

Análise de Algoritmos

**Parte destes slides são adaptações de slides
do Prof. Paulo Feofiloff e do Prof. José Coelho de Pina.**

Quicksort e Select Aleatorizados

CLRS Secs 7.3, 7.4 e 9.2

Relembramos o Particione

Rearranja $A[p..r]$ de modo que $p \leq q \leq r$ e
 $A[p..q-1] \leq A[q] < A[q+1..r]$

PARTICIONE (A, p, r)

```
1   $x \leftarrow A[r]$        $\triangleright x$  é o “pivô”
2   $i \leftarrow p-1$ 
3  para  $j \leftarrow p$  até  $r-1$  faça
4      se  $A[j] \leq x$ 
5          então  $i \leftarrow i + 1$ 
6               $A[i] \leftrightarrow A[j]$ 
7   $A[i+1] \leftrightarrow A[r]$ 
8  devolva  $i + 1$ 
```

Invariantes: no começo de cada iteração de 3–6,

(i0) $A[p..i] \leq x$ (i1) $A[i+1..j-1] > x$ (i2) $A[r] = x$

Relembramos o Particione

Rearranja $A[p..r]$ de modo que $p \leq q \leq r$ e
 $A[p..q-1] \leq A[q] < A[q+1..r]$

PARTICIONE (A, p, r)

```
1   $x \leftarrow A[r]$        $\triangleright x$  é o “pivô”
2   $i \leftarrow p-1$ 
3  para  $j \leftarrow p$  até  $r-1$  faça
4      se  $A[j] \leq x$ 
5          então  $i \leftarrow i + 1$ 
6               $A[i] \leftrightarrow A[j]$ 
7   $A[i+1] \leftrightarrow A[r]$ 
8  devolva  $i + 1$ 
```

Consumo de tempo: $\Theta(n)$ onde $n := r - p$.

Quicksort aleatorizado

PARTICIONE-ALEA(A, p, r)

1 $i \leftarrow \text{RANDOM}(p, r)$

2 $A[i] \leftrightarrow A[r]$

3 **devolva** PARTICIONE(A, p, r)

Quicksort aleatorizado

PARTICIONE-ALEA(A, p, r)

1 $i \leftarrow \text{RANDOM}(p, r)$

2 $A[i] \leftrightarrow A[r]$

3 **devolva** PARTICIONE(A, p, r)

QUICKSORT-ALE(A, p, r)

1 **se** $p < r$

2 **então** $q \leftarrow \text{PARTICIONE-ALEA}(A, p, r)$

3 QUICKSORT-ALE($A, p, q - 1$)

4 QUICKSORT-ALE($A, q + 1, r$)

Quicksort aleatorizado

PARTICIONE-ALEA(A, p, r)

1 $i \leftarrow \text{RANDOM}(p, r)$

2 $A[i] \leftrightarrow A[r]$

3 **devolva** PARTICIONE(A, p, r)

QUICKSORT-ALE(A, p, r)

1 **se** $p < r$

2 **então** $q \leftarrow \text{PARTICIONE-ALEA}(A, p, r)$

3 QUICKSORT-ALE($A, p, q - 1$)

4 QUICKSORT-ALE($A, q + 1, r$)

Consumo esperado de tempo?

Quicksort aleatorizado

PARTICIONE-ALEA(A, p, r)

1 $i \leftarrow \text{RANDOM}(p, r)$

2 $A[i] \leftrightarrow A[r]$

3 **devolva** PARTICIONE(A, p, r)

QUICKSORT-ALE(A, p, r)

1 **se** $p < r$

2 **então** $q \leftarrow \text{PARTICIONE-ALEA}(A, p, r)$

3 QUICKSORT-ALE($A, p, q - 1$)

4 QUICKSORT-ALE($A, q + 1, r$)

Consumo esperado de tempo?

Basta contar o número esperado de comparações na linha 4 do PARTICIONE.

Consumo esperado de tempo

Basta contar o número esperado de comparações na linha 4 do **PARTICIONE**.

```
PARTICIONE ( $A, p, r$ )
1   $x \leftarrow A[r]$        $\triangleright x$  é o “pivô”
2   $i \leftarrow p - 1$ 
3  para  $j \leftarrow p$  até  $r - 1$  faça
4      se  $A[j] \leq x$ 
5          então  $i \leftarrow i + 1$ 
6               $A[i] \leftrightarrow A[j]$ 
7   $A[i+1] \leftrightarrow A[r]$ 
8  devolva  $i + 1$ 
```

Consumo de tempo esperado

Suponha $A[p \dots r]$ permutação de $1 \dots n$.

X_{ab} = número de comparações entre a e b na
linha 4 do **PARTICIONE** do QUICKSORT-ALE;

Queremos calcular

$$\begin{aligned} X &= \text{total de comparações } "A[j] \leq x" \\ &= \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n X_{ab} \end{aligned}$$

Consumo de tempo esperado

Supondo $a < b$,

$$X_{ab} = \begin{cases} 1 & \text{se primeiro pivô em } \{a, \dots, b\} \text{ é } a \text{ ou } b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Qual a probabilidade de X_{ab} valer 1?

Consumo de tempo esperado

Supondo $a < b$,

$$X_{ab} = \begin{cases} 1 & \text{se primeiro pivô em } \{a, \dots, b\} \text{ é } a \text{ ou } b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Qual a probabilidade de X_{ab} valer 1?

$$\Pr \{X_{ab}=1\} = \frac{1}{b-a+1} + \frac{1}{b-a+1} = \mathbb{E}[X_{ab}]$$

Consumo de tempo esperado

Supondo $a < b$,

$$X_{ab} = \begin{cases} 1 & \text{se primeiro pivô em } \{a, \dots, b\} \text{ é } a \text{ ou } b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Qual a probabilidade de X_{ab} valer 1?

$$\Pr \{X_{ab}=1\} = \frac{1}{b-a+1} + \frac{1}{b-a+1} = \mathbb{E}[X_{ab}]$$

$$X = \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n X_{ab}$$

$$\mathbb{E}[X] = \text{????}$$

Consumo de tempo esperado

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X] &= \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n \mathbb{E}[X_{ab}] \\ &= \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n \Pr\{X_{ab}=1\} \\ &= \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n \frac{2}{b-a+1} \\ &= \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{k=1}^{n-a} \frac{2}{k+1} \\ &< \sum_{a=1}^{n-1} 2 \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n} \right) \\ &< 2n \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n} \right) < 2n(1 + \ln n) \end{aligned}$$

CLRS (A.7), p.1060

Conclusões

O consumo de tempo esperado do algoritmo
QUICKSORT-ALE é $O(n \log n)$.

Do **exercício 7.4-4 do CLRS** temos que

O consumo de tempo esperado do algoritmo
QUICKSORT-ALE é $\Theta(n \log n)$.

k -ésimo menor elemento

CLRS 9

k -ésimo menor

Problema: Encontrar o k -ésimo menor elemento de $A[1 \dots n]$.

Suponha $A[1 \dots n]$ sem elementos repetidos.

Exemplo: 33 é o 4o. menor elemento de:

1									10
22	99	32	88	34	33	11	97	55	66

A

1		4							10
11	22	32	33	34	55	66	88	97	99

ordenado

Mediana

Mediana é o $\lfloor \frac{n+1}{2} \rfloor$ -ésimo menor ou o $\lceil \frac{n+1}{2} \rceil$ -ésimo menor elemento.

Exemplo: a mediana é 34 ou 55:

1									10
22	99	32	88	34	33	11	97	55	66

A

1				5	6				10
11	22	32	33	34	55	66	88	97	99

ordenado

k -ésimo menor

Recebe $A[1..n]$ e k tal que $1 \leq k \leq n$
e devolve valor do k -ésimo menor elemento de $A[1..n]$.

SELECT-ORD (A, n, k)

1 **ORDENE** (A, n)

2 **devolva** $A[k]$

O consumo de tempo do **SELECT-ORD** é $\Theta(n \lg n)$.

k -ésimo menor

Recebe $A[1..n]$ e k tal que $1 \leq k \leq n$
e devolve valor do k -ésimo menor elemento de $A[1..n]$.

SELECT-ORD (A, n, k)

1 **ORDENE** (A, n)

2 **devolva** $A[k]$

O consumo de tempo do **SELECT-ORD** é $\Theta(n \lg n)$.

Dá para fazer melhor?

Menor

Recebe um vetor $A[1..n]$ e devolve o valor do **menor** elemento.

MENOR (A, n)

1 **menor** $\leftarrow A[1]$

2 **para** $k \leftarrow 2$ **até** n **faça**

3 **se** $A[k] < \text{menor}$

4 **então** **menor** $\leftarrow A[k]$

5 **devolva** **menor**

O consumo de tempo do algoritmo **MENOR** é $\Theta(n)$.

Segundo menor

Recebe um vetor $A[1..n]$ e devolve o valor do **segundo menor** elemento, supondo $n \geq 2$.

SEG-MENOR (A, n)

```
1  menor ← min{A[1], A[2]}    segmenor ← max{A[1], A[2]}
2  para k ← 3 até n faça
3      se A[k] < menor
4          então segmenor ← menor
5              menor ← A[k]
6      senão se A[k] < segmenor
7          então segmenor ← A[k]
8  devolva segmenor
```

O consumo de tempo do **SEG-MENOR** é $\Theta(n)$.

Algoritmo linear?

Será que conseguimos fazer um **algoritmo linear**
para a mediana?
para o k -ésimo menor?

Algoritmo linear?

Será que conseguimos fazer um **algoritmo linear**
para a mediana?
para o k -ésimo menor?

Sim!

Usaremos o PARTICIONE do QUICKSORT!

Select aleatorizado

PARTICIONE-ALEA(A, p, r)

- 1 $k \leftarrow \text{RANDOM}(p, r)$
- 2 $A[k] \leftrightarrow A[r]$
- 3 **devolva** **PARTICIONE**(A, p, r)

SELECT-ALEA(A, p, r, k)

- 1 **se** $p = r$ **então devolva** $A[p]$
- 2 $q \leftarrow \text{PARTICIONE-ALEA}(A, p, r)$
- 3 **se** $k = q - p + 1$
- 4 **então devolva** $A[q]$
- 5 **se** $k < q - p + 1$
- 6 **então devolva** **SELECT-ALEA**($A, p, q - 1, k$)
- 7 **senão devolva** **SELECT-ALEA**($A, q + 1, r, k - (q - p + 1)$)

Select aleatorizado

PARTICIONE-ALEA(A, p, r)

- 1 $k \leftarrow \text{RANDOM}(p, r)$
- 2 $A[k] \leftrightarrow A[r]$
- 3 **devolva** **PARTICIONE**(A, p, r)

SELECT-ALEA(A, p, r, k)

- 1 **se** $p = r$ **então devolva** $A[p]$
- 2 $q \leftarrow \text{PARTICIONE-ALEA}(A, p, r)$
- 3 **se** $k = q - p + 1$
- 4 **então devolva** $A[q]$
- 5 **se** $k < q - p + 1$
- 6 **então devolva** **SELECT-ALEA**($A, p, q - 1, k$)
- 7 **senão devolva** **SELECT-ALEA**($A, q + 1, r, k - (q - p + 1)$)

Consumo esperado de tempo?

Consumo de tempo esperado

Suponha $A[p..r]$ permutação de $1..n$.

X_{ab} = número de comparações entre a e b na
linha 4 do **PARTICIONE** do **SELECT-ALEA**.

Observe que X_{ab} não é a mesma de antes.

De novo, queremos calcular

$$\begin{aligned} X &= \text{total de comparações } "A[j] \leq x" \\ &= \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n X_{ab} \end{aligned}$$

Consumo de tempo esperado

Vamos supor que $k = n$.

Supondo $a < b$,

$$X_{ab} = \begin{cases} 1 & \text{se primeiro pivô em } \{a, \dots, n\} \text{ é } a \text{ ou } b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Qual a probabilidade de X_{ab} valer 1?

Consumo de tempo esperado

Vamos supor que $k = n$.

Supondo $a < b$,

$$X_{ab} = \begin{cases} 1 & \text{se primeiro pivô em } \{a, \dots, n\} \text{ é } a \text{ ou } b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Qual a probabilidade de X_{ab} valer 1?

$$\Pr \{X_{ab}=1\} = \frac{1}{n - a + 1} + \frac{1}{n - a + 1} = \mathbb{E}[X_{ab}]$$

Consumo de tempo esperado

Vamos supor que $k = n$.

Supondo $a < b$,

$$X_{ab} = \begin{cases} 1 & \text{se primeiro pivô em } \{a, \dots, n\} \text{ é } a \text{ ou } b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Qual a probabilidade de X_{ab} valer 1?

$$\Pr \{X_{ab}=1\} = \frac{1}{n - a + 1} + \frac{1}{n - a + 1} = \mathbb{E}[X_{ab}]$$

$$X = \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n X_{ab}$$

$$\mathbb{E}[X] = \text{????}$$

Consumo de tempo esperado

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X] &= \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n \mathbb{E}[X_{ab}] = \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n \Pr\{X_{ab}=1\} \\ &= \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n \frac{2}{n-a+1} \\ &= \sum_{a=1}^{n-1} \frac{2(n-a)}{n-a+1} \\ &< \sum_{a=1}^{n-1} 2 < 2n. \end{aligned}$$

Consumo de tempo esperado

$$\begin{aligned} E[X] &= \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n E[X_{ab}] = \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n \Pr\{X_{ab}=1\} \\ &= \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n \frac{2}{n-a+1} \\ &= \sum_{a=1}^{n-1} \frac{2(n-a)}{n-a+1} \\ &< \sum_{a=1}^{n-1} 2 < 2n. \end{aligned}$$

Exercício: Refaça os cálculos para um k arbitrário.

Conclusões

O consumo de tempo esperado do algoritmo
SELECT-ALEA é $O(n)$.

Conclusões

O consumo de tempo esperado do algoritmo
SELECT-ALEA é $O(n)$.

Outros comentários:

- Espaço do quicksort, recursão de cauda.

Conclusões

O consumo de tempo esperado do algoritmo
SELECT-ALEA é $O(n)$.

Outros comentários:

- Espaço do quicksort, recursão de cauda.
- Exercícios das últimas listas.