

Prof Dra. Majela Penton Machado

### Respostas da segunda lista de exercício

Questão 01) Determine as condições que as constantes  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  devem satisfazer para garantir a consistência do sistema linear.

$$\begin{cases} x - 2y + 5z = b_1 \\ 4x - 5y + 8z = b_2 \\ -3x + 3y - 3z = b_3 \end{cases}$$

Duas perguntas têm que ser feitas para essa verificação:

- (a) É um sistema possível de ser resolvido?
- (b) É um sistema possível determinada/única ou indeterminadas soluções?

Para responder essas questões, primeiramente devemos encontrar a **matriz escalonada**, por meio de operações elementares na matriz dos coeficientes.

Usando eliminação de gauss, tem-se:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 5 \\ 4 & -5 & 8 \\ -3 & 3 & -3 \end{bmatrix} \xrightarrow{R_2 - 4R_1 \rightarrow R_2} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 5 \\ 0 & 3 & -12 \\ -3 & 3 & -3 \end{bmatrix} \xrightarrow{R_3 - (-3)R_1 \rightarrow R_3} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 5 \\ 0 & 3 & -12 \\ 0 & -3 & 12 \end{bmatrix}$$

$$\xrightarrow{R_3 - (-1)R_2 \rightarrow R_3} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 5 \\ 0 & 3 & -12 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

A partir disso, obtemos o seu posto, isto é, o número de linhas não-nulas quando a matriz está escalonada  $p(M) = 2$ . Ainda, para a matriz aumentada teremos que a única condição de consistência é caso o seu posto seja também 2. Nessa situação, o sistema será possível e com infinitas soluções, já que o número de variáveis é igual a 3 e  $p(M) = p(M|B) < n$ . Caso tenhamos  $p(M|B) = 3$  o sistema será inconsistente. Para a consistência, temos:

$$(M|B) = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & -2 & 5 & b_1 \\ 0 & 3 & -12 & -4b_1 + b_2 \\ 0 & 0 & 0 & -b_1 + b_2 + b_3 \end{array} \right]$$

Onde devemos atender na terceira linha  $-b_1 + b_2 + b_3 = 0$  para que o sistema seja possível e indeterminado.

Questão 02) Usando o método de Gauss-Jordan resolva o sistema de equações lineares.

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - 3x_4 + x_5 = 2 \\ x_1 + 2x_2 + x_3 - 3x_4 + x_5 + 2x_6 = 3 \\ x_1 + 2x_2 - 3x_4 + 2x_5 + x_6 = 4 \\ 3x_1 + 6x_2 + x_3 - 9x_4 + 4x_5 + 3x_6 = 9 \end{cases}$$

No processo de eliminação gaussiana, encontra-se a matriz escalonada a partir da matriz aumentada:

$$\left[ \begin{array}{cccccc|c} 1 & 2 & 0 & -3 & 1 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 1 & -3 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 0 & -3 & 2 & 1 & 4 \\ 3 & 6 & 1 & -9 & 4 & 3 & 9 \end{array} \right] \xrightarrow{R_2 - R_1 \rightarrow R_2} \left[ \begin{array}{cccccc|c} 1 & 2 & 0 & -3 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -3 & 2 & 1 & 4 \\ 3 & 6 & 1 & -9 & 4 & 3 & 9 \end{array} \right] \xrightarrow{R_3 - R_1 \rightarrow R_3}$$

$$\left[ \begin{array}{cccccc|c} 1 & 2 & 0 & -3 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 \\ 3 & 6 & 1 & -9 & 4 & 3 & 9 \end{array} \right] \xrightarrow{R_4 - 3R_1 \rightarrow R_4} \left[ \begin{array}{cccccc|c} 1 & 2 & 0 & -3 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 3 & 3 \end{array} \right] \xrightarrow{R_4 - R_2 \rightarrow R_4} \left[ \begin{array}{cccccc|c} 1 & 2 & 0 & -3 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 \end{array} \right]$$

$$R_4 - R_3 \rightarrow R_4 \left[ \begin{array}{cccccc|c} 1 & 2 & 0 & -3 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad R_1 - R_3 \rightarrow R_1 \left[ \begin{array}{cccccc|c} 1 & 2 & 0 & -3 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

Essa matriz escalonada resulta em um sistema de equações lineares:

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - 3x_4 - x_6 = 0 \\ x_3 + 2x_6 = 1 \\ x_5 + x_6 = 2 \end{cases}$$

Pela matriz aumentada escalonada é possível notar que seu posto é igual a  $p(M|B) = 3$ . Sabe-se também que o posto da matriz dos coeficientes é igual a  $p(M) = 3$ . Com base nisso e tendo como número de variáveis  $n = 6$ , podemos afirmar que o sistema é possível, mas indeterminado. Ou seja, apresenta infinitas soluções.

$$\begin{cases} x_1 = -2x_2 + 3x_4 + x_6 \\ x_2 = x_2 \\ x_3 = 1 - 2x_6 \\ x_4 = x_4 \\ x_5 = 2 - x_6 \\ x_6 = x_6 \end{cases} \quad (1)$$

Para a resolução desse sistema de equações lineares com python, é retornada uma exceção, pois a matriz dos coeficientes não é quadrada e temos o seguinte código:

```
import numpy as np

# Seta precisao de 3 decimais
np.set_printoptions(precision=3, suppress=True)

#Matriz dos coeficientes
A = np.array([
```

```

[1, 2, 0, -3, 1, 0],
[1, 2, 1, -3, 1, 2],
[1, 2, 0, -3, 2, 1],
[3, 6, 1, -9, 4, 3]
])

#Vetor com valores atribuidos
B = np.array([2,3,4,9])

#Resolucao do sistema
x = np.linalg.solve(A, B)

print(x)

# raise LinAlgError('Last 2 dimensions of the array must be square')
# numpy.linalg.LinAlgError: Last 2 dimensions of the array must be
# square

```

Questão 03) A Regra de Cramer é um método para determinar a solução de um sistema linear  $Ax = b$  de  $n$  equações e  $n$  incógnitas quando a matriz dos coeficientes  $A$  é invertível.

**Regra de Cramer:** Se  $Ax = b$  é um sistema de  $n$  equações lineares em  $n$  incógnitas tal que  $\det(A) \neq 0$ , então a única solução do sistema é dada por:

$$x_1 = \frac{\det(A_1)}{\det(A)}, \quad x_2 = \frac{\det(A_2)}{\det(A)}, \quad \dots, \quad x_n = \frac{\det(A_n)}{\det(A)}$$

onde  $A_j$  é a matriz obtida substituindo as entradas da  $j$  – ésima coluna de  $A$  pelas entradas da matriz  $b$ .

a) Mostre a Regra de Cramer no caso em que  $A$  é uma matriz quadrada de ordem 2.

Tem-se então:

$$\begin{cases} a_1x_1 + a_2x_2 = b_1 \\ a_3x_1 + a_4x_2 = b_2 \end{cases}$$

Onde podemos obter a matriz dos coeficientes:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix}$$

o determinante de  $A$  é igual a:

$$\det(A) = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{vmatrix} = -a_2 \cdot a_3 + a_1 \cdot a_4$$

Os determinantes de  $A_1$  e  $A_2$  são iguais a:

$$\det(A_1) = \begin{vmatrix} b_1 & a_2 \\ b_2 & a_4 \end{vmatrix} = a_4 \cdot b_1 - a_2 \cdot b_2$$

$$\det(A_2) = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_3 & b_2 \end{vmatrix} = -a_3 \cdot b_1 + a_1 \cdot b_2$$

Obtem-se então a solução do sistema:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{-a_4 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2}{a_2 \cdot a_3 - a_1 \cdot a_4} \\ x_2 &= \frac{a_3 \cdot b_1 - a_1 \cdot b_2}{a_2 \cdot a_3 - a_1 \cdot a_4} \end{aligned} \tag{2}$$

b) Use a Regra de Cramer para resolver  $x'$  e  $y'$  em termos de  $x$  e  $y$

$$\begin{cases} x = \frac{3}{5}x' - \frac{4}{5}y' \\ y = \frac{4}{5}x' + \frac{3}{5}y' \end{cases}$$

A matriz dos coeficientes:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{3}{5} & \frac{-4}{5} \\ \frac{4}{5} & \frac{3}{5} \end{bmatrix}$$

$$\det(A) = 1$$

$$\det(A_1) = \begin{vmatrix} x & -4/5 \\ y & 3/5 \end{vmatrix} = \frac{3x + 4y}{5}$$

$$\det(A_2) = \begin{vmatrix} 3/5 & x \\ 4/5 & y \end{vmatrix} = \frac{-4x + 3y}{5}$$

Assim sendo, a solução do sistema é:

$$\begin{aligned} x' &= \frac{3x + 4y}{5} / 1 = \frac{3x + 4y}{5} \\ y' &= \frac{-4x + 3y}{5} / 1 = \frac{-4x + 3y}{5} \end{aligned} \tag{3}$$

Questão 04) Considere o seguinte sistema de equações lineares

$$\begin{bmatrix} 2 & -4 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 12 & 0 \\ 0 & -1 & -4 & -5 \\ 0 & 0 & 2 & 11 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 8 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

a) Use o Python para determinar uma decomposição LU da matriz dos coeficientes deste sistema.

```
import numpy as np

# Algoritmo para decomposicao LU (scipy apenas resolve com
# pivotacao)
def fatoraLU(A):
```

```

U = np.copy(A)
n = len(U)
L = np.eye(n)
for j in np.arange(n-1):
    for i in np.arange(j+1,n):
        L[i,j] = U[i,j]/U[j,j]
        for k in np.arange(j+1,n):
            U[i,k] = U[i,k] - L[i,j]*U[j,k]
        U[i,j] = 0
return L, U

A = np.array([[2,-4,0,0],[1,2,12,0],[0,-1,-4,-5],[0,0,2,11]])

# realiza decomposicao
l, u = fatorLU(A)
# imprime valores
print(l)
# [[ 1.    0.    0.    0. ]
#  [ 0.5   1.    0.    0. ]
#  [ 0.   -0.25  1.    0. ]
#  [ 0.    0.   -2.    1. ]]
print(u)
# [[ 2 -4  0  0]
#  [ 0  4 12  0]
#  [ 0  0 -1 -5]
#  [ 0  0  0  1]]

```

b) Use a decomposição LU para resolver o sistema.

Usando os resultados anteriores obtidos pelo Python para L e U, podemos resolver o sistema como:

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1/4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 1 \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} 2 & -4 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Completada a fatoração LU, resolvemos, primeiramente, o sistema  $Ly = b$ :

$$\begin{aligned}y_1 &= 8 \\ \frac{1}{2}y_1 + y_2 &= 0 \\ -\frac{1}{4}y_2 + y_3 &= 1 \\ -2y_3 + y_4 &= 0\end{aligned}$$

Encontrando os seguintes valores:

$$\begin{cases} y_1 = 8 \\ y_2 = -4 \\ y_3 = 0 \\ y_4 = 0 \end{cases}$$

Esses valores serão usados para resolver o sistema  $Ux = y$ , encontrando assim um *array* com os valores de  $x$ :

$$\begin{aligned}2x_1 - 4x_2 &= 8 \\ 4x_2 + 12x_3 &= -4 \\ -x_3 - 5x_4 &= 0 \\ x_4 &= 0\end{aligned}$$

$$x = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

Questão 05) Dado  $n$  um número natural maior ou igual a 2, considere a matriz  $A$  de tamanho  $n \times n$  cuja entrada na posição  $i, j$  é  $\max(i, j)$ . Na seguinte função foi implementado o método de Gauss-Jordan para resolver sistemas lineares cuja matriz dos coeficientes é uma matriz  $A$  da forma anterior e os termos independentes são matrizes colunas com entradas inteiras quaisquer.

```
import numpy as np

def GaussJordan(A, b):
```



```

b = np.array(b, dtype=float)
A = np.array(A, dtype=float)
Ab = np.column_stack((A, b))
n = np.shape(Ab)[0]
m = np.shape(Ab)[1]
for i in range(0, n - 1, 1):
    if Ab[i, i] == 0:
        print("Divisao por zero")
        break
    for k in range(i + 1, n, 1):
        fator = Ab[k, i] / Ab[i, i]
        Ab[k, :] = Ab[k, :] - Ab[i, :] * fator
for i in range(n - 1, -1, -1):
    for k in range(i - 1, -1, -1):
        fator = Ab[k, i] / Ab[i, i]
        Ab[k, :] = Ab[k, :] - Ab[i, :] * fator
    Ab[i, :] = Ab[i, :] / Ab[i, i]
x = np.copy(Ab[:, m - 1])
return x

```

Usando Python defina matrizes da forma acima e matrizes colunas  $b$  com entradas inteiras aleatórias de tamanhos 5, 10, 15, 50, 100, 500, 1000 (especifique os comandos utilizados). Use as seguintes linhas para comparar o tempo de execução da função Gauss-Jordan (acima) e da função do numpy (`linalg.solve`) ao resolver cada sistema linear  $AX = b$  definido anteriormente

```

inicio = time.time()
xgauss = GaussJordan(A,b)
fim = time.time()
print("Tempo de Gauss-Jordan:", fim - inicio)
inicio = time.time()
xnumpy = np.linalg.solve(A,b)
fim = time.time()
print("Tempo de numpy-solve:", fim - inicio)

```

Qual a conclusão que você pode tirar deste experimento?

Inicialmente, comparando os tempos de execução para a questão anterior, percebeu-se que o tempo de execução do numpy é menor que o de Gauss-Jordan, porém, há uma oscilação: vezes a diferença é bastante superior, por outras não muito. No geral, o método do numpy apresenta uma tendencia de sempre permanecer com tempos menores na execução. Isso possivelmente se deve a algoritmos otimizados para resolução interna do sistema, que apresentam um big O mais rápido.

Para testes em matrizes de tamanho  $2 \times 2$  até  $1000 \times 1000$  elaborou-se um gráfico *tempo  $\times$  passo/iteração* com o seguinte algoritmo e percebeu-se que o tempo de execução

do numpy continua sendo menor que o de Gauss-Jordan.

```
import numpy as np
import time as time
import matplotlib.pyplot as plt

initial = 2
final = 1000
times_gauss = []
times_numpy = []
for i in range(initial, final):
    A = np.random.randint(-5, 5, size=(i, i))
    b = np.random.randint(-5, 5, size=(i))
    if np.linalg.det(A) != 0:
        inicio = time.time()
        xgauss = GaussJordan(A, b)
        fim = time.time()
        times_gauss.append((fim-inicio)*1000) #tempo em s
        inicio = time.time()
        xnumpy = np.linalg.solve(A, b)
        fim = time.time()
        times_numpy.append((fim-inicio)*1000) #tempo em s

plt.title("Tempo de execucao")
plt.xlabel("Passo")
plt.ylabel("Tempo (s)")

df={'x_values': np.arange(initial, final), 'y1_values': times_gauss,
'y2_values': times_numpy }

plt.plot( 'x_values', 'y1_values', data=df, marker='', color='olive',
linewidth=2, label="gauss")
plt.plot( 'x_values', 'y2_values', data=df, marker='', color='blue',
linewidth=2, linestyle='dashed', label="numpy")
# show legend
plt.legend()

plt.show()
```