Algoritmos de Roteamento

Pedro Paulo V. Campos
Tarcísio Eduardo M. Crocomo

11 de novembro de 2010

Sumário

Sumário

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-**npd**254rs.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.**miam**fl02.us.bb.gin.ntt.net 177.438 ms
(...)
20 as-1.r21.**osak**jp01.jp.bb.gin.ntt.net 396.762 ms
21 ae-2.r23.**toky**jp01.jp.bb.gin.ntt.net 374.946 ms
22 129.250.3.75 407.060 ms
23 xe-1-1-0.a05.**taip**tw01.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*

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*

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*

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*

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

Modelos de Troca de Dados

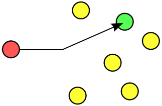


Figura: Unicast

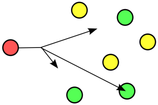


Figura: Anycast

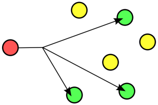


Figura: Multicast

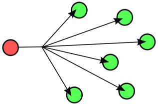


Figura: Broadcast

Modelos de Troca de Dados

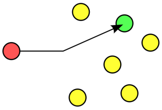


Figura: Unicast

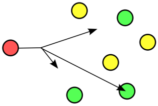


Figura: Anycast

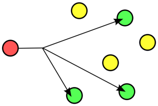


Figura: Multicast

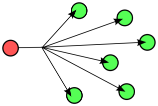


Figura: Broadcast

Modelos de Troca de Dados

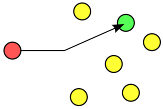


Figura: Unicast

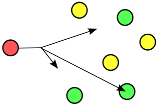


Figura: Anycast

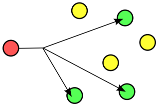


Figura: Multicast

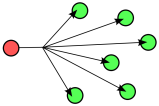


Figura: Broadcast

Modelos de Troca de Dados

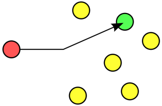


Figura: Unicast

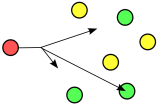


Figura: Anycast

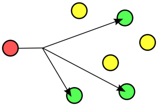


Figura: Multicast

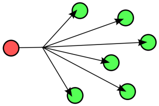


Figura: Broadcast

Modelos de Troca de Dados

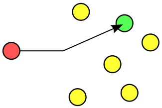


Figura: Unicast

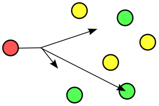


Figura: Anycast

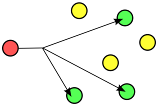


Figura: Multicast

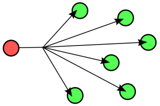


Figura: Broadcast

Métricas para Classificação de Rotas

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

Métricas para Classificação de Rotas

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

Métricas para Classificação de Rotas

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

Métricas para Classificação de Rotas

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

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

Sistemas Autônomos

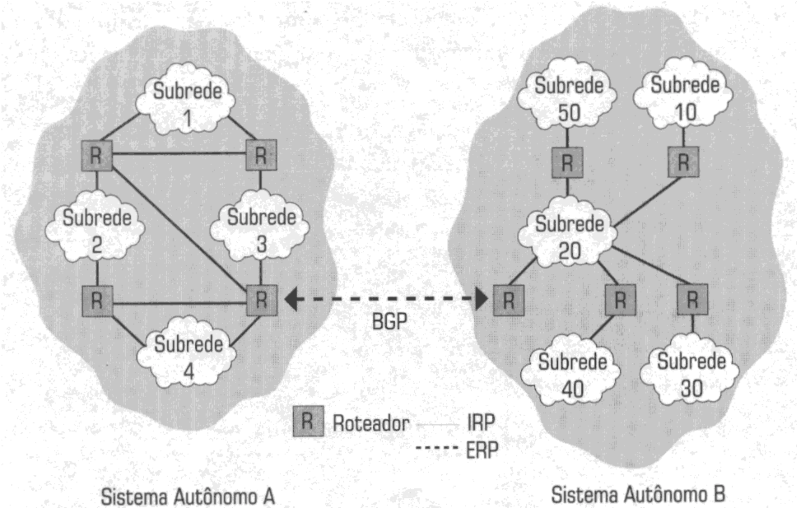
- Como tornar escalável e administrável um conjunto de ~2bi de computadores interconectados?
- Solução: Agrupar em um SA redes operadas por um ou mais operadores que apresentam uma única política clara de roteamento.
- Exemplo: AS11242 - POP-SC - Responsável por 73728 IPs

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



Classificação de Protocolos de Roteamento

Quanto à Vizinhança

Externos

G(V,A)

V = {v | v é um sistema autônomo}

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

Internos

G(V,A)

V = {v | v é nodo da rede de um sistema autônomo}

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

Classificação de Protocolos de Roteamento

Quanto à Vizinhança

Externos

G(V,A)

V = {v | v é um sistema autônomo}

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

Internos

G(V,A)

V = {v | v é nodo da rede de um sistema autônomo}

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

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

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

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

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 de enlace (*Link State*)
  - Hierárquico

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

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

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

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?

Rotas Ótimas

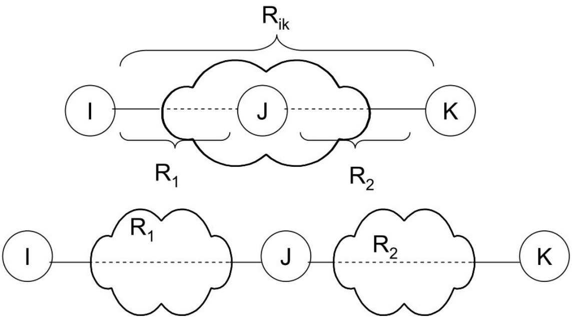
- É possível criar uma descrição das rotas ótimas sem levar em conta a topologia da rede?

- Como medir a qualidade de um algoritmo de roteamento?

Princípio de Otimização

Teorema

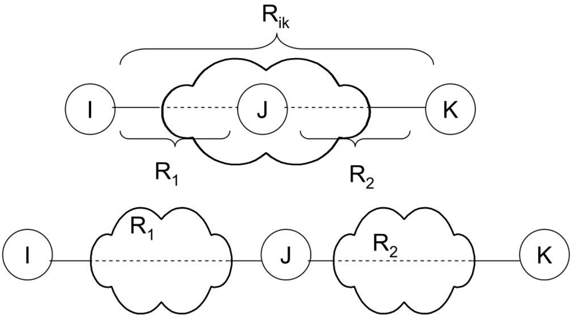
Se um roteador J estiver no caminho ótimo entre os roteadores I e K, o caminho ótimo de J a K também estará na mesma rota.



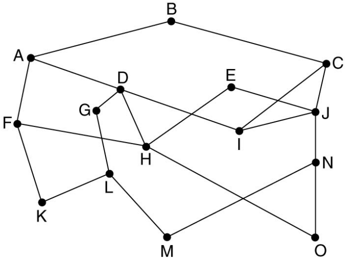
Princípio de Otimização

Prova (por contradição)

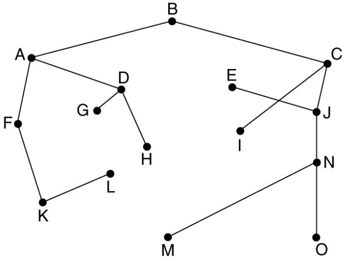
Se houvesse uma rota melhor que a enunciada entre J e K, ela poderia ser concatenada a R_1 para criar uma rota melhor entre I e K, contradizendo a afirmação que a rota R_{ik} é ótima. □



Árvore de Escoamento



(a)



(b)

Sumário

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

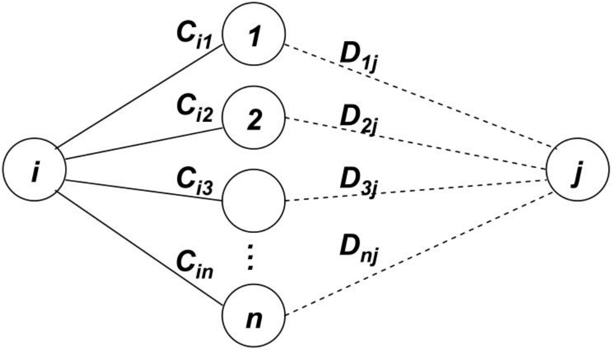
Vetor Distância

- 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

Algoritmo

Algoritmo

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, s)
for i $\leftarrow$ 1 to |V[G]| - 1 do

end for
for all (u, v) $\leftarrow$ E[G] do

end for
return TRUE

Algoritmo

Algoritmo

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, s)
for i $\leftarrow$ 1 to $|V[G]|$ - 1 **do**

end for
for all (u, v) $\leftarrow$ E[G] **do**

end for
return TRUE

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, s)
for i $\leftarrow$ 1 to $|V[G]|$ - 1 **do**
  for all (u, v) $\leftarrow$ E[G] **do**

  end for
end for
for all (u, v) $\leftarrow$ E[G] **do**

end for
return TRUE

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, s)
for i $\leftarrow$ 1 to $|V[G]|$ - 1 **do**
    for all (u, v) $\leftarrow$ E[G] **do**
    end for
end for
for all (u, v) $\leftarrow$ E[G] **do**
end for
return TRUE

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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**

end for
return TRUE

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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**

end for
return TRUE

Algoritmo

```
Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, s)
for i ← 1 to |V[G]| - 1 do
    for all (u, v) ← E[G] do
        Relax(u, v)
    end for
end for
for all (u, v) ← E[G] do



end for
return  TRUE
```

Algoritmo

```
Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, s)
for i ← 1 to |V[G]| - 1 do
    for all (u, v) ← E[G] do
        Relax(u, v)
    end for
end for
for all (u, v) ← E[G] do
    if d[v] > d[u] + w(u, v) then

    end if
end for
return TRUE
```

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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**
  end if
end for
return TRUE

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, s)
for i ← 1 to |V[G]| - 1 **do**
  for all (u, v) ← E[G] **do**
    Relax(u, v)
  end for
end for
for all (u, v) ← E[G] **do**
  if d[v] > d[u] + w(u, v) **then**
    return FALSE
  end if
end for
return TRUE

Algoritmo

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

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

Algoritmo

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

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

Algoritmo

Initialize-Single-Source(G, s)
for all v $\leftarrow$ V[G] **do**
end for
d[s] $\leftarrow$ 0

Algoritmo

Relax(u, v)
if d[v] > d[u] + w(u, v) **then**
end if

Algoritmo

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

Algoritmo

```
Initialize-Single-Source(G, s)
for all v ∈ V[G] do
    d[v] ← ∞
    π[v] ← nil
end for
d[s] = 0
```

Algoritmo

```
Relax(u, v)
if d[v] > d[u] + w(u, v) then

end if
```

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

Algoritmo

Initialize-Single-Source(G, s)
for all v $\in$ V[G] **do**
    d[v] $\leftarrow \infty$
    π[v] $\leftarrow$ nil
end for
d[s] = 0

Algoritmo

Relax(u, v)
if d[v] > d[u] + w(u, v) **then**

end if

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

Algoritmo

Initialize-Single-Source(G, s)
for all v $\in$ V[G] **do**
  d[v] $\leftarrow \infty$
  π[v] $\leftarrow$ nil
end for
d[s] = 0

Algoritmo

Relax(u, v)
if d[v] > d[u] + w(u, v) **then**
end if

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

Algoritmo

Initialize-Single-Source(G, s)
for all v $\in$ V[G] **do**
    d[v] $\leftarrow \infty$
    π[v] $\leftarrow$ nil
end for
d[s] = 0

Algoritmo

Relax(u, v)
if d[v] > d[u] + w(u, v) **then**

end if

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

Algoritmo

Initialize-Single-Source(G, s)
for all v $\in$ V[G] **do**
  d[v] $\leftarrow \infty$
  π[v] $\leftarrow$ nil
end for
d[s] = 0

Algoritmo

Relax(u, v)
if d[v] > d[u] + w(u, v) **then**

end if

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

Algoritmo

Initialize-Single-Source(G, s)
for all v $\in$ V[G] **do**
    d[v] $\leftarrow \infty$
    π[v] $\leftarrow$ nil
end for
d[s] = 0

Algoritmo

Relax(u, v)
if d[v] > d[u] + w(u, v) **then**

end if

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

Algoritmo

Initialize-Single-Source(G, s)
for all v $\in$ V[G] **do**
  d[v] $\leftarrow \infty$
  π[v] $\leftarrow$ nil
end for
d[s] = 0

Algoritmo

Relax(u, v)
if d[v] > d[u] + w(u, v) **then**

end if

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

Algoritmo

Initialize-Single-Source(G, s)
for all v $\in$ V[G] **do**
  d[v] $\leftarrow \infty$
  π[v] $\leftarrow$ nil
end for
d[s] = 0

Algoritmo

Relax(u, v)
if d[v] > d[u] + w(u, v) **then**
  d[v] $\leftarrow$ d[u] + w(u, v)
  π[v] $\leftarrow$ u
end if

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

Algoritmo

Initialize-Single-Source(G, s)
for all v $\in$ V[G] **do**
    d[v] $\leftarrow \infty$
    π[v] $\leftarrow$ nil
end for
d[s] = 0

Algoritmo

Relax(u, v)
if d[v] > d[u] + w(u, v) **then**
    d[v] $\leftarrow$ d[u] + w(u, v)
    π[v] $\leftarrow$ u
end if

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

Algoritmo

Initialize-Single-Source(G, s)
for all v $\in$ V[G] **do**
  d[v] $\leftarrow \infty$
  π[v] $\leftarrow$ nil
end for
d[s] = 0

Algoritmo

Relax(u, v)
if d[v] > d[u] + w(u, v) **then**
  d[v] $\leftarrow$ d[u] + w(u, v)
  π[v] $\leftarrow$ u
end if

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

Algoritmo

Initialize-Single-Source(G, s)
for all v $\in$ V[G] **do**
    d[v] $\leftarrow \infty$
    π[v] $\leftarrow$ nil
end for
d[s] = 0

Algoritmo

Relax(u, v)
if d[v] > d[u] + w(u, v) **then**
    d[v] $\leftarrow$ d[u] + w(u, v)
    π[v] $\leftarrow$ u
end if

Algoritmo

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

Algoritmo

```
Initialize-Single-Source(G, s)
for all v ∈ V[G] do
    d[v] ← ∞
    π[v] ← nil
end for
d[s] = 0
```

Algoritmo

```
Relax(u, v)
if d[v] > d[u] + w(u, v) then
    d[v] ← d[u] + w(u, v)
    π[v] ← u
end if
```

Algoritmo

Bellman-Ford(G, w, s)
Initialize-Single-Source(G, 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

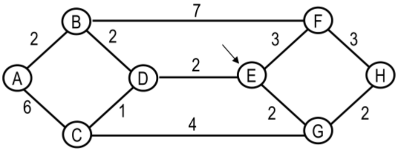
Algoritmo

Initialize-Single-Source(G, s)
for all v $\in$ V[G] **do**
  d[v] $\leftarrow \infty$
  π[v] $\leftarrow$ nil
end for
d[s] = 0

Algoritmo

Relax(u, v)
if d[v] > d[u] + w(u, v) **then**
  d[v] $\leftarrow$ d[u] + w(u, v)
  π[v] $\leftarrow$ u
end if

Vetor Distância



$C^E(v)$

D	2
F	3
G	2

Custo do enlace

	C^D (d)	C^F (d)	C^G (d)
A	4	9	9
B	2	7	7
C	1	9	4
D	0	9	5
E	2	3	2
F	9	0	5
G	5	5	0
H	7	4	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

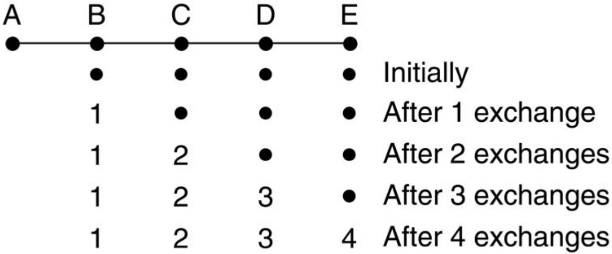
$C^E(D)+C^D$ (d) $C^E(F)+C^F$(d) $C^E(G)+C^G$ (d)

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

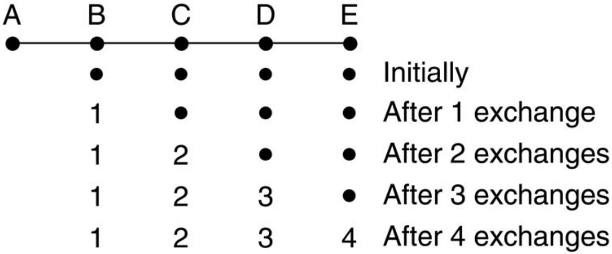
- Vetor distância reage bem (linearmente) a boas notícias:



- Já a más notícias. . .

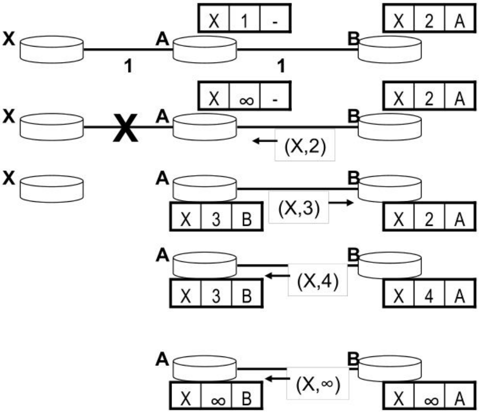
Convergência do Vetor Distância

- 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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

- 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

- Utilizado no roteamento externo (inter-rede)
- ~2bi de dispositivos $\rightarrow$ 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

- Utilizado no roteamento externo (inter-rede)
- ~2bi de dispositivos $\rightarrow$ 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

- Utilizado no roteamento externo (inter-rede)
- ~2bi de dispositivos $\rightarrow$ 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!)

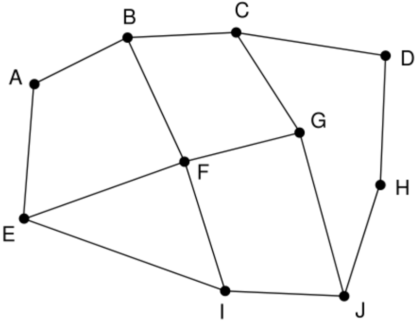
Roteamento Hierárquico

- 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!)

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!)

Roteamento Hierárquico



Informações sobre D que
F recebe de seus vizinhos

De B: "Eu utilizo BCD"
De G: "Eu utilizo GCD"
De I: "Eu utilizo IFGCD"
De E: "Eu utilizo EFGCD"

- O que acontece se G cair?

Sumário

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

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

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/l14-shortest-path.pdf>

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/l14-shortest-path.pdf>

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/l14-shortest-path.pdf>

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/l14-shortest-path.pdf>