

Aula 06

Recursividade

Introdução ao Conceito

Programação II, 2019-2020

v1.10, 21-03-2020

Introdução

Definição

Complexidade

Relação de
Recorrência

Exemplo 1: A Função
Factorial

Relação de
Recorrência: Síntese

Exemplo 2: Cálculo
das Combinações

Relação de
Recorrência:
Classificação

Exemplo 3: Torres de
Hanói

Definição Recursiva:
Condições de
Sanidade

Casos Atípicos

Casos com Interesse

- ➊ Introdução
- ➋ Definição
- ➌ Complexidade
- ➍ Relação de Recorrência
- ➎ Exemplo 1: A Função Factorial
- ➏ Relação de Recorrência: Síntese
- ➐ Exemplo 2: Cálculo das Combinações
- ➑ Relação de Recorrência: Classificação
- ➒ Exemplo 3: Torres de Hanói
- ➓ Definição Recursiva: Condições de Sanidade
 - Casos Atípicos
 - Casos com Interesse

Introdução

Definição

Complexidade

Relação de
Recorrência

Exemplo 1: A Função
Factorial

Relação de
Recorrência: Síntese

Exemplo 2: Cálculo
das Combinações

Relação de
Recorrência:
Classificação

Exemplo 3: Torres de
Hanói

Definição Recursiva:
Condições de
Sanidade

Casos Atípicos

Casos com Interesse



- Se tivesse de descrever a alguém o que é uma boneca *matryoshka*, como o faria?
- Uma possibilidade seria dizer que é uma boneca oca que contém outra boneca oca, que contém outra e assim sucessivamente.
- Podemos fazer uso de uma definição alternativa que talvez nos facilite a resposta:
 - Uma boneca *matryoshka* é uma boneca oca que contém outra boneca *matryoshka*.
- Este é um exemplo de uma **definição recursiva**.

Introdução

Definição

Complexidade

Relação de Recorrência

Exemplo 1: A Função Factorial

Relação de Recorrência: Síntese

Exemplo 2: Cálculo das Combinações

Relação de Recorrência: Classificação

Exemplo 3: Torres de Hanói

Definição Recursiva: Condições de Sanidade

Casos Atípicos

Casos com Interesse

Definição

Definição Recursiva

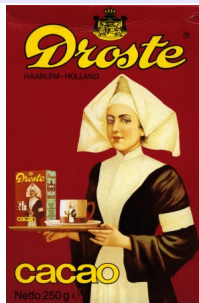
Uma definição de um conceito diz-se recursiva se envolver uma ou mais instâncias do próprio conceito.

Recursividade

Se ainda não entendeu, ver *recursividade*.

Podemos encontrar recursividade um pouco por todo o lado:

- Na descrição das árvores genealógicas.
- Nas imagens de espelhos paralelos.
- Na sintaxe das linguagens de programação.
- ...



(circa 1904)

Recursividade

Introdução

Definição

Complexidade

Relação de
Recorrência

Exemplo 1: A Função
Factorial

Relação de
Recorrência: Síntese

Exemplo 2: Cálculo
das Combinações

Relação de
Recorrência:
Classificação

Exemplo 3: Torres de
Hanói

Definição Recursiva:
Condições de
Sanidade

Casos Atípicos

Casos com Interesse

- Como veremos, as definições recursivas podem também aparecer nos dois aspectos essenciais da programação:
 - nas **estruturas de dados**;
 - nos **algoritmos**.
- Tal como nos exemplos apresentados, a justificação para a sua utilização é a **simplicidade** que ela por vezes nos dá na descrição de problemas complexos.
- Desde Programação 1 temos vindo a apresentar e aplicar tecnologias e métodos para controlar a complexidade inerente à resolução de problemas.
- Uma característica comum à maioria delas é o facto de **reduzirem a redundância** do código necessário para a solução.
- A estratégia tem sido tirar proveito das **semelhanças formais** entre as várias partes do código.

Vejamos alguns casos:

- **Variáveis:** as variáveis permitem que o mesmo código seja parametrizável para diferentes valores.
- **Instrução iterativa:** sempre que existe uma repetição de comandos estruturalmente semelhantes, os mesmos podem ser expressos como a repetição de um único comando (recorrendo muitas vezes ao uso de variáveis auxiliares).
- **Funções:** a semelhança formal algorítmica de certas operações pode ser abstraída e modularizada numa função. Há uma separação clara entre a **utilização** da função e a respectiva **implementação**. Quem a utiliza, delega a responsabilidade da resolução na função. Quem a implementa, pode livremente escolher o melhor algoritmo.

- O caso das funções é particularmente interessante. Se quem as **implementa** é livre para escolher o melhor algoritmo, porque não escolher um que **utiliza** a própria função?
- Se o problema se presta a ser descrito recursivamente, então porque não implementá-lo da mesma forma?
- Para se poder fazer isso mesmo torna-se necessário ter uma descrição recursiva formal do problema: esse é o papel das **Relações de Recorrência**.
- Uma relação de recorrência é uma formulação recursiva formal de um problema.
- As relações de recorrência podem ser sempre implementadas de uma forma **iterativa** ou de uma forma **recursiva**.
- A implementação recursiva é estruturalmente muito próxima da própria relação de recorrência (donde resulta a sua simplicidade).

[Introdução](#)

[Definição](#)

[Complexidade](#)

[Relação de Recorrência](#)

[Exemplo 1: A Função Factorial](#)

[Relação de Recorrência: Síntese](#)

[Exemplo 2: Cálculo das Combinações](#)

[Relação de Recorrência: Classificação](#)

[Exemplo 3: Torres de Hanói](#)

[Definição Recursiva: Condições de Sanidade](#)

[Casos Atípicos](#)

[Casos com Interesse](#)

Exemplo: a função factorial

- Fórmula iterativa:

$$n! = \begin{cases} \prod_{k=1}^n k & , n \in \mathbb{N} \\ 1 & , n = 0 \end{cases}$$

- Fórmula recursiva (relação de recorrência):

$$n! = \begin{cases} n \times (n-1)! & , n \in \mathbb{N} \\ 1 & , n = 0 \end{cases}$$

Exemplo: a função factorial

Implementação Iterativa

```
static int factorial(int n)
{
    assert n >= 0;

    int result = 1;

    for (int i=2; i <= n; i++)
        result = result * i;

    return result;
}
```

$$n! = 1 \times 2 \times \dots \times (n-1) \times n$$

O índice pode variar do caso limite 0 até ao valor n , ou *vice-versa*.

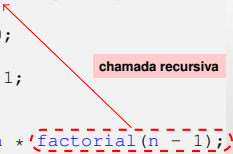
Implementação Recursiva

```
static int factorial(int n)
{
    assert n >= 0;

    int result = 1;

    if (n > 1)
        result = n * factorial(n - 1);

    return result;
}
```



$$n! = n \times ((n-1) \times \dots \times (2 \times (1)) \dots)$$

O argumento varia na direcção do caso limite (de n até 0).

Introdução

Definição

Complexidade

Relação de
Recorrência

Exemplo 1: A Função
Factorial

Relação de
Recorrência: Síntese

Exemplo 2: Cálculo
das Combinações

Relação de
Recorrência:
Classificação

Exemplo 3: Torres de
Hanói

Definição Recursiva:
Condições de
Sanidade

Casos Atípicos

Casos com Interesse

- **Método Iterativo** (Repetitivo)
 - O algoritmo assenta num ciclo em que o índice pode variar desde o valor correspondente às situações limite até ao valor pretendido.
- **Método Recursivo**
 - Uma solução recursiva para um problema é expressa em função de si própria.
 - Para que se atinja uma solução, cada invocação recursiva deve estar mais próxima de uma situação limite.
 - Método poderoso e compacto de resolução de problemas mas potencialmente menos eficiente em termos de recursos pois tem de guardar o estado das várias invocações da função.

Exemplo 2: Combinações

- Fórmula:

$$\begin{aligned}C_k^n &= \frac{A_k^n}{A_k^k} = \frac{n \times (n-1) \times \cdots \times (n-k+1)}{k!} \\&= \frac{n!}{(n-k)! \times k!}, \text{ com } n, k \in \mathbb{N}_0 \wedge n \geq k\end{aligned}$$

- A aplicação destas fórmulas pode levantar problemas de cálculo numérico devido ao facto de os registos internos de armazenamento de um valor terem uma capacidade limitada.
- Exemplo:

$$C_{23}^{25} = \frac{15511210043330985984000000}{51704033477769953280000} = 300$$

- Para representar estes números necessitaríamos de pelo menos 84 bits (mesmo o tipo `long` tem apenas 64).
- Solução?

Exemplo 2: Combinações – Relação de Recorrência

- Demonstração:

$$\begin{aligned}C_k^n &= \frac{n!}{(n-k)! \times k!} = \frac{(n-1)! \times (k+n-k)}{(n-k)! \times k!} \\&= \frac{(n-1)! \times k}{(n-k)! \times k!} + \frac{(n-1)! \times (n-k)}{(n-k)! \times k!} \\&= \frac{(n-1)!}{(n-k)! \times (k-1)!} + \frac{(n-1)!}{(n-k-1)! \times k!} \\&= C_{k-1}^{n-1} + C_k^{n-1}\end{aligned}$$

- Relação de recorrência:

$$\begin{aligned}C_k^n &= C_{k-1}^{n-1} + C_k^{n-1} \quad , \text{ com } n, k \in \mathbb{N} \wedge n > k \\C_0^n &= 1 \quad , \text{ com } n \in \mathbb{N}_0 && \text{(caso limite)} \\C_n^n &= 1 \quad , \text{ com } n \in \mathbb{N}_0 && \text{(caso limite)}\end{aligned}$$

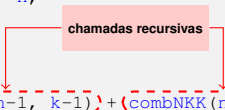
Exemplo Combinações: Implementação Recursiva

```
static int combNKK(int n, int k)
{
    assert 0 <= k && k <= n;

    int result = 1;

    if (k > 0 && k < n)
        result = combNKK(n-1, k-1) + combNKK(n-1, k);

    return result;
}
```



- Método Recursivo:
 - Simples;
 - Compacto;
 - Legível;
 - Fácil detectar erros.
- E se tentarmos implementar uma solução com o método iterativo?

Introdução

Definição

Complexidade

Relação de
Recorrência

Exemplo 1: A Função
Factorial

Relação de
Recorrência: Síntese

Exemplo 2: Cálculo
das Combinações

Relação de
Recorrência:
Classificação

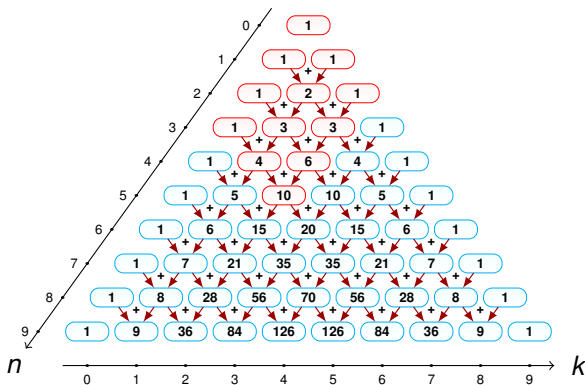
Exemplo 3: Torres de
Hanói

Definição Recursiva:
Condições de
Sanidade

Casos Atípicos
Casos com Interesse

Exemplo Combinações: Implementação Iterativa 1

- Triângulo de Pascal:



$$C_2^5 = C_1^4 + C_2^4 \left\{ \begin{array}{l} C_1^4 = C_0^3 + C_1^3 \{ \dots \\ C_2^4 = C_1^3 + C_2^3 \{ \dots \end{array} \right.$$

Exemplo Combinações: Implementação Iterativa 1

- Necessitamos de um *array* de $k + 1$ elementos para guardar os valores de uma linha (inicializado a zeros).
- O processo iterativo pode seguir as regras seguintes:
 - 1 existem $n + 1$ iterações (uma por linha);
 - 2 a primeira linha ($n = 0$) tem apenas o valor 1 (na posição $k = 0$ do *array*), esse valor manter-se-á fixo para todas as linhas;
 - 3 para as restantes n linhas, os valores do *array* desde o índice 1 até ao índice k são calculados como sendo a soma dos dois valores referidos pela relação de recorrência (se o índice do *array* for i , então será a soma dos valores com índice $i - 1$ e i).
- O resultado é o elemento de índice k da linha n .
- Este algoritmo pode ser optimizado considerando as seguintes factos:
 - Não é necessário calcular um triângulo completo (para C_2^5 bastam os valores assinalados a vermelho na figura).
 - O triângulo de Pascal é simétrico, por isso basta calcular metade.
- O programa mostrado a seguir faz todas essas optimizações.

Exemplo Combinações: Implementação Iterativa 1

```
static int combIter1(int n,int k)
{
    assert 0 <= k && k <= n;

    int result = 1;
    if (k > 0 && k < n) {
        int kMin = k < n-k ? k : n-k; // minimo(k, n-k)
        int[] linha = new int[k + 1];
        int c = 0;
        int cIni = 1;
        linha[0] = 1;
        for(int l = 1; l <= n; l++) {
            if (l > n-kMin+1)
                cIni++;
            for(c = kMin; c >= cIni; c--)
                linha[c] = linha[c]+linha[c-1];
        }
        result = linha[kMin];
    }

    return result;
}
```

Recursividade

Introdução

Definição

Complexidade

Relação de
Recorrência

Exemplo 1: A Função
Factorial

Relação de
Recorrência: Síntese

Exemplo 2: Cálculo
das Combinações

Relação de
Recorrência:
Classificação

Exemplo 3: Torres de
Hanói

Definição Recursiva:
Condições de
Sanidade

Casos Atípicos
Casos com Interesse

Exemplo Combinações: Implementação Iterativa 2

- Há uma solução iterativa mais simples e mais eficiente.
- Baseia-se em construir os elementos necessários do triângulo diagonal-a-diagonal em vez de linha-a-linha.
- O algoritmo segue os passos:
 - 1 Começamos com um *array* de $k + 1$ elementos iniciados com uns, correspondendo aos elementos a vermelho na diagonal descendente mais à direita do triângulo. Esta é a diagonal zero.
 - 2 Cada iteração do ciclo externo vai construir a diagonal seguinte;
 - 3 Para isso, o ciclo interno vai “descendo” ao longo da diagonal, adicionando a cada elemento do array (que ainda traz o valor da diagonal anterior) o elemento anterior do array (que tem o novo valor acabado de calcular).
 - 4 O ciclo externo é repetido até chegar à diagonal número $n - k$.
 - 5 No fim, o valor da posição k do array tem o resultado pretendido.
- Na verdade, é mais simples iniciar o array com apenas um 1 na primeira posição e gerar a diagonal zero da mesma forma que as seguintes.
- Este algoritmo é preferível ao anterior porque percorre e

Exemplo Combinações: Implementação Iterativa 2

Recursividade

Introdução

Definição

Complexidade

Relação de
Recorrência

Exemplo 1: A Função
Factorial

Relação de
Recorrência: Síntese

Exemplo 2: Cálculo
das Combinações

Relação de
Recorrência:
Classificação

Exemplo 3: Torres de
Hanói

Definição Recursiva:
Condições de
Sanidade

Casos Atípicos

Casos com Interesse

```
static int combIter2(int n,int k)
{
    assert 0 <= k && k <= n;

    int[] diag = new int[k+1];
    diag[0] = 1;
    for (int i = 0; i <= n-k; i++)
        for (int j = 1; j <= k; j++)
            diag[j] += diag[j-1];
    return diag[k];
}
```

Introdução

Definição

Complexidade

Relação de
Recorrência

Exemplo 1: A Função
Factorial

Relação de
Recorrência: Síntese

Exemplo 2: Cálculo
das Combinações

Relação de
Recorrência:
Classificação

Exemplo 3: Torres de
Hanói

Definição Recursiva:
Condições de
Sanidade

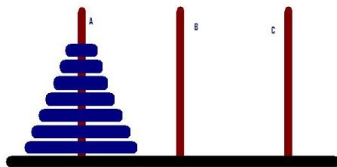
Casos Atípicos

Casos com Interesse

Em termos de complexidade do mecanismo de descrição:

- **Simple**s: quando há apenas uma chamada recursiva.
 - Exemplo: factorial.
- **Composta**: quando há múltiplas chamadas recursivas.
 - Exemplo: combinações, torres de Hanói.

Exemplo 3: Torres de Hanói



- Este jogo, criado pelo matemático francês Édouard Lucas no Século XIX, é um dos exemplos clássicos que mostram as potencialidades dos algoritmos recursivos.
- Existem três postes onde se podem enfiar discos de diâmetros decrescente.
- O objectivo do jogo é mover todos os discos de um poste para outro, de acordo com as seguintes regras:
 - 1 Só pode mover um disco de cada vez;
 - 2 Não pode colocar um disco em cima de outro de menor dimensão.

[Introdução](#)[Definição](#)[Complexidade](#)[Relação de
Recorrência](#)[Exemplo 1: A Função
Factorial](#)[Relação de
Recorrência: Síntese](#)[Exemplo 2: Cálculo
das Combinações](#)[Relação de
Recorrência:
Classificação](#)[Exemplo 3: Torres de
Hanói](#)[Definição Recursiva:
Condições de
Sanidade](#)[Casos Atípicos
Casos com Interesse](#)

Relação de recorrência:

- `moverDiscos(n, tOrigem, tDestino, tAuxiliar)`
 - 1 `moverDiscos(n-1, tOrigem, tAuxiliar, tDestino)`
 - 2 `moverUmDisco(tOrigem, tDestino)`
 - 3 `moverDiscos(n-1, tAuxiliar, tDestino, tOrigem)`

Caso limite:

- `moverDiscos(1, tOrigem, tDestino, tAuxiliar)`
 - 1 `moverUmDisco(tOrigem, tDestino)`

ou, alternativamente:

- `moverDiscos(0, tOrigem, tDestino, tAuxiliar)`
 - 1 *(não é preciso fazer nada)*

```
static void moverDiscos(int n, String origem, String destino, String auxiliar)
{
    assert n >= 0;

    if (n > 0)
    {
        moverDiscos(n-1, origem, auxiliar, destino);
        out.println("Move disco "+n+" da torre "+origem+" para a torre "+destino);
        moverDiscos(n-1, auxiliar, destino, origem);
    }
}
```

- E se tentarmos implementar uma solução com o método iterativo?
- Existe solução para esse problema (como para qualquer outro algoritmo recursivo) mas a implementação é bastante complexa!

Definição Recursiva: Condições de Sanidade

- Para que uma função recursiva termine é preciso que:
 - 1 Exista pelo menos uma alternativa não recursiva (**CASO(S) LIMITE**);
 - 2 Todas as alternativas recursivas ocorram num contexto diferente do original (**VARIABILIDADE**);
 - 3 Em cada alternativa recursiva, o contexto (2) varie de forma a aproximar-se de um caso limite (1) (**CONVERGÊNCIA**).
- As condições (1) e (2) são **necessárias**. As três juntas são **suficientes** para garantir a terminação da recursão.

Todos os exemplos de recursividade apresentados até agora verificam estas três condições:

- **Factorial:**

- 1 $f(0)$ é um caso limite.
- 2 $f(n)$ expresso em função de $f(n-1)$ e $n \neq n-1, \forall n$.
- 3 A sucessão $n, n-1, \dots$ converge para 0.

- **Combinações:**

- 1 $C(n, 0)$ e $C(n, n)$ são casos limite.
- 2 $C(n, k)$ expresso em função de $C(n-1, k)$ e $C(n-1, k-1)$.
- 3 n converge para k ou k converge para 0.

- **Torres de Hanói:**

- 1 Mover 1 disco (ou 0 discos) é trivial.
- 2 $moveTorre(n, \dots)$ expresso em função de $moveTorre(n-1, \dots)$.
- 3 n converge para 1 (ou 0).

Introdução

Definição

Complexidade

Relação de
Recorrência

Exemplo 1: A Função
Factorial

Relação de
Recorrência: Síntese

Exemplo 2: Cálculo
das Combinações

Relação de
Recorrência:
Classificação

Exemplo 3: Torres de
Hanói

Definição Recursiva:
Condições de
Sanidade

Casos Atípicos

Casos com Interesse

Exemplo de casos atípicos

- Função *McCarthy 91*:

```
static int mc_carthy91(int n) {  
    assert n > 0;  
    int result;  
    if (n > 100)  
        result = n - 10;  
    else  
        result = mc_carthy91(mc_carthy91(n + 11));  
    return result;  
}
```

- Sabe-se que termina, mas o tipo complexo de recursão dificulta a demonstração.

- Conjectura de *Collatz* ($3n + 1$):

```
static long collatz(long n) {  
    assert n > 0;  
    long result = n;  
    if (n == 1)  
        result = 1;  
    else if (n % 2 == 0)  
        result = collatz(n / 2);  
    else  
        result = collatz(3 * n + 1);  
    return result;  
}
```

- *Acredita-se* que termina sempre, mas ninguém o demonstrou!

Introdução

Definição

Complexidade

Relação de
Recorrência

Exemplo 1: A Função
Factorial

Relação de
Recorrência: Síntese

Exemplo 2: Cálculo
das Combinações

Relação de
Recorrência:
Classificação

Exemplo 3: Torres de
Hanói

Definição Recursiva:
Condições de
Sanidade

Casos Atípicos

Casos com Interesse

- Na área da programação, os problemas recursivos considerados são sempre problemas em que as três condições de sanidade estão bem identificadas e podem ser implementadas.

Introdução

Definição

Complexidade

Relação de
Recorrência

Exemplo 1: A Função
Factorial

Relação de
Recorrência: Síntese

Exemplo 2: Cálculo
das Combinações

Relação de
Recorrência:
Classificação

Exemplo 3: Torres de
Hanói

Definição Recursiva:
Condições de
Sanidade

Casos Atípicos

Casos com Interesse