

Notas de Aula 11 - Algoritmos e Estrutura de Dados 2 (AE43CP) – Técnicas e Análise de Algoritmos: programação dinâmica
Prof. Jefferson T. Oliva

Nas aulas anteriores, estudamos duas técnicas para projeto de algoritmos:

Força-bruta: também conhecida como tentativa-e-erro, esses algoritmos geram todas as soluções possíveis, incluindo as erradas, e no final, retornar a melhor solução (ótima).

Métodos gulosos: técnicas que consideram melhores objetos locais como parte da solução global. Como vocês viram, métodos gulosos são geralmente simples de serem implementados, mas nem sempre geram a solução ótima.

Divisão e conquista: dividir, conquistar e combinar. Os métodos também são geralmente simples de serem implementados, muitas vezes são rápidos e simplificam problemas complexos. No entanto, podem haver repetições de subproblemas e é necessária uma quantidade extra de memória.

Hoje veremos uma outra técnica para a solução de problemas: programação dinâmica.

Programação Dinâmica

Essa técnica divide o problema em vários subproblemas mais simples (similar à divisão e conquista). Esses subproblemas são resolvidos e as soluções são armazenadas em uma tabela para serem reusadas para a solução de subproblemas pouco maiores. Isso é feito até que o problema original seja resolvido. Como o problema é resolvido em partes, dos menores aos maiores subproblemas, a solução é feita iterativamente. Nessa abordagem, como a solução de subproblemas menores é utilizada em problemas maiores, o recálculo pode ser evitado, economizando operações computacionais.

A ideia básica da programação dinâmica é construir a solução por etapas.

Primeiro, o problema é decomposto em subproblemas de tamanho mínimo.

Durante a solução do problema, os resultados são combinados para a geração da resposta para subproblemas maiores.

Isso é feito até que o problema original seja resolvido.

Cada passo é feito uma única vez, mas as soluções podem ser reusadas quando for necessário.

Com o reuso de resultados, o número de verificações é reduzido drasticamente. Para isso, durante a aplicação da programação dinâmica, as soluções que não são ótimas são descartadas em cada passo.

Consequentemente, a solução final é ótima.

A programação dinâmica tem duas desvantagens: o desenvolvimento de uma solução pode ser mais complexa e pode ser necessário uso de grande espaço de memória (para armazenar resultados).

Existem algoritmos exponenciais que podem ter a sua complexidade reduzida por meio da programação dinâmica. Um exemplo é a sequência de Fibonacci, cuja solução recursiva tem complexidade $O(2^n)$ e a iterativa tem o custo de tempo na ordem de $O(n)$. Na programação dinâmica, pode ser utilizado um vetor de tamanho $n + 1$ para o armazenamento da sequência, em que os resultados subproblemas menores estão armazenados nas primeiras posições do vetor. Quanto maior for o índice do vetor, maior é o subproblema e o problema fica na posição n . Dessa forma o custo de espaço é de $\Theta(n)$.

```
Fib1(n)
1: if f[n] != ∞ then
2:   return f[n]
3: end if
4: if n ≤ 1 then
5:   return f[n] = n
6: end if
7: return f[n] = Fib1(n - 1) + Fib1(n - 2)
```

Assim, o vetor é iniciado com valores infinitos, nas posições zero e um são armazenados 0 e 1 respectivamente. Nos demais campos do vetor, são armazenados os resultados da soma entre $v[i - 2]$ e $v[i - 1]$.

Em diversos problemas podem ser aplicada a programação dinâmica, dos quais abordaremos nessa aula: multiplicação de cadeias de matrizes e mochila binária

Multiplicação de Cadeias de Matrizes

Cálculo de multiplicação de cadeias de matrizes: minimizar as operações escalares

Considere o produto: $M = M_{\{1\}[10,20]} \times M_{\{2\}[20,50]} \times M_{\{3\}[50,1]} \times M_{\{4\}[1,100]}$

$M = M_{\{1\}} \times (M_{\{2\}} \times (M_{\{3\}} \times M_{\{4\}}))$ requer 125.000 operações

$M = (M_{\{1\}} \times (M_{\{2\}} \times M_{\{3\}})) \times M_{\{4\}}$ requer 2.200 operações

A figura abaixo é o slide 9 da aula “Programação Dinâmica”

- Seja $m_{i,j}$ o menor custo para calcular o produto $M_i \times M_{i+1} \dots \times M_j$ para $1 \leq i \leq j \leq n$
 - $m_{i,j} = 0$ se $i = j$
 - $m_{i,j} = \min_{i \leq k \leq j} (m_{i,k} + m_{k+1,j} + b_{i-1} b_k b_j)$ se $j > i$
 - onde:
 - $m_{i,k}$ representa o custo mínimo para calcular $M' = M_i \times M_{i+1} \times \dots \times M_k$
 - $m_{k+1,j}$ representa o custo mínimo para calcular $M'' = M_{k+1} \times M_{k+2} \times \dots \times M_j$
 - $b_{i-1} b_k b_j$ é o custo para multiplicar $M'[b_{i-1}, b_k]$ por $M''[b_k, b_j]$
 - $b_{i-1} \times b_i$ são as dimensões da matriz M_i
 - $m_{i,j}$, $j > i$, representa o custo mínimo de todos os valores possíveis de k entre i e $j - 1$ da soma dos três termos

$m[i,j]$ é um elemento de uma tabela onde serão armazenados os custos mínimos para multiplicação de cadeias de matrizes. Essa tabela é uma matriz quadrática onde a quantidade de linhas e colunas são diretamente proporcionais à quantidade de matrizes consideradas na multiplicação.

Na tabela (ou matriz) de custos, por exemplo, o elemento $m[1,3]$ representa o custo mínimo para multiplicar $M_1 \times M_2 \times M_3$.

Nessa matriz, os elementos da diagonal principal são iniciados com o valor 0, pois $i = j$. Quando $j > i$, deve ser considerada a minimização apresentada no slide 9 (figura na página anterior). Se $j - i$ for igual a 1, significa que $m[i,j]$ é a quantidade de operações para calcular $M_i \times M_j$, ou seja, não é necessário incluir parênteses para minimizar a multiplicação das matrizes. Caso, $j - i > 1$, deve-se definir onde deverá haver a parentesiação (por isso, k entra na equação). Por exemplo, a $m[1,3]$ é o menor custo entre $(M_1 \times M_2) \times M_3$ e $M_1 \times (M_2 \times M_3)$.

A figura abaixo é o

- Considerando o exemplo anterior:
 $M = M_1[10, 20] \times M_2[20, 50] \times M_3[50, 1] \times M_4[1, 100]$. Como minimizar as operações escalares?

$m_{11} = ?$	$m_{12} = ?$	$m_{13} = ?$	$m_{14} = ?$
	$m_{22} = ?$	$m_{23} = ?$	$m_{24} = ?$
		$m_{33} = ?$	$m_{34} = ?$
			$m_{44} = ?$

$b_0 = 10$	$b_1 = 20$	$b_2 = 50$	$b_3 = 1$	$b_4 = 100$
------------	------------	------------	-----------	-------------

- Relembrando:
 - $m_{i,j} = 0$ se $i = j$
 - $m_{i,j} = \min_{i \leq k \leq j} (m_{i,k} + m_{k+1,j} + b_{i-1}b_kb_j)$ se $j > i$

No exemplo apresentado em aula

$$\begin{aligned} m[1,2] &= m[1,1] + m[2,2] + b[0] * b[1] * b[2] \Rightarrow M_1 \times M_2 \\ m[2,3] &= m[2,2] + m[3,3] + b[1] * b[2] * b[3] \Rightarrow M_2 \times M_3 \\ m[3,4] &= m[3,3] + m[4,4] + b[2] * b[3] * b[4] \Rightarrow M_3 \times M_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m[1,3] &= \\ m[1,1] + m[2,3] + b[0] * b[1] * b[3] &\Rightarrow 0 + M_2 \times M_3 + (M_1 \times (M_2 \times M_3)) \Rightarrow A \\ m[1,2] + m[3,3] + b[0] * b[2] * b[3] &\Rightarrow M_1 \times M_2 + 0 + ((M_1 \times M_2) \times M_3) \Rightarrow B \\ M_1 \times M_2 \times M_3 & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m[2,4] &= \\ m[2,2] + m[3,4] + b[1] * b[2] * b[4] &\Rightarrow 0 + M_3 \times M_4 + (M_2 \times (M_3 \times M_4)) \Rightarrow C \\ m[2,3] + m[4,4] + b[1] * b[3] * b[4] &\Rightarrow M_2 \times M_3 + 0 + ((M_2 \times M_3) \times M_4) \Rightarrow D \\ M_2 \times M_3 \times M_4 & \end{aligned}$$

$m[1,4] =$
 $m[1,1] + m[2,4] + b[0] * b[1] * b[4] \Rightarrow 0 + (C \text{ ou } D) + (M1 \times (C \text{ ou } D))$
 $m[1,2] + m[3,4] + b[0] * b[2] * b[4] \Rightarrow M1 \times M2 + M3 \times M4 + ((M1 \times M2) \times (M3 \times M4))$
 $m[1,3] + m[4,4] + b[0] * b[3] * b[4] \Rightarrow (A \text{ ou } B) + 0 + ((A \text{ ou } B) \times M4)$

A resolução do exemplo acima é apresentada entre os slides 11 e 15.

Implementação da solução em C

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#define inf 2147483647

int** create_matrix(int l, int c){
    int i = 0;
    int** mat = (int**) malloc(sizeof(int*) * l);

    for (i = 0; i < l; i++)
        mat[i] = (int*) malloc(sizeof(int) * c);

    return mat;
}

int multiplicacao_minima(int** m, int n, int b[]){
    int h, i, j, k, aux;

    for (i = 0; i < n; i++)
        m[i][i] = 0;

    for (h = 1; h < n; h++) { // indica qual diagonal após a principal será processada. Por exemplo: se h = 1,
        // a diagonal processada é logo após a principal
        for (i = 1; i <= n - h; i++) { // n - h é a quantidade de elementos analisados na diagonal
            j = i + h; // i => linhas; j => colunas
            m[i - 1][j - 1] = INT_MAX;

            for (k = i; k <= j - 1; k++) {
                aux = m[i - 1][k - 1] + m[k][j - 1] + b[i - 1] * b[k] * b[j];

                if (aux < m[i - 1][j - 1])
                    m[i - 1][j - 1] = aux;
            }
        }
    }

    return m[0][n - 1];
}

```

```
int main(){
    int b[] = {10, 20, 50, 1, 100};
    int** m = create_matrix(4, 4);
    int min = multiplicacao_minima(m, 4, b);

    printf("Operacoes minimas: %d", min);

    free(m);

    return 0;
}
```

Como determinar a parentesiização?

Solução: utilizar uma outra tabela auxiliar para determinar onde vai a parentesiização em $m[i,j]$

$m_{11} = 0$	$m_{12} = 10.000$	$m_{13} = 1.200$	$m_{14} = 2.200$
	$m_{22} = 0$	$m_{23} = 1.000$	$m_{24} = 3.000$
		$m_{33} = 0$	$m_{34} = 5.000$
			$m_{44} = 0$

$b_0 = 10$	$b_1 = 20$	$b_2 = 50$	$b_3 = 1$	$b_4 = 100$
------------	------------	------------	-----------	-------------

0	1	1 (M1 x (M2 x M3))	3 ((M1 x (M2 x M3)) x M4)
	0	2	3 ((M2 x M3) x M4)
		0	3
			0

Na matriz auxiliar deve ser colocado o valor de k da escolha

Primeiro, olhar na posição 1,4 da matriz, no qual indica que a separação deve ser na matriz 3, ou seja, de $M1 \times M2 \times M3 \times M4$, agora será $(M1 \times M2 \times M3) \times (M4)$. O próximo passo será olhar o campo da matriz na posição 1,3 (já que ainda falta colocar parênteses entre as matrizes de 1 a 3).

Na posição 1,3, é indicado que a separação deve ser na matriz 1, ou seja, de $M1 \times M2 \times M3$, passa para $(M1) \times (M2 \times M3)$. Assim, no problema original passa a ser de $(M1 \times M2 \times M3) \times (M4)$ para $((M1) \times (M2 \times M3)) \times (M4)$.

Complexidade de tempo: $O(n^3)$

Complexidade de espaço: $\Theta(\max(m^2, n^2))$, onde m^2 é a dimensão da maior matriz e n^2 é o espaço necessário para armazenar a matriz auxiliar. No geral, na análise de complexidade de espaço, não é considerada a entrada, mas sim o espaço extra, que nesse caso é $O(n^2)$.

Problema da Mochila Binária

Considere n itens a serem levados para uma viagem, dentro de uma mochila de capacidade b

Cada item $x[i]$ tem um peso $a[i]$ e um valor $c[i]$. Quais itens escolher, de modo que o valor total dos itens levados seja o maior possível?

As figuras a seguir são os slides 18--21.

- O problema da mochila é definido em programação matemática:

$$P : z = \max \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

- sujeito a

$$\sum_{j=1}^n a_j x_j \leq b, x_j \in \{0, 1\}$$

Princípio para aplicação de programação dinâmica:

Imagine que o lado direito da desigualdade assume um valor λ que varia de 0 até b e as soluções ótimas são $x_0, \dots, x_k, \dots, x_b$

Isto nos leva a definir o problema $P_k(\lambda)$, a sua respectiva solução ótima $x_k(\lambda)$ e o seu respectivo valor objetivo $f_k(\lambda)$

$$P_k(\lambda) : f_k(\lambda) = \max \sum_{j=1}^k c_j x_j$$

sujeito a

$$\sum_{j=1}^k a_j x_j \leq \lambda, x_j \in \{0, 1\}, \{a\}_{j=1}^n, j = 1, \dots, k$$

$P_k(\lambda)$ é o problema da mochila restrito aos k primeiros itens e uma mochila de capacidade λ

Resta-nos obter um procedimento que permita calcular $f_k(\lambda)$ em termos dos valores $f_s(u)$ com $s \leq k$ e $u \leq \lambda$

O que podemos dizer sobre a solução ótima x^* para o problema $P_k(\lambda)$ com valor $f_k(\lambda)$?

- $x_k^* = 0$ ou $x_k^* = 1$

Considerando cada caso, temos:

- ❶ Se $x_k^* = 0$, então a solução ótima satisfaz $f_k(\lambda) = f_{k-1}(\lambda)$
- ❷ Se $x_k^* = 1$, então a solução ótima satisfaz $f_k(\lambda) = c_k + f_{k-1}(\lambda - a_k)$

Combinando os casos (1) e (2), obtêm-se a recorrência abaixo:

$$f_k(\lambda) = \max\{f_{k-1}(\lambda), c_k + f_{k-1}(\lambda - a_k)\} \quad (1)$$

Definindo-se os valores iniciais como $f_0(\lambda) = 0$ para $\lambda \geq 0$, pode-se utilizar a recorrência 1 para calcular sucessivamente os valores de f_1, f_2, \dots, f_n para todos os valores inteiros de $\lambda \in \{0, \dots, b\}$

Quando $x_{\{k\}^*}$ é igual a zero, significa que o item k não é considerado.

O que a Equação 1 quer dizer? Se o item x_k não for selecionado, então o valor de $f_k(\lambda)$ será o mesmo de $f_{\{k-1\}}(\lambda)$. Se o item x_k for selecionado, então o valor de $f_k(\lambda)$ será o custo do item k mais o valor de $f_k(\lambda - \text{peso do item } k)$, ou seja, o custo do item k mais o maior custo para a inclusão de outros itens antes de k

A questão que resta é como encontrar a solução ótima associada ao valor ótimo.

Exemplo: considere a instância do problema da mochila

- $z = \max 10x_1 + 7x_2 + 25x_3 + 24x_4$, sujeito a
- $2x_1 + x_2 + 6x_3 + 5x_4 \leq 7$

O que isso quer dizer? Que temos 4 itens (x_1, x_2, x_3 e x_4), cada um com determinado custo (10, 7, 25 e 24) e peso (2, 1, 6, e 5). Desejamos colocar esses itens em uma mochila com capacidade 7,

λ	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4
0	0	0	0	0	0
1	0	0	7	7	7
2	0	10	10	10	10
3	0	10	17	17	17
4	0	10	17	17	17
5	0	10	17	17	24
6	0	10	17	25	31
7	0	10	17	32	34

$$a_1 = 2, a_2 = 1, a_3 = 6, a_4 = 5, c_1 = 10, c_2 = 7, c_3 = 25, c_4 = 24, b = 7$$

$$f_k(\lambda) = \max\{f_{k-1}(\lambda), c_k + f_{k-1}(\lambda - a_k)\}$$

$f_1(0) = \max\{f_0(0); c_1 + f_0(0 - a_1)\} = \max\{0; 10 + f_0(0 - 2)\} = 0$ (não existe $f_0(-2)$) – Extrapola peso
 $f_1(1) = \max\{f_0(1); c_1 + f_0(1 - a_1)\} = \max\{0; 10 + f_0(1 - 2)\} = 0$ (não existe $f_0(-1)$) – Extrapola peso
 $f_1(2) = \max\{f_0(2); c_1 + f_0(2 - a_1)\} = \max\{0; 10 + f_0(2 - 2)\} = 10$ // Neste caso, c_1 faz parte da solução
 $f_1(3) = \max\{f_0(3); c_1 + f_0(3 - a_1)\} = \max\{0; 10 + f_0(3 - 2)\} = 10$ // Neste caso, c_1 faz parte da solução
 $f_1(4) = \max\{f_0(4); c_1 + f_0(4 - a_1)\} = \max\{0; 10 + f_0(4 - 2)\} = 10$ // Neste caso, c_1 faz parte da solução
 $f_1(5) = \max\{f_0(5); c_1 + f_0(5 - a_1)\} = \max\{0; 10 + f_0(5 - 2)\} = 10$ // Neste caso, c_1 faz parte da solução
 $f_1(6) = \max\{f_0(6); c_1 + f_0(6 - a_1)\} = \max\{0; 10 + f_0(6 - 2)\} = 10$ // Neste caso, c_1 faz parte da solução
 $f_1(7) = \max\{f_0(7); c_1 + f_0(7 - a_1)\} = \max\{0; 10 + f_0(7 - 2)\} = 10$ // Neste caso, c_1 faz parte da solução

$f_2(0) = \max\{f_1(0); c_2 + f_1(0 - a_2)\} = \max\{0; 7 + f_1(0 - 1)\} = 0$ (não existe $f_1(-1)$) – Extrapola peso
 $f_2(1) = \max\{f_1(1); c_2 + f_1(1 - a_2)\} = \max\{0; 7 + f_1(1 - 1)\} = 7$ // Neste caso, c_2 faz parte da solução
 $f_2(2) = \max\{f_1(2); c_2 + f_1(2 - a_2)\} = \max\{10; 7 + f_1(2 - 1)\} = 10$ // Neste caso, c_1 faz parte da solução
 $f_2(3) = \max\{f_1(3); c_2 + f_1(3 - a_2)\} = \max\{10; 7 + f_1(3 - 1)\} = 17$ // Neste caso, c_1 e c_2 fazem parte da solução
 $f_2(4) = \max\{f_1(4); c_2 + f_1(4 - a_2)\} = \max\{10; 7 + f_1(4 - 1)\} = 17$ // Neste caso, c_1 e c_2 fazem parte da solução
 $f_2(5) = \max\{f_1(5); c_2 + f_1(5 - a_2)\} = \max\{10; 7 + f_1(5 - 1)\} = 17$ // Neste caso, c_1 e c_2 fazem parte da solução
 $f_2(6) = \max\{f_1(6); c_2 + f_1(6 - a_2)\} = \max\{10; 7 + f_1(6 - 1)\} = 17$ // Neste caso, c_1 e c_2 fazem parte da solução
 $f_2(7) = \max\{f_1(7); c_2 + f_1(7 - a_2)\} = \max\{10; 7 + f_1(7 - 1)\} = 17$ // Neste caso, c_1 e c_2 fazem parte da solução

$f_3(0) = \max\{f_2(0); c_3 + f_2(0 - a_3)\} = \max\{0; 25 + f_2(0 - 6)\} = 0$ (não existe $f_2(-6)$)
 $f_3(1) = \max\{f_2(1); c_3 + f_2(1 - a_3)\} = \max\{7; 25 + f_2(1 - 6)\} = 7$ (não existe $f_2(-5)$)
 $f_3(2) = \max\{f_2(2); c_3 + f_2(2 - a_3)\} = \max\{10; 25 + f_2(2 - 6)\} = 10$ (não existe $f_2(-4)$)
 $f_3(3) = \max\{f_2(3); c_3 + f_2(3 - a_3)\} = \max\{17; 25 + f_2(3 - 6)\} = 17$ (não existe $f_2(-3)$)
 $f_3(4) = \max\{f_2(4); c_3 + f_2(4 - a_3)\} = \max\{17; 25 + f_2(4 - 6)\} = 17$ (não existe $f_2(-2)$)
 $f_3(5) = \max\{f_2(5); c_3 + f_2(5 - a_3)\} = \max\{17; 25 + f_2(5 - 6)\} = 17$ (não existe $f_2(-1)$)
 $f_3(6) = \max\{f_2(6); c_3 + f_2(6 - a_3)\} = \max\{17; 25 + f_2(6 - 6)\} = 25$ // Neste caso, c_1 e c_3 fazem parte da solução
 $f_3(7) = \max\{f_2(7); c_3 + f_2(7 - a_3)\} = \max\{17; 25 + f_2(7 - 6)\} = 32$ // Neste caso, c_2 e c_3 fazem parte da solução

$f_4(0) = \max\{f_3(0); c_4 + f_3(0 - a_4)\} = \max\{0; 24 + f_3(0 - 5)\} = 0$ (não existe $f_3(-5)$)
 $f_4(1) = \max\{f_3(1); c_4 + f_3(1 - a_4)\} = \max\{7; 24 + f_3(1 - 5)\} = 7$ (não existe $f_3(-4)$)
 $f_4(2) = \max\{f_3(2); c_4 + f_3(2 - a_4)\} = \max\{10; 24 + f_3(2 - 5)\} = 10$ (não existe $f_3(-3)$)
 $f_4(3) = \max\{f_3(3); c_4 + f_3(3 - a_4)\} = \max\{17; 24 + f_3(3 - 5)\} = 17$ (não existe $f_3(-2)$)
 $f_4(4) = \max\{f_3(4); c_4 + f_3(4 - a_4)\} = \max\{17; 25 + f_3(4 - 5)\} = 17$ (não existe $f_3(-1)$)
 $f_4(5) = \max\{f_3(5); c_4 + f_3(5 - a_4)\} = \max\{17; 24 + f_3(5 - 5)\} = 24$ // Neste caso, c_3 e c_4 fazem parte da solução
 $f_4(6) = \max\{f_3(6); c_4 + f_3(6 - a_4)\} = \max\{25; 24 + f_3(6 - 5)\} = 31$ // Neste caso, c_1 , c_2 e c_3 fazem parte da solução
 $f_4(7) = \max\{f_3(7); c_4 + f_3(7 - a_4)\} = \max\{32; 24 + f_3(7 - 5)\} = 34$ // Neste caso, c_1 e c_4 fazem parte da solução

Complexidade de tempo: $O(b * n)$

Complexidade de espaço: $\Theta(b * n)$

Programação Dinâmica

Vantagens:

- Explora todas as alternativas de maneira eficiente
- A cada iteração, a decisão pode ser reconsiderada
- Tem prova de correção simples

Desvantagens:

- Solução pode ser lenta, pois a complexidade pode ser exponencial
- Necessita de maior espaço de memória

Outros exemplos de aplicação:

- Algoritmo de Dijkstra
- Subsequência crescente máxima
- Sequência de Fibonacci
- Entre outras

Referências

Cormen, T. H.; Leiserson, C. E.; Rivest, R. L.; Clifford, S. Algoritmos: teoria e prática. Elsevier, 2012.

Horowitz, E., Sahni, S. Rajasekaran, S. Computer Algorithms. Computer Science Press, 1998.

Szwarcfiter, J.; Markenzon, L. Estruturas de Dados e Seus Algoritmos. LTC, 2010.

Ziviani, M. Projetos de Algoritmos: com implementações em Pascal e C. Thomson, 2004.