

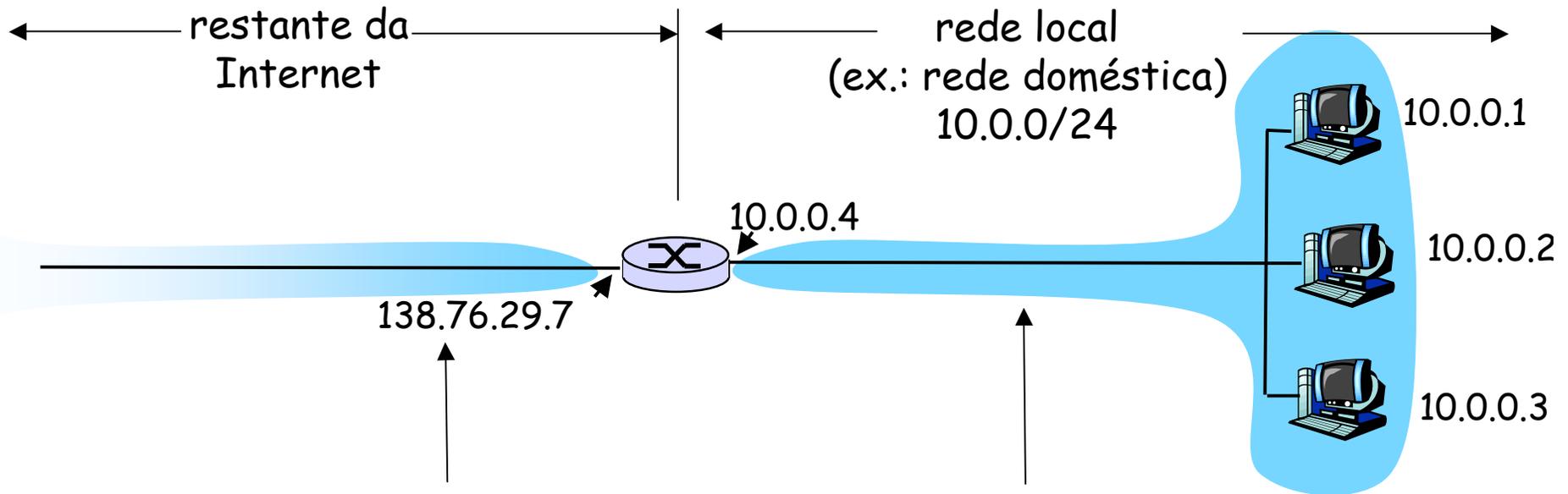
4 Endereçamento IP: a última palavra...

P.: Como o ISP obtém seu bloco de endereço?

R.: ICANN: internet corporation for assigned names and numbers

- Aloca endereços
- Gerencia DNS
- Atribui nomes de domínios e resolve disputas

4 NAT: Network Address Translation



todos os datagramas que **saem** da rede local possuem o **mesmo** e único endereço IP do NAT de origem: 138.76.29.7, números diferentes de portas de origem

datagramas com origem ou destino nesta rede possuem endereço 10.0.0/24 para origem, destino (usualmente)

4 NAT: Network Address Translation

- **Motivação:** redes locais podem utilizar apenas um endereço IP:
 - Não é preciso alocar uma gama de endereços do ISP: apenas um endereço IP é usado para todos os dispositivos
 - Podem-se alterar os endereços dos dispositivos na rede local sem precisar notificar o mundo exterior
 - Pode-se mudar de ISP sem alterar os endereços dos dispositivos na rede local
 - Dispositivos da rede local não são explicitamente endereçáveis ou visíveis pelo mundo exterior (um adicional de segurança).

4 NAT: Network Address Translation

Implementação: o roteador NAT deve:

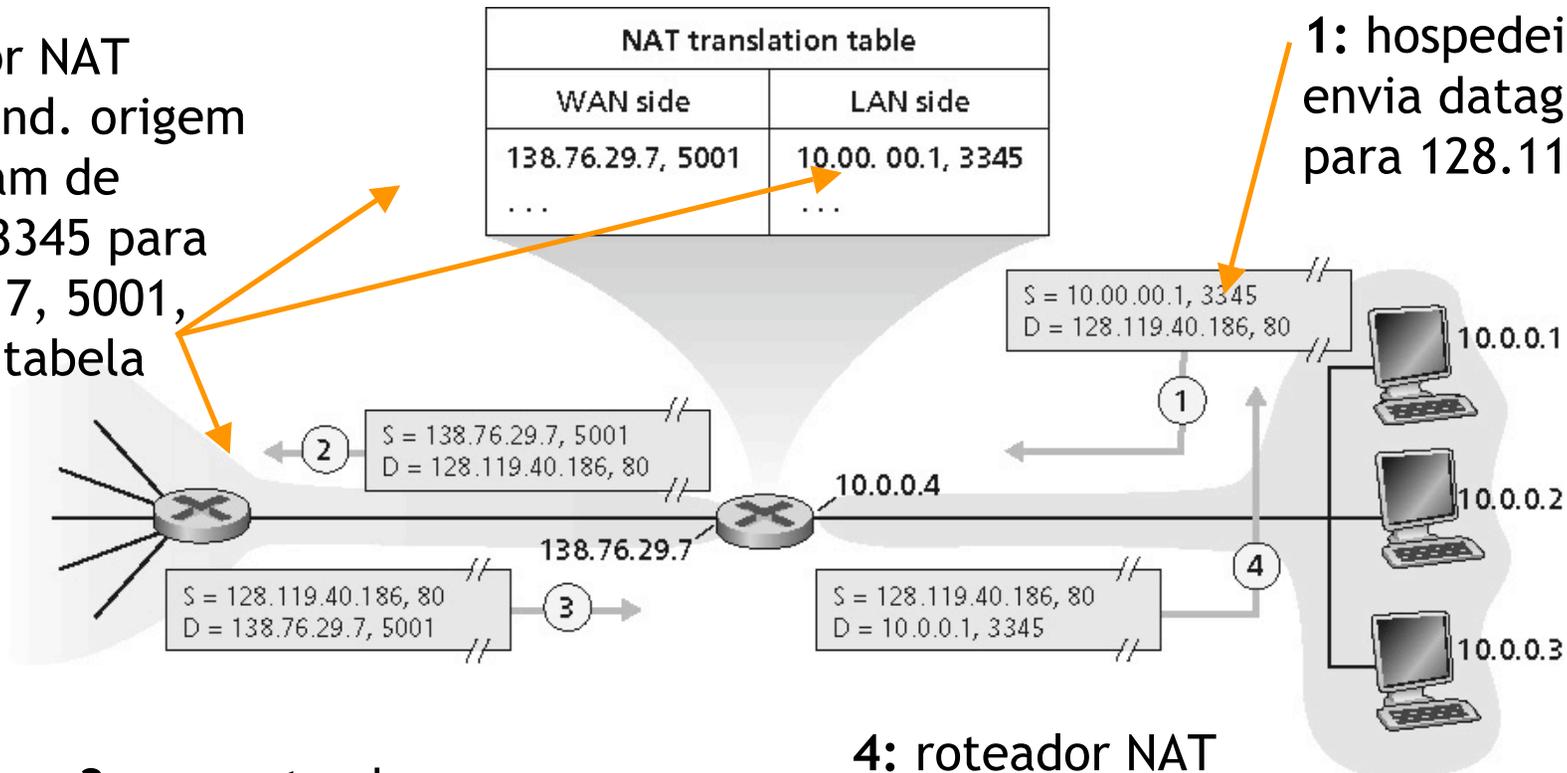
Datagramas que saem: substituir (endereço IP de origem, porta #) de cada datagrama para (endereço IP do NAT, nova porta #)

. . . clientes/servidores remotos responderão usando (endereço IP do NAT, nova porta #) como endereço de destino.

- **Lembrar (na tabela de tradução do NAT)** cada (endereço IP de origem, porta #) para o par de tradução (endereço IP do NAT, nova porta #).
- **Datagramas que chegam:** substituir (endereço IP do NAT, nova porta #) nos campos de destino de cada datagrama pelos correspondentes (endereço IP de origem, porta #) armazenados da tabela NAT

4 NAT: Network Address Translation

2: roteador NAT substitui end. origem do datagram de 10.0.0.1, 3345 para 138.76.29.7, 5001, atualiza a tabela



3: resposta chega endereço de destino: 138.76.29.7, 5001

4: roteador NAT substitui o endereço de destino do datagrama de 138.76.29.7, 5001 para 10.0.0.1, 3345

4 NAT: Network Address Translation

- Campo número de porta com 16 bits:
 - 60.000 conexões simultâneas com um único endereço de LAN
- NAT é controverso:
 - Roteadores deveriam processar somente até a camada 3
 - Violação do argumento fim-a-fim
 - A possibilidade de NAT deve ser levada em conta pelos desenvolvedores de aplicações, ex., aplicações P2P
 - A escassez de endereços deveria ser resolvida pelo IPv6

4 A camada de rede

- 4.1 Introdução
- 4.2 Circuito virtual e redes de datagrama
- 4.3 O que há dentro de um roteador
- 4.4 IP: Protocolo da Internet
 - Formato do datagrama
 - Endereçamento IPv4
 - ICMP
 - IPv6
- 4.5 Algoritmos de roteamento
 - Link state
 - Distance vector
 - Roteamento hierárquico
- 4.6 Roteamento na Internet
 - RIP
 - OSPF
 - BGP
- 4.7 Roteamento de broadcast e multicast

4 ICMP: Internet Control Message Protocol

- Usado por computadores e roteadores para troca de informação de controle da camada de rede
 - Error reporting: hospedeiro, rede, porta ou protocolo
 - Echo request/reply (usado pela aplicação ping)
- Transporte de mensagens:
 - Mensagens ICMP transportadas em datagramas IP
- **ICMP message:** tipo, código, mais primeiros 8 bytes do datagrama IP que causou o erro

Tipo	Código	Descrição
0	0	echo reply (ping)
3	0	dest. network unreachable
3	1	dest host unreachable
3	2	dest protocol unreachable
3	3	dest port unreachable
3	6	dest network unknown
3	7	dest host unknown
4	0	source quench (congestion control - not used)
8	0	echo request (ping)
9	0	route advertisement
10	0	router discovery
11	0	TTL expired
12	0	bad IP header

4 Traceroute e ICMP

- O transmissor envia uma série de segmentos UDP para o destino
 - O 1º possui TTL = 1
 - O 2º possui TTL = 2 etc.
 - nº de porta improvável
- Quando o enésimo datagrama chega ao enésimo roteador:
 - O roteador descarta o datagrama
 - E envia à origem uma mensagem ICMP (type 11, code 0)
 - A mensagem inclui o nome do roteador e o endereço IP
- Quando a mensagem ICMP chega, a origem calcula o RTT
- O traceroute faz isso três vezes
- **Critério de interrupção**
- O segmento UDP finalmente chega ao hospedeiro de destino
- O destino retorna o pacote ICMP “hospedeiro unreachable” (type 3, code 3)
- Quando a origem obtém esse ICMP, ela pára.

4 A camada de rede

- 4.1 Introdução
- 4.2 Circuito virtual e redes de datagrama
- 4.3 O que há dentro de um roteador
- 4.4 IP: Protocolo da Internet
 - Formato do datagrama
 - Endereçamento IPv4
 - ICMP
 - IPv6
- 4.5 Algoritmos de roteamento
 - Link state
 - Distance vector
 - Roteamento hierárquico
- 4.6 Roteamento na Internet
 - RIP
 - OSPF
 - BGP
- 4.7 Roteamento de broadcast e multicast

4 Cabeçalho IPv6

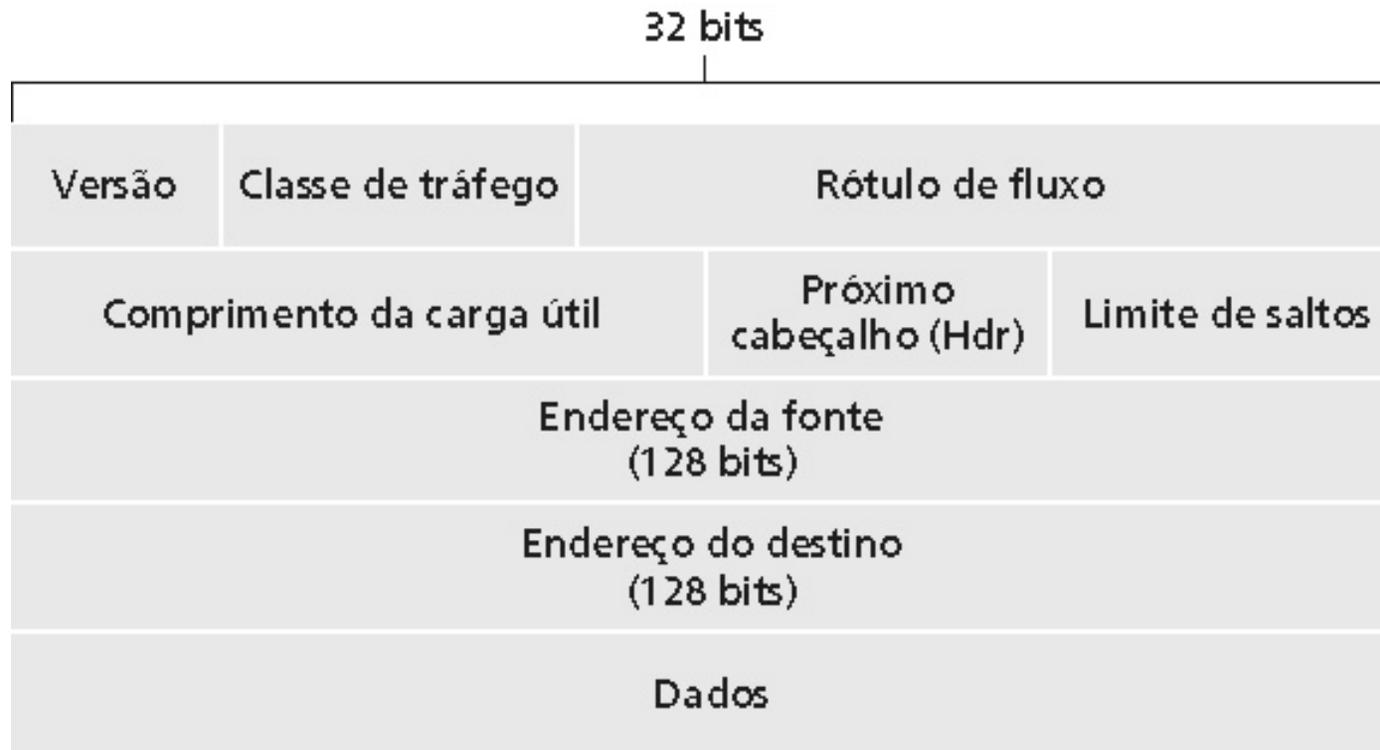
- **Motivação inicial:** o espaço de endereços de 32 bits está próximo de ser completamente alocado
- Motivação adicional:
 - Melhorar o formato do header para permitir maior velocidade de processamento e de transmissão
 - Mudanças no header para incorporar mecanismos de controle de QoS
 - **Formato do datagrama IPV:**
 - Cabeçalho fixo de 40 bytes
 - Não é permitida fragmentação

4 Cabeçalho IPv6

Priority: permitir definir prioridades diferenciadas para vários fluxos de informação

Flow label: identifica datagramas do mesmo “fluxo.” (conceito de “fluxo” não é bem definido).

Next header: identifica o protocolo da camada superior ou um header auxiliar



4 Outras mudanças do IPv4

- **Checksum**: removido inteiramente para reduzir o tempo de processamento em cada salto
- **Options**: são permitidas, mas são alocadas em cabeçalhos suplementares, indicados pelo campo “Next header”
- **ICMPv6**: nova versão de ICMP
 - Tipos de mensagens adicionais, ex.: “Packet Too Big”
 - Funções de gerenciamento de grupos multicast

4 Transição do IPv4 para IPv6

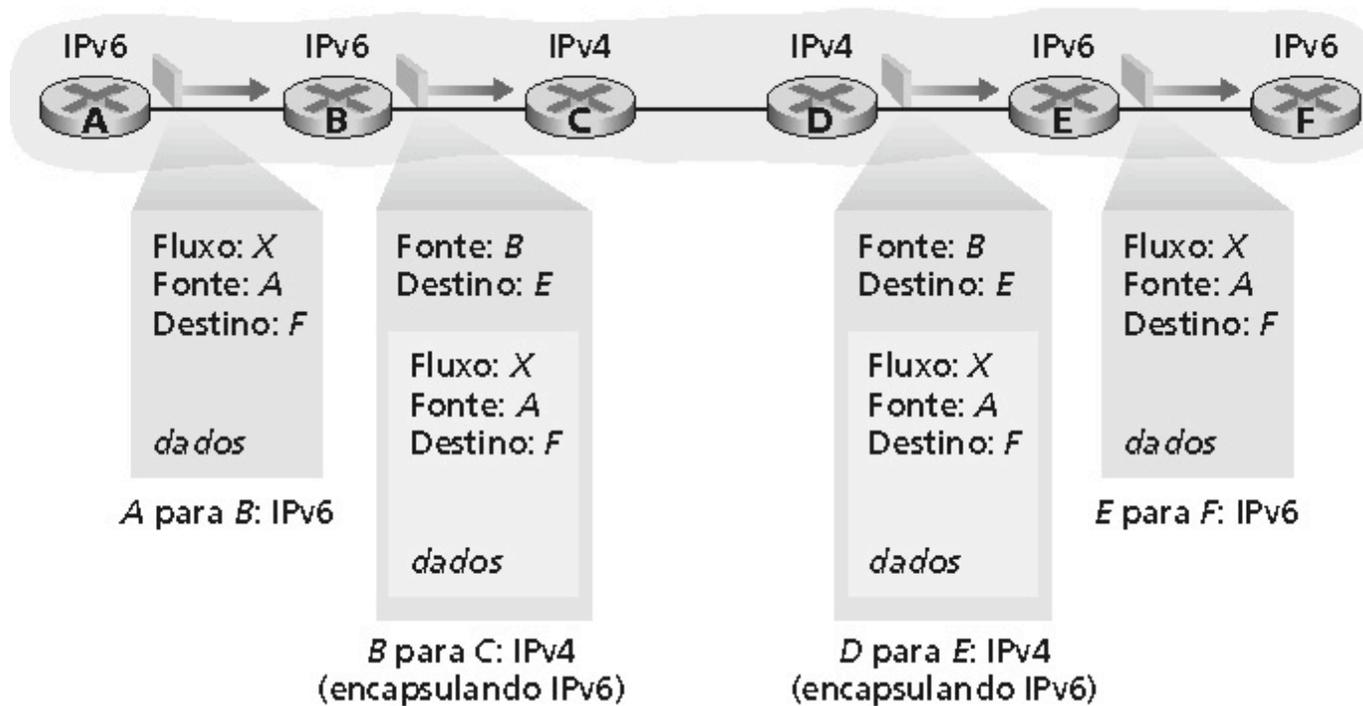
- Nem todos os roteadores poderão ser atualizados simultaneamente
 - Não haverá um dia da vacinação
 - Como a rede irá operar com roteadores mistos de IPV4 e IPV6?
- **Tunelamento:** IPv6 transportado dentro de pacotes IPv4 entre roteadores IPv4

4 Tunelamento

Visão lógica



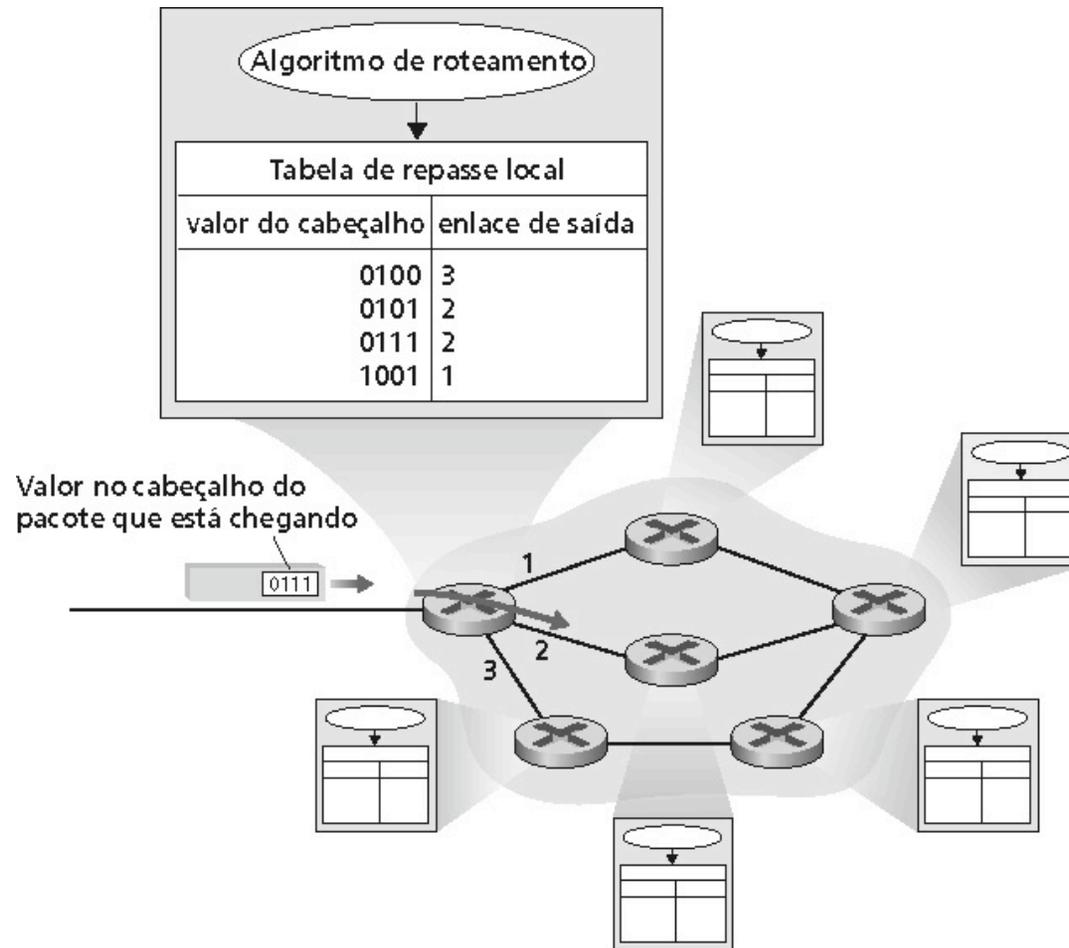
Visão física



4 A camada de rede

- 4.1 Introdução
- 4.2 Circuito virtual e redes de datagrama
- 4.3 O que há dentro de um roteador
- 4.4 IP: Protocolo da Internet
 - Formato do datagrama
 - Endereçamento IPv4
 - ICMP
 - IPv6
- 4.5 Algoritmos de roteamento
 - Link state
 - Distance vector
 - Roteamento hierárquico
- 4.6 Roteamento na Internet
 - RIP
 - OSPF
 - BGP
- 4.7 Roteamento de broadcast e multicast

4 Interação entre roteamento e comutação



4 Abstração do gráfico

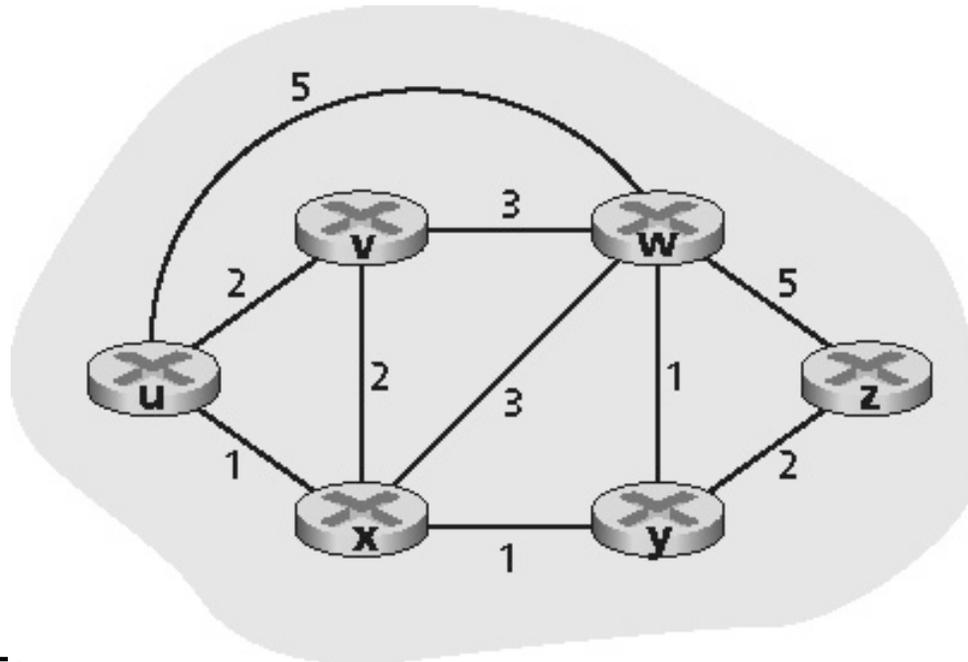


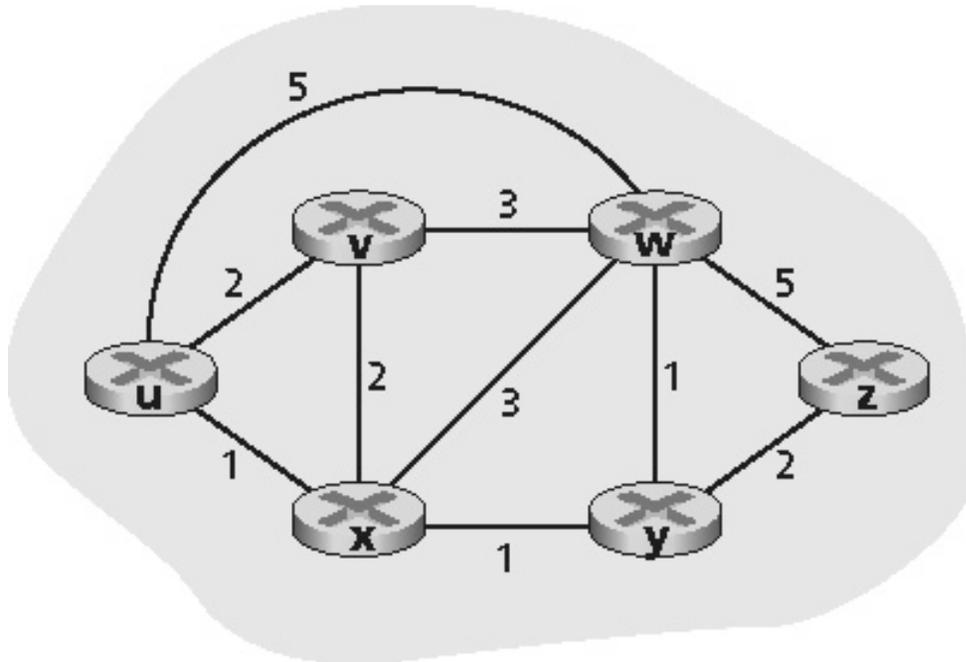
Gráfico: $G = (N,E)$

$N =$ conjunto de roteadores = $\{ u, v, w, x, y, z \}$

$E =$ conjunto de links = $\{ (u,v), (u,x), (v,x), (v,w), (x,w), (x,y), (w,y), (w,z), (y,z), (u,w) \}$

**Lembrete: A abstração de gráfico é útil em outros contextos de rede.
Exemplo: P2P, em que N é o conjunto de peers e E é o conjunto de conexões TCP**

4 Abstração do gráfico: custo



- $c(x, x')$ = custo do link (x, x')
 - ex., $c(w, z) = 5$
- Custo poderia ser sempre 1, ou inversamente relacionado à largura de banda ou ao congestionamento

Custo do caminho $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_p) = c(x_1, x_2) + c(x_2, x_3) + \dots + c(x_{p-1}, x_p)$

Questão: Qual é o caminho de menor custo entre u e z ?

Algoritmo de roteamento: algoritmo que encontra o caminho de menor custo

4 Classificação dos algoritmos de roteamento

Informação global ou descentralizada

Global:

- Todos os roteadores têm informações completas da topologia e do custos dos enlaces
- Algoritmos “link state”
- Descentralizada:
- Roteadores só conhecem informações sobre seus vizinhos e os enlaces para el
- Processo de computação iterativo, troca de informações com os vizinhos
- Algoritmos “distance vector”

Estático ou dinâmico?

Estático:

- As rotas mudam lentamente ao longo do tempo

Dinâmico:

- As rotas mudam mais rapidamente
 - Podem responder a mudanças no custo dos enlaces
 - Atualizações periódicas

4 A camada de rede

- 4.1 Introdução
- 4.2 Circuito virtual e redes de datagrama
- 4.3 O que há dentro de um roteador
- 4.4 IP: Protocolo da Internet
 - Formato do datagrama
 - Endereçamento IPv4
 - ICMP
 - IPv6
- 4.5 Algoritmos de roteamento
 - Link state
 - Distance vector
 - Roteamento hierárquico
- 4.6 Roteamento na Internet
 - RIP
 - OSPF
 - BGP
- 4.7 Roteamento de broadcast e multicast

4 Algoritmo de roteamento link-state

- **Algoritmo de Dijkstra**
- Topologia de rede e custo dos enlaces são conhecidos por todos os nós
 - Implementado via “link state broadcast”
 - Todos os nós têm a mesma informação
- Computa caminhos de menor custo de um nó (fonte) para todos os outros nós
 - Fornece uma **tabela de roteamento** para aquele nó
- Convergência: após k iterações, conhece o caminho de menor custo para k destinos

Notação:

- $C(i,j)$: custo do enlace do nó i ao nó j . Custo é infinito se não houver ligação entre i e j
- $D(v)$: valor atual do custo do caminho da fonte ao destino V
- $P(v)$: nó predecessor ao longo do caminho da fonte ao nó v , isto é, antes do v
- N' : conjunto de nós cujo caminho de menor custo é definitivamente conhecido

4 Algoritmo de Dijkstra

1 Inicialização:

2 $N' = \{u\}$

3 para todos os nós v

4 se v é adjacente a u

5 então $D(v) = c(u,v)$

6 senão $D(v) = \infty$

7

8 Loop

9 ache w não em N' tal que $D(w)$ é um mínimo

10 acrescente w a N'

11 atualize $D(v)$ para todo v adjacente a w e não em N' :

12 $D(v) = \min(D(v), D(w) + c(w,v))$

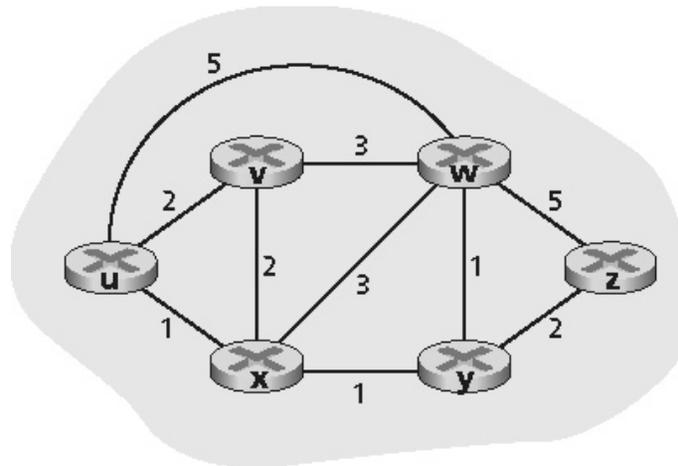
13 /* novo custo para v é ou o custo anterior para v ou o menor

14 custo de caminho conhecido para w mais o custo de w a v */

15 até que todos os nós estejam em N'

4 Exemplo: Algoritmo de Dijkstra

Passo	Início N	D(B),p(B)	D(C),p(C)	D(D),p(D)	D(E),p(E)	D(F),p(F)
→ 0	u	2,u	5,u	1,u	∞	∞
→ 1	ux	2,u	4,x		2,x	∞
→ 2	uxy	2,u	3,y			4,y
→ 3	uxyv		3,y			4,y
→ 4	uxyvw					4,y
5	uxyvwz					



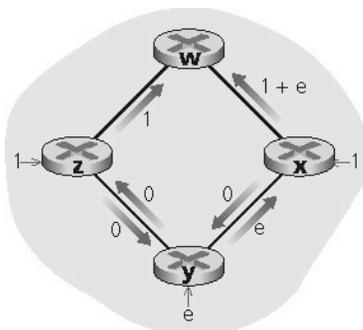
4 Discussão do algoritmo de Dijkstra

Complexidade do algoritmo: n nós

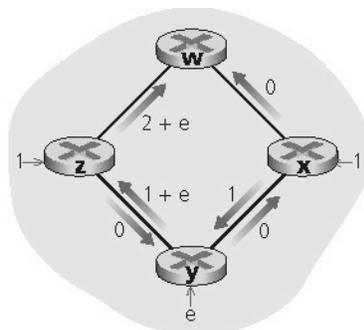
- Cada iteração: precisa verificar todos os nós w , que não estão em N
- $n(n+1)/2$ comparações: $O(n^2)$
- Implementações mais eficientes: $O(n \log n)$

Oscilações possíveis:

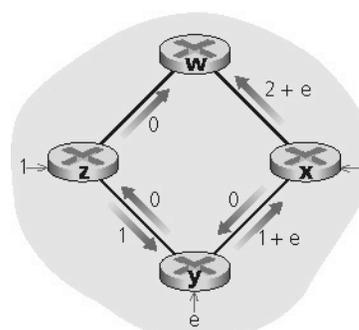
- Ex.: custo do link = quantidade de tráfego transportado



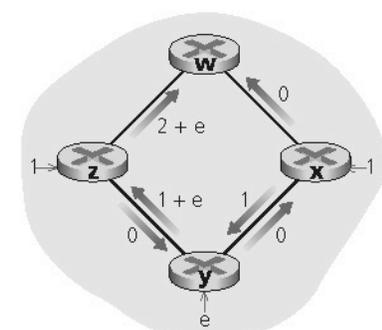
a. Roteamento inicial



b. x, y detectam melhor caminho até w em sentido horário



c. x, y, z detectam melhor caminho até w em sentido anti-horário



d. x, y, z , detectam melhor caminho até w em sentido horário

4 A camada de rede

- 4.1 Introdução
- 4.2 Circuito virtual e redes de datagrama
- 4.3 O que há dentro de um roteador
- 4.4 IP: Protocolo da Internet
 - Formato do datagrama
 - Endereçamento IPv4
 - ICMP
 - IPv6
- 4.5 Algoritmos de roteamento
 - Link state
 - Distance vector
 - Roteamento hierárquico
- 4.6 Roteamento na Internet
 - RIP
 - OSPF
 - BGP
- 4.7 Roteamento de broadcast e multicast

4 Algoritmo vetor de distância (1)

Equação de Bellman-Ford (programação dinâmica)

Define

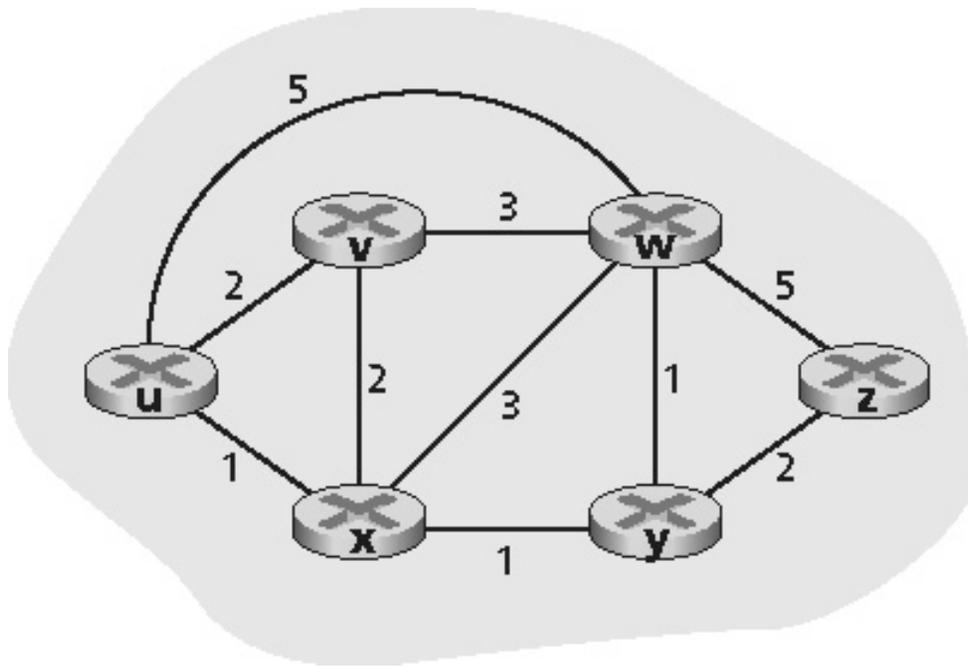
$d_x(y)$ = custo do caminho de menor custo de x para y

Então

$$d_x(y) = \min \{c(x,v) + d_v(y)\}$$

Em que min é calculado sobre todos os vizinhos de x

4 Exemplo: Bellman-Ford (2)



Claramente, $d_v(z) = 5$, $d_x(z) = 3$
 $d_w(z) = 3$

A equação B-F diz que:

$$\begin{aligned}d_u(z) &= \min \{ c(u,v) + d_v(z), \\ &\quad c(u,x) + d_x(z), \\ &\quad c(u,w) + d_w(z) \} \\ &= \min \{ 2 + 5, \\ &\quad 1 + 3, \\ &\quad 5 + 3 \} = 4\end{aligned}$$

O nó que atinge o mínimo é o próximo salto no caminho mais curto →
tabela de roteamento

4 Algoritmo vetor de distância (3)

- $D_x(y)$ = estima o menor custo de x para y
- Vetor de distância: $D_x = [D_x(y): y \in N]$
- O nó x conhece o custo para cada vizinho v: $c(x,v)$
- O nó x mantém $D_x = [D_x(y): y \in N]$
- O nó x também mantém os vetores de distância de seus vizinhos
 - Para cada vizinho v, x mantém $D_v = [D_v(y): y \in N]$

4 Algoritmo vetor de distância (4)

Idéia básica:

- Cada nó envia periodicamente sua própria estimativa de vetor de distância aos vizinhos
- Quando o nó x recebe nova estimativa de DV do vizinho, ele atualiza seu próprio DV usando a equação B-F:

$$D_x(y) = \min_v \{c(x,v) + D_v(y)\} \quad \text{para cada nó } y \in N$$

- Ao menos em condições naturais, a estimativa $D_x(y)$ converge para o menor custo atual $d_x(y)$

4 Algoritmo vetor de distância (5)

Iterativo, assíncrono: cada iteração local é causada por:

- Mudança no custo do enlace local
- Mensagem de atualização DV do vizinho

Distribuído:

- Cada nó notifica os vizinhos **apenas** quando seu DV mudar
 - Os vizinhos então notificam seus vizinhos, se necessário

Cada nó:

espera por (mudança no custo do enlace local na mensagem do vizinho)

recalcula estimativas

se o DV para qualquer destino mudou, **notifica** os vizinhos

4 A camada de rede

Tabela do nó x

		Custo até		
		x	y	z
De	x	0	2	7
	y	∞	∞	∞
	z	∞	∞	∞

Tabela do nó y

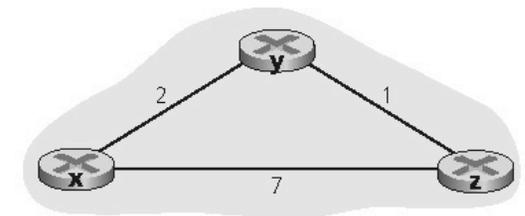
		Custo até		
		x	y	z
De	x	∞	∞	∞
	y	2	0	1
	z	∞	∞	∞

Tabela do nó z

		Custo até		
		x	y	z
De	x	∞	∞	∞
	y	∞	∞	∞
	z	7	1	0

$$D_x(y) = \min\{c(x,y) + D_y(y), c(x,z) + D_z(y)\} = \min\{2+0, 7+1\} = 2$$

$$D_x(z) = \min\{c(x,y) + D_y(z), c(x,z) + D_z(z)\} = \min\{2+1, 7+0\} = 3$$

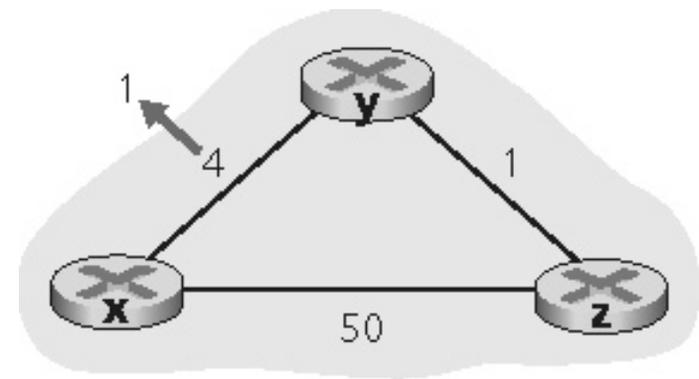


.....→ Tempo

4 Vetor de distância: mudanças no custo do enlace

Mudanças no custo do enlace:

- Nó detecta mudança no custo do enlace local
- Atualiza informações de roteamento, recalcula o vetor de distância
- Se o DV muda, notifica vizinhos



a.

No tempo t_0 , y detecta a mudança no custo do enlace, atualiza seu DV e informa seus vizinhos.

No tempo t_1 , z recebe a atualização de y e atualiza sua tabela.

Ele calcula o menor custo novo para x e envia seu DV para os vizinhos.

No tempo t_2 , y recebe a atualização de z a atualiza sua tabela de distância. O menor custo de y's não muda e então y *não* envia nenhuma mensagem para z.

“boas notícias viajam depressa”

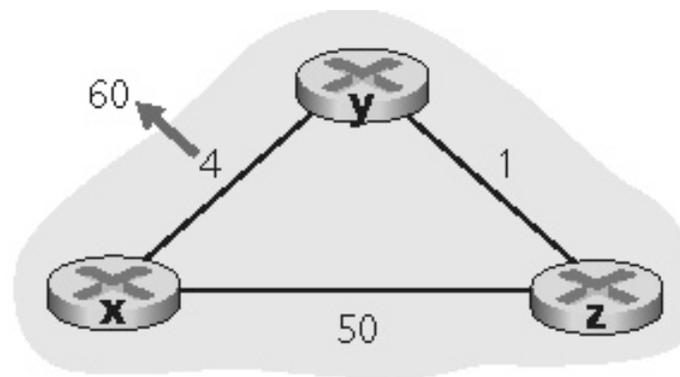
4 Vetor de distância: mudanças no custo do enlace

Mudanças no custo do enlace:

- Boas notícias viajam rápido
- Más notícias viajam devagar – problema da “contagem ao infinito”!
- 44 iterações antes de o algoritmo estabilizar: veja o texto

Reversão envenenada:

- Se Z roteia por Y para alcançar X :
 - Z diz a Y que sua distância (de Z) para X é infinita (então Y não roteará até X via Z)
- Isso resolverá completamente o problema da contagem ao infinito?



b.

4 Comparação dos algoritmos LS e VD

Complexidade

- **LS:** com n nós, E links, $O(NE)$ mensagens enviadas
- **DV:** trocas somente entre vizinhos
 - Tempo de convergência varia

Tempo de convergência

- **LS:** algoritmo $O(N^2)$ exige mensagens $O(NE)$
 - Pode ter oscilações
- **DV:** tempo de convergência varia
 - Pode haver loops de roteamento
 - Problema da contagem ao infinito

Robustez: o que acontece se um roteador funciona mal?

Ls:

- Nós podem informar custos de **link** incorretos
- Cada nó calcula sua própria tabela de roteamento

Dv:

- Nó DV pode informar custo de **caminho** incorreto
- Tabela de cada nó é usada por outros
 - Propagação de erros pela rede

4 A camada de rede

- 4.1 Introdução
- 4.2 Circuito virtual e redes de datagrama
- 4.3 O que há dentro de um roteador
- 4.4 IP: Protocolo da Internet
 - Formato do datagrama
 - Endereçamento IPv4
 - ICMP
 - IPv6
- 4.5 Algoritmos de roteamento
 - Link state
 - Distance vector
 - Roteamento hierárquico
- 4.6 Roteamento na Internet
 - RIP
 - OSPF
 - BGP
- 4.7 Roteamento de broadcast e multicast

4 Roteamento hierárquico

Nosso estudo é uma idealização

- Roteadores são todos idênticos
- Redes “flat”
- ... na prática, isso não é verdade

Escala: com 200 milhões de destinos:

- Não é possível armazenar todos os destinos numa única tabela de rotas!
- As mudanças na tabela de rotas irão congestionar os enlaces!

Autonomia administrativa

- Internet = rede de redes
- Cada administração de rede pode querer controlar o roteamento na sua própria rede

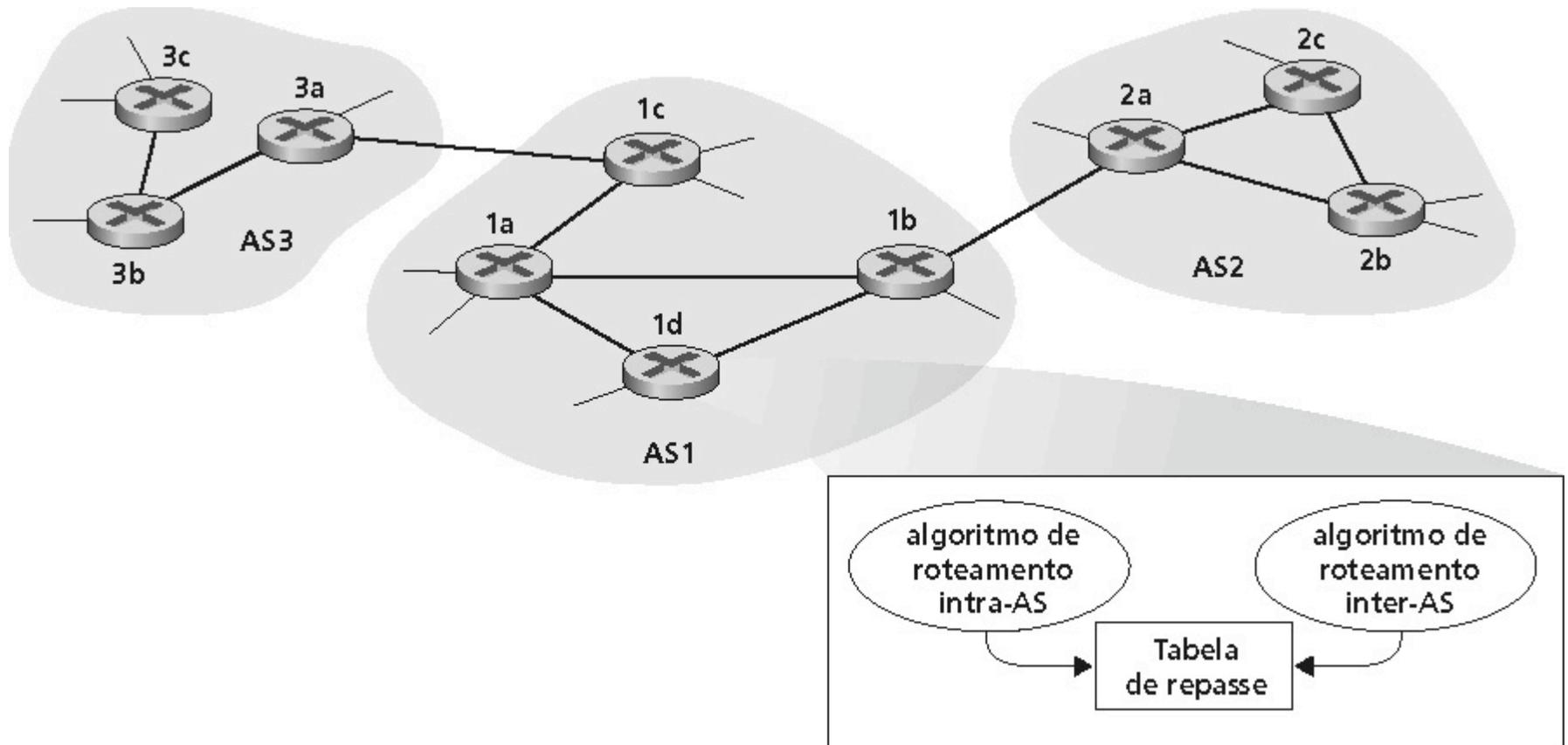
4 Roteamento hierárquico

- Agrega roteadores em regiões, “sistemas autônomos” (AS)
- Roteadores no mesmo AS rodam o mesmo protocolo de roteamento
 - Protocolo de roteamento “intra-AS”
 - Roteadores em diferentes AS podem rodar diferentes protocolos de roteamento

Roteador Gateway

- Link direto para um roteador em outro AS

4 ASs interconectadas



- Tabela de roteamento é configurada por ambos os algoritmos, intra e inter-AS
 - Intra-AS estabelece entradas para destinos internos
 - Inter-AS e intra-AS estabelecem entradas para destinos externos

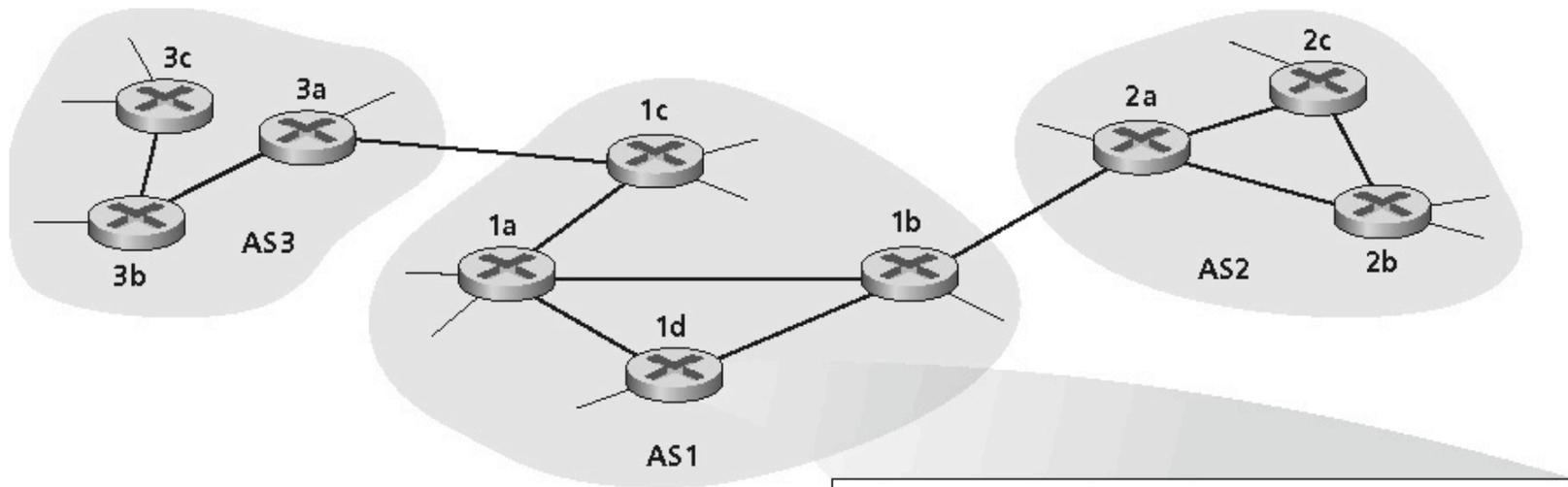
4 Tarefas Inter-AS

- Suponha que um roteador no AS1 receba um datagrama cujo destino seja fora do AS1
 - O roteador deveria encaminhar o pacote para os roteadores gateway, mas qual deles?

AS1 precisa:

1. Aprender quais destinos são alcançáveis através de AS2 e através de AS3.
2. Propagar suas informações de alcance para todos os roteadores em AS1.

Tarefa para o roteamento inter-AS routing!

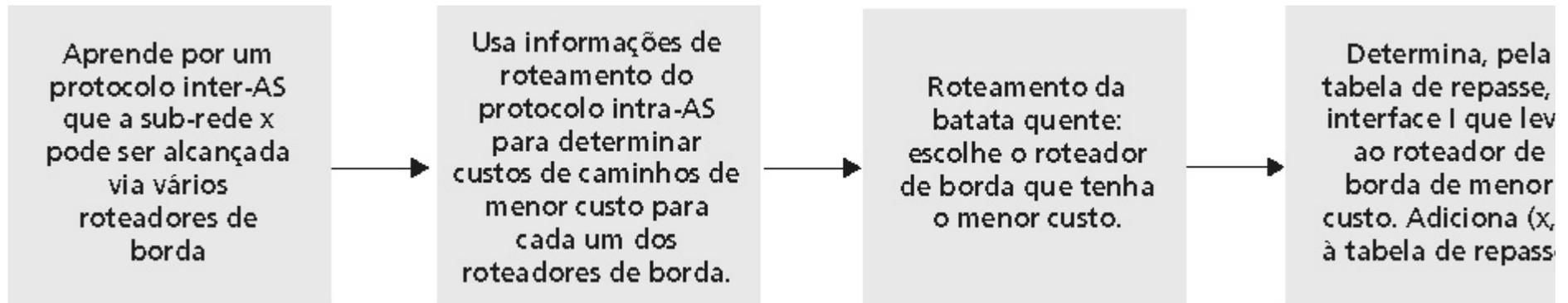


4 Exemplo: Ajustando a tabela de roteamento no roteador 1d

- Suponha que AS1 aprende pelo protocolo inter-AS protocol que a sub-rede **x** é alcançável através de AS3 (gateway 1c) mas não através de AS2
- O protocolo inter-AS propaga informações de alcance para todos os roteadores internos
- Baseado nas informações de roteamento intra-AS, o roteador 1d determina que sua interface **I** está no caminho de menor custo para 1c
- Coloca na tabela de roteamento a entrada **(x,I)**

4 Exemplo: Escolhendo entre múltiplas ASs

- Agora suponha que AS1 aprende pelo protocolo inter-AS que a sub-rede **x** é alcançável através de AS3 e através de AS2.
- Para configurar a tabela de roteamento, o roteador 1d deve determinar por qual gateway ele deve encaminhar os pacotes para o destino **x**.
- Isso também é tarefa para o protocolo de roteamento inter-AS.
- **Roteamento de “batata quente”**: envia o pacote para o mais próximo de dois roteadores.



4 A camada de rede

- 4.1 Introdução
- 4.2 Circuito virtual e redes de datagrama
- 4.3 O que há dentro de um roteador
- 4.4 IP: Protocolo da Internet
 - Formato do datagrama
 - Endereçamento IPv4
 - ICMP
 - IPv6
- 4.5 Algoritmos de roteamento
 - Link state
 - Distance vector
 - Roteamento hierárquico
- 4.6 Roteamento na Internet
 - RIP
 - OSPF
 - BGP
- 4.7 Roteamento de broadcast e multicast

4 Roteamento intra-AS

- Também conhecido como **Interior Gateway Protocols (IGP)**
- Protocolos de roteamento intra-AS mais comuns:
 - RIP: Routing Information Protocol
 - OSPF: Open Shortest Path First
 - IGRP: Interior Gateway Routing Protocol (proprietário da Cisco)

4 A camada de rede

- 4.1 Introdução
- 4.2 Circuito virtual e redes de datagrama
- 4.3 O que há dentro de um roteador
- 4.4 IP: Protocolo da Internet
 - Formato do datagrama
 - Endereçamento IPv4
 - ICMP
 - IPv6
- 4.5 Algoritmos de roteamento
 - Link state
 - Distance vector
 - Roteamento hierárquico
- 4.6 Roteamento na Internet
 - RIP
 - OSPF
 - BGP
- 4.7 Roteamento de broadcast e multicast