

Árvores Binárias de Busca

Busca e Travessia

Prof. Edson Alves – UnB/FGA

Tamanho

Tamanho de uma árvore binária de busca

- O tamanho de uma árvore corresponde ao número N de nós que ela possui
- O algoritmo abaixo computa este valor em $O(N)$:
 1. Comece no nó raiz e inicialize a variável tamanho com zero
 2. Para cada nó não nulo:
 - i. Incremente em uma unidade da variável tamanho
 - ii. Some à variável o tamanho da subárvore esquerda do nó
 - iii. Some à variável o tamanho da subárvore direita do nó
- O algoritmo acima é recursivo
- O caso base é a árvore vazia, que tem tamanho zero
- O passo 2 corresponde à chamada recursiva, uma vez que cada uma das subárvores são, de fato, árvores

Implementação do tamanho de uma BST em C++

```
1  template<typename T>
2  class BST {
3  private:
4      struct Node {
5          T info;
6          Node *left, *right;
7      };
8
9      Node *root;
10
11     int size(const Node *node) const
12     {
13         return node ? size(node->left) + size(node->right) + 1 : 0;
14     }
15
16 public:
17     BST() : root(nullptr) {}
18
19     int size() const { return size(root); }
20 };
```

Notas sobre o algoritmo de tamanho

- O algoritmo apresentado pode ser adaptado para computar o tamanho de árvores no caso geral
- Basta retornar a soma dos tamanho de todas as subárvore associadas ao nó atual
- Conforme dito, no pior caso a complexidade é $O(N)$
- Este é um exemplo de algoritmo cuja complexidade independente da forma da árvore, e é $O(N)$ mesmo em árvores balanceadas (pois é preciso visitar cada nó ao menos uma vez)
- Uma alternativa é adicionar um membro `size` na classe `BST` e atualizá-lo a cada inserção e a cada remoção
- Deste modo, o tamanho da árvore pode ser obtido em $O(1)$, bastando retornar o valor desta variável

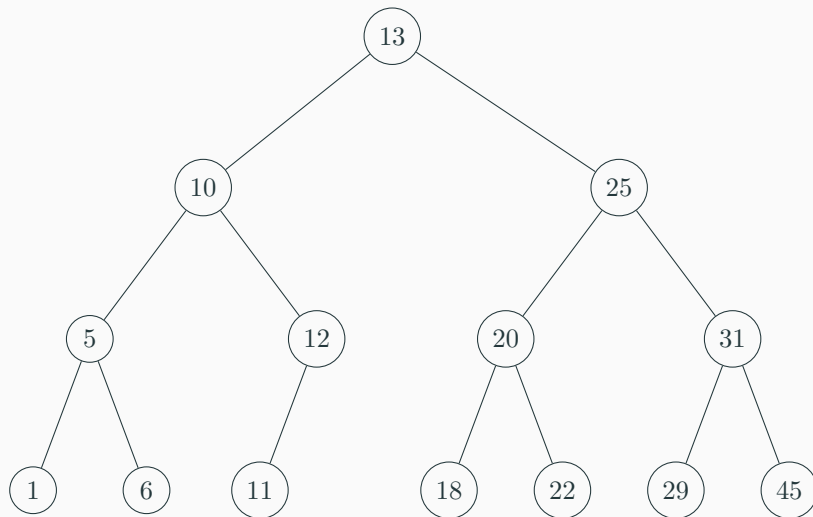
Busca

Busca em árvores binárias de busca

- A busca em uma árvore binária de busca procura responder a seguinte questão: a informação x está armazenada em algum dos nós da árvore?
- A importância desta operação nesta estrutura é tamanha que, de fato, a nomeia
- O algoritmo abaixo busca a informação x em uma árvore binária de busca:
 1. Comece no nó raiz
 2. Para cada nó não nulo:
 - 2.1 Se x está armazenado no nó, retorne verdadeiro
 - 2.2 Se x for menor do que o valor armazenado no nó, vá para a subárvore à esquerda
 - 2.3 Se x for maior do que o valor armazenado no nó, vá para a subárvore à direita
 3. Retorne falso

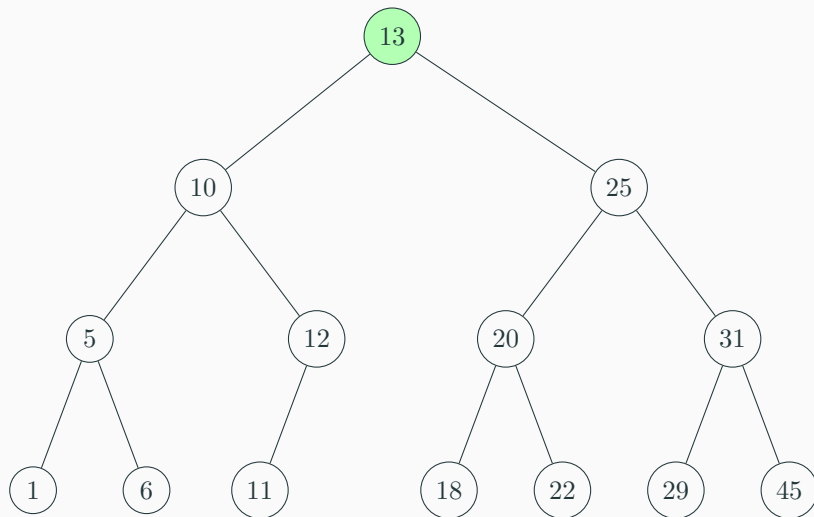
Exemplo de busca em árvore binária de busca

Elemento a ser localizado: 24



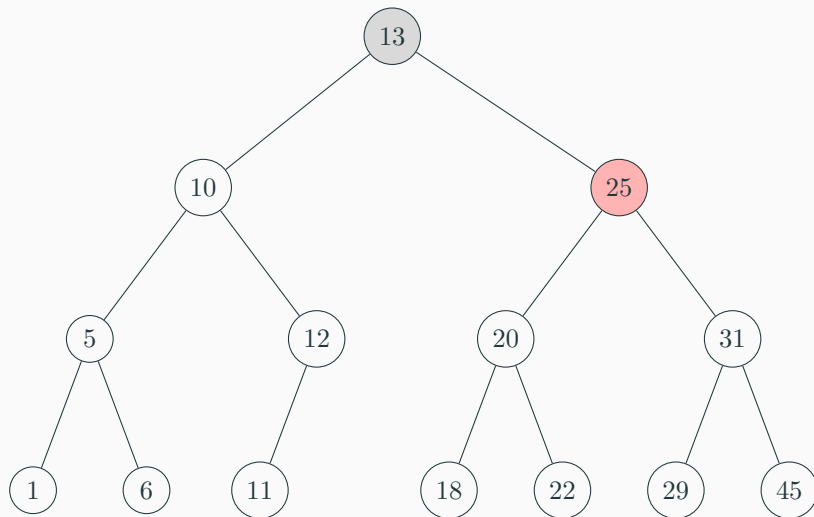
Exemplo de busca em árvore binária de busca

Elemento a ser localizado: 24



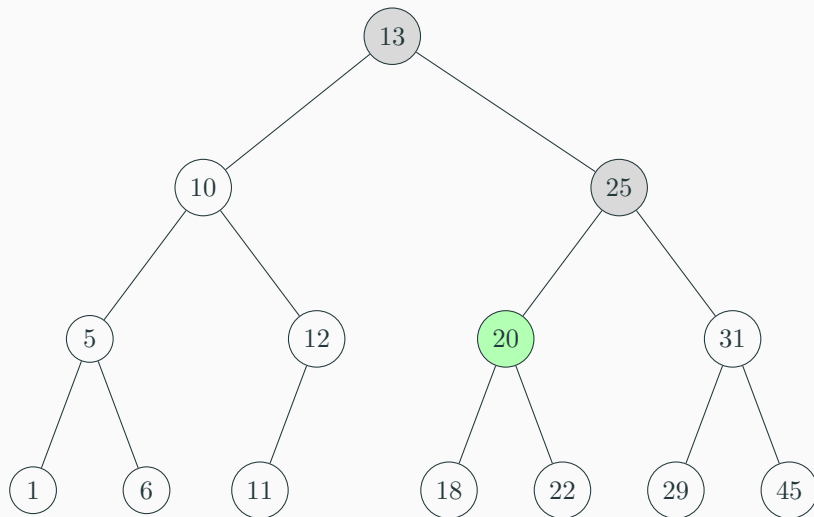
Exemplo de busca em árvore binária de busca

Elemento a ser localizado: 24



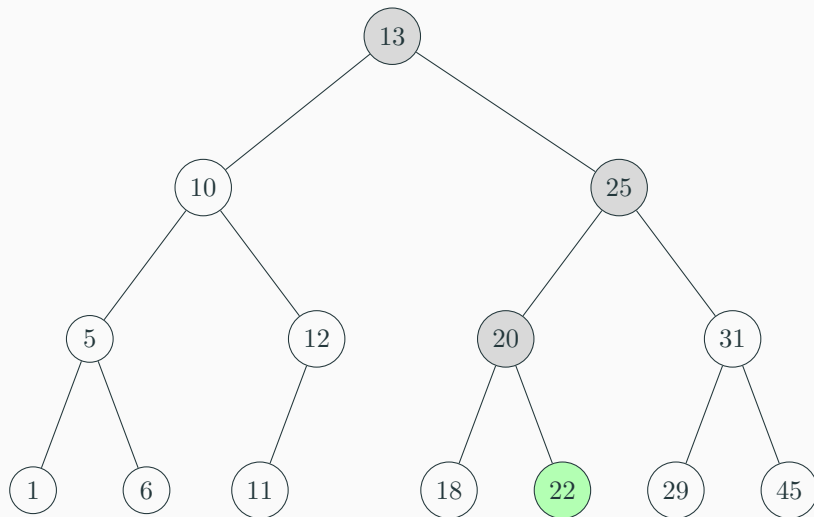
Exemplo de busca em árvore binária de busca

Elemento a ser localizado: 24



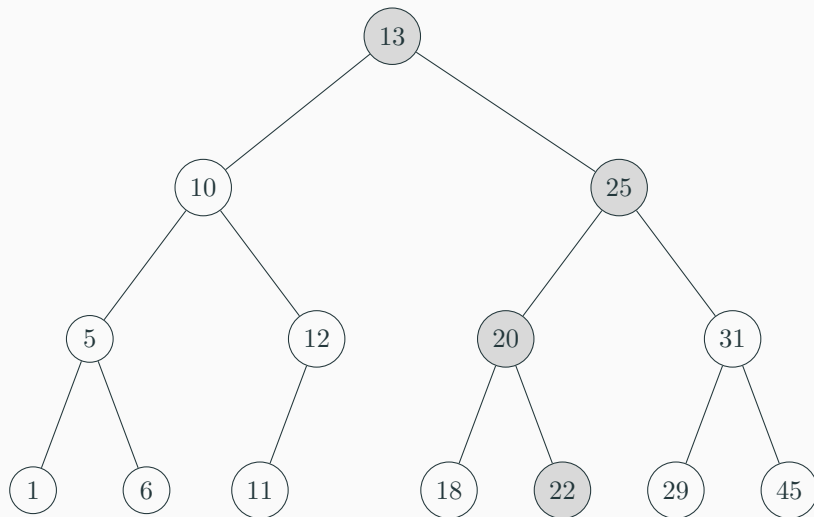
Exemplo de busca em árvore binária de busca

Elemento a ser localizado: 24



Exemplo de busca em árvore binária de busca

Elemento a ser localizado: 24



Implementação iterativa do algoritmo de busca

```
1 template<typename T>
2 class BST {
3 private:
4     struct Node {
5         T info;
6         Node *left, *right;
7     };
8
9     Node *root;
```

Implementação iterativa do algoritmo de busca

```
11  bool search(Node *node, const T& info) const
12  {
13      while (node)
14      {
15          if (info == node->info)
16              return true;
17          else if (info < node->info)
18              node = node->left;
19          else
20              node = node->right;
21      }
22
23      return false;
24  }
25
26  public:
27      BST() : root(nullptr) {}
28
29      bool search(const T& info) const { return search(root, info); }
30  };
```


Notas sobre o algoritmo de busca

- O algoritmo de busca em árvores binárias de busca também pode ser implementado recursivamente:

```
1 bool search(Node *node, const T& info) const
2 {
3     if (node == nullptr) return false;
4
5     if (node->info == info) return true;
6
7     return info < node->info ? search(node->left, info) : search(node->right, info);
8 }
```

- Uma variante do algoritmo retorna o ponteiro para o elemento, se encontrado, ou um ponteiro nulo, caso contrário
- A ordem de complexidade, no pior caso, é $O(N)$
- Em árvores balanceadas, o algoritmo é $O(\log N)$

Travessia

Definição

- A travessia de uma árvore é o processo de visitar cada nó exatamente uma vez
- Visitar significa processar, de algum modo, o nó visitado
- A travessia pode ser interpretada como o processo de linearização de uma árvore
- A definição de travessia não especifica a ordem na qual os nós devem ser visitados
- O número de travessias possíveis de uma árvore é igual o número de permutações de seus nós
- Se a árvore tem n nós, terá $n!$ travessias distintas
- Há, contudo, dois tipos especiais de travessia: travessia por extensão e travessia por profundidade

Travessia por extensão e por profundidade

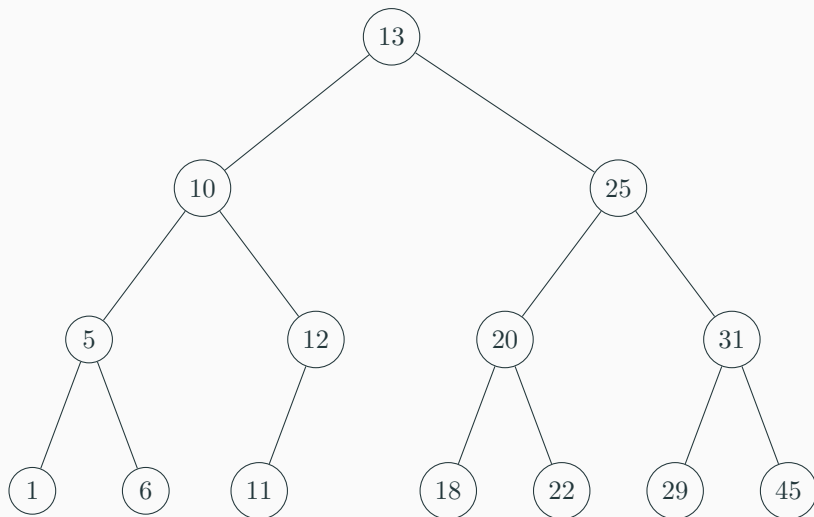
- A travessia por extensão consiste em visitar cada nó começando do nível mais baixo (ou mais alto) e seguindo para baixo (ou para cima) nível a nível, visitando todos os nós daquele nível da esquerda para a direita (ou em sentido oposto)
- Dada a natureza da travessia por extensão, sua implementação requer o auxílio de uma fila
- A travessia por profundidade consiste em ir o mais longe possível à esquerda, retornar até o primeiro cruzamento, tomar à direita e novamente ir o máximo para a esquerda, até que todos os nós tenham sido visitados
- A travessia por profundidade pode ser implementada recursivamente
- Também pode ser implementada iterativamente, com o auxílio de uma pilha

Travessias por profundidade notáveis

- A definição de travessia por profundidade não especifica o momento em que o nó deve ser visitado
- Há 3 tarefas de interesse neste caso:
 1. Visitar o nó (V)
 2. Realizar a travessia da subárvore da esquerda (L)
 3. Realizar a travessia da subárvore da direita (R)
- As 6 possíveis permutações destas tarefas são travessias por profundidade válidas
- As travessias por profundidade mais comuns são:
 1. pré-ordem: VLR
 2. em-ordem: LVR
 3. pós-ordem: LRV

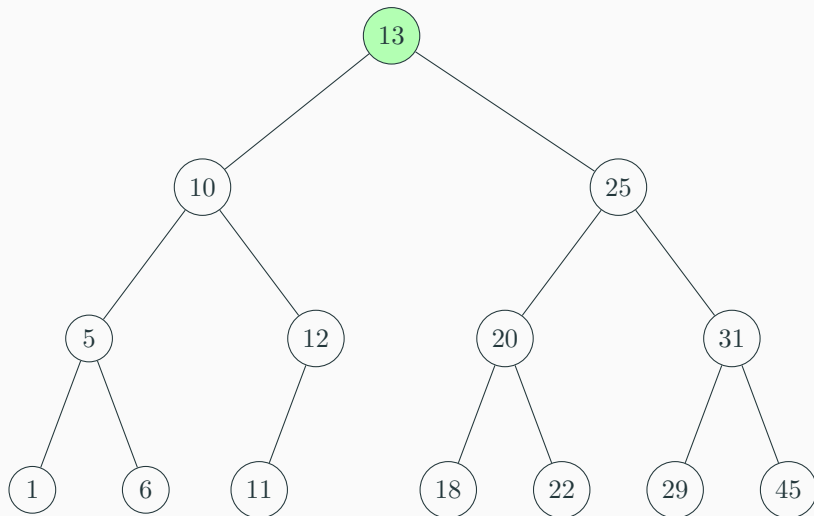
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem:



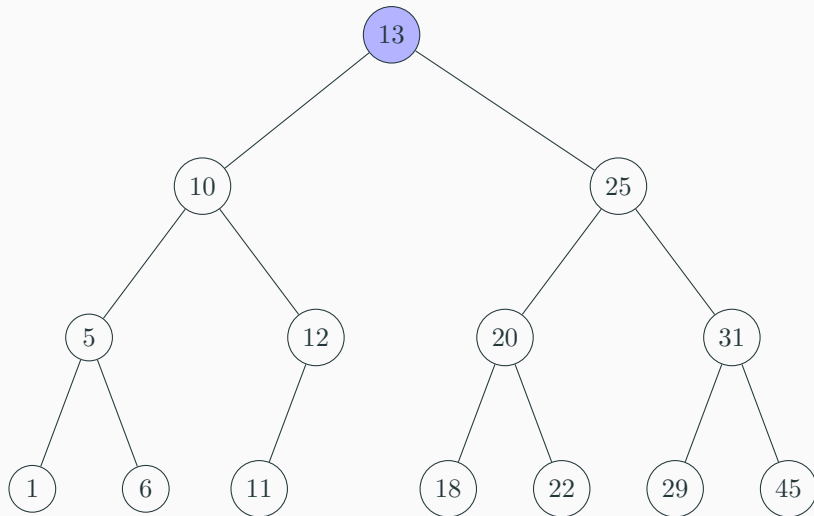
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem:



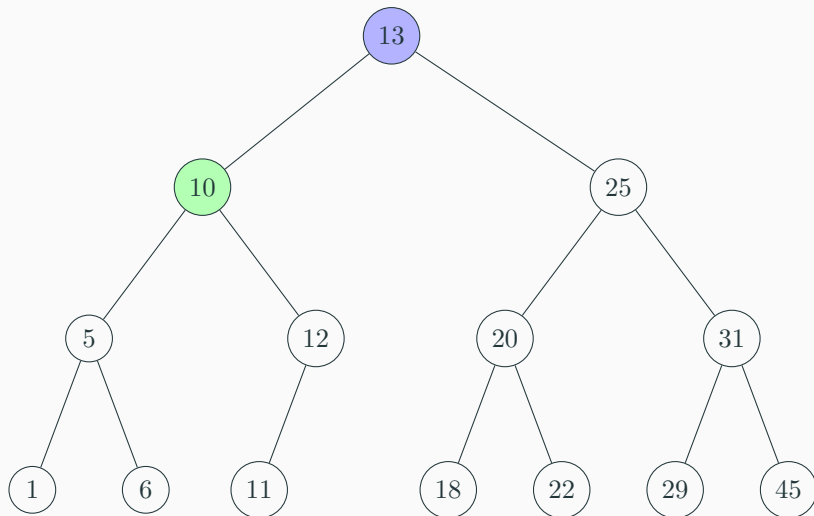
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13



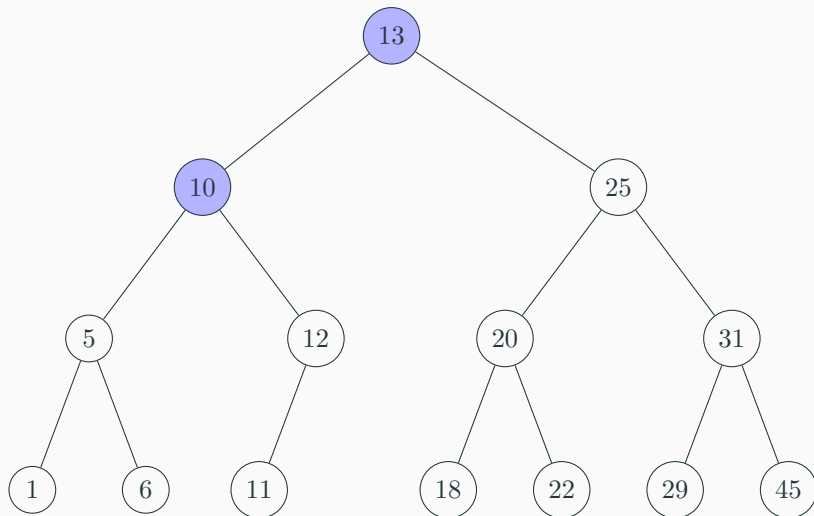
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13



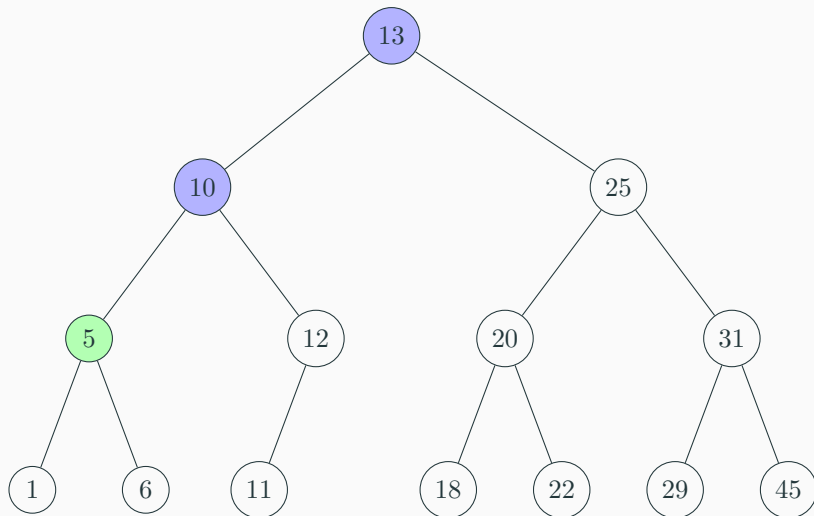
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10



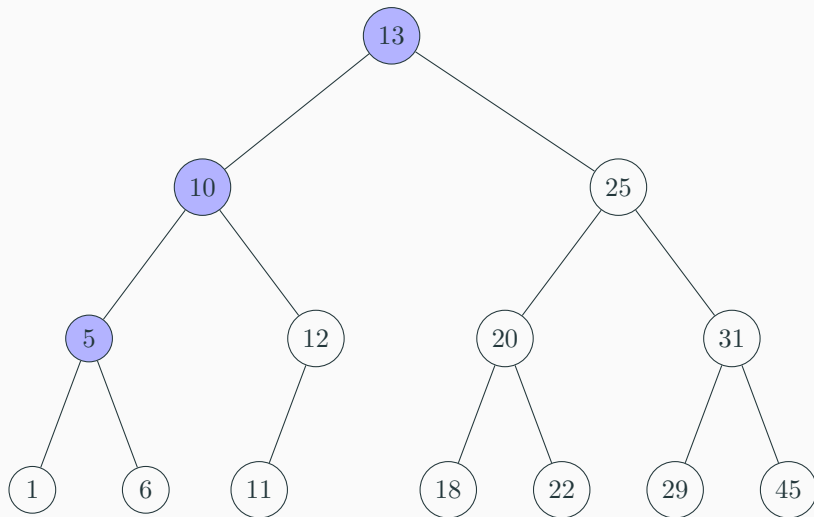
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10



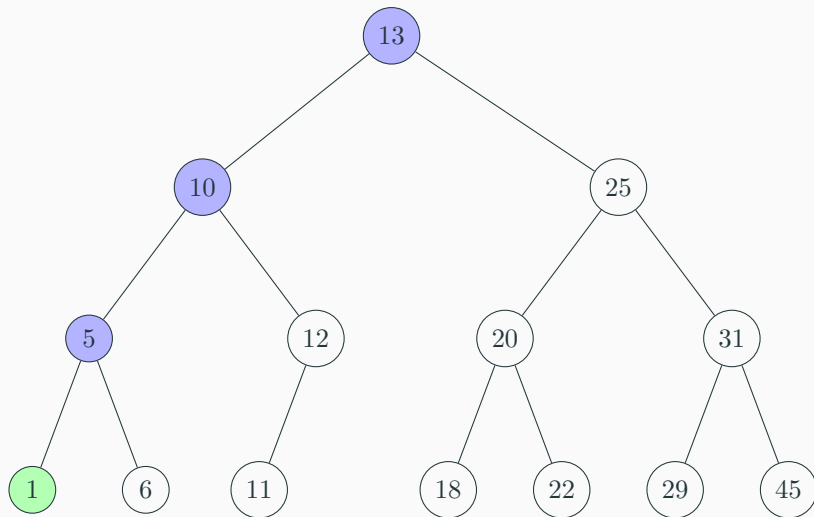
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5



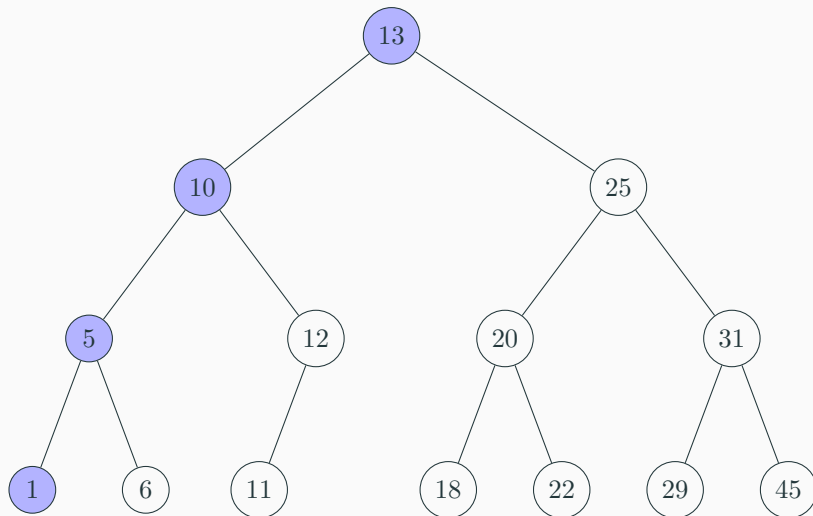
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5



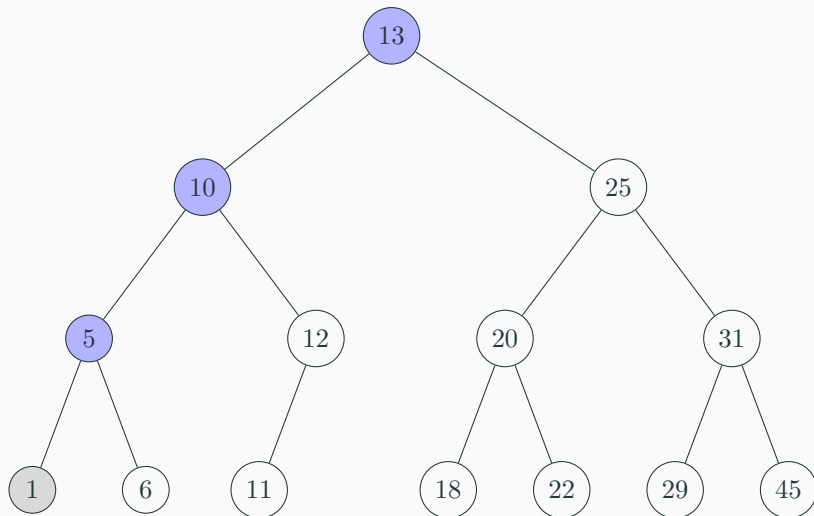
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1



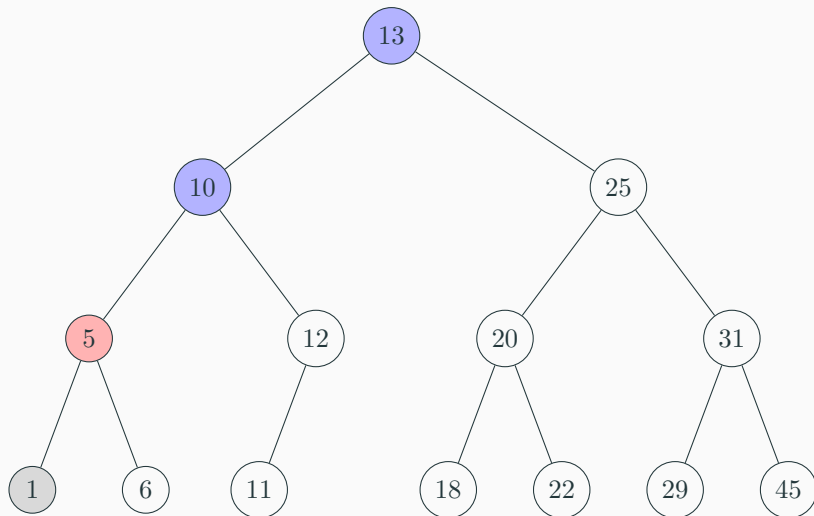
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1



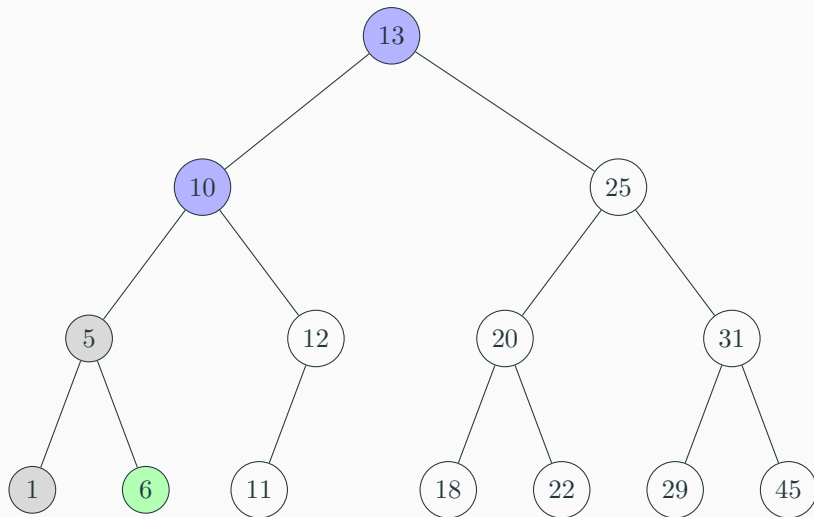
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1



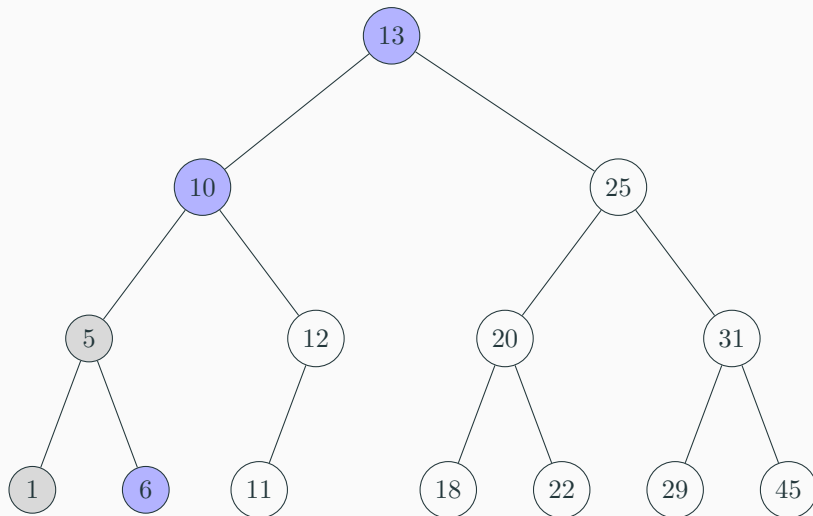
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1



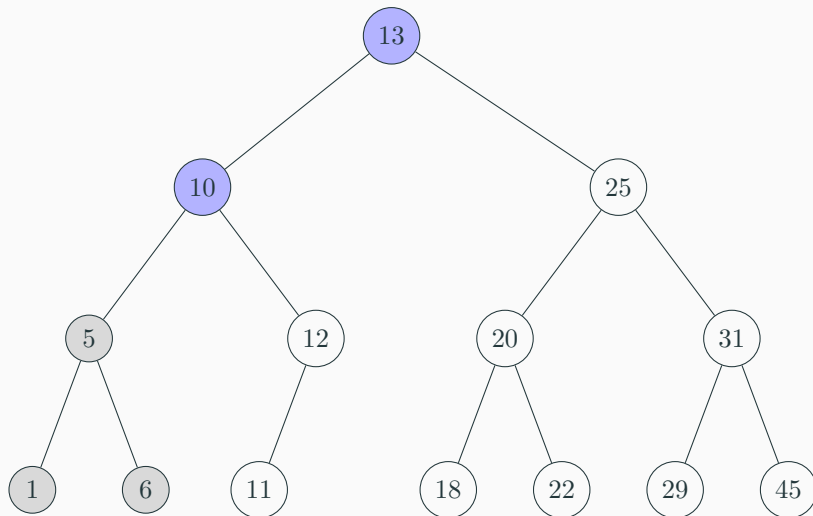
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6



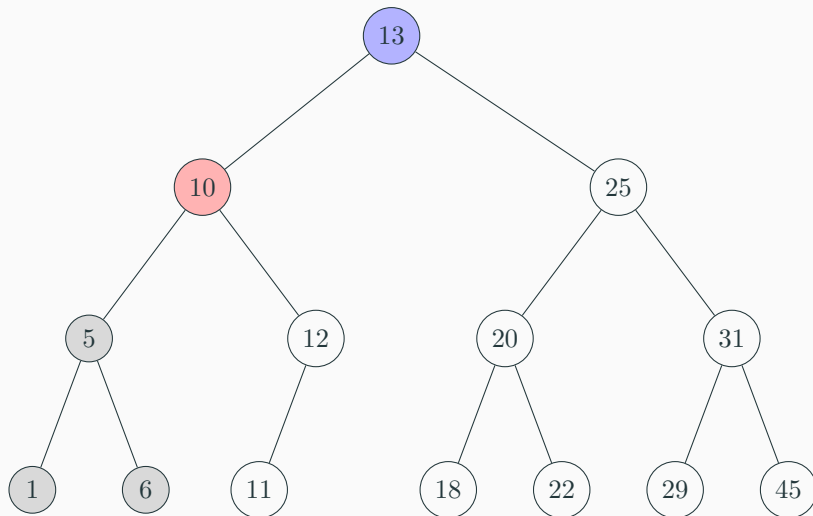
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6



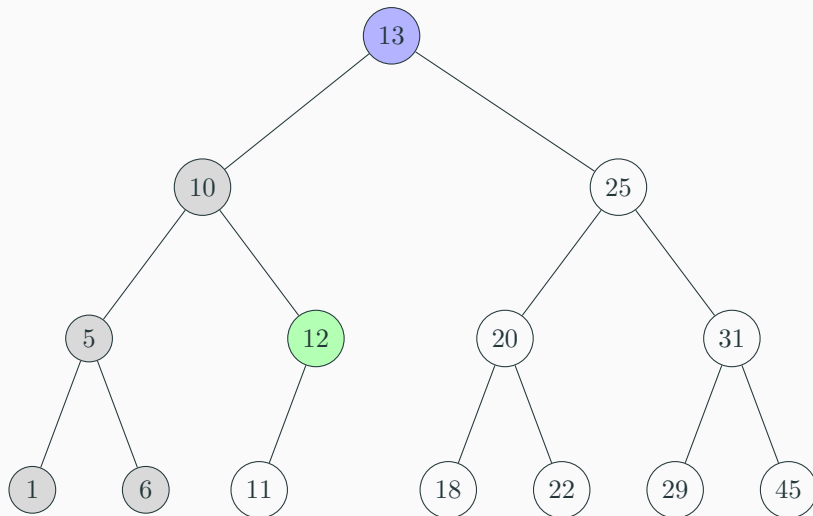
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6



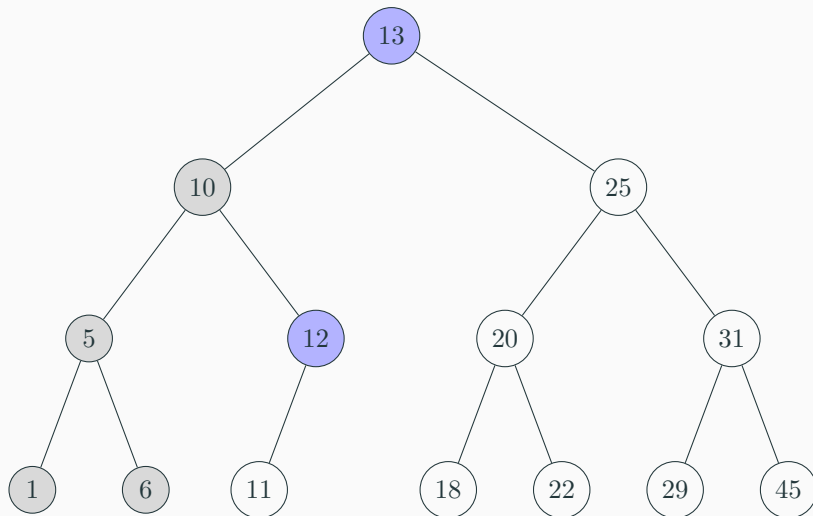
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6



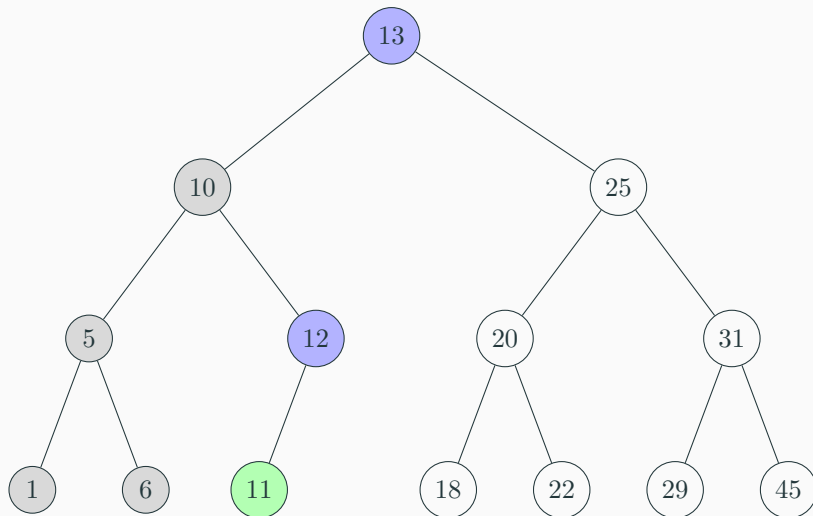
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12



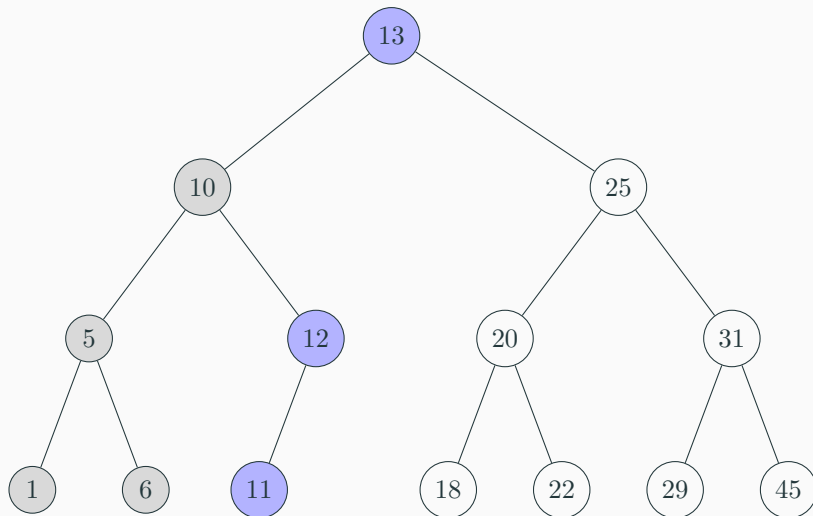
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12



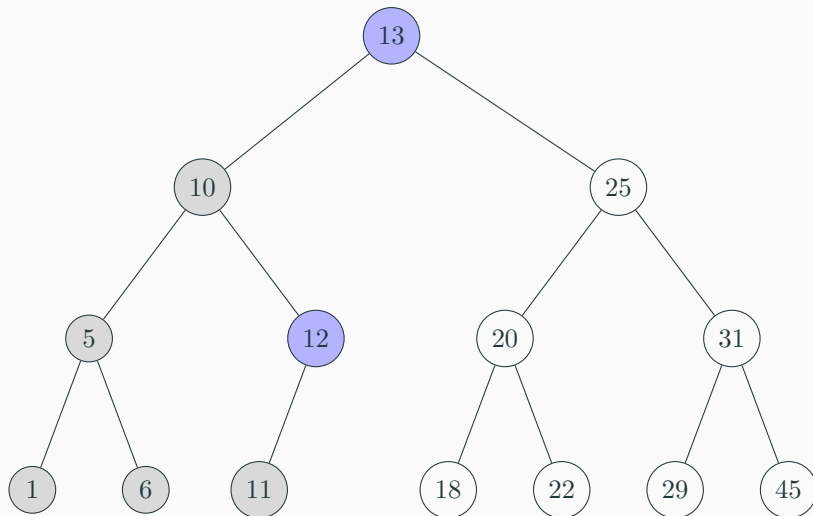
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11



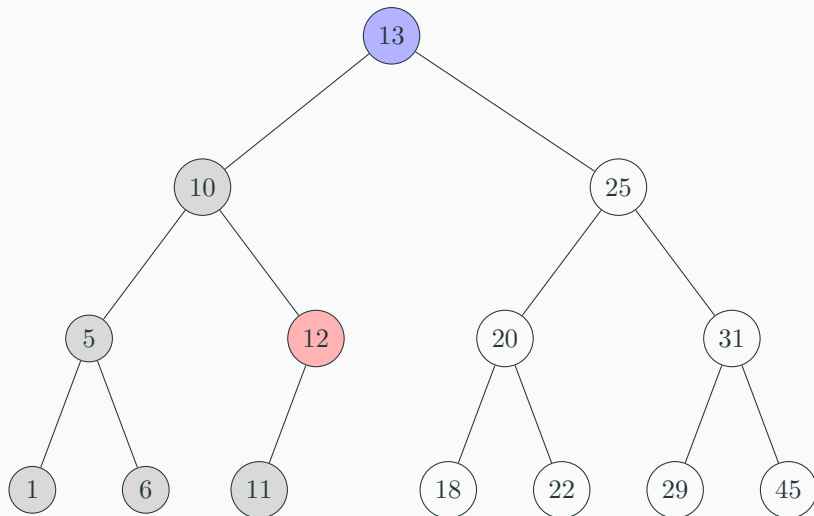
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11



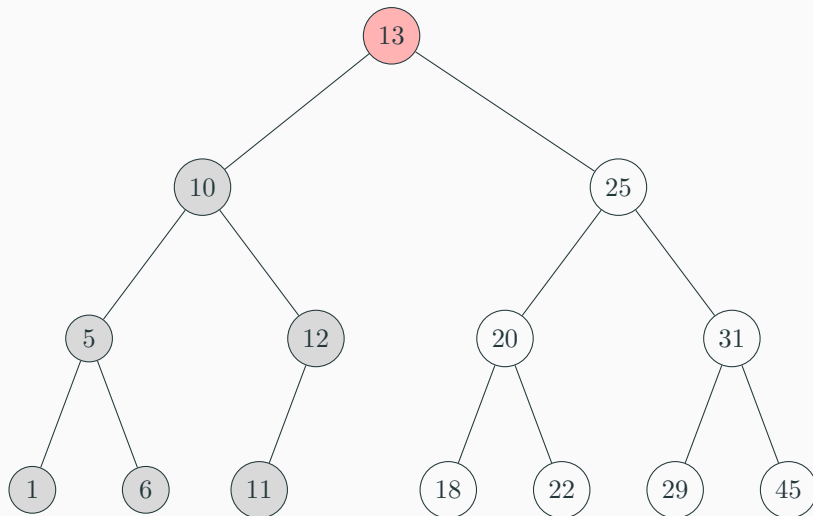
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11



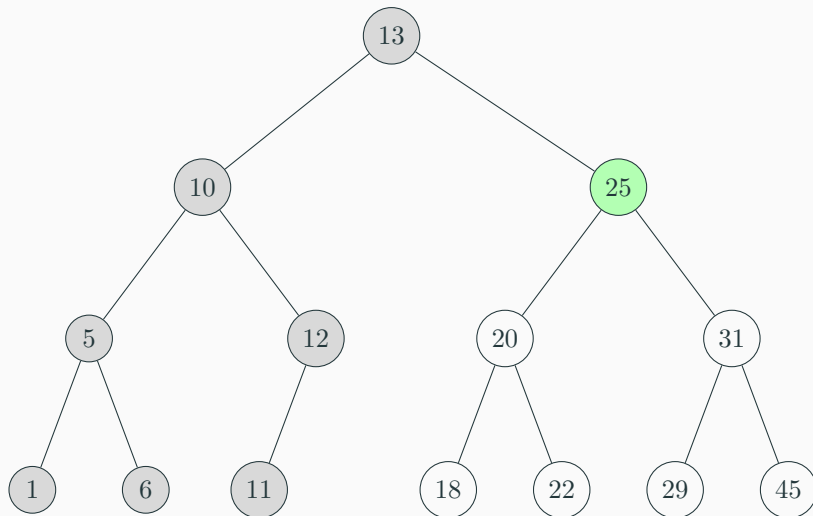
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11



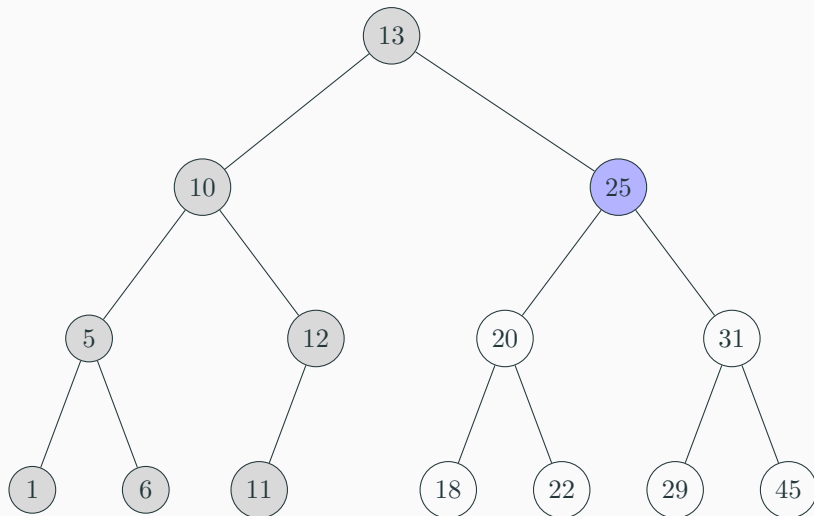
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11



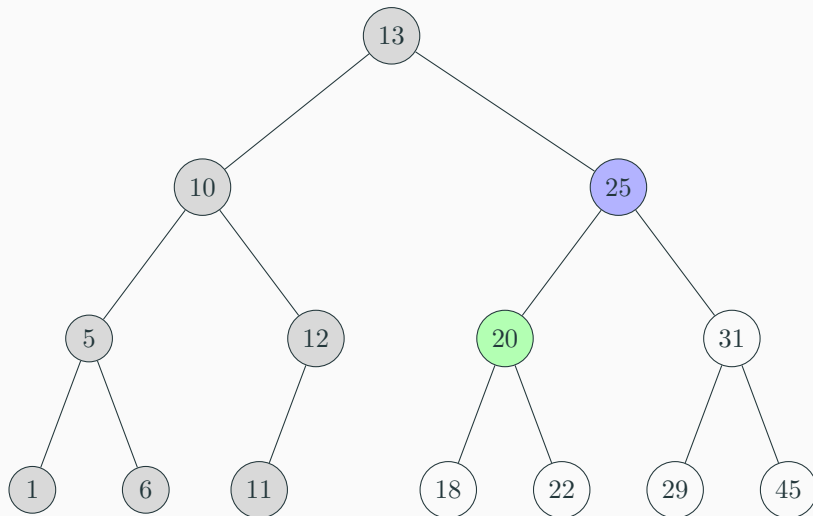
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25



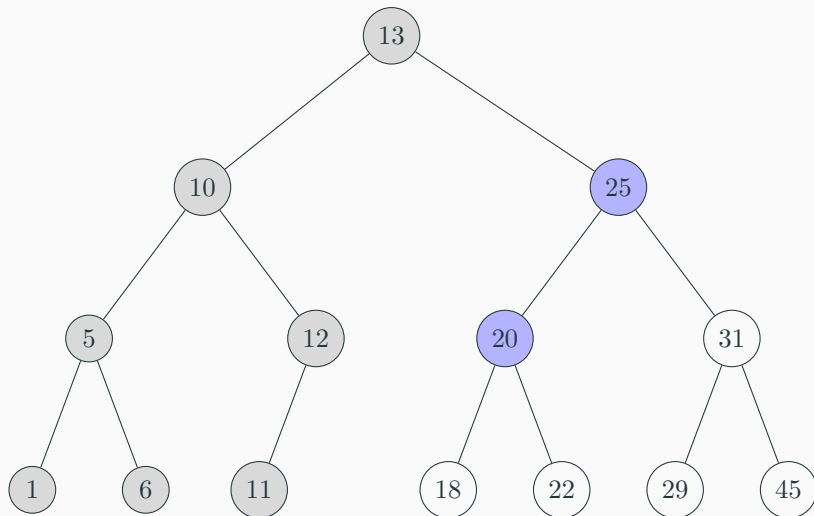
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25



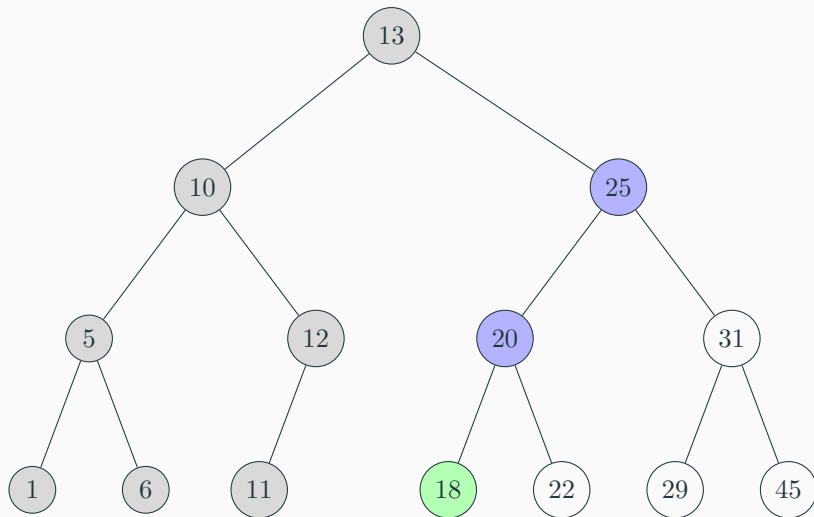
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20



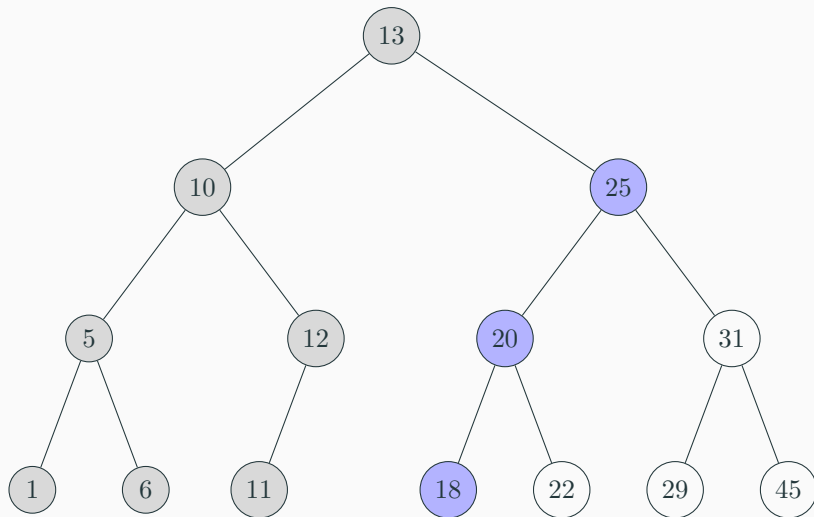
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20



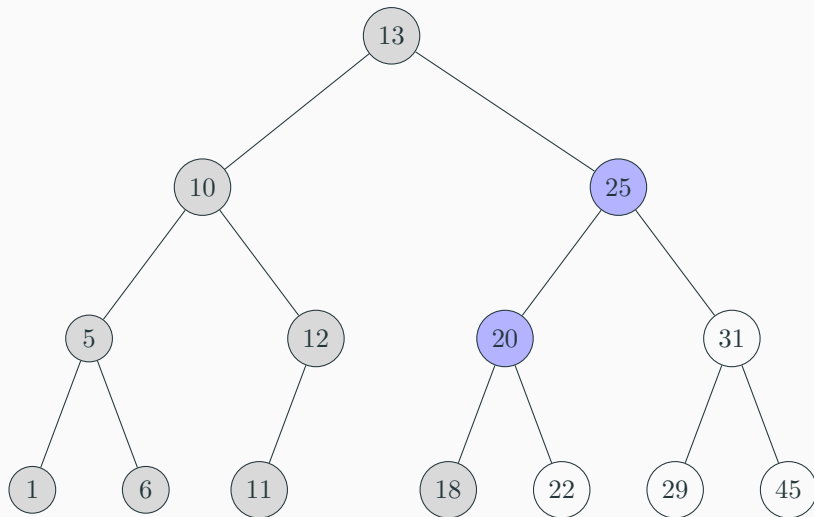
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18



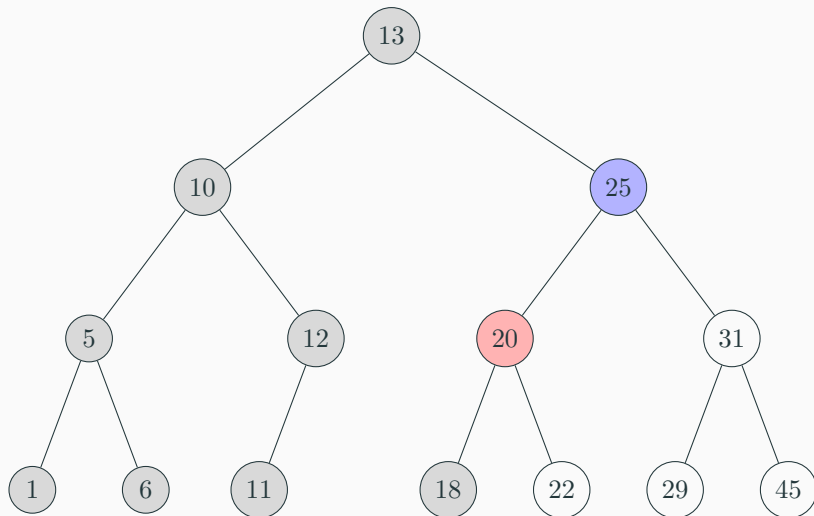
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18



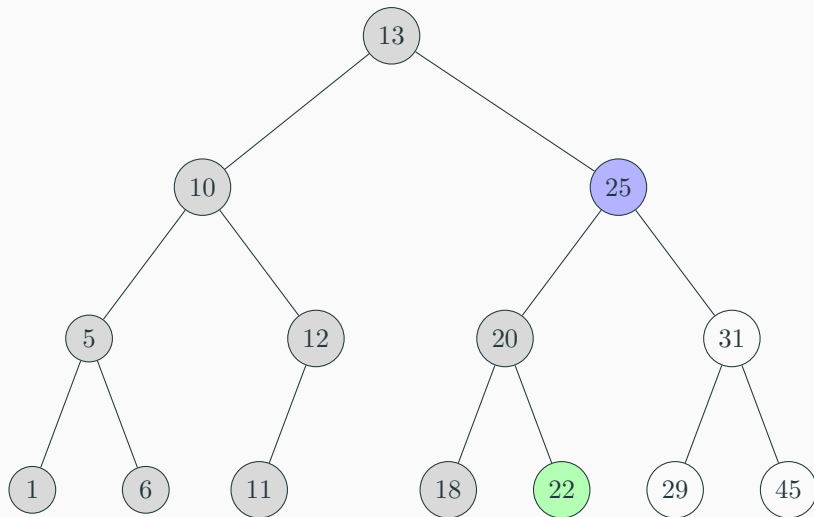
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18



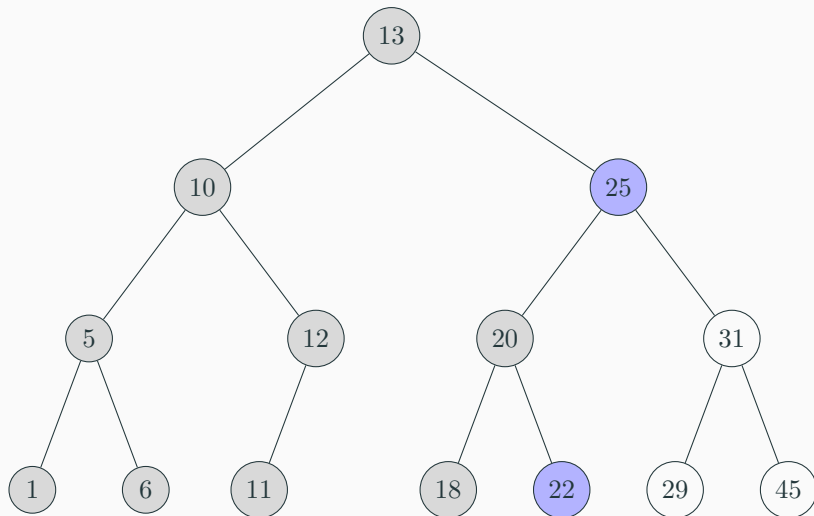
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18



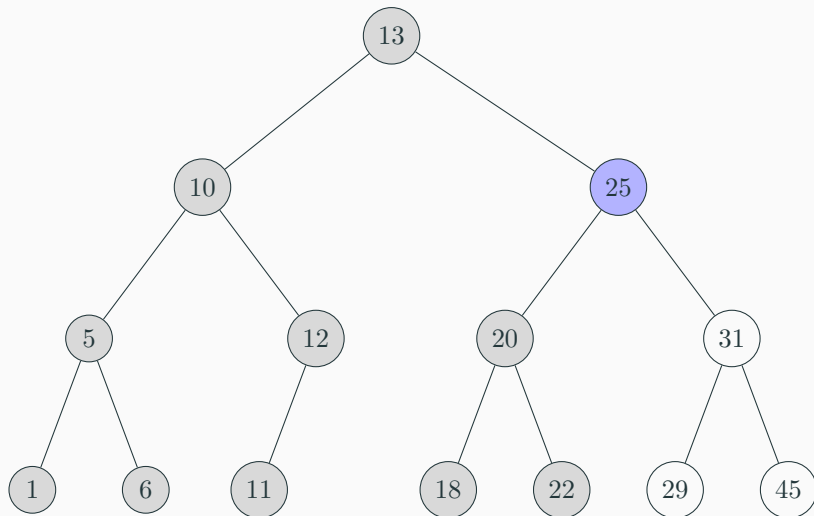
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18, 22



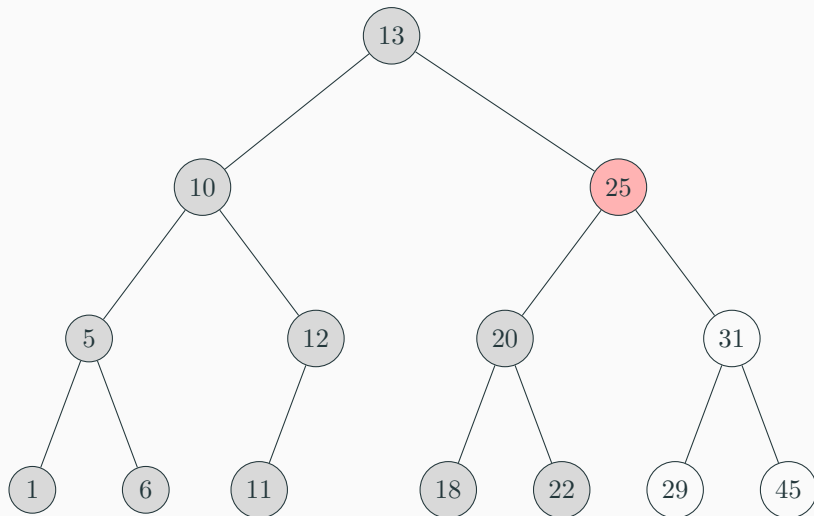
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18, 22



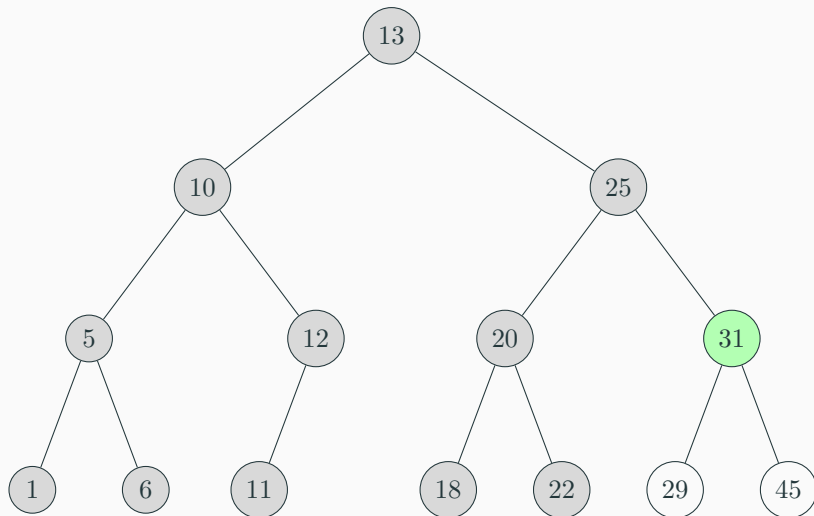
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18, 22



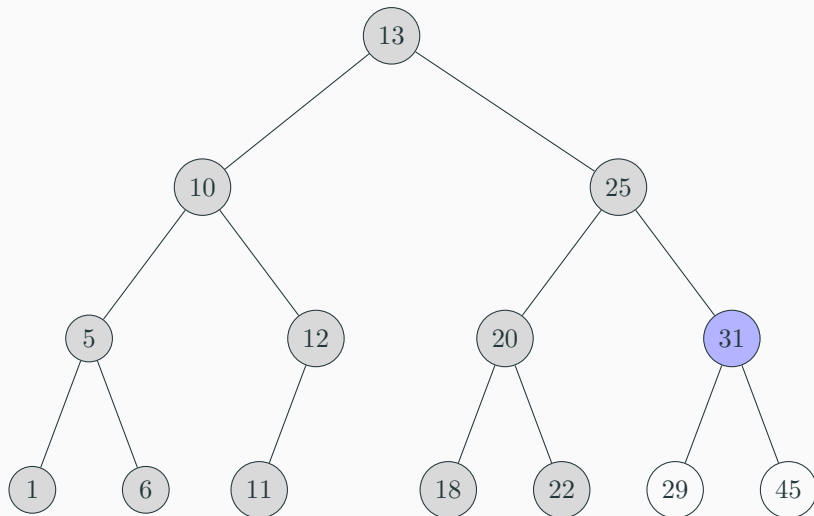
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18, 22



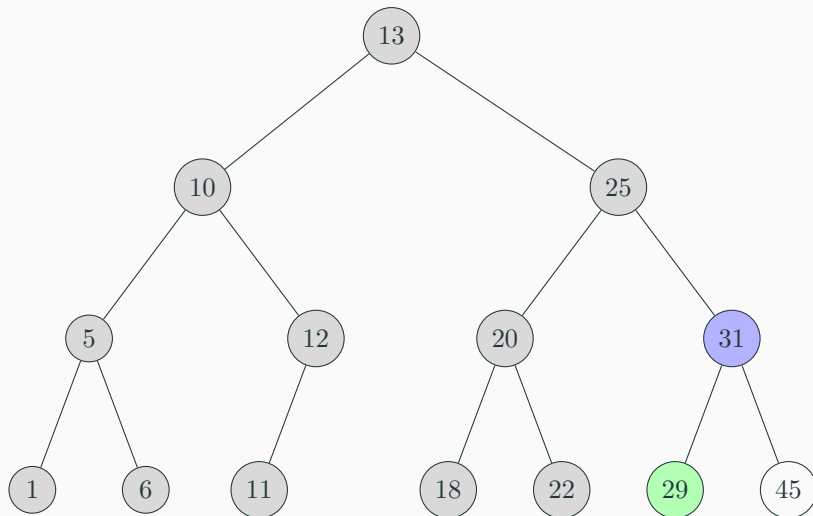
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18, 22, 31



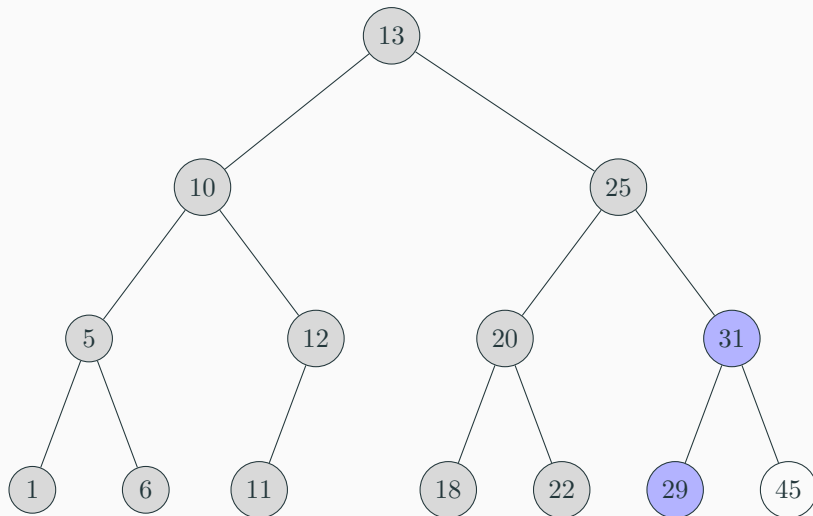
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18, 22, 31



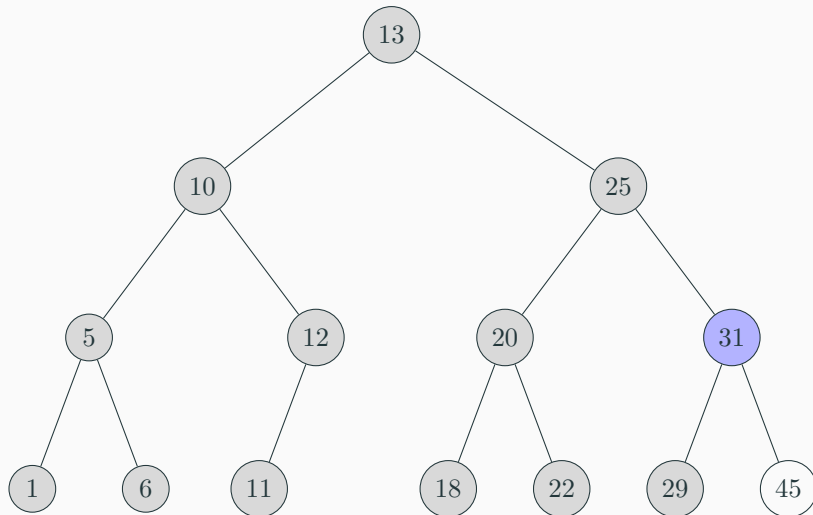
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18, 22, 31, 29



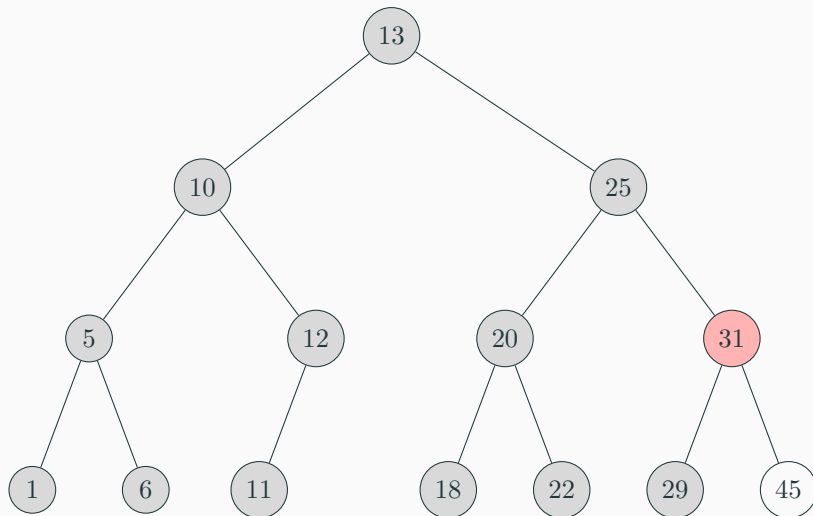
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18, 22, 31, 29



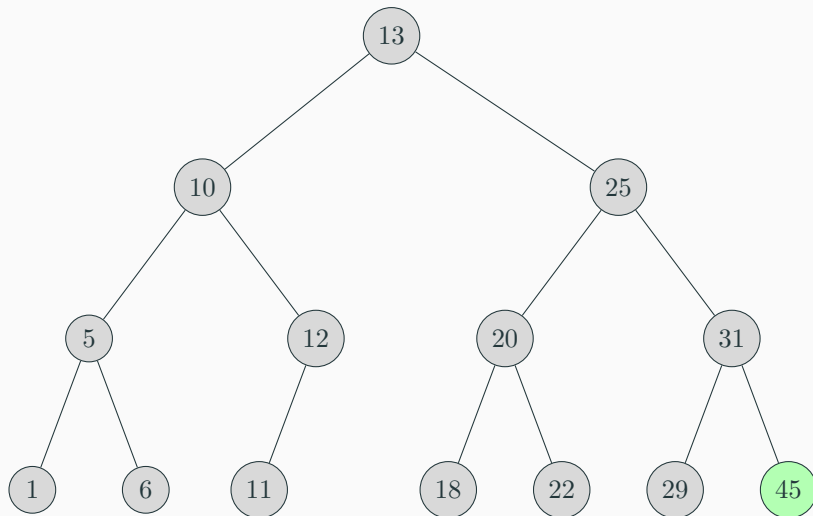
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18, 22, 31, 29



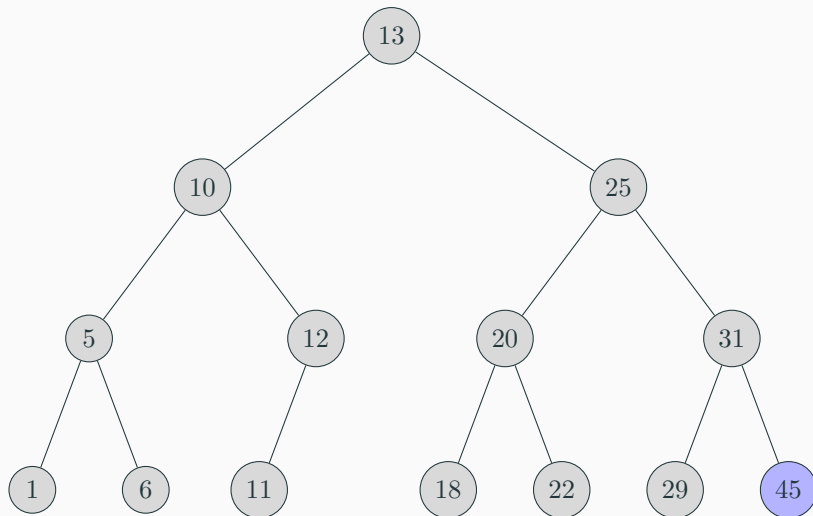
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18, 22, 31, 29



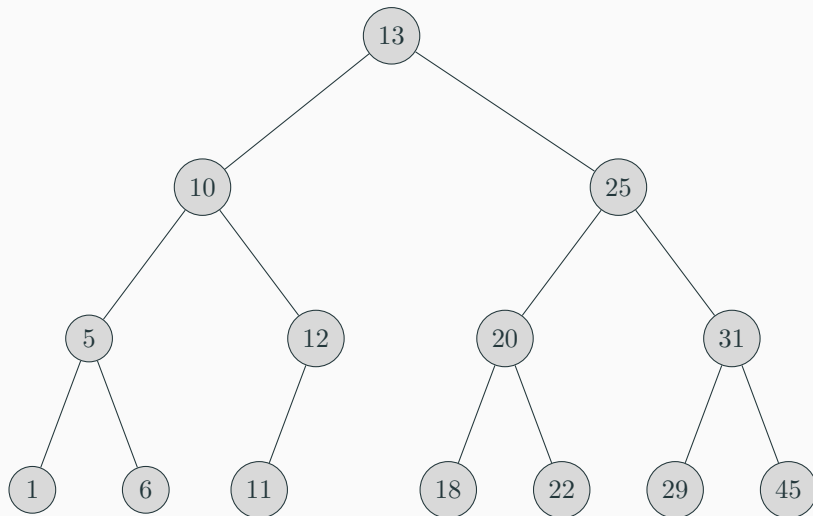
Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18, 22, 31, 29, 45



Exemplo de travessia por profundidade

Travessia pré-ordem: 13, 10, 5, 1, 6, 12, 11, 25, 20, 18, 22, 31, 29, 45



Implementação das travessias notáveis em C++

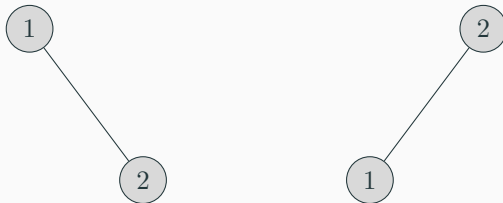
```
1 #include <functional>
2
3 template<typename T>
4 class BST {
5 private:
6     struct Node {
7         T info;
8         Node *left, *right;
9     };
10
11     Node *root;
12
13     void preorder(Node *node, function<void(Node *)>& visit)
14     {
15         if (node) {
16             visit(node);
17             preorder(node->left, visit);
18             preorder(node->right, visit);
19         }
20     }
```

Implementação das travessias notáveis em C++

```
22 void inorder(Node *node, function<void(Node *)>& visit)
23 {
24     if (node)
25     {
26         inorder(node->left, visit);
27         visit(node);
28         inorder(node->right, visit);
29     }
30 }
31
32 void postorder(Node *node, function<void(Node *)>& visit)
33 {
34     if (node)
35     {
36         postorder(node->left, visit);
37         postorder(node->right, visit);
38         visit(node);
39     }
40 }
41 };
```

Reconstrução de árvores binárias a partir de travessias

- Das três travessias notáveis de uma árvore binária de busca, duas permitem a reconstrução da árvore original: a pré-ordem e a pós-ordem
- Veja que a travessia em-ordem não garante a unicidade da árvore: as árvores abaixo tem a mesma travessia em-ordem, e são distintas



Reconstrução de árvores binárias a partir de travessias

- Para uma árvore binária qualquer, um par de travessias, exceto o par pré-ordem/pós-ordem, garante a unicidade de árvore
- Em outras palavras, a travessia em em-ordem, mais um das outras duas travessias, garante a unicidade de árvore
- Isto porque a travessia em-ordem estabelece a ordem relativa dos elementos, a qual fica subentendida numa árvore binária de busca
- Por este motivo a árvore binária de busca pode ser reconstruída usando apenas a pré-ordem ou a pós-ordem
- Para tal, basta inserir os elementos na ordem listada na pré-ordem (ou em ordem reversa, na pós-ordem) e usar a ordenação estabelecida na em-ordem para posicionar os elementos na inserção

Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F

Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F

Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

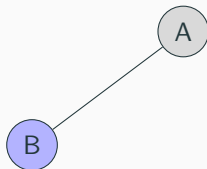
Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

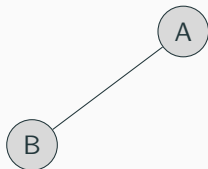
Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

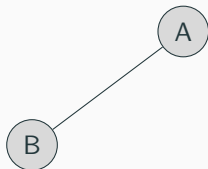
Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

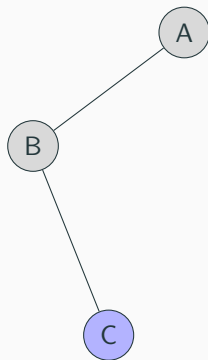
Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

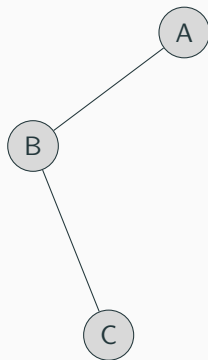
Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

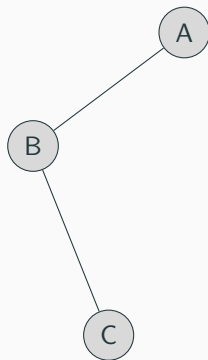
Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

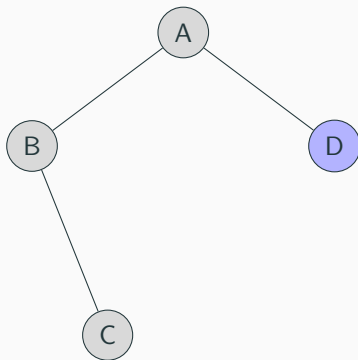
Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, **D**, E, F

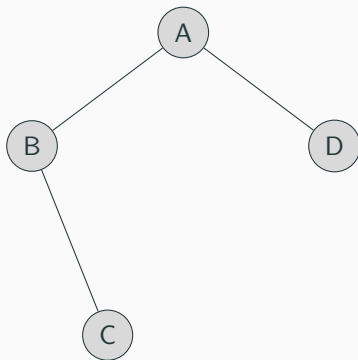
Travessia em-ordem: B, C, **A**, E, **D**, F



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

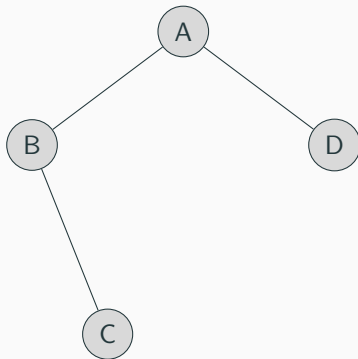
Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, **E**, F

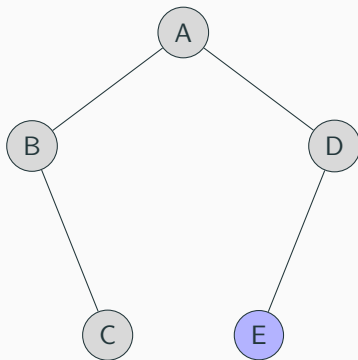
Travessia em-ordem: B, C, **A**, **E**, D, F



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

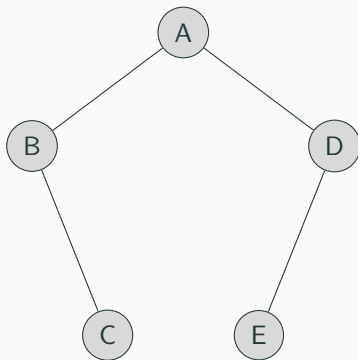
Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

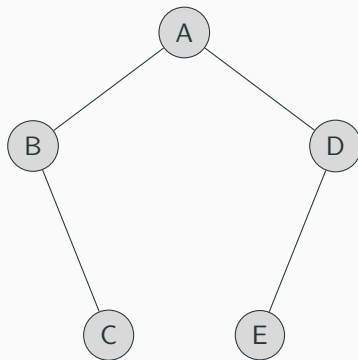
Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, **F**

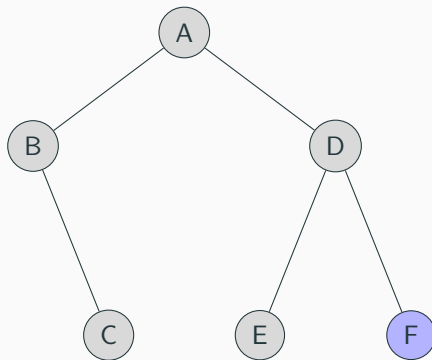
Travessia em-ordem: B, C, **A**, E, D, **F**



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, **F**

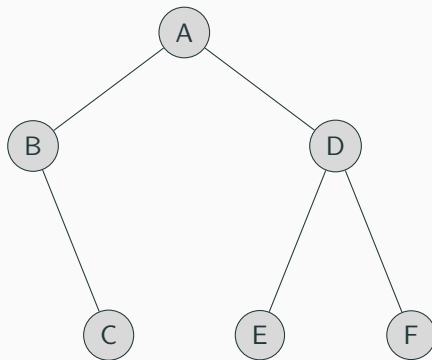
Travessia em-ordem: B, C, A, E, **D**, **F**



Exemplo de construção: pré-ordem e em-ordem

Travessia pré-ordem: A, B, C, D, E, F

Travessia em-ordem: B, C, A, E, D, F



1. **DROZDEK**, Adam. *Algoritmos e Estruturas de Dados em C++*, 2002.
2. **KERNIGHAN**, Bryan; **RITCHIE**, Dennis. *The C Programming Language*, 1978.
3. **STROUSTROUP**, Bjarne. *The C++ Programming Language*, 2013.
4. C++ Reference¹.

¹<https://en.cppreference.com/w/>