

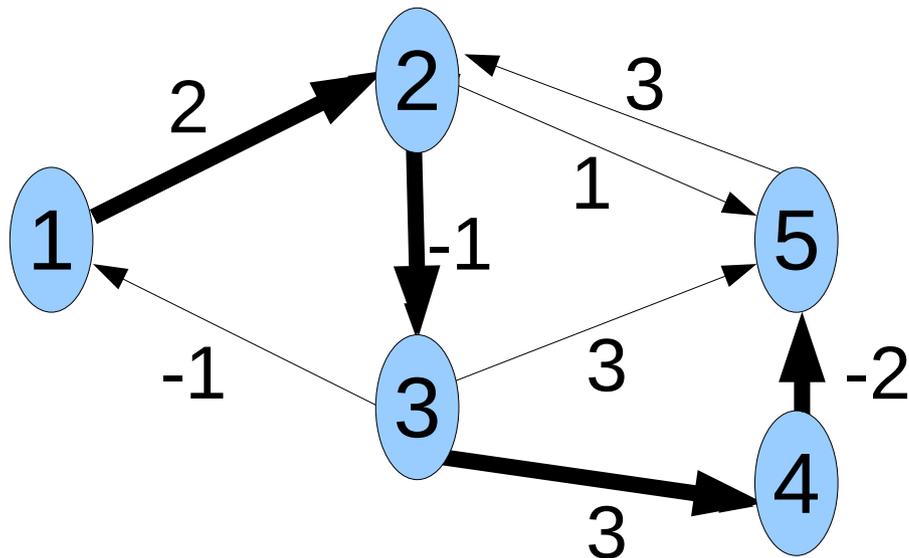
Grafos – Aula 14

Roteiro

- Caminho mínimo com pesos negativos
- Programação dinâmica
- Algoritmo de Bellman-Ford
- Melhorias

Caminho Mínimo

- Dado grafo direcionado G , com pesos negativos
- **Problema:** Encontrar caminho mínimo e distância de todos os vértices para um vértice destino t (fixado)



- Ex. caminho mais curto para $t = 5$
- Árvore geradora com caminhos mínimos

Programação Dinâmica

- Considere o caminho mínimo P entre v e t
 - $P = (v, v_1, v_2, \dots, t)$
- Decompor o problema em subproblemas
 - encontrar P através de soluções ótimas para subproblemas menores
- **Ideia:** número de arestas de P
 - P pode ter $1, 2, \dots, n-1$ arestas
- Usar número de arestas para decompor o problema
 - caminho mínimo passando por até i arestas

Função de Recursão

■ $OPT(i, v)$: custo do caminho mínimo P entre v e t usando no máximo i arestas

■ Ex. $t = 5$

■ $OPT(1, 3) = 3$

■ $OPT(2, 3) = 1$

■ $OPT(3, 3) = 1$

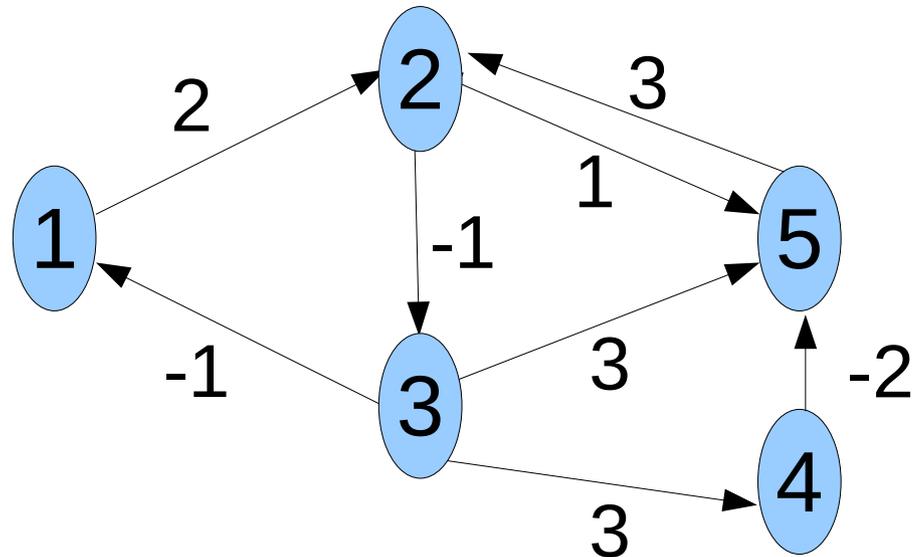
■ $OPT(1, 2) = 1$

■ $OPT(2, 2) = 1$

■ $OPT(3, 2) = 0$

■ $OPT(1, 1) = \text{infinito}$

■ $OPT(2, 1) = 3$



Analizando Solução Ótima

- Maior comprimento possível (em arestas) do caminho mínimo P entre v e t ?
 - $n-1$ arestas (caminho simples)
- O que podemos dizer sobre o caminho mais curto P entre v e t ?
 - 1) Ou possui exatamente $n-1$ arestas
 - 2) Ou possui menos arestas

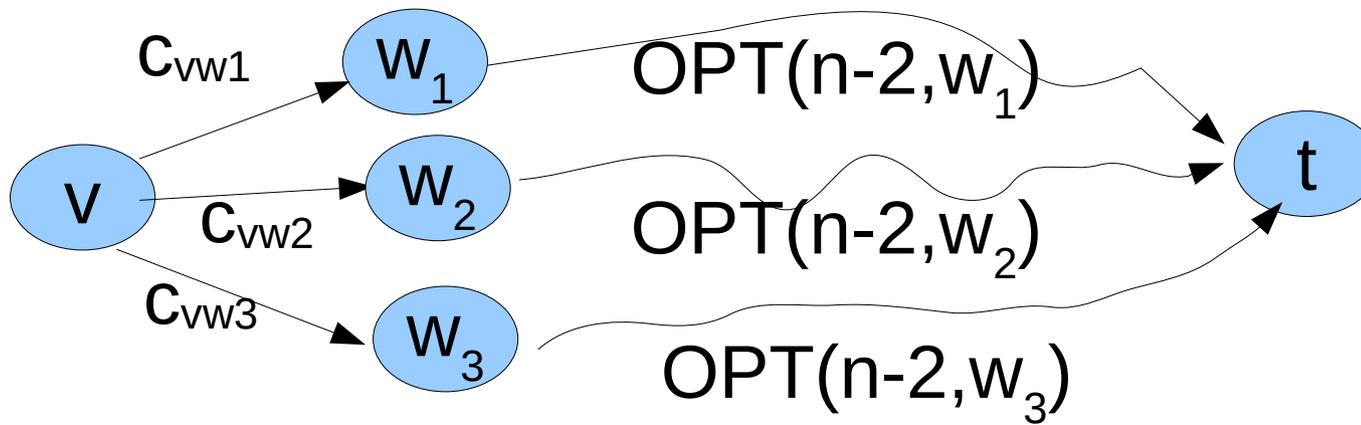
Analizando Solução Ótima

- Se P possui menos do que $n-1$ arestas
 - Custo da solução ótima com $n-2$ arestas será o mesmo
 - $\text{OPT}(n-1, v) = \text{OPT}(n-2, v)$
- Se P possui exatamente $n-1$ arestas
 - P passa por algum vizinho de v
 - caminho do vizinho até t tem exatamente $n-2$ arestas
 - escolher vizinho w com menor caminho, considerando o peso da aresta (v, w)
 - $\text{OPT}(n-1, v) = \min_w (\text{OPT}(n-2, w) + c_{vw})$

Graficamente

1 aresta

n-2 arestas



- Por qual vizinho de v o caminho mínimo P irá passar?
 - o de menor custo, considerando o peso da aresta com o vizinho
 - $\min_w (OPT(n-2, w) + c_{vw})$, onde w pertence aos vizinhos de saída de v

Generalizando

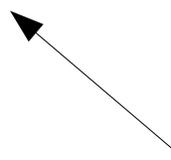
- Supor P caminho ótimo de v para t usando i arestas ou menos
- Podemos decompor P em dois casos
 - P possuir exatamente i arestas
 - P possuir menos de i arestas
- Mesmo raciocínio de antes

- $$\text{OPT}(i, v) = \min (\text{OPT}(i-1, v), \min_w (\text{OPT}(i-1, w) + c_{vw}))$$

peso da
aresta (v, w)



w pertence aos
vizinhos de saída e v



Algoritmo de Bellman-Ford

- Algoritmo iterativo para calcular $\text{OPT}(n-1, *)$

Bellman_Ford(G, t)

Array $M[0, \dots, n-1 ; 1, \dots, n]$

$M[0, v] = \infty$ para todo v

$M[0, t] = 0$

For $i = 1, \dots, n-1$

For $v = 1, \dots, n$

$M[i, v] = M[i-1, v]$

Para cada vizinho w de v

$M[i, v] = \min (M[i, v], M[i-1, w] + C_{vw})$

Retorna $M[n-1, *]$

- M retorna distância

Complexidade

- Loop mais interno passa por todos os vértices
 - para cada vértice, percorre vizinhos (grau)
- Soma dos graus é igual $2m$, número de arestas
- Loop externo tem $n-1$ passos
- Complexidade $O(n m)$
 - se grafo for muito denso: $O(n^3)$
- Memória?
 - Armazenar a matriz M , $O(n^2)$

Melhorias Práticas (1)

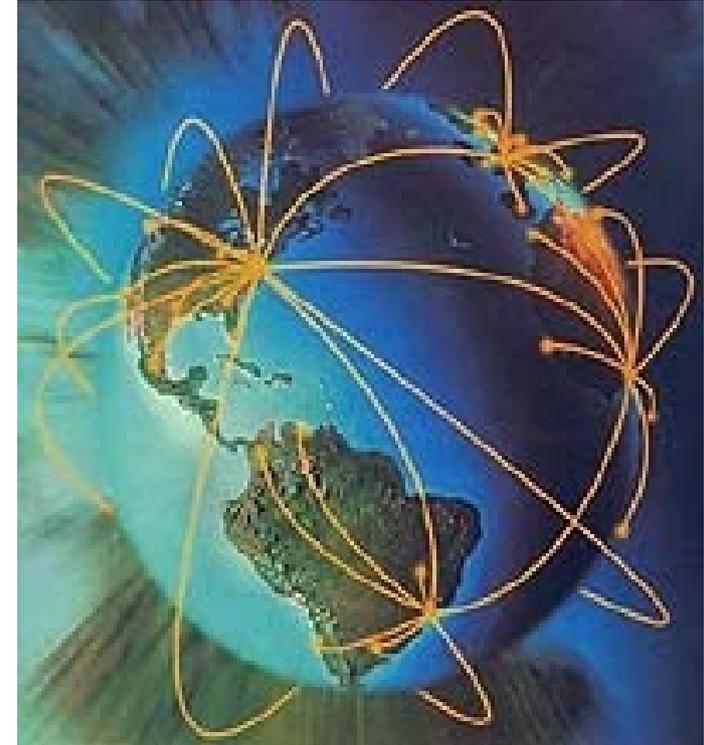
- Redução na quantidade de memória
- Manter vetor $M[v]$, ao invés de matriz $M[i,v]$
 - não precisamos guardar distâncias de caminhos com menos arestas (já vimos este truque)
- $M[v]$: custo do menor caminho entre v e t que conhecemos até agora
 - número de arestas não importa
- Custo de memória: $O(m + n)$
 - armazenar os pesos das m arestas

Melhorias Práticas (2)

- Redução no tempo de execução
- Atualizar $M[v]$ apenas quando $M[w]$ for atualizado no passo anterior
 - para algum vizinho w de v
- Terminar algoritmo quando nenhum $M[v]$ for atualizado
 - nenhuma distância vai reduzir
- Não reduz complexidade de pior caso
 - mas faz diferença pois na prática caminhos mínimos tem bem menos que $n-1$ arestas

Roteamento em Redes

- Rede global de comunicação
- Cada vértice é um *roteador*
- Arestas representam enlaces (*links*) entre roteadores
- Enlaces possuem custos (ex. tempo de propagação)
 - conhecidos pelo roteador
- **Problema:** cada roteador deve encontrar *melhor* rota (caminho) para todos os outros roteadores da rede



Roteamento em Redes

■ 1) Solução Centralizada

- Cada roteador obtém visão global da rede (ex. passa a conhecer o grafo da rede, com pesos)
- Executa Dijkstra: árvore geradora com raiz no roteador define para qual vizinho enviar

■ 2) Solução Distribuída

- Cada roteador conhece apenas seus vizinhos
- Descobre caminho mínimo através dos vizinhos (trocando mensagens)
- Versão distribuída do Bellman-Ford

Bellman-Ford Distribuído

- Vetor $M[]$ do algoritmo está *distribuído* entre os roteadores
 - cada roteador v é responsável por manter o valor $M[v]$, para cada destino t (vetor com todos os destinos)
- Ordem de execução do loop interno do algoritmo não é importante
- Roteador w informa aos vizinhos sempre que $M[w]$ diminuir
 - vizinho v atualiza $M[v]$ e informa aos seus vizinhos
- Opções de melhor caminho se *propagam* pela rede
- Precisa executar para cada destino t da rede
 - mas pode executar em paralelo

Implementado por protocolos de redes