# AULA 23

# Busca de palavras (string matching)

PF 13

http://www.ime.usp.br/~pf/algoritmos/aulas/strma.html

# Busca de palavras em um texto

Dizemos que um vetor $p[1\,..\,m]$ **ocorre em** um vetor $t[1\,..\,n]$ se

$$p[1\,..\,m] = t[s+1\,..\,s+m]$$

para algum $s$ em $[0\,..\,n-m]$.

Exemplo:

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| t | x | c | b | a | b | b | c | b | a | x |

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| p | b | c | b | a |

$p[1\,..\,4]$ ocorre em $t[1\,..\,10]$ com deslocamento 5.

# Busca de palavras em um texto

Problema: Dados $\mathtt{p}[1\,..\,\mathtt{m}]$ e $\mathtt{t}[1\,..\,\mathtt{n}]$,
encontrar o número de ocorrências de $\mathtt{p}$ em $\mathtt{t}$.

Exemplo: Para $\mathtt{n} = 10$, $\mathtt{m} = 4$, e

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| t | b | b | a | b | a | b | a | c | b | a |

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| p | b | a | b | a |

p ocorre 2 vezes em t.

# Algoritmo trivial

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |

# Algoritmo trivial

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | |

# Algoritmo trivial

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |

# Algoritmo trivial

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | |

# Algoritmo trivial

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | |

# Algoritmo trivial

Devolve o número de ocorrências de p em t.

```
int trivial (char p[], int m,
             char t[], int n) {
    int r, k, ocorrs = 0;
1   for (k = 1; k <= n-m+1; k++) {
2      r = 0;
3      while (r < m && p[1+r] == t[k+r])
4         r += 1;
5      if (r == m) ocorrs += 1;
    }
6   return ocorrs;
 }
```

# Algoritmo trivial

```
int trivial (char p[], int m,
             char t[], int n) {
    int r, k, ocorrs = 0;
1   for (k = 1; k <= n-m+1; k++) {
2      r = 0;
3      while (r < m && p[1+r] == t[k+r])
4         r += 1;
5      if (r == m) ocorrs += 1;
    }
6   return ocorrs;
 }
```

Relação invariante: no início da linha 3 vale que

(i0) $\mathtt{p}[1\,..\,1+\mathtt{r}-1] = \mathtt{t}[\mathtt{k}\,..\,\mathtt{k}+\mathtt{r}-1]$

# Algoritmo trivial

```
int trivial (char p[], int m,
             char t[], int n) {
    int r, k, ocorrs = 0;
1   for (k = 1; k <= n-m+1; k++) {
2      r = 0;
3      while (r < m && p[1+r] == t[k+r])
4         r += 1;
5      if (r == m) ocorrs += 1;
    }
6   return ocorrs;
 }
```

Consumo de tempo?

# Consumo de tempo

Consumo de tempo da função `trivial`, versão direita para a esquerda.

| linha | todas as execuções da linha |
|---|---|
| 1 | $= \mathtt{n} - \mathtt{m} + 2$ |
| 2 | $= \mathtt{n} - \mathtt{m} + 1$ |
| 3 | $\leq (\mathtt{n} - \mathtt{m} + 1)(\mathtt{m} + 1)$ |
| 4 | $\leq (\mathtt{n} - \mathtt{m} + 1)\mathtt{m}$ |
| 5 | $= \mathtt{n} - \mathtt{m} + 1$ |
| 6 | $= 1$ |
| total | $< 3\,(\mathtt{n} - \mathtt{m} + 2) + 2\,(\mathtt{n} - \mathtt{m} + 1)(\mathtt{m} + 1)$ |
| | $= \mathrm{O}((\mathtt{n} - \mathtt{m} + 1)\mathtt{m})$ |

# Pior caso

p = a a a a a a a a a a a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | t |
| 1 | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | |

# Melhor caso

p = b a a a a a a a a a a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | t |
| 1 | b | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | b | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | b | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | b | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | b | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | b | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | b | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | b | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | b | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | b | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | b | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | b | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | b | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a |

# Conclusões

O consumo de tempo da função `trivial` no pior caso é $\mathrm{O}((\mathtt{n}-\mathtt{m}+1)\mathtt{m})$.

O consumo de tempo da função `trivial` no melhor caso é $\mathrm{O}(\mathtt{n}-\mathtt{m}+1)$.

Isto significa que no pior caso o consumo de tempo é essencialmente proporcional a $\mathtt{mn}$.

# Algoritmo trivial: direita para esquerda

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |

# Algoritmo trivial: direita para esquerda

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | |

# Algoritmo trivial: direita para esquerda

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |

# Algoritmo trivial: direita para esquerda

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | |

# Algoritmo trivial: direita para esquerda

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | |

# Algoritmo trivial: direita para esquerda

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | |

# Algoritmo trivial: direita para esquerda

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | |

# Algoritmo trivial: direita para esquerda

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | |

# Algoritmo trivial: direita para esquerda

Devolve o número de ocorrências de p em t.

```
int trivial (char p[], int m,
             char t[], int n) {
    int r, k, ocorrs = 0;
1   for (k = m; k <= n; k++) {
2      r = 0;
3      while (r < m && p[m-r] == t[k-r])
4         r += 1;
5      if (r == m) ocorrs += 1;
    }
6   return ocorrs;
 }
```

# Algoritmo trivial: direita para esquerda

```
int trivial (char p[], int m, char t[], int n) {
    int r, k, ocorrs = 0;
1   for (k = m; k <= n; k++) {
2      r = 0;
3      while (r < m && p[m-r] == t[k-r])
4         r += 1;
5      if (r == m) ocorrs += 1;
    }
6   return ocorrs;
 }
```

Relação invariante: no início da linha 3 vale que

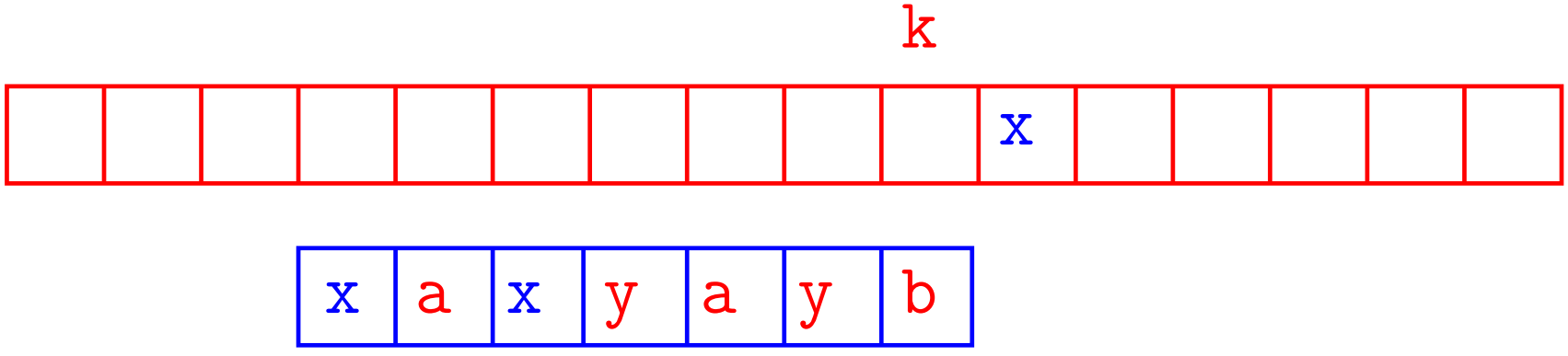
(i0) $p[m-r+1\,..\,m] = t[k-r+1\,..\,k]$

# Algoritmo trivial: direita para esquerda

```
int trivial (char p[], int m,
             char t[], int n) {
    int r, k, ocorrs;
 3  ocorrs = 0; k = m;
 4  while (k <= n) {
 5     r = 0;
 6     while (r < m && p[m-r] == t[k-r])
 7        r += 1;
 8     if (r == m) ocorrs += 1;
 9     k += 1;                    <<< atenção aqui!
    }
11  return ocorrs;
  }
```

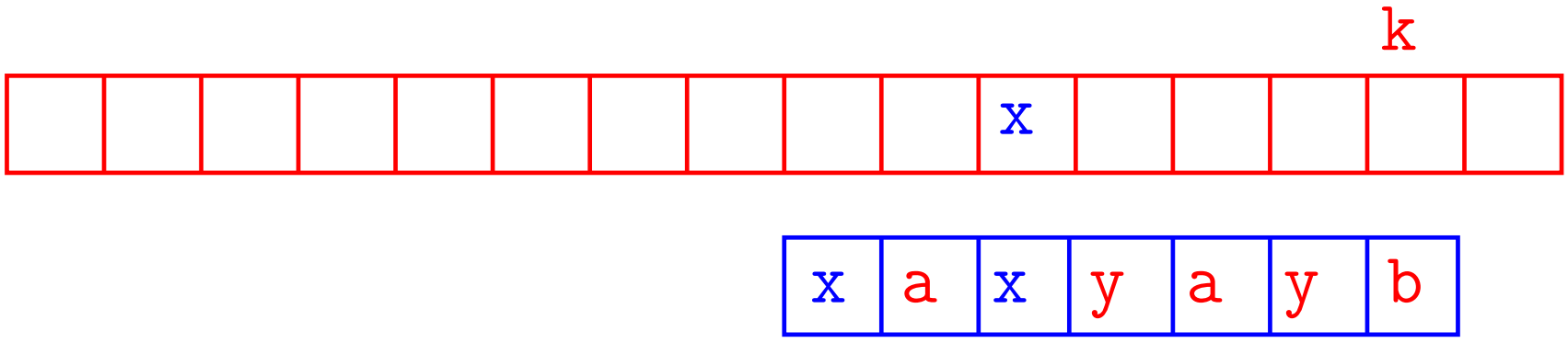
# Primeiro algoritmo de Boyer-Moore

O primeiro algoritmo de R.S. Boyer e J.S. Moore (1977) é baseado na seguinte heurística.



# Primeiro algoritmo de Boyer-Moore

O primeiro algoritmo de R.S. Boyer e J.S. Moore (1977) é baseado na seguinte heurística.



# Boyer-Moore

p = a n d a n d o

```
  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32
  a s   a n d o r i n h a s   a n d a m   a n d a n d o   a l t o t
1 a n d a n d o
```

# Boyer-Moore

p = a n d a n d o

```
  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32
  a s   a n d o r i n h a s   a n d a m   a n d a n d o   a l t o  t
1 a n d a n d o
2           a n d a n d o
```

# Boyer-Moore

p = a n d a n d o

```
  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32
  a s   a n d o r i n h a s   a n d a m   a n d a n d o   a l t o  t
1 a n d a n d o
2             a n d a n d o
3                 a n d a n d o
```

# Boyer-Moore

p = a n d a n d o

```
  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32
  a s   a n d o r i n h a s   a n d a m   a n d a n d o   a l t o  t
1 a n d a n d o
2             a n d a n d o
3                 a n d a n d o
4                                     a n d a n d o
```

# Boyer-Moore

p = a n d a n d o

```
  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32
  a s   a n d o r i n h a s   a n d a m   a n d a n d o   a l t o  t
1 a n d a n d o
2             a n d a n d o
3                 a n d a n d o
4                                     a n d a n d o
5                                       a n d a n d o
```

# Boyer-Moore

p = a n d a n d o

```
  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32
  a s   a n d o r i n h a s   a n d a m   a n d a n d o   a l t o  t
1 a n d a n d o
2             a n d a n d o
3                 a n d a n d o
4                                     a n d a n d o
5                                       a n d a n d o
6                                                     a n d a . . .
```

# Boyer-Moore

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |

# Boyer-Moore

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |

# Boyer-Moore

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | |

# Boyer-Moore

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | |

# Boyer-Moore

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | |

# Boyer-Moore

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | |

# Boyer-Moore

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | |

# Boyer-Moore

p = a b a b b a b a b b a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | a | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | t |
| 1 | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | a | b | a | b | b | a | b | a | b | b | a | |

# Primeiro algoritmo de Boyer-Moore

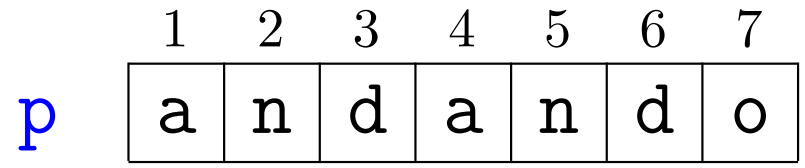
**Ideia** ("*bad-character heuristic*"): calcular um deslocamento de modo que `t[k+1]` fique emparelhado com a última ocorrência do caractere `t[k+1]` em `p`.

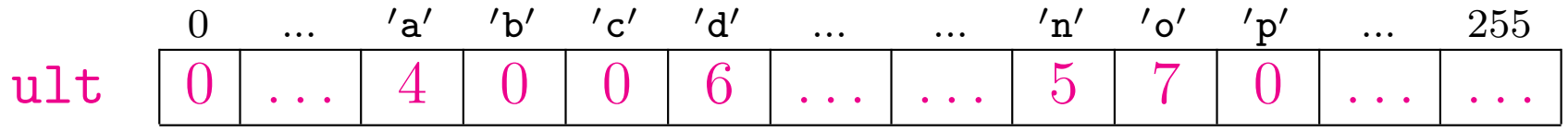
Suponha que o conjunto a que pertencem todos os elementos de `p` e de `t` é conhecido de antemão. Este conjunto é o **alfabeto** do problema.

Suponha que o alfabeto é o conjunto de todos os 256 caracteres.

# Primeiro algoritmo de Boyer-Moore

Para implementar essa ideia, fazemos um pré-processamento de p, determinando para cada símbolo x do alfabeto a posição de sua última ocorrência em p.



# Primeiro algoritmo de Boyer-Moore

Recebe vetores p[1 . . m] e t[1 . . n] de caracteres, com m ≥ 1 e n ≥ 0, e devolve o número de ocorrências de p em t.

```
int BoyerMoore (char p[], int m,
                char t[], int n) {
    int ult[256];
    int i, r, k, ocorrs;

    /* pre-processamento da palavra p */
1   for (i=0; i < 256; i++) ult[i] = 0;
```

# Primeiro algoritmo de Boyer-Moore

Recebe vetores p[1 . . m] e t[1 . . n] de caracteres, com m ≥ 1 e n ≥ 0, e devolve o número de ocorrências de p em t.

```
int BoyerMoore (char p[], int m,
                char t[], int n) {
    int ult[256];
    int i, r, k, ocorrs;

    /* pre-processamento da palavra p */
1   for (i=0; i < 256; i++) ult[i] = 0;
2   for (i=1; i <= m; i++) ult[p[i]] = i;
```

# Primeiro algoritmo de Boyer-Moore

```
   /* busca da palavra p no texto t */
 3   ocorrs = 0; k = m;
 4   while (k <= n) {
 5      r = 0;
 6      while (r < m && p[m-r] == t[k-r])
 7         r += 1;
 8      if (r == m) ocorrs += 1;
 9      if (k == n) k += 1;          /* cai fora */
10      else k += m - ult[t[k+1]] + 1;
    }
11   return ocorrs;
  }
```

# Pior caso

p = a a a a a a a a a a a

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | t |
| 1 | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | |

# Melhor caso

p = a a a a b

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ? | ? | ? | ? | a | c | ? | ? | ? | ? | a | c | ? | ? | ? | ? | a | c | ? | ? | ? | ? | a | t |
| 1 | a | a | a | a | b | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

# Melhor caso

p = a a a a b

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ? | ? | ? | ? | a | c | ? | ? | ? | ? | a | c | ? | ? | ? | ? | a | c | ? | ? | ? | ? | a | t |
| 1 | a | a | a | a | b | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | a | a | a | a | b | | | | | | | | | | | | |

# Melhor caso

p = a a a a b

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ? | ? | ? | ? | a | c | ? | ? | ? | ? | a | c | ? | ? | ? | ? | a | c | ? | ? | ? | ? | a | t |
| 1 | a | a | a | a | b | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | a | a | a | a | b | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | a | a | a | a | b | | | | | | |

# Melhor caso

p = a a a a b

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ? | ? | ? | ? | a | c | ? | ? | ? | ? | a | c | ? | ? | ? | ? | a | c | ? | ? | ? | ? | a | t |
| 1 | a | a | a | a | b | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | a | a | a | a | b | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | a | a | a | a | b | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | a | a | a | a | b |

# Conclusões

O consumo de tempo da função `BoyerMoore` no pior caso é $O((n - m + 1)m)$.

O consumo de tempo da função `BoyerMoore` no melhor caso é $O(n/m)$.

Isto significa que no pior caso o consumo de tempo é essencialmente proporcional a $mn$ e no melhor caso o algoritmo é **sublinear**.