

T3. Análise do Tempo de Execução de Algoritmos Recursivos

Algoritmos com uma chamada recursiva

Exemplo: contagem de ocorrências num array

Relembremos a função `conta` de T1. Tempo de Execução de Algoritmos Iterativos.

```
1 int conta (int k, int v[], int N) {
2     int i = 0, r = 0;
3     while (i < N) {
4         if (v[i] == k) r++;
5         i++;
6     }
7     return r;
8 }
```

É imediato escrever uma versão recursiva desta função:

```
1 int conta (int k, int v[], int N) {
2     int r;
3     if (N == 0) r = 0;
4     else {
5         r = conta(k, v+1, N-1);
6         if (v[0] == k) r++;
7     }
8 }
```

```
8     return r;
9 }
```

Note-se que a invocação `conta(k, v+1, N-1)` chama recursivamente a função, passando-lhe o array de comprimento $N-1$ com início na posição 1 do array v (i.e., a “cauda” de v).

Ao analisarmos o tempo de execução desta função deparamo-nos com uma dificuldade: a própria função que caracteriza o tempo de execução terá que ter uma definição recursiva, uma vez que $T(N)$ dependerá necessariamente de $T(N-1)$.

A análise de algoritmos recursivos requer pois a utilização de um instrumento que permita exprimir o tempo de execução sobre um input de tamanho N em função do tempo de execução sobre inputs de tamanhos inferiores. Esse instrumento são as *Equações de recorrência*, estudadas pela primeira vez por Fibonacci, no início do século XIII.

A recorrência que caracteriza o tempo de execução do algoritmo acima, contando o número de comparações `v[0] == k` executadas, é a seguinte:

$$T(N) = 0, \text{ se } N = 0$$

$$T(N) = T(N-1) + 1, \text{ se } N > 0$$

A primeira cláusula corresponde ao caso de paragem da função, quando $N=0$, em que apenas são executadas operações de tempo constante. No caso recursivo, é feita uma invocação da função sobre um input de tamanho $N-1$, e ainda uma comparação,

`if (v[i] == k) r++.`

Como resolver a recorrência acima? Podemos simplesmente expandir a definição:

$$\begin{aligned} T(N) &= T(N-1) + 1 \\ &= T(N-2) + 1 + 1 \\ &= \dots \\ &= T(0) + 1 + \dots + 1 \end{aligned}$$

$$= 0 + N * 1$$

$$= N$$

Como seria de esperar, o tempo de execução da versão recursiva do algoritmo de contagem de ocorrências é igual ao da versão iterativa.

Nota

Poderíamos igualmente escrever uma recorrência para o tempo assintótico:

$$T(N) = \Theta(1), \text{ se } N = 0$$

$$T(N) = T(N - 1) + \Theta(1), \text{ se } N > 0$$

que teria naturalmente solução $T(N) = \Theta(N)$.

EXERCÍCIO: Apresente uma versão alternativa da função `conta`, ainda recursiva, mas utilizando um *acumulador*. Será que o tempo de execução da função que escreveu pode ser descrito pela mesma recorrência da anterior?

EXERCÍCIO: Relembre a função de identificação de duplicados num *array* de **T1. Tempo de Execução de Algoritmos Iterativos**. Escreva uma versão recursiva desta função e uma recorrência que caracterize o seu tempo de execução. Resolva essa recorrência, expandindo-a como no exemplo acima.

```

1 void dup_rec (int v[], int a, int b) {
2     if (a>=b) return;
3     for (t=a+1; t<=b ; t++)
4         if (v[a]==v[t]) printf("%d igual a %d\n", v, t);
5     dup_rec (v, a+1, b);
6 }
7
```

```

8 T(N) = 0, se N<=1
9 T(N) = N-1 + T(N-1), se N>1
10
11 T(N) = N-1 + N-2 + N-3 + .... 1 + T(1)
12     = 1 + 2 + 3 + ... + N-2 + N-1
```

$$T(N) = \sum_{k=1}^{N-1} k = \frac{(N-1)N}{2} = \theta(N^2)$$

```

1 void aux (int v[], int i, int j, int x) {
2     for (t=i; t<=j ; t++)
3         if (v[x]==v[t]) printf("%d igual a %d\n", x, t);
4 }
5
6 Taux (N) = N
7
8 void dup_rec_2 (int v[], int a, int b) {
9     if (a<b) {
10         aux(v, a+1, b, a);
11         dup_rec_2 (v, a+1, b);
12     }
13 }
14
15 T(N) = 0, se N<=1
16 T(N) = Taux(N-1) + T(N-1), se N>1
17     = N-1 + T(N-1), se N>1
```

```

1 void aux_rec (int v[], int i, int j, int x) {
2     if (i>j) return;
3     if (v[x]==v[i]) printf("%d igual a %d\n", i, t);
```

```

4     aux_rec(v, i+1, j, x);
5 }
6
7 Taux_rec(N) = 0, se N=0
8 Taux_rec(N) = 1 + Taux_rec(N-1), se N>0
9
10 Taux_rec(N) = 1+1+...+1 = N
11
12 void dup_rec_3 (int v[], int a, int b) {
13     if (a<b) {
14         aux_rec(v, a+1, b, a);
15         dup_rec_3 (v, a+1, b);
16     }
17 }
18
19 T(N) = 0, se N<=1
20 T(N) = Taux_rec(N-1) + T(N-1), se N>1
21     = N-1 + T(N-1), se N>1

```

O exemplo anterior caracteriza-se por ter o mesmo comportamento no melhor e no pior caso. Vejamos agora como analisar **algoritmos recursivos com diferentes casos** no que diz respeito ao tempo de execução.

Exemplo: procura linear num array

Relembremos o algoritmo de procura linear estudado em **T2. Análise de Pior Caso, Melhor Caso, e Caso Médio**:

```

1 int procura(int v[], int a, int b, int k) {
2     int i = a;

```

```

3     while ((i<=b) && (v[i]!=k))
4         i++;
5     if (i>b)
6         return -1;
7     else return i;
8 }

```

Uma versão recursiva pode ser escrita como se segue, fazendo avançar o índice inferior `a` ao longo do array.

```

1 int procura(int v[], int a, int b, int k) {
2     if (a > b) return -1;
3     if (v[a]==k) return a;
4     return procura(v, a+1, b, k);
5 }

```

Antes de mais note-se que este algoritmo recursivo tem dois casos de paragem:

- O caso `(a > b)`, que corresponde ao array vazio, e que será executado caso `k` não seja encontrado entre os índices `a` e `b`;
- O caso `(v[a]==k)`, que será executado quando `k` é encontrado na posição `a` do array.

Não é possível definir uma recorrência que entre em linha de conta com este segundo caso de paragem, uma vez que ele não depende do valor de `N`, mas sim do conteúdo do array. É no entanto possível escrever *recorrências específicas para a análise do tempo de execução no pior e no melhor caso*.

Contemos o número de comparações `(v[a]==k)` avaliadas. O **pior caso** de

execução acontece quando k não ocorre no array, e é caracterizado pela seguinte recorrência (o caso de paragem é o primeiro que identificámos acima):

$$T_p(N) = 1, \text{ se } N = 0$$
$$T_p(N) = T_p(N - 1) + 1, \text{ se } N > 0$$

Em que $N = b - a + 1$. Note-se que no caso recursivo é executada uma comparação (que falha) e é feita depois uma invocação da função sobre um input de tamanho $N-1$. Esta recorrência, que é igual à do primeiro exemplo que vimos, tem solução $T_p(N) = N$.

Quanto ao **melhor caso**, ele ocorre quando k se encontra na posição a do array, e neste caso a recorrência “degenera” na seguinte definição não-recorrente, uma vez que um caso de paragem é imediatamente executado (a comparação executada tem sucesso):

$$T_m(N) = 1$$

A análise da versão recursiva revela que o algoritmo executa em tempo constante no melhor caso e linear no pior, tal como a versão iterativa.

Algoritmos de Divisão e Conquista

Os exemplos que vimos anteriormente são algoritmos muito simples que admitem versões iterativas e recursivas. No entanto, a recursividade é um instrumento fundamental na definição de algoritmos baseados numa estratégia algorítmica específica: os algoritmos de **divisão e conquista**. Trata-se aqui de algoritmos cuja definição sem a utilização de recursividade não é de todo trivial.

Um algoritmo recursivo de divisão e conquista tem a seguinte estrutura típica:

1. **Divisão** do problema em n sub-problemas
2. Resolução recursiva dos n sub-problemas (passo de **Conquista**)

3. **Combinação** das soluções dos sub-problemas para obter a solução do problema inicial

O caso de paragem ocorre normalmente no caso de inputs muito pequenos.

Em geral, o tempo de execução de um algoritmo de divisão e conquista será caracterizado por uma recorrência com a seguinte forma:

$$T(N) = \Theta(1), \text{ se } N \leq k$$
$$T(N) = D(N) + aT(N/a) + C(N), \text{ se } N > k$$

Em que cada *divisão* gera a sub-problemas, sendo o tamanho de cada sub-problema uma fracção $1/a$ do original (ou próximo disso); k é o tamanho dos problemas com solução trivial; e D e C são funções que caracterizam o tempo das operações de *divisão* e *combinação*, respectivamente.

Exemplo: algoritmo Merge Sort

Neste algoritmo de ordenação bem conhecido a estrutura de divisão e conquista é instanciada da seguinte forma:

1. **Divisão** do array em duas partes de tamanho igual (a menos de uma unidade, no caso de o comprimento ser ímpar)
2. **Conquista**: ordenação recursiva dos dois vectores
3. **Combinação**: *fusão* dos dois vectores ordenados.

Este último passo será implementado por uma função auxiliar `merge`. A definição seguinte assume que são declarados globalmente dois arrays auxiliares L e R com tamanho suficiente para armazenar temporariamente os elementos das duas partes ordenadas de A que se pretende fundir. Será colocada uma *sentinela* (o valor do maior inteiro representável) no final dos arrays L e R , o que simplificará o algoritmo.

A primeira parte ordenada de A está contida entre os índices p e q ; a segunda está contida entre os índices $q+1$ e r .

```

1 void merge(int A[], int p, int q, int r) {
2     int n1 = q-p+1, n2 = r-q;
3     for (i=0 ; i<n1 ; i++) L[i] = A[p+i];    // L[], R[]
        globais
4     for (j=0 ; j<n2 ; j++) R[j] = A[q+j+1];
5     L[n1] = INT_MAX; R[n2] = INT_MAX;
6
7     i = 0; j = 0;
8     for (k=p ; k<=r ; k++)
9         if (L[i] <= R[j]) {
10             A[k] = L[i]; i++;
11         } else {
12             A[k] = R[j]; j++;
13         }
14 }

```

O passo básico do algoritmo compara dois valores contidos nas primeiras posições de ambos os arrays, colocando o menor dos valores no array resultado. Este passo é executado em *tempo constante*, e são sempre executados N passos básicos, com $N = r - p + 1$. Este número corresponde em particular ao *número de comparações efectuadas* entre pares de elementos do array.

Depois de definida a função de fusão ordenada, o algoritmo de ordenação é facilmente implementado através de uma função recursiva como a seguinte, que ordena o array entre os índices p e r .

```

1 void merge_sort(int A[], int p, int r) {
2     if (p < r) {
3         q = (p+r)/2;
4         merge_sort(A, p, q);
5         merge_sort(A, q+1, r);

```

```

6         merge(A, p, q, r);
7     }
8 }

```

Sendo a invocação inicial para ordenar um array de comprimento N

`merge_sort(A,0,N-1)`.

Note-se que:

- O **caso de paragem** é $N=1$, quando $r = p$
- No caso dos arrays de **comprimento ímpar**, o elemento central é incluído na primeira invocação recursiva. Por exemplo se $p = 3$ e $r = 9$, será $q = 6$, e teremos invocações entre $(3, 6)$ e $(7, 9)$.

O tempo de execução pode ser caracterizado pela seguinte recorrência.

Note-se a utilização dos operadores de arredondamento para captar o efeito da divisão inteira $q = (p+r)/2$.

$T(N) = 0$, se $N = 1$

$T(N) = T\lceil N/2 \rceil + T\lfloor N/2 \rfloor + cN$, se $N > 1$

em que o termo cN corresponde ao tempo de execução da função de fusão ordenada (sendo c o custo abstracto de uma operação de comparação).

Mais uma vez resolveremos a recorrência começando por expandi-la. Mas vamos para isso considerar uma simplificação que permitirá simplificar a sua análise: admitiremos que N é uma potência de 2, o que significa que todos os valores tomados por esta variável na expansão da recorrência serão pares, e por essa razão os operadores de arredondamento podem ser dispensados.

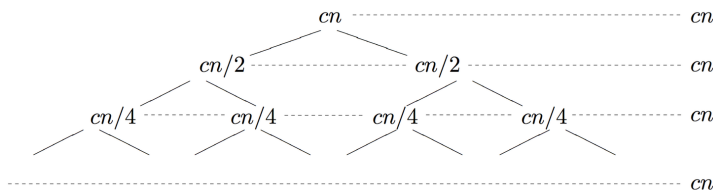
$T(N) = 0$, se $N = 1$

$T(N) = 2T(N/2) + cN$, se $N > 1$

Efectuemos então a expansão:

$$\begin{aligned}
T(N) &= 2T(N/2) + cN \\
&= 4T(N/4) + 2c(N/2) + cN = 4T(N/4) + 2cN \\
&= 8T(N/8) + 3cN \\
&= \dots \\
&= NT(1) + (\log N)cN \\
&= 0 + (\log N)cN \\
&= cN \log N \\
&= \Theta(N \log N)
\end{aligned}$$

Visualmente podemos compreender a execução do algoritmo através de uma árvore de recursividade em que todos os níveis contribuem para o tempo de execução com o mesmo custo cN , tendo a árvore $\log N$ níveis (excluindo-se as folhas da árvore, que correspondem à execução dos casos de paragem, sobre os arrays singulares).



No caso geral em que o comprimento não é uma potência de dois o número de níveis aumenta para $\log N + 1$, estando o último nível incompleto (por exemplo com apenas um nó para $N = 9$, ou quase completo para $N = 7$).

Em conclusão, o algoritmo merge sort executa em tempo $T(N) = \Theta(N \log N)$, sem distinção de casos.

Métodos de resolução de recorrências

Não existe um método universal para resolução de recorrências. No entanto, muitas das recorrências que caracterizam o tempo de execução de algoritmos de divisão e conquista podem ser resolvidas pelo chamado

Master theorem, que não estudaremos aqui.

https://en.wikipedia.org/wiki/Master_theorem

Adicionalmente, é possível *provar* indutivamente que uma determinada pseudo-solução (por exemplo calculada informalmente por expansão da recorrência, como nos exemplos anteriores) é de facto uma verdadeira solução de uma recorrência. O método de prova que se utiliza para isto designa-se por *método de substituição*, e veremos um exemplo da sua aplicação em T4. Tópicos sobre Algoritmos de Ordenação.

Exercícios Adicionais

- Para cada uma das seguintes recorrências, apresente um exemplo de um algoritmo cujo tempo de execução seja caracterizado por ela, e resolva-a. k é uma constante; assuma também que $T(1)$ é constante (caso de paragem).
 - $T(N) = k + T(N - 1)$
 - $T(N) = N + T(N - 1)$
 - $T(N) = k + T(N/2)$
 - $T(N) = k + 2 * T(N/2)$
 - $T(N) = N + 2 * T(N/2)$
 - $T(N) = N + T(N/2)$

```

1 int procuraBin (int v[], int a, int b, int k) {
2     if (a>b) result = -1;
3     else {
4         m = a + (b-a) / 2;
5         if (vector[m] < k) result = procuraBin (v, m+1, b,
6         k);
7         else if (vector[m] > k) result = procuraBin(v, a, m-
8         1, k);
9     }
10 }

```

```

7         else result = m;
8     }
9     return result;
10 }

```

$$T(16) = k + T(8) = 2k + T(4) = 3k + T(2) = 4k + T(1) = 4k$$

$$T(N) = \sum_{i=1}^{\log N} k = \theta(\log N)$$

2. Considere o seguinte algoritmo para o problema conhecido por *Torres de Hanói*:

```

1 void Hanoi(int nDiscos, int esquerda, int direita, int me
  io)
2 {
3     if (nDiscos > 0) {
4         Hanoi(nDiscos-1, esquerda, meio, direita);
5         printf("mover disco de %d para %d\n", esquerda, direi
      ta);
6         Hanoi(nDiscos-1, meio, direita, esquerda);
7     }
8 }

```

- Escreva uma relação de recorrência que exprima a complexidade deste algoritmo (por exemplo, em função do número de linhas impressas).
- Desenhe a árvore de recursão do algoritmo e obtenha a partir dessa árvore um resultado sobre a sua complexidade assintótica.

3. Considere a seguinte versão recursiva do algoritmo *insertion sort*.

```

1 void isort (int v[], int N) {

```

```

2     int i; int t;
3     if (N>1) {
4         isort (v+1, N-1);
5         i = 0;
6         t = v[0];
7         while (i<N-1 && v[i]<t) {
8             v[i] = v[i+1];
9             i++;
10        }
11        if (i>0) v[i] = t;
12    }
13 }

```

- Identifique o melhor e pior casos de execução desta função.
- Para esses casos, apresente uma relação de recorrência que traduza o número de comparações entre elementos do vector em função do tamanho do vector.

$$T_{mc}(N) = 1 + T(N-1) = N-1$$

$$T_{pc}(N) = N-1 + T(N-1) = \frac{(N-1)N}{2}$$

4. Considere o seguinte algoritmo para o cálculo dos números de Fibonacci. Assuma que as operações aritméticas elementares se efectuam em tempo $\Theta(1)$.

```

1 int fib (int n)
2 {
3     if (n==0 || n==1) return 1;
4     else return fib(n-1) + fib(n-2);
5 }

```

- Escreva uma recorrência que descreva o comportamento temporal do