



MC102 – Aula 10

Algoritmos de Ordenação

Algoritmos e Programação de Computadores

Zanoni Dias

2019

Instituto de Computação

O Problema da Ordenação

Selection Sort

Insertion Sort

Bubble Sort

Exercícios

O Problema da Ordenação

O Problema da Ordenação

- Vamos estudar alguns algoritmos para o seguinte problema:

Definição do Problema

Dada uma coleção de elementos, com uma relação de ordem entre eles, ordenar os elementos da coleção de forma crescente.

- Nos nossos exemplos, a coleção de elementos será representada por uma lista de inteiros.
 - Números inteiros possuem uma relação de ordem entre eles.
- Apesar de usarmos números inteiros, os algoritmos que estudaremos servem para ordenar qualquer coleção de elementos que possam ser comparados entre si.

O Problema da Ordenação

- O problema da ordenação é um dos mais básicos em computação.
- Muito provavelmente este é um dos problemas com maior número de aplicações diretas ou indiretas (como parte da solução para um problema maior).
- Exemplos de aplicações diretas:
 - criação de *rankings*.
 - definição de preferências em atendimentos por prioridade.
 - criação de listas.
- Exemplos de aplicações indiretas:
 - otimização de sistemas de busca.
 - manutenção de estruturas de bancos de dados.

Selection Sort

Selection Sort

- Dada uma lista contendo n números inteiros, desejamos ordenar essa lista de forma crescente.
- A ideia do algoritmo é a seguinte:
 - Encontre o menor elemento a partir da posição 0. Troque este elemento com o elemento da posição 0.
 - Encontre o menor elemento a partir da posição 1. Troque este elemento com o elemento da posição 1.
 - Encontre o menor elemento a partir da posição 2. Troque este elemento com o elemento da posição 2.
 - E assim sucessivamente...

Selection Sort

- No exemplo abaixo, os elementos sublinhados representam os elementos que serão trocados na iteração i do Selection Sort:

Iteração 0: (57, 32, 25, 11, 90, 63)

Iteração 1: (11, 32, 25, 57, 90, 63)

Iteração 2: (11, 25, 32, 57, 90, 63)

Iteração 3: (11, 25, 32, 57, 90, 63)

Iteração 4: (11, 25, 32, 57, 90, 63)

Iteração 5: (11, 25, 32, 57, 63, 90)

Selection Sort

- Podemos criar uma função que retorna o índice do menor elemento de uma lista (formado por n números inteiros) a partir de uma posição inicial dada:

```
1 def indiceMenor(lista, inicio):
2     minimo = inicio
3     n = len(lista)
4     for j in range(inicio + 1, n):
5         if lista[minimo] > lista[j]:
6             minimo = j
7     return minimo
```

- Dada a função anterior, que encontra o índice do menor elemento de uma lista a partir de uma dada posição, como implementar o algoritmo de ordenação?
 - Encontre o menor elemento a partir da posição 0 e troque-o com o elemento da posição 0.
 - Encontre o menor elemento a partir da posição 1 e troque-o com o elemento da posição 1.
 - Encontre o menor elemento a partir da posição 2 e troque-o com o elemento da posição 2.
 - E assim sucessivamente...

Selection Sort

- Podemos trocar os elementos das posições i e j da seguinte forma:

```
1 lista = [1, 2, 3, 4, 5]
2 i = 0 # lista[0] = 1
3 j = 2 # lista[2] = 3
4
5 aux = lista[i]
6 lista[i] = lista[j]
7 lista[j] = aux
8
9 print(lista)
10 # [3, 2, 1, 4, 5]
```

- Também podemos trocar os elementos das posições i e j usando menos linhas de código:

```
1 lista = [1, 2, 3, 4, 5]
2 i = 0 # lista[0] = 1
3 j = 2 # lista[2] = 3
4
5 (lista[i], lista[j]) = (lista[j], lista[i])
6
7 print(lista)
8 # [3, 2, 1, 4, 5]
```

Selection Sort

- Usando a função auxiliar `indiceMenor` podemos implementar o Selection Sort da seguinte forma:

```
1 def selectionSort(lista):  
2     n = len(lista)  
3     for i in range(n):  
4         minimo = indiceMenor(lista, i)  
5         (lista[i], lista[minimo]) = (lista[minimo], lista[i])
```

Selection Sort

- Usando a função auxiliar `indiceMenor` podemos implementar o Selection Sort da seguinte forma:

```
1 def selectionSort(lista):  
2     n = len(lista)  
3     for i in range(n - 1):  
4         minimo = indiceMenor(lista, i)  
5         (lista[i], lista[minimo]) = (lista[minimo], lista[i])
```

Selection Sort - Análise de Complexidade

```
1 def selectionSort(lista):  
2     n = len(lista)  
3     for i in range(n - 1):  
4         minimo = indiceMenor(lista, i)  
5         (lista[i], lista[minimo]) = (lista[minimo], lista[i])
```

- Número máximo de comparações entre elementos da lista:

$$f(n) = \sum_{i=0}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} 1 = \sum_{i=0}^{n-2} n - i - 1 = \sum_{i=1}^{n-1} i = (n-1) \frac{n}{2} = \frac{n^2 - n}{2}$$

Selection Sort - Análise de Complexidade

```
1 def selectionSort(lista):
2     n = len(lista)
3     for i in range(n - 1):
4         minimo = indiceMenor(lista, i)
5         (lista[i], lista[minimo]) = (lista[minimo], lista[i])
```

- Número máximo de trocas entre elementos da lista:

$$f(n) = \sum_{i=0}^{n-2} 1 = n - 1$$

Selection Sort - Análise de Complexidade

```
1 def selectionSort(lista):  
2     n = len(lista)  
3     for i in range(n - 1):  
4         minimo = indiceMenor(lista, i)  
5         (lista[i], lista[minimo]) = (lista[minimo], lista[i])
```

- Número mínimo de comparações entre elementos da lista:

$$f(n) = \sum_{i=0}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} 1 = \sum_{i=0}^{n-2} n - i - 1 = \sum_{i=1}^{n-1} i = (n-1) \frac{n}{2} = \frac{n^2 - n}{2}$$

Selection Sort - Análise de Complexidade

```
1 def selectionSort(lista):  
2     n = len(lista)  
3     for i in range(n - 1):  
4         minimo = indiceMenor(lista, i)  
5         (lista[i], lista[minimo]) = (lista[minimo], lista[i])
```

- Número mínimo de trocas entre elementos da lista:

$$f(n) = \sum_{i=0}^{n-2} 1 = n - 1$$

- É possível diminuir o número de trocas no melhor caso?
- Vale a pena testar se `lista[i] ≠ lista[minimo]` antes de realizar a troca?

Insertion Sort

- A ideia do algoritmo Insertion Sort é a seguinte:
 - A cada iteração i , os elementos das posições 0 até $i-1$ da lista estão ordenados.
 - Então, precisamos inserir o elemento da posição i , entre as posições 0 e i , de forma a deixar a lista ordenada até a posição i .
 - Na iteração seguinte, consideramos que a lista está ordenada até a posição i e repetimos o processo até que a lista esteja completamente ordenada.

- No exemplo abaixo, o elemento sublinhado representa o elemento que será inserido na i -ésima iteração do Insertion Sort:

(57, 25, 32, 11, 90, 63): lista ordenada entre as posições 0 e 0.

(25, 57, 32, 11, 90, 63): lista ordenada entre as posições 0 e 1.

(25, 32, 57, 11, 90, 63): lista ordenada entre as posições 0 e 2.

(11, 25, 32, 57, 90, 63): lista ordenada entre as posições 0 e 3.

(11, 25, 32, 57, 90, 63): lista ordenada entre as posições 0 e 4.

(11, 25, 32, 57, 63, 90): lista ordenada entre as posições 0 e 5.

Insertion Sort

- Podemos criar uma função que, dados uma lista e um índice i , insere o elemento de índice i entre os elementos das posições 0 e $i-1$ (pré-ordenados), de forma que todos os elementos entre as posições 0 e i fiquem ordenados:

```
1 def insertion(lista, i):
2     aux = lista[i]
3     j = i - 1
4     while (j >= 0) and (lista[j] > aux):
5         lista[j + 1] = lista[j]
6         j = j - 1
7     lista[j + 1] = aux
```

- Exemplo de execução da função `insertion`:

- Configuração inicial:

(11, 31, 54, 58, 66, 12, 47), `i = 5`, `aux = 12`

- Iterações:

(11, 31, 54, 58, 66, 12, 47), `j = 4`

(11, 31, 54, 58, 66, 66, 47), `j = 3`

(11, 31, 54, 58, 58, 66, 47), `j = 2`

(11, 31, 54, 54, 58, 66, 47), `j = 1`

(11, 31, 31, 54, 58, 66, 47), `j = 0`

- Neste ponto temos que `lista[j] < aux`, logo, o loop `while` é encerrado e a atribuição `lista[j + 1] = aux` é executada:

(11, 12, 31, 54, 58, 66, 47)

Insertion Sort

- Em Python podemos implementar a função `insertion` de forma ainda mais simples, inserindo o elemento na posição desejada com um único comando.

```
1 def insertion(lista, i):  
2     j = i - 1  
3     while (j >= 0) and (lista[j] > lista[i]):  
4         j = j - 1  
5     lista[j + 1:i + 1] = lista[i:i + 1] + lista[j + 1:i]
```

- Usando a função auxiliar `insertion` podemos implementar o Insertion Sort da seguinte forma:

```
1 def insertionSort(lista):  
2     n = len(lista)  
3     for i in range(1, n):  
4         insertion(lista, i)
```

Insertion Sort - Análise de Complexidade

```
1 def insertionSort(lista):  
2     n = len(lista)  
3     for i in range(1, n):  
4         insertion(lista, i)
```

- Número máximo de comparações entre elementos da lista:

$$f(n) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=0}^{i-1} 1 = \sum_{i=1}^{n-1} i = (n-1) \frac{n}{2} = \frac{n^2 - n}{2}$$

Insertion Sort - Análise de Complexidade

```
1 def insertionSort(lista):  
2     n = len(lista)  
3     for i in range(1, n):  
4         insertion(lista, i)
```

- Número máximo de modificações realizadas na lista:

$$f(n) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=0}^i 1 = \sum_{i=1}^{n-1} (i+1) = (n-1) \frac{n+2}{2} = \frac{n^2+n}{2} - 1$$

Insertion Sort - Análise de Complexidade

```
1 def insertionSort(lista):  
2     n = len(lista)  
3     for i in range(1, n):  
4         insertion(lista, i)
```

- Número mínimo de comparações entre elementos da lista:

$$f(n) = \sum_{i=1}^{n-1} 1 = n - 1$$

Insertion Sort - Análise de Complexidade

```
1 def insertionSort(lista):  
2     n = len(lista)  
3     for i in range(1, n):  
4         insertion(lista, i)
```

- Número mínimo de modificações realizadas na lista:

$$f(n) = \sum_{i=1}^{n-1} 1 = n - 1$$

Bubble Sort

- A ideia do algoritmo Bubble Sort é a seguinte:
- O algoritmo faz iterações repetindo os seguintes passos:
 - Se `lista[0] > lista[1]`, troque `lista[0]` com `lista[1]`.
 - Se `lista[1] > lista[2]`, troque `lista[1]` com `lista[2]`.
 - Se `lista[2] > lista[3]`, troque `lista[2]` com `lista[3]`.
 - ...
 - Se `lista[n-2] > lista[n-1]`, troque `lista[n-2]` com `lista[n-1]`.
- Após uma iteração executando os passos acima, o que podemos garantir?
 - O maior elemento estará na posição correta (a última da lista).

- Após a primeira iteração de trocas, o maior elemento estará na posição correta.
- Após a segunda iteração de trocas, o segundo maior elemento estará na posição correta.
- E assim sucessivamente...
- Quantas iterações são necessárias para deixar a lista completamente ordenado?

Bubble Sort

- No exemplo abaixo, os elementos sublinhados estão sendo comparados (e, eventualmente, serão trocados):

(57, 32, 25, 11, 90, 63)

(32, 57, 25, 11, 90, 63)

(32, 25, 57, 11, 90, 63)

(32, 25, 11, 57, 90, 63)

(32, 25, 11, 57, 90, 63)

(32, 25, 11, 57, 63, 90)

- Isto termina a primeira iteração de trocas.
- Como a lista possui 6 elementos, temos que realizar 5 iterações.
- Note que, após a primeira iteração, não precisamos mais avaliar a última posição da lista.

Bubble Sort

- O código abaixo realiza as trocas de uma iteração do algoritmo.
- Os pares de elementos das posições 0 e 1 , 1 e 2 , ..., $i-1$ e i são comparados e, eventualmente, trocados.
- Assumimos que, das posições $i+1$ até $n-1$, a lista já possui os maiores elementos ordenados.

```
1 for j in range(i):  
2     if lista[j] > lista[j + 1]:  
3         (lista[j], lista[j + 1]) = (lista[j + 1], lista[j])
```

Bubble Sort

```
1 def bubbleSort(lista):
2     n = len(lista)
3     for i in range(n - 1, 0, -1):
4         for j in range(i):
5             if lista[j] > lista[j + 1]:
6                 (lista[j], lista[j + 1]) = (lista[j + 1], lista[j])
```

- Note que as comparações na primeira iteração ocorrem até a última posição da lista.
- Na segunda iteração, elas ocorrem até a penúltima posição.
- E assim sucessivamente...

Bubble Sort - Análise de Complexidade

```
1 def bubbleSort(lista):
2     n = len(lista)
3     for i in range(n - 1, 0, -1):
4         for j in range(i):
5             if lista[j] > lista[j + 1]:
6                 (lista[j], lista[j + 1]) = (lista[j + 1], lista[j])
```

- Número máximo de comparações entre elementos da lista:

$$f(n) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=0}^{i-1} 1 = \sum_{i=1}^{n-1} i = (n-1) \frac{n}{2} = \frac{n^2 - n}{2}$$

Bubble Sort - Análise de Complexidade

```
1 def bubbleSort(lista):
2     n = len(lista)
3     for i in range(n - 1, 0, -1):
4         for j in range(i):
5             if lista[j] > lista[j + 1]:
6                 (lista[j], lista[j + 1]) = (lista[j + 1], lista[j])
```

- Número máximo de trocas entre elementos da lista:

$$f(n) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=0}^{i-1} 1 = \sum_{i=1}^{n-1} i = (n-1) \frac{n}{2} = \frac{n^2 - n}{2}$$

```
1 def bubbleSort(lista):
2     n = len(lista)
3     for i in range(n - 1, 0, -1):
4         for j in range(i):
5             if lista[j] > lista[j + 1]:
6                 (lista[j], lista[j + 1]) = (lista[j + 1], lista[j])
```

- Número mínimo de comparações entre elementos da lista:

$$f(n) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=0}^{i-1} 1 = \sum_{i=1}^{n-1} i = (n-1) \frac{n}{2} = \frac{n^2 - n}{2}$$

Bubble Sort - Análise de Complexidade

```
1 def bubbleSort(lista):  
2     n = len(lista)  
3     for i in range(n - 1, 0, -1):  
4         for j in range(i):  
5             if lista[j] > lista[j + 1]:  
6                 (lista[j], lista[j + 1]) = (lista[j + 1], lista[j])
```

- Número mínimo de trocas entre elementos da lista:

$$f(n) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=0}^{i-1} 0 = 0$$

- Não existe um algoritmo de ordenação que seja o melhor em todas as possíveis situações.
- Para escolher o algoritmo mais adequado para uma dada situação, precisamos verificar as características específicas dos elementos que devem ser ordenados.
- Por exemplo:
 - Se os elementos a serem ordenados forem grandes, por exemplo, registros acadêmicos de alunos, o Selection Sort pode ser uma boa escolha, já que ele efetuará, no pior caso, muito menos trocas que o Insertion Sort ou o Bubble Sort.
 - Se os elementos a serem ordenados estiverem quase ordenados (situação relativamente comum), o Insertion Sort realizará muito menos operações (comparações e trocas) do que o Selection Sort ou o Bubble Sort.

Exercícios

1. Altere o Bubble Sort para que o algoritmo pare assim que for possível perceber que a lista está ordenada. Qual o custo deste novo algoritmo em termos do número de comparações entre elementos da lista (tanto no melhor, quanto no pior caso)?
2. Escreva uma função **k-ésimo** que, dada uma lista de tamanho n e um inteiro k (tal que $1 \leq k \leq n$), determine o **k-ésimo** menor elemento da lista. Analise o custo da sua função em termos do número de comparações realizadas entre elementos da lista.

Exercício 1

```
1 def bubbleSort(lista):
2     n = len(lista)
3     for i in range(n - 1, 0, -1):
4         OK = True
5         for j in range(i):
6             if lista[j] > lista[j + 1]:
7                 (lista[j], lista[j + 1]) = (lista[j + 1], lista[j])
8                 OK = False
9         if OK:
10            return
```

Exercício 2

```
1 def k_menor(lista, k):
2     lista = lista.copy()
3     for i in range(k):
4         minimo = indiceMenor(lista, i)
5         (lista[i], lista[minimo]) = (lista[minimo], lista[i])
6     return lista[k - 1]
```