

MC-202 — Unidade 16

Árvores Binárias de Busca

Rafael C. S. Schouery
rafael@ic.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas

1º semestre/2018

Relembrando

Vimos EDs que permitem inserir, remover e buscar

Relembrando

Vimos EDs que permitem inserir, remover e buscar

Estrutura de Dados	Inserção	Remoção	Busca
Vetor	$O(1)$	$O(1)$	$O(n)$
Lista duplamente ligada	$O(1)$	$O(1)$	$O(n)$
Vetor ordenado	$O(n)$	$O(n)$	$O(\lg n)$

Relembrando

Vimos EDs que permitem inserir, remover e buscar

Estrutura de Dados	Inserção	Remoção	Busca
Vetor	$O(1)$	$O(1)$	$O(n)$
Lista duplamente ligada	$O(1)$	$O(1)$	$O(n)$
Vetor ordenado	$O(n)$	$O(n)$	$O(\lg n)$

Veremos **árvores binárias de busca**

Relembrando

Vimos EDs que permitem inserir, remover e buscar

Estrutura de Dados	Inserção	Remoção	Busca
Vetor	$O(1)$	$O(1)$	$O(n)$
Lista duplamente ligada	$O(1)$	$O(1)$	$O(n)$
Vetor ordenado	$O(n)$	$O(n)$	$O(\lg n)$

Veremos **árvores binárias de busca**

- primeiro uma versão simples, depois uma sofisticada

Relembrando

Vimos EDs que permitem inserir, remover e buscar

Estrutura de Dados	Inserção	Remoção	Busca
Vetor	$O(1)$	$O(1)$	$O(n)$
Lista duplamente ligada	$O(1)$	$O(1)$	$O(n)$
Vetor ordenado	$O(n)$	$O(n)$	$O(\lg n)$

Veremos **árvores binárias de busca**

- primeiro uma versão simples, depois uma sofisticada
- versão sofisticada: três operações levam $O(\lg n)$

Árvore Binária de Busca

Uma **Árvore Binária de Busca** (ABB) é uma árvore binária em que cada nó contém um elemento de um conjunto ordenável

Árvore Binária de Busca

Uma **Árvore Binária de Busca** (ABB) é uma árvore binária em que cada nó contém um elemento de um conjunto ordenável

Cada nó r , com subárvores esquerda T_e e direita T_d satisfaz a seguinte propriedade:

Árvore Binária de Busca

Uma **Árvore Binária de Busca** (ABB) é uma árvore binária em que cada nó contém um elemento de um conjunto ordenável

Cada nó r , com subárvores esquerda T_e e direita T_d satisfaz a seguinte propriedade:

1. $e \leq r$ para todo elemento $e \in T_e$

Árvore Binária de Busca

Uma **Árvore Binária de Busca** (ABB) é uma árvore binária em que cada nó contém um elemento de um conjunto ordenável

Cada nó r , com subárvores esquerda T_e e direita T_d satisfaz a seguinte propriedade:

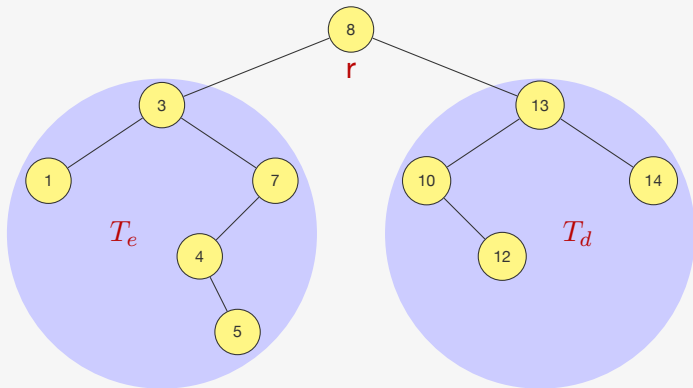
1. $e \leq r$ para todo elemento $e \in T_e$
2. $r \leq d$ para todo elemento $d \in T_d$

Árvore Binária de Busca

Uma **Árvore Binária de Busca** (ABB) é uma árvore binária em que cada nó contém um elemento de um conjunto ordenável

Cada nó r , com subárvores esquerda T_e e direita T_d satisfaz a seguinte propriedade:

1. $e \leq r$ para todo elemento $e \in T_e$
2. $r \leq d$ para todo elemento $d \in T_d$



TAD - Árvores de Busca Binária

```
1 typedef struct No {
2     int chave;
3     struct No *esq, *dir, *pai; /*pai é opcional, usado em
4     sucessor e antecessor*/
5 } No;
6
7 typedef No * p_no;
8
9 p_no criar_arvore();
10
11 void destruir_arvore(p_no raiz);
12
13 p_no inserir(p_no raiz, int chave);
14
15 p_no remover(p_no raiz, int chave);
16
17 p_no buscar(p_no raiz, int chave);
18
19 p_no minimo(p_no raiz);
20
21 p_no maximo(p_no raiz);
22
23 p_no sucessor(p_no x);
24
25 p_no antecessor(p_no x);
```

Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore

Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz

Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda

Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz

Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

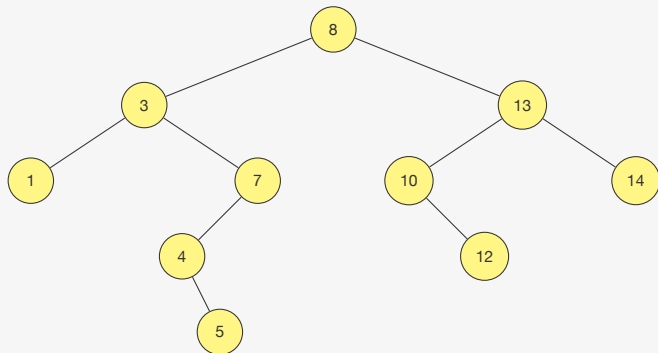
Ex: Buscando por 4

Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por 4

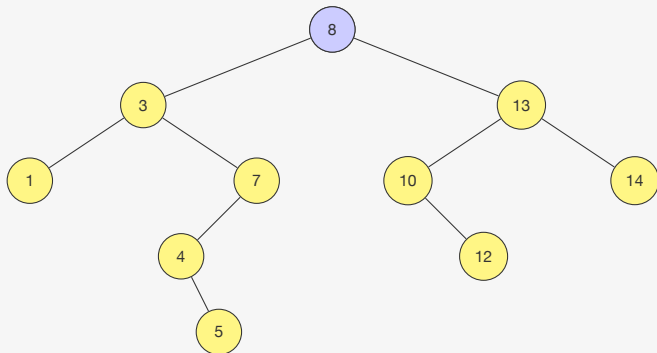


Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por 4

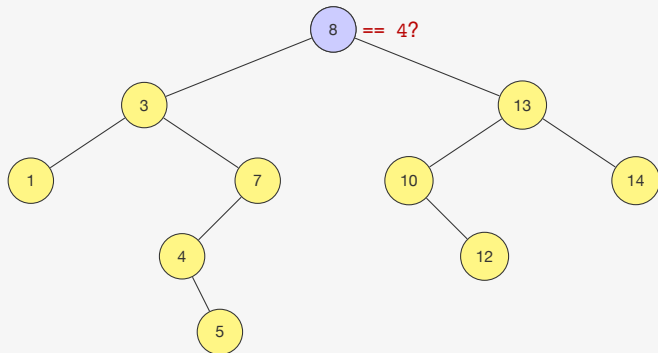


Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por 4

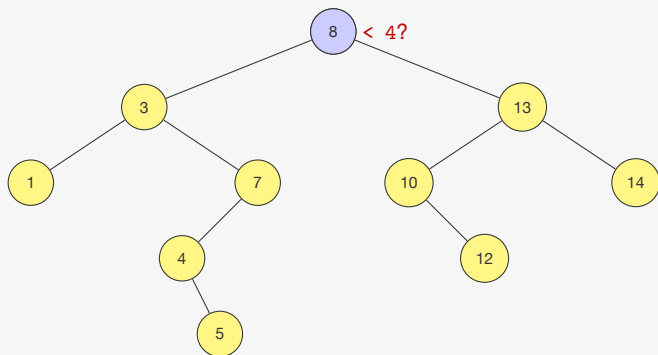


Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por 4

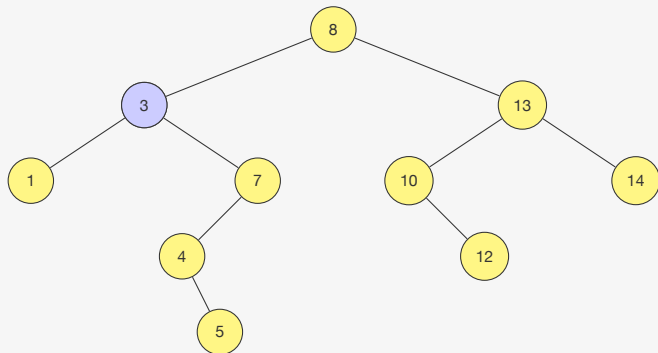


Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por 4

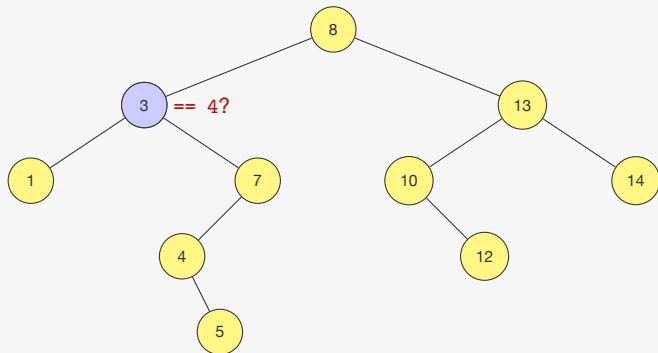


Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por 4

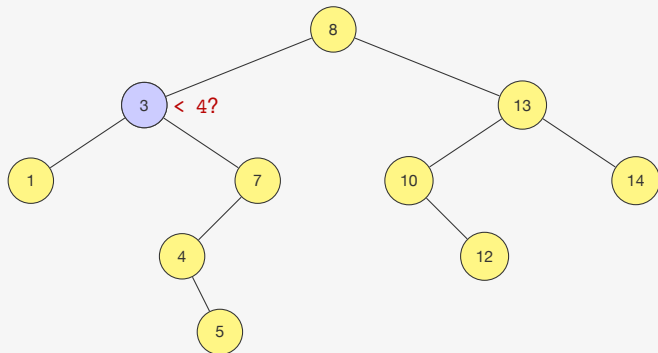


Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por 4

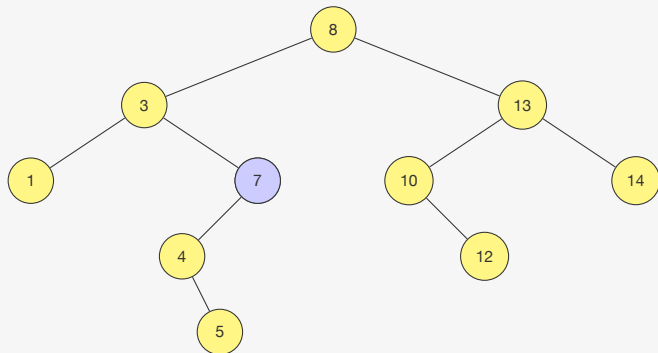


Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por 4

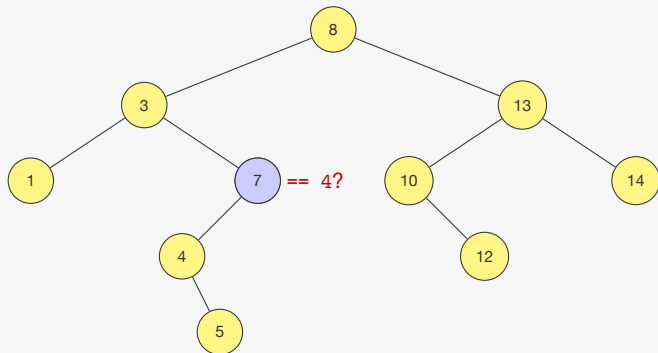


Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por 4

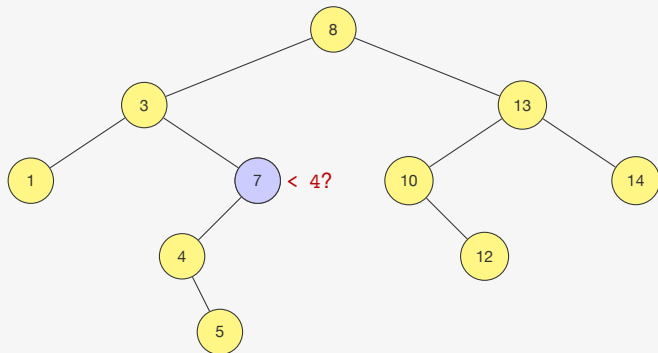


Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por 4

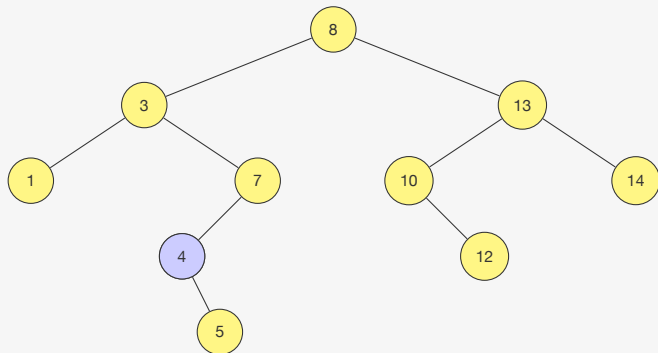


Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por 4

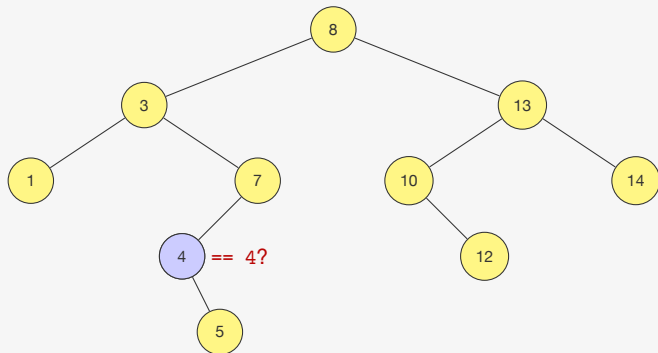


Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por 4

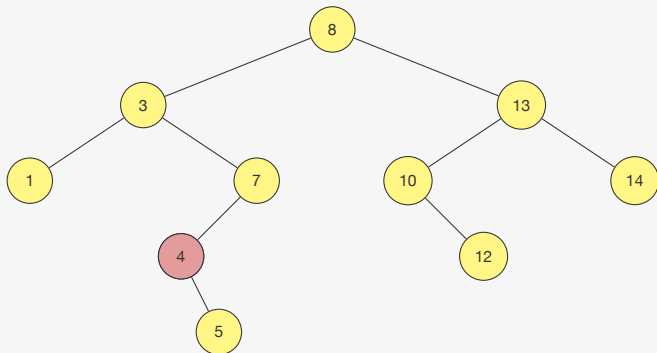


Busca por um valor

A ideia é semelhante àquela da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por 4

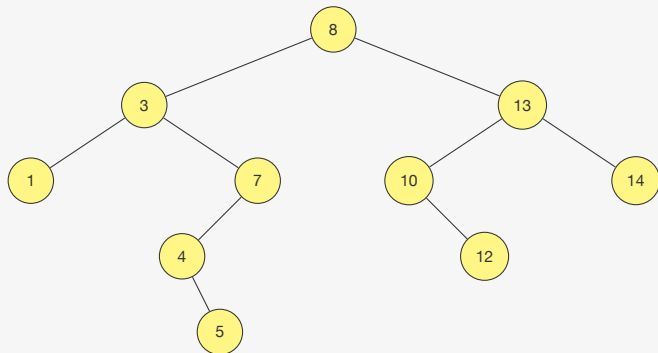


Busca por um valor

A ideia é semelhante a da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por **11**

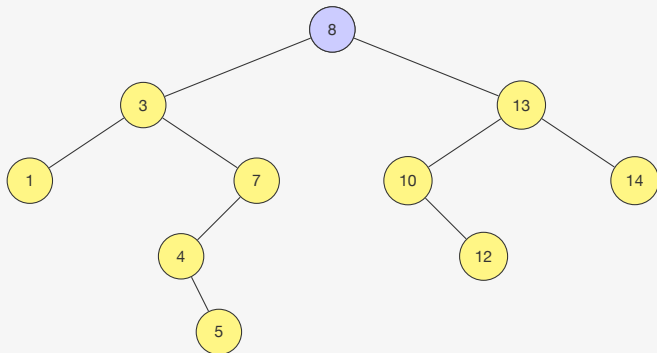


Busca por um valor

A ideia é semelhante a da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por **11**

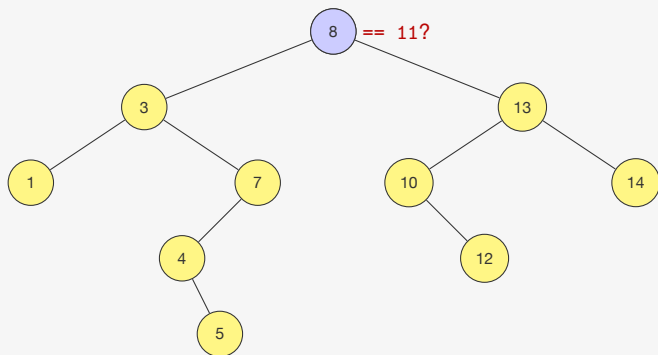


Busca por um valor

A ideia é semelhante a da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por **11**

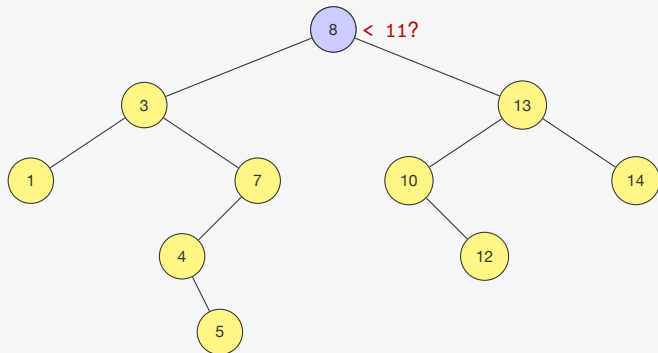


Busca por um valor

A ideia é semelhante a da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por **11**

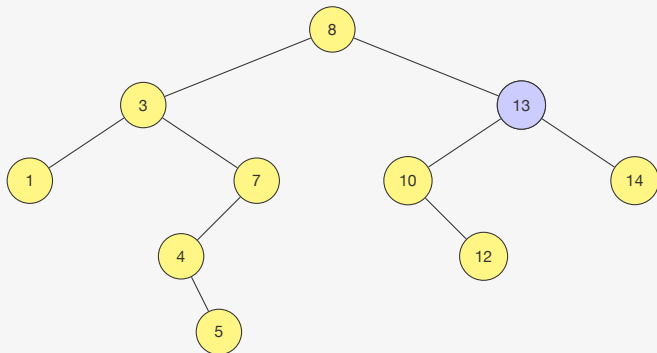


Busca por um valor

A ideia é semelhante a da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por **11**

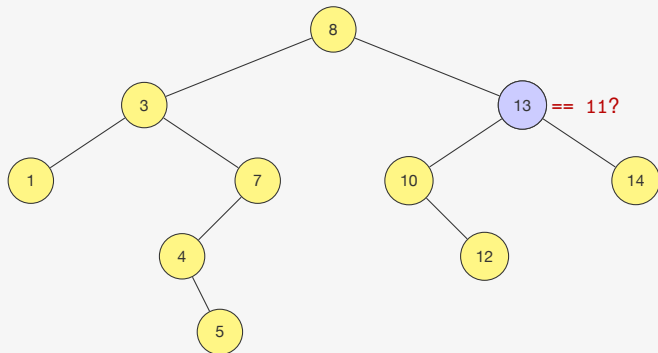


Busca por um valor

A ideia é semelhante a da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por **11**

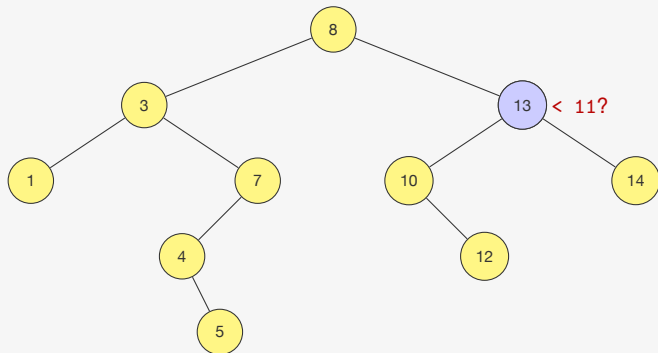


Busca por um valor

A ideia é semelhante a da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por **11**

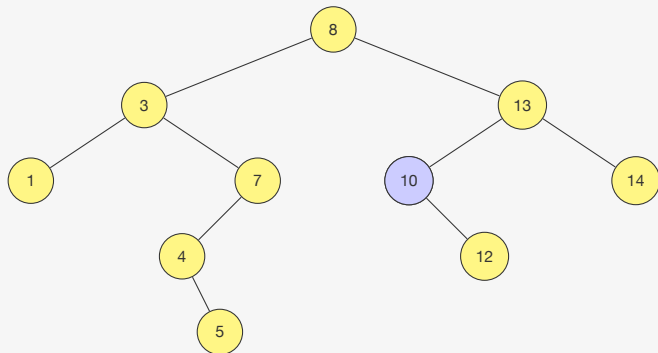


Busca por um valor

A ideia é semelhante a da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por **11**

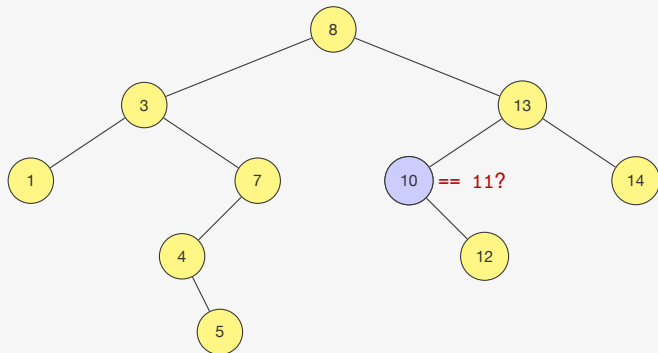


Busca por um valor

A ideia é semelhante a da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por **11**

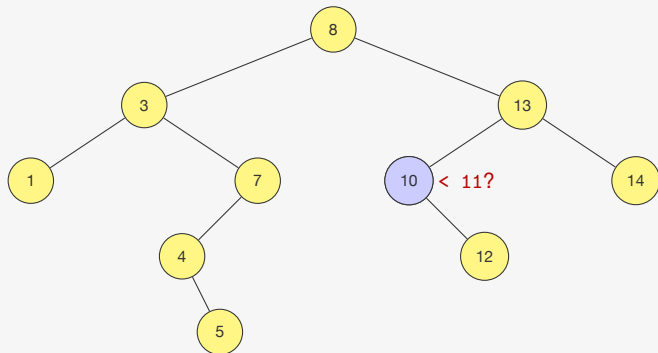


Busca por um valor

A ideia é semelhante a da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por **11**

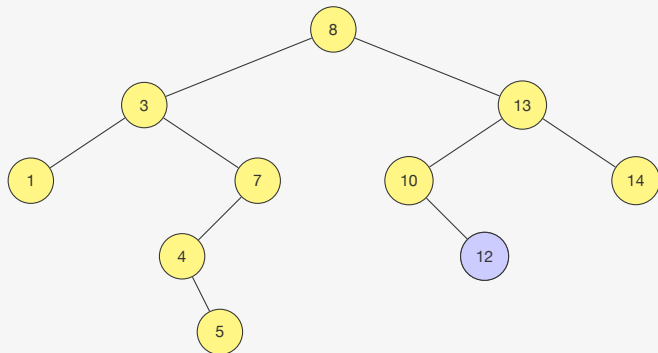


Busca por um valor

A ideia é semelhante a da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por **11**

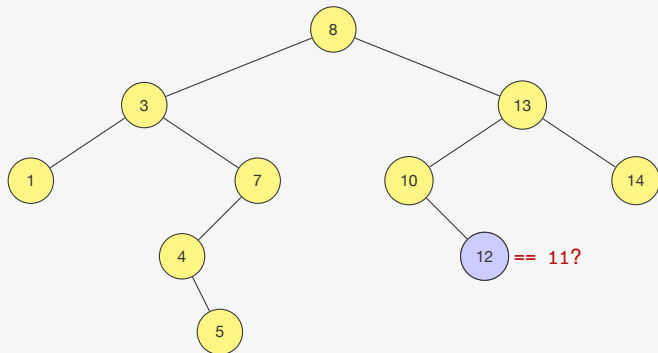


Busca por um valor

A ideia é semelhante a da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por **11**

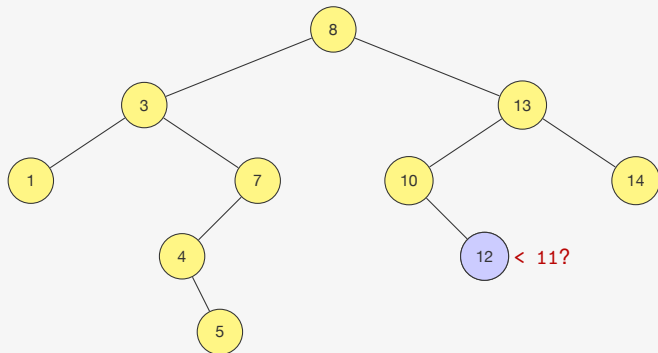


Busca por um valor

A ideia é semelhante a da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por **11**

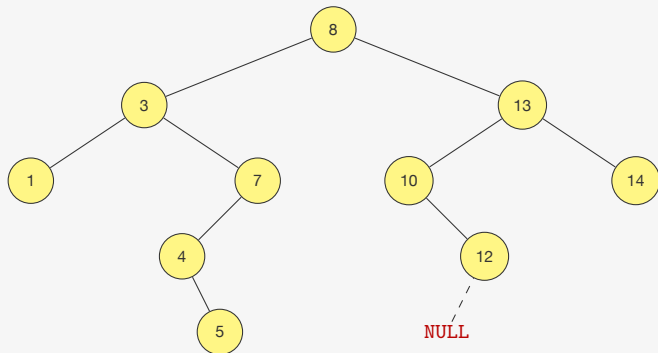


Busca por um valor

A ideia é semelhante a da busca binária:

- Ou o valor a ser buscado está na raiz da árvore
- Ou é menor do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore esquerda
- Ou é maior do que o valor da raiz
 - Se estiver na árvore, está na subárvore direita

Ex: Buscando por **11**



Busca

Versão recursiva:

```
1 p_no buscar(p_no raiz, int chave) {
```

Busca

Versão recursiva:

```
1 p_no buscar(p_no raiz, int chave) {  
2     if (raiz == NULL || chave == raiz->chave)  
3         return raiz;
```


Busca

Versão recursiva:

```
1 p_no buscar(p_no raiz, int chave) {
2   if (raiz == NULL || chave == raiz->chave)
3     return raiz;
4   if (chave < raiz->chave)
5     return buscar(raiz->esq, chave);
```

Busca

Versão recursiva:

```
1 p_no buscar(p_no raiz, int chave) {
2   if (raiz == NULL || chave == raiz->chave)
3     return raiz;
4   if (chave < raiz->chave)
5     return buscar(raiz->esq, chave);
6   else
7     return buscar(raiz->dir, chave);
8 }
```

Busca

Versão recursiva:

```
1 p_no buscar(p_no raiz, int chave) {
2   if (raiz == NULL || chave == raiz->chave)
3     return raiz;
4   if (chave < raiz->chave)
5     return buscar(raiz->esq, chave);
6   else
7     return buscar(raiz->dir, chave);
8 }
```

Versão iterativa:

```
1 p_no buscar_iterativo(p_no raiz, int chave) {
2   while (raiz != NULL && chave != raiz->chave)
3     if (chave < raiz->chave)
4       raiz = raiz->esq;
5     else
6       raiz = raiz->dir;
7   return raiz;
8 }
```

Eficiência da busca

Qual é o tempo da busca?

Eficiência da busca

Qual é o tempo da busca?

- depende da forma da árvore...

Eficiência da busca

Qual é o tempo da busca?

- depende da forma da árvore...

Ex: 31 nós

Eficiência da busca

Qual é o tempo da busca?

- depende da forma da árvore...

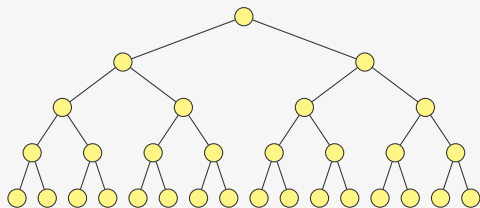
Ex: 31 nós

Eficiência da busca

Qual é o tempo da busca?

- depende da forma da árvore...

Ex: 31 nós



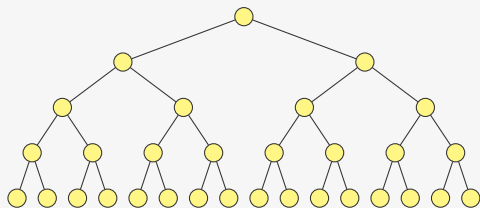
Melhor árvore: $O(\lg n)$

Eficiência da busca

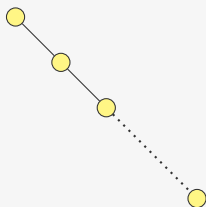
Qual é o tempo da busca?

- depende da forma da árvore...

Ex: 31 nós



Melhor árvore: $O(\lg n)$



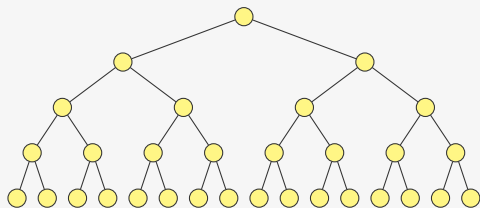
Pior árvore: $O(n)$

Eficiência da busca

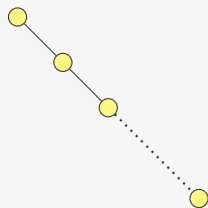
Qual é o tempo da busca?

- depende da forma da árvore...

Ex: 31 nós



Melhor árvore: $O(\lg n)$



Pior árvore: $O(n)$

Caso médio: em uma árvore com n elementos adicionados em ordem aleatória a busca demora (em média) $O(\lg n)$

Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

- fazemos uma busca pelo valor

Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

- fazemos uma busca pelo valor
- e colocamos ele na posição onde deveria estar

Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

- fazemos uma busca pelo valor
- e colocamos ele na posição onde deveria estar

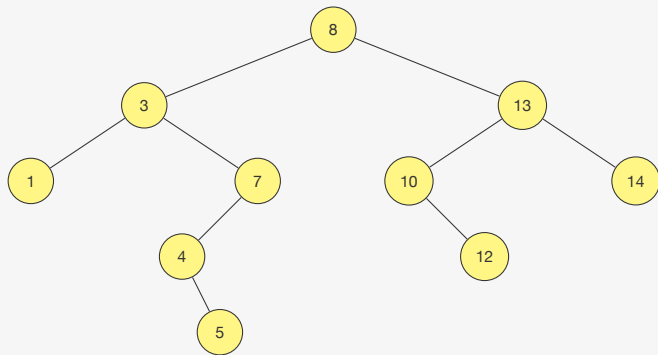
Ex: Inserindo 11

Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

- fazemos uma busca pelo valor
- e colocamos ele na posição onde deveria estar

Ex: Inserindo **11**

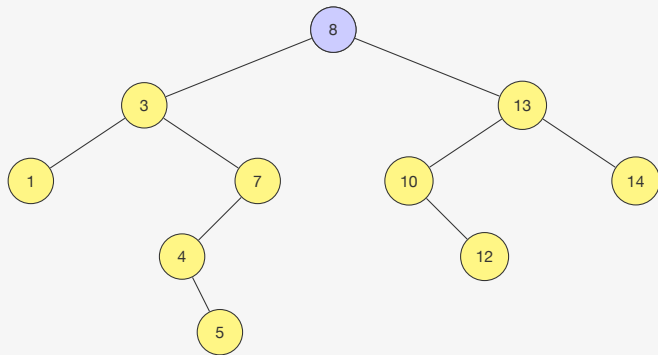


Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

- fazemos uma busca pelo valor
- e colocamos ele na posição onde deveria estar

Ex: Inserindo **11**

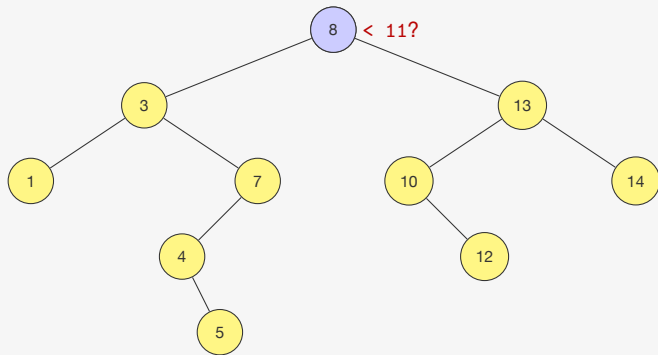


Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

- fazemos uma busca pelo valor
- e colocamos ele na posição onde deveria estar

Ex: Inserindo 11

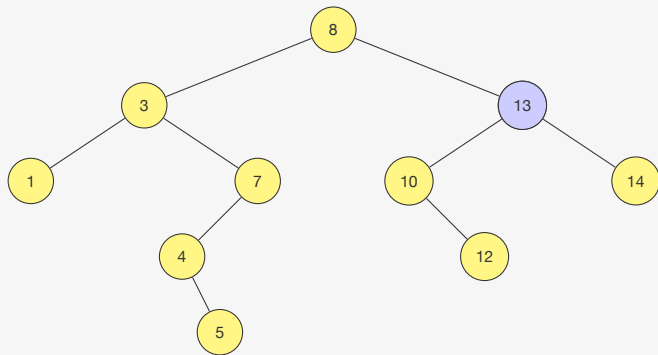


Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

- fazemos uma busca pelo valor
- e colocamos ele na posição onde deveria estar

Ex: Inserindo **11**

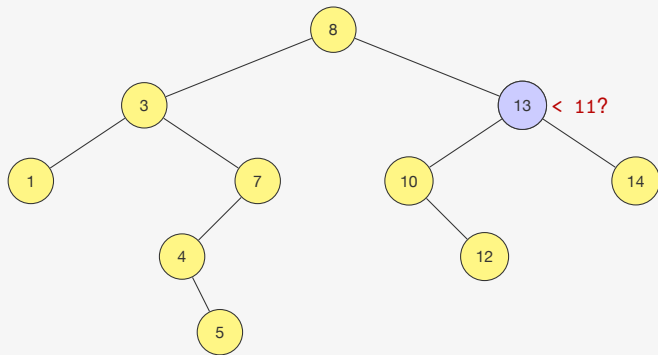


Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

- fazemos uma busca pelo valor
- e colocamos ele na posição onde deveria estar

Ex: Inserindo 11

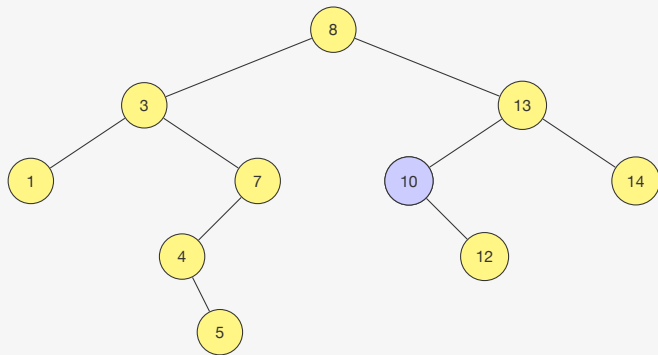


Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

- fazemos uma busca pelo valor
- e colocamos ele na posição onde deveria estar

Ex: Inserindo **11**

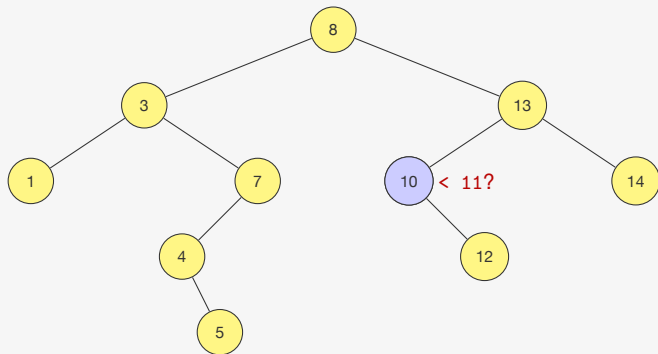


Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

- fazemos uma busca pelo valor
- e colocamos ele na posição onde deveria estar

Ex: Inserindo 11

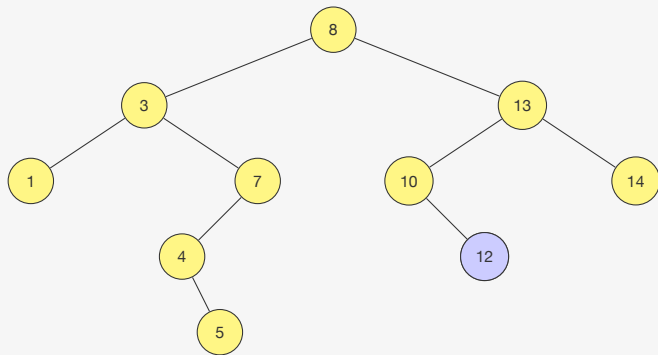


Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

- fazemos uma busca pelo valor
- e colocamos ele na posição onde deveria estar

Ex: Inserindo 11

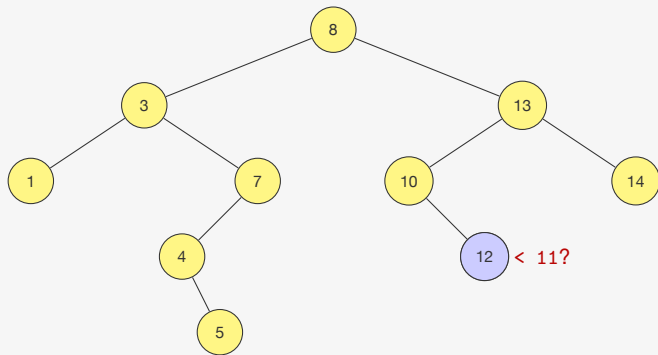


Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

- fazemos uma busca pelo valor
- e colocamos ele na posição onde deveria estar

Ex: Inserindo 11

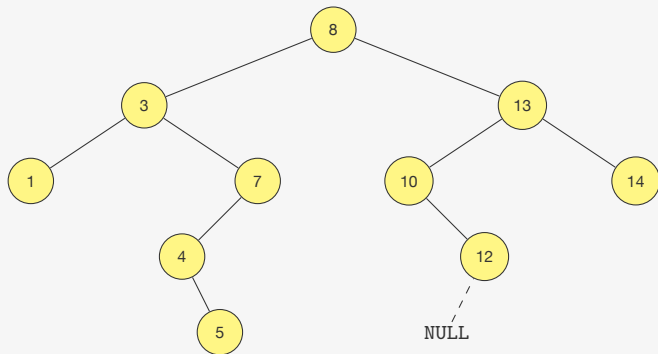


Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

- fazemos uma busca pelo valor
- e colocamos ele na posição onde deveria estar

Ex: Inserindo 11

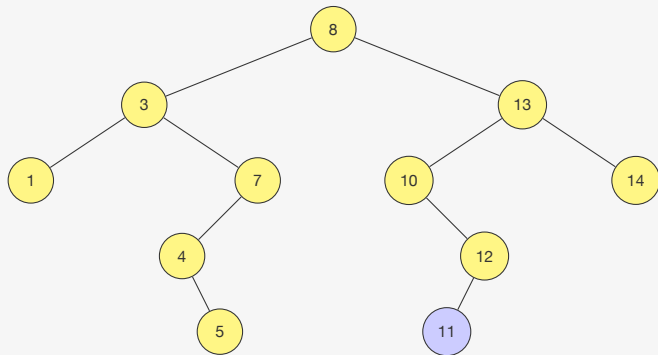


Inserindo um valor

Precisamos determinar onde inserir o valor:

- fazemos uma busca pelo valor
- e colocamos ele na posição onde deveria estar

Ex: Inserindo 11



Inserção - implementação

O algoritmo insere na árvore recursivamente

Inserção - implementação

O algoritmo insere na árvore recursivamente

- devolve um ponteiro para a raiz da “nova” árvore

Inserção - implementação

O algoritmo insere na árvore recursivamente

- devolve um ponteiro para a raiz da “nova” árvore
- assim como fizemos com listas ligadas

Inserção - implementação

O algoritmo insere na árvore recursivamente

- devolve um ponteiro para a raiz da “nova” árvore
- assim como fizemos com listas ligadas

```
1 p_no inserir(p_no raiz, int chave) {
```

Inserção - implementação

O algoritmo insere na árvore recursivamente

- devolve um ponteiro para a raiz da “nova” árvore
- assim como fizemos com listas ligadas

```
1 p_no inserir(p_no raiz, int chave) {
2     p_no novo;
3     if (raiz == NULL) {
4         novo = malloc(sizeof(No));
5         novo->esq = novo->dir = NULL;
6         novo->chave = chave;
7         return novo;
8     }
```

Inserção - implementação

O algoritmo insere na árvore recursivamente

- devolve um ponteiro para a raiz da “nova” árvore
- assim como fizemos com listas ligadas

```
1 p_no inserir(p_no raiz, int chave) {
2     p_no novo;
3     if (raiz == NULL) {
4         novo = malloc(sizeof(No));
5         novo->esq = novo->dir = NULL;
6         novo->chave = chave;
7         return novo;
8     }
9     if (chave < raiz->chave)
10        raiz->esq = inserir(raiz->esq, chave);
11    else
12        raiz->dir = inserir(raiz->dir, chave);
13    return raiz;
14 }
```

Inserção - implementação

O algoritmo insere na árvore recursivamente

- devolve um ponteiro para a raiz da “nova” árvore
- assim como fizemos com listas ligadas

```
1 p_no inserir(p_no raiz, int chave) {
2     p_no novo;
3     if (raiz == NULL) {
4         novo = malloc(sizeof(No));
5         novo->esq = novo->dir = NULL;
6         novo->chave = chave;
7         return novo;
8     }
9     if (chave < raiz->chave)
10        raiz->esq = inserir(raiz->esq, chave);
11    else
12        raiz->dir = inserir(raiz->dir, chave);
13    return raiz;
14 }
```


Inserção - implementação

O algoritmo insere na árvore recursivamente

- devolve um ponteiro para a raiz da “nova” árvore
- assim como fizemos com listas ligadas

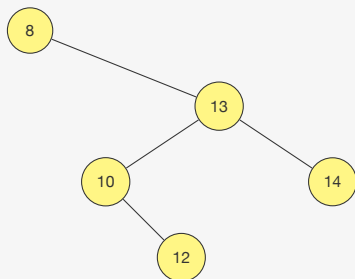
```
1 p_no inserir(p_no raiz, int chave) {
2     p_no novo;
3     if (raiz == NULL) {
4         novo = malloc(sizeof(No));
5         novo->esq = novo->dir = NULL;
6         novo->chave = chave;
7         return novo;
8     }
9     if (chave < raiz->chave)
10        raiz->esq = inserir(raiz->esq, chave);
11    else
12        raiz->dir = inserir(raiz->dir, chave);
13    return raiz;
14 }
```

Mínimo da Árvore

Onde está o nó com a menor chave de uma árvore?

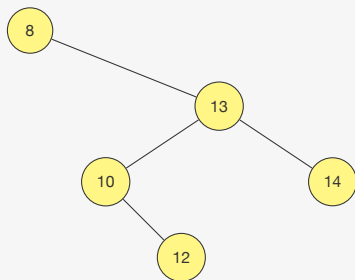
Mínimo da Árvore

Onde está o nó com a menor chave de uma árvore?



Mínimo da Árvore

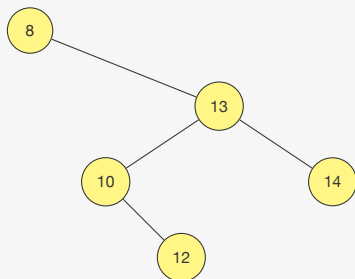
Onde está o nó com a menor chave de uma árvore?



Quem é o mínimo para essa árvore?

Mínimo da Árvore

Onde está o nó com a menor chave de uma árvore?



Quem é o mínimo para essa árvore?

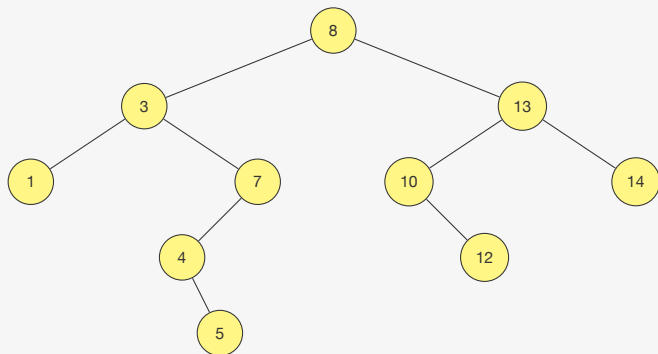
- É a própria raiz

Mínimo da Árvore

Onde está o nó com a menor chave de uma árvore?

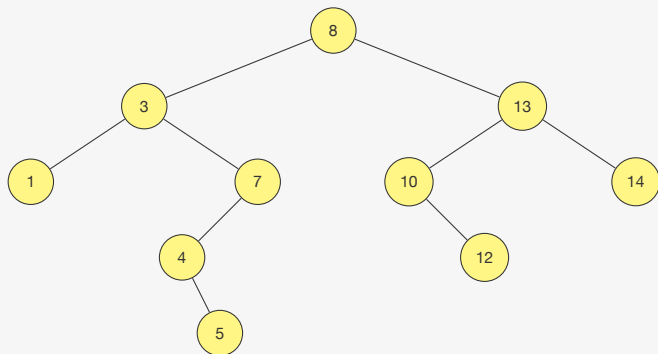
Mínimo da Árvore

Onde está o nó com a menor chave de uma árvore?



Mínimo da Árvore

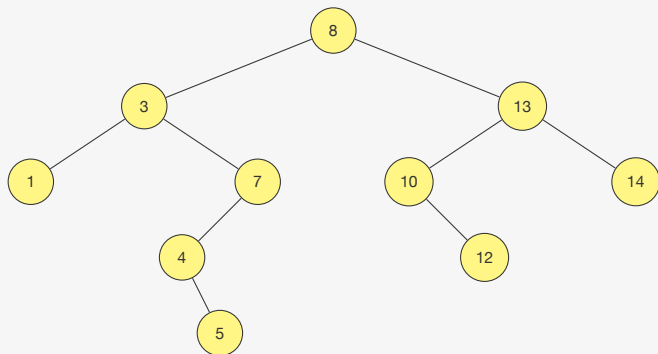
Onde está o nó com a menor chave de uma árvore?



Quem é o mínimo para essa árvore?

Mínimo da Árvore

Onde está o nó com a menor chave de uma árvore?



Quem é o mínimo para essa árvore?

- É o mínimo da subárvore esquerda

Mínimo - Implementações

Versão recursiva:

```
1 p_no minimo(p_no raiz) {  
2     if (raiz == NULL || raiz->esq == NULL)  
3         return raiz;  
4     return minimo(raiz->esq);  
5 }
```

Mínimo - Implementações

Versão recursiva:

```
1 p_no minimo(p_no raiz) {
2     if (raiz == NULL || raiz->esq == NULL)
3         return raiz;
4     return minimo(raiz->esq);
5 }
```

Versão iterativa:

```
1 p_no minimo_iterativo(p_no raiz) {
2     while (raiz != NULL && raiz->esq != NULL)
3         raiz = raiz->esq;
4     return raiz;
5 }
```

Mínimo - Implementações

Versão recursiva:

```
1 p_no minimo(p_no raiz) {
2     if (raiz == NULL || raiz->esq == NULL)
3         return raiz;
4     return minimo(raiz->esq);
5 }
```

Versão iterativa:

```
1 p_no minimo_iterativo(p_no raiz) {
2     while (raiz != NULL && raiz->esq != NULL)
3         raiz = raiz->esq;
4     return raiz;
5 }
```

Para encontrar o máximo, basta fazer a operação simétrica

Mínimo - Implementações

Versão recursiva:

```
1 p_no minimo(p_no raiz) {
2   if (raiz == NULL || raiz->esq == NULL)
3     return raiz;
4   return minimo(raiz->esq);
5 }
```

Versão iterativa:

```
1 p_no minimo_iterativo(p_no raiz) {
2   while (raiz != NULL && raiz->esq != NULL)
3     raiz = raiz->esq;
4   return raiz;
5 }
```

Para encontrar o máximo, basta fazer a operação simétrica

- Se a subárvore direita existir, é o seu máximo

Mínimo - Implementações

Versão recursiva:

```
1 p_no minimo(p_no raiz) {
2   if (raiz == NULL || raiz->esq == NULL)
3     return raiz;
4   return minimo(raiz->esq);
5 }
```

Versão iterativa:

```
1 p_no minimo_iterativo(p_no raiz) {
2   while (raiz != NULL && raiz->esq != NULL)
3     raiz = raiz->esq;
4   return raiz;
5 }
```

Para encontrar o máximo, basta fazer a operação simétrica

- Se a subárvore direita existir, é o seu máximo
- Senão, é a própria raiz

Sucessor

Dado um nó da árvore, onde está o seu sucessor?

Sucessor

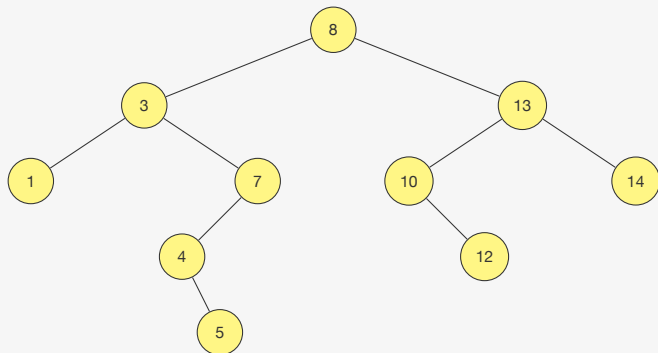
Dado um nó da árvore, onde está o seu sucessor?

- O sucessor é o próximo nó na ordenação

Sucessor

Dado um nó da árvore, onde está o seu sucessor?

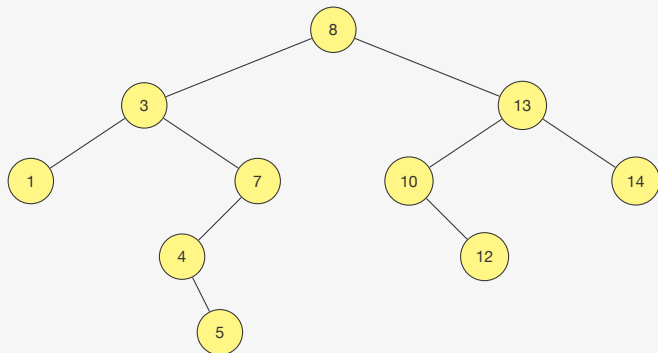
- O sucessor é o próximo nó na ordenação



Sucessor

Dado um nó da árvore, onde está o seu sucessor?

- O sucessor é o próximo nó na ordenação

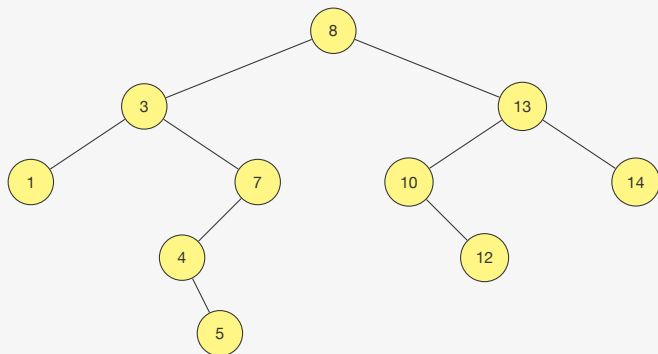


Quem é o sucessor de **3**?

Sucessor

Dado um nó da árvore, onde está o seu sucessor?

- O sucessor é o próximo nó na ordenação



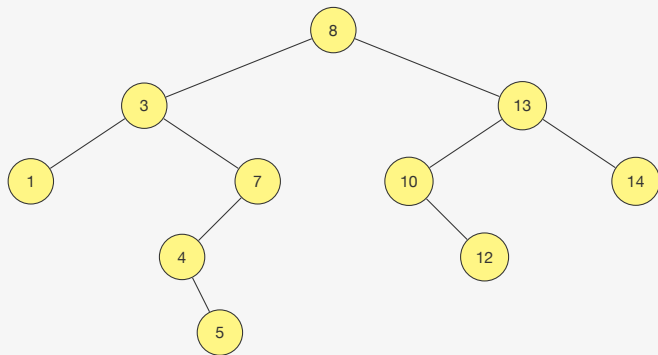
Quem é o sucessor de **3**?

- É o mínimo da sua subárvore direita de **3**

Sucessor

Dado um nó da árvore, onde está o seu sucessor?

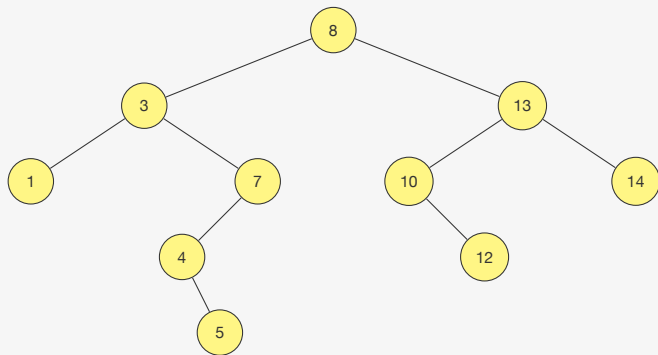
- O sucessor é o próximo nó na ordenação



Sucessor

Dado um nó da árvore, onde está o seu sucessor?

- O sucessor é o próximo nó na ordenação

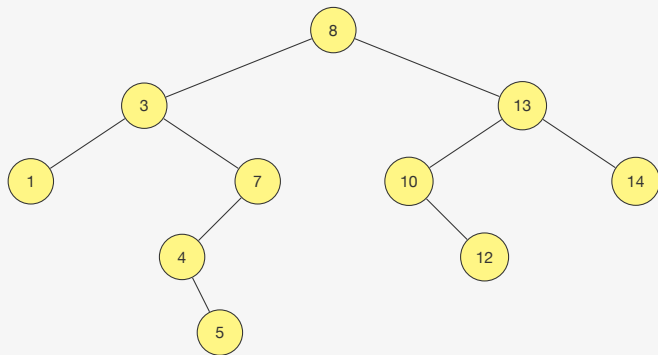


Quem é o sucessor de 7?

Sucessor

Dado um nó da árvore, onde está o seu sucessor?

- O sucessor é o próximo nó na ordenação



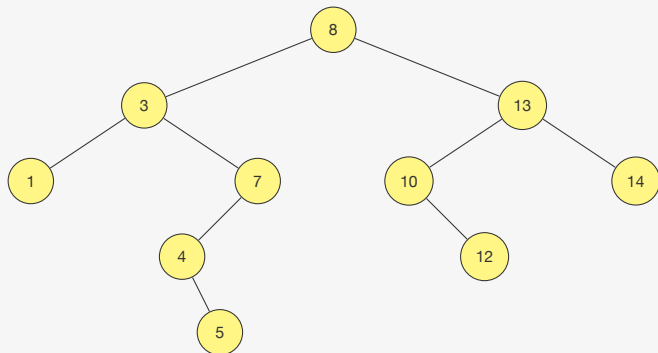
Quem é o sucessor de 7?

- É primeiro ancestral a direita

Sucessor

Dado um nó da árvore, onde está o seu sucessor?

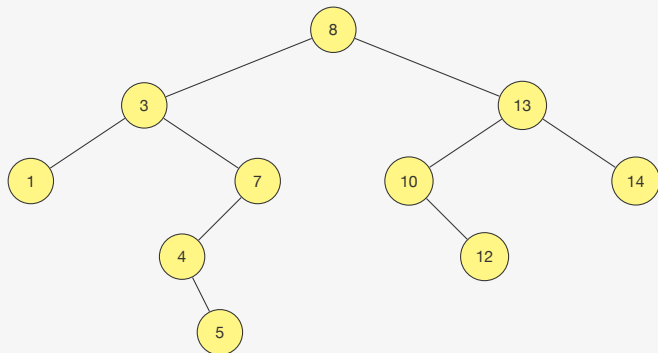
- O sucessor é o próximo nó na ordenação



Sucessor

Dado um nó da árvore, onde está o seu sucessor?

- O sucessor é o próximo nó na ordenação

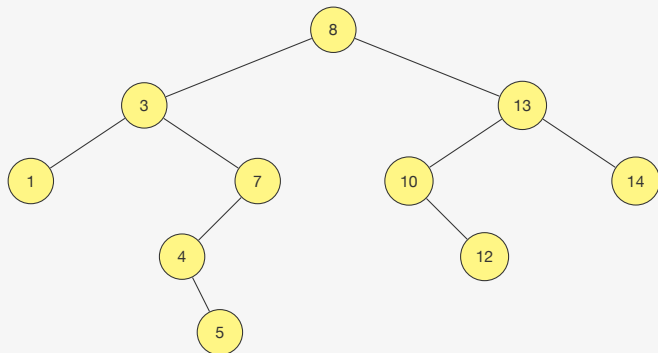


Quem é o sucessor de 14?

Sucessor

Dado um nó da árvore, onde está o seu sucessor?

- O sucessor é o próximo nó na ordenação



Quem é o sucessor de 14?

- não tem sucessor...

Sucessor - Implementação

```
1 p_no sucessor(p_no x) {  
2     if (x->dir != NULL)  
3         return minimo(x->dir);  
4     else  
5         return ancestral_a_direita(x);  
6 }
```

Sucessor - Implementação

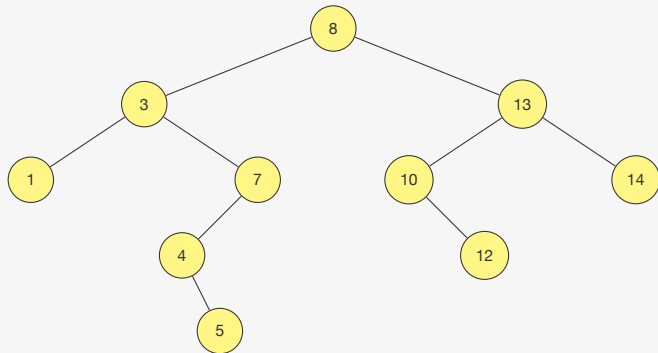
```
1 p_no sucessor(p_no x) {
2   if (x->dir != NULL)
3     return minimo(x->dir);
4   else
5     return ancestral_a_direita(x);
6 }
```

```
1 p_no ancestral_a_direita(p_no x) {
2   if (x == NULL)
3     return NULL;
4   if (x->pai == NULL || x->pai->esq == x)
5     return x->pai;
6   else
7     return ancestral_a_direita(x->pai);
8 }
```

A implementação da função **antecessor** é simétrica

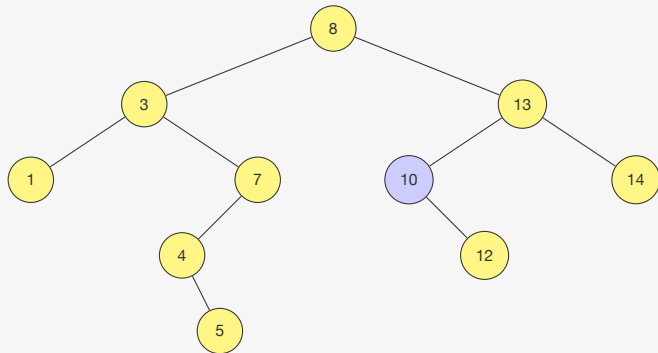
Remoção

Ex: removendo 10



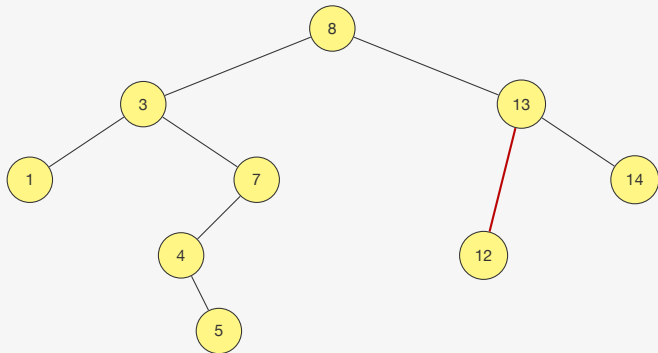
Remoção

Ex: removendo 10



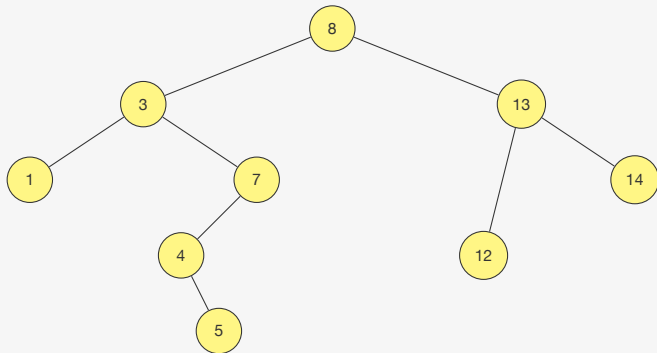
Remoção

Ex: removendo 10



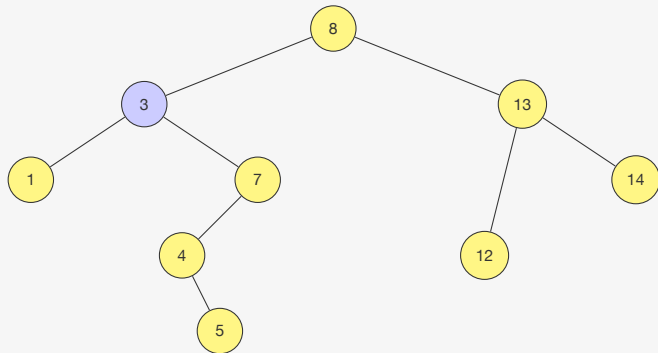
Remoção

Ex: removendo 3



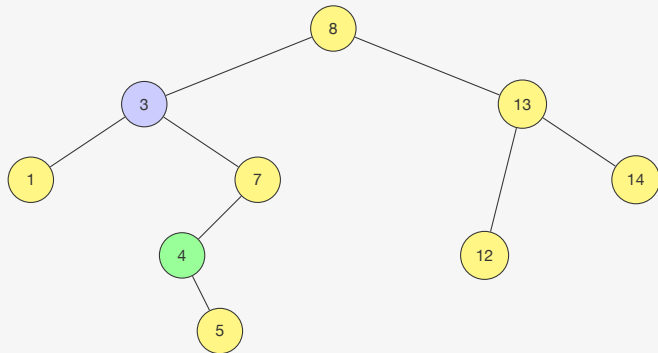
Remoção

Ex: removendo 3



Remoção

Ex: removendo 3

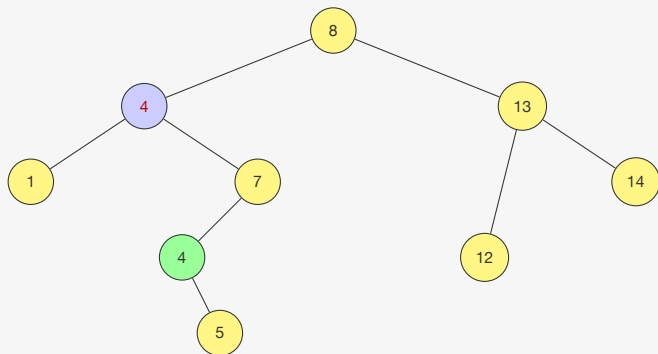


Podemos colocar o sucessor de 3 em seu lugar

- Isso mantém a propriedade da árvore binária de busca

Remoção

Ex: removendo 3

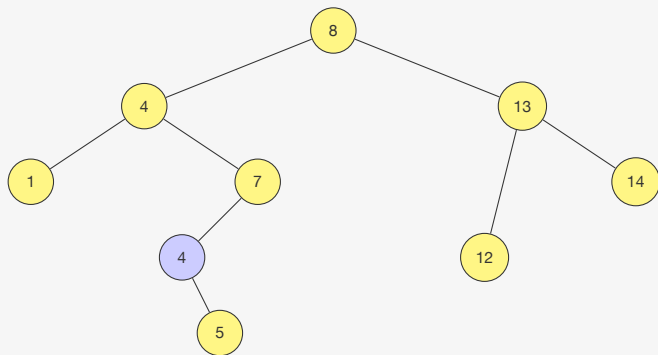


Podemos colocar o sucessor de 3 em seu lugar

- Isso mantém a propriedade da árvore binária de busca

Remoção

Ex: removendo 3



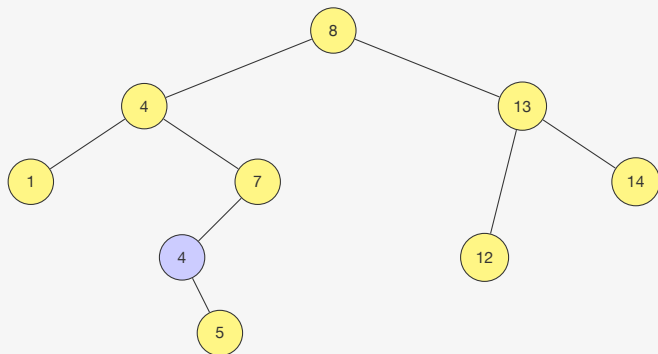
Podemos colocar o sucessor de 3 em seu lugar

- Isso mantém a propriedade da árvore binária de busca

E agora removemos o sucessor

Remoção

Ex: removendo 3



Podemos colocar o sucessor de 3 em seu lugar

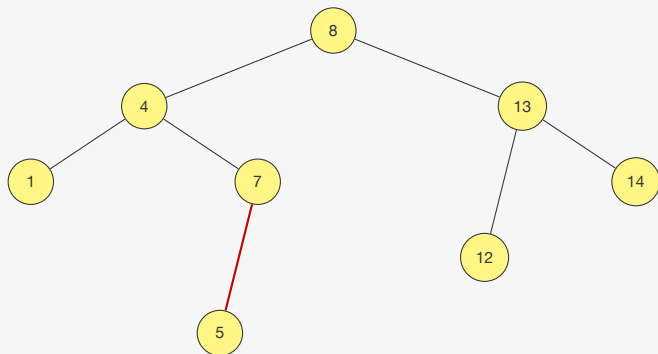
- Isso mantém a propriedade da árvore binária de busca

E agora removemos o sucessor

- O sucessor nunca tem filho esquerdo!

Remoção

Ex: removendo 3



Podemos colocar o sucessor de 3 em seu lugar

- Isso mantém a propriedade da árvore binária de busca

E agora removemos o sucessor

- O sucessor nunca tem filho esquerdo!

Remoção - Implementação

Versão sem ponteiro para `pai` e que não libera o nó

```
1 p_no remover_rec(p_no raiz, int chave) {
```

Remoção - Implementação

Versão sem ponteiro para `pai` e que não libera o nó

```
1 p_no remover_rec(p_no raiz, int chave) {  
2     if (raiz == NULL)  
3         return NULL;
```

Remoção - Implementação

Versão sem ponteiro para `pai` e que não libera o nó

```
1 p_no remover_rec(p_no raiz, int chave) {
2   if (raiz == NULL)
3     return NULL;
4   if (chave < raiz->chave)
5     raiz->esq = remover_rec(raiz->esq, chave);
6   else if (chave > raiz->chave)
7     raiz->dir = remover_rec(raiz->dir, chave);
8   else if (raiz->esq == NULL)
9     return raiz->dir;
```


Remoção - Implementação

Versão sem ponteiro para `pai` e que não libera o nó

```
1 p_no remover_rec(p_no raiz, int chave) {
2   if (raiz == NULL)
3     return NULL;
4   if (chave < raiz->chave)
5     raiz->esq = remover_rec(raiz->esq, chave);
6   else if (chave > raiz->chave)
7     raiz->dir = remover_rec(raiz->dir, chave);
8   else if (raiz->esq == NULL)
9     return raiz->dir;
10  else if (raiz->dir == NULL)
11    return raiz->esq;
```

Remoção - Implementação

Versão sem ponteiro para `pai` e que não libera o nó

```
1 p_no remover_rec(p_no raiz, int chave) {
2   if (raiz == NULL)
3     return NULL;
4   if (chave < raiz->chave)
5     raiz->esq = remover_rec(raiz->esq, chave);
6   else if (chave > raiz->chave)
7     raiz->dir = remover_rec(raiz->dir, chave);
8   else if (raiz->esq == NULL)
9     return raiz->dir;
10  else if (raiz->dir == NULL)
11    return raiz->esq;
12  else
13    remover_sucessor(raiz);
14  return raiz;
15 }
```

Remoção - Implementação

```
1 void remover_sucessor(p_no raiz) {
```

Remoção - Implementação

```
1 void remover_sucessor(p_no raiz) {
2     p_no t = raiz->dir; /*será o mínimo da subárvore direita*/
3     p_no pai = raiz, /*será o pai de t*/
4     while (t->esq != NULL) {
5         pai = t;
6         t = t->esq;
7     }
```

Remoção - Implementação

```
1 void remover_sucessor(p_no raiz) {
2     p_no t = raiz->dir; /*será o mínimo da subárvore direita*/
3     p_no pai = raiz, /*será o pai de t*/
4     while (t->esq != NULL) {
5         pai = t;
6         t = t->esq;
7     }
8     if (pai->esq == t)
9         pai->esq = t->dir;
```

Remoção - Implementação

```
1 void remover_sucessor(p_no raiz) {
2     p_no t = raiz->dir; /*será o mínimo da subárvore direita*/
3     p_no pai = raiz, /*será o pai de t*/
4     while (t->esq != NULL) {
5         pai = t;
6         t = t->esq;
7     }
8     if (pai->esq == t)
9         pai->esq = t->dir;
10    else
11        pai->dir = t->dir;
12    raiz->chave = t->chave;
13 }
```

Exercício

Faça uma função que imprime as chaves de uma ABB em ordem crescente

Exercício

Faça uma implementação da função `sucessor` que não usa o ponteiro `pai`

- Dica: você precisará da raiz da árvore pois não pode subir