Análise de Algoritmos e Estruturas de Dados
Centro de Matemática, Computação e Cognição
Universidade Federal do ABC
Profa. Carla Negri Lintzmayer

Lista 2: Recorrências e corretude de algoritmos recursivos

Instruções importantes

(1) Em qualquer exercício que peça para você fornecer um algoritmo/solução para um problema, a menos que explicitamente dito o contrário, **você deve**, na seguinte ordem:

- descrever em palavras qual é a ideia do seu algoritmo (**obrigatório**);
- escrever um pseudocódigo (**obrigatório**);
- provar ou fornecer um argumento intuitivo para sua corretude (**obrigatório**), a depender do que o exercício pede;
- analisar o tempo de execução de pior caso do seu algoritmo (**obrigatório**).

O não cumprimento dos itens acima implica que o exercício está incorreto e portanto será desconsiderado.
Na dúvida, procure atendimento!

(2) Você pode utilizar qualquer algoritmo visto em aula sem reescrevê-lo ou provar sua corretude novamente, mesmo que o algoritmo necessite de alguma pequena alteração.

- Descrever clara e sucintamente o que o algoritmo recebe, o que ele devolve e qual o seu consumo de tempo.
- Se houver alterações, descreva-as, indicando, por exemplo, quais linhas estão sendo alteradas/acrescentadas.

1. Considere os seguintes algoritmos recursivos que resolvem um mesmo problema em uma entrada de tamanho n:

   Algoritmo A: Divide o problema em 2 partes de tamanho $n/4$ cada, resolve-as e gasta tempo adicional n.

   Algoritmo B: Divide o problema em 9 partes de tamanho $n/3$ cada, resolve-as e gasta tempo adicional n.

   Algoritmo C: Divide o problema em 6 partes de tamanho $n/5$ cada, resolve-as e gasta tempo adicional $\sqrt{n}$.

   No que segue, assuma $T(1) = 1$. Para cada um dos três algoritmos, monte uma recursão para seu tempo de execução $T(n)$ e resolva-a com o melhor limitante possível (notação O ou Θ) usando:

   (a) **Algoritmo A**: Método de substituição.

   (b) **Algoritmo B**: Método de iteração.

   (c) **Algoritmo C**: Método mestre.

   Qual algoritmo é mais eficiente?

2. Suponha que $T(1) = 1$ e $T(2) = 1$. Resolva as seguintes recorrências com notação O com o resultado mais justo possível (quando não especificado, use o método mais adequado):

   (a) $T(n) = T(\frac{n}{3}) + n^2$ (método de iteração)

   (b) $T(n) = 2T(n-1) + n$ (método de iteração)

   (c) $T(n) = 4T(\frac{n}{2}) + n$ (método de substituição, suponha $T(n) = \Theta(n^2)$)

   (d) $T(n) = T(n-1)+T(n-2)+3$ (método de substituição, suponha $T(n) = O(2^n)$ e $T(n) = \Omega(2^{n/2})$)

   (e) $T(n) = 4T(\frac{n}{2}) + \sqrt{n}$ (árvore de recursão e método mestre)

   (f) $T(n) = 7T(\frac{n}{3}) + n^2$ (árvore de recursão e método de substituição)

   (g) $T(n) = 2T(\frac{n}{4}) + 1$ (método mestre)

   (h) $T(n) = 2T(\frac{n}{4}) + \sqrt{n}$ (método mestre)

   (i) $T(n) = 2T(\frac{n}{4}) + n$ (método mestre)

   (j) $T(n) = 2T(\frac{n}{4}) + n^2$ (método mestre)

   (k) $T(n) = T(\frac{n}{2}) + T(\frac{n}{4}) + n$

   (l) $T(n) = 2T(\frac{3n}{4}) + n$

   (m) $T(n) = T(\frac{2n}{3}) + 2T(\frac{n}{3}) + 1$ (método de substituição)

   (n) $T(n) = 64T(\frac{n}{8}) + 7n^3$

   (o) $T(n) = 4T(\frac{n}{8}) + \sqrt{n}$

   (p) $T(n) = 2T(\frac{n}{2}) + n \log_2 n$ (chute: $T(n) = \Theta(n \log_2^2 n)$)

   (q) $T(n) = T(\frac{n}{3}) + T(\frac{n}{6}) + T(\frac{n}{9}) + n$

   (r) $T(n) = T(\sqrt{n}) + 1$ (faça uma mudança de variáveis: defina $m = \log n$, escreva uma recorrência $S(m)$ equivalente a $T(n)$, resolva $S(m)$ e use esse resultado para encontrar $T(n)$)

(s) $T(n) = 2T(\sqrt{n}) + \log_2 n$ (faça uma mudança de variáveis)

3. Seja $A[1..n]$ um vetor qualquer de inteiros de tamanho n e seja k um inteiro qualquer. Resolva de forma recursiva o problema de verificar se existem posições i e j tais que $A[i] + A[j] = k$.

4. Seja $A[1..n]$ um vetor qualquer de inteiros de tamanho n e seja k um inteiro qualquer. Resolva de forma recursiva o problema de verificar se existem números em A (pode ser apenas um ou mais do que dois) cuja soma seja igual a k.

5. É fácil provar que $T(n) = 2T(\frac{n}{2}) + \Theta(n)$ é $\Theta(n \log n)$ sempre que n é potência de 2, por exemplo usando árvore de recursão. Suponha agora que $n \geq 3$ não é potência de 2. Prove que, ainda assim, $T(n) = \Theta(n \log n)$. *Dica:* se n não é potência de 2, então existe um inteiro $k \geq 2$ tal que $2^{k-1} < n < 2^k$, e podemos assumir $T(2^{k-1}) \leq T(n) \leq T(2^k)$.

6. Um algoritmo A tem o seu consumo de tempo descrito através da recorrência

$$T(n) = 7T(n/2) + n^2 \,.$$

Um outro algoritmo B tem o seu consumo de tempo descrito através da recorrência

$$T'(n) = aT'(n/4) + n^2 \,,$$

onde a é uma constante. Qual é o maior valor inteiro possível para a de tal forma que o algoritmo B seja assintoticamente mais eficiente que o algoritmo A? Justifique a sua resposta.

7. O *Quicksort* é outro algoritmo de divisão e conquista para o problema da ordenação. É muito usado na prática, pois é fácil de implementar, tem tempo esperado de execução $\Theta(n \log n)$ e as constantes escondidas pela notação assintótica são pequenas.

Seja $A[1..n]$ um vetor com n elementos. Dizemos que A está *particionado* com relação a um elemento, chamado *pivô*, se os elementos que são menores do que o pivô estão à esquerda dele e os outros elementos (maiores ou iguais) estão à direita dele. Note que o pivô está em sua posição correta final com relação ao vetor ordenado. A ideia do *Quicksort* é particionar o vetor e recursivamente ordenar as partes à direita e à esquerda do pivô, desconsiderando-o. Seu pseudocódigo é dado no Algoritmo 1. Para entendê-lo por completo, considere o seguinte:

- a função EscolhePivo apenas devolve a posição fim.
- a função Particiona recebe o vetor A e as posições ini e fim e devolve a posição final do pivô no subvetor $A[ini..fim]$ após a partição.

Assim, para ordenar um vetor $A[1..n]$, basta executar Quicksort(A, 1, n).

Considere que a função Particiona executa em tempo $\Theta(n)$, sendo $n = fim - ini + 1$. Responda:

(a) Escreva uma recorrência para o tempo de execução do Quicksort.

(b) Mostre que o tempo de execução de Quicksort no pior caso é $\Theta(n^2)$.

(c) Assumindo que Particiona está correto, prove que Quicksort está correto.

Algorithm 1 Algoritmo *Quicksort* para ordenação.

```
Função QUICKSORT(A, ini, fim)
    Se ini < fim então
        p = ESCOLHEPIVO(A, ini, fim)
        troque A[p] com A[fim]
        x = PARTICIONA(A, ini, fim)
        QUICKSORT(A, ini, x − 1)
        QUICKSORT(A, x + 1, fim)
```

8. No ensino fundamental, aprendemos um algoritmo para multiplicar dois números "grandes". Esse algoritmo tem tempo de execução $O(n^2)$ quando os números têm n dígitos[1].

   O algoritmo de Karatsuba é um algoritmo de divisão e conquista que promete multiplicar dois números inteiros x e y que possuem n dígitos de uma forma mais eficiente. Sua ideia principal baseia-se em reescrever um número em partes menores com aproximadamente metade do número de dígitos cada. Por exemplo, 3147869 pode ser escrito como $10^4 \cdot 314 + 7869$.

   O algoritmo é apresentado a seguir. Ele usa a função IGUALATAM(x, y), que deixa os números x e y com o mesmo número de dígitos (igual ao número de dígitos do maior deles) colocando zeros à esquerda se necessário. Ela devolve o número de dígitos (agora igual) desses números.

```
Função KARATSUBA(x, y)
    n = IGUALATAM(x, y)
    Se n ≤ 2 então
        Devolve xy
    seja x = 10^⌈n/2⌉ a + b e y = 10^⌈n/2⌉ c + d, onde a e c têm ⌊n/2⌋ dígitos cada e b e d
    têm ⌈n/2⌉ dígitos cada
    p1 = KARATSUBA(a, c)
    p2 = KARATSUBA(b, d)
    p3 = KARATSUBA(a + b, c + d)
    Devolve 10^(2⌈n/2⌉) p1 + 10^⌈n/2⌉ (p3 − p1 − p2) + p2
```

   Prove a corretude e analise seu tempo de execução do algoritmo de Karatsuba. *Dica:* primeiro, imagine como os números estão sendo representados (afinal, se fossem duas variáveis inteiras bastaria fazer $x \times y$ para resolver o problema).

9. A ordenação por inserção pode ser expressa sob a forma de um procedimento recursivo como a seguir. Para ordenar $A[1..n]$, ordenamos recursivamente $A[1..n-1]$ e depois inserimos $A[n]$ no subvetor já ordenado $A[1..n-1]$. Escreva o pseudocódigo desse algoritmo, uma recorrência para seu tempo de execução e resolva a recorrência pelo método de substituição. Prove que ele está correto.

10. Suponha que um vetor (não necessariamente ordenado) $A[1..n]$ contém todos os números em $\{1, 2, \ldots, n-1\}$, ou seja, um dos números está aparecendo duas vezes. Dê um algoritmo de divisão e conquista que determina qual é o número que ocorre duas vezes em A.

[1] É um bom exercício entender por que isso vale.

1 Questões retiradas do Enade e Poscomp

QUESTÃO DISCURSIVA 03

Listas lineares armazenam uma coleção de elementos. A seguir, é apresentada a declaração de uma lista simplesmente encadeada.

```
struct ListaEncadeada {
   int dado;
   struct ListaEncadeada *proximo;
};
```

Para imprimir os seus elementos da cauda para a cabeça (do final para o início) de forma eficiente, um algoritmo pode ser escrito da seguinte forma:

```
void mostrar(struct ListaEncadeada *lista) {
   if (lista != NULL) {
      mostrar(lista->proximo);
      printf("%d ", lista->dado);
   }
}
```

Com base no algoritmo apresentado, faça o que se pede nos itens a seguir.

a) Apresente a classe de complexidade do algoritmo, usando a notação Θ. (valor: 3,0 pontos)

b) Considerando que já existe implementada uma estrutura de dados do tipo pilha de inteiros — com as operações de empilhar, desempilhar e verificar pilha vazia — reescreva o algoritmo de forma não recursiva, mantendo a mesma complexidade. Seu algoritmo pode ser escrito em português estruturado ou em alguma linguagem de programação, como C, Java ou Pascal. (valor: 7,0 pontos)

QUESTÃO 25

A sequência de Fibonacci é uma sequência de números inteiros que começa em 1, a que se segue 1, e na qual cada elemento subsequente é a soma dos dois elementos anteriores. A função `fib` a seguir calcula o n-ésimo elemento da sequência de Fibonacci:

```
unsigned int fib (unsigned int n)
{
    if (n < 2)
        return 1;
    return fib(n - 2) + fib (n - 1);
}
```

Considerando a implementação acima, avalie as afirmações a seguir.

I. A complexidade de tempo da função `fib` é exponencial no valor de `n`.

II. A complexidade de espaço da função `fib` é exponencial no valor de `n`.

III. É possível implementar uma versão iterativa da função `fib` com complexidade de tempo linear no valor de `n` e complexidade de espaço constante.

É correto o que se afirma em

A I, apenas.

B II, apenas.

C I e III, apenas.

D II e III, apenas.

E I, II e III.

QUESTÃO 33

Considere a função recursiva F a seguir, que em sua execução chama a função G:

```
1 void F(int n) {
2     if(n > 0) {
3         for(int i = 0; i < n; i++) {
4             G(i);
5         }
6         F(n/2);
7     }
8 }
```

Com base nos conceitos de teoria da complexidade, avalie as afirmações a seguir.

I. A equação de recorrência que define a complexidade da função F é a mesma do algoritmo clássico de ordenação *mergesort*.

II. O número de chamadas recursivas da função F é $\Theta(\log n)$.

III. O número de vezes que a função G da linha 4 é chamada é $O(n \log n)$.

É correto o que se afirma em

A I, apenas.

B II, apenas.

C I e III, apenas.

D II e III, apenas.

E I, II e III.

QUESTÃO 21 – Suponha que, ao invés de dividir em duas partes, foi criada uma versão do merge-sort que divida a entrada em quatro partes, ordene cada quarta-parte, e, finalmente, combine essas quatro partes usando um procedimento O(n). A equação de recorrência que descreve o tempo de execução desse algoritmo é:

A) T(n) = 4*T(n/4) + O(n)
B) T(n) = 4*T(n/2) + 2*O(n)
C) T(n) = T(n/4) + 4*O(n)
D) T(n) = 4*T(n/4) + 4*O(n)
E) T(n) = T(n/4) + O(n)

QUESTÃO 22 – A complexidade de tempo da questão 21 é:

A) $O(n^2)$
B) $O(n^4)$
C) O(4*n)
D) O(n log n)
E) O(n)

QUESTÃO 21 – Dadas as seguintes relações de recorrência:

I. $T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + O(n)$

II. $T(n) = 8T\left(\frac{n}{2}\right) + O(n^2)$

III. $T(n) = T\left(\frac{n}{2}\right) + O(1)$

As relações de recorrência I, II, e III pertencem, nessa ordem, às classes de complexidade:

A) $\Theta(n^2)$, $\Theta(n^3)$, e $\Theta(n)$
B) $\Theta(n)$, $\Theta(n^2)$, e $\Theta(n^3)$
C) $\Theta(n \log n)$, $\Theta(n^3)$, e $\Theta(\log n)$
D) $\Theta(\log n)$, $\Theta(n \log n)$, e $\Theta(n^3)$
E) $\Theta(n^2)$, $\Theta(n^2)$, e $\Theta(n^2)$

QUESTÃO 21 – Considere os seguintes algoritmos recursivos que resolvem o mesmo problema em uma entrada de tamanho n:

Algoritmo 1: Divide o problema em 3 partes de tamanho n/4 cada e gasta um tempo adicional O(1) por chamada.
Algoritmo 2: Divide o problema em 3 partes de tamanho n/2 cada e gasta um tempo adicional $O(n^2)$ por chamada.
Algoritmo 3: Divide o problema em 3 partes de tamanho n/3 cada e gasta um tempo adicional de O(n) por chamada.

A complexidade dos algoritmos 1, 2 e 3 é, respectivamente:

A) $\Theta(n^{log_4 3}), \Theta(n^2), \Theta(n\, log\, n)$

B) $\Theta\left(\frac{n}{4}\right), \Theta\left(\frac{n}{2}\right), \Theta\left(\frac{n}{3}\right)$

C) $\Theta(1), \Theta(n^2), \Theta(n)$

D) $\Theta(n^4), \Theta(n^2), \Theta(n^3)$

E) $\Theta(n^{log_4 3}), \Theta(n^{log_2 3}), \Theta(n^{log_3 3})$