


Algoritmos de Procura e de Ordenação III

09/10/2024

Sumário

- Recap
- Bubble Sort – Ordenação por troca sequencial
- Insertion Sort – Ordenação por inserção
- Exercícios / Tarefas 
- Sugestão de leitura

Let's
RECAP

Recapitulação

Selection Sort – Lembram-se do exemplo ?

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |
| 3 | 2 | 6 | 4 | 7 |
| 3 | 2 | 4 | 6 | 7 |
| 3 | 2 | 4 | 6 | 7 |
| 2 | 3 | 4 | 6 | 7 |

5 elementos
4 passos

- N^o de comparações = $4 + 3 + 2 + 1$
- N^o de trocas = $1 + 1 + 0 + 1$

Selection Sort – Ordem de Complexidade

- Nº fixo de **Comparações** entre elementos do array :

$$C(n) \approx \frac{n^2}{2} \Rightarrow \mathbf{O(n^2)}$$

- Nº de **Trocas** entre elementos do array:

$$W_T(n) = n - 1 \Rightarrow \mathbf{O(n)}$$

$$A_T(n) \approx n - \ln n \Rightarrow \mathbf{O(n)}$$

$$B_T(n) = 0$$

Bubble Sort

– Ordenação por Troca Sequencial

Bubble Sort – Estratégia

- Percorrer o array da esquerda para a direita
- Trocar elementos adjacentes, se estiverem fora de ordem
 - Quantas comparações ?
- A última ocorrência do maior elemento fica na sua posição final
- Repetir o processo para os restantes elementos
 - Parar logo que possível !
- Algoritmo in-place
- Shaker Sort : alternar o sentido : esquerda-direita / direita-esquerda

Exemplo

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |

Exemplo – 1ª Iteração

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |

| | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |
|----------|----------|----------|----------|----------|

1ª iteração

Exemplo – Avançar e trocar, se necessário

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |

1ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |
| 2 | 7 | 6 | 4 | 3 |

Exemplo – Avançar e trocar, se necessário

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |

1ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |
| 2 | 7 | 6 | 4 | 3 |
| 2 | 6 | 7 | 4 | 3 |

Exemplo – Avançar e trocar, se necessário

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |

1ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |
| 2 | 7 | 6 | 4 | 3 |
| 2 | 6 | 7 | 4 | 3 |
| 2 | 6 | 4 | 7 | 3 |

Exemplo – Posição final

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |

1ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |
| 2 | 7 | 6 | 4 | 3 |
| 2 | 6 | 7 | 4 | 3 |
| 2 | 6 | 4 | 7 | 3 |
| 2 | 6 | 4 | 3 | 7 |

- 4 comparações + 4 trocas

Exemplo – 2ª Iteração

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 6 | 4 | 3 | 7 |
| 2 | 6 | 4 | 3 | 7 |

2ª iteração

Exemplo – Avançar e trocar, se necessário

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 6 | 4 | 3 | 7 |

2ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 6 | 4 | 3 | 7 |
| 2 | 6 | 4 | 3 | 7 |

Exemplo – Avançar e trocar, se necessário

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 6 | 4 | 3 | 7 |

2ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 6 | 4 | 3 | 7 |
| 2 | 6 | 4 | 3 | 7 |
| 2 | 4 | 6 | 3 | 7 |

Exemplo – Posição final

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 6 | 4 | 3 | 7 |

2ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 6 | 4 | 3 | 7 |
| 2 | 6 | 4 | 3 | 7 |
| 2 | 4 | 6 | 3 | 7 |
| 2 | 4 | 3 | 6 | 7 |

- 3 comparações + 2 trocas

Exemplo – 3ª Iteração

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 3 | 6 | 7 |
| 2 | 4 | 3 | 6 | 7 |

3ª iteração

Exemplo – Avançar e trocar, se necessário

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 3 | 6 | 7 |

3ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 3 | 6 | 7 |
| 2 | 4 | 3 | 6 | 7 |

Exemplo – Posição final

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 3 | 6 | 7 |

3ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 3 | 6 | 7 |
| 2 | 4 | 3 | 6 | 7 |
| 2 | 3 | 4 | 6 | 7 |

- 2 comparações + 1 troca

Exemplo – Posição final – Array ordenado





| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 3 | 4 | 6 | 7 |

4ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 3 | 4 | 6 | 7 |
| 2 | 3 | 4 | 6 | 7 |

- 1 comparação + 0 trocas
- TOTAL de comparações = $4 + 3 + 2 + 1$
- TOTAL de trocas = $4 + 2 + 1 + 0$

Bubble Sort

```
void bubbleSort( int a[], int n ) {  
    int k = n; int stop = 0;  
    while( stop == 0 ) {  
         stop = 1; k--;  
        for( int i = 0; i < k; i++ )  
            if( a[i] > a[i + 1] ) {   
                 swap( &a[i], &a[i + 1] );  
                stop = 0;   
            }  
        }  
    }  
}
```

Nº de Comparações – Melhor Caso e Pior Caso

- Melhor Caso ? - Array ordenado

- $B_c(n) = n - 1$ $O(n)$

- Pior Caso ? - Array pela ordem inversa, sem elementos repetidos

- $W_c(n) = \sum_{k=1}^{n-1} k = \frac{n(n-1)}{2} = \frac{n^2}{2} - \frac{n}{2}$ $O(n^2)$

Nº de Trocas – Melhor Caso e Pior Caso

- Melhor Caso ? - Array ordenado

- $B_t(n) = 0$ $O(1)$

- Pior Caso ? - Array pela ordem inversa, sem elementos repetidos
- 1 troca para cada comparação

- $W_t(n) = W_c(n) = \sum_{k=1}^{n-1} k = \frac{n(n-1)}{2} = \frac{n^2}{2} - \frac{n}{2}$ $O(n^2)$

Nº de Comparações – Caso Médio

- Casos possíveis ?

| Nº de iterações do ciclo while | Nº de comparações realizadas : $C(j)$ | Probabilidade |
|--------------------------------|---------------------------------------|---------------|
| 1 | $(n - 1)$ | |
| 2 | $(n - 1) + (n - 2)$ | |
| ... | ... | |
| j | $(n - 1) + (n - 2) + \dots + (n - j)$ | |
| ... | ... | |
| $n - 2$ | $(n - 1) + (n - 2) + \dots + 2$ | |
| $n - 1$ | $(n - 1) + (n - 2) + \dots + 2 + 1$ | |

- $C(j) = \sum_{i=1}^j (n - i) = \frac{j}{2} [(n - 1) + (n - j)] = \frac{j}{2} [(2n - 1) - j]$

Nº de Comparações – Caso Médio

- Probabilidade ? Simplificação...

| Nº de iterações do ciclo while | Nº de comparações realizadas : $C(j)$ | Probabilidade |
|--------------------------------|---------------------------------------|---------------|
| 1 | $(n - 1)$ | $1 / (n - 1)$ |
| 2 | $(n - 1) + (n - 2)$ | $1 / (n - 1)$ |
| ... | ... | ... |
| j | $(n - 1) + (n - 2) + \dots + (n - j)$ | $1 / (n - 1)$ |
| ... | ... | ... |
| $n - 2$ | $(n - 1) + (n - 2) + \dots + 2$ | $1 / (n - 1)$ |
| $n - 1$ | $(n - 1) + (n - 2) + \dots + 2 + 1$ | $1 / (n - 1)$ |

- Habitualmente, para **arrays aleatórios**, o **número de iterações** do ciclo while é próximo do seu número **máximo**

Nº de Comparações – Caso Médio

$$A_c(n) = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{n-1} C(k) = \dots = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{k=1}^{n-1} [(2n-1)k - k^2]$$

Expressão auxiliar: $\sum_{k=1}^n k^2 = \frac{1}{6}n(n+1)(2n+1)$

$$A_c(n) = \frac{1}{3}n^2 - \frac{1}{6}n \quad \mathbf{O(n^2)}$$

- Façam o desenvolvimento e confirmem o resultado

Insertion Sort

– Ordenação por Inserção

Insertion Sort – Estratégia

- O elemento $a[0]$ constitui um subconjunto de um só elemento
- **Inserir ordenadamente o elemento $a[1]$** nesse subconjunto
 - 1 comparação + 0 ou 1 troca de posição
- Temos agora um subconjunto ordenado com **dois elementos**
- **Repetir** o processo, um a um, para os restantes elementos do array
 - Casos possíveis ? Quantas **comparações** ? Quantos **deslocamentos** ?
- Algoritmo **in-place**
- **Variante:** começar na outra extremidade do array

Exemplo

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |

Exemplo – 1ª Iteração

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |

1ª iteração

Exemplo – Inserir ordenadamente

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |
|---|---|---|---|---|

1ª iteração

Exemplo – Posição final

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |

1ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 7 | 2 | 6 | 4 | 3 |
| 2 | 7 | 6 | 4 | 3 |

- 1 comparação + 1 deslocamento

Exemplo – Inserir ordenadamente

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 7 | 6 | 4 | 3 |
| 2 | 7 | 6 | 4 | 3 |

2ª iteração

Exemplo – Posição final

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 7 | 6 | 4 | 3 |

2ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 7 | 6 | 4 | 3 |
| 2 | 6 | 7 | 4 | 3 |

- 2 comparações + 1 deslocamento

Exemplo – Inserir ordenadamente

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 6 | 7 | 4 | 3 |
| 2 | 6 | 7 | 4 | 3 |

3ª iteração

Exemplo – Continuar a deslocar

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 6 | 7 | 4 | 3 |

3ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 6 | 7 | 4 | 3 |
| 2 | 6 | 4 | 7 | 3 |

Exemplo – Posição final

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 6 | 7 | 4 | 3 |

3ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 6 | 7 | 4 | 3 |
| 2 | 6 | 4 | 7 | 3 |
| 2 | 4 | 6 | 7 | 3 |

- 3 comparações + 2 deslocamentos

Exemplo – Inserir ordenadamente

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 6 | 7 | 3 |
| 2 | 4 | 6 | 7 | 3 |

4ª iteração

Exemplo – Continuar a deslocar

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 6 | 7 | 3 |

4ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 6 | 7 | 3 |
| 2 | 4 | 6 | 3 | 7 |

Exemplo – Continuar a deslocar

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 6 | 7 | 3 |

4ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 6 | 7 | 3 |
| 2 | 4 | 6 | 3 | 7 |
| 2 | 4 | 3 | 6 | 7 |

Exemplo – Posição final

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 6 | 7 | 3 |

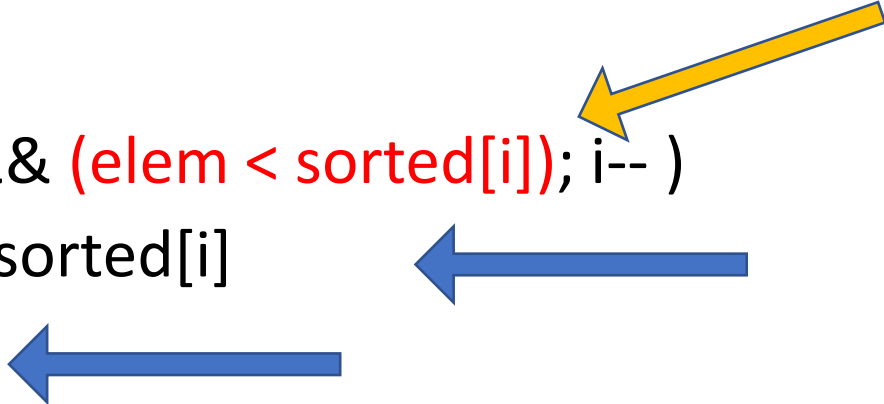
4ª iteração

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 6 | 7 | 3 |
| 2 | 4 | 6 | 3 | 7 |
| 2 | 4 | 3 | 6 | 7 |
| 2 | 3 | 4 | 6 | 7 |

4 comparações + 3 deslocamentos

Função Auxiliar – Inserção Ordenada

```
void insertElement( int sorted[], int n, int elem ) {  
    // Array sorted está ordenado  
    // Há espaço para acrescentar mais um elemento  
    int i;  
    for( i = n - 1; (i >= 0) && (elem < sorted[i]); i-- )  
        sorted[i + 1] = sorted[i]  
    sorted[i + 1] = elem;  
}
```



- Deslocamentos para a direita, para abrir espaço e inserir

Comparações – Melhor Caso e Pior Caso

- Melhor Caso

- $B(n) = 1$

- $\text{elem} \geq \text{sorted}[n - 1]$

- Pior Caso

- $W(n) = n$



- $\text{elem} < \text{sorted}[0]$ OU $\text{sorted}[0] \leq \text{elem} < \text{sorted}[1]$

Comparações – Caso Médio

| Casos possíveis | Nº de comparações | Probabilidade |
|--|-------------------|---------------|
| $\text{elem} < \text{sorted}[0]$ | n | $1 / (n + 1)$ |
| $\text{sorted}[0] \leq \text{elem} < \text{sorted}[1]$ | n | $1 / (n + 1)$ |
| $\text{sorted}[1] \leq \text{elem} < \text{sorted}[2]$ | $n - 1$ | $1 / (n + 1)$ |
| ... | ... | ... |
| $\text{sorted}[i] \leq \text{elem} < \text{sorted}[i+1]$ | $n - i$ | $1 / (n + 1)$ |
| ... | ... | ... |
| $\text{sorted}[n-2] \leq \text{elem} < \text{sorted}[n-1]$ | 2 | $1 / (n + 1)$ |
| $\text{sorted}[n-1] \leq \text{elem}$ | 1 | $1 / (n + 1)$ |

$$A_c(n) = \frac{1}{n+1} [1 + 2 + \dots + n + n] = \frac{n}{2} + \frac{n}{n+1} \approx \frac{n}{2} + 1$$

Insertion Sort

```
void insertionSort( int a[], int n ) {  
    for( int i = 1; i < n; i++ )  
        if( a[i] < a[i - 1] )   
            insertElement( a, i, a[i] );   
}
```

- **Deslocamentos** (i.e., atribuições) são efetuados pela **função auxiliar**
- Contar também as **comparações** feitas pela **função auxiliar** !!

Comparações – Melhor Caso e Pior Caso

- Melhor Caso

- $B_c(n) = n - 1$

$O(n)$

- **Array ordenado** : A função auxiliar nunca é chamada

- Pior Caso

- $W_c(n) = \sum_{i=1}^{n-1} (1 + i) = \frac{n-1}{2} \times (n + 2)$

$O(n^2)$

- A função auxiliar é **sempre chamada** !!
- E tem **sempre** o comportamento de **pior caso** !!

Comparações – Caso Médio

- Análise simplificada !
- Considera-se que em cada iteração a função auxiliar tem **sempre** o **comportamento do caso médio** ($i/2 + 1$)

$$A_c(n) \approx \sum_{i=1}^{n-1} \left[1 + \left(\frac{i}{2} + 1 \right) \right] = \left[2(n-1) + \frac{n(n-1)}{4} \right]$$

$$A_c(n) \approx \frac{n^2}{4} + \frac{7n}{4}$$

- Comparar com o pior caso !



Exercícios / Tarefas

Tarefa 1 – Bubble Sort

- Encontrar **configurações de um array** com **n elementos** que, para o algoritmo **Bubble Sort**, correspondam:
- Ao **melhor caso** para as **comparações**
- Ao **pior caso** para as **comparações**
- Ao **melhor caso** para as **trocias**
- Ao **pior caso** para as **trocias**
- **Alguns dos casos anteriores ocorrem em simultâneo ?**

Exercício 1 – Escolha múltipla

Considere o seguinte *array* de 6 elementos, que se pretende ordenar usando o algoritmo ***Bubble Sort***.

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |

- a) São efetuadas **15 comparações** entre elementos do *array*, para que seja ordenado por **ordem crescente**.
- b) São efetuadas **15 trocas** entre elementos do *array*, para que seja ordenado por **ordem crescente**.
- c) Ambas estão corretas.
- d) Nenhuma está correta.

Exercício 2 – Escolha múltipla

Considere o seguinte *array* de 6 elementos, que se pretende ordenar usando o algoritmo ***Bubble Sort***.

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 5 | 2 | 3 | 4 | 1 |

- a) São efetuadas **12 trocas** entre elementos do *array*, se este for ordenado por **ordem crescente**.
- b) São efetuadas **3 trocas** entre elementos do *array*, se este for ordenado por **ordem decrescente**.
- c) Ambas estão corretas.
- d) Nenhuma está correta.

Tarefa 2 – Bubble Sort – Trocas – Caso Médio

- **Bubble Sort** : Efetuar a análise do **caso médio** para o **número de trocas** efetuadas
- **Possível cenário** :
- Igualmente provável **terminar após qualquer uma das iterações** do ciclo externo (**while**)
- Em cada **iteração** do ciclo externo (**while**) fazem-se, em média, **50% do nº de trocas** possíveis

Tarefa 3 – Insertion Sort

- Encontrar **configurações de um array** com **n elementos** que, para o algoritmo **Insertion Sort**, correspondam:
- Ao **melhor caso** para as **comparações**
- Ao **pior caso** para as **comparações**
- Ao **melhor caso** para os **deslocamentos**
- Ao **pior caso** para os **deslocamentos**
- **Alguns dos casos anteriores ocorrem em simultâneo ?**

Exercício 3 – Escolha múltipla

Considere o seguinte *array* de 6 elementos, que se pretende ordenar usando o algoritmo *Insertion Sort*.

| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 5 | 4 | 4 | 2 | 1 |

- a) São efetuadas **15 comparações** entre elementos do *array*, para que seja ordenado por **ordem crescente**.
- b) São efetuadas **25 atribuições** entre elementos do *array*, para que seja ordenado por **ordem decrescente**.
- c) Ambas estão corretas.
- d) Nenhuma está correta.

Tarefa 4 – Insertion Sort – Caso Médio

- **Função auxiliar de inserção ordenada** : Efetuar a análise do **caso médio** para o **número de deslocamentos** efetuados, i.e., das **atribuições** efetuadas envolvendo **elementos do array**
- **Possível cenário** :
- Igualmente provável **terminar após qualquer uma das iterações**

Tarefa 5 – Insertion Sort – Caso Médio

- **Insertion Sort** : Efetuar a análise para o caso médio dos deslocamentos, i.e., das atribuições efetuadas envolvendo elementos do array
- Possível cenário simplificado :
- Em cada iteração fazem-se, em média, 50% do nº de deslocamentos possíveis

Tarefa – Overview – Algoritmos de Ordenação

- Construir uma **tabela** que agrupe as **características dos algoritmos analisados**, relativamente à sua **ordem de complexidade**
- E uma outra **tabela** que mostre como evolui o **número de comparações efetuadas**, para sucessivos valores de n
- $n = 100, 1000, 10000, 100000, 1000000, \dots$
- Qual é o **maior array** que consegue **processar, em tempo útil**, no seu computador ?

Sugestão de leitura

Sugestão de leitura

- J. J. McConnell, Analysis of Algorithms, 1st Edition, 2001
 - Capítulo 3: secções 3.1 e 3.2