

Algoritmos e Estruturas de Dados I

# Árvores Binárias de Busca

Prof. Tiago Eugenio de Melo  
[tmelo@uea.edu.br](mailto:tmelo@uea.edu.br)

[www.tiagodemelo.info](http://www.tiagodemelo.info)

# Observações

- O conteúdo dessa aula é parcialmente proveniente do Capítulo 14 do livro “*Data Structure and Algorithms Using Python*”.
- As palavras com a fonte `Courier` indicam uma palavra-reservada da linguagem de programação.

# Árvores Binárias de Busca

# Introdução

# Introdução

- Busca (pesquisa) de dados em texto é uma operação bastante comum e, por isso, bastante estudada.

# Introdução

- Busca (pesquisa) de dados em texto é uma operação bastante comum e, por isso, bastante estudada.
- Uma pesquisa linear de um array ou uma lista de Python é bastante lenta.

# Introdução

- Busca (pesquisa) de dados em texto é uma operação bastante comum e, por isso, bastante estudada.
- Uma pesquisa linear de um array ou uma lista de Python é bastante lenta.
  - Essa pesquisa pode ser melhorada com uma busca binária.

# Introdução

- Busca (pesquisa) de dados em texto é uma operação bastante comum e, por isso, bastante estudada.
- Uma pesquisa linear de um array ou uma lista de Python é bastante lenta.
  - Essa pesquisa pode ser melhorada com uma busca binária.
  - Porém, arrays e listas de Python ainda têm dificuldade de realizar as operação de inserção e remoção de chaves.



# Introdução

- Busca (pesquisa) de dados em texto é uma operação bastante comum e, por isso, bastante estudada.
- Uma pesquisa linear de um array ou uma lista de Python é bastante lenta.
  - Essa pesquisa pode ser melhorada com uma busca binária.
  - Porém, arrays e listas de Python ainda têm dificuldade de realizar as operação de inserção e remoção de chaves.
  - Exemplo: a remoção de uma chave obriga a reorganização da lista, pois a busca binária somente funciona em listas (arrays) ordenados.

# Introdução

- Busca (pesquisa) de dados em texto é uma operação bastante comum e, por isso, bastante estudada.
- Uma pesquisa linear de um array ou uma lista de Python é bastante lenta.
  - Essa pesquisa pode ser melhorada com uma busca binária.
  - Porém, arrays e listas de Python ainda têm dificuldade de realizar as operação de inserção e remoção de chaves.
  - Exemplo: a remoção de uma chave obriga a reorganização da lista, pois a busca binária somente funciona em listas (arrays) ordenados.
- O objetivo primário de uma árvore de busca é fornecer uma eficiente operação de busca para rapidamente localizar um específico item na árvore.

# Árvore Binária de Busca (ABB)

# Árvore Binária de Busca (ABB)

- Uma árvore binária de busca (ABB) – binary search tree (BST) – é uma árvore binária em que cada nó contém um campo chave e a árvore é estruturada de tal maneira que para cada nó interior  $V$ :

# Árvore Binária de Busca (ABB)

- Uma árvore binária de busca (ABB) – binary search tree (BST) – é uma árvore binária em que cada nó contém um campo chave e a árvore é estruturada de tal maneira que para cada nó interior  $V$ :
  - Todas as chaves menores que a chave do nó  $V$  devem ser armazenadas à esquerda de  $V$ .

# Árvore Binária de Busca (ABB)

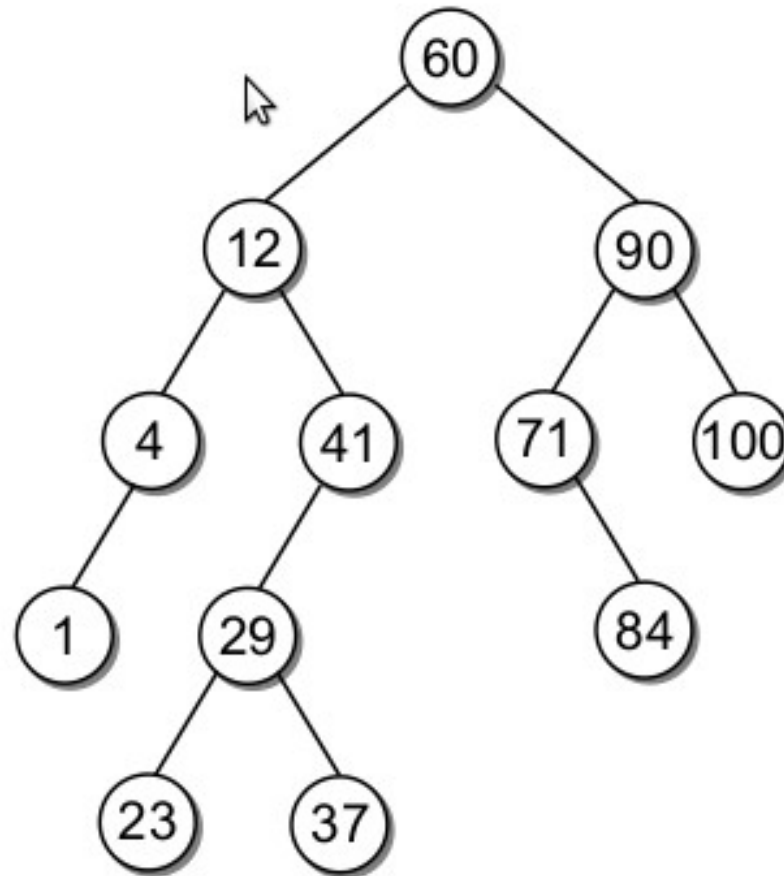
- Uma árvore binária de busca (ABB) – binary search tree (BST) – é uma árvore binária em que cada nó contém um campo chave e a árvore é estruturada de tal maneira que para cada nó interior  $V$ :
  - Todas as chaves menores que a chave do nó  $V$  devem ser armazenadas à esquerda de  $V$ .
  - Todas as chaves maiores que a chave do nó  $V$  devem ser armazenadas à direita de  $V$ .

# Árvore Binária de Busca (ABB)

- Exemplo de ABB:

# Árvore Binária de Busca (ABB)

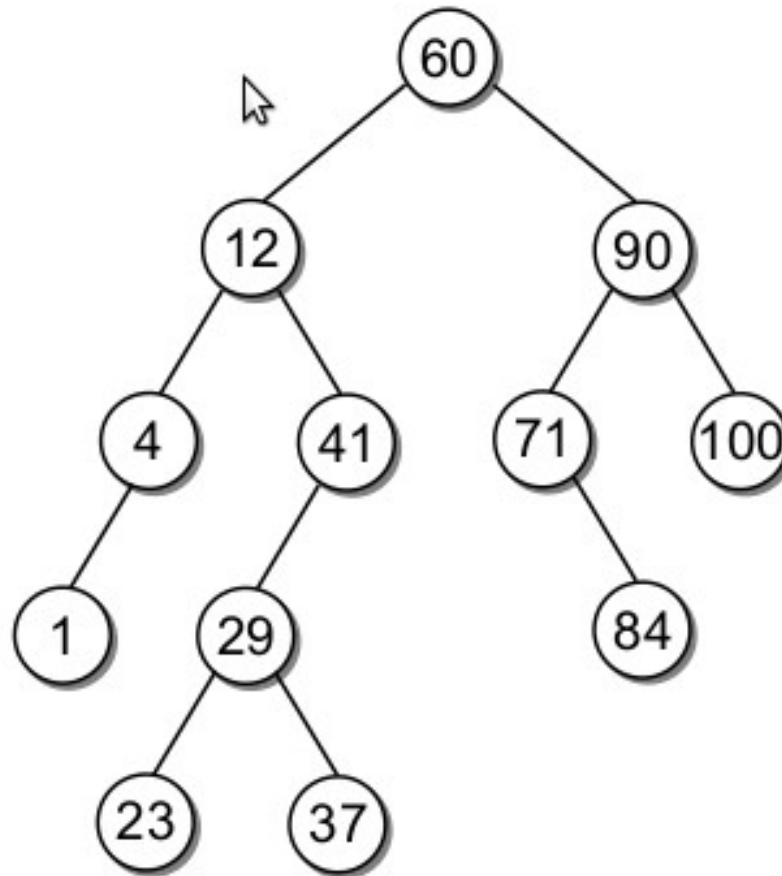
- Exemplo de ABB:





# Árvore Binária de Busca (ABB)

- Exemplo de ABB:



1 → 4 → 12 → 23 → 29 → 37 → 41 → 60 → 71 → 84 → 90 → 100

# Árvore Binária de Busca (ABB)

# Árvore Binária de Busca (ABB)

- Observações:

# Árvore Binária de Busca (ABB)

- Observações:
  - A nossa definição de ABB impede o armazenamento de chaves duplicadas.

# Árvore Binária de Busca (ABB)

- Observações:
  - A nossa definição de ABB impede o armazenamento de chaves duplicadas.
    - É uma suposição realista para vários problemas.

# Árvore Binária de Busca (ABB)

- Observações:
  - A nossa definição de ABB impede o armazenamento de chaves duplicadas.
    - É uma suposição realista para vários problemas.
    - Isto torna a implementação mais simples.

# Árvore Binária de Busca (ABB)

- Observações:
  - A nossa definição de ABB impede o armazenamento de chaves duplicadas.
    - É uma suposição realista para vários problemas.
    - Isto torna a implementação mais simples.
    - Essa restrição poderia ser alterada para permitir o armazenamento de chaves duplicadas.

# Árvore Binária de Busca (ABB)

- Observações:
  - A nossa definição de ABB impede o armazenamento de chaves duplicadas.
    - É uma suposição realista para vários problemas.
    - Isto torna a implementação mais simples.
    - Essa restrição poderia ser alterada para permitir o armazenamento de chaves duplicadas.
    - Por questões didáticas, nós estamos apresentando apenas uma versão que considera chaves únicas..




# TAD de ABB

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13



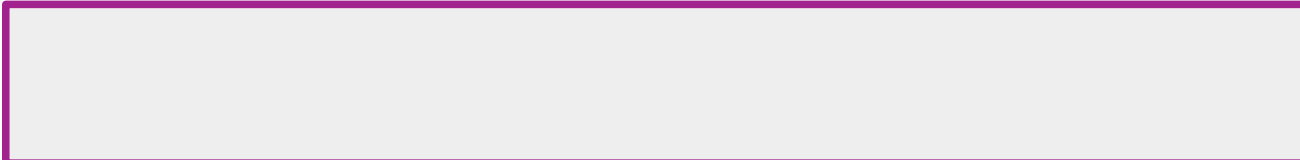
# TAD de ABB

```
1 class BSTMap :  
2     # Creates an empty map instance.  
3     def __init__( self ):  
4         self._root = None  
5         self._size = 0  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13
```



# TAD de ABB

```
1 class BSTMap :  
2     # Creates an empty map instance.  
3     def __init__( self ):  
4         self._root = None  
5         self._size = 0  
6  
7         # Returns the number of entries in the map.  
8     def __len__( self ):  
9         return self._size  
10  
11  
12  
13
```



# TAD de ABB

```
1 class BSTMap :
2     # Creates an empty map instance.
3     def __init__( self ):
4         self._root = None
5         self._size = 0
6
7     # Returns the number of entries in the map.
8     def __len__( self ):
9         return self._size
10
11     # Returns an iterator for traversing the keys in the map.
12     def __iter__( self ):
13         return _BSTMapIterator( self._root )
```

# TAD de ABB

```
1 class BSTMap :
2     # Creates an empty map instance.
3     def __init__( self ):
4         self._root = None
5         self._size = 0
6
7     # Returns the number of entries in the map.
8     def __len__( self ):
9         return self._size
10
11     # Returns an iterator for traversing the keys in the map.
12     def __iter__( self ):
13         return _BSTMapIterator( self._root )
```



# TAD de ABB

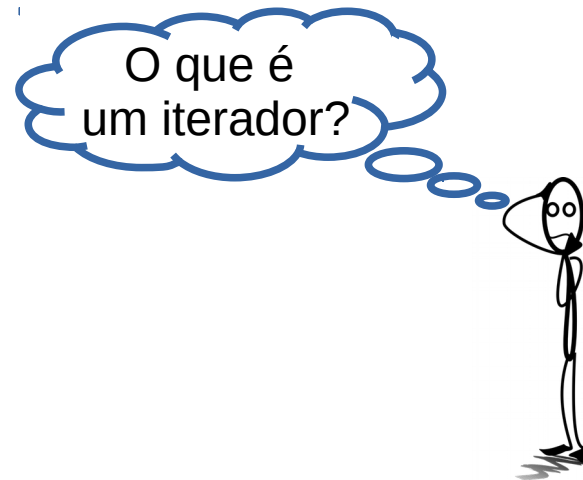
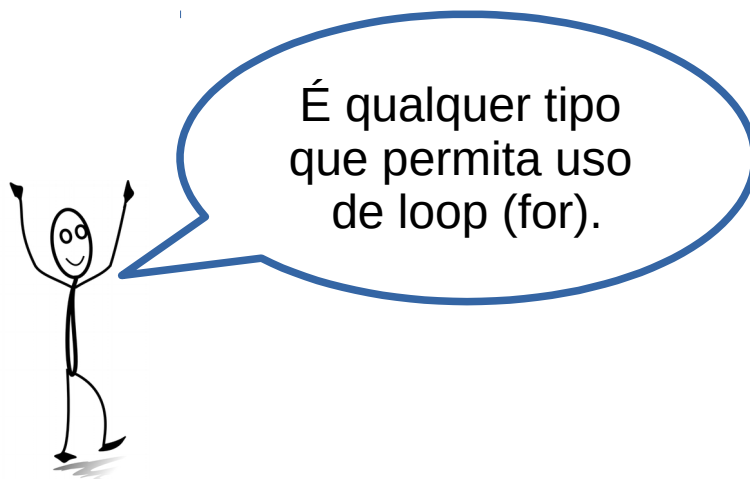
```
1 class BSTMap :
2     # Creates an empty map instance.
3     def __init__( self ):
4         self._root = None
5         self._size = 0
6
7     # Returns the number of entries in the map.
8     def __len__( self ):
9         return self._size
10
11    # Returns an iterator for traversing the keys in the map.
12    def __iter__( self ):
13        return _BSTMapIterator( self._root )
```

O que é  
um iterador?



# TAD de ABB

```
1 class BSTMap :
2     # Creates an empty map instance.
3     def __init__( self ):
4         self._root = None
5         self._size = 0
6
7     # Returns the number of entries in the map.
8     def __len__( self ):
9         return self._size
10
11    # Returns an iterator for traversing the keys in the map.
12    def __iter__( self ):
13        return _BSTMapIterator( self._root )
```




# TAD de ABB

15  
16  
17  
18  
19  
20  
21



# TAD de ABB

```
15 # Storage class for the binary search tree nodes of the map.
16 class _BSTMapNode :
17     def __init__( self, key, value ):
18         self.key = key
19         self.value = value
20         self.left = None
21         self.right = None
```



# Operação de Busca

# Operação de Busca

- Dada uma árvore binária, alguém sempre vai querer buscar na árvore para determinar se ela contém uma determinada chave (ou localizar um elemento específico).

# Operação de Busca

- Dada uma árvore binária, alguém sempre vai querer buscar na árvore para determinar se ela contém uma determinada chave (ou localizar um elemento específico).
- Lembre-se:

# Operação de Busca

- Dada uma árvore binária, alguém sempre vai querer buscar na árvore para determinar se ela contém uma determinada chave (ou localizar um elemento específico).
- Lembre-se:
  - Existe um único caminho da raiz até algum dos nós da árvore.

# Operação de Busca

- Dada uma árvore binária, alguém sempre vai querer buscar na árvore para determinar se ela contém uma determinada chave (ou localizar um elemento específico).
- Lembre-se:
  - Existe um único caminho da raiz até algum dos nós da árvore.
- A questão é:

# Operação de Busca

- Dada uma árvore binária, alguém sempre vai querer buscar na árvore para determinar se ela contém uma determinada chave (ou localizar um elemento específico).
- Lembre-se:
  - Existe um único caminho da raiz até algum dos nós da árvore.
- A questão é:
  - Como nós sabemos qual caminho seguir?

# Operação de Busca

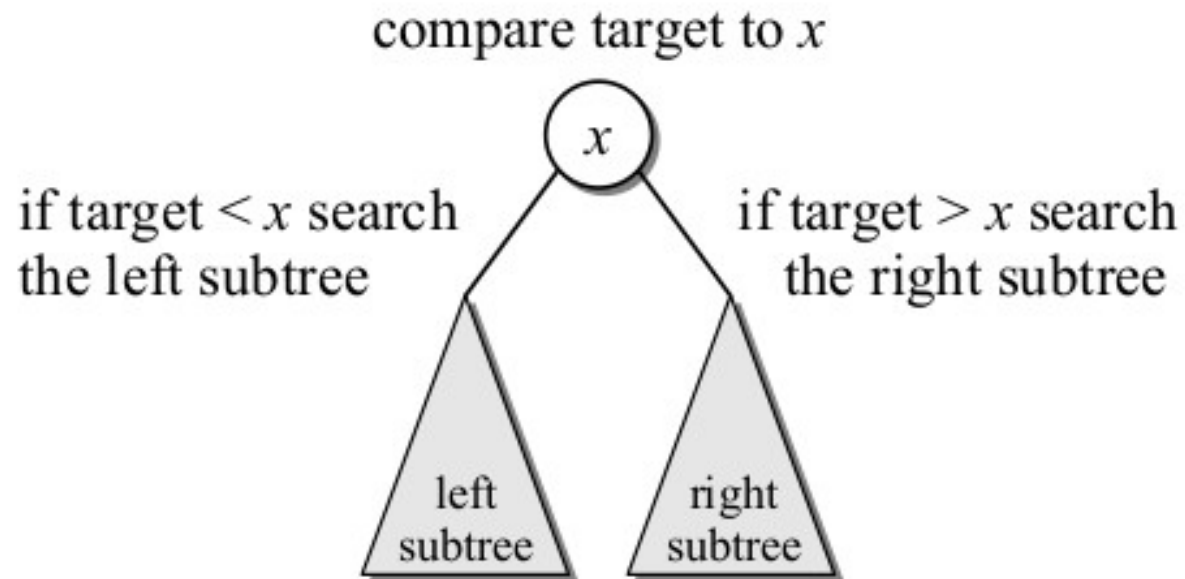


# Operação de Busca

- O início da busca sempre se iniciará pela raiz.

# Operação de Busca

- O início da busca sempre se iniciará pela raiz.



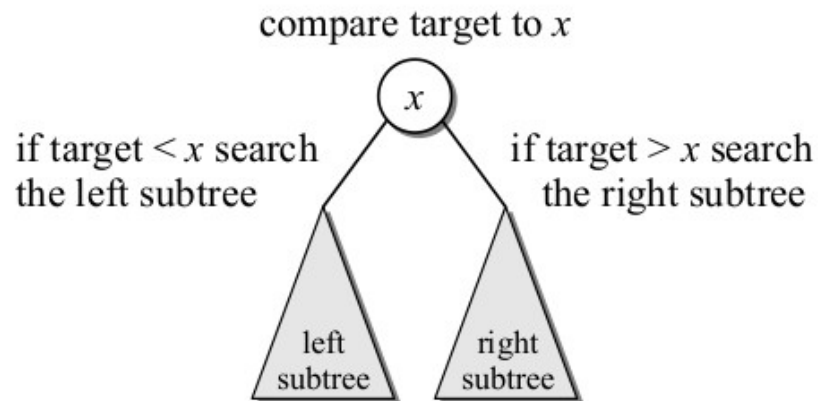
# Operação de Busca

# Operação de Busca

- O elemento procurado é comparado com o nó da raiz.

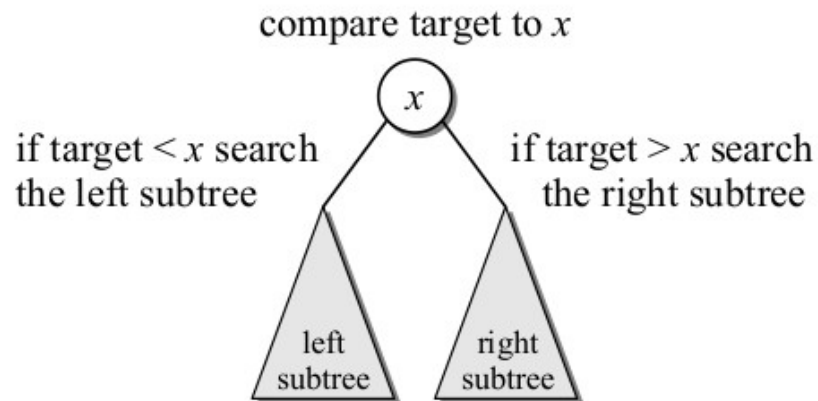
# Operação de Busca

- O elemento procurado é comparado com o nó da raiz.



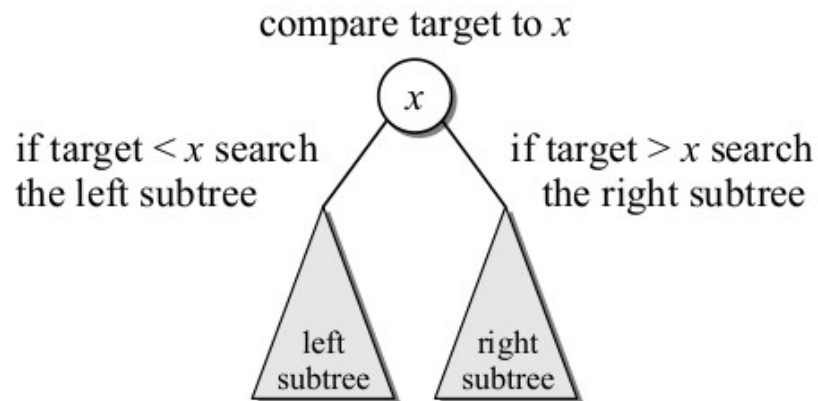
# Operação de Busca

- O elemento procurado é comparado com o nó da raiz.
  - Se ele for igual, então encontramos.



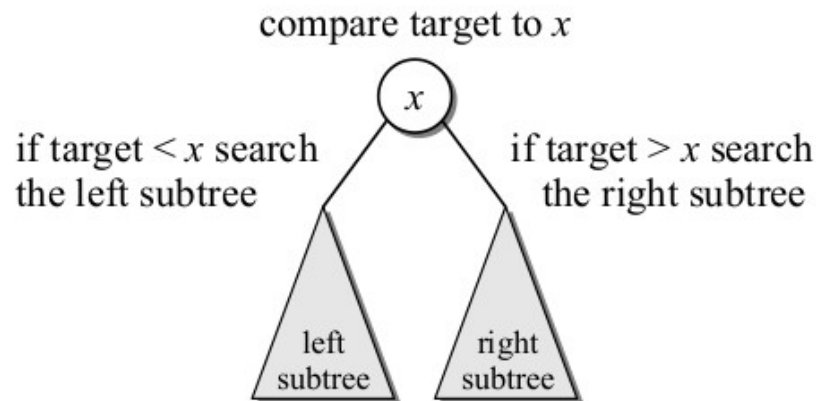
# Operação de Busca

- O elemento procurado é comparado com o nó da raiz.
  - Se ele for igual, então encontramos.
  - Se ele for maior, então estará à direita da raiz.



# Operação de Busca

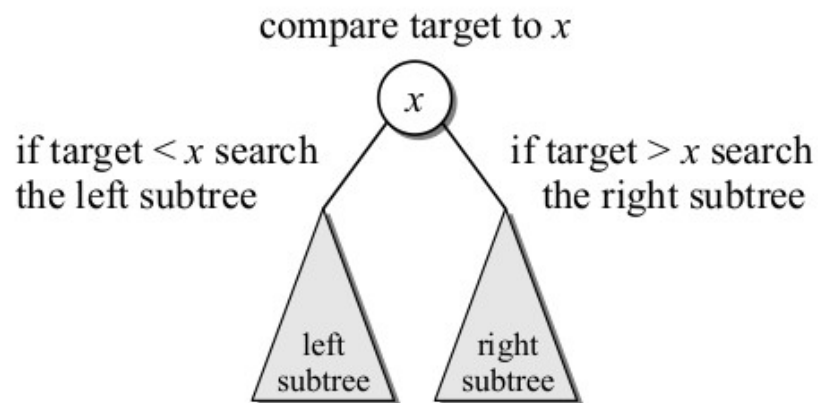
- O elemento procurado é comparado com o nó da raiz.
  - Se ele for igual, então encontramos.
  - Se ele for maior, então estará à direita da raiz.
  - Se ele for menor, então estará à esquerda da raiz.





# Operação de Busca

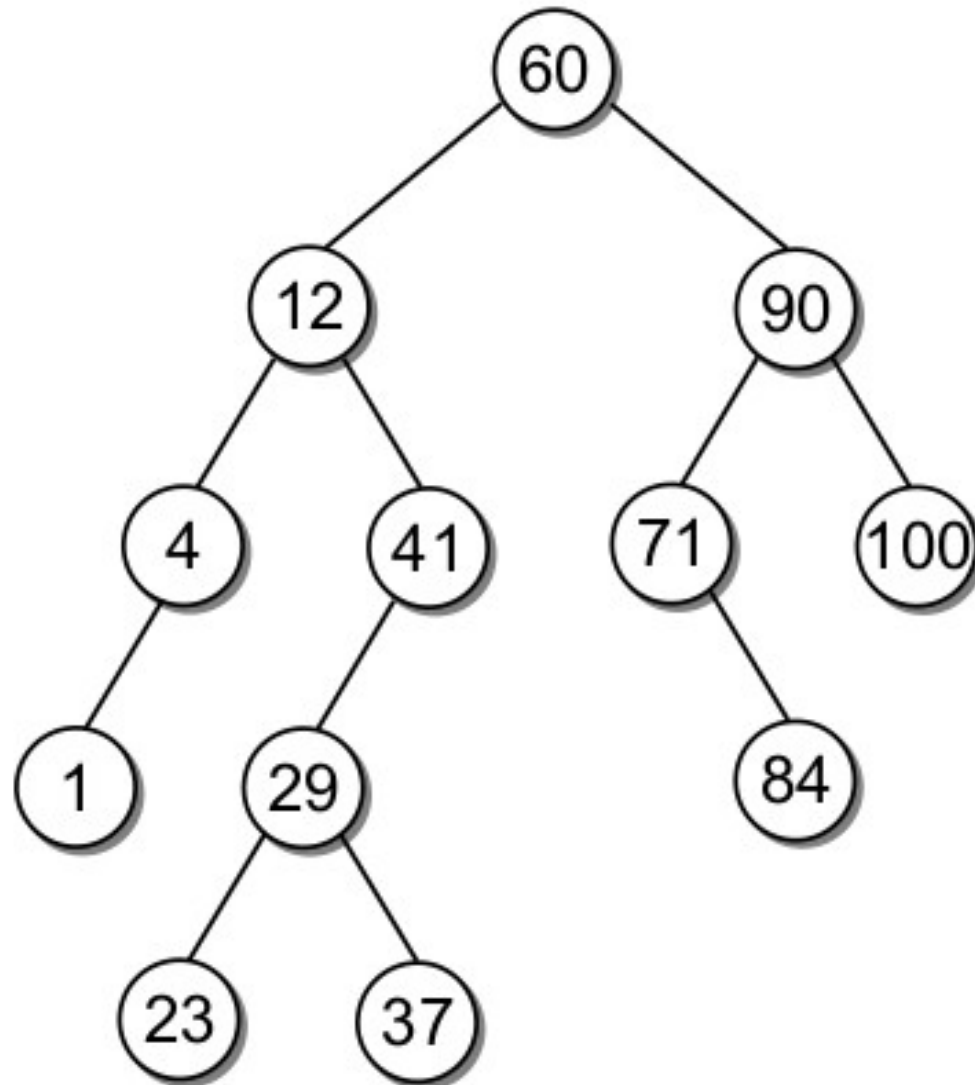
- O elemento procurado é comparado com o nó da raiz.
  - Se ele for igual, então encontramos.
  - Se ele for maior, então estará à direita da raiz.
  - Se ele for menor, então estará à esquerda da raiz.
  - Processo é repetido até localizarmos o alvo ou encontrarmos um nó filho nulo.



# Operação de Busca

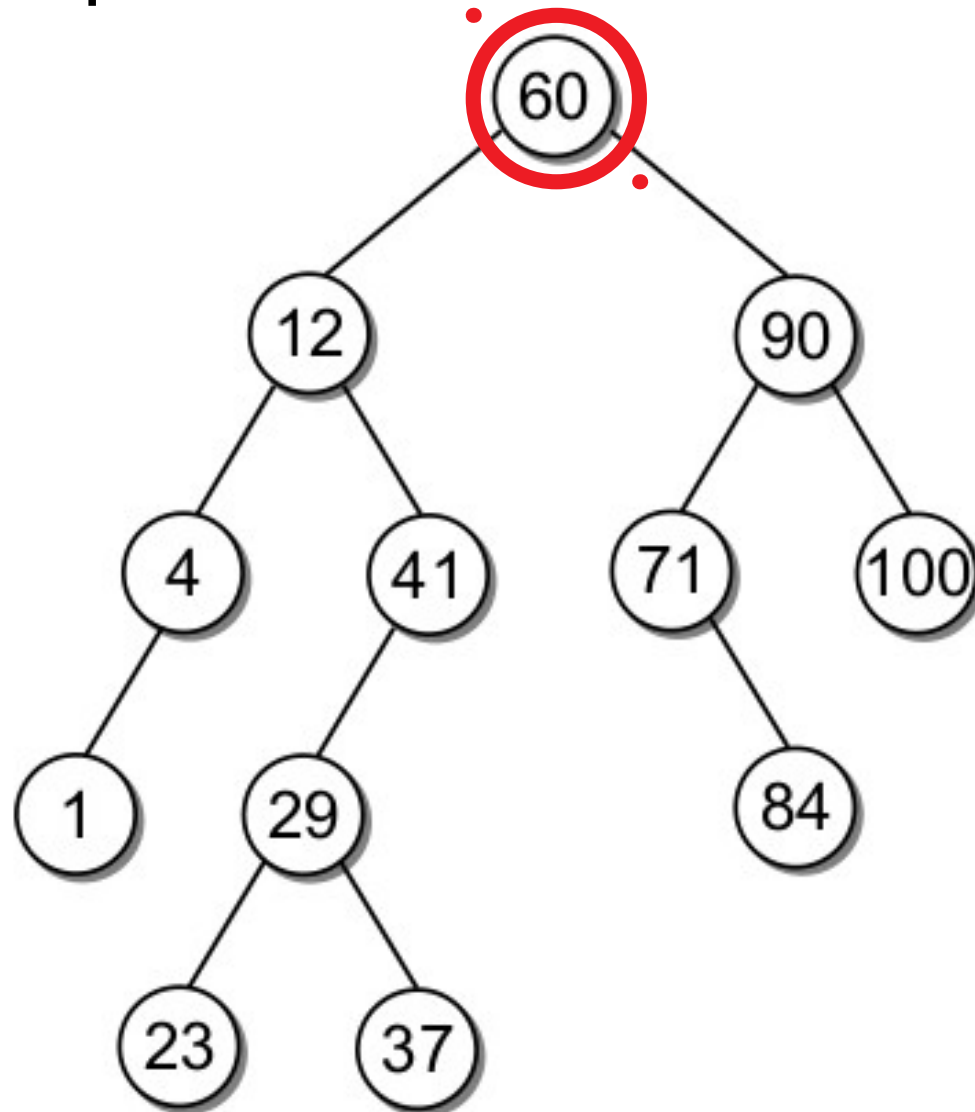
# Operação de Busca

- Suponha que vamos buscar o elemento 29:



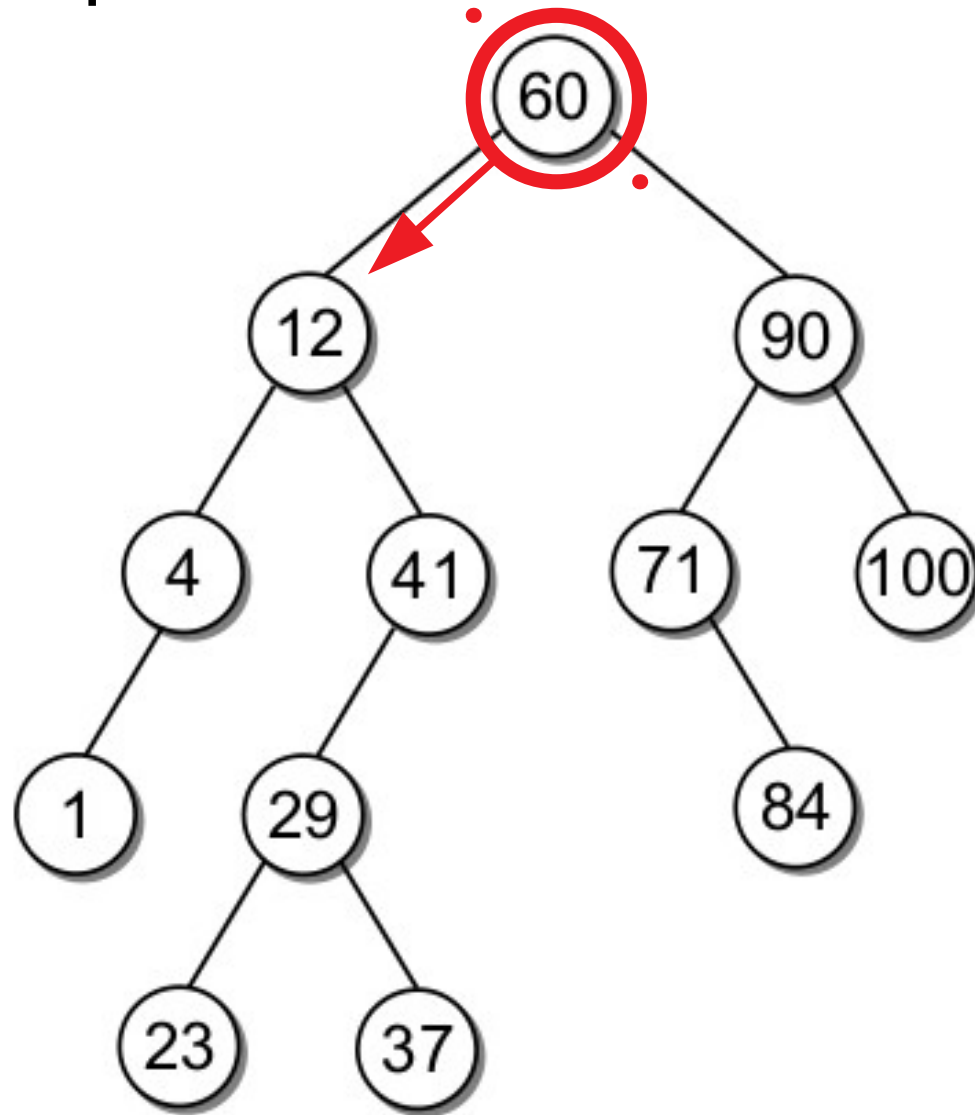
# Operação de Busca

- Suponha que vamos buscar o elemento 29:



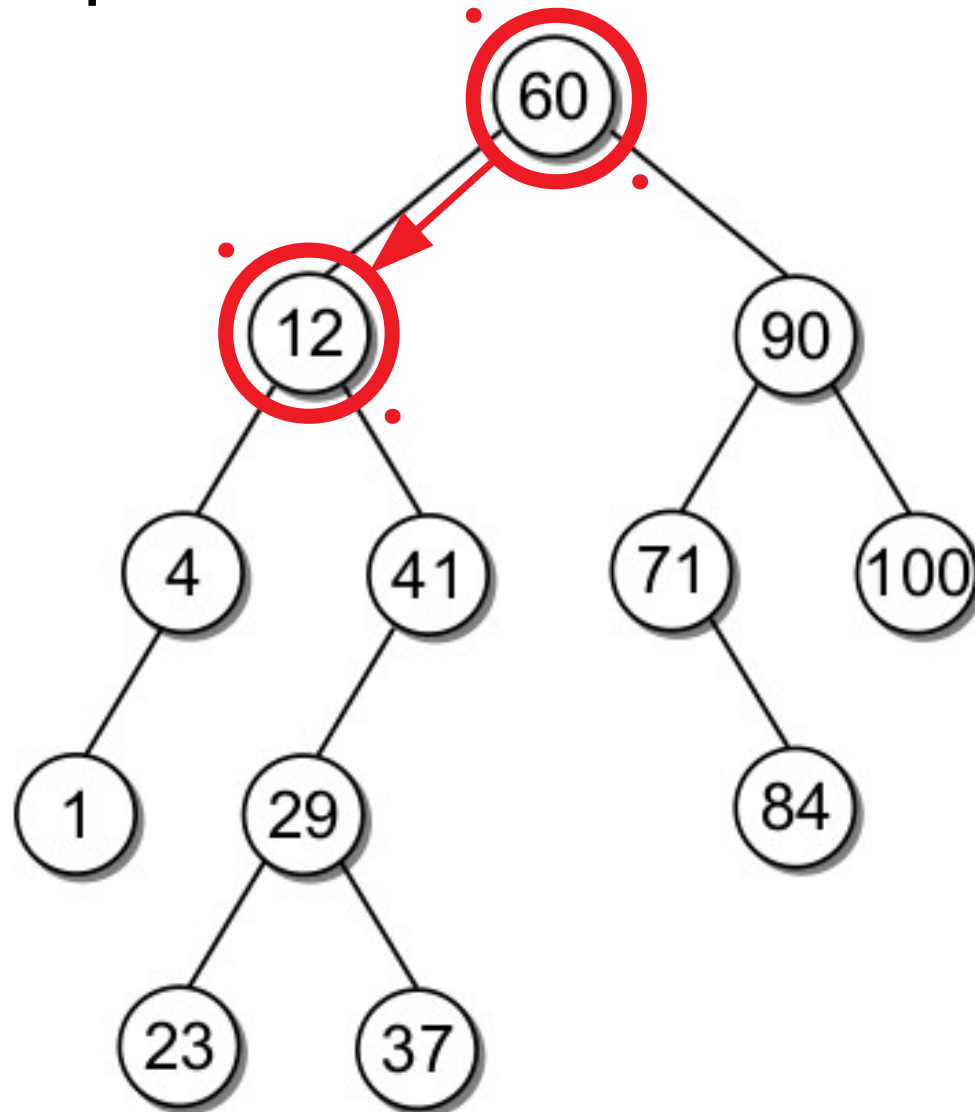
# Operação de Busca

- Suponha que vamos buscar o elemento 29:



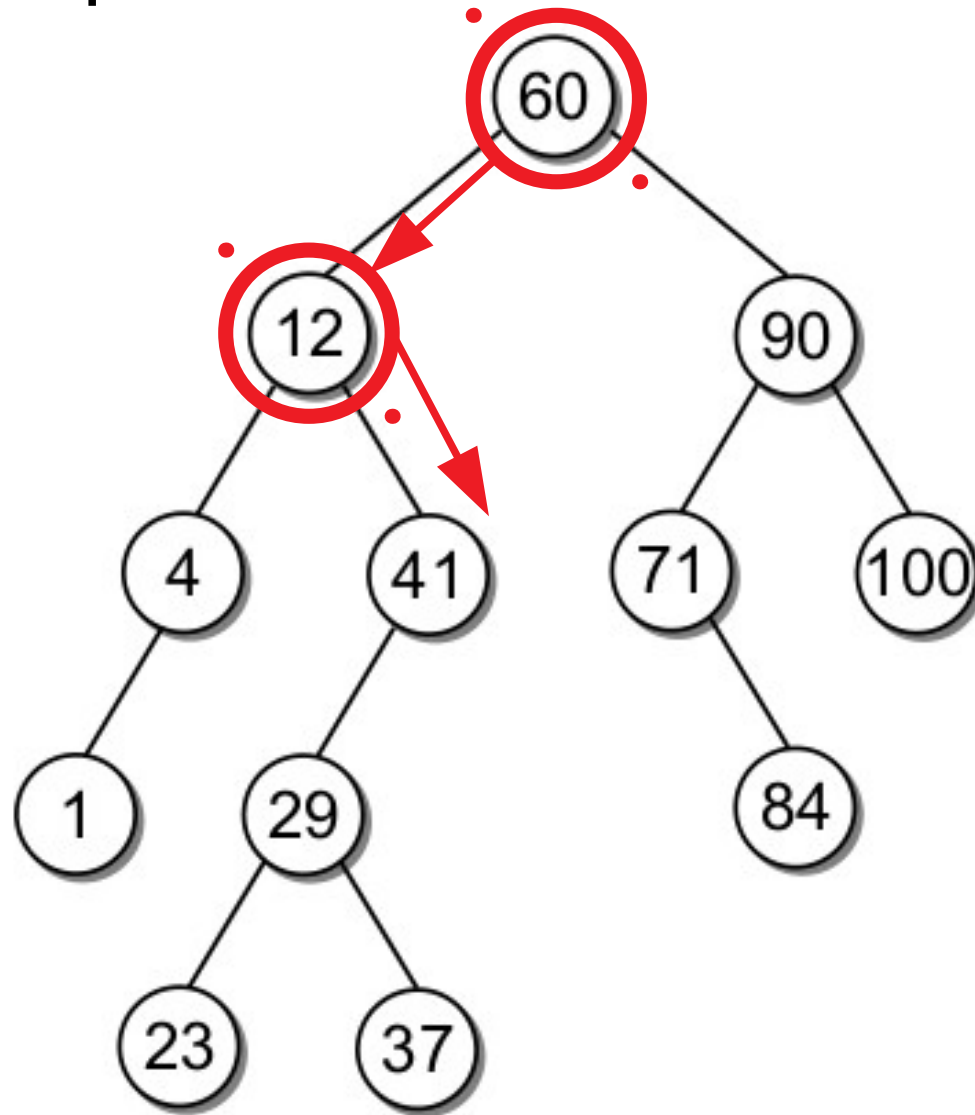
# Operação de Busca

- Suponha que vamos buscar o elemento 29:



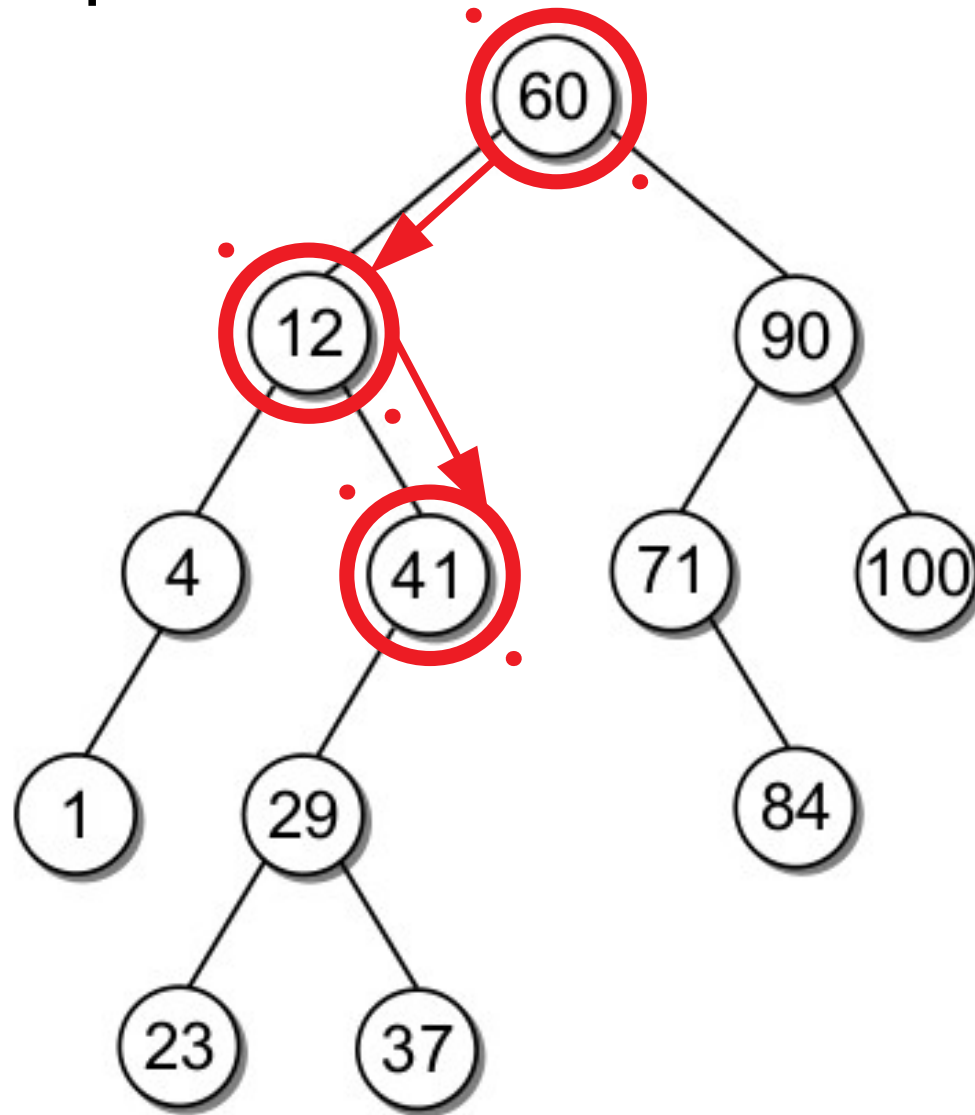
# Operação de Busca

- Suponha que vamos buscar o elemento 29:



# Operação de Busca

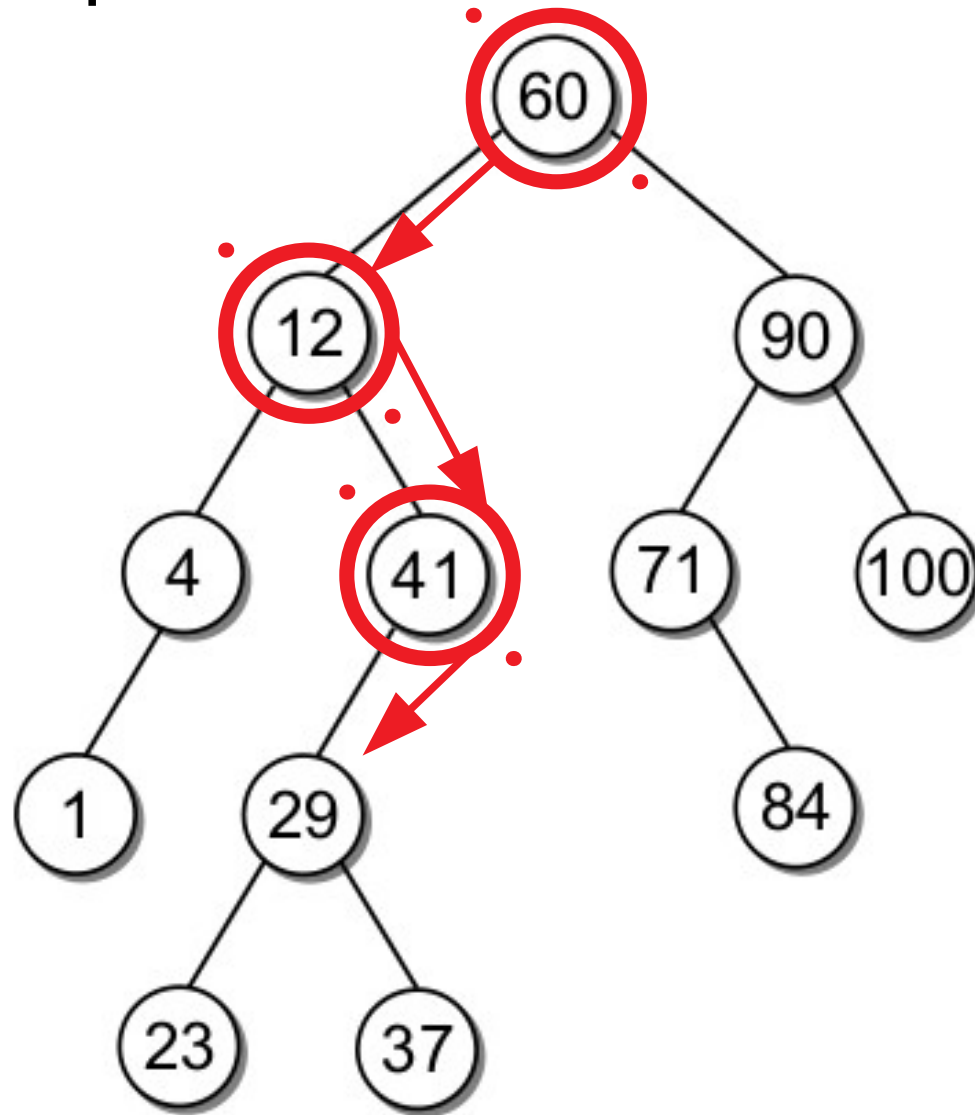
- Suponha que vamos buscar o elemento 29:





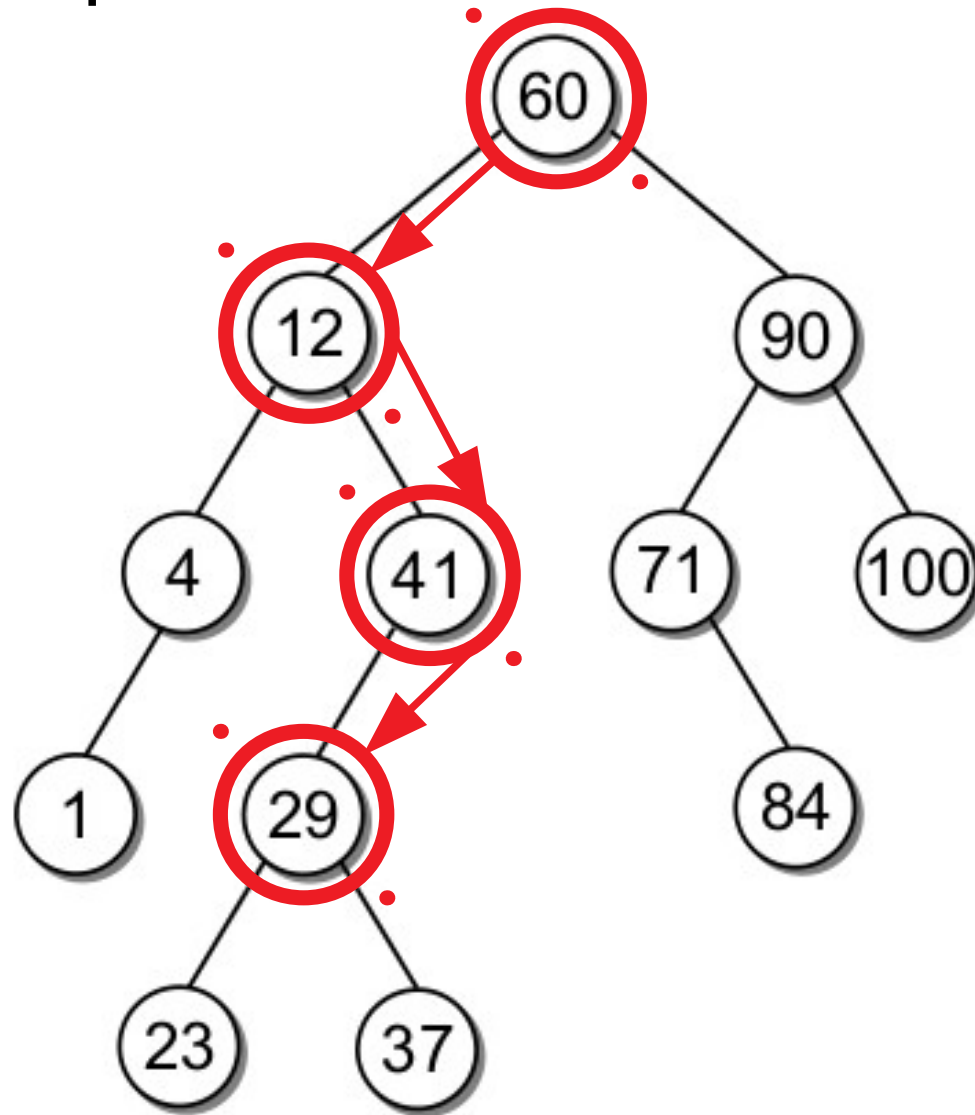
# Operação de Busca

- Suponha que vamos buscar o elemento 29:



# Operação de Busca

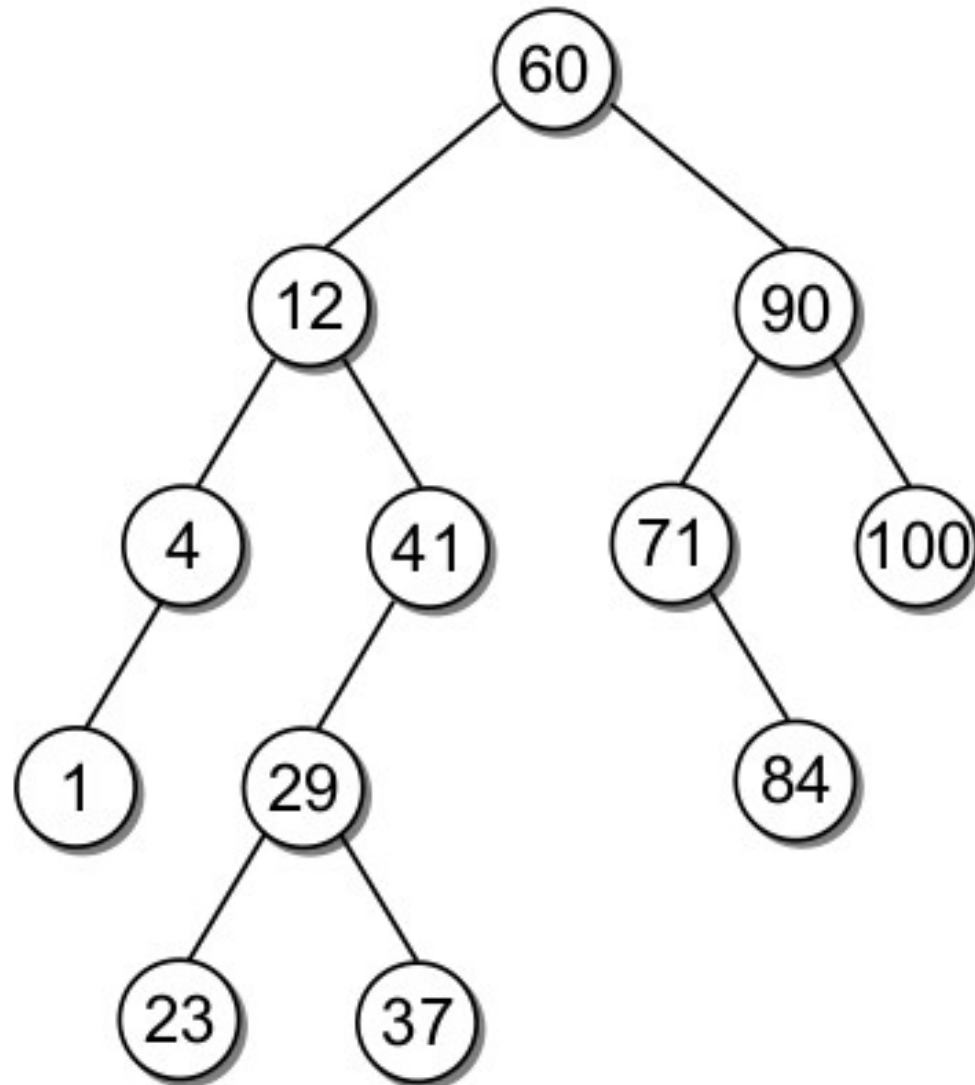
- Suponha que vamos buscar o elemento 29:



# Operação de Busca

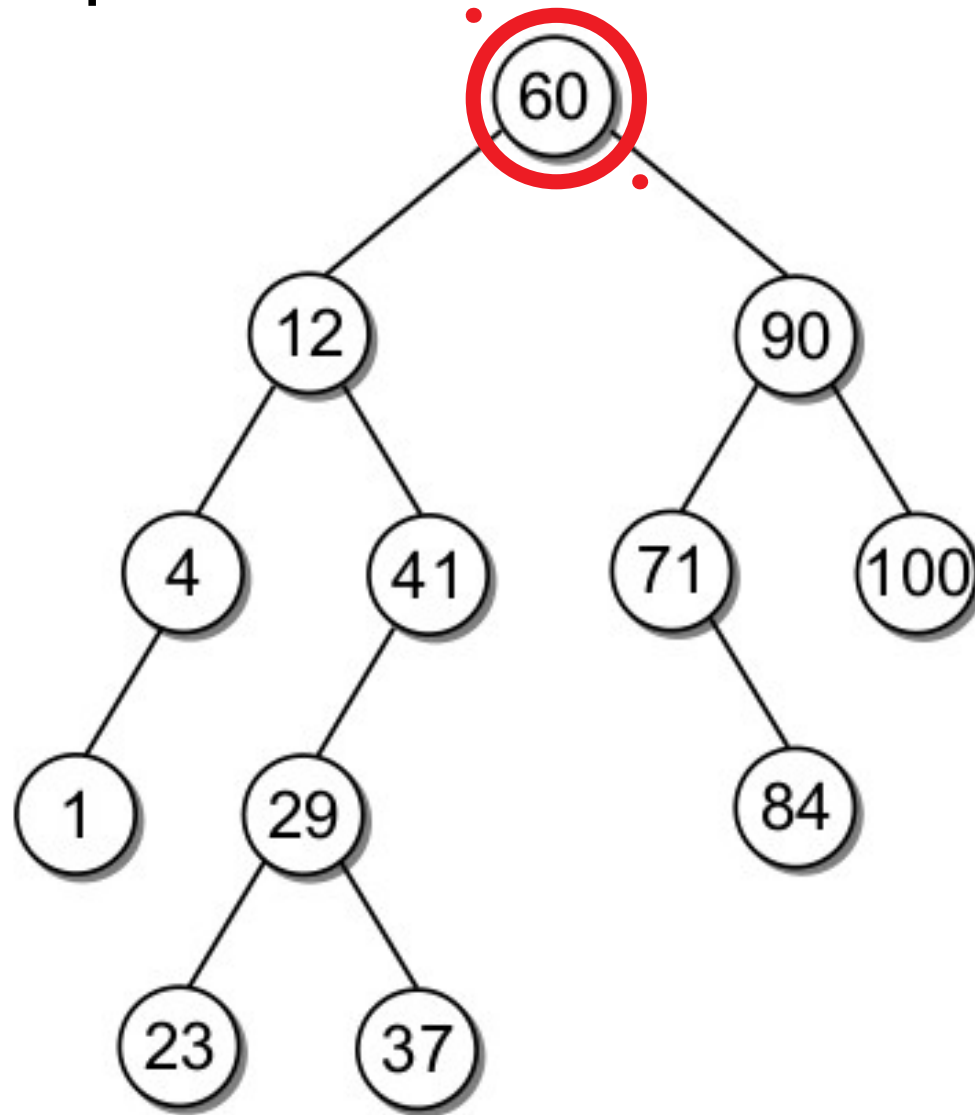
# Operação de Busca

- Suponha que vamos buscar o elemento 68:



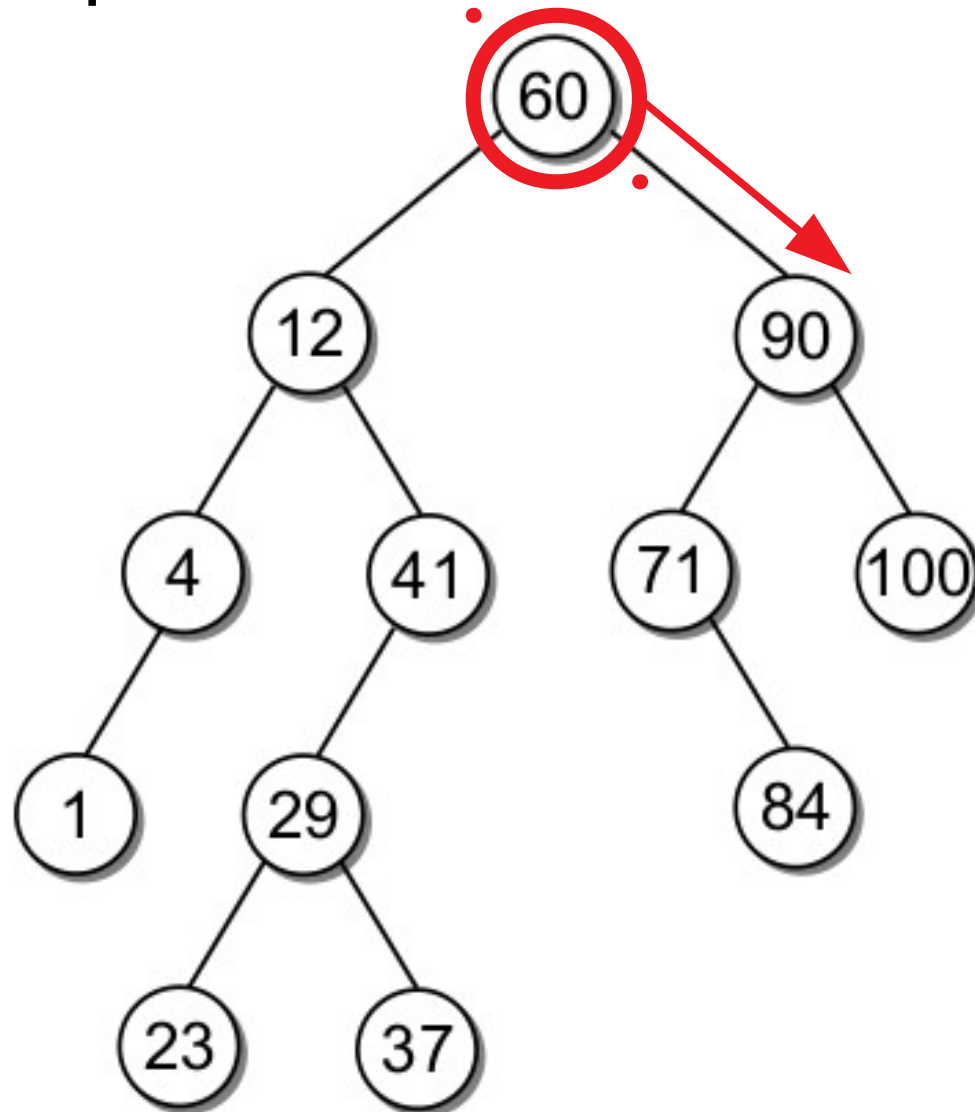
# Operação de Busca

- Suponha que vamos buscar o elemento 68:



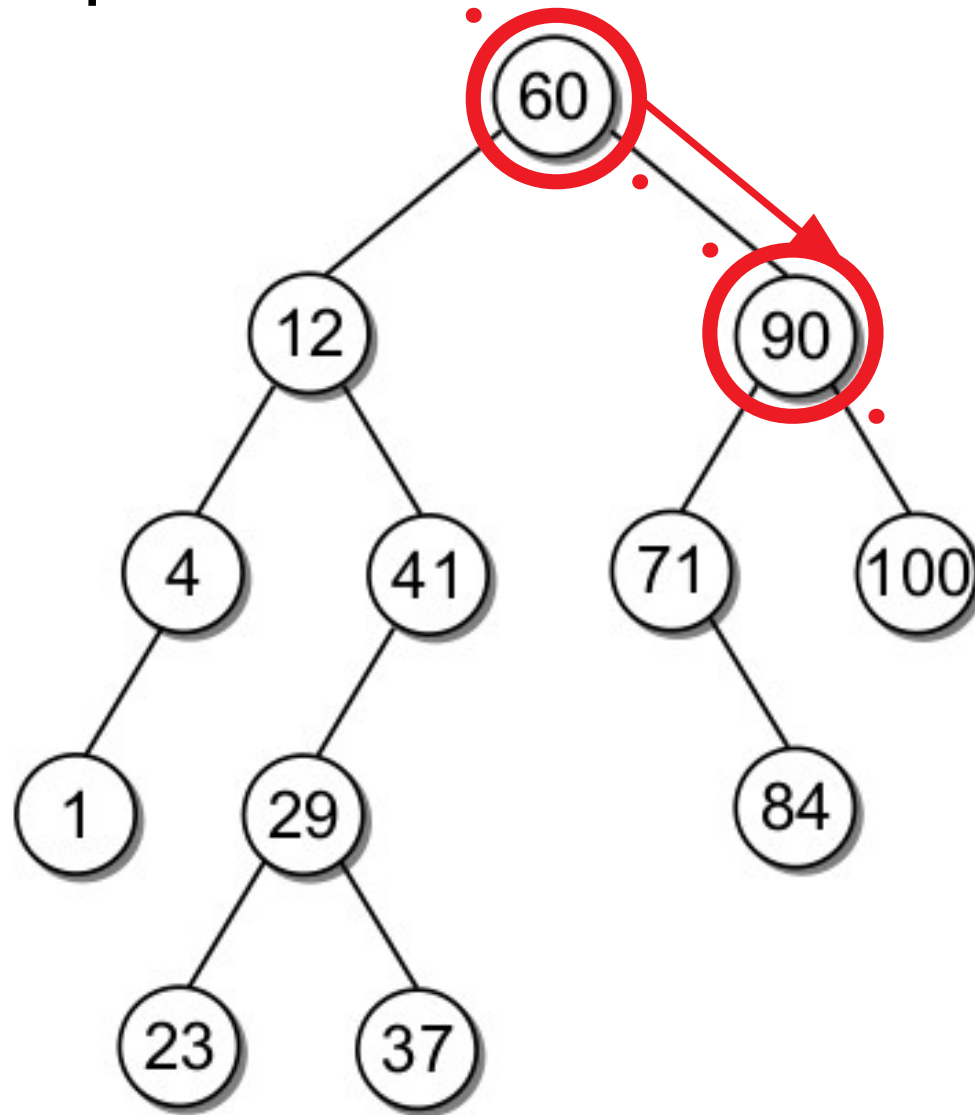
# Operação de Busca

- Suponha que vamos buscar o elemento 68:



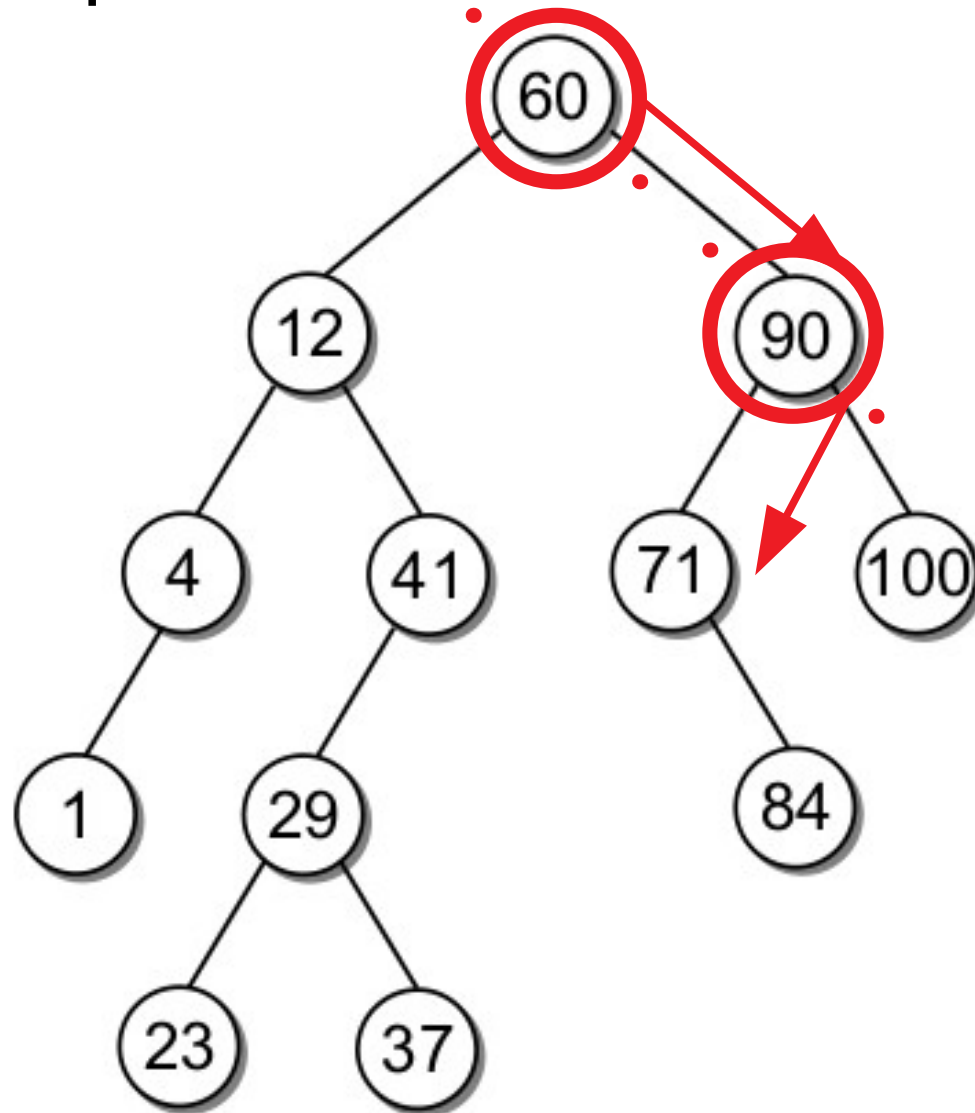
# Operação de Busca

- Suponha que vamos buscar o elemento 68:



# Operação de Busca

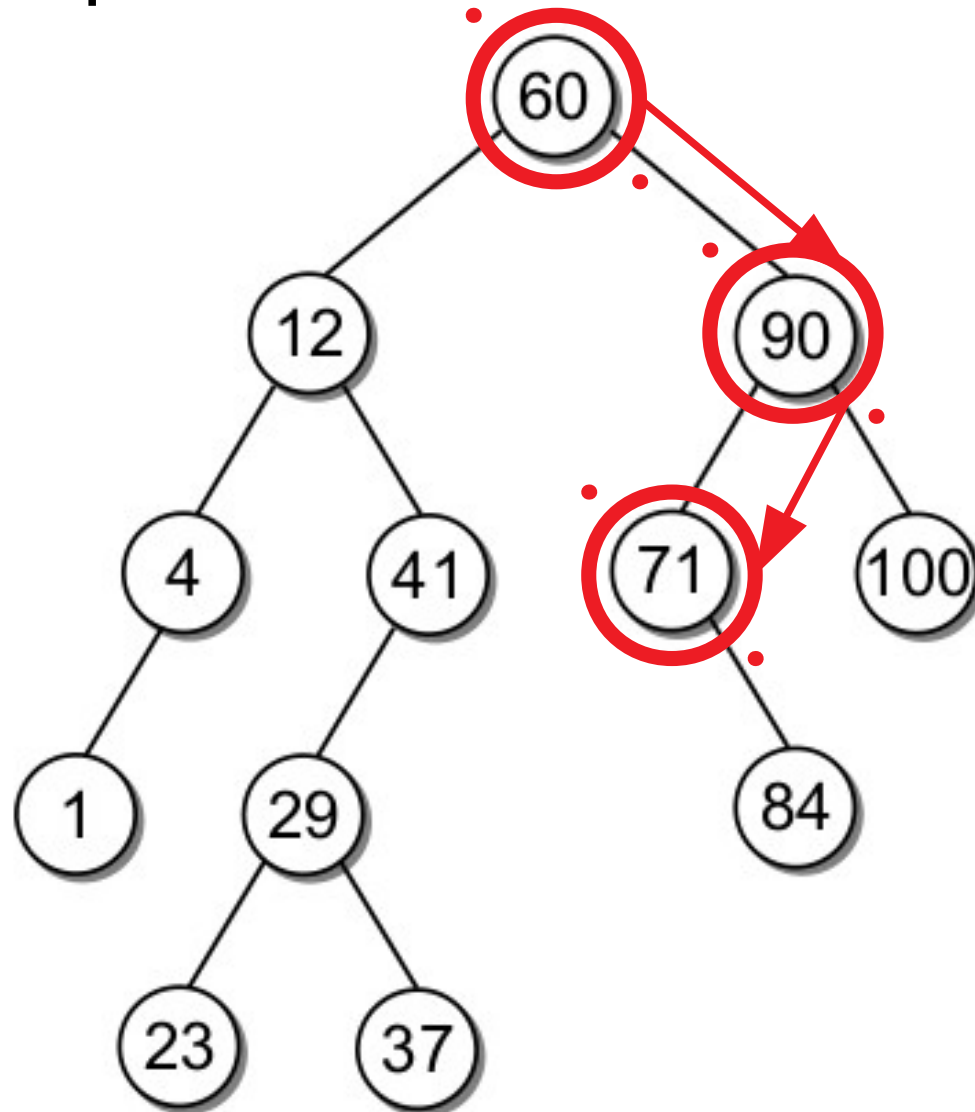
- Suponha que vamos buscar o elemento 68:





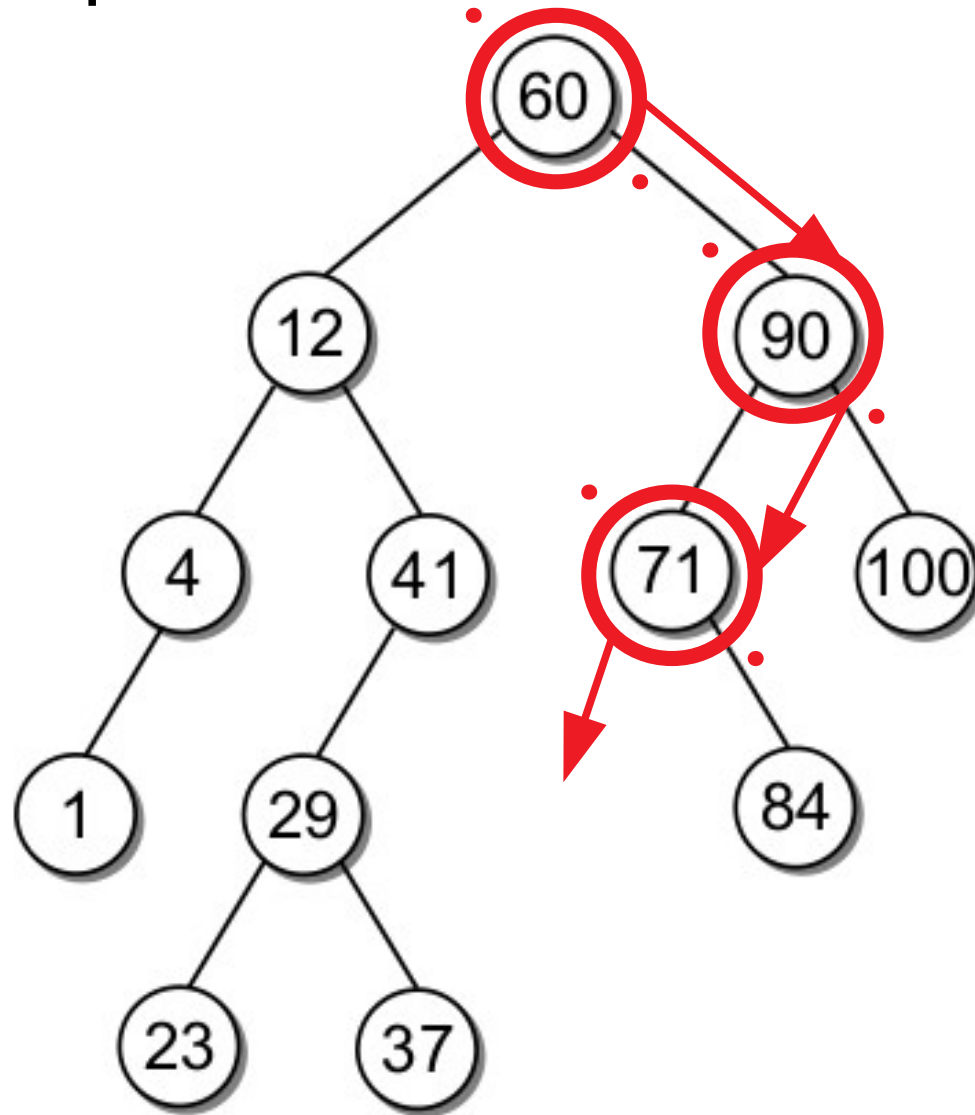
# Operação de Busca

- Suponha que vamos buscar o elemento 68:



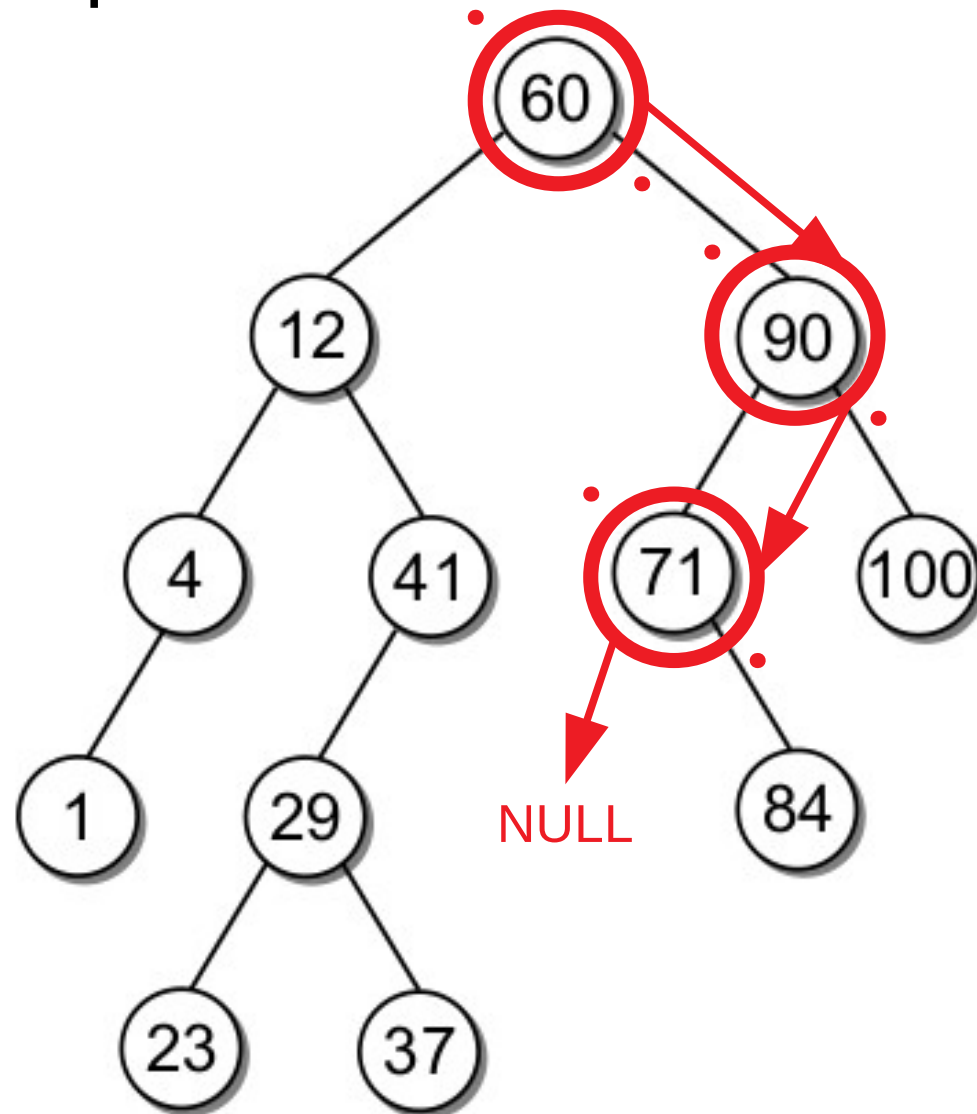
# Operação de Busca

- Suponha que vamos buscar o elemento 68:



# Operação de Busca

- Suponha que vamos buscar o elemento 68:



# Operação de Busca

# Operação de Busca

- As operações de busca na árvore binária podem ser implementadas iterativamente ou com recursão.

# Operação de Busca

- As operações de busca na árvore binária podem ser implementadas iterativamente ou com recursão.
- Vamos ver um exemplo de implementação com recursão.

# Operação de Busca

- As operações de busca na árvore binária podem ser implementadas iterativamente ou com recursão.
- Vamos ver um exemplo de implementação com recursão.
- O modo iterativo ficará como exercício!!!

# Operação de Busca



# Operação de Busca

- A função tem dois casos base:

# Operação de Busca

- A função tem dois casos base:
  - O elemento alvo está no nó atual da busca ou

# Operação de Busca

- A função tem dois casos base:
  - O elemento alvo está no nó atual da busca ou
  - Um nó filho NULL é encontrado.

# Operação de Busca

- A função tem dois casos base:
  - O elemento alvo está no nó atual da busca ou
  - Um nó filho NULL é encontrado.
- Portanto, a função retornará:

# Operação de Busca

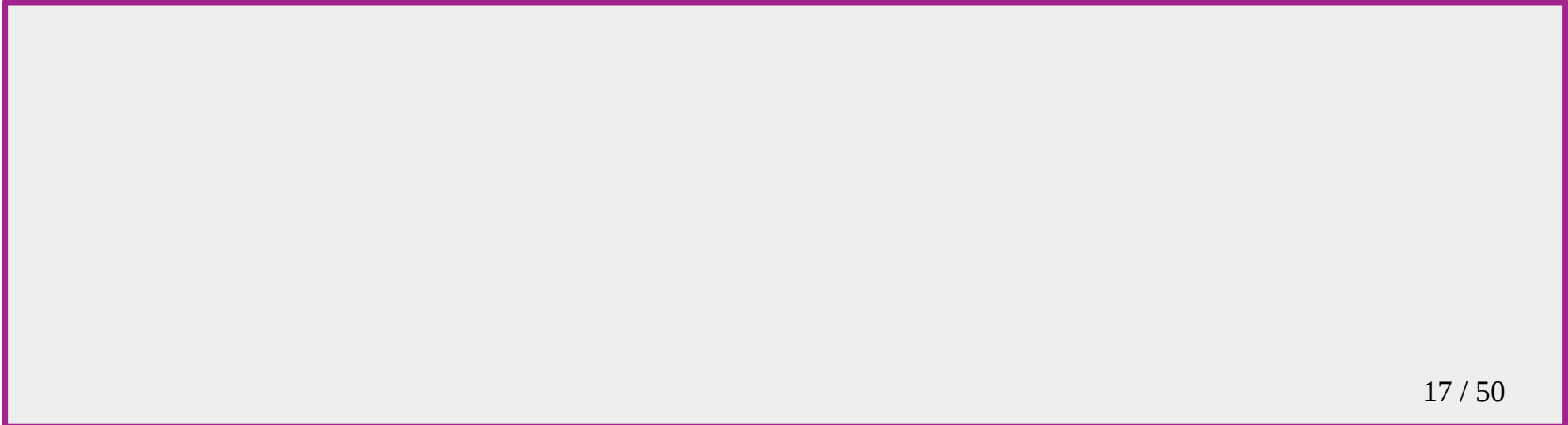
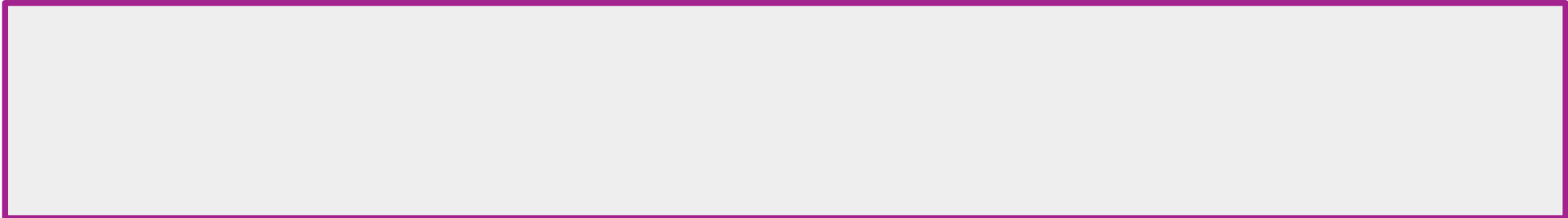
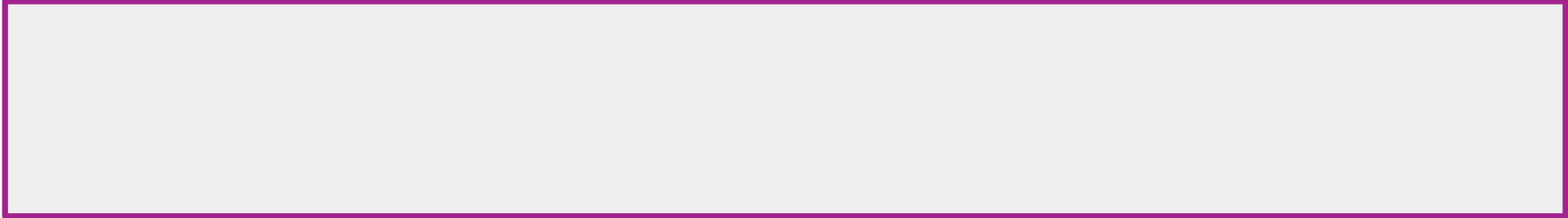
- A função tem dois casos base:
  - O elemento alvo está no nó atual da busca ou
  - Um nó filho NULL é encontrado.
- Portanto, a função retornará:
  - A referência ao nó que contém o elemento procurado ou

# Operação de Busca

- A função tem dois casos base:
  - O elemento alvo está no nó atual da busca ou
  - Um nó filho NULL é encontrado.
- Portanto, a função retornará:
  - A referência ao nó que contém o elemento procurado ou
  - None.

# Operação de Busca

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22



# Operação de Busca

```
1 class BSTMap :  
2 # ...  
3   # Determines if the map contains the given key.  
4   def __contains__( self, key ):  
5     return self._bstSearch( self._root, key ) is not None
```



# Operação de Busca

```
1 class BSTMap :
2 # ...
3 # Determines if the map contains the given key.
4 def __contains__( self, key ):
5     return self._bstSearch( self._root, key ) is not None
6
7 # Returns the value associated with the key.
8 def valueOf( self, key ):
9     node = self._bstSearch( self._root, key )
10    assert node is not None, "Invalid map key."
11    return node.value
```

# Operação de Busca

```
1 class BSTMap :
2 # ...
3 # Determines if the map contains the given key.
4 def __contains__( self, key ):
5     return self._bstSearch( self._root, key ) is not None
6
7 # Returns the value associated with the key.
8 def valueOf( self, key ):
9     node = self._bstSearch( self._root, key )
10    assert node is not None, "Invalid map key."
11    return node.value
12
13 # Helper method that recursively searches the tree for a target key.
14 def _bstSearch( self, subtree, target ):
15     if subtree is None :           # base case
16         return None
17     elif target < subtree.key : # target is left of the subtree root.
18         return self._bstSearch( subtree.left )
19     elif target > subtree.key : # target is right of the subtree root.
20         return self._bstSearch( subtree.right )
21     else :                         # base case
22         return subtree
```

# Busca por valores Max e Min

# Busca por valores Max e Min

- Uma outra operação de busca comumente executada em uma árvore binária de busca é encontrar os maiores e menores valores (chaves).

# Busca por valores Max e Min

- Uma outra operação de busca comumente executada em uma árvore binária de busca é encontrar os maiores e menores valores (chaves).
- De acordo com a definição de ABB, nós sabemos que o valor mínimo está na raiz ou em algum nó a sua esquerda.

# Busca por valores Max e Min

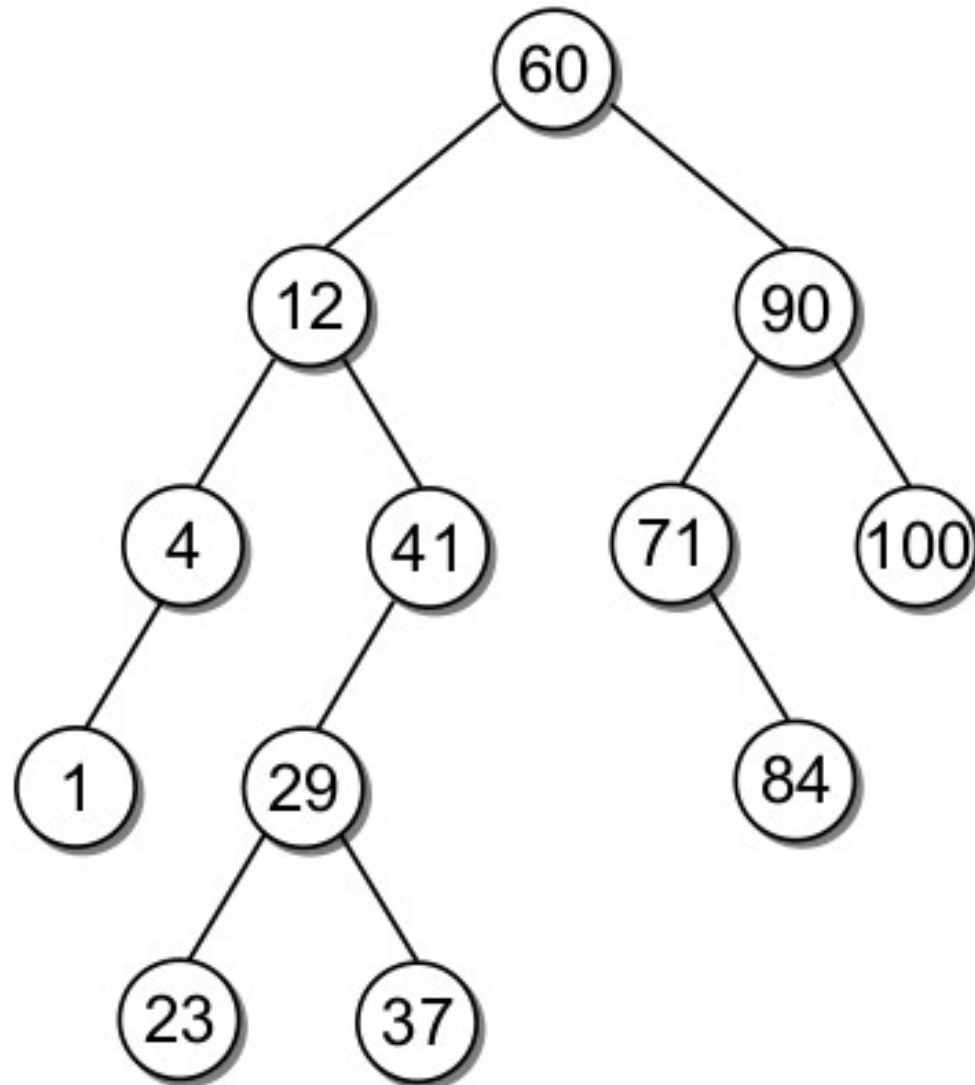
- Uma outra operação de busca comumente executada em uma árvore binária de busca é encontrar os maiores e menores valores (chaves).
- De acordo com a definição de ABB, nós sabemos que o valor mínimo está na raiz ou em algum nó a sua esquerda.
- Existe alguma maneira de fazer a busca pelo menor elemento se ter a necessidade de fazer a comparação individual?

# Busca por valores Max e Min

- Como achar o menor valor na ABB abaixo?

# Busca por valores Max e Min

- Como achar o menor valor na ABB abaixo?





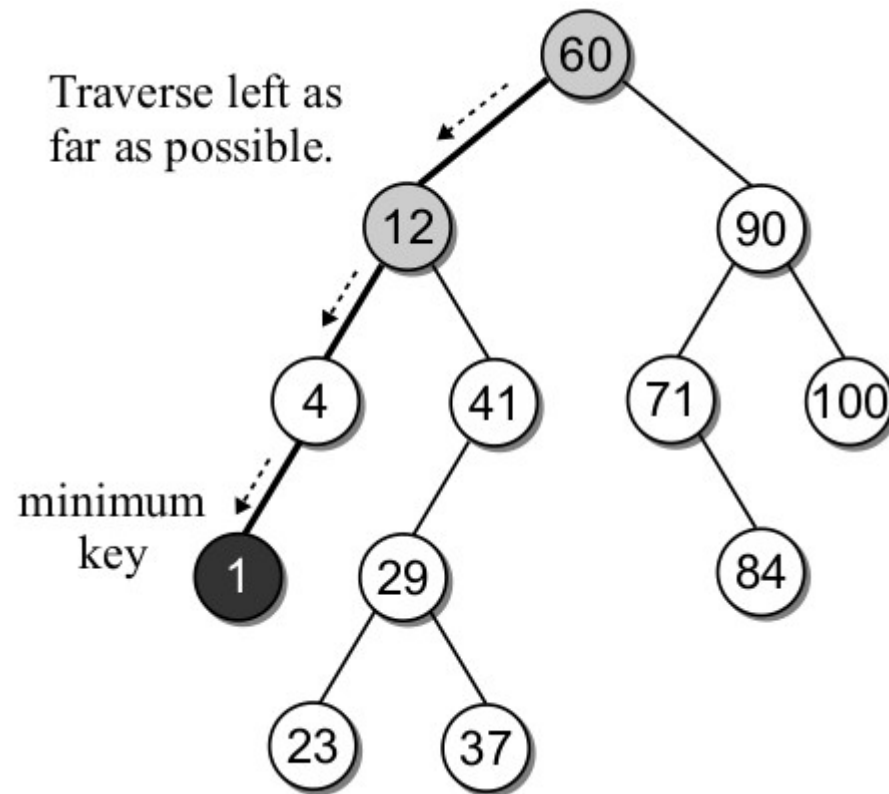
# Busca por valores Max e Min

# Busca por valores Max e Min

- A ideia é que se o nó raiz contém um elemento a sua esquerda, então esse nó não pode ser o menor.

# Busca por valores Max e Min

- A ideia é que se o nó raiz contém um elemento a sua esquerda, então esse nó não pode ser o menor.



# Busca por valores Max e Min

- A mesma ideia da busca pelo menor valor se aplica à busca do maior valor.

# Busca por valores Max e Min

- Código:

```
1 class BSTMap :
2 # ...
3     # Helper method for finding the node containing the minimum key.
4     def _bstMinimum( self, subtree ) :
5         if subtree is None :
6             return None
7         elif subtree.left is None :
8             return subtree
9         else :
10            return self._bstMinimum( subtree.left )
```

# Inserção

# Inserção

- Na construção de uma ABB, as chaves (elementos) são adicionados um por vez.

# Inserção

- Na construção de uma ABB, as chaves (elementos) são adicionados um por vez.
- Suponha que vamos inserir a seguinte relação de elementos [60, 25, 100, 35, 17, 80].



# Inserção

# Inserção

Inserir 60

# Inserção

Inserir 60



# Inserção

Inserir 60



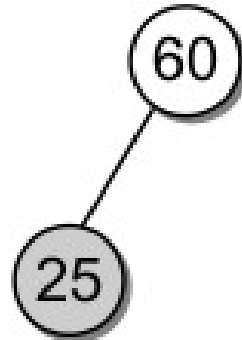
Inserir 25

# Inserção

Inserir 60



Inserir 25

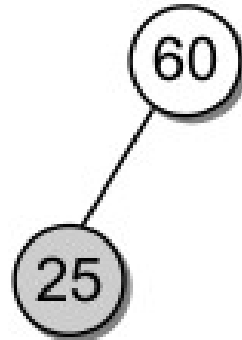


# Inserção

Inserir 60



Inserir 25



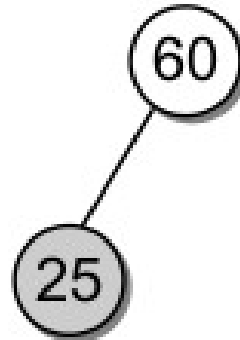
Inserir 100

# Inserção

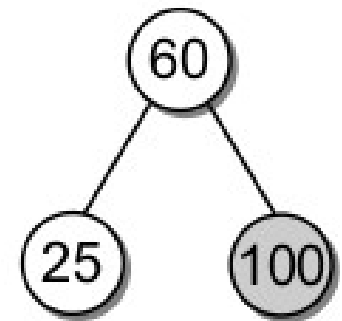
Inserir 60



Inserir 25



Inserir 100

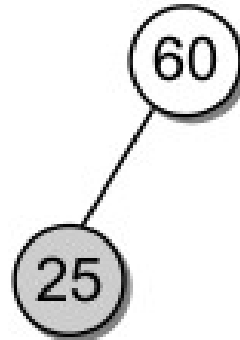


# Inserção

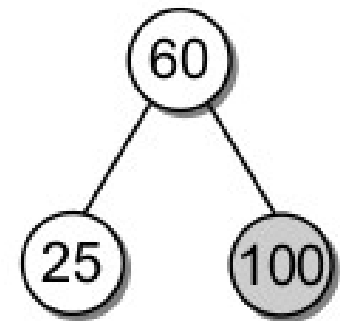
Inserir 60



Inserir 25



Inserir 100



Inserir 35

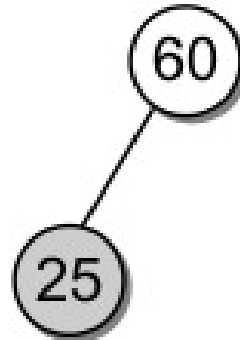


# Inserção

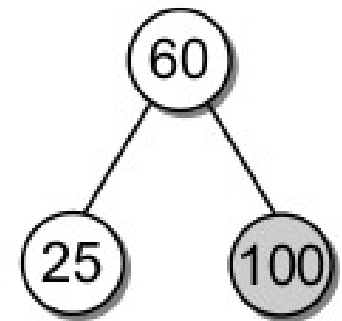
Inserir 60



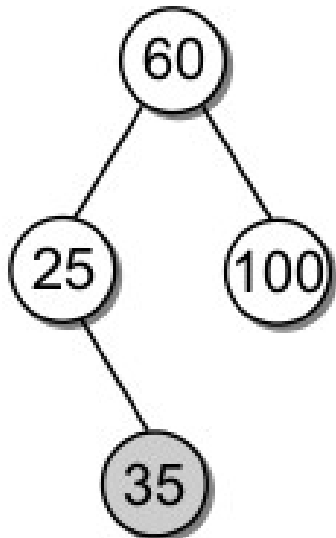
Inserir 25



Inserir 100



Inserir 35

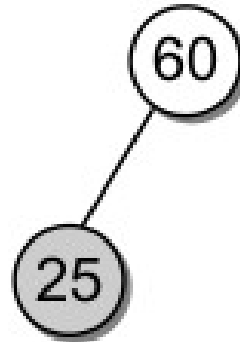


# Inserção

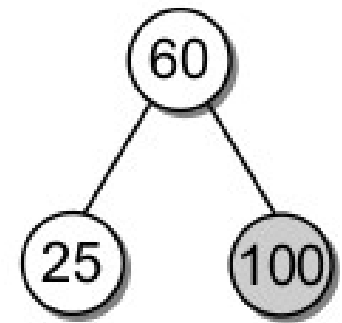
Inserir 60



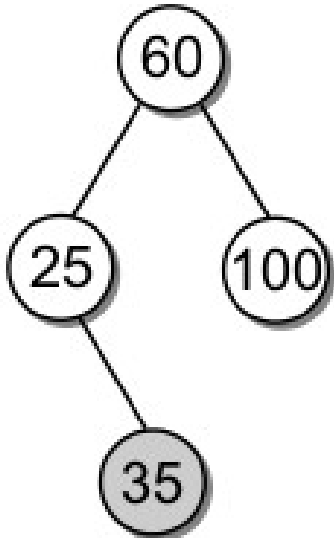
Inserir 25



Inserir 100



Inserir 35



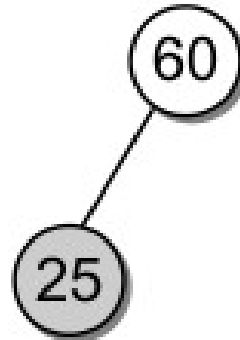
Inserir 17

# Inserção

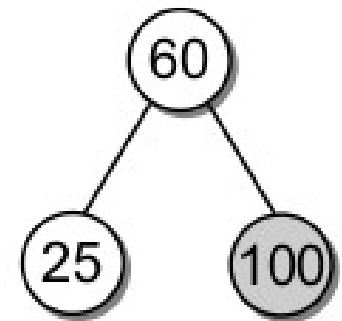
Inserir 60



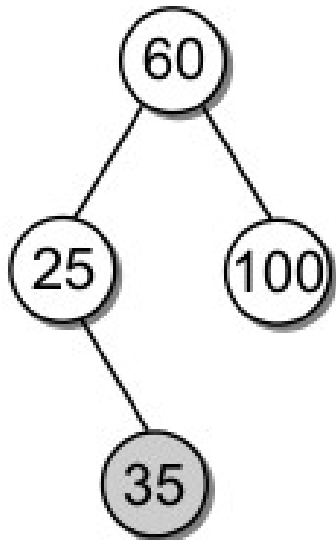
Inserir 25



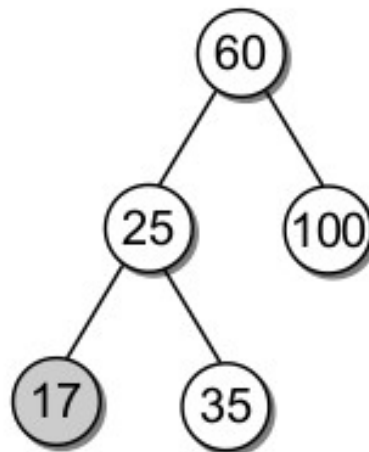
Inserir 100



Inserir 35



Inserir 17

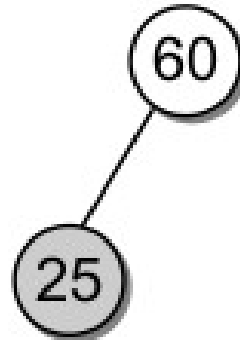


# Inserção

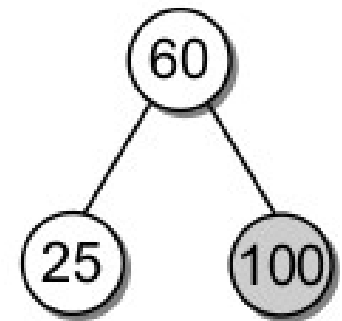
Inserir 60



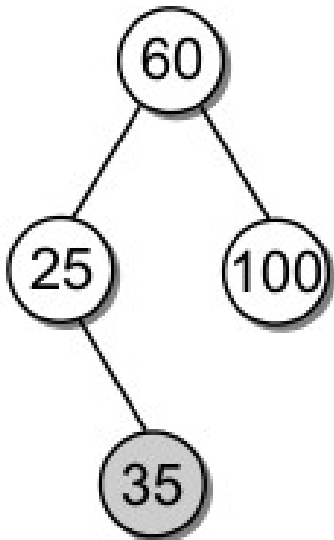
Inserir 25



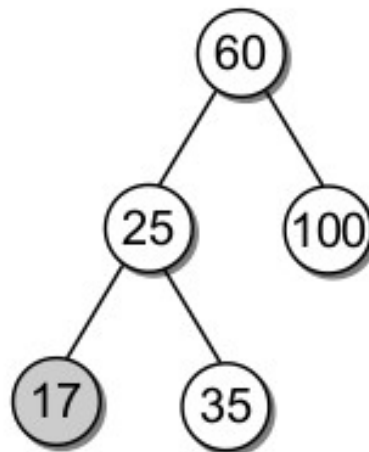
Inserir 100



Inserir 35



Inserir 17



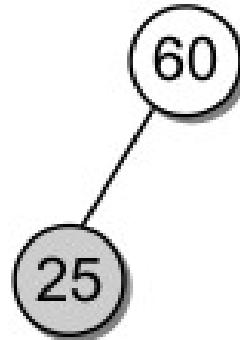
Inserir 80

# Inserção

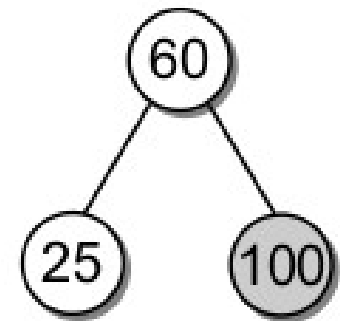
Inserir 60



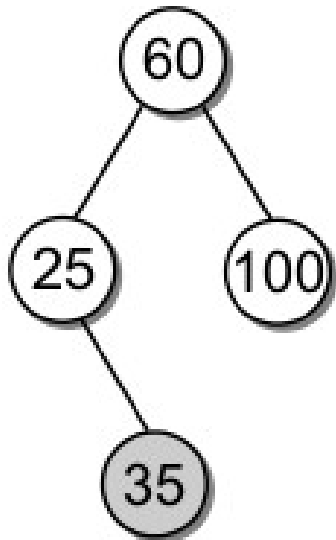
Inserir 25



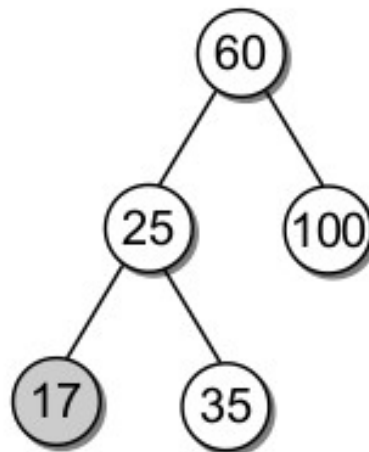
Inserir 100



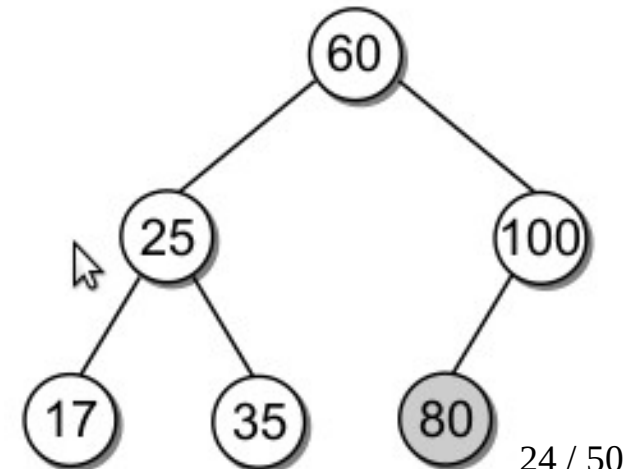
Inserir 35



Inserir 17



Inserir 80



# Inserção

# Inserção

- Suponha que vamos inserir a chave 30 na árvore anterior.

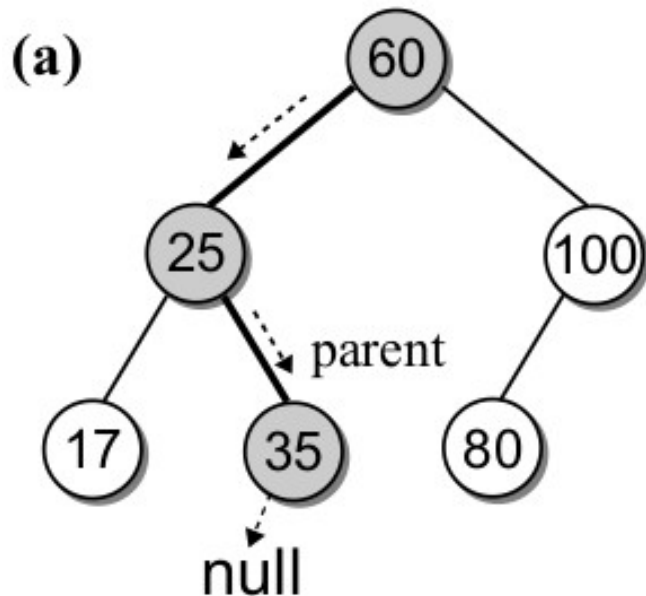
# Inserção

- Suponha que vamos inserir a chave 30 na árvore anterior.
- O que aconteceria se nós usarmos o função `_bstSearch ( )` e pesquisarmos pelo nó 30?



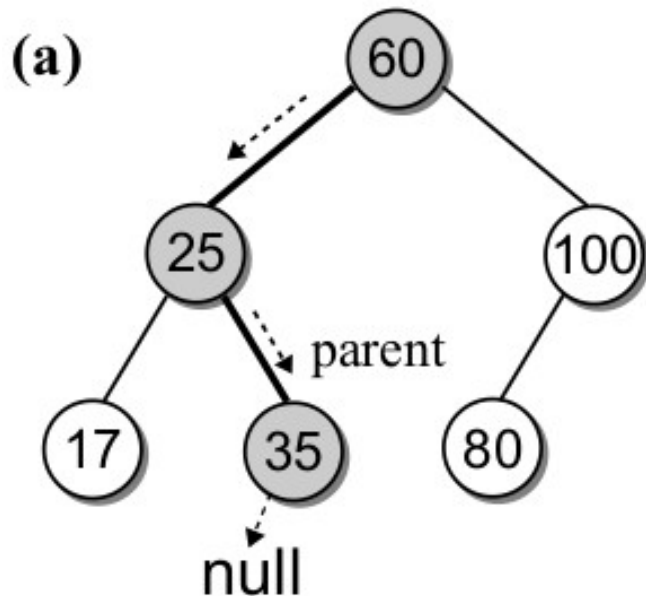
# Inserção

- Suponha que vamos inserir a chave 30 na árvore anterior.
- O que aconteceria se nós usarmos o função `_bstSearch ( )` e pesquisarmos pelo nó 30?



# Inserção

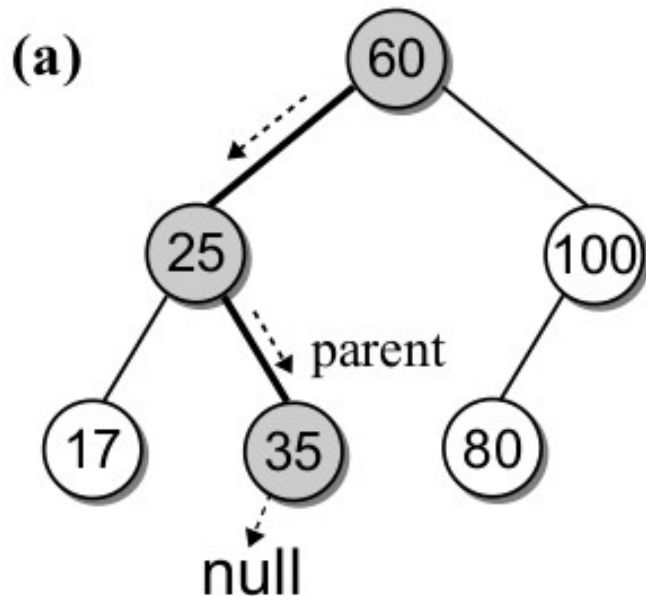
- Suponha que vamos inserir a chave 30 na árvore anterior.
- O que aconteceria se nós usarmos o função `_bstSearch ( )` e pesquisarmos pelo nó 30?



A busca não localizará o nó 30.

# Inserção

- Suponha que vamos inserir a chave 30 na árvore anterior.
- O que aconteceria se nós usarmos o função `_bstSearch ( )` e pesquisarmos pelo nó 30?



A busca não localizará o nó 30. Porém, este será o lugar correto onde a nova chave deverá ser inserida.

# Inserção

- Código para inserir um nó na ABB:

```
# Adds a new entry to the map or replaces the value of an existing key.
def add( self, key, value ):
    # Find the node containing the key, if it exists.
    node = self._bstSearch( key )
    # If the key is already in the tree, update its value.
    if node is not None :
        node.value = value
        return False
    # Otherwise, add a new entry.
    else :
        self._root = self._bstInsert( self._root, key, value )
        self._size += 1
        return True
```

# Inserção

- Código para inserir um nó na ABB:

```
# Helper method that inserts a new item, recursively.
def _bstInsert( self, subtree, key, value ):
    if subtree is None :
        subtree = _BSTMapNode( key, value )
    elif key < subtree.key :
        subtree.left = self._bstInsert( subtree.left, key, value )
    elif key > subtree.key :
        subtree.right = self._bstInsert( subtree.right, key, value )
    return subtree
```

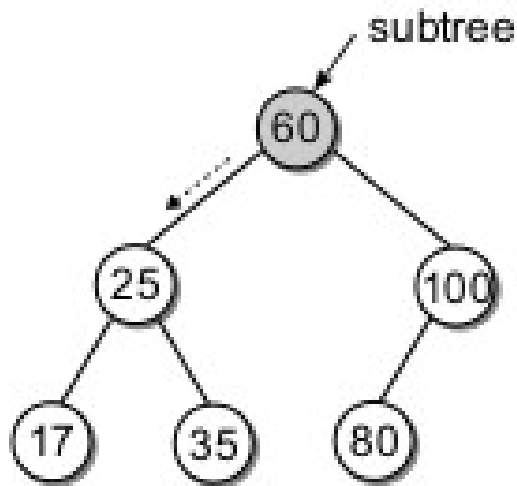
# Inserção

# Inserção

- O método deve pesquisar a localização do novo nó.

# Inserção

- O método deve pesquisar a localização do novo nó.

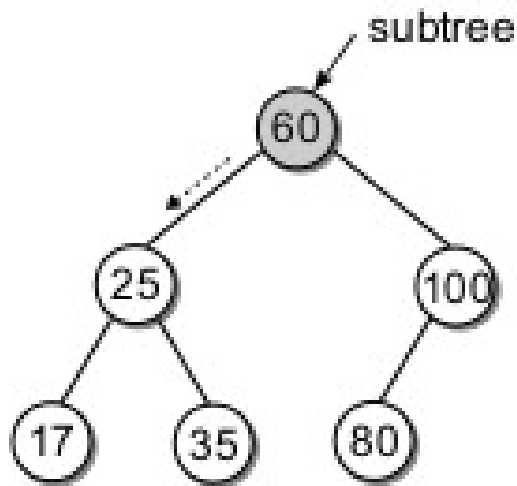


(a) `bstInsert(root,30)`

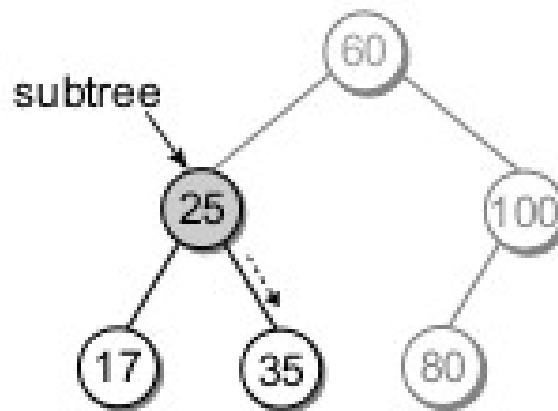


# Inserção

- O método deve pesquisar a localização do novo nó.



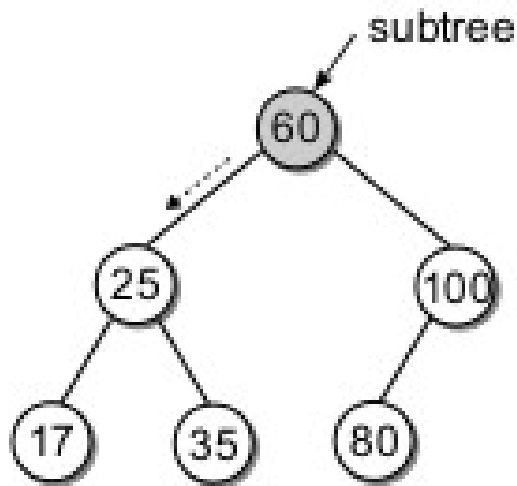
(a) `bstInsert(root,30)`



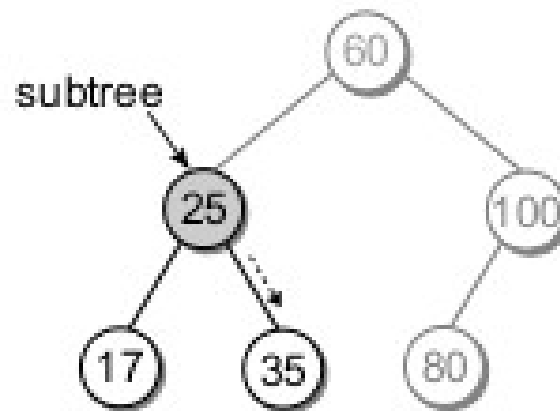
(b) `bstInsert(subtree.left,key)`

# Inserção

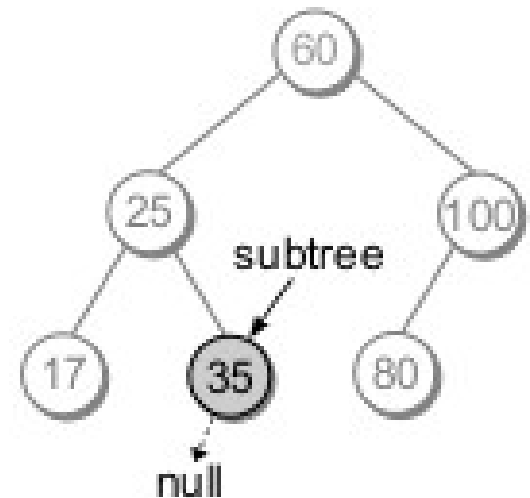
- O método deve pesquisar a localização do novo nó.



(a) `bstInsert(root,30)`



(b) `bstInsert(subtree.left,key)`



(c) `bstInsert(subtree.right,key)`

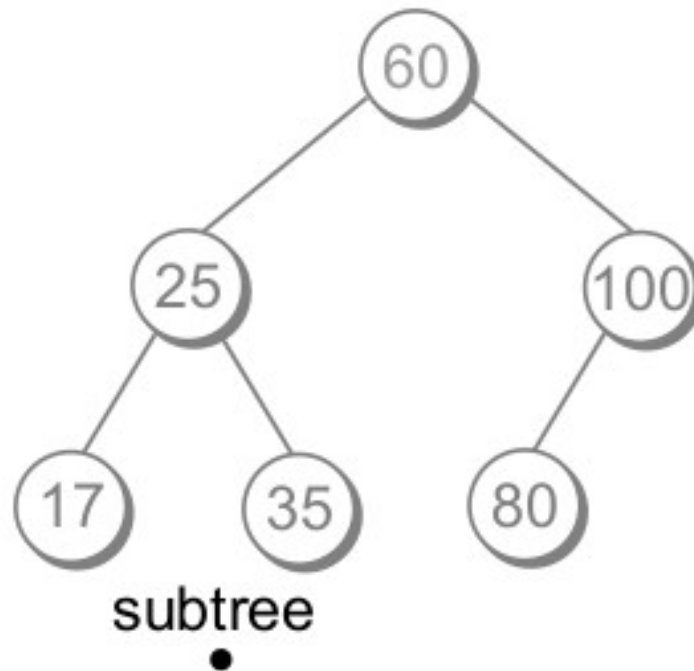
# Inserção

# Inserção

- O caso base é alcançado quando uma subárvore vazia é encontrada.

# Inserção

- O caso base é alcançado quando uma subárvore vazia é encontrada.



**(d)** `bstInsert(subtree.left,key)`

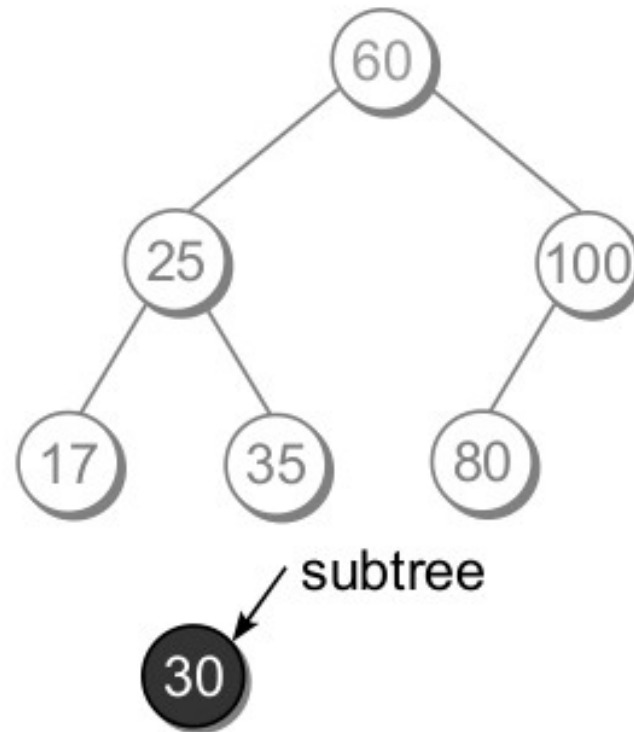
# Inserção

# Inserção

- Neste momento, um novo nó da árvore é criado e seus valores são atualizados.

# Inserção

- Neste momento, um novo nó da árvore é criado e seus valores são atualizados.



(e) subtree = TreeNode(key)



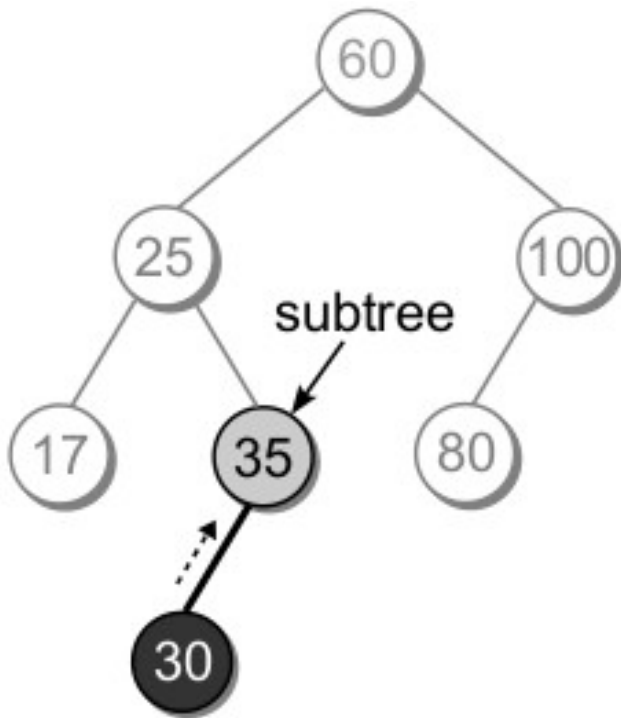
# Inserção

# Inserção

- A recursão continua...

# Inserção

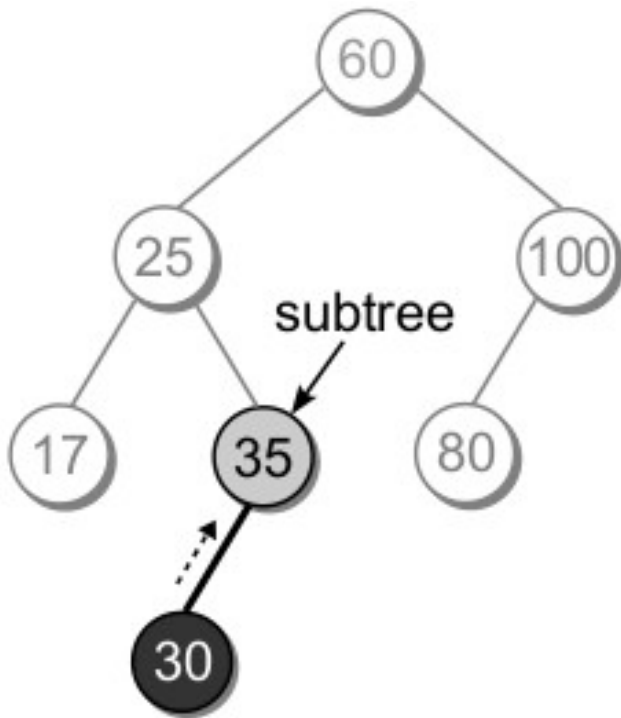
- A recursão continua...



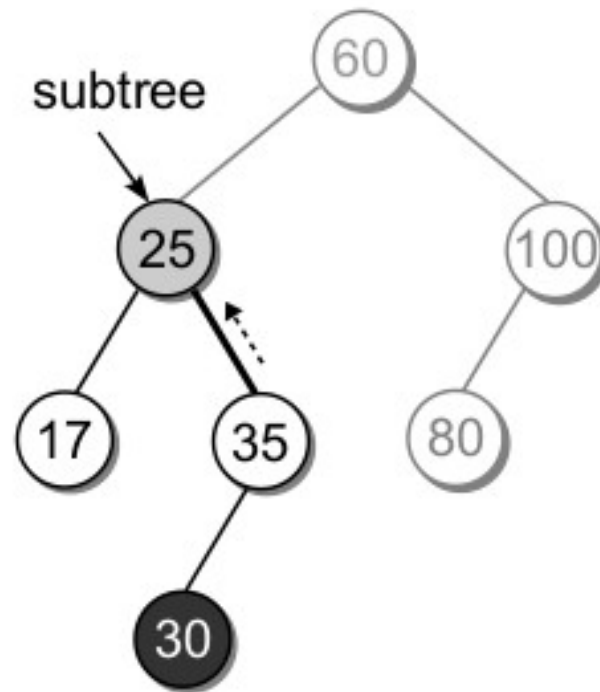
**(f)** subtree.left = bstInsert(...)

# Inserção

- A recursão continua...



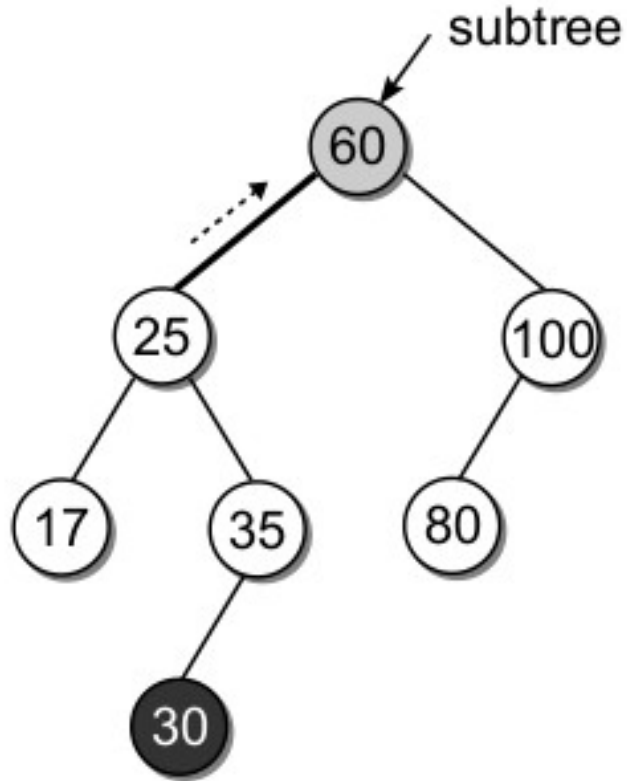
(f) subtree.left = bstInsert(...)



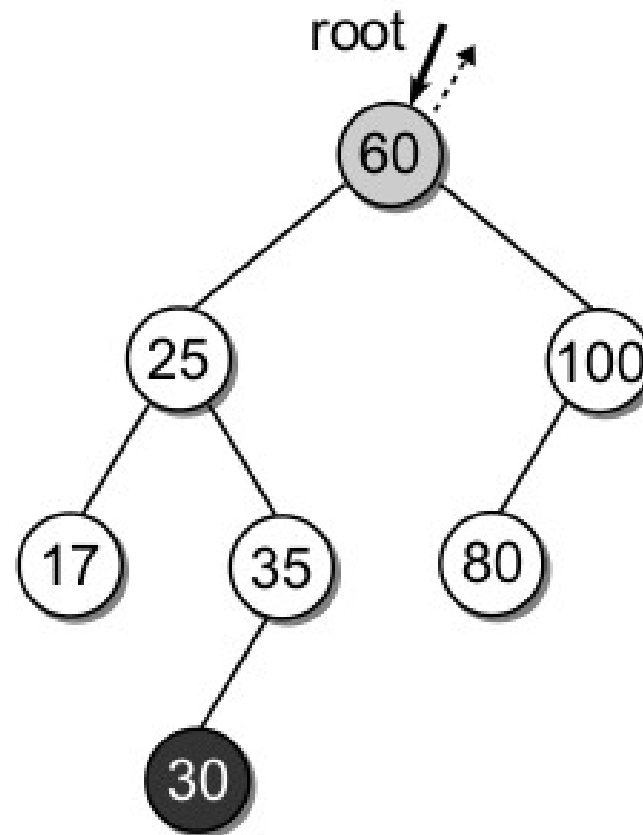
(g) subtree.right = bstInsert(...)

# Inserção

- Até alcançar o nó raiz.



(h) subtree.left = bstInsert(...)



(i) root = bstInsert(...)

# Remoção

# Remoção

- A operação de remoção é um pouco mais complicada do que as operações de busca ou inserção.

# Remoção

- A operação de remoção é um pouco mais complicada do que as operações de busca ou inserção.
- Operações envolvidas na remoção:



# Remoção

- A operação de remoção é um pouco mais complicada do que as operações de busca ou inserção.
- Operações envolvidas na remoção:
  - Localizar o elemento.

# Remoção

- A operação de remoção é um pouco mais complicada do que as operações de busca ou inserção.
- Operações envolvidas na remoção:
  - Localizar o elemento.
  - Remover o nó da árvore.

# Remoção

- A operação de remoção é um pouco mais complicada do que as operações de busca ou inserção.
- Operações envolvidas na remoção:
  - Localizar o elemento.
  - Remover o nó da árvore.
  - Os nós restantes devem preservar a propriedade de ABB.

# Remoção

- Existem três casos a serem considerados antes de remover um nó:
  - O nó é uma folha.
  - O nó tem um único filho.
  - O nó tem dois filhos.

# Remoção

# Remoção

- Remoção de nó folha

# Remoção

- Remoção de nó folha
  - É o caso mais simples.

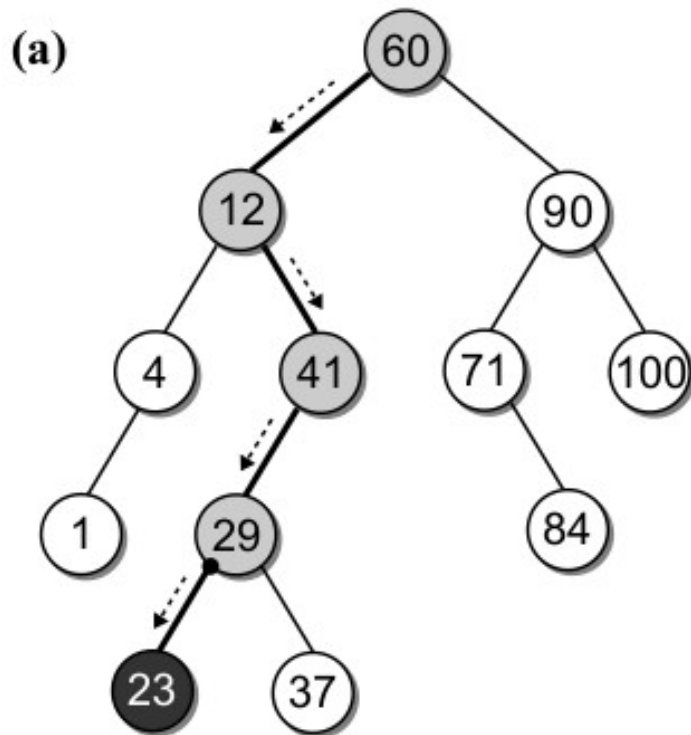
# Remoção

- Remoção de nó folha
  - É o caso mais simples.
  - Depois de encontrar o nó, basta removê-lo da ABB.



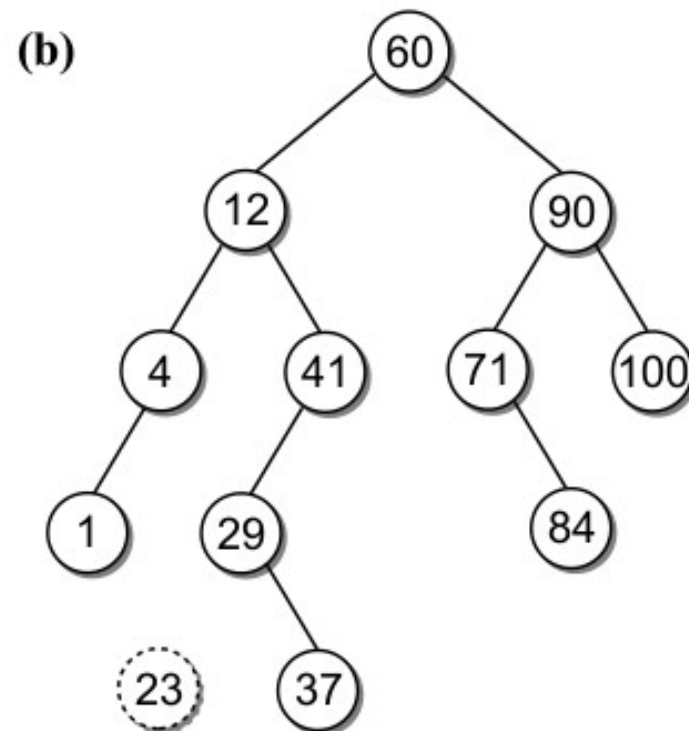
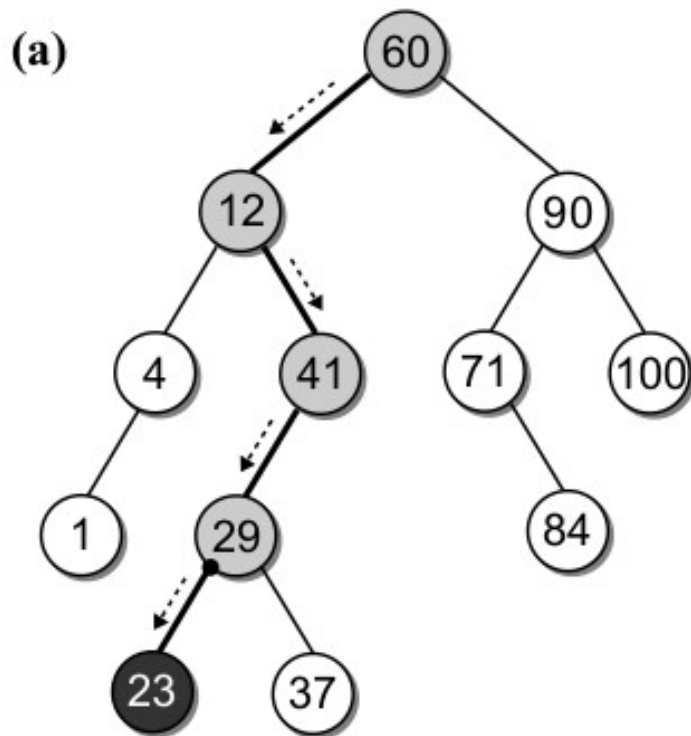
# Remoção

- Remoção de nó folha
  - É o caso mais simples.
  - Depois de encontrar o nó, basta removê-lo da ABB.



# Remoção

- Remoção de nó folha
  - É o caso mais simples.
  - Depois de encontrar o nó, basta removê-lo da ABB.



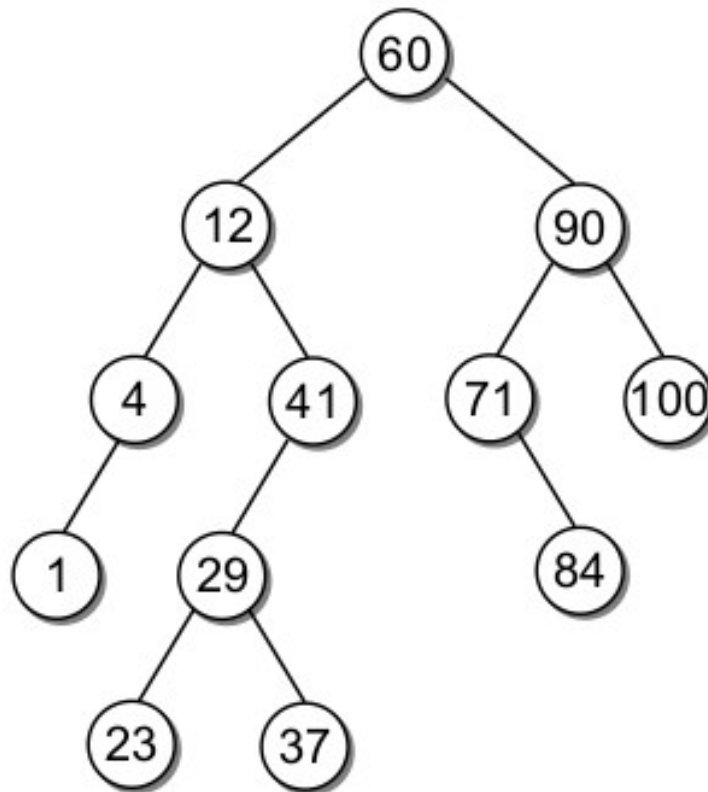
# Remoção

# Remoção

- Remover nó interior com 1 filho

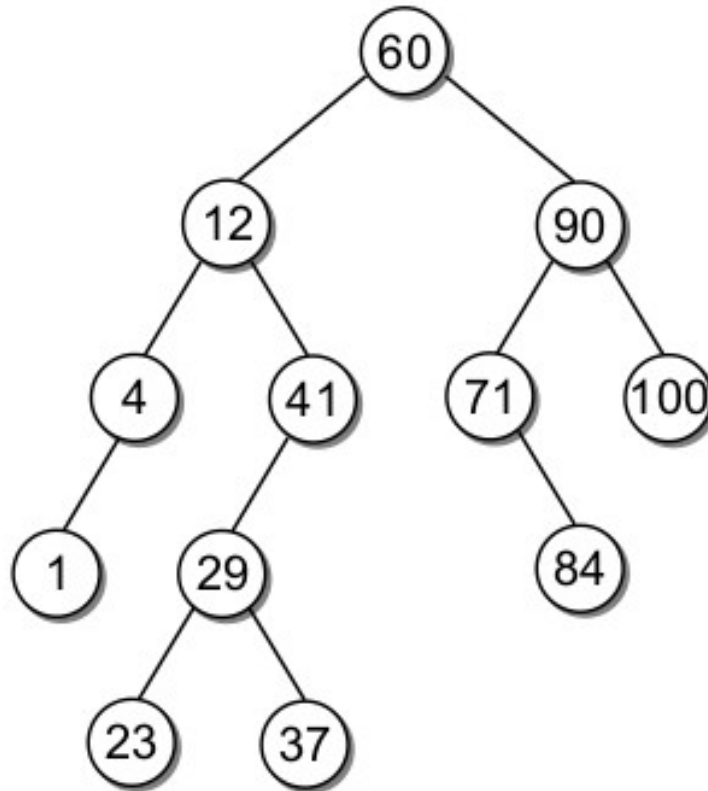
# Remoção

- Remover nó interior com 1 filho



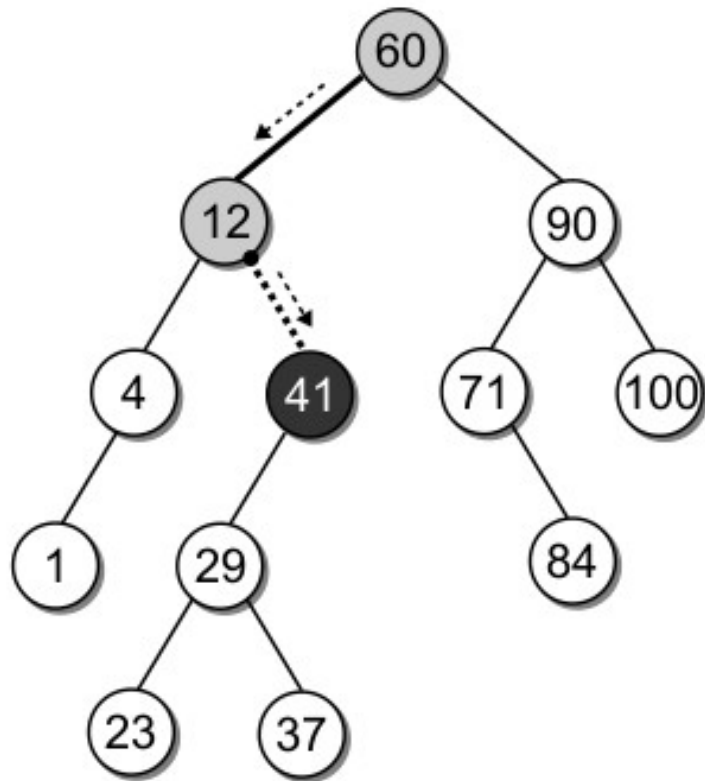
# Remoção

- Remover nó interior com 1 filho
  - Como seria remover o nó 41?



# Remoção

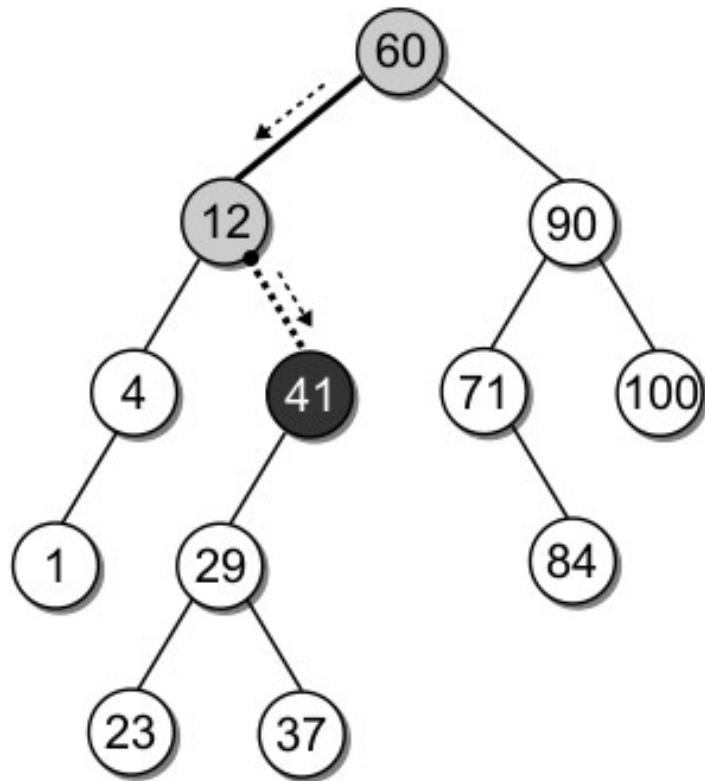
# Remoção





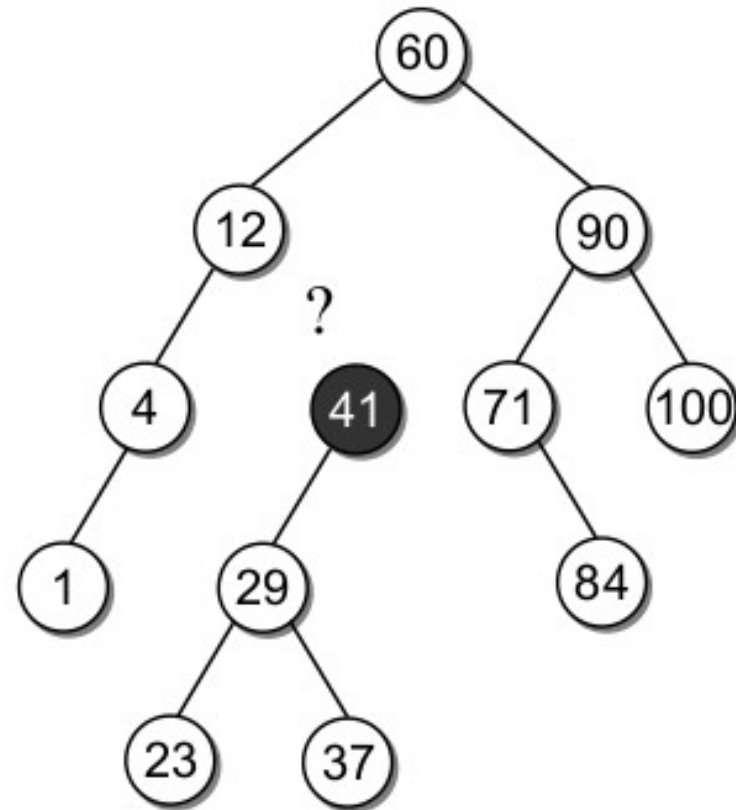
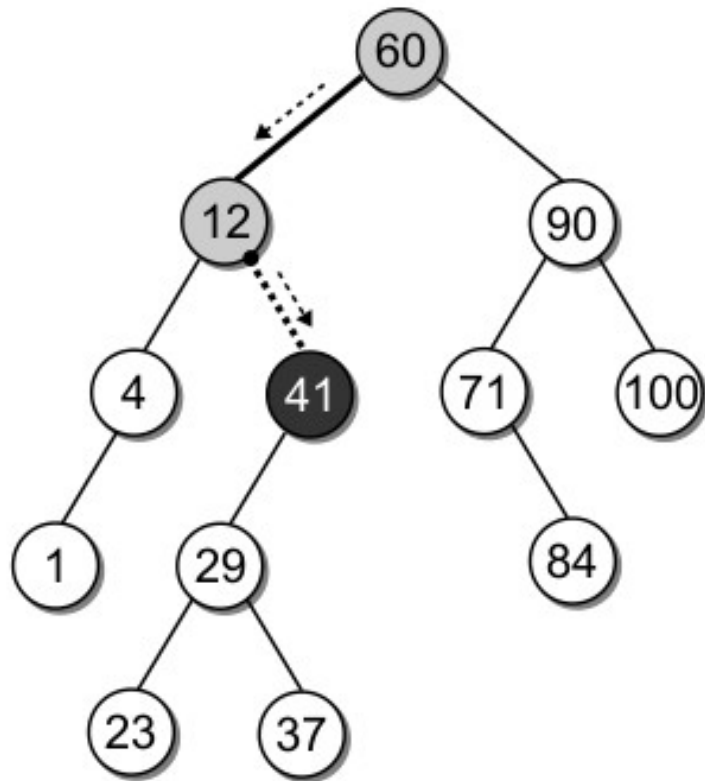
# Remoção

- Bastaria que o nó anterior (12) apontasse para NULL?



# Remoção

- Bastaria que o nó anterior (12) apontasse para NULL?



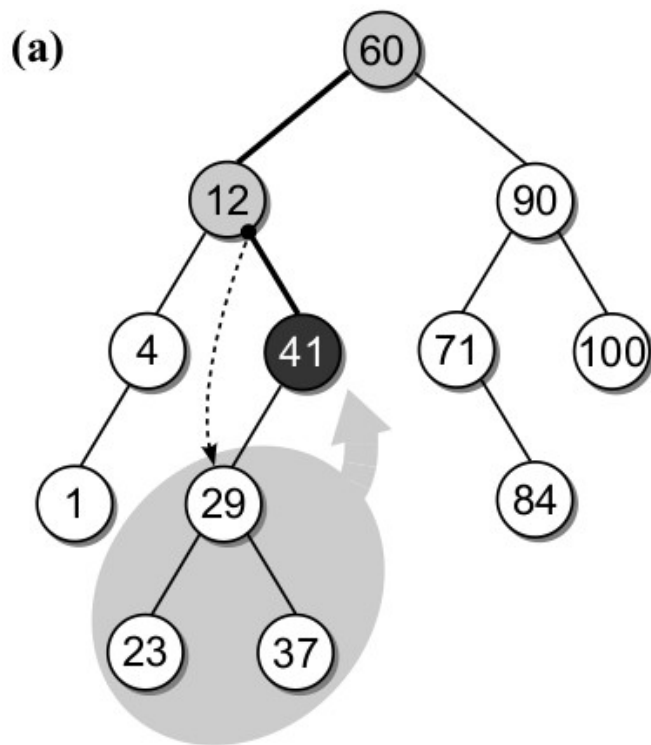
# Remoção

# Remoção

- Como o nó 41 tem apenas 1 único filho, então todos os seus descendentes têm chaves maiores do que o nó 12.

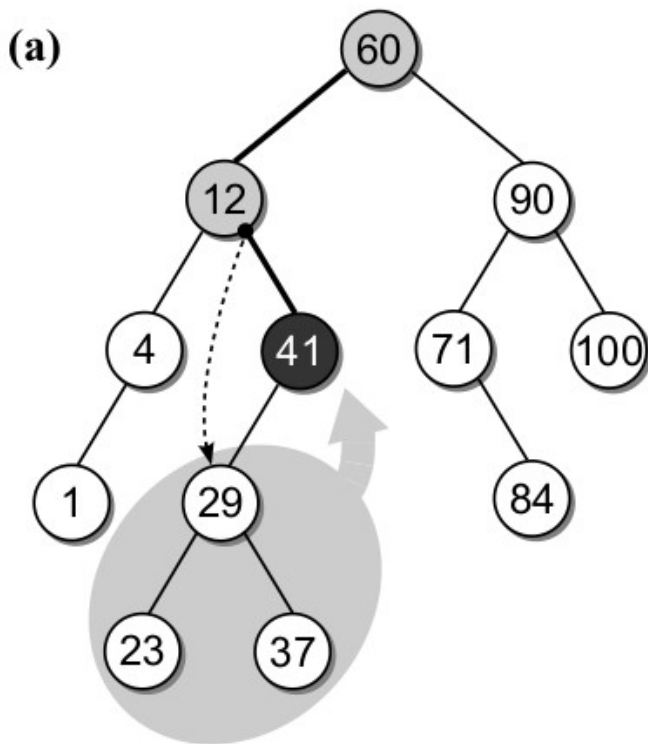
# Remoção

- Como o nó 41 tem apenas 1 único filho, então todos os seus descendentes têm chaves maiores do que o nó 12.



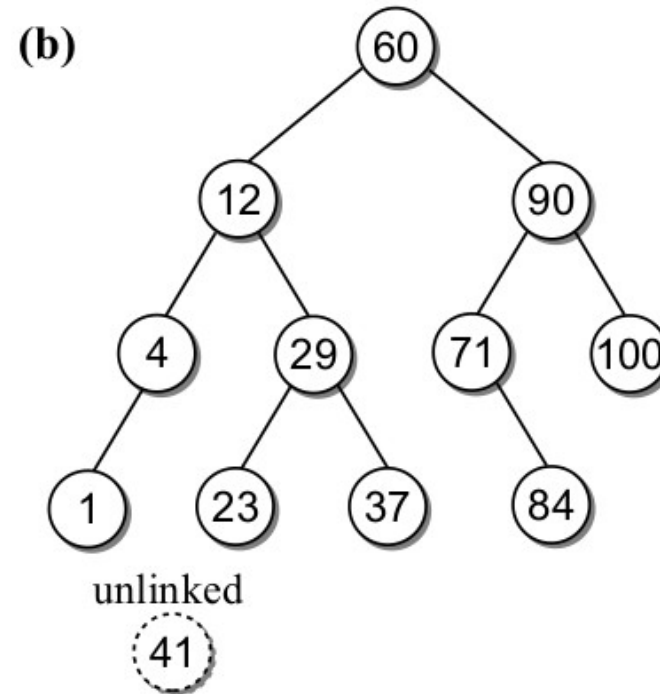
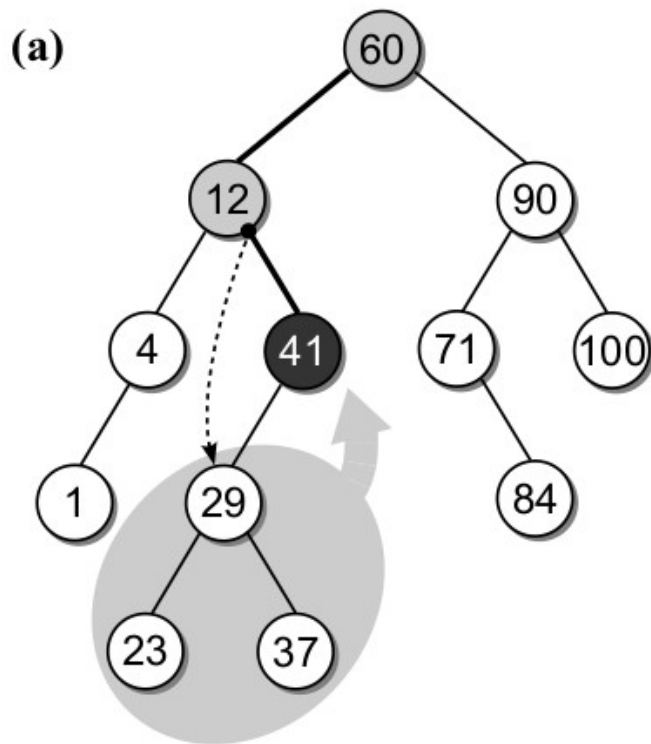
# Remoção

- Como o nó 41 tem apenas 1 único filho, então todos os seus descendentes têm chaves maiores do que o nó 12.
- Assim, basta ligar o nó 12 ao filho do nó 41.



# Remoção

- Como o nó 41 tem apenas 1 único filho, então todos os seus descendentes têm chaves maiores do que o nó 12.
- Assim, basta ligar o nó 12 ao filho do nó 41.



# Remoção



# Remoção

- Remover nó interior com 2 filhos

# Remoção

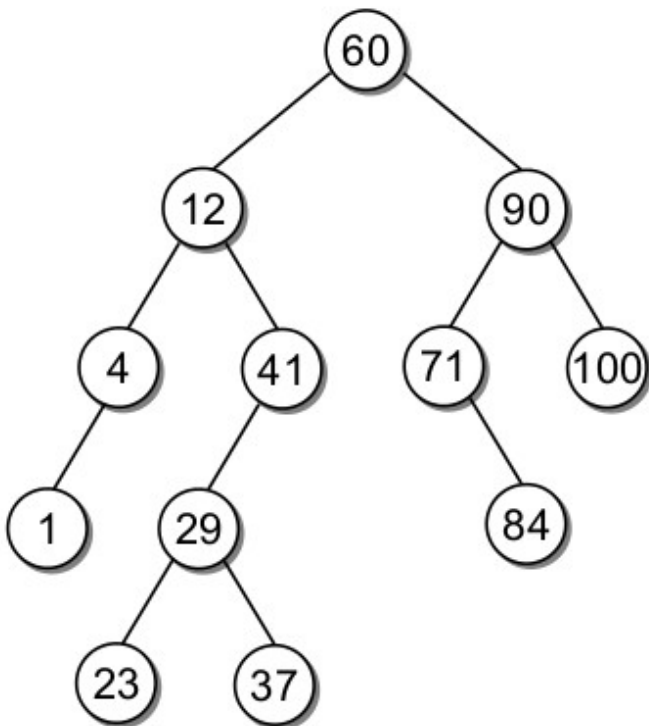
- Remover nó interior com 2 filhos
  - Essa é a sua situação mais difícil.

# Remoção

- Remover nó interior com 2 filhos
  - Essa é a sua situação mais difícil.
  - O que aconteceria na árvore para remover o nó 12?

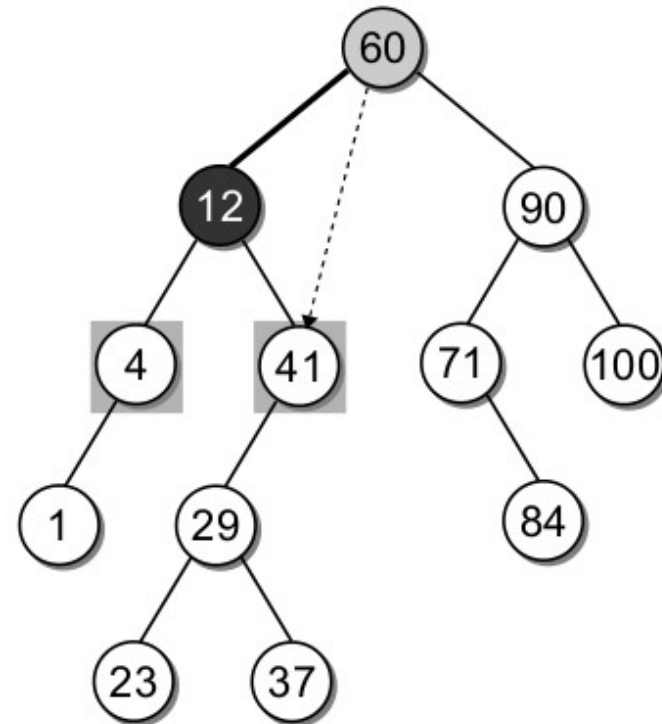
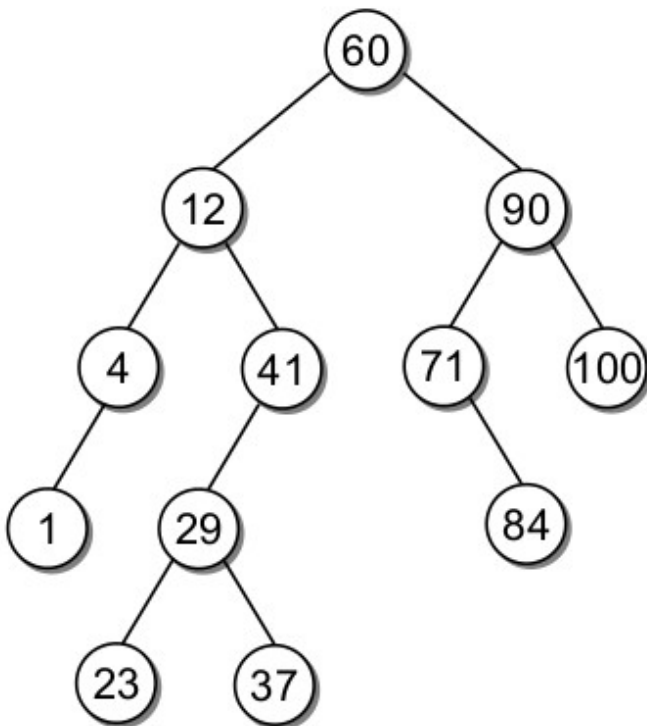
# Remoção

- Remover nó interior com 2 filhos
  - Essa é a sua situação mais difícil.
  - O que aconteceria na árvore para remover o nó 12?



# Remoção

- Remover nó interior com 2 filhos
  - Essa é a sua situação mais difícil.
  - O que aconteceria na árvore para remover o nó 12?



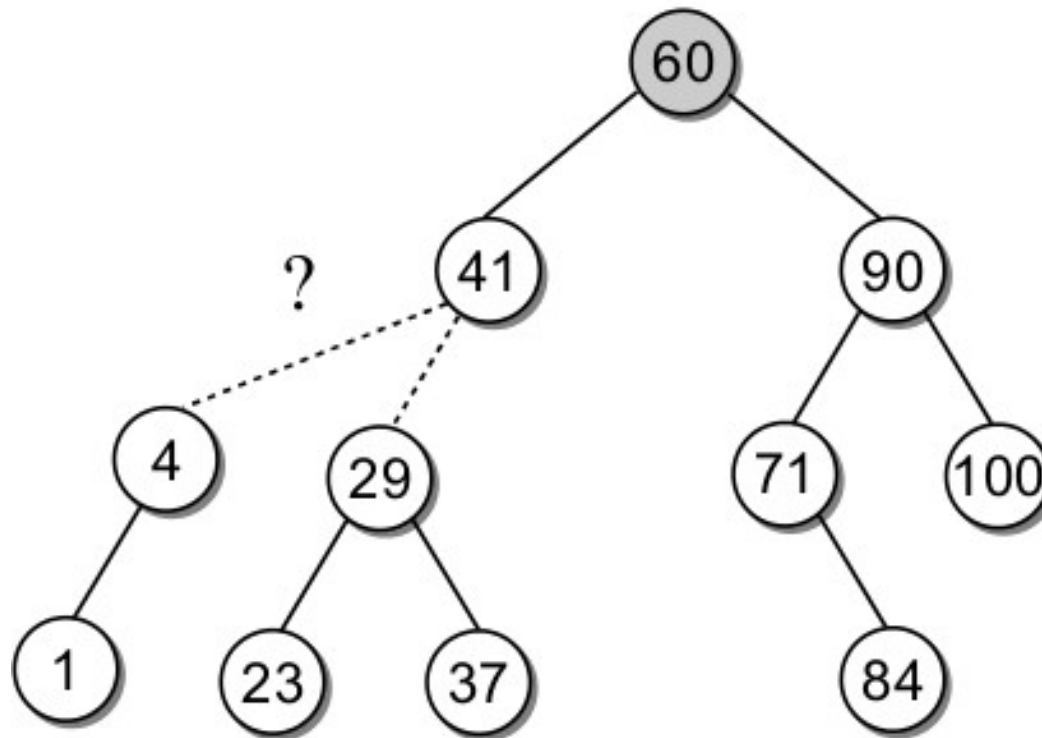
# Remoção

# Remoção

- O resultado da remoção anterior seria a árvore abaixo.

# Remoção

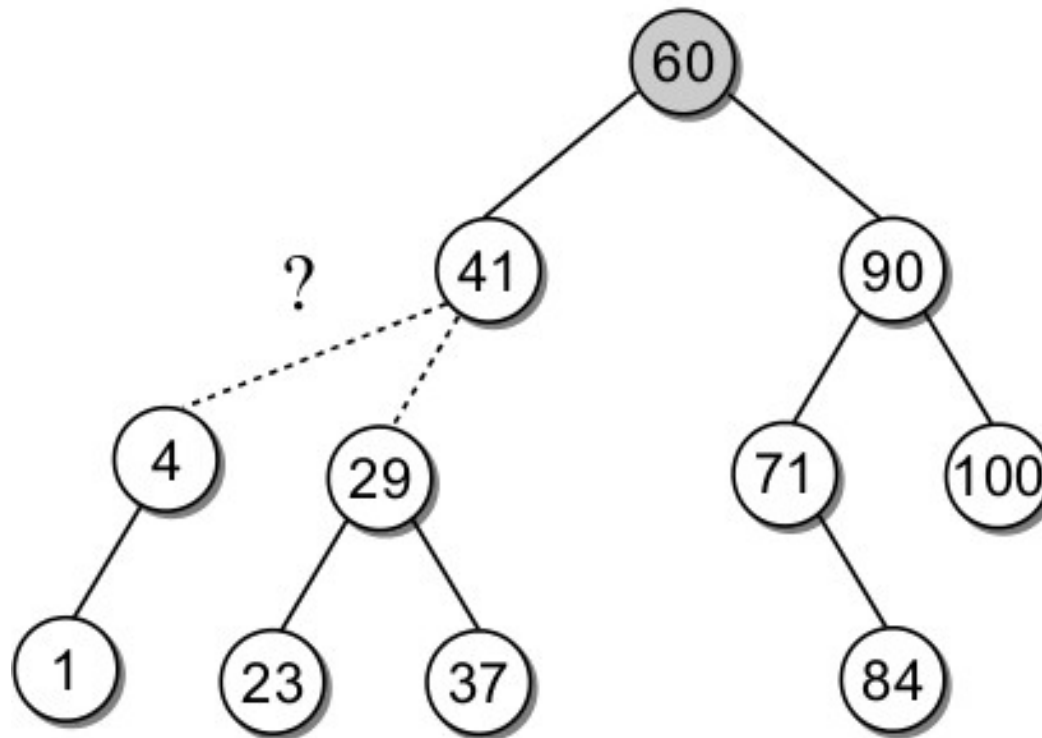
- O resultado da remoção anterior seria a árvore abaixo.





# Remoção

- O resultado da remoção anterior seria a árvore abaixo.
- O nó 41 teria dois filhos à esquerda.



# Remoção

# Remoção

- Remover o nó interior com dois filhos:

# Remoção

- Remover o nó interior com dois filhos:
  - Encontrar o sucessor lógico,  $S$ , do nó que será removido  $N$ .

# Remoção

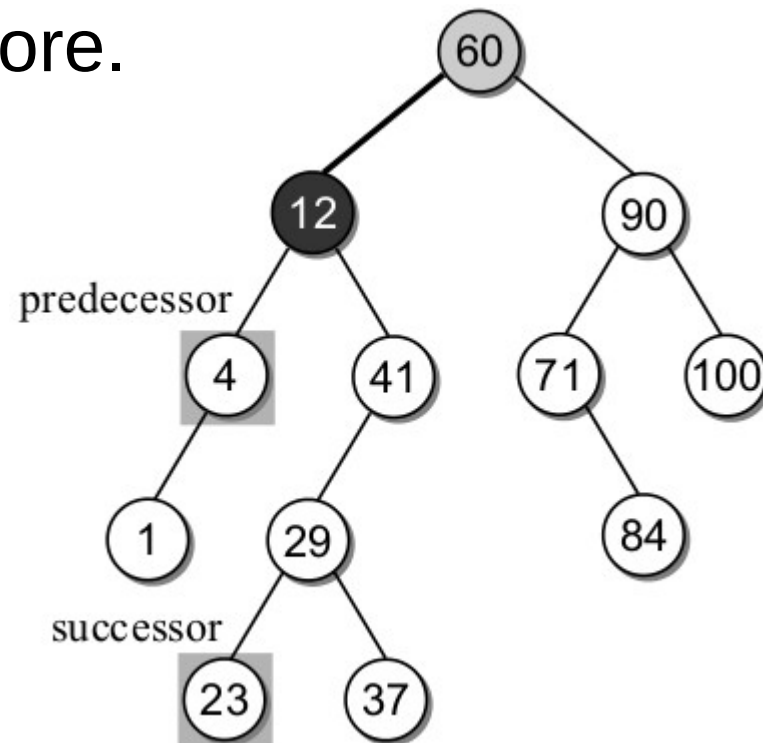
- Remover o nó interior com dois filhos:
  - Encontrar o sucessor lógico, S, do nó que será removido N.
  - Copiar a chave do nó S para N.

# Remoção

- Remover o nó interior com dois filhos:
  - Encontrar o sucessor lógico, S, do nó que será removido N.
  - Copiar a chave do nó S para N.
  - Remover o nó S da árvore.

# Remoção

- Remover o nó interior com dois filhos:
  - Encontrar o sucessor lógico, S, do nó que será removido N.
  - Copiar a chave do nó S para N.
  - Remover o nó S da árvore.



# Remoção



# Remoção

- A dúvida que surge é:

# Remoção

- A dúvida que surge é:
  - Como encontrar o sucessor de um nó e onde ele estará localizado na árvore?

# Remoção

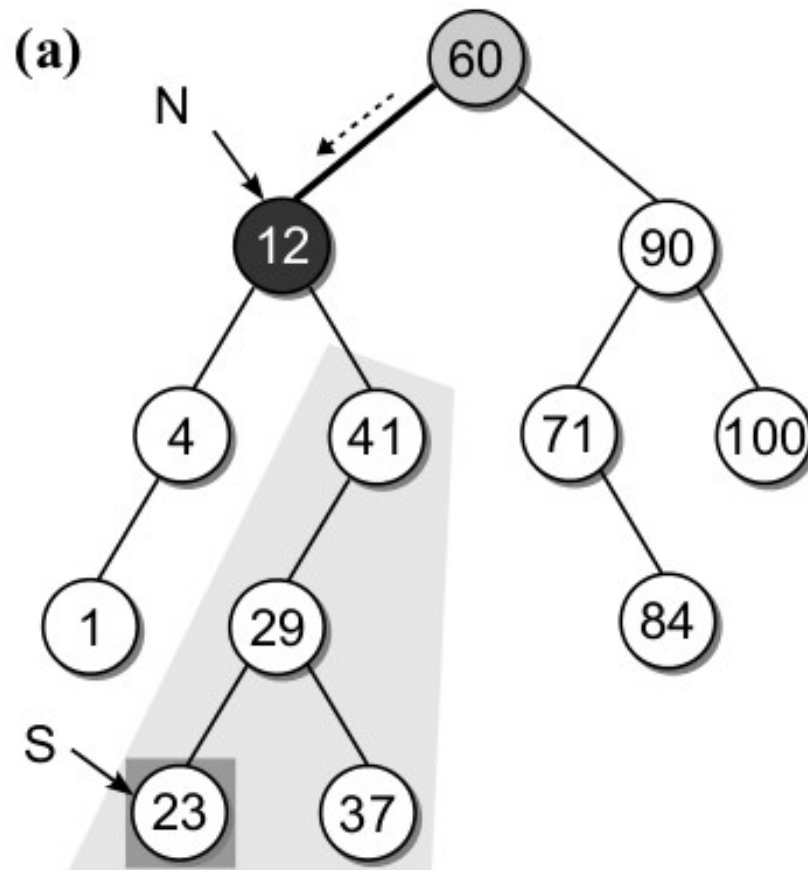
- A dúvida que surge é:
  - Como encontrar o sucessor de um nó e onde ele estará localizado na árvore?
  - O sucessor é o menor elemento dos elementos que sejam maiores que o nó que será removido.

# Remoção

- A dúvida que surge é:
  - Como encontrar o sucessor de um nó e onde ele estará localizado na árvore?
  - O sucessor é o menor elemento dos elementos que sejam maiores que o nó que será removido.
  - De acordo com as propriedades de uma ABB, o sucessor de um nó é o seu pai ou algum nó que esteja a sua direita.

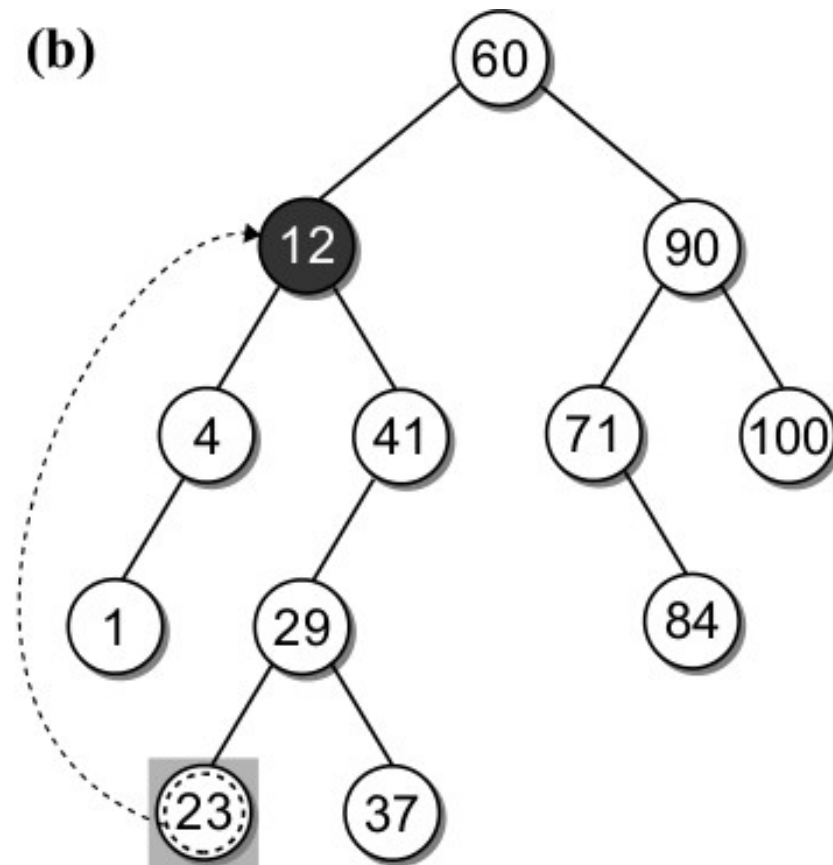
# Remoção

- Passo 1
  - Achar o nó N e o seu sucessor S.



# Remoção

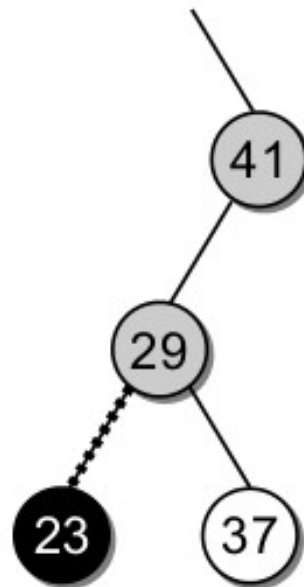
- Passo 2
  - Copiar o nó S para N.



# Remoção

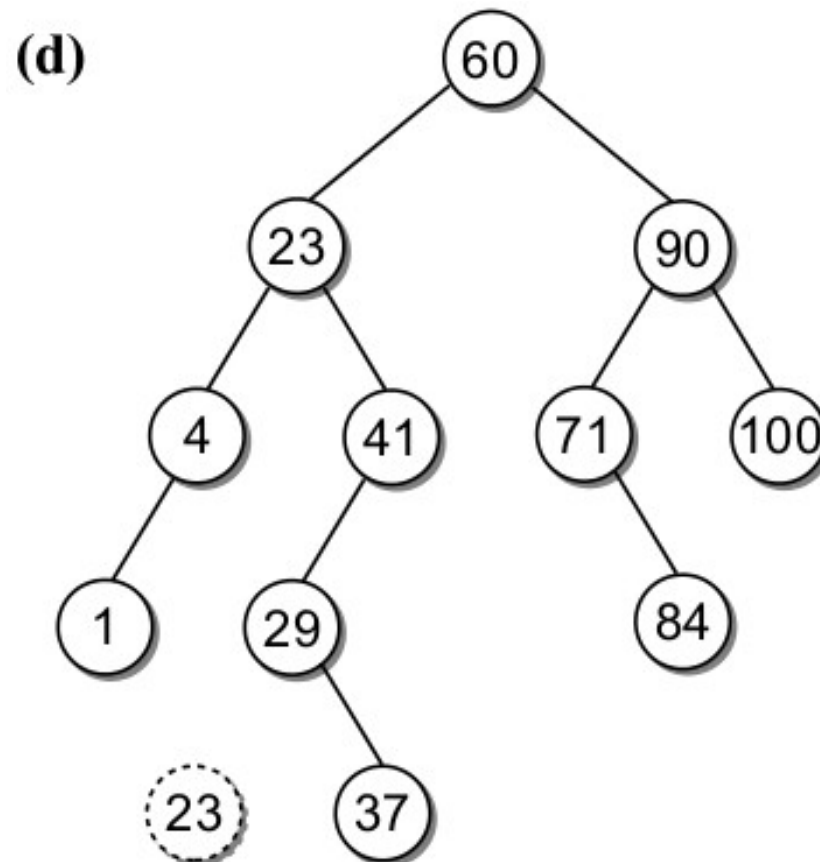
- Passo 3
  - Remova o sucessor S que estava à direita.

(c)



# Remoção

- Passo 4
  - Remova o sucessor S que estava à direita.



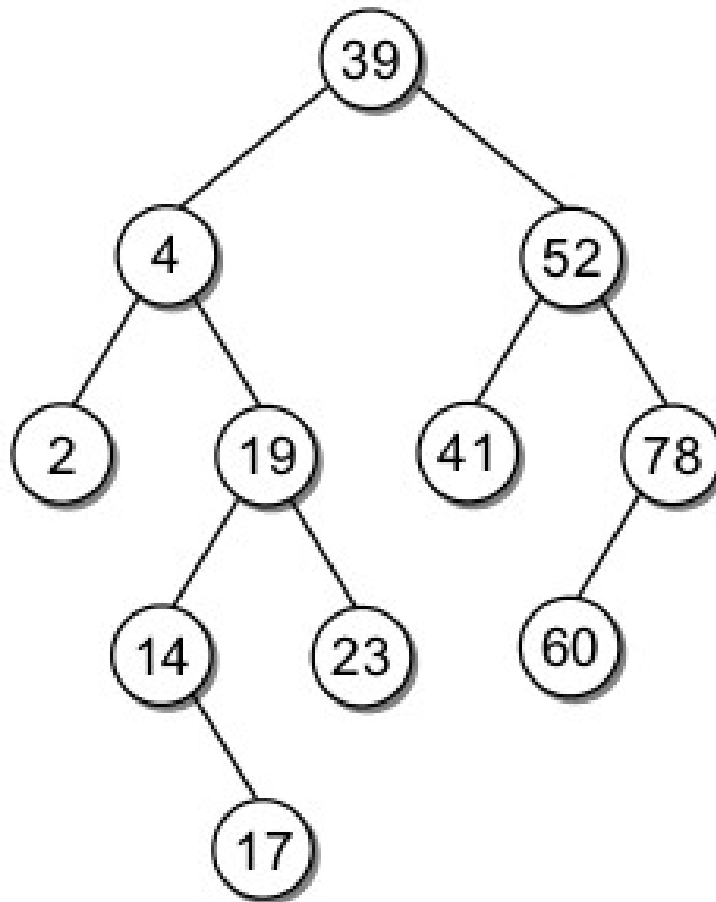


# Eficiência das ABB

Operation	Worst Case
<code>_bstSearch(root, k)</code>	$O(n)$
<code>_bstMinimum(root)</code>	$O(n)$
<code>_bstInsert(root, k)</code>	$O(n)$
<code>_bstDelete(root, k)</code>	$O(n)$
traversal	$O(n)$

# Exercícios

- Considere a árvore binária de busca abaixo e mostre o resultado após deletar cada uma das seguintes chaves: 14, 52 e 39.



# Exercícios

- Discuta a avaliação entre uma implementação de uma lista ordenada e a implementação de uma árvore binária de busca.
- Considere que as chaves 50, 30, 70, 20, 40, 60, 80, 15, 25, 35, 45 e 36 são inseridas, nesta ordem, numa árvore de busca inicialmente vazia. Desenhe a árvore resultante.
- O que aconteceria se o nó 30 fosse removido da árvore construída no exercício anterior? Desenhe essa árvore resultante.

# Exercícios

- Escreva uma função em Python para verificar se uma árvore é uma ABB.
- Escreva uma função em Python para verificar se duas ABBs são iguais.