



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Fatoração LU com Pivoteamento Parcial

Alunos

**Anna O. Monteiro
Caio Silva Couto
Patrick Andrade
Pedro Lameirão**

PROFESSOR

Marco Antônio Monteiro Silva Ramos

DISCIPLINA

Métodos Numéricos

Dezembro de 2022

Objetivos

O presente documento tem por objetivo a elucidação de um código computacional em linguagem C++ para a resolução de sistemas lineares $Ax = b$ por meio da Fatoração PA = LU com pivoteamento parcial.

Metodologia

Para o desenvolvimento do código foi utilizado o editor de código-fonte Visual Studio Code e conhecimentos de programação alinhados à Álgebra Linear para a edificação do programa.

Para a elaboração e formatação deste arquivo foi utilizado o sistema de preparação de documentos, LaTeX, e sua respectiva linguagem de programação, por meio do editor colaborativo Overleaf.

Sumário

1	Aplicação da Fatoração LU	4
2	Função main()	4
3	Inclusão De Arquivos à Biblioteca Padrão C e ao Código Fonte	5
4	Leitura de Arquivo de texto para Retorno de Vetor Float	5
5	“Vector Within a Vector”	7
6	Vetor “x” em Arquivo de Texto	8
7	Escolha do Pivô e Manipulação Algébrica	8
8	Escalonando a Matriz	9
9	Matrizes L e U	10
10	Pivoteamento	11
11	“x Inverso”	11
12	Finalização do Problema	12
13	Conclusão	14
14	Código na íntegra	15
15	Resultado do Problema Teste Resolvido	19

1 Aplicação da Fatoração LU

A fatoração de matrizes leva em conta três importantes premissas, chamadas "operações elementares". São elas:

- Permutação duas equações;
- Multiplicação uma equação por uma constante não-nula;
- Adição ou subtração do múltiplo de uma equação à outra

A fatoração LU considera sistemas lineares no formato " $Ax = b$ ", onde " A " é a matriz principal, " x " representa a coluna " $x_1, x_2, x_3, (...), x_n$ ", e " b " é a coluna de resultados de cada equação do sistema.

Para iniciar o processo, deve-se fatorar a matriz A , dividindo-a em duas matrizes triangulares — L e U .

Em teoria, a Fatoração LU equivale ao método da Eliminação de Gauss, entretanto, neste método, os multiplicadores usados para a transformação da matriz inicial A em uma matriz triangular superior U são guardados.

A matriz L é, então, composta por zeros acima da diagonal principal (compostas por "1"), a U por zeros abaixo da diagonal principal, conforme o exemplo abaixo.

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & 4 & 0 \\ 4 & -1 & 5 & 1 \\ -2 & 2 & -2 & 3 \\ 0 & 3 & -9 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 9 \\ 1 \\ -2 \end{bmatrix}$$
$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{6} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad e \quad U = \begin{bmatrix} 4 & -1 & 5 & 1 \\ 0 & 3 & -9 & 4 \\ 0 & 0 & 5 & \frac{3}{2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{6} \end{bmatrix}$$

Após a obtenção das matrizes L e U , por fim, são feitas operações as seguintes operações, respectivamente:

- $L \cdot y = b$
- $U \cdot x = y$

Assim, será possível a obtenção dos valores corretos para a coluna " y " e para a coluna " x ", chegando-se ao fim do processo de fatoração LU.

2 Função main()

Para iniciar é importante falar sobre a função " $\text{main}()$ ". Esta é a premissa básica para que um programa seja executado, em outros termos, é o "entry point" do programa. Com essa função, é possível a execução das chamadas de outras funções dentro do programa.

3 Inclusão De Arquivos à Biblioteca Padrão C e ao Código Fonte

```
1 #include <iostream>
2 #include <cmath>
3 #include <tuple>
4 #include <fstream>
5 #include <vector>
6 #include <string>
```

#include

- `iostream` : Leitura e gravação a partir dos fluxos de saída e entrada, em específico para inputs e outputs no terminal do programa
- `cmath` : Funções para cálculo matemático
- `tuple` : Conter elementos que são inicializados como argumentos em ordem de acesso
- `fstream` : Leitura ou escrita em arquivos
- `vector` : organização com acesso aleatório rápido de elementos em sequência linear.
- `string` : representação de palavras, frases ou textos por meio de sequência de caracteres.

4 Leitura de Arquivo de texto para Retorno de Vetor Float

O bloco começa por declarar um leitor de texto do tipo `ifstream` com nomeado “`vectorb`” para a abertura do arquivo de texto.

Em seguida é declarada uma variável para o armazenamento do número atual “`num`” e uma outra variável para o armazenamento do vetor em si.

```

10 vector<float> read_b(){
11     ifstream vectorb;
12     vectorb.open("b_vector.txt");
13
14     float num;
15     vector<float> b;
16
17     while(vectorb.good()){
18         vectorb >> num;
19         b.push_back(num);
20     }
21
22     vectorb.close();
23     return b;
24 }

```

- “vectorb.good()” retornará verdadeiro (true) enquanto o arquivo de texto não chegar ao final.
- “vectorb >> num” extrairá um número do arquivo de texto e colocará o valor como um float em “num”.
- “b.push_back(num)” posicionará esse valor no vetor.

Em seguida, o arquivo de texto é fechado e retorna o vetor lido.

5 “Vector Within a Vector”

Representa a criação de “vetores dentro de vetores”.

É, basicamente, a mesma ideia do tópico anterior, entretanto, agora, para uma matriz com “n” colunas ou “n” linhas (no caso para “n” linhas).

Nesta etapa, a função “read_A” recebe um inteiro obtido a partir do comando “size.vector_b()” e declarado em main.

```
26 vector<vector<float>> read_A(int n){
27     ifstream matrix_A;
28     matrix_A.open("A_matrix.txt");
29
30     vector<vector<float>> A;
31     int i = 0;
32     float num;
33     vector<float> temp;
34
35     while(matrix_A.good()){
36         matrix_A >> num;
37         temp.push_back(num);
38         i++;
39         if(i == n){
40             A.push_back(temp);
41             temp.clear();
42             i = 0;
43         }
44     }
45     matrix_A.close();
46
47     return A;
48 }
```

Sendo assim, se os arquivos estiverem corretamente formatados, a função “size.vector_b()” retornará a ordem do sistema linear, considerando que o inteiro “n” representa a quantidade de termos independentes. Importante destacar que, após isso, o processo é semelhante ao “read_b”, pois o programa aloca, à variável “num”, um valor da esquerda para a direita e de cima para baixo — $[a_{11}, a_{12}, a_{13}, (\dots), a_{1n}]$

A variável “num” é alocada, a cada volta de “while”, em um vetor temporário, enquanto a variável “i” recebe o acréscimo de uma unidade ($i + 1$). Seguindo essa linha, quando “i” tiver passado por todos os elementos de uma linha da matriz em questão, isto é, quando “i” for equivalente à ordem do sistema, o comando “if” é agregado e, dentro dele, o vetor “temp” é alocado em “A”, para que este possa ser zerado e “i” possa assumir “ $i = 1$ ”.

6 Vetor “x” em Arquivo de Texto

```
50 void write_x(vector<float> x){
51     ofstream vectorx("x_vector.txt");
52     int n = x.size();
53
54     for(int i=0; i<n; i++){
55         vectorx<<x[i];
56         vectorx<<endl;
57     }
58     vectorx.close();
59 }
```

A presente função escreve o vetor “x” em um arquivo de texto. O “ofstream” também é usado para iterar através de arquivos de texto como o “ifstream”, porém, enquanto o “ifstream” é usado para ler e interpretar arquivos de texto, o “ofstream” é feito apenas para escrevê-los.

7 Escolha do Pivô e Manipulação Algébrica

Neste bloco, é escolhida uma matriz “U” e, dentro dela, é buscado um vetor a partir da “p-ésima” linha até a “n-ésima” linha.

A função “fabs()” retornará o valor absoluto. Sendo assim, começa no p-ésimo elemento da coluna “p”. Dessa forma, vai sendo feita a iteração pela coluna “p”, mudando apenas a linha.

```
61 int find_piv(vector<vector<float>> U, int n, int p){
62     float par = fabs(U[p][p]);
63     int line = p;
64
65     for(int i=p; i<n; i++){
66         if(fabs(U[i][p])>par){
67             par=fabs(U[i][p]);
68             line = i;
69         }
70     }
71     return line;
72 }
```

Se o valor em módulo do pivô da linha “i” da coluna “p” for maior que o anterior, a troca de linhas é feita, fazendo com que essa linha seja igual a “i”. Em outras palavras, a função deste bloco é procurar o maior número em módulo de uma coluna e retornar a linha onde esse número está.

8 Escalonando a Matriz

Esta função, em suma, resolve o sistema linear.

A partir da matriz "L", inicia-se um vetor "c" (vetor das constantes) com a premissa "c0 = b0", pois o primeiro valor inserido em "c" é b0.

A função "push_back" é justamente utilizada para inserir novos elementos ao final de um vetor ou enviar um elemento para o vetor anterior.

```
110 vector<float> solve_systemL(vector<vector<float>> L,  
111 vector<float> b, int n){  
112     vector<float> c;  
113     c.push_back(b[0]);  
114     float sum = 0;  
115  
116     for(int i=1; i<n; i++){  
117         for(int j=0; j<i; j++){  
118             sum += L[i][j]*c[j];  
119         }  
120         c.push_back(b[i]-sum);  
121         sum = 0;  
122     }  
123     return c;  
124 }
```

Algebricamente, a conta seria:

$$L[1][0] \times c_0 + c_1 = b_1$$

$$L[2][0] \times c_0 + L[2][1] \times c_1 + c_2 = b_2$$

(...)

E assim até encontrar todos os valores abaixo da diagonal principal da matriz (código retorna o valor de "c").

9 Matrizes L e U

Uma tupla é retornada de duas matrizes e um vetor.

Para as duas matrizes são criados dois vetores: "temp1" e "temp2". Esses vetores armazenam temporariamente as linhas que serão trocadas.

```
74 tuple<vector<vector<float>>,vector<vector<float>>,&br/>75 vector<float>> ch_line(vector<vector<float>> U,  
76 vector<vector<float>> L,  
77 vector<float> x, int n, int p, int line){  
78     vector<float> temp1, temp2;  
79     float temp3;  
80  
81     for(int i=0; i<n; i++){  
82         temp1.push_back(U[line][i]);  
83         U[line][i] = U[p][i];  
84         U[p][i] = temp1[i];  
85     }  
86     for(int i=0; i<p; i++){  
87         temp2.push_back(L[line][i]);  
88         L[line][i] = L[p][i];  
89         L[p][i] = temp2[i];  
90     }  
91     temp3 = x[line];  
92     x[line] = x[p];  
93     x[p] = temp3;  
94  
95     return {U, L, x};  
96 }
```

A matriz U possui "n" colunas que são percorridas e os valores da linha "line" são colocados dentro do vetor "temp1", e os valores dessa linha são trocados com os valores da linha p dessa matriz.

Na matriz "L" é feito o mesmo processo, porém a diferença está em que essa matriz tem "p" colunas.

Para o vetor, o valor que está na "line-ésima" linha de "line" é trocado com o valor "p".

Ao final, a função retorna as novas matrizes

10 Pivoteamento

Esta função retorna uma tupla (matrizes U e L) e um vetor "x".

```
96 tuple<vector<vector<float>>,vector<vector<float>>,&br/>97 vector<float>> piv(vector<vector<float>> U,  
98 vector<vector<float>> L, vector<float> x , int n, int p){  
99     float pivo = U[p][p];  
100  
101     for(int i=p+1; i<n; i++){  
102         float coef = U[i][p];  
103         for(int j=0; j<n; j++){  
104             U[i][j]=U[i][j]-(coef/pivo)*U[p][j];  
105             L[i][p] = coef/pivo;  
106         }  
107     }  
108     return {U, L, x};  
109 }
```

A partir disso, é feito o pivoteamento — com o pivô definido como valor "p" da linha p da matriz U. É identificado o coeficiente (valor "i" da linha p) e este é alterado.

Então é feita a iteração de "j" até o último valor.

11 "x Inverso"

O seguinte bloco faz o mesmo do sistema de L, mas para U. Ao invés de definir um vetor "x", foi definido um vetor "x" inverso ("x_inv"), em outros termos, "de trás para frente".

O último valor de "c" (n - 1) é dividido pelo último valor da última linha de U.

É feita a iteração de trás para frente, multiplicando pelo valor de "x" inverso. Ou seja, é a mesma ideia da seção anterior, porém de forma inversa. Isso se dá dessa forma pois a matriz L é composta de zeros acima da diagonal principal e a matriz U é composta de zeros abaixo da diagonal principal.

```

125 vector<float> solve_systemU(vector<vector<float>> U,
126 vector<float> c, int n){
127     vector<float> x_inv, x;
128     x_inv.push_back(c[n-1]/(U[n-1][n-1]));
129     float sum = 0;
130
131     for(int i=n-2; i>=0; i--){
132         for(int j=n-1; j>i; j--){
133             sum += U[i][j]*x_inv[n-(1+j)];
134         }
135         x_inv.push_back((c[i]-sum)/(U[i][i]));
136         sum = 0;
137     }
138     for(int i=n-1; i>=0; i--){
139         x.push_back(x_inv[i]);
140     }
141
142     return x;
143 }

```

Em síntese, como a matriz U é resolvida no sentido de baixo para cima, a função “push_back” adiciona, primeiramente, o “ n -ésimo” valor “ x ”, e, em seguida, o “ n -ésimo” valor “ x ” menos uma unidade (“ $x-1$ ”) e assim por diante.

Por essa razão, este vetor precisa ter os elementos “pivotados” para se encontrarem na mesma ordem de apresentação dos coeficientes na “A_matrix.txt”.

12 Finalização do Problema

O código segue, então, realizando operações algébricas — assim como as citadas na seção “Fatoração LU” — para determinar os valores finais das matrizes L , U e b , assim como no bloco a seguir.

```

186 for(int p=0; p<n-1; p++){
187     tuple<vector<vector<float>>, vector<vector<float>>,
188 vector<float>> temp;
189     line = find_piv(U, n, p);
190     temp = ch_line(U, L, b, n, p, line);
191     U = get<0>(temp);
192     L = get<1>(temp);
193     b = get<2>(temp);
194     temp = piv(U, L, b, n, p);
195     U = get<0>(temp);
196     L = get<1>(temp);
197 }
198 c = solve_systemL(L, b, n);
199 x = solve_systemU(U, c, n);
200
201 write_x(x);
202 return 0;
203 }

```

O código encerra, por fim, retornando o resultado final, ou, os valores de "x".

13 Conclusão

A Fatoração LU é uma das formas mais eficientes para resolver sistemas lineares.

Algumas das principais razões para a utilização desse método é o fato de fornecer uma forma hábil para o cálculo de matrizes inversas, a qual é muito utilizada para rotacionar ou transpor um objeto no espaço 3D, por exemplo. Além disso, é um excelente meio de avaliação do condicionamento de sistemas. Dessa forma, aliada à programação, o método da fatoração LU se torna rápido e sistemático, que beneficia aqueles que precisam utilizá-lo, facilitando sua aplicação, tendo em vista que, para as máquinas, é um trabalho completamente trivial.

14 Código na íntegra

```
1  #include <iostream>
2  #include <cmath>
3  #include <tuple>
4  #include <fstream>
5  #include <vector>
6  #include <string>
7
8  using namespace std;
9
10 vector<float> read_b(){
11     ifstream vectorb;
12     vectorb.open("b_vector.txt");
13
14     float num;
15     vector<float> b;
16
17     while(vectorb.good()){
18         vectorb >> num;
19         b.push_back(num);
20     }
21
22     vectorb.close();
23     return b;
24 }
25
26 vector<vector<float>> read_A(int n){
27     ifstream matrix_A;
28     matrix_A.open("A_matrix.txt");
29
30     vector<vector<float>> A;
31     int i = 0;
32     float num;
33     vector<float> temp;
34
35     while(matrix_A.good()){
36         matrix_A >> num;
37         temp.push_back(num);
38         i++;
39         if(i == n){
40             A.push_back(temp);
41             temp.clear();
42             i = 0;
43         }
44     }
45     matrix_A.close();
46
47     return A;
48 }
49
```

```

50 void write_x(vector<float> x){
51     ofstream vectorx("x_vector.txt");
52     int n = x.size();
53
54     for(int i=0; i<n; i++){
55         vectorx<<x[i];
56         vectorx<<endl;
57     }
58     vectorx.close();
59 }
60
61 int find_piv(vector<vector<float>> U, int n, int p){
62     float par = fabs(U[p][p]);
63     int line = p;
64
65     for(int i=p; i<n; i++){
66         if(fabs(U[i][p])>par){
67             par=fabs(U[i][p]);
68             line = i;
69         }
70     }
71     return line;
72 }
73
74 tuple<vector<vector<float>>,vector<vector<float>>, vector<float>>
75 ch_line(vector<vector<float>> U, vector<vector<float>> L, vector<float> x,
76 int n, int p, int line){
77     vector<float> temp1, temp2;
78     float temp3;
79
80     for(int i=0; i<n; i++){
81         temp1.push_back(U[line][i]);
82         U[line][i] = U[p][i];
83         U[p][i] = temp1[i];
84     }
85     for(int i=0; i<p; i++){
86         temp2.push_back(L[line][i]);
87         L[line][i] = L[p][i];
88         L[p][i] = temp2[i];
89     }
90     temp3 = x[line];
91     x[line] = x[p];
92     x[p] = temp3;
93
94     return {U, L, x};
95 }
96
97 tuple<vector<vector<float>>,vector<vector<float>>, vector<float>>
98 piv(vector<vector<float>> U, vector<vector<float>> L, vector<float> x,
99 int n, int p){
100     float pivo = U[p][p];

```



```

101         for(int i=p+1; i<n; i++){
102             float coef = U[i][p];
103             for(int j=0; j<n; j++){
104                 U[i][j]=U[i][j]-(coef/pivo)*U[p][j];
105                 L[i][p] = coef/pivo;
106             }
107         }
108     }
109     return {U, L, x};
110 }
111
112 vector<float> solve_systemL(vector<vector<float>> L, vector<float> b, int n){
113     vector<float> c;
114     c.push_back(b[0]);
115     float sum = 0;
116
117     for(int i=1; i<n; i++){
118         for(int j=0; j<i; j++){
119             sum += L[i][j]*c[j];
120         }
121         c.push_back(b[i]-sum);
122         sum = 0;
123     }
124     return c;
125 }
126
127 vector<float> solve_systemU(vector<vector<float>> U, vector<float> c, int n){
128     vector<float> x_inv, x;
129     x_inv.push_back(c[n-1]/(U[n-1][n-1]));
130     float sum = 0;
131
132     for(int i=n-2; i>=0; i--){
133         for(int j=n-1; j>i; j--){
134             sum += U[i][j]*x_inv[n-(1+j)];
135         }
136         x_inv.push_back((c[i]-sum)/(U[i][i]));
137         sum = 0;
138     }
139     for(int i=n-1; i>=0; i--){
140         x.push_back(x_inv[i]);
141     }
142
143     return x;
144 }
145
146 void print_matrix(vector<vector<float>> Matrix, int n){
147     for(int i=0; i<n; i++){
148         for(int j=0; j<n; j++){
149             cout<<Matrix[i][j]<<' ';
150         }
151         cout<<endl;

```

```

152     }
153 }
154
155 void print_vector(vector<float> b, int n){
156     for(int i=0; i<n; i++){
157         cout<<b[i]<<' ';
158     }
159     cout<<endl;
160 }
161
162 int main(){
163     int line;
164     vector<float> b;
165     vector<vector<float>> A;
166
167     b = read_b();
168     int n = b.size();
169     A = read_A(n);
170
171     vector<float> c, x;
172     vector<vector<float>> U, L;
173
174     U = A;
175
176     for(int i=0; i<n; i++){
177         vector<float> temp;
178         for(int j=0; j<n; j++){
179             if(i==j){
180                 temp.push_back(1);
181             }else{
182                 temp.push_back(0);
183             }
184         }
185         L.push_back(temp);
186     }
187
188     for(int p=0; p<n-1; p++){
189         tuple<vector<vector<float>>, vector<vector<float>>,
190         vector<float>> temp;
191         line = find_piv(U, n, p);
192         temp = ch_line(U, L, b, n, p, line);
193         U = get<0>(temp);
194         L = get<1>(temp);
195         b = get<2>(temp);
196         temp = piv(U, L, b, n, p);
197         U = get<0>(temp);
198         L = get<1>(temp);
199     }
200     c = solve_systemL(L, b, n);
201     x = solve_systemU(U, c, n);
202

```

```

203     write_x(x);
204     return 0;
205 }

```

O mesmo pode ser também encontrado em:
https://github.com/th3worst4/Trab_PALU

15 Resultado do Problema Teste Resolvido

A matriz teste utilizada no código é a matriz apresentada na primeira seção, “Aplicação da Fatoração LU”, isto é,

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & 4 & 0 \\ 4 & -1 & 5 & 1 \\ -2 & 2 & -2 & 3 \\ 0 & 3 & -9 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 9 \\ 1 \\ -2 \end{bmatrix}$$

Ao rodar o código usando os dados do problema teste, o resultado retornado pelo programa no arquivo “x_vector.txt” é:

```

1 1
2 1
3 1
4 0.999999

```

O mesmo pode ser verificado através do download dos seguintes arquivos:
https://github.com/th3worst4/Trab_PALU/blob/main/TRABLU_final.exe
https://github.com/th3worst4/Trab_PALU/blob/main/A_matrix.txt
https://github.com/th3worst4/Trab_PALU/blob/main/b_vector.txt