

# Algoritmos de Roteamento

Pedro Paulo V. Campos  
Tarcísio Eduardo M. Crocomo

10 de novembro de 2010

# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Fundamentação
- 3 Algoritmos Estáticos
- 4 Algoritmos Dinâmicos
- 5 Conclusão

# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Fundamentação
- 3 Algoritmos Estáticos
- 4 Algoritmos Dinâmicos
- 5 Conclusão

# Motivação

```
traceroute to nhk.co.jp (61.58.37.103)
 1 192.168.1.254 0.150 ms
 2 roteador.inf.ufsc.br 1.835 ms
 3 npd252e1-1gb-npd254rs.bb.ufsc.br 5.233 ms
 4 popsc-1g-ufsc-(...)-r250.bb.pop-sc.rnp.br 5.939 ms
 5 rnp-2g-194-251-v40-r251.bb.pop-sc.rnp.br 6.613 ms
 6 so-1-0-0-r1-rs.bkb.rnp.br 11.776 ms
 7 so-0-0-0-r1-df.bkb.rnp.br 51.419 ms
 8 so-0-2-0-r1-sp.bkb.rnp.br 66.531 ms
 (...)
16 xe-0-1-0.r21.miamfl02.us.bb.gin.ntt.net 177.438 ms
 (...)
20 as-1.r21.osakjp01.jp.bb.gin.ntt.net 396.762 ms
21 ae-2.r23.tokyjp01.jp.bb.gin.ntt.net 374.946 ms
22 129.250.3.75 407.060 ms
23 xe-1-1-0.a05.taiptw01.tw.ra.gin.ntt.net 430.482 ms
 (...)
27 nhk-grp.jp 408.878 ms
```

# O Roteador



Figura: DI-604: 100 Mbps, \$60

# O Roteador



Figura: Cisco CRS-3: 322 Tbps, \$60.000

# Desafios

**Correção** Fornecer não apenas uma rota válida mas a melhor

**Escalabilidade** Tamanho de rede variável. Algoritmos eficientes

**Estabilidade** Rápida adaptação a mudanças ou problemas na rede

**Robustez** Funcionar por anos sem necessitar reinicialização

**Justiça** Visar eficiência global sem gerar starvation

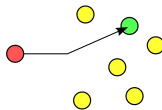
# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Fundamentação**
- 3 Algoritmos Estáticos
- 4 Algoritmos Dinâmicos
- 5 Conclusão

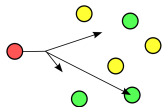


# Modelos de Troca de Dados

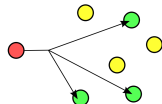
**Unicast**



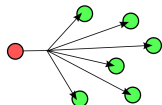
**Anycast**



**Multicast**



**Broadcast**



# Métricas para Classificação de Rotas

- Número de hops
- Largura de banda
- Custo (monetário)

# Sistemas Autônomos

- Como tornar escalável e administrável um conjunto de ~2bi de computadores interconectados?
- Solução: Agrupar em um SA redes operadas por um ou mais operadores que apresentam uma única política clara de roteamento.
- Exemplo: AS11242 - POP-SC - Responsável por 73728 IPs

# Classificação de Protocolos de Roteamento

## Quanto à Vizinhança

### Externos

$G(V,A)$

$V = \{v \mid v \text{ é um sistema autônomo}\}$

$A = \{(v_1, v_2, m) \mid v_1, v_2 \in V, \text{ há uma ligação direta entre } v_1 \text{ e } v_2 \text{ com um custo } m\}$

### Internos

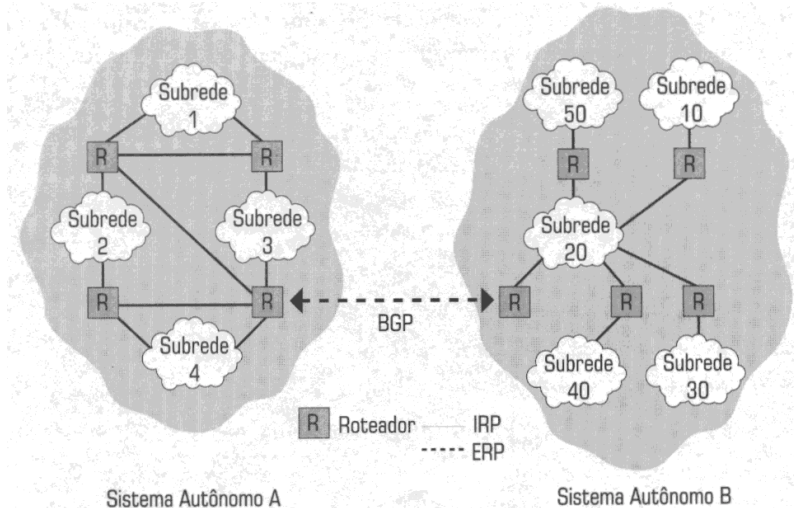
$G(V,A)$

$V = \{v \mid v \text{ é nodo da rede de um sistema autônomo}\}$

$A = \{(v_1, v_2, m) \mid v_1, v_2 \in V, \text{ há uma ligação direta entre } v_1 \text{ e } v_2 \text{ com um custo } m\}$

# Classificação de Protocolos de Roteamento

Quanto à Vizinhança



# Classificação de Protocolos de Roteamento

## Quanto à Escolha de Rotas

- Estáticos (Não adaptativos)
  - Menor caminho
  - *Flooding*
  - Baseado em Fluxo (*Flow-based*)
- Dinâmicos (Adaptativos)
  - Vetor distância
  - Estado do *link* (*Link State*)
  - Hierárquico

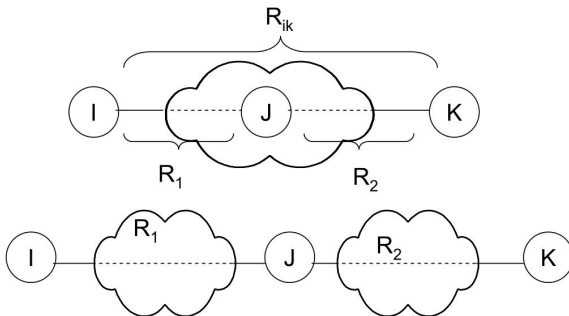
# Rotas Ótimas

- É possível criar uma descrição das rotas ótimas sem levar em conta a topologia da rede?
- Como medir a qualidade de um algoritmo de roteamento?

# Princípio de Otimização

## Teorema

Se um roteador  $J$  estiver no caminho ótimo entre os roteadores  $I$  e  $K$ , o caminho ótimo de  $J$  a  $K$  também estará na mesma rota.

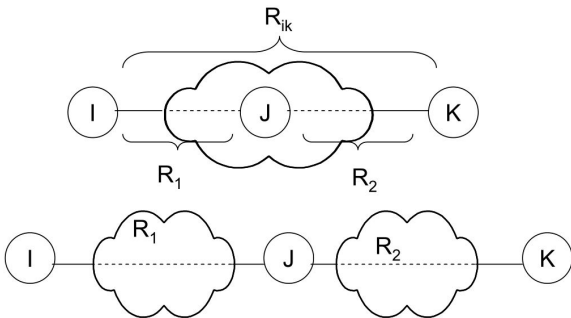




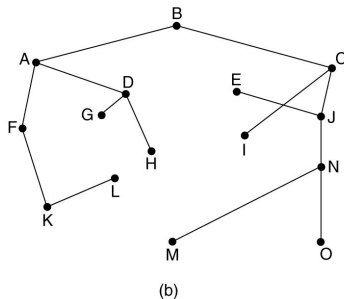
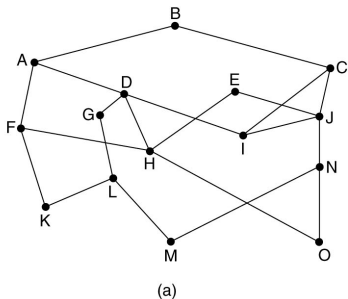
# Princípio de Otimização

## Prova (por contradição)

Se houvesse uma rota melhor que a enunciada entre  $J$  e  $K$ , ela poderia ser concatenada a  $R_1$  para criar uma rota melhor entre  $I$  e  $K$ , contradizendo a afirmação que a rota  $R_{ik}$  é ótima.



# Árvore de Escoamento



# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Fundamentação
- 3 Algoritmos Estáticos**
- 4 Algoritmos Dinâmicos
- 5 Conclusão

# Menor Caminho

- Um dos algoritmos mais simples
- A partir do modelo de grafos de uma rede interna gera uma sequência de nodos a serem percorridos para um pacote sair da origem e chegar ao destino.
- Algoritmo global, conhecimento completo do grafo
- Calculado de maneira centralizada e distribuída para os roteadores
- Algoritmo de Dijkstra

## *Flooding*

- Envia pacotes para todos os vizinhos, exceto pra de onde ele veio
- Necessita de controle para evitar o envio de infinitos pacotes
- Não costuma ser prático, exceto quando seu efeito é efetivamente o desejado
- Escolhe o menor caminho, pois escolhe todos simultaneamente

# Baseado em Fluxo

- Conta carga da rede junto da topologia
- Fluxo médio conhecido anteriormente
- Cálculo do atraso médio entre nodos
- Algoritmo que determine menor atraso médio determina o roteamento

# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Fundamentação
- 3 Algoritmos Estáticos
- 4 Algoritmos Dinâmicos**
- 5 Conclusão

# Vetor Distância

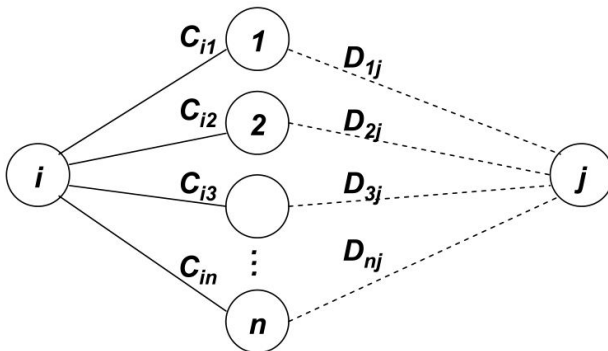
- Algoritmo distribuído
- Cada roteador possui uma tabela (vetor) contendo a melhor distância conhecida até cada destino e a linha de saída preferencial utilizada para alcançá-lo.
- Utilizado na ARPANET: *Routing Information Protocol* (RIP)
- Objetivo: Encontrar o menor caminho
  - Algoritmo de Bellman-Ford



# Algoritmo de Bellman-Ford

## Princípio

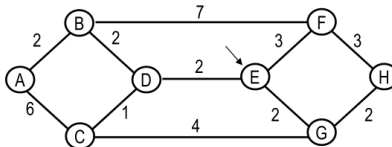
Se os vizinhos de um nodo  $i$  conhecem um caminho até um nodo  $j$ , a menor distância entre o nodo  $i$  e  $j$  é obtido encontrando o menor valor resultante da soma da distância de  $i$  até um vizinho e deste até  $j$ .



## Algoritmo

```
Bellman-Ford( $G, w, s$ )  
for  $i \leftarrow 1$  to  $|V[G]| - 1$  do  
    for all  $(u, v) \leftarrow E[G]$  do  
        Relax( $u, v$ )  
    end for  
end for  
for all  $(u, v) \leftarrow E[G]$  do  
    if  $d[v] > d[u] + w(u, v)$  then  
        return FALSE  
    end if  
end for  
return TRUE
```

# Vetor Distância


 $C^E(v)$ 

D	2
F	3
G	2

Custo do enlace

 $C^D(d)$ 

A	4
B	2
C	1
D	0
E	2
F	9
G	5
H	7

 $C^F(d)$ 

A	9
B	7
C	9
D	9
E	3
F	0
G	5
H	4

 $C^G(d)$ 

A	9
B	7
C	4
D	5
E	2
F	5
G	0
H	2

Vetores de distância vizinhos imediatos

 $D^E(d,v)$ 

	D	F	G
A	6	12	11
B	4	10	9
C	3	12	6
D	2	12	7
E	-	-	-
F	11	3	7
G	7	8	2
H	9	7	4

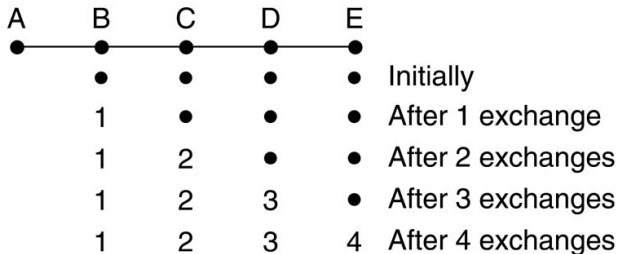
 $C^E(D) + C^D(d)$ 
 $C^E(F) + C^F(d)$ 
 $C^E(G) + C^G(d)$ 

Tabela de Roteamento E

Dst	custo, via
A	6,D
B	4,D
C	3,D
D	2,D
E	-, -
F	3,F
G	2,G
H	4,G

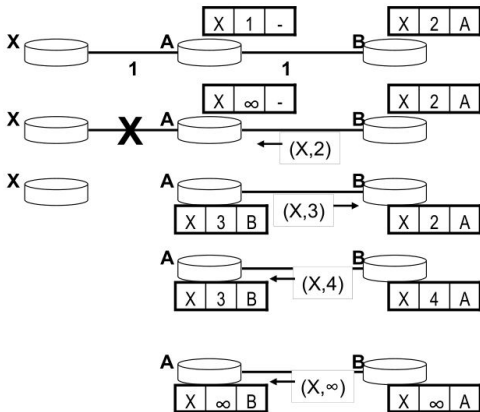
# Convergência do Vetor Distância

- Vetor distância reage bem (linearmente) a boas notícias:



- Já a más notícias...

# Problema da Contagem ao Infinito



Não daria problema se A enviasse o vetor de distância **antes** de B, pois declararia que seu custo até X seria infinito.

## Estado do *Link*

- Descobrir vizinhos
- Propagar informação
  - Quem
  - Vizinhos
  - Número de sequência
- Criação do mapa da rede
- Recalcular e reenviar em caso de falha
- Cálculo da melhor rota é independente
- OSPF - Open Shortest Path First:
  - Protocolo muito utilizado em redes internas, baseado em link-state.

## Roteamento Hierárquico

- Utilizado no roteamento externo (inter-rede)
- ~2bi de dispositivos → 35.000 Sistemas Autônomos (2010)
- Exemplo: Border Gateway Protocol (BGP)
- Responsável por tornar a Internet uma aplicação verdadeiramente distribuída.
- Obediência a leis internacionais e decisões políticas

# Roteamento Hierárquico

- Funcionamento básico: Similar ao vetor distância. Roteadores enviam uns aos outros duas informações:
  - Que eles estão vivos e quais redes (Faixas de IPs) estão sob sua responsabilidade.
  - Qual a rota completa que utilizam para chegar ao destino (Solução para o problema da contagem ao infinito!)



- O que acontece se  $G$  cair?

# Sumário

- 1 Introdução
- 2 Fundamentação
- 3 Algoritmos Estáticos
- 4 Algoritmos Dinâmicos
- 5 Conclusão

# Conclusão

- Grafos e seus algoritmos são ferramentas extremamente úteis em redes de computadores. Permitem a modelagem e solução de diferentes situações encontradas na área.
- A Internet como a conhecemos só existe hoje graças aos avanços no desenvolvimento de melhores e mais eficientes algoritmos de roteamento.
- Não há uma "bala de prata", diferentes algoritmos servem a diferentes propósitos

## Bibliografia

- TANENBAUM, A. S. Redes de Computadores. 4 ed. São Paulo: Elsevier, 2003.
- DE CASTRO, M. C. F. Redes Comutadas. setembro de 2002. Disponível em: <<http://www.ee.pucrs.br/~decastro/download.html>>.
- CARISSIMI, A. Algoritmos de roteamento. 2008. Disponível em: <<http://www.inf.ufrgs.br/~asc/redes/pdf/aula21.pdf>>.
- CAMPONOGARA, E. Caminhos Mínimos Com Uma Fonte. abril de 2009. Disponível em: <[http://www.das.ufsc.br/~camponog/Disciplinas/DAS-9003/slides\\_CLR/114-shortest-path.pdf](http://www.das.ufsc.br/~camponog/Disciplinas/DAS-9003/slides_CLR/114-shortest-path.pdf)>