

Projeto e Análise de Algoritmos

Árvore geradora mínima

Cid Carvalho de Souza, Cândida Nunes da Silva et al.

Primeiro Semestre de 2017

Árvore Geradora Mínima

Árvore Geradora Mínima

- ▶ Suponha que queremos resolver o seguinte problema: dado um conjunto de computadores, onde cada par de computadores pode ser ligado usando uma quantidade de fibra ótica, encontrar uma rede interconectando-os que use a menor quantidade de fibra ótica possível.
- ▶ Este problema pode ser modelado por um problema em grafos não direcionados ponderados onde os vértices representam os computadores, as arestas representam as conexões que podem ser construídas e o peso/custo de uma aresta representa a quantidade de fibra ótica necessária.

Árvore Geradora Mínima

- ▶ Nessa modelagem, o problema que queremos resolver é encontrar um **subgrafo gerador** (que contém todos os vértices do grafo original), **conexo** (para garantir a interligação de todas as cidades) e cuja **soma dos custos de suas arestas seja a menor possível**.
- ▶ Obviamente, o problema só tem solução se o **grafo** for **conexo**. Daqui pra frente vamos supor que o grafo de entrada é conexo.
- ▶ Além disso, o **sugrafo gerador** procurado é sempre uma **árvore** (supondo que os pesos são positivos).

Árvore Geradora Mínima

Problema da Árvore Geradora Mínima

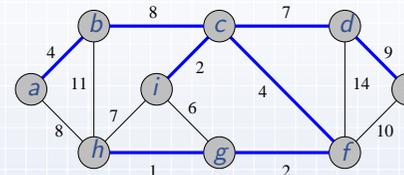
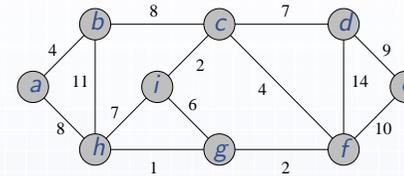
Entrada: grafo conexo $G = (V, E)$ com pesos $\omega(u, v)$ para cada aresta (u, v) .

Saída: subgrafo gerador conexo T de G cujo peso total

$$\omega(T) = \sum_{(u,v) \in T} \omega(u, v)$$

seja o menor possível.

Exemplo



Árvore Geradora Mínima

- ▶ Aqui trataremos do caso em que $\omega \geq 0$, ou seja, **não há arestas de peso negativo**.
- ▶ Depois pense em como o problema poderia ser resolvido se houvesse arestas de peso negativo na entrada.

Árvore Geradora Mínima

- ▶ Veremos dois algoritmos para resolver o problema de encontrar uma AGM:
 - ▶ algoritmo de Prim
 - ▶ algoritmo de Kruskal
- ▶ Ambos algoritmos usam **estratégia gulosa**. Eles são exemplos clássicos de algoritmos gulosos.

Algoritmo genérico

- ▶ A estratégia gulosa usada baseia-se em um **algoritmo genérico** que constrói uma AGM incrementalmente.
- ▶ O algoritmo mantém um conjunto de arestas A que satisfaz o seguinte **invariante**:

No início de cada iteração, A está contido em uma AGM.

- ▶ Em cada iteração, o algoritmo encontra uma aresta (u, v) tal que $A' = A \cup \{(u, v)\}$ também satisfaz o invariante.

Uma tal aresta é chamada **aresta segura** (para A).

Algoritmo genérico

AGM-GENÉRICO(G, w)

- 1 $A \leftarrow \emptyset$
- 2 **enquanto** A não é uma árvore geradora
- 3 Encontre uma **aresta segura** (u, v) para A
- 4 $A \leftarrow A \cup \{(u, v)\}$
- 5 **devolva** A

Obviamente o “algoritmo” está correto!

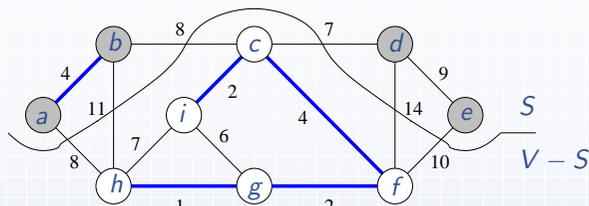
Note que nas linhas 2–4 A está propriamente contido em uma AGM, digamos T . Logo, existe uma **aresta segura** (u, v) em $E[T] - A$.

Naturalmente, para que isso seja um algoritmo de verdade, é preciso especificar como **encontrar** uma **aresta segura**.

Como encontrar arestas seguras

Considere um grafo $G = (V, E)$ e seja $S \subset V$.

Denote por $\delta(S)$ o conjunto de arestas de G com um extremo em S e outro em $V - S$. Dizemos que um tal conjunto é um **corte**.



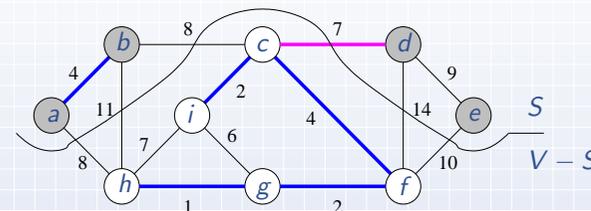
Um corte $\delta(S)$ **respeita** um conjunto A de arestas se não contém nenhuma aresta de A .

Como encontrar arestas seguras

Uma aresta de um corte $\delta(S)$ é **leve** se tem o menor peso entre as arestas do corte.

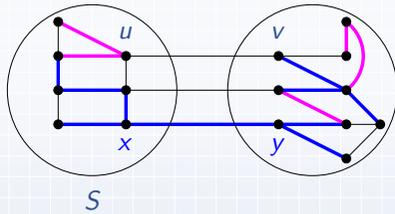
Teorema 23.1: (CLRS)

Seja (G, w) um grafo com pesos nas arestas. Seja A um subconjunto de arestas contido em uma AGM. Seja $\delta(S)$ um corte que respeita A e (u, v) uma aresta leve desse corte. Então (u, v) é uma **aresta segura**.



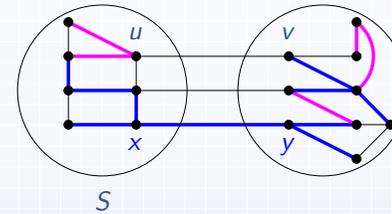
Prova do Teorema 23.1

Seja T uma AGM que contém A . Seja $\delta(S)$ um corte que respeita A e seja (u, v) uma **aresta leve** deste corte. Suponha que (u, v) **não** é uma aresta de T . Construiremos uma AGM T' que contém $A \cup \{(u, v)\}$ e daí segue que (u, v) é **segura**.



Prova do Teorema 23.1

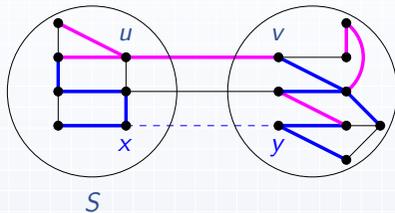
Existe um único caminho P de u a v em T . Como u a v estão em lados opostos do corte $\delta(S)$, pelo menos uma aresta de P pertence ao corte.



Seja (x, y) uma tal aresta. Note que (x, y) não pertence a A pois o corte respeita A .

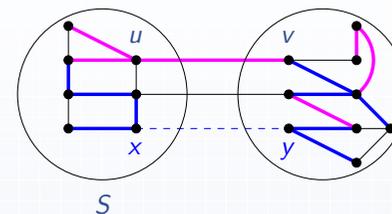
Prova do Teorema 23.1

Temos que $T' := T - \{(x, y)\} \cup \{(u, v)\}$ é uma árvore geradora.



Mostraremos que T' é uma AGM.

Prova do Teorema 23.1



Como (u, v) é uma **aresta leve** do corte $\delta(S)$ e (x, y) pertence ao corte, temos que $\omega(u, v) \leq \omega(x, y)$. Assim,

$$\omega(T') = \omega(T) - \omega(x, y) + \omega(u, v) \leq \omega(T).$$

Como T é uma AGM, então $\omega(T) \leq \omega(T')$. Logo, T' é uma AGM. Além disso, T' contém $A \cup \{(u, v)\}$ e portanto, (u, v) é uma **aresta segura**. Isto termina a prova. ■

Como encontrar arestas seguras

Corolário 23.2 (CLRS)

Seja G um grafo com pesos nas arestas dado por w . Seja A um subconjunto de arestas contido em uma AGM. Seja C um componente (árvore) de $G_A = (V, A)$. Se (u, v) é uma aresta leve de $\delta(C)$, então (u, v) é segura para A .

Os algoritmos de Prim e Kruskal são especializações do algoritmo genérico e fazem uso do Corolário 23.2.

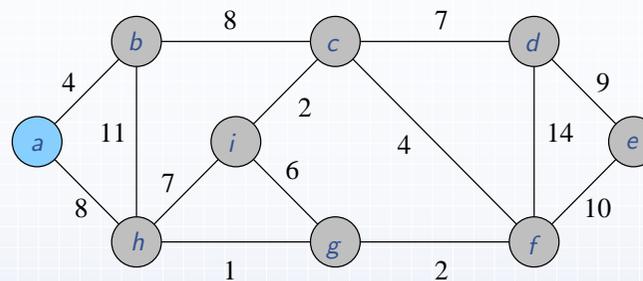
Algoritmo de Prim

O algoritmo de Prim

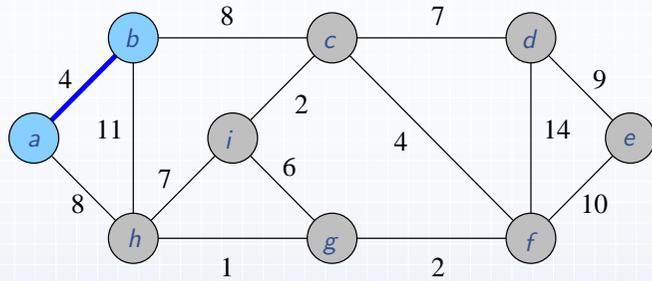
- ▶ No algoritmo de Prim, A é o conjunto de arestas de uma árvore com raiz r (escolhido arbitrariamente no início). Inicialmente, A é vazio.
- ▶ Em cada iteração, o algoritmo considera o corte $\delta(S)$ onde S é o conjunto de vértices que são extremos de A . Se $A = \emptyset$ então $S = \{r\}$.
- ▶ Ele encontra uma aresta leve (u, v) neste corte, acrescenta-a ao conjunto A e começa outra iteração. Isto é repetido até que A seja uma árvore geradora.

Um detalhe de implementação importante é como encontrar eficientemente uma aresta leve no corte.

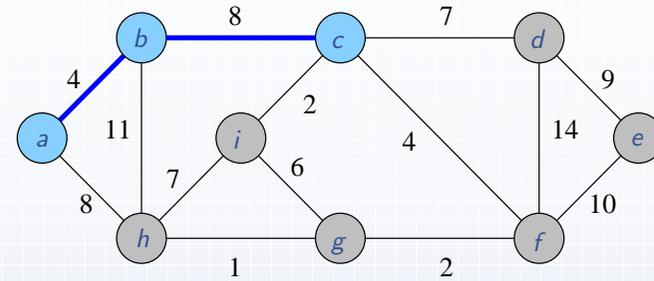
O algoritmo de Prim



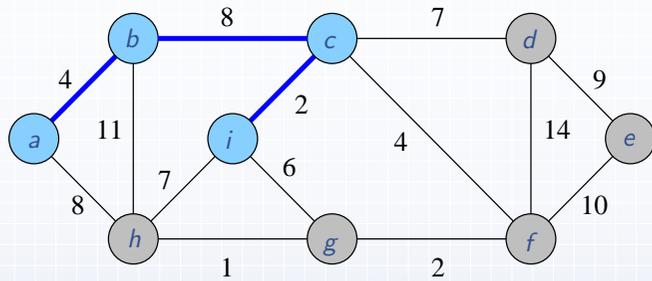
O algoritmo de Prim



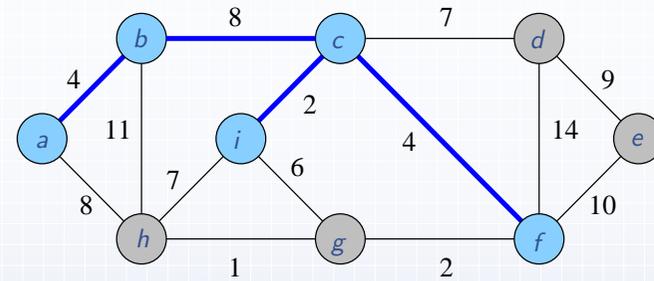
O algoritmo de Prim



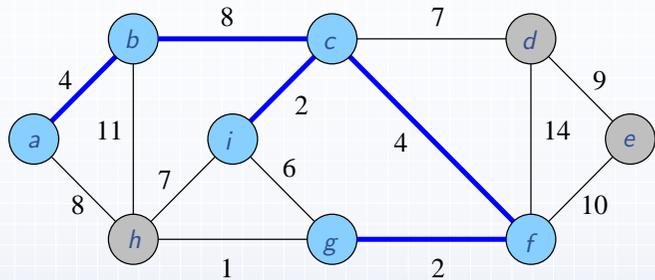
O algoritmo de Prim



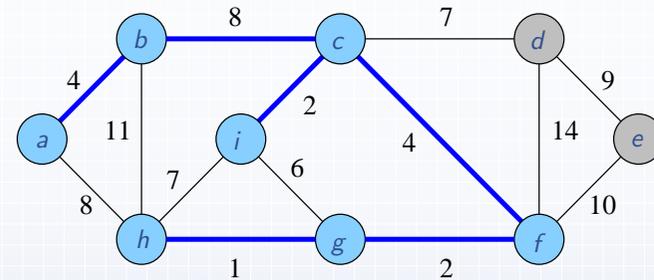
O algoritmo de Prim



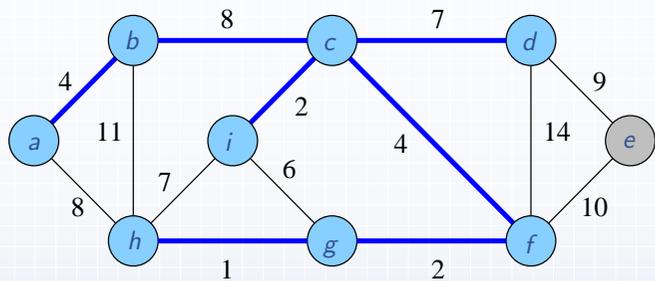
O algoritmo de Prim



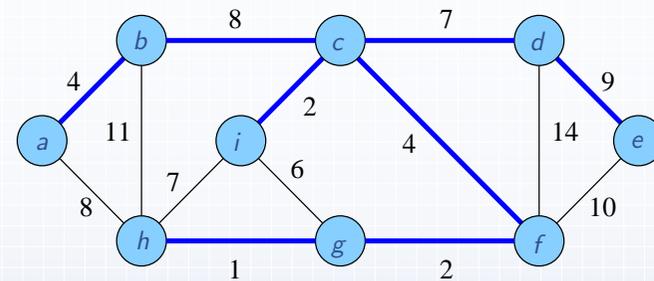
O algoritmo de Prim



O algoritmo de Prim



O algoritmo de Prim



O algoritmo de Prim

O algoritmo mantém durante sua execução as seguintes informações:

- ▶ Todos os vértices que **não** estão na árvore estão em uma fila de prioridade (de mínimo) Q .
- ▶ Cada vértice v em Q tem uma **chave** $key[v]$ que indica o menor peso de qualquer aresta ligando v a algum vértice da árvore. Se não existir nenhuma aresta, então $key[v] = \infty$.
- ▶ A variável $\pi[u]$ indica o **pai** de u na árvore. Então

$$A = \{(u, \pi[u]) : u \in V - \{r\} - Q, \pi[u] \neq \text{NIL}\}.$$

O algoritmo de Prim

AGM-PRIM(G, w, r)

```
1  para cada  $u \in V[G]$ 
2    faça  $key[u] \leftarrow \infty$ 
3     $\pi[u] \leftarrow \text{NIL}$ 
4   $key[r] \leftarrow 0$ 
5   $Q \leftarrow V[G]$ 
6  enquanto  $Q \neq \emptyset$  faça
7     $u \leftarrow \text{EXTRACT-MIN}(Q)$ 
8    para cada  $v \in \text{Adj}[u]$ 
9      se  $v \in Q$  e  $w(u, v) < key[v]$ 
10     então  $\pi[v] \leftarrow u$ 
11      $key[v] \leftarrow w(u, v)$ 
```

Corretude do algoritmo de Prim

O algoritmo mantém os seguintes invariantes.

No início de cada iteração das linhas 6–11:

- ▶ $A = \{(u, \pi[u]) : u \in V - \{r\} - Q, \pi[u] \neq \text{NIL}\}$.
- ▶ O conjunto de vértices da árvore é $V[G] - Q$.
- ▶ Para cada $v \in Q$, se $\pi[v] \neq \text{NIL}$, então $key[v]$ é o peso de uma aresta $(v, \pi[v])$ de menor peso ligando v a um vértice $\pi[v]$ na árvore.

Esses invariantes garantem que o algoritmo sempre escolhe uma **aresta segura** para acrescentar a A e portanto, o algoritmo está correto.

Complexidade do algoritmo de Prim

Obviamente, a complexidade de **AGM-PRIM** depende de como a fila de prioridade Q é implementada.

As operações que precisamos são:

- ▶ **INSERT** (linhas 1–5)
- ▶ **EXTRACT-MIN**
- ▶ **DECREASE-KEY**

Complexidade do algoritmo de Prim

- ▶ As linhas 1–5 correspondem a $|V|$ chamadas a **INSERT**.
- ▶ O laço da linha 6 é executado $O(V)$ vezes.
Total: $O(V)$ chamadas a **EXTRACT-MIN**.
- ▶ O laço das linhas 8–11 é executado $O(E)$ vezes no total. O teste de pertinência a Q pode ser feito em tempo constante com um **vetor booleano**.
Ao atualizar uma chave na linha 11 é feita uma *chamada implícita* a **DECREASE-KEY**.
Total: $O(E)$ chamadas a **DECREASE-KEY**.
- ▶ **Tempo total:**
 $O(V)$ **INSERT** + $O(V)$ **EXTRACT-MIN** +
 $O(E)$ **DECREASE-KEY**

Complexidade do algoritmo de Prim

Tempo total

$$O(V) \text{ INSERT} + O(V) \text{ EXTRACT-MIN} + O(E) \text{ DECREASE-KEY}$$

Vejamos o que acontece se implementarmos Q como um **min-heap**.

- ▶ **INSERT** consome tempo $O(\lg V)$ resultando em tempo $O(V \lg V)$ no total. Na verdade, é possível inicializar o min-heap em tempo $O(V)$;
- ▶ **EXTRACT-MIN** consome tempo $O(\lg V)$;
- ▶ **DECREASE-KEY** consome tempo $O(\lg V)$.
- ▶ O tempo total é $O(V + V \lg V + E \lg V) = O(E \lg V)$.
Temos que $V = O(E)$ pois sabemos que G é conexo.

Custo amortizado

- ▶ Descreveremos superficialmente outra estrutura de dados que pode ser usada no lugar de **min-heaps**. Para tanto, apresentamos o conceito de **custo amortizado** de uma operação.
- ▶ Suponha que S é uma estrutura de dados abstrata e $p(S)$ é uma operação que pode ser executada sobre S . Por exemplo, inserir ou remover um elemento de S (pode haver mais parâmetros).

Custo amortizado

- ▶ Suponha que durante a execução de um algoritmo foram feitas m chamadas a $p(S)$. Se o **tempo total** de todas as operações p durante a execução do algoritmo é $T(n)$ ($n = |S|$) então o **custo (tempo) amortizado** de p é $T(n)/m$.
- ▶ Por exemplo, se $T(n) = 4n$ e $m = 2n$ então o custo amortizado é 2. Note que isto **não** significa que a operação gasta tempo constante, mas apenas que em **média** o tempo gasto em cada execução de p é constante.

Complexidade do algoritmo de Prim

Pode-se fazer melhor usando uma estrutura de dados chamada *heap de Fibonacci* que guarda $|V|$ elementos e suporta as seguintes operações:

- ▶ **EXTRACT-MIN** – $O(\lg V)$,
- ▶ **DECREASE-KEY** – tempo amortizado $O(1)$.
- ▶ **INSERT** – tempo amortizado $O(1)$.
- ▶ Outras operações eficientes que um **min-heap** não suporta. Por exemplo, **UNION**. Maiores detalhes no CLRS.

Usando um *heap de Fibonacci* para implementar Q melhoramos o tempo para $O(V + E + V \lg V) = O(E + V \lg V)$.

Este é um resultado interessante do **ponto de vista teórico**. Na prática, a implementação anterior comporta-se muito melhor.

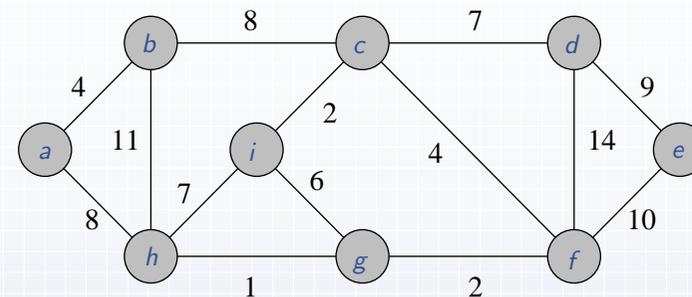
O algoritmo de Kruskal

O algoritmo de Kruskal

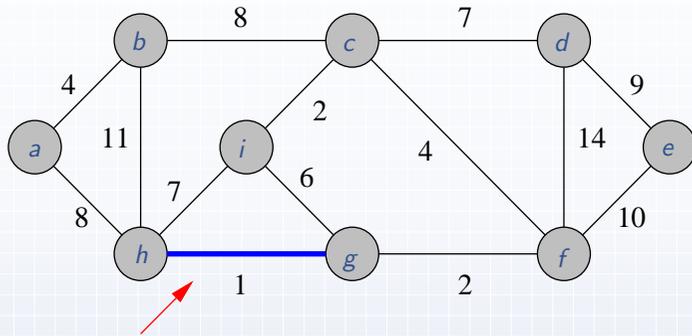
- ▶ No algoritmo de Kruskal o subgrafo $G_A = (V, A)$ é uma **floresta**. Inicialmente, $A = \emptyset$.
- ▶ Em cada iteração, o algoritmo escolhe uma aresta (u, v) de **menor peso** que liga vértices de componentes (árvores) distintos C e C' de $G_A = (V, A)$. Note que (u, v) é uma **aresta leve** do corte $\delta(C)$.
- ▶ Ele acrescenta (u, v) ao conjunto A e começa outra iteração até que A seja uma árvore geradora.

Um detalhe de implementação importante é como encontrar a **aresta de menor peso** ligando componentes distintos.

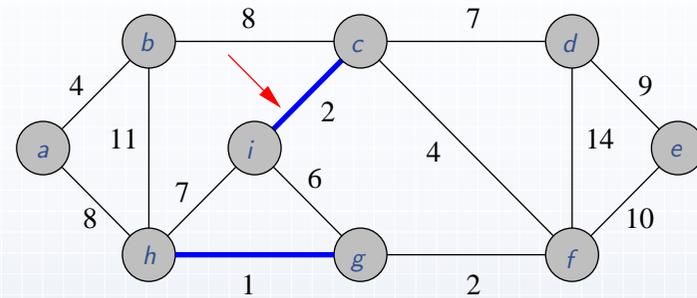
O algoritmo de Kruskal



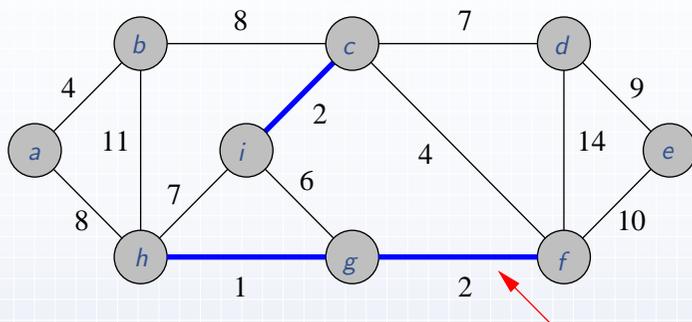
O algoritmo de Kruskal



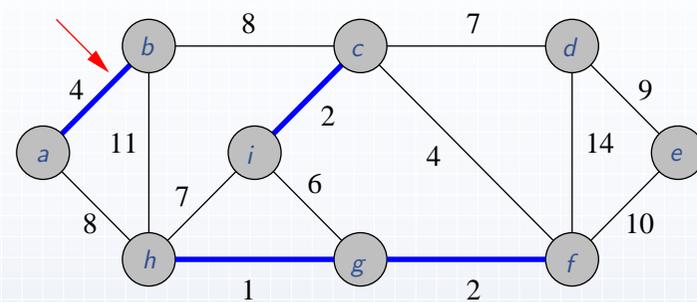
O algoritmo de Kruskal



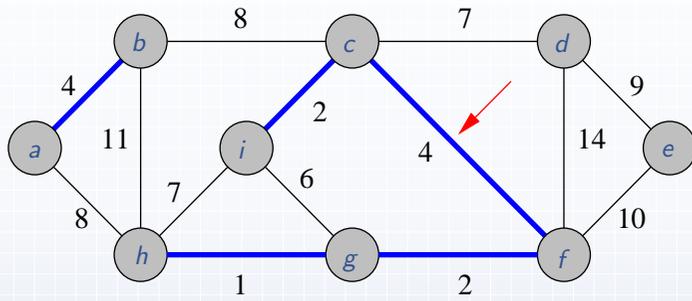
O algoritmo de Kruskal



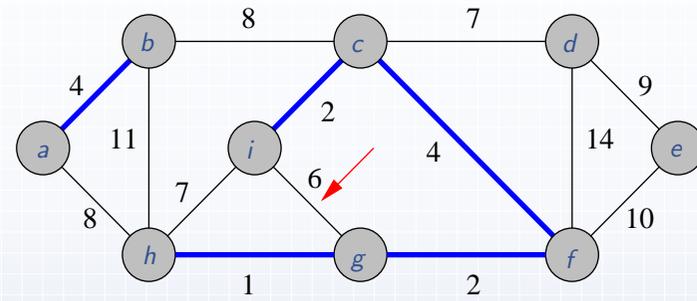
O algoritmo de Kruskal



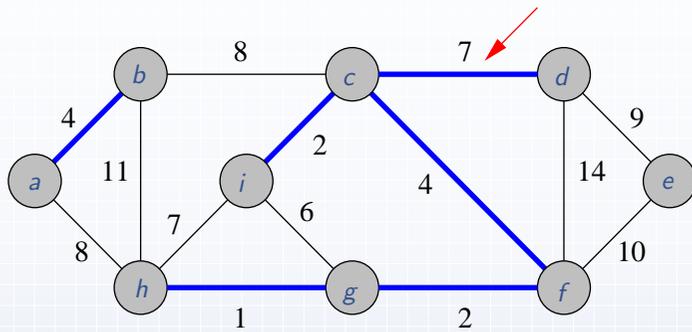
O algoritmo de Kruskal



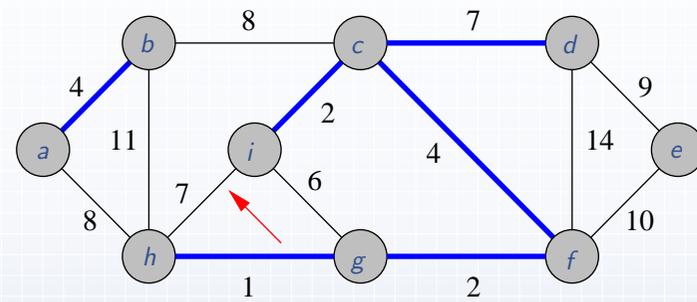
O algoritmo de Kruskal



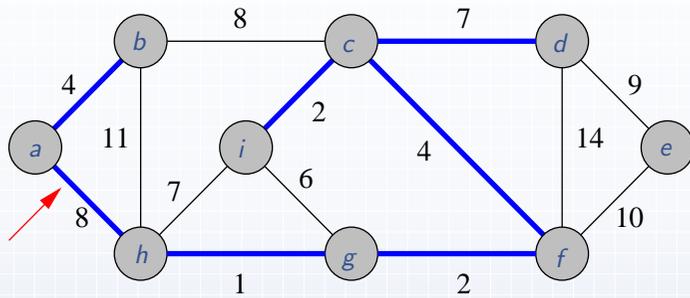
O algoritmo de Kruskal



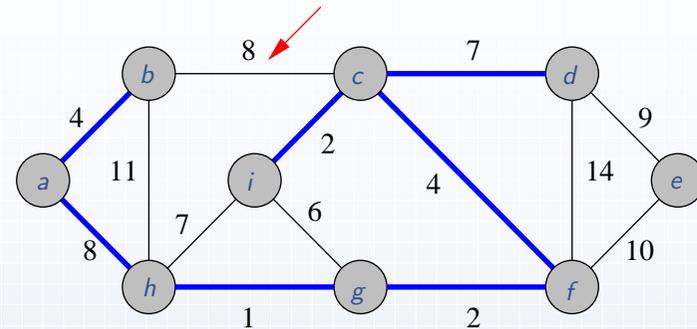
O algoritmo de Kruskal



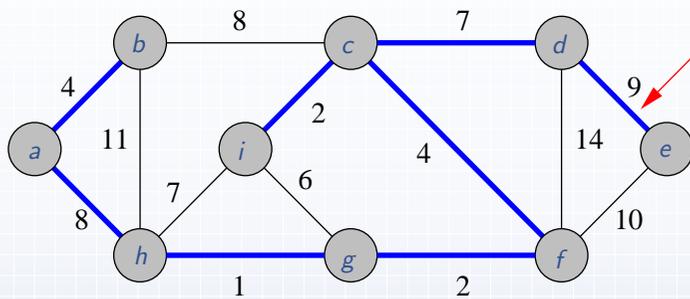
O algoritmo de Kruskal



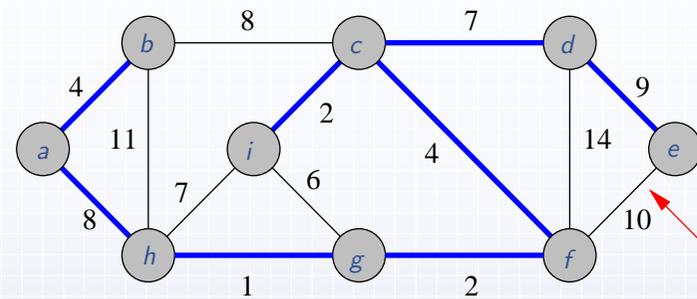
O algoritmo de Kruskal



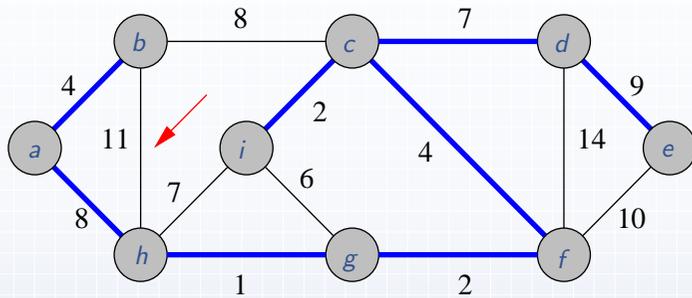
O algoritmo de Kruskal



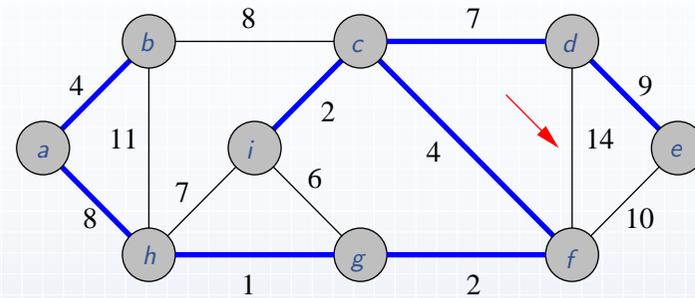
O algoritmo de Kruskal



O algoritmo de Kruskal



O algoritmo de Kruskal



O algoritmo de Kruskal

Eis uma versão preliminar do algoritmo de Kruskal.

AGM-KRUSKAL(G, w)

- 1 $A \leftarrow \emptyset$
- 2 Ordene as arestas em **ordem não decrescente** de peso
- 3 **para cada** $(u, v) \in E$ nessa ordem **faça**
- 4 **se** u e v estão em componentes distintos de (V, A)
- 5 **então** $A \leftarrow A \cup \{(u, v)\}$
- 6 **devolva** A

Problema: Como verificar eficientemente se u e v estão no mesmo componente da floresta $G_A = (V, A)$?

O algoritmo de Kruskal

Inicialmente $A = \emptyset$ e $G_A = (V, A)$ corresponde à floresta onde cada componente é um vértice isolado.

Ao longo do algoritmo, esses componentes são modificados pela inclusão de arestas em A .

Uma estrutura de dados para representar $G_A = (V, A)$ deve ser capaz de executar eficientemente as seguintes operações:

- ▶ dado um vértice u , **determinar** o componente de G_A que contém u e
- ▶ dados dois vértices u e v em componentes distintos C e C' , fazer a **união** desses em um novo componente.

ED para conjuntos disjuntos

- ▶ Uma **estrutura de dados para conjuntos disjuntos** mantém uma coleção $\{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ de **conjuntos disjuntos dinâmicos** (isto é, eles mudam ao longo do tempo).
- ▶ Cada conjunto é identificado por um **representante** que é um elemento do conjunto.
Quem é o representante é irrelevante, mas se o conjunto não for modificado, então o representante não pode mudar.

ED para conjuntos disjuntos

Uma **estrutura de dados para conjuntos disjuntos** deve ser capaz de executar as seguintes operações:

- ▶ **MAKE-SET**(x): cria um novo conjunto $\{x\}$.
- ▶ **UNION**(x, y): une os conjuntos (disjuntos) que contém x e y , digamos S_x e S_y , em um novo conjunto $S_x \cup S_y$.
Os conjuntos S_x e S_y são descartados da coleção.
- ▶ **FIND-SET**(x) devolve um **apontador** para o representante do (único) conjunto que contém x .

Componentes conexos

Vamos ilustrar uma aplicação simples da estrutura de dados para conjuntos disjuntos para resolver o seguinte problema.

Dado um grafo não direcionado G determinar seus componentes conexos.

Após determinar seus componentes conexos, gostaríamos também de ser capazes de verificar eficientemente se quaisquer dois vértices dados pertencem ao mesmo componente.

Componentes conexos

CONNECTED-COMPONENTS(G)

- 1 **para cada** $v \in V[G]$ **faça**
- 2 **MAKE-SET**(v)
- 3 **para cada** $(u, v) \in E[G]$ **faça**
- 4 **se** **FIND-SET**(u) \neq **FIND-SET**(v)
- 5 **então** **UNION**(u, v)

SAME-COMPONENT(u, v)

- 1 **se** **FIND-SET**(u) = **FIND-SET**(v)
- 2 **então devolva** VERDADEIRO
- 3 **senão devolva** FALSO

Componentes conexos

“Complexidade” de **CONNECTED-COMPONENTS**

- ▶ $|V|$ chamadas a **MAKE-SET**
- ▶ $2|E|$ chamadas a **FIND-SET**
- ▶ $\leq |V| - 1$ chamadas a **UNION**

Usando a ED para conjuntos disjuntos também é fácil listar os vértices de cada componente (**Exercício**).

O algoritmo de Kruskal

Eis a versão completa do algoritmo de Kruskal.

```
AGM-KRUSKAL( $G, \omega$ )
1   $A \leftarrow \emptyset$ 
2  para cada  $v \in V[G]$  faça
3    MAKE-SET( $v$ )
4  Ordene as arestas em ordem não decrescente de peso
5  para cada  $(u, v) \in E$  nessa ordem faça
6    se FIND-SET( $u$ )  $\neq$  FIND-SET( $v$ )
7      então  $A \leftarrow A \cup \{(u, v)\}$ 
8          UNION( $u, v$ )
9  devolva  $A$ 
```

O algoritmo de Kruskal

“Complexidade” de **AGM-KRUSKAL**

- ▶ Ordenação: $O(E \lg E)$
- ▶ $|V|$ chamadas a **MAKE-SET**
- ▶ $2|E|$ chamadas a **FIND-SET**
- ▶ $|V| - 1$ chamadas a **UNION**

A complexidade depende de como essas operações são implementadas.

ED para conjuntos disjuntos

Sequência de operações **MAKE-SET**, **UNION** e **FIND-SET**

M M M U F U U F U F F F U F

n

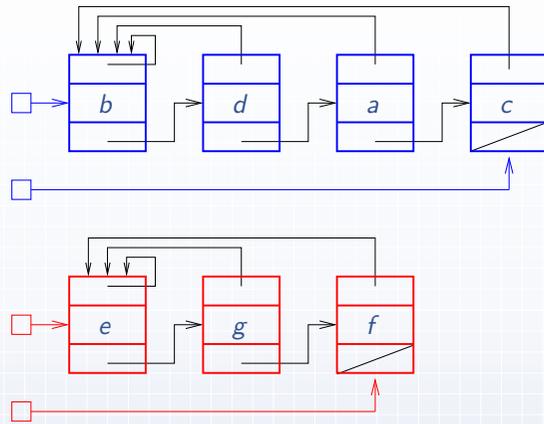
m

Vamos medir a complexidade das operações em termos de n e m .

Que estrutura de dados usar?

Ou seja, como representar os conjuntos?

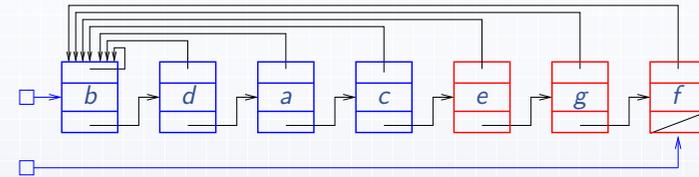
Representação por listas ligadas



- ▶ Cada conjunto tem um representante (início da lista)
- ▶ Cada nó tem um campo que aponta para o representante
- ▶ Guarda-se um apontador para o fim da lista

Representação por listas ligadas

- ▶ $\text{MAKE-SET}(x) - O(1)$
- ▶ $\text{FIND-SET}(x) - O(1)$
- ▶ $\text{UNION}(x, y)$ – concatena a lista de y no final da lista de x



$O(n)$ no pior caso

É preciso atualizar os apontadores para o representante.

Um exemplo de pior caso

Operação	Número de atualizações
$\text{MAKE-SET}(x_1)$	1
$\text{MAKE-SET}(x_2)$	1
\vdots	\vdots
$\text{MAKE-SET}(x_n)$	1
$\text{UNION}(x_2, x_1)$	1
$\text{UNION}(x_3, x_2)$	2
$\text{UNION}(x_4, x_3)$	3
\vdots	\vdots
$\text{UNION}(x_n, x_{n-1})$	$n-1$

Número total de operações: $2n - 1$

Custo total: $n + \sum_{i=1}^{n-1} i = \Theta(n^2)$

Custo amortizado de cada operação: $\frac{\Theta(n^2)}{2n-1} = \Theta(n)$

Uma heurística muito simples

No exemplo anterior, cada chamada de UNION requer em média tempo $\Theta(n)$ pois concatenamos a maior lista no final da menor.

Uma idéia simples para evitar esta situação é sempre **concatenar a menor lista no final da maior** (*weighted-union heuristic*).

Para implementar isto basta guardar o tamanho de cada lista.

Uma única execução de UNION pode gastar tempo $\Theta(n)$, mas na média o tempo é bem menor (próximo slide).

Uma heurística muito simples

Teorema. Usando a representação por listas ligadas e *weighted-union heuristic*, uma sequência de m operações **MAKE-SET**, **UNION** e **FIND-SET** gasta tempo $O(m + n \lg n)$.

Prova.

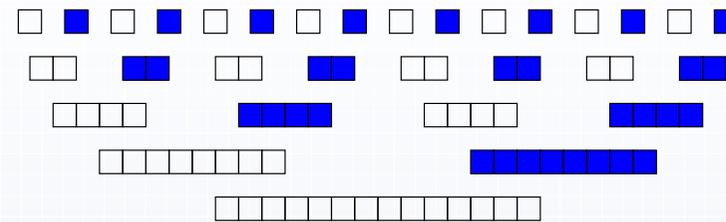
O tempo total em chamadas a **MAKE-SET** e **FIND-SET** é $O(m)$.

Sempre que o apontador para o representante de um elemento x é atualizado, o tamanho da lista que contém x (pelo menos) dobra.

Após ser atualizado $\lceil \lg k \rceil$ vezes, a lista tem tamanho pelo menos k . Como k tem que ser menor que n , cada apontador é atualizado no máximo $O(\lg n)$ vezes.

Assim, o tempo total em chamadas a **UNION** é $O(n \lg n)$. ■

Um exemplo de pior caso



Em cada nível, a lista em azul é concatenada com a lista a sua esquerda e assim $n/2$ apontadores são atualizados.

Há $\Theta(\lg n)$ níveis.

O custo total de **UNION** é $\Theta(n \lg n)$ (como no **MERGESORT!**).

Complexidade do algoritmo de Kruskal

Complexidade de **AGM-KRUSKAL** usando a representação por listas ligadas de **Union-Find**:

- ▶ Ordenação: $O(E \lg E)$
- ▶ $|V|$ chamadas a **MAKE-SET**
- ▶ $2|E|$ chamadas a **FIND-SET**
- ▶ $|V| - 1$ chamadas a **UNION**

Custo total: ordenação + $O(m + n \lg n)$

Custo total:

$$O(E \lg E) + O(2V + 2E - 1 + V \lg V) = O(E \lg E) = O(E \lg V)$$

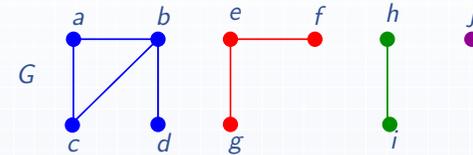
Conjuntos disjuntos com florestas disjuntas

Representação por *disjoint-set forests*

- ▶ Veremos agora a representação por *disjoint-set forests*.
- ▶ Implementações ingênuas não são melhores assintoticamente do que a representação por listas ligadas.
- ▶ Usando duas heurísticas — *union by rank* e *path compression* — obtemos a representação por *disjoint-set forests* mais eficiente que se conhece até hoje.

Observação: isto não diminui a complexidade de AGM-KRUSKAL pois esta é dominada pelo passo de ordenação.

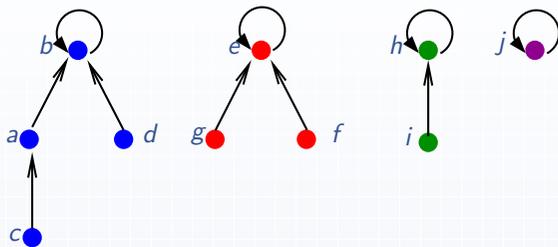
Representação por *disjoint-set forests*



Grafo com vários componentes.

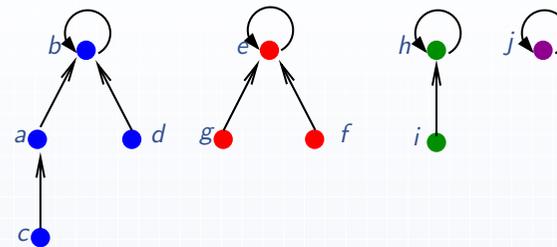
Como é a representação dos componentes na estrutura de dados *disjoint-set forests*?

Representação por *disjoint-set forests*



- ▶ Cada conjunto corresponde a uma árvore enraizada.
- ▶ Cada elemento aponta para seu pai.
- ▶ A raiz é o representante do conjunto e aponta para si mesma.

Representação por *disjoint-set forests*



MAKE-SET(x)

1 pai[x] $\leftarrow x$

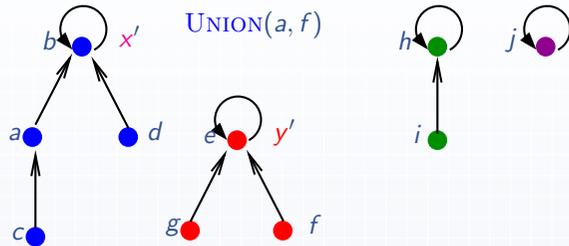
FIND-SET(x)

1 se $x = \text{pai}[x]$

2 então devolva x

3 senão devolva FIND-SET(pai[x])

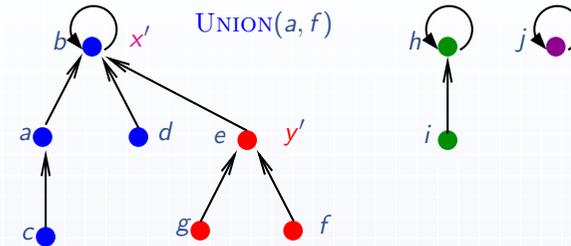
Representação por *disjoint-set forests*



$\text{UNION}(x, y)$

- 1 $x' \leftarrow \text{FIND-SET}(x)$
- 2 $y' \leftarrow \text{FIND-SET}(y)$
- 3 $\text{pai}[y'] \leftarrow x'$

Representação por *disjoint-set forests*



$\text{UNION}(x, y)$

- 1 $x' \leftarrow \text{FIND-SET}(x)$
- 2 $y' \leftarrow \text{FIND-SET}(y)$
- 3 $\text{pai}[y'] \leftarrow x'$

Representação por *disjoint-set forests*

Com a implementação descrita até agora, **não há melhoria assintótica** em relação à representação por listas ligadas.

- ▶ $\text{MAKE-SET}(x) - O(1)$
- ▶ $\text{FIND-SET}(x) - O(n)$
- ▶ $\text{UNION}(x, y) - O(n)$

É fácil descrever uma sequência de $n - 1$ chamadas a **UNION** que resultam em uma cadeia linear com n nós. Isto torna **FIND-SET custoso** podendo levar a um **custo total** de $\Theta(n^2)$.

Pode-se melhorar (muito) isso usando duas heurísticas:

- ▶ **union by rank**
- ▶ **path compression**

Union by rank

- ▶ A idéia é emprestada do **weighted-union heuristic**.
- ▶ Cada nó x possui um "posto" $\text{rank}[x]$ que é um limitante superior para a altura de x .
- ▶ Em **union by rank** a raiz com menor **rank** aponta para a raiz com maior **rank**.

Union by rank

MAKE-SET(x)

- 1 $\text{pai}[x] \leftarrow x$
- 2 $\text{rank}[x] \leftarrow 0$

UNION(x, y)

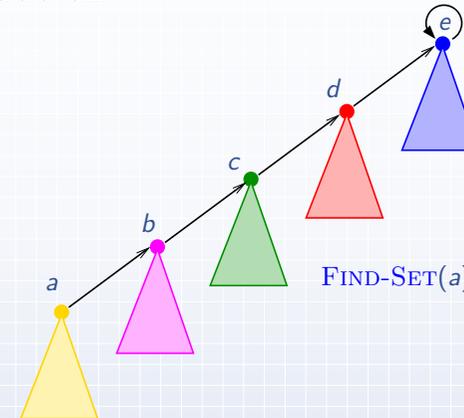
- 1 **LINK**(**FIND-SET**(x), **FIND-SET**(y))

LINK(x, y) $\triangleright x$ e y são raízes

- 1 **se** $\text{rank}[x] > \text{rank}[y]$
- 2 **então** $\text{pai}[y] \leftarrow x$
- 3 **senão** $\text{pai}[x] \leftarrow y$
- 4 **se** $\text{rank}[x] = \text{rank}[y]$
- 5 **então** $\text{rank}[y] \leftarrow \text{rank}[y] + 1$

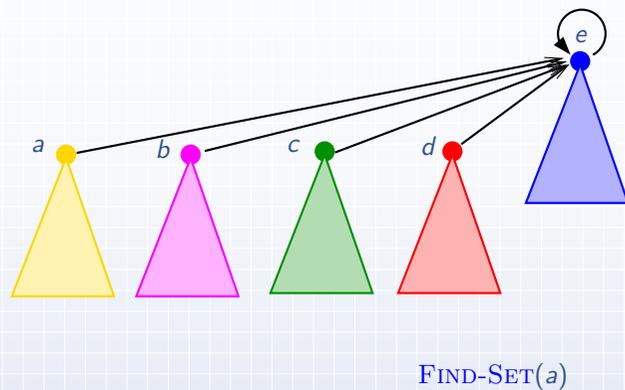
Path compression

A idéia é muito simples: ao tentar determinar o representante (**raiz** da árvore) de um nó fazemos com que todos os nós no caminho apontem para a raiz.

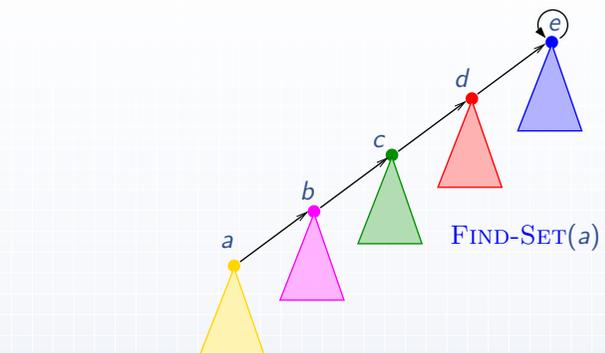


Path compression

A idéia é muito simples: ao tentar determinar o representante (**raiz** da árvore) de um nó fazemos com que todos os nós no caminho apontem para a raiz.



Path compression



FIND-SET(x)

- 1 **se** $x \neq \text{pai}[x]$
- 2 **então** $\text{pai}[x] \leftarrow \text{FIND-SET}(\text{pai}[x])$
- 3 **devolva** $\text{pai}[x]$

Análise de union by rank e path compression separados

- ▶ Usando a **ED disjoint-set forest** somente com a heurística **union by rank** pode-se mostrar que o **custo total** é $O(m \lg n)$.
- ▶ Usando a **ED disjoint-set forest** somente com a heurística **path compression** e supondo que são feitas f chamadas a **FIND-SET**, pode-se mostrar que o **custo total** é $O(n + f \cdot (1 + \log_{2+f/n} n))$.
- ▶ Quando combinamos as **duas heurísticas juntas** o **custo total** é $O(m\alpha(n))$ onde $\alpha(n)$ é uma função que **crece muito lentamente**. Esta é a **melhor implementação** conhecida.

Análise de union by rank com path compression

Vamos descrever (sem provar) a complexidade de uma sequência de operações **MAKE-SET**, **UNION** e **FIND-SET** quando **union by rank** e **path compression** são usados juntas.

Para $k \geq 0$ e $j \geq 1$ considere a função

$$A_k(j) = \begin{cases} j + 1 & \text{se } k = 0, \\ A_{k-1}^{(j+1)}(j) & \text{se } k \geq 1, \end{cases}$$

onde $A_{k-1}^{(j+1)}(j)$ significa que $A_{k-1}(j)$ foi iterada $j + 1$ vezes.

Análise de union by rank com path compression

Ok. Você não entendeu o que esta função faz. . .

Tudo que você precisa saber é que ela cresce **muito** rápido.

$$\begin{aligned} A_0(1) &= 2 \\ A_1(1) &= 3 \\ A_2(1) &= 7 \\ A_3(1) &= 2047 \\ A_4(1) &= 16^{512} \end{aligned}$$

Em particular, $A_4(1) = 16^{512} \gg 10^{80}$ que é número estimado de átomos do universo. . .

Análise de union by rank com path compression

Considere agora inversa da função $A_k(n)$ definida como

$$\alpha(n) = \min\{k : A_k(1) \geq n\}.$$

Usando a tabela anterior temos

$$\alpha(n) = \begin{cases} 0 & \text{para } 0 \leq n \leq 2, \\ 1 & \text{para } n = 3, \\ 2 & \text{para } 4 \leq n \leq 7, \\ 3 & \text{para } 8 \leq n \leq 2047, \\ 4 & \text{para } 2048 \leq n \leq A_4(1). \end{cases}$$

Ou seja, do **ponto de vista prático**, para qualquer valor razoável de n , temos $\alpha(n) \leq 4$, ou seja, $\alpha(n)$ é uma **constante**.

Análise de union by rank com path compression

Teorema. (Tarjan) Uma sequência de m operações **MAKE-SET**, **UNION** e **FIND-SET** pode ser executada em uma **ED disjoint-set forest** com union by rank e path compression em tempo $O(m\alpha(n))$ no pior caso.

Dizemos que a função $m\alpha(n)$ é **superlinear**.

Dada a afirmação anterior de que $\alpha(n)$ é **constante** para qualquer valor razoável de n , isto significa que na prática o **tempo total** é **linear** e que o **custo amortizado por operação** é uma **constante**.

Análise de union by rank com path compression

Uma discussão mais detalhada da **ED disjoint-set forests** pode ser vista no Capítulo 21 do CLRS.

Voltaremos agora à implementação do algoritmo de Kruskal. Podemos supor que o grafo é conexo e assim $V = O(E)$.

O algoritmo de Kruskal (de novo)

AGM-KRUSKAL(G, w)

```
1  $A \leftarrow \emptyset$ 
2 para cada  $v \in V[G]$  faça
3   MAKE-SET( $v$ )
4 Ordene as arestas em ordem não decrescente de peso
5 para cada  $(u, v) \in E$  nessa ordem faça
6   se FIND-SET( $u$ )  $\neq$  FIND-SET( $v$ )
7     então  $A \leftarrow A \cup \{(u, v)\}$ 
8     UNION( $u, v$ )
9 devolva  $A$ 
```

Complexidade:

- ▶ Ordenação: $O(E \lg E)$
- ▶ $|V|$ chamadas a **MAKE-SET**
- ▶ $2|E| + |V| - 1 = O(E)$ chamadas a **UNION** e **FIND-SET**

O algoritmo de Kruskal (de novo)

- ▶ Ordenação: $O(E \lg E)$
- ▶ $|V|$ chamadas a **MAKE-SET**
- ▶ $O(E)$ chamadas a **UNION** e **FIND-SET**

Usando a **ED disjoint-set forest** com union by rank e path compression, o tempo gasto com as operações é $O((V + E)\alpha(V)) = O(E\alpha(V))$.

Como $\alpha(V) = O(\lg V) = O(\lg E)$ o passo que consome mais tempo no algoritmo de Kruskal é a ordenação.

Logo, a complexidade do algoritmo é $O(E \lg E) = O(E \lg V)$.