

Complexidade de Algoritmos (parte 2)

Prof. Jefferson T. Oliva

Algoritmos e Estrutura de Dados 2 (AE43CP)
Engenharia de Computação
Departamento Acadêmico de Informática (Dainf)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Campus Pato Branco

- Análise de Algoritmos
- Cálculo do Tempo de Execução
- Cálculo de Espaço

- Aula anterior: análise assintótica
 - O
 - Ω
 - Θ
- Taxas de crescimento

Análise de Algoritmos

- Para proceder a uma análise de algoritmos e determinar as taxas de crescimento, necessitamos de um modelo de computador e das operações que executa
- Assume-se o uso de um computador tradicional, em que as instruções de um algoritmo são executadas sequencialmente
 - Com memória infinita, por simplicidade

- Repertório de instruções simples: soma, multiplicação, comparação, atribuição, etc
 - Por simplicidade e viabilidade da análise, assume-se que cada instrução demora exatamente uma unidade de tempo para ser executada, ou seja, $O(1)$
 - Operações complexas, como inversão de matrizes e ordenação de valores, não são realizadas em uma única unidade de tempo
 - Operações complexas devem ser analisadas em partes

- Considera-se somente o algoritmo e suas entradas (de tamanho n)
- Para uma entrada de tamanho n , pode-se calcular o tempo de execução para os seguintes casos
 - Melhor caso ($T_{melhor}(n)$)
 - Caso médio ($T_{media}(n)$)
 - Pior caso ($T_{pior}(n)$)
 - $T_{melhor}(n) \leq T_{media}(n) \leq T_{pior}(n)$
- Atenção: para mais de uma entrada, essas funções teriam mais de um argumento

- Geralmente, utiliza-se somente a análise do pior caso ($T_{pior}(n)$)
 - Análise do melhor caso é de pouco interesse prático
 - O tempo médio pode ser útil, principalmente em sistemas executados rotineiramente
 - Dá mais trabalho calcular o tempo médio
 - Na análise do pior caso é verificado o máximo de esforço computacional que deve ser utilizado para o processamento da entrada

- Qual a complexidade do algoritmo abaixo?

```
int busca(int x, int v[], int n){  
1.   int i;  
2.   for (i = 0; i < n; i++)  
3.       if (x == v[i])  
4.           return i;  
5.   return -1;  
}
```

- Qual a complexidade do algoritmo abaixo?

```
int busca(int x, int v[], int n){  
1.   int i;  
2.   for (i = 0; i < n; i++)  
3.       if (x == v[i])  
4.           return i;  
5.   return -1;  
}
```

- Como a linha 1 é apenas uma declaração de variável, a mesma não entra na contagem
- Na linha 2, desconsiderando as linhas 3 e 4, podem ser realizadas até $2n + 2$ operações (pior caso)
- Na linha 3 são realizadas um total de n comparações (o comando está dentro do laço for)

- Qual a complexidade do algoritmo abaixo?

```
int busca(int x, int v[], int n){  
1.   int i;  
2.   for (i = 0; i < n; i++)  
3.       if (x == v[i])  
4.           return i;  
5.   return -1;  
}
```

- Por fim, a linha 4 (item localizado) ou 5 (caso o item não seja localizado) será executada
 - Melhor caso e caso médio: a instrução da linha 4 será executada, que é o retorno da posição do item encontrado, ou seja, uma unidade de tempo
 - Pior caso: a instrução da linha 5 será executada

- Qual a complexidade do algoritmo abaixo?

```
int busca(int x, int v[], int n){  
1.   int i;  
2.   for (i = 0; i < n; i++)  
3.       if (x == v[i])  
4.           return i;  
5.   return -1;  
}
```

- Análise de complexidade para os três casos (melhor, médio e pior):
 - $T_{melhor}(n) = 4$ (iniciar a variável i , comparar i com n , comparar x com $v[i]$ e retornar i)
 - $T_{media}(n) = \frac{3n}{2} + 2$ (estimativa "aproximada", ou seja, supondo que geralmente, a chave procurada esteja ao redor do meio do arranjo)
 - $T_{pior}(n) = 3n + 3$ (quando a chave não é encontrada)

- Qual a complexidade do algoritmo abaixo?

```
int busca(int x, int v[], int n){  
1.   int i;  
2.   for (i = 0; i < n; i++)  
3.       if (x == v[i])  
4.           return i;  
5.   return -1;  
}
```

- Análise de complexidade para os três casos (melhor, médio e pior):
 - Melhor caso: $\Omega(1)$ ou $O_{\text{melhor}}(1)$
 - Caso médio: $O_{\text{médio}}(n)$
 - Pior caso: $O_{\text{pior}}(n)$ ou $O(n)$
 - Dizemos que a complexidade do algoritmo acima é de $O(n)$ (geralmente, o que nos interessa é o pior caso)

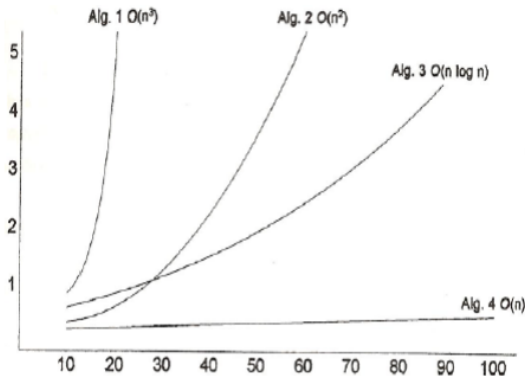
- Idealmente, para um algoritmo qualquer de ordenação de vetores com n elementos:
 - Qual a configuração do vetor que você imagina que provavelmente resultaria no melhor tempo de execução?
 - E qual resultaria no pior tempo?
- Outro exemplo de problema: soma da subsequência máxima
 - Dada uma sequência de inteiros (possivelmente negativos) a_1, a_2, \dots, a_n encontre o valor da máxima soma de quaisquer números de elementos consecutivos
 - Se todos os inteiros forem negativos, o algoritmo deve retornar 0 como resultado da maior soma
 - Por exemplo, para a entrada -2, 11, -4, 13, -5 e -2, a resposta é 20 ($a_2 + a_3 + a_4$)

- Assim como o problema de ordenação, há diversos algoritmos propostos para encontrar a subsequência máxima:
 - Alguns são mostrados abaixo juntamente com seus tempos de execução (n é o tamanho da entrada):

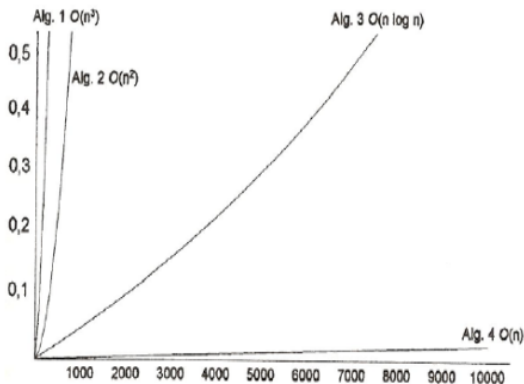
Algoritmo	1	2	3	4
tempo	$O(n^3)$	$O(n^2)$	$O(n \log n)$	$O(n)$
$n = 10$	0,00103	0,00045	0,00066	0,00034
$n = 100$	0,47015	0,01112	0,00486	0,00063
$n = 1.000$	448,77	1,1233	0,05843	0,00333
$n = 10.000$	-	111,13	0,68631	0,03042
$n = 100.000$	-	-	8,0113	0,29832

- Deve-se notar que:
 - Para entradas pequenas, todas as implementações rodam num piscar de olhos
 - Para entradas grandes, o melhor algoritmo é o 4
 - Os tempos não incluem o tempo requerido para leitura dos dados de entrada

- Gráfico (n vs. milissegundos) das taxas de crescimentos dos quatro algoritmos com entradas entre 10 e 100



- Gráfico (n vs. segundos) das taxas de crescimentos dos quatro algoritmos para entradas maiores crescimento



- A complexidade de espaço determina a quantidade de memória extra necessária para a execução de um algoritmo e é dada em função de:
 - Quantidade de variáveis escalares (parâmetros e locais)
 - Tamanho de arranjos declarados internamente
- A partir daqui, nas aulas/materiais, caso seja mencionada apenas a palavra "complexidade" em algoritmos, estaremos nos referindo à complexidade de tempo
 - Em outras palavras, na análise de espaço, será mencionada "complexidade de espaço"

- Qual a complexidade de espaço do algoritmo abaixo?

```
int busca(int x, int v[], int n){  
1.   int i;  
2.   for (i = 0; i < n; i++)  
3.       if (x == v[i])  
4.           return i;  
5.   return -1;  
}
```

- Qual a complexidade de espaço do algoritmo abaixo?

```
int busca(int x, int v[], int n){  
1.   int i;  
2.   for (i = 0; i < n; i++)  
3.       if (x == v[i])  
4.           return i;  
5.   return -1;  
}
```

- Resposta: $\Theta(1)$
 - Geralmente, o tamanho do conjunto de entradas não é considerado nesse tipo de análise, ou seja, o interesse é calcular o espaço "extra" necessário para a execução do algoritmo
 - $T(n) = 2$ (passagem de variáveis x e n) + 1 (passagem de um ponteiro) + 1 (declaração de i) + 1 (endereço de retorno) = 5

Cálculo do Tempo de Execução

Cálculo do Tempo de Execução

- Existem basicamente 2 formas de estimar o tempo de execução de programas e decidir quais são os melhores:
 - Empiricamente
 - Teoricamente
- É desejável e possível estimar qual o melhor algoritmo sem ter que executá-los: função da análise de algoritmos

- Supondo que as operações simples demoram uma unidade de tempo para executar e a linguagem de programação utilizada é a C, considere o programa abaixo para calcular o resultado de

$$\sum_{i=1}^n i^3$$

- 1 Início
- 2 declare soma_parcial numérico;
- 3 soma_parcial \leftarrow 0;
- 4 para $i \leftarrow 0$ até n faça
- 5 soma_parcial \leftarrow soma_parcial + $i*i*i$;
- 6 escreva(soma_parcial);
- 7 Fim

$$\sum_{i=1}^n i^3$$

- 3 1 unidade de tempo
 - 4 1 unidade para iniciação de i , $n + 1$ unidades para testar se $i = n$ e n unidades para incrementar $i = 2n + 2$
 - 5 4 unidades (1 da soma, 2 das multiplicações e 1 da atribuição) executada n vezes (pelo comando "para") = $4n$ unidades
 - 6 1 unidade para escrita
- **Custo total:** $6n + 4$, ou seja, a função é $O(n)$!
 - Também podemos dizer que a complexidade do algoritmo acima é $\Theta(n)$, já que não há distinção entre o pior e o melhor caso

Cálculo do Tempo de Execução

- Ter que realizar todos esses passos para cada algoritmo (principalmente algoritmos grandes) pode se tornar uma tarefa cansativa
- Em geral, como se dá a resposta em termos do *big-oh*, costuma-se desconsiderar as constantes e elementos menores dos cálculos
- No exemplo anterior:
 - A linha 3 $soma_parcial \leftarrow 0$ é insignificante em termos de tempo
 - É desnecessário ficar contando 2, 3 ou 4 unidades de tempo na linha 5 $soma_parcial \leftarrow soma_parcial + i * i * i$
 - O que realmente dá a grandeza de tempo desejada é a repetição na linha 4 "para $i \leftarrow 1$ até n faça"

- Regras para o cálculo de execução
 - Repetições: tempo dos comandos dentro da repetição (incluindo testes) vezes o número de vezes que é executada

```
para  $i \leftarrow 0$  até  $n$  faça  
   $x \mathrel{+}= 1$ ;
```

- Regras para o cálculo de execução
 - Repetições: tempo dos comandos dentro da repetição (incluindo testes) vezes o número de vezes que é executada
 - No exemplo abaixo são realizadas $3n + 2$ operações (uma unidade para iniciar $i + n * (\text{incremento na variável } i + \text{uma comparação} + \text{atribuição na variável } x) + \text{uma última comparação, que é o momento em que a variável } i \text{ atinge o valor de } n)$, ou seja, o seu custo é $O(n)$
 - Por mais que o operador $+=$ seja equivalente a duas operações (uma atribuição e uma soma), o mesmo é contado como uma unidade

```
para  $i \leftarrow 0$  até  $n$  faça  
     $x += 1$ ;
```

- Regras para o cálculo de execução
 - Repetições: tempo dos comandos dentro da repetição (incluindo testes) vezes o número de vezes que é executada
 - No exemplo abaixo também são realizadas $3n + 2$ operações

```
 $i \leftarrow 0$   
enquanto  $i < n$  faça  
     $x \mathrel{+}= 1$ ;  
     $i \mathrel{+}= 1$ ;
```

- Regras para o cálculo de execução
 - Repetições aninhadas
 - A análise é feita de dentro para fora
 - Tempo de execução dos comandos multiplicado pelo produto do tamanho de todas as repetições
 - Exemplo de fragmento de código com custo de $O(n^2)$

```
para  $i \leftarrow 0$  até  $n$  faça  
  para  $j \leftarrow 0$  até  $n$  faça  
     $k \leftarrow k + 1$ ;
```

- Regras para o cálculo de execução
 - Repetições aninhadas

```
para  $i \leftarrow 0$  até  $n$  faça  
  para  $j \leftarrow 0$  até  $n$  faça  
     $k \leftarrow k + 1$ ;
```

- Nas duas últimas linhas do código acima (laço interno), são realizadas $4n + 2$ operações: uma atribuição para a variável $j + n *$ (uma atualização de $j +$ mais uma comparação entre i e $n +$ uma atribuição na variável $k +$ uma soma na variável k)
- A operação acima é realizada n vezes, ou seja, o total de operações no fragmento de código acima é $n * (4n + 2 + 2) + 2 = 4n^2 + 4n + 2$

- Regras para o cálculo de execução
 - Comandos consecutivos
 - É a soma dos tempos de cada um, o que pode significar o máximo entre eles
 - O exemplo abaixo é $O(n^2)$ apesar da primeira repetição ser $O(n)$

```
para  $i \leftarrow 0$  até  $n$  faça  
     $k \leftarrow 0$ ;  
    para  $j \leftarrow 0$  até  $n$  faça  
         $k \leftarrow k + 1$ ;
```


- Regras para o cálculo de execução
 - Se... então... senão:
 - Para uma cláusula condicional, o tempo de execução nunca é maior do que o tempo do teste (então) mais o tempo do senão
 - Em outras palavras, a complexidade é comando que leva o maior tempo
 - O exemplo abaixo é $O(n)$ no pior caso e $\Omega(1)$ no melhor caso:
se $i < j$
então $i \leftarrow i + 1$
senão para $k \leftarrow 0$ até n faça
 $i \leftarrow i * k;$
 - Chamadas de sub-rotinas: uma sub-rotina deve ser analisada primeiro e depois ter suas unidades de tempo incorporadas ao programa/sub-rotina que a chamou

- **Exercício 1:** Estime quantas unidades de tempo são necessárias para rodar o algoritmo abaixo:

```
❶ void função1(int v[], int n){  
❷     int i, j, auxA, auxB;  
❸     i = 1;  
❹     while (i <= n){  
❺         v[i - 1] += 0;  
❻         i = i + 1;  
❼     }  
❽     for (i = 0; i < n; i++)  
❾         for (j = 0; j < n; j++)  
❿             v[i] += v[j] + i + j;  
⓫ }
```

• Resolução do exercício 1:

- 1 Linha 3: inicialização de i : 1 operação
- 2 Linhas 4-7: $5n + 1$
 - $n * (1 \text{ comparação} + 1 \text{ subtração } (v[i - 1]) + 1 \text{ atribuição com soma } (+) \text{ em } v + 1 \text{ atribuição e 1 soma em } i)$: $5n$ operações
 - Última comparação (quando $i > n$): 1 operação
- 3 Linhas 9-10 (*loop interno*): $5n + 2$
 - Inicialização de j : 1 operação
 - $n * (1 \text{ comparação} + 3 \text{ operações em } A \text{ (1 atribuição e duas somas)} + 1 \text{ incremento em } j)$: $5n$ operações
 - Última comparação (quando $j > n$): 1 operação
- 4 Linhas 8-10: $5n^2 + 4n + 2$
 - Inicialização de i : 1 operação
 - $n * (1 \text{ comparação} + 5n + 2 \text{ (for interno)} + 1 \text{ atribuição em } i)$: $5n^2 + 4n$ operações
 - Última comparação (quando $i > n$): 1 operação
- 5 Soma dos itens 1, 2 e 3: $1 + 5n + 2 + 5n^2 + 4n + 2 = 5n^2 + 9n + 5$
 - Complexidade: $O(n^2)$

- **Exercício 2:** Estime quantas unidades de tempo são necessárias para rodar o algoritmo abaixo:

```
1 void função2(int n){
2     int i, j, auxA, auxB;
3     i = 0;
4     auxA = 0;
5     auxB = 0;
6     while (i <= n){
7         auxA += 1;
8         i = i + 1;
9     }
10    for (i = 0; i <= n; i++)
11        for (j = 0; j <= n; j++)
12            auxB += (auxA - i + j);
13 }
```

• Resolução do exercício 2:

① Linhas 3–9: $4n + 8$

- Inicialização de i , auxA, AuxB: 3 operações
- $(n + 1) * (1 \text{ comparação} + 1 \text{ atribuição em auxA} + 1 \text{ atribuição e 1 soma em } i)$: $4n + 4$ operações
- Última comparação (quando $i > n$): 1 operação

② Linhas 11–12 (*loop* interno): $5n + 7$

- Inicialização de j : 1 operação
- $(n + 1) * (1 \text{ comparação} + 3 \text{ operações em auxB (1 atribuição e duas somas)} + 1 \text{ incremento em } j)$: $5n + 5$ operações
- Última comparação (quando $j > n$): 1 operação

③ Linhas 10–12: $5n^2 + 14n + 11$

- Inicialização de i : 1 operação
- $(n + 1) * (1 \text{ comparação} + 5n + 7 \text{ (for interno)} + 1 \text{ atribuição em } i)$: $5n^2 + 14n + 9$ operações
- Última comparação (quando $i > n$): 1 operação

④ Soma dos itens 1 e 3: $5n^2 + 18n + 19$

- Complexidade: $O(n^2)$

Cálculo de Espaço

- Supondo que todos os tipos de dados possuam o mesmo tamanho e a linguagem de programação utilizada é a C, considere o programa abaixo:

$$\sum_{i=1}^n i^3$$

- 1 Início
- 2 declare soma_parcial numérico;
- 3 soma_parcial \leftarrow 0;
- 4 para $i \leftarrow 0$ até n faça
- 5 soma_parcial \leftarrow soma_parcial + $i*i*i$;
- 6 escreva(soma_parcial);
- 7 Fim

$$\sum_{i=1}^n i^3$$

- 1 1 unidade para a declaração do parâmetro n
 - 2 1 unidade para a declaração da variável *soma_parcial*
 - 4 1 unidade para a declaração da variável i
- **Custo total:** 3, ou seja, o algoritmo ocupa $O(1)$ de espaço!
 - Também podemos dizer que a complexidade do algoritmo acima é $\Theta(1)$, já que não há distinção entre o pior e o melhor caso
 - **Obs.:** na análise de complexidade de espaço geralmente é considerado apenas o espaço extra, ou seja, não é levado em consideração a entrada, exceto em funções recursivas, onde a quantidade de parâmetros é considerada

- Regras para o cálculo de espaço
 - Repetições: no exemplo abaixo, é contada apenas uma unidade para x , pois no final de cada passagem do laço, essa variável é descartada

```
para  $i \leftarrow 0$  até  $n$  faça  
    INTEIRO  $x = 1$ ;
```

- Contando com i e n , São necessárias 3 unidades de espaço para o fragmento de código acima
- A complexidade de espaço aqui é $O(1)$ ou pode ser definida como $\Theta(1)$, já que não há distinções entre melhor e o pior caso para o uso de espaço

- Regras para o cálculo de execução
 - Se... então... senão:
 - Para uma cláusula condicional, o espaço nunca é maior do que o espaço do teste (então) mais o espaço do senão
 - Em outras palavras, a complexidade é comando que leva o maior tempo
 - O exemplo abaixo é $O(n)$ no pior caso e $\Omega(1)$ no melhor caso:
se $i < j$
então *INTEIRO* v ;
senão
 INTEIRO $v[n]$;



Cormen, T. H.; Leiserson, C. E.; Rivest, R. L.; Clifford, S.
Algoritmos: teoria e prática.
Elsevier, 2012.



Horowitz, E., Sahni, S. Rajasekaran, S.
Computer Algorithms.
Computer Science Press, 1998.



Rosa, J. L. G.
Análise de Algoritmos - parte 1. SCC-201 – Introdução à
Ciência da Computação II.
Slides. Ciência de Computação. ICMC/USP, 2016.



Ziviani, N.
Projeto de Algoritmos - com implementações em Java e C++.
Thomson, 2007.