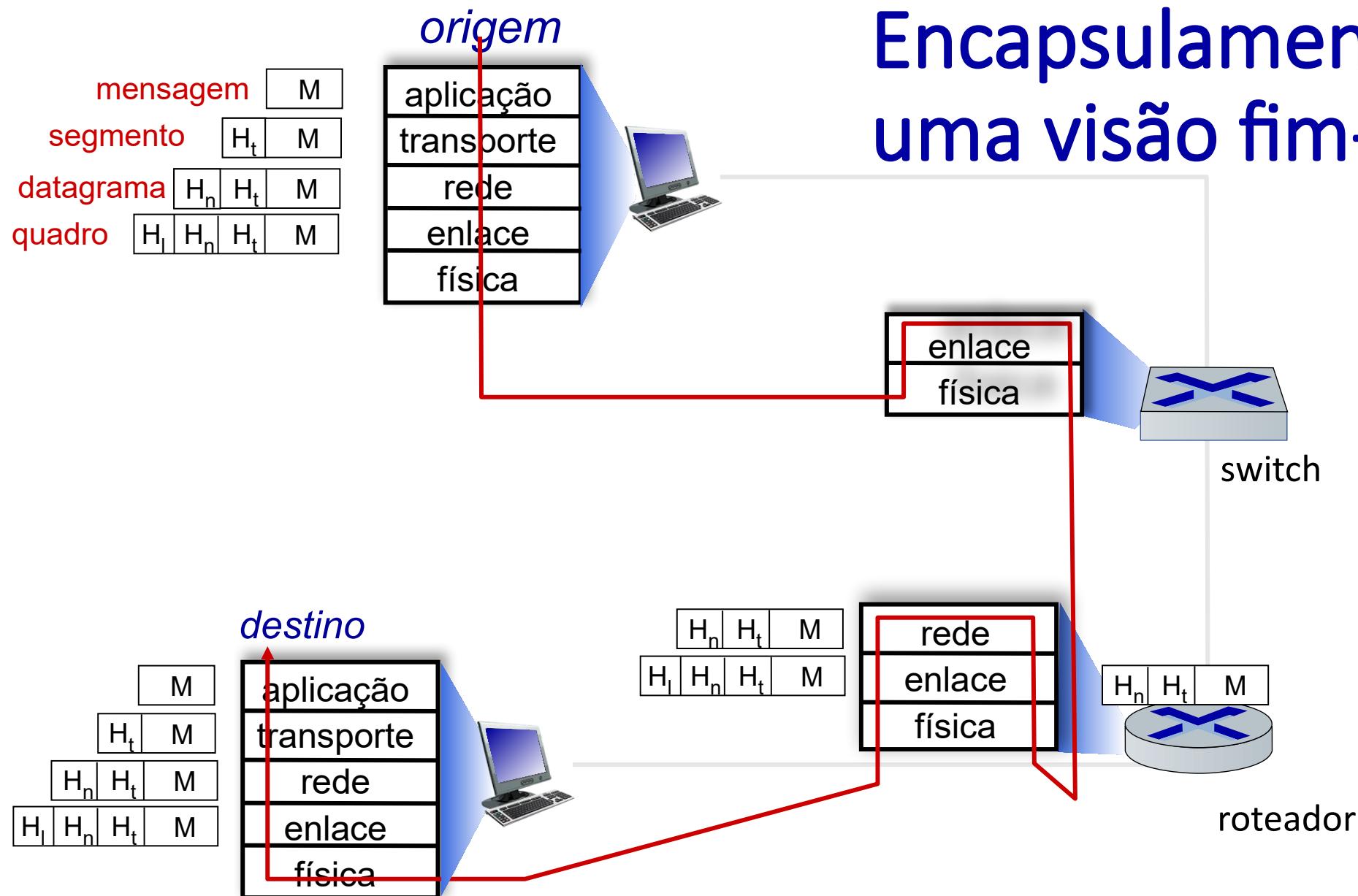
Duas camadas não encontradas na pilha de protocolo da Internet!

- *apresentação*: permite que os aplicativos interpretem o significado dos dados, por exemplo, criptografia, compressão, convenções específicas da máquina
- *sessão*: sincronização, ponto de verificação, recuperação de troca de dados
- Pilha da Internet “faltando” essas camadas!
 - esses serviços, *se necessários*, devem ser implementados na aplicação
 - necessários?

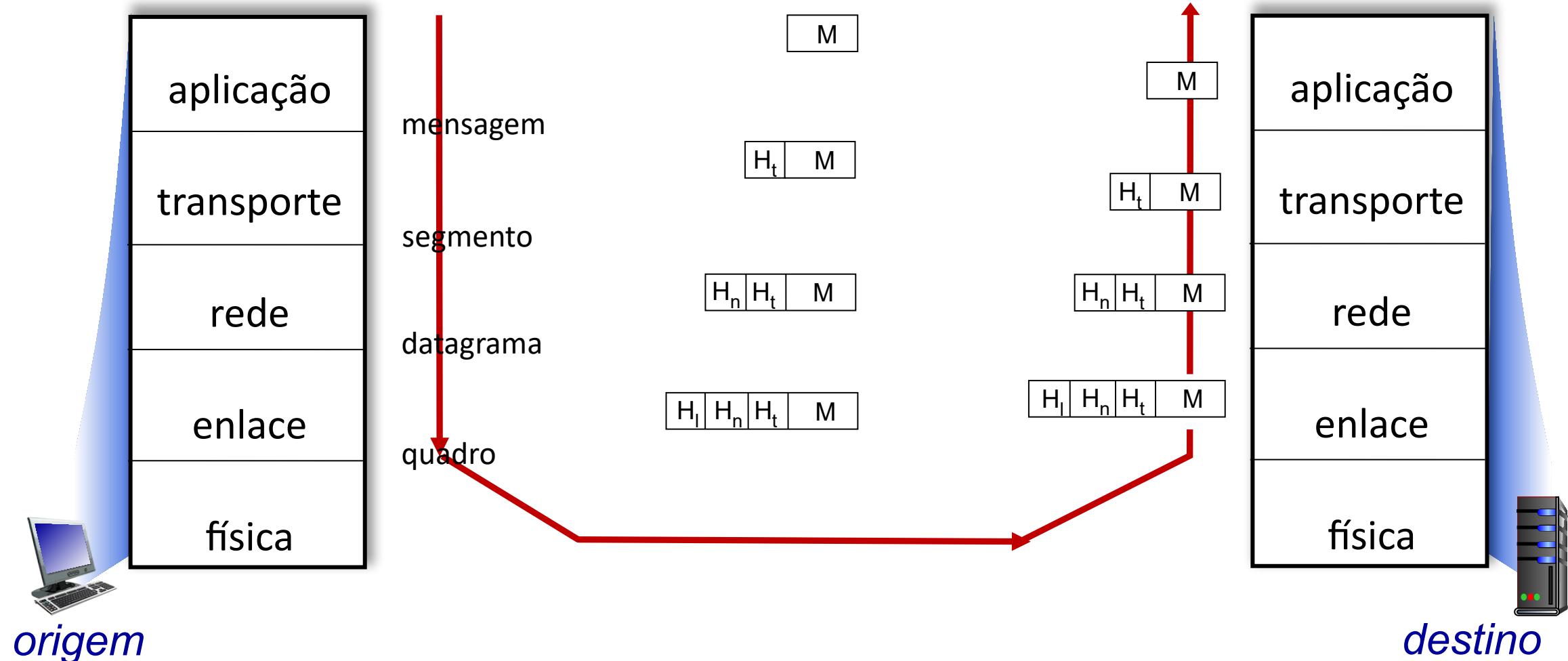


O modelo de referência ISO/OSI de sete camadas

Encapsulamento: uma visão fim-fim



Serviços, Camadas e Encapsulamento



Capítulo 1: roteiro

- O que é a Internet?
- O que é um protocolo?
- Borda da rede: hospedeiros, rede de acesso, mídia física
- Núcleo da rede: comutação de pacote/circuito, estrutura da Internet
- Desempenho: perda, atraso, vazão
- **Segurança**
- Camadas de protocolo, modelos de serviço
- História



Segurança de rede

- A Internet não foi originalmente projetada com (muita) segurança em mente
 - *visão original*: “um grupo de usuários que se confiam mutuamente, conectados a uma rede transparente” ☺
 - projetistas de protocolo de Internet brincam de “pega pega”
 - considerações de segurança em todas as camadas!
- Agora precisamos pensar sobre:
 - como os bandidos podem atacar redes de computadores
 - como podemos defender as redes contra ataques
 - como projetar arquiteturas que são imunes a ataques

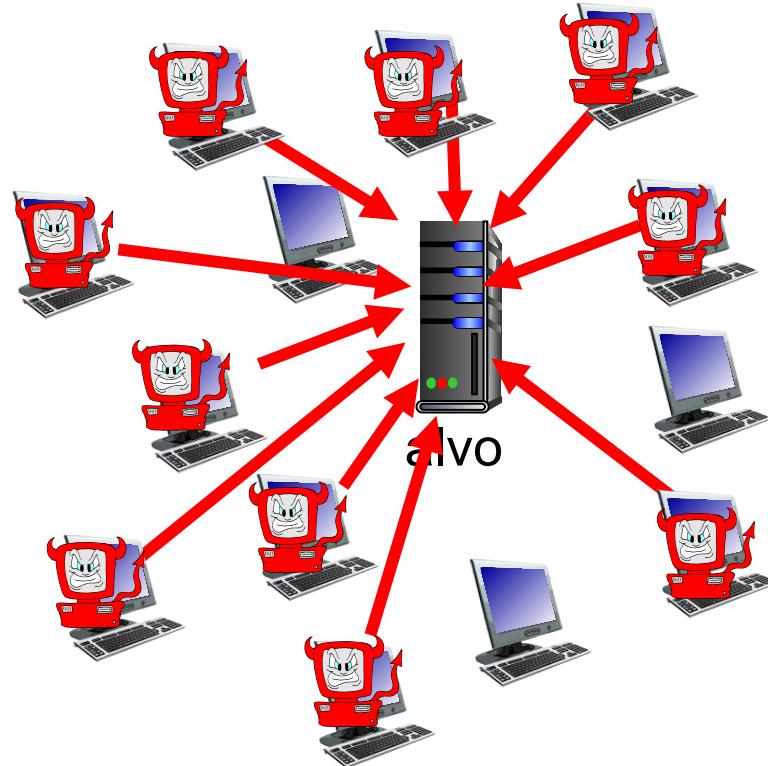
Bandidos: colocam *malware* em hospedeiros via Internet

- *malware* pode chegar ao hospedeiro por:
 - *vírus*: infecção auto-replicante por receber/executar um objeto (ex.: anexo de e-mail)
 - *worm*: infecção auto-replicante por passivamente receber um objeto que se executa por si próprio
- *spyware*: *malware* que pode gravar teclas pressionadas, *web sites* visitados e enviar informações para um site de coleta
- hospedeiro infectado pode ser colocado em uma *botnet*, usada para *spam* e ataques DDoS (a seguir)

Bandidos: negação de serviço

Denial of Service (DoS) – negação de serviço: os atacantes tornam os recursos (servidor, largura de banda) indisponíveis para o tráfego legítimo, sobrecarregando os recursos com tráfego falso

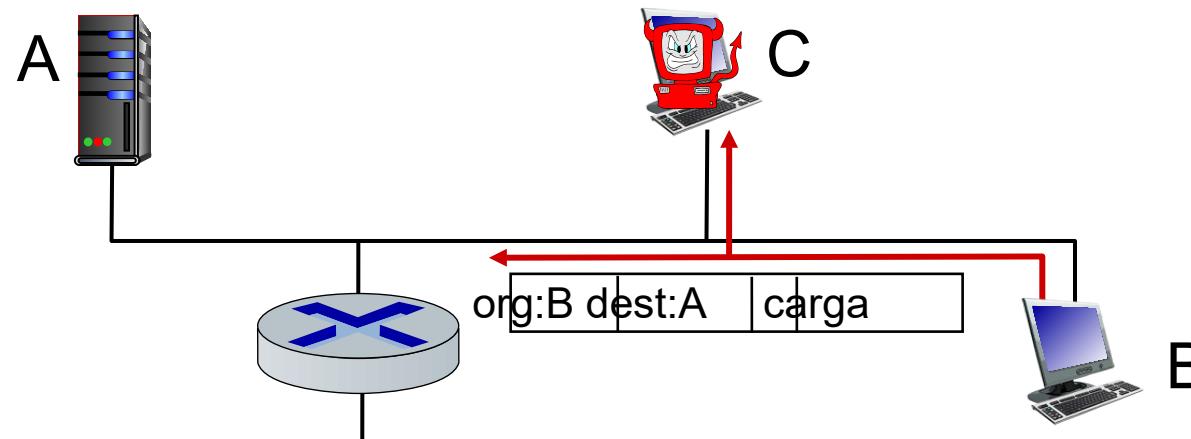
1. selecionar alvo
2. invadir hospedeiros em torno da rede (ver *botnet*)
3. enviar pacotes para o alvo a partir de hospedeiros comprometidos



Bandidos: interceptação de pacotes

“farejamento” (“sniffing”) de pacotes:

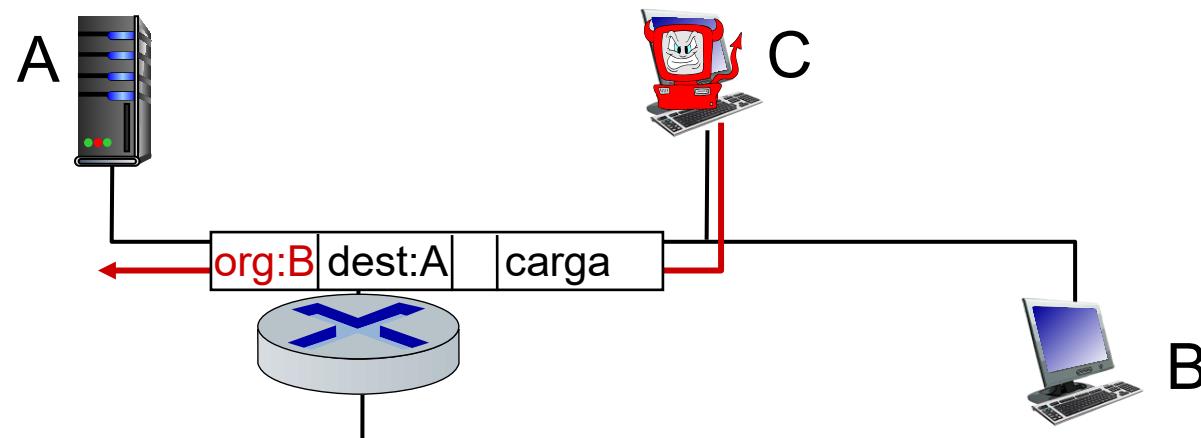
- mídia de difusão (Ethernet compartilhada, redes sem fio)
- interface de rede promiscua lê/registra todos os pacotes (incluindo senhas!) que passam por ela



O software Wireshark usado em nossos laboratórios de fim de capítulo é um farejador de pacotes (gratuito)

Bandidos: identidade falsa

Spoofing de IP: injeção de pacote com endereço de origem falso



Linhas de defesa:

- **autenticação:** provando que você é quem você diz que é
 - as redes celulares fornecem identidade de hardware por meio do cartão SIM; nenhum hardware desse tipo ajuda na Internet tradicional
- **confidencialidade:** via criptografia
- **checagem de integridade:** assinaturas digitais evitam/detectam adulteração
- **restrições de acesso:** VPNs protegidas por senha
- ***firewalls*:** “*middleboxes*” especializados em redes de acesso e de núcleo:
 - negar por padrão: filtre os pacotes de entrada para restringir remetentes, destinatários e aplicativos
 - detectar/reagir a ataques Dos

... muito mais sobre segurança (em todo o Capítulo 8)

Capítulo 1: roteiro

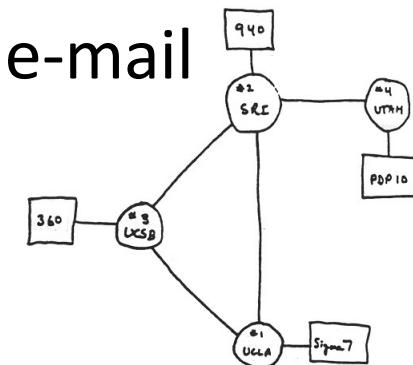
- O que é a Internet?
- O que é um protocolo?
- Borda da rede: hospedeiros, rede de acesso, mídia física
- Núcleo da rede: comutação de pacote/circuito, estrutura da Internet
- Desempenho: perda, atraso, vazão
- Segurança,
- Camadas de protocolo, modelos de serviço
- História



História da Internet

1961-1972: Princípios de comutação de pacotes iniciais

- 1961: Kleinrock - a teoria das filas mostra a eficácia da comutação de pacotes
- 1964: Baran - comutação de pacotes em redes militares
- 1967: ARPAnet concebida pela Advanced Research Projects Agency
- 1969: primeiro nó ARPAnet operacional
- 1972:
 - Demonstração pública da ARPAnet
 - NCP (Network Control Protocol) primeiro protocolo hospedeiro-hospedeiro
 - primeiro programa de e-mail
 - ARPAnet tem 15 nós



História da Internet

1972-1980: Comunicação entre redes, redes novas e proprietárias

- 1970: Rede de satélites ALOHAnet no Havaí
- 1974: Cerf and Kahn - arquitetura para interconectar redes
- 1976: Ethernet no Xerox PARC
- final dos 70's: arquiteturas proprietárias: DECnet, SNA, XNA
- 1979: ARPAnet tem 200 nós

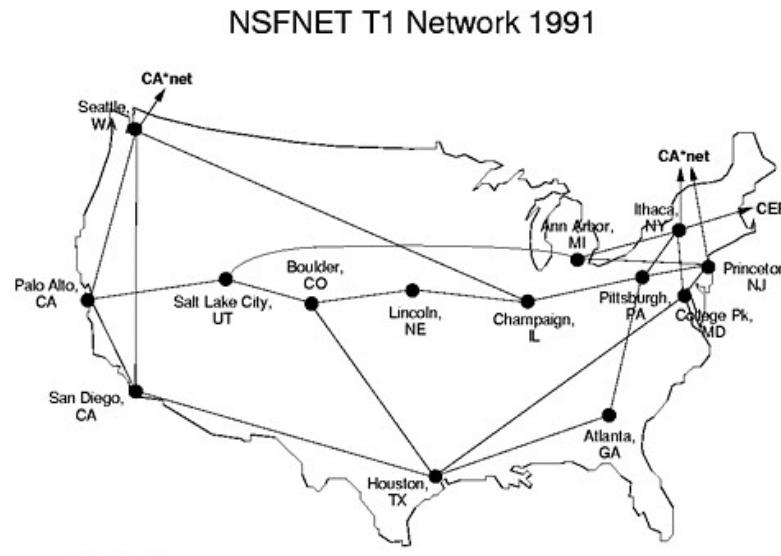
Princípios de interconexão de redes de Cerf e Kahn:

- minimalismo, autonomia - nenhuma mudança interna necessária para interconectar redes
 - modelo de serviço de melhor esforço
 - roteamento sem estado
 - controle descentralizado
- define a arquitetura da Internet de hoje

História da Internet

1980-1990: novos protocolos, uma proliferação de redes

- 1983: implantação de TCP/IP
- 1982: protocolo de e-mail SMTP definido
- 1983: DNS definido para tradução de nome para endereço IP
- 1985: protocolo FTP definido
- 1988: Controle de congestionamento do TCP
- novas redes nacionais: CSnet, BITnet, NSFnet, Minitel
- 100.000 hospedeiros conectados à confederação de redes



História da Internet

1990, 2000s: comercialização, a Web, novas aplicações

- Início dos 1990s: ARPAnet retirada de serviço
- 1991: NSF remove restrições sobre o uso comercial da NSFnet (desativada em 1995)
- Início dos 1990s: Web
 - hipertexto [Bush 1945, Nelson 1960's]
 - HTML, HTTP: Berners-Lee
 - 1994: Mosaic, depois Netscape
 - final dos 1990s: comercialização da Web
- final 1990s – 2000s:
 - mais aplicações matadoras: mensagens instantâneas, compartilhamento de arquivos P2P
 - segurança de rede em primeiro plano
 - estimativa de 50 milhões de hospedeiros, mais de 100 milhões de usuários
 - enlaces de *backbone* em execução a Gbps

História da Internet

2005-presente: escala, SDN, mobilidade, nuvem

- implantação agressiva de acesso doméstico de banda larga (10-100 Mbps)
- 2008: rede definida por software (SDN)
- aumento da ubiquidade do acesso sem fio de alta velocidade: 4G/5G, WiFi
- provedores de serviços (Google, FB, Microsoft) criam suas próprias redes
 - contornando a Internet comercial para se conectar “perto” do usuário final, fornecendo acesso “instantâneo” às mídias sociais, pesquisa, conteúdo de vídeo, ...
- empresas executam seus serviços na “nuvem” (ex.: Amazon Web Services, Microsoft Azure)
- ascensão dos smartphones: mais dispositivos móveis do que fixos na Internet (2017)
- ~15 bilhões de dispositivos conectados à Internet (2023, statista.com)
 - estimativa de chegar a 27 bilhões até 2025.

Capítulo 1: resumo

Cobrimos uma “tonelada” de material!

- visão geral da Internet
- o que é um protocolo?
- borda da rede, rede de acesso, núcleo
 - comutação de pacotes versus comutação de circuitos
 - estrutura da Internet
- desempenho: perda, atraso e vazão
- camadas, modelos de serviço
- segurança
- história

Agora você sabe:

- contexto, visão geral, vocabulário, “sentimento” de rede
- mais profundidade, detalhes e *diversão* de seguir!

Wireshark

