

Declaro que segui o código de ética do Curso de Engenharia Ambiental ao realizar esta prova

NOME: _____

Assinatura: _____

AO REALIZAR ESTA PROVA, VOCÊ DEVE JUSTIFICAR TODAS AS PASSAGENS. EVITE “PULAR” PARTES IMPORTANTES DO DESENVOLVIMENTO DE CADA QUESTÃO. JUSTIFIQUE CADA PASSO IMPORTANTE. SIMPLIFIQUE AO MÁXIMO SUAS RESPOSTAS.

ATENÇÃO PARA A NOTAÇÃO VETORIAL E TENSORIAL! VETORES MANUSCRITOS DEVEM SER ESCRITOS COMO \underline{v} ; TENSORES DE ORDEM 2 COMO $\underline{\underline{A}}$.

1 [25] Quando um explosivo é detonado debaixo d'água, ele se converte quase que instantaneamente em gás. A pressão inicial do gás é p_0 . A explosão produz uma onda de choque esférica que se propaga (expandindo-se) pela água. Durante a propagação, o raio da R da esfera aumenta, e a pressão p do gás em seu interior diminui. A pressão p do gás durante a explosão depende das variáveis p_0 , R , ρ (massa específica da água, cujas dimensões são $M L^{-3}$), κ_T (compressibilidade isotérmica da água) e da massa m de explosivo. Note que κ_T é definido por

$$\kappa_T \equiv \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right).$$

Há 3 dimensões fundamentais M , L e T , e 6 variáveis. Obtenha os 3 parâmetros adimensionais do problema, escolhendo **obrigatoriamente** p_0 , R e ρ como variáveis em comum (no máximo) para os mesmos.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

A lista de variáveis e dimensões é

$$\begin{aligned} \llbracket p \rrbracket &= M L^{-1} T^{-2}, \\ \llbracket \kappa_T \rrbracket &= M^{-1} L T^2 \\ \llbracket m \rrbracket &= M, \\ \llbracket p_0 \rrbracket &= M L^{-1} T^{-2}, \\ \llbracket R \rrbracket &= L, \\ \llbracket \rho \rrbracket &= M L^{-3}. \end{aligned}$$

Os 3 grupos adimensionais são:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= p p_0^a R^b \rho^c, \\ \llbracket \Pi_1 \rrbracket &= [M L^{-1} T^{-2}] [M L^{-1} T^{-2}]^a [L^b] [M L^{-3}]^c \\ 1 &= M^0 L^0 T^0 = M^{1+a+c} L^{-1-a+b-3c} T^{-2-2a}. \end{aligned}$$

O sistema de equações é

$$\begin{aligned} a + c &= -1, \\ -a + b - 3c &= 1, \\ -2a &= 2 \end{aligned}$$

donde $a = -1$, $b = 0$, $c = 0$ e

$$\Pi_1 = \frac{p}{p_0}.$$

$$\begin{aligned} \Pi_2 &= \kappa_T p_0^a R^b \rho^c, \\ \llbracket \Pi_2 \rrbracket &= [M^{-1} L T^2] [M L^{-1} T^{-2}]^a [L^b] [M L^{-3}]^c \\ 1 &= M^0 L^0 T^0 = M^{-1+a+c} L^{1-a+b-3c} T^{2-2a} \end{aligned}$$

Continue a solução no verso \implies

O sistema de equações é

$$\begin{aligned}a + c &= 1, \\ -a + b - 3c &= -1, \\ -2a &= -2\end{aligned}$$

donde $a = 1, b = 0, c = 0$ e

$$\Pi_2 = \kappa_T p_0.$$

$$\begin{aligned}\Pi_3 &= m p_0^a R^b \rho^c, \\ \llbracket \Pi_3 \rrbracket &= [M][M L^{-1} T^{-2}]^a [L^b][M L^{-3}]^c \\ 1 &= M^0 L^0 T^0 = M^{1+a+c} L^{-a+b-3c} T^{-2a}\end{aligned}$$

O sistema de equações é

$$\begin{aligned}a + c &= -1 \\ -a + b - 3c &= 0 \\ -2a &= 0\end{aligned}$$

donde $a = 0, b = -3, c = -1$ e

$$\Pi_3 = m R^{-3} \rho^{-1} \blacksquare$$

2 [25] Escreva uma linha de Python que converte 7777 da base 10 para a base 2.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

`bin(7777)` ■

3 [25]

a) [05] Calcule a integral analítica

$$I = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \cos(x) \, dx.$$

b) [10] Aproxime o $\cos(x)$ por uma parábola $f(x) = ax^2 + bx + c$ passando por $(-\pi/2, 0)$, $(0, 1)$ e $(+\pi/2, 0)$ (ou seja: **encontre** a , b e c).c) [10] Com a , b e c encontrados acima, obtenha o valor de

$$I_a = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} f(x) \, dx.$$

Atenção: simplifique ao máximo o resultado para I_a e depois obtenha I_a **numericamente**, fazendo as contas à mão, com apenas 3 algarismos significativos: qual é a diferença relativa $|(I_a - I)/I|$?

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

a)

$$I = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \cos(x) \, dx = 2.$$

b)

$$\begin{aligned} a\left(-\frac{\pi}{2}\right)^2 + b\left(-\frac{\pi}{2}\right) + c &= 0, \\ c &= 1, \\ a\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 + b\left(\frac{\pi}{2}\right) + c &= 0, \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned} a\frac{\pi^2}{4} + 1 &= 0, \\ a &= -\frac{4}{\pi^2}, \\ b &= 0. \end{aligned}$$

c)

$$\begin{aligned} f(x) &= -\frac{4}{\pi^2}x^2 + 1; \\ \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} f(x) \, dx &= \frac{2\pi}{3} \approx 2,09; \\ \left| \frac{I_a - I}{I} \right| &= \frac{2,09 - 2}{2} = \frac{0,09}{2} = 0,045 \blacksquare \end{aligned}$$

4 [25] (Anulada: resposta foi impressa na prova) Traduza a função em Python abaixo em **apenas duas fórmulas** (no máximo) para o cálculo da integral numérica correspondente.

```
def simple(n,a,b,f):  
    dx = (b-a)/n;  
    I = 0.0;  
    for i in range(1,n+1):  
        xi = a + (i-0.5)*dx  
        I += f(xi)*dx  
    return I
```

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

$$\Delta x = (b - a)/n,$$

$$I = \sum_{i=1}^n f(a + (i - 1/2)\Delta x)\Delta x$$

Declaro que segui o código de ética do Curso de Engenharia Ambiental ao realizar esta prova

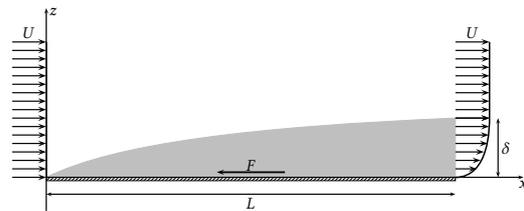
NOME: GABARITO

Assinatura: _____

AO REALIZAR ESTA PROVA, VOCÊ DEVE JUSTIFICAR TODAS AS PASSAGENS. EVITE “PULAR” PARTES IMPORTANTES DO DESENVOLVIMENTO DE CADA QUESTÃO. JUSTIFIQUE CADA PASSO IMPORTANTE. SIMPLIFIQUE AO MÁXIMO SUAS RESPOSTAS.

ATENÇÃO PARA A NOTAÇÃO VETORIAL E TENSORIAL! VETORES MANUSCRITOS DEVEM SER ESCRITOS COMO \vec{v} ; TENSORES DE ORDEM 2 COMO $\underline{\underline{A}}$.

1 [25] Quando um escoamento uniforme com velocidade U encontra uma placa de comprimento L , forma-se uma **camada-limite** (mostrada ao lado em cinza), que é uma região em que a velocidade vai de zero na placa até U no limite superior da camada-limite. As variáveis de interesse do problema são a força **por unidade de largura** F da placa sobre o escoamento, a massa específica ρ do fluido, a viscosidade cinemática ν do fluido ($[\nu] = L^2 T^{-1}$), o comprimento L da placa, a espessura δ da camada-limite em $x = L$, e a velocidade não-perturbada U .



Utilizando como variáveis comuns (no máximo) ρ , U e L , obtenha os 3 grupos adimensionais do problema.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

A lista de variáveis e dimensões é

$$\begin{aligned} [F] &= M T^{-2}, \\ [\nu] &= L^2 T^{-1}, \\ [\delta] &= L, \\ [\rho] &= M L^{-3}, \\ [U] &= L T^{-1} \\ [L] &= L. \end{aligned}$$

Os 3 grupos adimensionais são:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= F \rho^a U^b L^c, \\ [\Pi_1] &= [M T^{-2}] [M L^{-3}]^a [L T^{-1}]^b [L]^c \\ 1 &= M^0 L^0 T^0 = M^{1+a} L^{-3a+b+c} T^{-2-b}. \end{aligned}$$

O sistema de equações é

$$\begin{aligned} a + 1 &= 0, \\ -3a + b + c &= 0, \\ -b - 2 &= 0, \end{aligned}$$

donde $a = -1$, $b = -2$, $c = -1$ e

$$\Pi_1 = \frac{F}{\rho U^2 L}.$$

$$\begin{aligned} \Pi_2 &= \nu \rho^a U^b L^c, \\ [\Pi_2] &= [L^2 T^{-1}] [M L^{-3}]^a [L T^{-1}]^b [L]^c \\ 1 &= M^0 L^0 T^0 = M^a L^{2-3a+b+c} T^{-1-b} \end{aligned}$$

O sistema de equações é

$$\begin{aligned}a &= 0, \\ -3a + b + c + 2 &= 0, \\ -b - 1 &= 0,\end{aligned}$$

donde $a = 0$, $b = -1$, $c = -1$ e

$$\Pi_2 = \frac{v}{UL}.$$

$$\begin{aligned}\Pi_3 &= \delta \rho^a U^b L^c, \\ \llbracket \Pi_3 \rrbracket &= [L][ML^{-3}]^a [LT^{-1}]^b [L]^c \\ 1 &= M^0 L^0 T^0 = M^a L^{1-3a+b+c} T^{-b}\end{aligned}$$

O sistema de equações é

$$\begin{aligned}a &= 0, \\ -3a + b + c + 1 &= 0, \\ -b &= 0,\end{aligned}$$

donde $a = 0$, $b = -0$, $c = -1$ e

$$\Pi_3 = \frac{\delta}{L} \blacksquare$$

2 [25] Dado o programa em Python a seguir,

```
#!/usr/bin/python3
from numpy.random import rand
fob = open('a.bin', 'wb')
for k in range(3):
    a = rand(10)
    a.tofile(fob)
fob.close()
```

e sabendo que um float ocupa 8 bytes em Python, qual é o tamanho do arquivo 'a.bin' em bytes que o programa gera?

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

240

3 [25] A **Regra de Simpson** para integração numérica utiliza um número par de intervalos e aproxima a integral de $f(x)$ com $2n + 1$ pontos segundo

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{\Delta x}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{2n-2}) + 4f(x_{2n-1}) + f(x_{2n})],$$

onde $x_0 = a$, $x_{2n} = b$, e $\Delta x = (b - a)/(2n)$. Escreva uma função `simpson` (em Python) que calcula a fórmula acima. Os argumentos de entrada devem ser `(m, a, b, f)`, onde $m = 2n$ e f é a função a ser integrada.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

```
def simpson(m, a, b, f):
    assert(m % 2 == 0)
    dx = (b-a)/m
    Se = f(a) + f(b)
    S4 = 0.0
    for k in range(1, m, 2):
        xk = a + k*dx
        S4 += f(xk)
    S4 *= 4
    S2 = 0.0
    for k in range(2, m, 2):
        xk = a + k*dx
        S2 += f(xk)
    S2 *= 2
    I = (dx/3.0)*(Se + S4 + S2)
    return I
```

4 [25] A função

$$f(x) = \frac{e^{-x}}{\sqrt{x}}$$

não pode ser integrada em termos de funções transcendentais elementares. No entanto, expandindo-se $\exp(-x)$ em série de Taylor em torno de $x = 0$, é possível obter facilmente uma “série” para $f(x)$, cujos primeiros termos são

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{x}} - \sqrt{x} + \frac{x^{3/2}}{2} - \frac{x^{5/2}}{6} + \frac{x^{7/2}}{24} - \frac{x^{9/2}}{120} + \dots$$

- a) [12.5] Obtenha o termo geral da série acima, ou seja: obtenha as expressões para C_n e p_n para $n = 0, 1, 2, \dots$ que concordam com os termos acima e tais que

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n x^{p_n}.$$

- b) [12.5] Integrando termo a termo, encontre a série (isto é, D_n e q_n) da primitiva de $f(x)$:

$$F(x) = \sum_{n=0}^{\infty} D_n x^{q_n}$$

de tal forma que $F'(x) = f(x)$.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

a)

$$\begin{aligned} \frac{\exp(-x)}{x^{1/2}} &= x^{-1/2} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^n}{n!} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{n-1/2}}{n!}; \end{aligned}$$

portanto, $C_n = \frac{(-1)^n}{n!}$ e $p_n = n - 1/2$.

b) Integrando termo a termo,

$$\begin{aligned} F(x) &= \int f(x) dx = \int \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{n-1/2}}{n!} dx \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \int x^{n-1/2} dx \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \frac{x^{n+1/2}}{n+1/2} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n+1/2)n!} x^{n+1/2}; \end{aligned}$$

logo, $D_n = \frac{(-1)^n}{(n+1/2)n!}$ e $q_n = n + 1/2$ ■

Declaro que segui o código de ética do Curso de Engenharia Ambiental ao realizar esta prova

NOME: GABARITO

Assinatura: _____

AO REALIZAR ESTA PROVA, VOCÊ DEVE JUSTIFICAR TODAS AS PASSAGENS. EVITE “PULAR” PARTES IMPORTANTES DO DESENVOLVIMENTO DE CADA QUESTÃO. JUSTIFIQUE CADA PASSO IMPORTANTE. SIMPLIFIQUE AO MÁXIMO SUAS RESPOSTAS.

ATENÇÃO PARA A NOTAÇÃO VETORIAL E TENSORIAL! VETORES MANUSCRITOS DEVEM SER ESCRITOS COMO \underline{v} ; TENSORES DE ORDEM 2 COMO $\underline{\underline{A}}$.

1 [25] Como vimos em aula, o método de Runge-Kutta permite resolver (em princípio) qualquer sistema de equações diferenciais ordinárias do tipo

$$\frac{d\mathbf{y}}{dx} = f(x, \mathbf{y})$$

simplesmente programando $f(x, \mathbf{y})$ e passando a função como argumento para `rk4(x, y, h, f)`. Se o sistema de EDOs é

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_2 + y_3 \\ y_3 - y_1 \\ y_1 + y_2 \end{bmatrix},$$

programe a $f(x, y)$ correspondente em Python.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

```
from numpy import array
def f(x,y):
    return array([y[1]+y[2],y[2]-y[0],y[0]+y[1]])
```

2 [25] Se $E = ((1, 1), (-1, 1))$ é uma base do \mathbb{R}^2 , obtenha as coordenadas de $v = (3, 4)$ na base E .

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

$$\begin{aligned}v &= ae_1 + be_2, \\(3, 4) &= a(1, 1) + b(-1, 1) \\(3, 4) &= (a - b, a + b), \\a - b &= 3, \\a + b &= 4, \\2a &= 7, \\a &= 7/2, \\7/2 - b &= 3, \\b &= 7/2 - 3 = 7/2 - 6/2 = 1/2 \blacksquare\end{aligned}$$

3 [25] Determine a projeção do vetor $\mathbf{v} = (3, 3, 1)$ na direção do vetor $\mathbf{p} = (1/2, 1/2, 1/2)$.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

$$\begin{aligned} |\mathbf{p}| &= \sqrt{1/4 + 1/4 + 1/4} = \sqrt{3/4} = \frac{\sqrt{3}}{2}; \\ \mathbf{m} &= \frac{1}{|\mathbf{p}|} \mathbf{p} = \frac{2}{\sqrt{3}} (1/2, 1/2, 1/2); \\ \mathbf{v} \cdot \mathbf{m} &= (3, 3, 1) \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} (1/2, 1/2, 1/2) \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}} [3/2 + 3/2 + 1/2] \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{7}{2} = \frac{7}{\sqrt{3}} \blacksquare \end{aligned}$$

4 [25] Se u, v, w e p são vetores do \mathbb{R}^3 , calcule

$$([u \times v] \times w) \cdot p$$

em função dos produtos escalares $(u \cdot w)$, $(v \cdot p)$, $(u \cdot p)$ e $(v \cdot w)$. **Sugestão:** você vai precisar da identidade polar.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

$$\begin{aligned} [u \times v]_k &= \epsilon_{ijk} u_i v_j, \\ [u \times v] \times w &= \epsilon_{klm} [u \times v]_k w_l e_m, \\ &= \epsilon_{klm} \epsilon_{ijk} u_i v_j w_l e_m; \\ ([u \times v] \times w) \cdot p &= \epsilon_{klm} \epsilon_{ijk} u_i v_j w_l e_m \cdot p_n e_n \\ &= \epsilon_{ijk} \epsilon_{klm} u_i v_j w_l p_n \delta_{mn} \\ &= \epsilon_{ijk} \epsilon_{klm} u_i v_j w_l p_m \\ &= \epsilon_{ijk} \epsilon_{lmk} u_i v_j w_l p_m \\ &= (\delta_{il} \delta_{jm} - \delta_{im} \delta_{jl}) u_i v_j w_l p_m \\ &= u_i v_j w_l p_j - u_i v_j w_j p_i \\ &= (u_i w_i) (v_j p_j) - (u_i p_i) (v_j w_j) \\ &= (u \cdot w) (v \cdot p) - (u \cdot p) (v \cdot w) \blacksquare \end{aligned}$$

Declaro que segui o código de ética do Curso de Engenharia Ambiental ao realizar esta prova

NOME: GABARITO

Assinatura: _____

AO REALIZAR ESTA PROVA, VOCÊ DEVE JUSTIFICAR TODAS AS PASSAGENS. EVITE “PULAR” PARTES IMPORTANTES DO DESENVOLVIMENTO DE CADA QUESTÃO. JUSTIFIQUE CADA PASSO IMPORTANTE. SIMPLIFIQUE AO MÁXIMO SUAS RESPOSTAS.

ATENÇÃO PARA A NOTAÇÃO VETORIAL E TENSORIAL! VETORES MANUSCRITOS DEVEM SER ESCRITOS COMO \vec{v} ; TENSORES DE ORDEM 2 COMO \underline{A} .

1 [25] Dado o programa a seguir escrito em Python,

```
1 #!/usr/bin/python3
2 from numpy import array
3 h = 0.1 # passo em x
4 x = [0.0] # x inicial
5 y = [array([1.0,0.0])] # y inicial
6 n = int(10/h) # número de passos
7 def ff(x,y):
8     return array([y[0]+y[1],y[0]-y[1]])
9 def rk4(x,y,h,ff):
10     k1 = h*ff(x,y)
11     k2 = h*ff(x+h/2,y+k1/2)
12     k3 = h*ff(x+h/2,y+k2/2)
13     k4 = h*ff(x+h,y+k3)
14     yn = y + k1/6.0 + k2/3.0 + k3/3.0 + k4/6.0
15     return yn
16 for i in range(0,n): # loop da solução numérica
17     xn = (i+1)*h
18     yn = rk4(x[i],y[i],h,ff)
19     x.append(xn)
20     y.append(yn)
21 fou = open('ruk.out','wt')
22 for i in range(0,n+1): # imprime o arquivo de saída
23     fou.write('%12.6f_%12.6f_%12.6f\n' % (x[i],y[i][0],y[i][1]))
24 fou.close()
```

qual é o problema que ele resolve? Escreva **todas** as equações que especificam completamente o problema.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & +1 \\ +1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}, \quad y_1(0) = 1, \quad y_2(0) = 0 \blacksquare$$

2 [25] Se $E = ((1, 1, 0), (1, -1, 0), (0, 2, 1))$ é uma base do \mathbb{R}^3 , obtenha as coordenadas de $v = (1, 1, 1)$ na base E .

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

$$\begin{aligned}v &= xe_1 + ye_2 + ze_3, \\(1, 1, 1) &= x(1, 1, 0) + y(1, -1, 0) + z(0, 2, 1), \\(1, 1, 1) &= (x + y, x - y + 2z, z), \\z &= 1, \\x + y &= 1, \\x - y + 1 - 2 &= -1, \\x &= 0, \\y &= 1 \blacksquare\end{aligned}$$

3 [25] Seja $E = (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$ a base canônica do \mathbb{R}^3 , e $F = (\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{f}_3)$ uma outra base, onde

$$\mathbf{f}_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(1, 1, 1),$$

$$\mathbf{f}_2 = \frac{1}{\sqrt{6}}(-1, 2, -1),$$

$$\mathbf{f}_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(-1, 0, 1).$$

a) [10] Mostre que F é uma base ortonormal.

b) [15] Calcule a matriz de rotação de E para F .

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

a)

$$\mathbf{f}_1 \cdot \mathbf{f}_1 = 1,$$

$$\mathbf{f}_1 \cdot \mathbf{f}_2 = \mathbf{f}_2 \cdot \mathbf{f}_1 = 0,$$

$$\mathbf{f}_1 \cdot \mathbf{f}_3 = \mathbf{f}_3 \cdot \mathbf{f}_1 = 0,$$

$$\mathbf{f}_2 \cdot \mathbf{f}_2 = 1,$$

$$\mathbf{f}_2 \cdot \mathbf{f}_3 = 0,$$

$$\mathbf{f}_3 \cdot \mathbf{f}_3 = 1.$$

b)

$$C_{ij} = \mathbf{f}_j \cdot \mathbf{e}_i :$$

$$C_{11} = \mathbf{f}_1 \cdot \mathbf{e}_1 = \frac{1}{\sqrt{3}};$$

$$C_{12} = \mathbf{f}_2 \cdot \mathbf{e}_1 = -\frac{1}{\sqrt{6}};$$

$$C_{13} = \mathbf{f}_3 \cdot \mathbf{e}_1 = -\frac{1}{\sqrt{2}};$$

$$C_{21} = \mathbf{f}_1 \cdot \mathbf{e}_2 = \frac{1}{\sqrt{3}};$$

$$C_{22} = \mathbf{f}_2 \cdot \mathbf{e}_2 = \frac{2}{\sqrt{6}};$$

$$C_{23} = \mathbf{f}_3 \cdot \mathbf{e}_2 = 0;$$

$$C_{31} = \mathbf{f}_1 \cdot \mathbf{e}_3 = \frac{1}{\sqrt{3}};$$

$$C_{32} = \mathbf{f}_2 \cdot \mathbf{e}_3 = -\frac{1}{\sqrt{6}};$$

$$C_{33} = \mathbf{f}_3 \cdot \mathbf{e}_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \blacksquare$$

4 [25] Se

$$A = A_{lm} \mathbf{e}_l \mathbf{e}_m, \quad \mathbf{x} \times \mathbf{y} = \epsilon_{ijk} x_i y_j \mathbf{e}_k,$$

onde $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$ é a base canônica, obtenha uma expressão em notação indicial para

$$A \cdot [\mathbf{x} \times \mathbf{y}].$$

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

$$\begin{aligned} A \cdot [\mathbf{x} \times \mathbf{y}] &= A_{lm} \mathbf{e}_l \mathbf{e}_m \cdot \epsilon_{ijk} x_i y_j \mathbf{e}_k \\ &= A_{lm} x_i y_j \epsilon_{ijk} \mathbf{e}_l (\mathbf{e}_m \cdot \mathbf{e}_k) \\ &= A_{lm} x_i y_j \epsilon_{ijk} \mathbf{e}_l \delta_{mk} \\ &= A_{lk} x_i y_j \epsilon_{ijk} \mathbf{e}_l \blacksquare \end{aligned}$$

Declaro que segui o código de ética do Curso de Engenharia Ambiental ao realizar esta prova

NOME: GABARITO

Assinatura: _____

AO REALIZAR ESTA PROVA, VOCÊ DEVE JUSTIFICAR TODAS AS PASSAGENS. EVITE “PULAR” PARTES IMPORTANTES DO DESENVOLVIMENTO DE CADA QUESTÃO. JUSTIFIQUE CADA PASSO IMPORTANTE. SIMPLIFIQUE AO MÁXIMO SUAS RESPOSTAS.

ATENÇÃO PARA A NOTAÇÃO VETORIAL E TENSORIAL! VETORES MANUSCRITOS DEVEM SER ESCRITOS COMO \vec{v} ; TENSORES DE ORDEM 2 COMO $\underline{\underline{A}}$.

1 [25] Usando obrigatoriamente a regra de Leibniz, calcule

$$\frac{d}{dx} \int_x^{2x} \frac{\text{sen}(t/x)}{t} dt.$$

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

A regra de Leibniz é

$$\frac{d}{dx} \int_{a(x)}^{b(x)} f(x, t) dt = f(x, b) \frac{db}{dx} - f(x, a) \frac{da}{dx} + \int_{a(x)}^{b(x)} \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} dt.$$

Agora,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \int_x^{2x} \frac{\text{sen}\left(\frac{t}{x}\right)}{t} dt &= \frac{\text{sen}(2x/x)}{2x} \frac{d(2x)}{dx} - \frac{\text{sen}(x/x)}{x} \frac{d(x)}{dx} + \int_x^{2x} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\text{sen}(t/x)}{t} dt \\ &= \frac{\text{sen}(2)}{x} - \frac{\text{sen}(1)}{x} + \int_x^{2x} \frac{1}{t} \cos\left(\frac{t}{x}\right) \times -\frac{t}{x^2} dt \\ &= \frac{\text{sen}(2)}{x} - \frac{\text{sen}(1)}{x} - \frac{1}{x} \int_x^{2x} \cos\left(\frac{t}{x}\right) \frac{dt}{x} \\ &= \frac{\text{sen}(2)}{x} - \frac{\text{sen}(1)}{x} - \frac{1}{x} \int_1^2 \cos(u) du \\ &= \frac{\text{sen}(2)}{x} - \frac{\text{sen}(1)}{x} - \left[\frac{\text{sen}(2)}{x} - \frac{\text{sen}(1)}{x} \right] = 0 \blacksquare \end{aligned}$$

2 [25] Se

$$f(x, y) = \frac{x}{x^2 + y^2},$$

Calcule a integral

$$I = \iint_{R_{xy}} f(x, y) \, dy \, dx$$

onde R_{xy} é o semi-círculo definido por $x^2 + y^2 \leq 1$ e $x \geq 0$.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

É infinitamente mais fácil usar coordenadas polares. Primeiramente,

$$\begin{aligned}x &= r \cos(\theta), \\y &= r \operatorname{sen}(\theta), \\x^2 + y^2 &= r^2, \\f(x, y) &= \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \times \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\&= \frac{\frac{x}{r}}{\frac{r}{r}} \\&= \frac{\cos(\theta)}{r} = g(r, \theta).\end{aligned}$$

Agora,

$$\iint_{R_{xy}} f(x, y) \, dy \, dx = \iint_{R_{r\theta}} g(r, \theta) \left| \frac{\partial(x, y)}{\partial(r, \theta)} \right| \, d\theta \, dr;$$

Mas

$$\begin{aligned}\frac{\partial(x, y)}{\partial(r, \theta)} &= \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \end{vmatrix} \\&= \begin{vmatrix} \cos(\theta) & -r \operatorname{sen}(\theta) \\ \operatorname{sen}(\theta) & r \cos(\theta) \end{vmatrix} \\&= r;\end{aligned}$$

Logo,

$$\begin{aligned}I &= \iint_{R_{r\theta}} g(r, \theta) \left| \frac{\partial(x, y)}{\partial(r, \theta)} \right| \, d\theta \, dr \\&= \int_{r=0}^1 \int_{\theta=-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{\cos(\theta)}{r} r \, dr \, d\theta \\&= \int_{\theta=-\pi/2}^{+\pi/2} \cos(\theta) \, d\theta \\&= [\operatorname{sen}(\theta)]_{-\pi/2}^{+\pi/2} = 2 \blacksquare\end{aligned}$$

3 [25] Se

$$F = (yz^2 + y^2z)\mathbf{i} + (x^2z + xz^2)\mathbf{j} + (xy^2 + x^2y)\mathbf{k},$$

calcule o $\nabla \times F$.

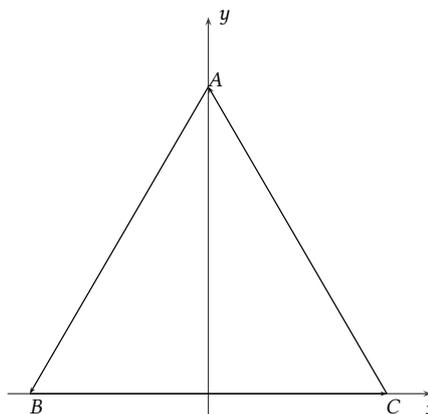
SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

$$\begin{aligned}\nabla \times F &= \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ (yz^2 + y^2z) & (x^2z + xz^2) & (xy^2 + x^2y) \end{vmatrix} \\ &= [(2xy + x^2) - (x^2 + 2xz)]\mathbf{i} + [(2yz + y^2) - (y^2 + 2xy)]\mathbf{j} + [(2xz + z^2) - (z^2 + 2yz)]\mathbf{k} \\ &= 2(xy - xz)\mathbf{i} + 2(yz - xy)\mathbf{j} + 2(xz - yz)\mathbf{k} \blacksquare\end{aligned}$$

4 [25] Se $F(x, y) = -y\mathbf{i} + x\mathbf{j}$, calcule o valor da integral de linha

$$I = \oint F \cdot d\mathbf{r}$$

ao longo do caminho fechado formado pelos lados do triângulo equilátero da figura (o tamanho dos lados é 1).



SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

Use o Teorema de Green: se $F = P\mathbf{i} + Q\mathbf{j}$,

$$\oint_{\mathcal{L}} P dx + Q dy = \iint_{\mathcal{S}} \left[\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right] dA$$

Mas $P = -y$ e $Q = x$;

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 1,$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = -1,$$

$$I = \iint_{\mathcal{S}} 2 dA = 2A,$$

onde A é a área do triângulo retângulo:

$$A = \frac{1}{2} \times 1 \times 1 \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) = \frac{\sqrt{3}}{4};$$

$$I = \frac{\sqrt{3}}{2} \blacksquare$$

Declaro que segui o código de ética do Curso de Engenharia Ambiental ao realizar esta prova

NOME: GABARITO

Assinatura: _____

AO REALIZAR ESTA PROVA, VOCÊ DEVE JUSTIFICAR TODAS AS PASSAGENS. EVITE “PULAR” PARTES IMPORTANTES DO DESENVOLVIMENTO DE CADA QUESTÃO. JUSTIFIQUE CADA PASSO IMPORTANTE. SIMPLIFIQUE AO MÁXIMO SUAS RESPOSTAS.

ATENÇÃO PARA A NOTAÇÃO VETORIAL E TENSORIAL! VETORES MANUSCRITOS DEVEM SER ESCRITOS COMO \tilde{v} ; TENSORES DE ORDEM 2 COMO \tilde{A} .

1 [25] Resolva o sistema de EDOs

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}.$$

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

A matriz é simétrica. Existem dois autovalores reais e dois autovetores mutuamente ortogonais. Os autovalores e autovetores associados são

$$\begin{aligned} \lambda = 0 &\Rightarrow \mathbf{v}_1 = (1, 1), \\ \lambda = 2 &\Rightarrow \mathbf{v}_2 = (1, -1). \end{aligned}$$

Na base $A = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$ dos autovetores o sistema fica

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}_A.$$

ou

$$\begin{aligned} \frac{du_{1A}}{dt} &= 0u_{1A} \Rightarrow u_{1A}(t) = C_1, \\ \frac{du_{2A}}{dt} &= 2u_{2A} \Rightarrow u_{2A}(t) = C_2 e^{2t}. \end{aligned}$$

Portanto,

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = u_{1A}\mathbf{v}_1 + u_{2A}\mathbf{v}_2 = C_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + C_2 e^{2t} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \blacksquare$$

2 [25] Sabendo que

$$\int \frac{a}{x^2 + a^2} dx = \operatorname{arctg} \left(\frac{x}{a} \right) + C,$$

Calcule a integral

$$I = \iint_{R_{xy}} \frac{x}{x^2 + y^2} dy dx$$

onde R_{xy} é a região $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq x$.

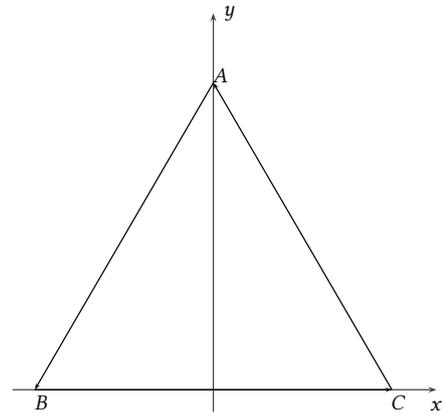
SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

$$\begin{aligned} I &= \int_{x=0}^1 \left[\int_{y=0}^x \frac{x}{x^2 + y^2} dy \right] dx \\ &= \int_{x=0}^1 \operatorname{arctg} \left(\frac{y}{x} \right) \Big|_{y=0}^x dx \\ &= \int_{x=0}^1 [\operatorname{arctg}(1) - \operatorname{arctg}(0)] dx \\ &= \int_{x=0}^1 \frac{\pi}{4} dx = \frac{\pi}{4} \blacksquare \end{aligned}$$

3 [25] Se $F(x, y) = -yi + xj$, **sem utilizar os teoremas de Stokes ou de Green**, calcule o valor da integral de linha

$$I = \oint F \cdot dr$$

ao longo do caminho fechado formado pelos lados do triângulo equilátero da figura (o tamanho dos lados é 1). **Sugestão:** parametrize cada um dos 3 segmentos de reta que formam os lados do triângulo e some as integrais de linha sobre cada trecho.



SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

As coordenadas dos pontos são

$$A = \left(0, \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{3}\right)\right) = \left(0, \frac{\sqrt{3}}{2}\right),$$

$$B = \left(-\cos\left(\frac{\pi}{3}\right), 0\right) = \left(-\frac{1}{2}, 0\right),$$

$$C = \left(\cos\left(\frac{\pi}{3}\right), 0\right) = \left(\frac{1}{2}, 0\right).$$

Os segmentos de reta podem ser parametrizados como se segue:

CA:

$$x = at + b,$$

$$y = ct + d;$$

$$x(0) = 1/2 \Rightarrow b = 1/2,$$

$$x(1) = 0 \Rightarrow a = -1/2,$$

$$y(0) = 0 \Rightarrow d = 0,$$

$$y(1) = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow c = \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$x(t) = (-1/2)t + 1/2,$$

$$y(t) = \frac{\sqrt{3}}{2}t.$$

AB:

$$x = at + b,$$

$$y = ct + d;$$

$$x(0) = 0 \Rightarrow b = 0,$$

$$x(1) = -1/2 \Rightarrow a = -1/2,$$

$$y(0) = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow d = \frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$y(1) = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow c = -\frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$x(t) = (-1/2)t,$$

$$y(t) = \frac{\sqrt{3}}{2} [1 - t].$$

BC:

$$\begin{aligned}x &= at + b, \\y &= ct + d; \\x(0) &= -1/2 \Rightarrow b = -1/2, \\x(1) &= +1/2 \Rightarrow a = +1, \\y(0) &= 0 \Rightarrow d = 0, \\y(1) &= 0 \Rightarrow c = 0; \\x(t) &= t - 1/2, \\y(t) &= 0.\end{aligned}$$

Sobre CA:

$$\begin{aligned}\mathbf{dr} &= (dx, dy) = \left(-\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}\right) dt, \\F &= (-y, x) = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}t, (-1/2)t + 1/2\right), \\F \cdot \mathbf{dr} &= \left[\frac{\sqrt{3}}{4}t + \frac{\sqrt{3}}{4}(1-t)\right] dt = \frac{\sqrt{3}}{4} dt, \\\int_{CA} F \cdot \mathbf{dr} &= \int_0^1 \frac{\sqrt{3}}{4} dt = \frac{\sqrt{3}}{4}.\end{aligned}$$

Sobre AB:

$$\begin{aligned}\mathbf{dr} &= (dx, dy) = \left(-\frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}\right) dt, \\F &= (-y, x) = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}(1-t), (-1/2)t\right), \\F \cdot \mathbf{dr} &= \left[\frac{\sqrt{3}}{4}(1-t) + \frac{\sqrt{3}}{4}t\right] dt = \frac{\sqrt{3}}{4} dt, \\\int_{AB} F \cdot \mathbf{dr} &= \int_0^1 \frac{\sqrt{3}}{4} dt = \frac{\sqrt{3}}{4}.\end{aligned}$$

Sobre BC:

$$\begin{aligned}\mathbf{dr} &= (dx, dy) = (1, 0) dt, \\F &= (-y, x) = (0, t - 1/2), \\F \cdot \mathbf{dr} &= 0, \\\int_{BC} F \cdot \mathbf{dr} &= 0.\end{aligned}$$

Portanto,

$$\oint F \cdot \mathbf{dr} = \frac{\sqrt{3}}{4} + \frac{\sqrt{3}}{4} = \frac{\sqrt{3}}{2} \blacksquare$$

4 [25] Encontre a solução geral da EDO

$$\frac{dy}{dx} + \frac{y}{x+1} = \cos(x).$$

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

$$\begin{aligned}y &= uv, \\u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx} + \frac{uv}{x+1} &= \cos(x), \\u \left[\frac{dv}{dx} + \frac{v}{x+1} \right] + v \frac{du}{dx} &= \cos(x), \\ \frac{dv}{dx} + \frac{v}{x+1} &= 0, \\ \frac{dv}{v} + \frac{dx}{x+1} &= 0, \\ \ln |v| + \ln |x+1| &= k_1, \\ \ln |v(x+1)| &= k_1, \\ |v(x+1)| &= e^{k_1} = k_2, \\ v(x+1) &= \pm k_2 = k_3, \\ v &= \frac{k_3}{x+1}; \\ \frac{k_3}{x+1} \frac{du}{dx} &= \cos(x), \\ \frac{du}{dx} &= \frac{1}{k_3} (x+1) \cos(x), \\ u &= \frac{1}{k_3} [(x+1) \operatorname{sen}(x) + \cos(x) + k_4], \\ y = uv &= \frac{1}{k_3} [(x+1) \operatorname{sen}(x) + \cos(x) + k_4] \frac{k_3}{x+1} \\ &= \operatorname{sen}(x) + \frac{\cos(x)}{x+1} + \frac{k_4}{x+1} \blacksquare\end{aligned}$$

Continue a solução no verso \Rightarrow

Declaro que segui o código de ética do Curso de Engenharia Ambiental ao realizar esta prova

NOME: GABARITO

Assinatura: _____

AO REALIZAR ESTA PROVA, VOCÊ DEVE JUSTIFICAR TODAS AS PASSAGENS. EVITE “PULAR” PARTES IMPORTANTES DO DESENVOLVIMENTO DE CADA QUESTÃO. JUSTIFIQUE CADA PASSO IMPORTANTE. SIMPLIFIQUE AO MÁXIMO SUAS RESPOSTAS.

ATENÇÃO PARA A NOTAÇÃO VETORIAL E TENSORIAL! VETORES MANUSCRITOS DEVEM SER ESCRITOS COMO \vec{v} ; TENSORES DE ORDEM 2 COMO $\underline{\underline{A}}$.

1 [25] Encontre a solução geral da EDO não-linear

$$\frac{dy}{dx} + ay = -by^3, \quad y(0) = y_0,$$

$a > 0, b > 0$. **Sugestão:** Tente $y = uv$ e resolva uma EDO linear e homogênea em v .

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

Faça $y = uv$:

$$\begin{aligned} u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx} + auv &= -bu^3v^3, \\ \left[\frac{dv}{dx} + av \right] u + v \frac{du}{dx} &= -bu^3v^3. \end{aligned}$$

Obrigue o termo dentro dos colchetes a ser nulo, e resolva:

$$v = v_0 e^{-ax}.$$

Substitua no que restou:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dx} &= -bu^3v^2, \\ \frac{du}{u^3} &= -b[v_0 e^{-ax}]^2 dx, \\ \frac{du}{u^3} &= -bv_0^2 e^{-2ax} dx, \\ \frac{1}{2u_0^2} - \frac{1}{2u^2} &= -\frac{bv_0^2}{2a} (1 - e^{-2ax}), \\ \frac{1}{u_0^2} - \frac{1}{u^2} &= -\frac{bv_0^2}{a} (1 - e^{-2ax}), \\ \frac{1}{u^2} &= \frac{1}{u_0^2} + \frac{bv_0^2}{a} (1 - e^{-2ax}), \\ \frac{1}{u^2} &= \frac{1}{u_0^2} + \frac{bu_0^2v_0^2}{au_0^2} (1 - e^{-2ax}), \\ \frac{1}{u^2} &= \frac{1}{u_0^2} \left[1 + \frac{bu_0^2v_0^2}{a} (1 - e^{-2ax}) \right], \\ u &= \frac{u_0}{\left[1 + \frac{by_0^2}{a} (1 - e^{-2ax}) \right]^{1/2}}, \end{aligned}$$

donde

$$y = uv = \frac{y_0 e^{-ax}}{\left[1 + \frac{by_0^2}{a} (1 - e^{-2ax}) \right]^{1/2}} \blacksquare$$

2 [25] Encontre a solução geral de

$$y'' - 5y' + 6y = x.$$

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

A solução da equação homogênea associada é

$$y_h(x) = Ae^{2x} + Be^{3x}.$$

Agora aplicamos o método de variação de constantes, fazendo

$$y(x) = A(x)e^{2x} + B(x)e^{3x}.$$

Derivamos:

$$\begin{aligned}y(x) &= Ae^{2x} + Be^{3x}, \\y'(x) &= 2Ae^{2x} + 3Be^{3x} + \underbrace{A'e^{2x} + B'e^{3x}}_{=0}, \\y''(x) &= 4Ae^{2x} + 9Be^{3x} + 2A'e^{2x} + 3B'e^{3x}.\end{aligned}$$

Substituímos na EDO:

$$\begin{aligned}4Ae^{2x} + 9Be^{3x} + 2A'e^{2x} + 3B'e^{3x} - 5[2Ae^{2x} + 3Be^{3x}] + 6[Ae^{2x} + Be^{3x}] &= x, \\Ae^{2x} \underbrace{[4 - 10 + 6]}_{=0} + Be^{3x} \underbrace{[9 - 15 + 6]}_{=0} + 2A'e^{2x} + 3B'e^{3x} &= x.\end{aligned}$$

Obtemos o sistema de EDOs,

$$\begin{aligned}A'e^{2x} + B'e^{3x} &= 0, \\2A'e^{2x} + 3B'e^{3x} &= x, \\3A'e^{2x} + 3B'e^{3x} &= 0, \\A'e^{2x} &= -x, \\\frac{dA}{dx} &= -xe^{-2x}, \\A(x) &= \frac{2x+1}{4}e^{-2x} + C, \\2A'e^{2x} + 3B'e^{3x} &= x, \\2A'e^{2x} + 2B'e^{3x} &= 0, \\B'e^{3x} &= x, \\\frac{dB}{dx} &= xe^{-3x}, \\B(x) &= -\frac{3x+1}{9}e^{-3x} + D.\end{aligned}$$

Agora, juntando tudo,

$$\begin{aligned}y(x) &= A(x)e^{2x} + B(x)e^{3x} \\&= \left[\frac{2x+1}{4}e^{-2x} + C \right] e^{2x} + \left[-\frac{3x+1}{9}e^{-3x} + D \right] e^{3x} \\&= \frac{6x+5}{36} + Ce^{2x} + De^{3x} \blacksquare\end{aligned}$$

Continue a solução no verso \Rightarrow

3 [25] Encontre as 3 raízes complexas de

$$z^3 = 1.$$

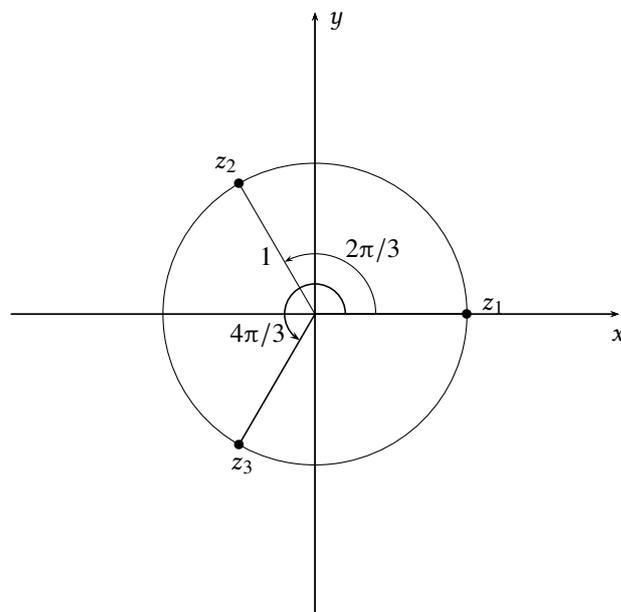
Deixe as 3 raízes explícitas e desenhe-as no plano complexo.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

$$\begin{aligned}z^3 &= 1 = e^{i2k\pi}, \\z &= re^{i\theta}, \\z^3 &= r^3 e^{3i\theta}, \\r^3 e^{i3\theta} &= e^{i2k\pi}, \\r &= 1, \\\theta &= \frac{2k\pi}{3}.\end{aligned}$$

As 3 raízes são

$$\begin{aligned}z_1 &= 1, \\z_2 &= e^{i\frac{2\pi}{3}}, \\z_3 &= e^{i\frac{4\pi}{3}} \blacksquare\end{aligned}$$



4 [25] Expanda a função complexa

$$f(z) = \frac{z-3}{z-7}$$

em série de Laurent em torno de $z = 3$ na região $|z - 3| < 4$.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

Note que a região é do tipo $|z - 3|/4 < 1$:

$$\begin{aligned} \frac{z-3}{z-7} &= \frac{z-3}{(z-3)-4} \\ &= \frac{\frac{z-3}{4}}{\frac{z-3}{4}-1} \\ &= -\frac{z-3}{4} \times \frac{1}{1-\frac{z-3}{4}} \\ &= -\frac{z-3}{4} \left[1 + \left(\frac{z-3}{4}\right) + \left(\frac{z-3}{4}\right)^2 + \left(\frac{z-3}{4}\right)^3 + \dots \right] \blacksquare \end{aligned}$$

Declaro que segui o código de ética do Curso de Engenharia Ambiental ao realizar esta prova

NOME: GABARITO

Assinatura: _____

AO REALIZAR ESTA PROVA, VOCÊ DEVE JUSTIFICAR TODAS AS PASSAGENS. EVITE “PULAR” PARTES IMPORTANTES DO DESENVOLVIMENTO DE CADA QUESTÃO. JUSTIFIQUE CADA PASSO IMPORTANTE. SIMPLIFIQUE AO MÁXIMO SUAS RESPOSTAS.

ATENÇÃO PARA A NOTAÇÃO VETORIAL E TENSORIAL! VETORES MANUSCRITOS DEVEM SER ESCRITOS COMO \vec{v} ; TENSORES DE ORDEM 2 COMO $\underline{\underline{A}}$.

1 [25] Resolva a EDO não-homogênea

$$x^2 y'' + 7xy' + 6y = x.$$

a) [10] Encontre a solução da equação homogênea associada,

$$y_h = c_1 y_1(x) + c_2 y_2(x),$$

ou seja: encontre $y_1(x)$ e $y_2(x)$.

b) [15] Faça

$$y(x) = A(x)y_1(x) + B(x)y_2(x);$$

derive; force o termo envolvendo A' e B' a ser nulo; derive novamente e substitua. Produza um sistema de duas EDOs de ordem 1 em A e B . Resolva para $A(x)$ e $B(x)$.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

a) A equação homogênea associada é uma equação de Euler:

$$\begin{aligned}x^2 y_h'' + 7x y_h' + 6y_h &= 0, \\y_h &= x^m, \\y_h' &= mx^{m-1}, \\y_h'' &= (m-1)mx^{m-2}, \\[(m-1)m + 7m + 6] x^m &= 0, \\m^2 + 6m + 6 &= 0, \\m_1 &= +\sqrt{3} - 3, \\m_2 &= -\sqrt{3} - 3, \\y_h(x) &= c_1 x^{m_1} + c_2 x^{m_2}\end{aligned}$$

b) Agora,

$$\begin{aligned}y(x) &= A(x)x^{m_1} + B(x)x^{m_2}, \\y'(x) &= m_1 A x^{m_1-1} + m_2 B x^{m_2-1} + \underbrace{A' x^{m_1} + B' x^{m_2}}_{=0}, \\y''(x) &= (m_1 - 1)m_1 A x^{m_1-2} + (m_2 - 1)m_2 B x^{m_2-2} + m_1 A' x^{m_1-1} + m_2 B' x^{m_2-1}.\end{aligned}$$

Substituindo na EDO,

$$\begin{aligned}x^2 y'' + 7xy' + 6y &= x, \\ \underbrace{[(m_1 - 1)m_1 + 7m_1 + 6]}_{=0} A + \underbrace{[(m_2 - 1)m_2 + 7m_2 + 6]}_{=0} B + m_1 A' x^{m_1+1} + m_2 B' x^{m_2+1} &= x\end{aligned}$$

Ficamos com o sistema de EDOs

$$\begin{aligned}A'x^{m_1} + B'x^{m_2} &= 0, \\m_1A'x^{m_1+1} + m_2B'x^{m_2+1} &= 0,\end{aligned}$$

cuja solução é

$$\begin{aligned}A(x) &= \frac{1}{(m_1 - m_2)(1 - m_1)}x^{1-m_1} + A_0, \\B(x) &= \frac{1}{(m_2 - m_1)(1 - m_1)}x^{1-m_2} + B_0.\end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned}y(x) &= \left[\frac{1}{(m_1 - m_2)(1 - m_1)} + \frac{1}{(m_2 - m_1)(1 - m_1)} \right] x + A_0x^{m_1} + B_0x^{m_2} \\&= \frac{x}{13} + A_0x^{-3+\sqrt{3}} + B_0x^{-3-\sqrt{3}} \blacksquare\end{aligned}$$

2 [25] Dada a função

$$f(z) = \ln(z - 1),$$

a) [10] Encontre o(s) ponto(s) de ramificação de f .

b) [15] **Desenhe** no plano complexo um corte que torne a função unívoca.

Sugestão: faça $z - 1 = re^{i\theta}$ e analise o que acontece.

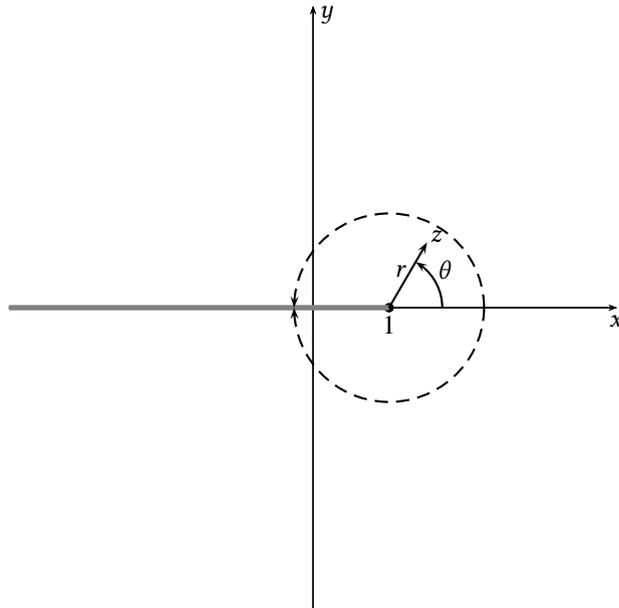
SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

a) Se $z - 1 = re^{i\theta}$,

$$\ln(z - 1) = \ln re^{i\theta} = \ln r + i\theta.$$

Claramente, se z der uma volta completa em torno de 1, $f(z)$ muda de valor; logo, $z = 1$ é o único ponto de ramificação.

b) Um corte possível é mostrado (linha cinza grossa) na figura abaixo, que limita θ a $-\pi < \theta \leq \pi$ ■



Continue a solução no verso \implies

3 [25] Obtenha a série de Laurent de

$$f(x) = f(z) = \frac{1}{(2i-2)(z-2i)} - \frac{1}{(2i-2)(z-2)}$$

no disco $|z-2| < 2\sqrt{2}$.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

Se

$$f(z) = \frac{1}{(2i-2)(z-2i)} - \frac{1}{(2i-2)(z-2)},$$

o 2º termo já está no formato de um termo da série de Laurent desejada, e nós o deixamos como está. O 1º termo precisa ser reescrito:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(2i-2)(z-2i)} &= \frac{1}{(2i-2)} \left[\frac{1}{(z-2) + (2-2i)} \right] \\ &= -\frac{1}{(2i-2)^2} \left[\frac{1}{\frac{z-2}{2-2i} + 1} \right] \\ &= -\frac{1}{(2i-2)^2} \left[\frac{1}{1 + \frac{z-2}{2-2i}} \right] \end{aligned}$$

Mas

$$\begin{aligned} \left| \frac{z-2}{2-2i} \right| &= \frac{|z-2|}{|2-2i|} \\ &= \frac{|z-2|}{2\sqrt{2}} < 1, \end{aligned}$$

donde

$$\frac{1}{1 + \frac{z-2}{2-2i}} = 1 - \frac{z-2}{2-2i} + \left(\frac{z-2}{2-2i}\right)^2 - \left(\frac{z-2}{2-2i}\right)^3 + \left(\frac{z-2}{2-2i}\right)^4 + \dots$$

Portanto,

$$\begin{aligned} f(z) &= -\frac{1}{(2i-2)(z-2)} \\ &+ \frac{1}{(2i-2)^2} \left[1 - \frac{z-2}{2i-2} + \left(\frac{z-2}{2i-2}\right)^2 - \left(\frac{z-2}{2i-2}\right)^3 + \left(\frac{z-2}{2i-2}\right)^4 + \dots \right] \blacksquare \end{aligned}$$

4 [25] Dada a equação diferencial ordinária

$$xy'' + xy' + y = 0 :$$

a) [05] Mostre que $x = 0$ é um ponto singular regular.

b) [20] Obtenha **uma** solução de Frobenius do tipo

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+r}.$$

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

Começo escrevendo a equação na forma

$$y'' + p(x)y' + q(x)y = y'' + y' + \frac{1}{x}y = 0.$$

As funções

$$[xp(x)] = x, \quad \text{e} \quad [x^2q(x)] = x$$

são analíticas em $x = 0$, e $x = 0$ é um ponto singular regular, em torno do qual é possível obter uma solução de Frobenius,

$$\begin{aligned} y &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+r}, \\ y' &= \sum_{n=0}^{\infty} (n+r)a_n x^{n+r-1}, \\ y'' &= \sum_{n=0}^{\infty} (n+r-1)(n+r)a_n x^{n+r-2}. \end{aligned}$$

Substituindo na equação diferencial, encontro

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+r-1)(n+r)a_n x^{n+r-1} + \sum_{n=0}^{\infty} (n+r)a_n x^{n+r} + \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+r} = 0.$$

Faço agora no primeiro somatório:

$$\begin{aligned} m+r &= n+r-1, \\ m &= n-1, \\ n &= m+1, \end{aligned}$$

e obtenho

$$\begin{aligned} \sum_{m=-1}^{\infty} (m+r)(m+r+1)a_{m+1}x^{m+r} + \sum_{n=0}^{\infty} (n+r)a_n x^{n+r} + \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+r} &= 0, \\ (r-1)ra_0x^{r-1} + \sum_{n=0}^{\infty} [(n+r)(n+r+1)a_{n+1} + (n+r)a_n + a_n] x^{n+r} &= 0, \\ (r-1)ra_0x^{r-1} + \sum_{n=0}^{\infty} [(n+r)(n+r+1)a_{n+1} + (n+r+1)a_n] x^{n+r} &= 0. \end{aligned}$$

É evidente que, com $a_0 \neq 0$, a equação indicial é

$$r(r-1) = 0 \Rightarrow r_2 = 0 \text{ ou } r_1 = 1.$$

As raízes diferem por um inteiro; ou a menor raiz leva a 2 soluções, ou não leva a nenhuma. Tentemos com a menor raiz ($r_2 = 0$):

$$\begin{aligned} n(n+1)a_{n+1} + (n+1)a_n &= 0, \\ a_{n+1} &= -\frac{1}{n}a_n. \end{aligned}$$

Continue a solução no verso \Rightarrow

Note que é impossível obter a_1 a partir de a_0 : a recursão falha, e a menor raiz não leva a nenhuma solução. Uma única solução ainda é possível com a maior raiz $r_1 = 1$:

$$(n+1)(n+2)a_{n+1} + (n+2)a_n = 0,$$
$$a_{n+1} = -\frac{1}{n+1}a_n.$$

Fazendo $a_0 = 1$ sem perda de generalidade, não é difícil encontrar o termo geral:

$$a_n = \frac{(-1)^n}{n!}$$

e uma solução

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} x^{n+1} \blacksquare$$

Declaro que segui o código de ética do Curso de Engenharia Ambiental ao realizar esta prova

NOME: GABARITO

Assinatura: _____

AO REALIZAR ESTA PROVA, VOCÊ DEVE JUSTIFICAR TODAS AS PASSAGENS. EVITE “PULAR” PARTES IMPORTANTES DO DESENVOLVIMENTO DE CADA QUESTÃO. JUSTIFIQUE CADA PASSO IMPORTANTE. SIMPLIFIQUE AO MÁXIMO SUAS RESPOSTAS.

ATENÇÃO PARA A NOTAÇÃO VETORIAL E TENSORIAL! VETORES MANUSCRITOS DEVEM SER ESCRITOS COMO \vec{v} ; TENSORES DE ORDEM 2 COMO \underline{A} .

1 [20] Considere a seguinte equação diferencial ordinária não linear:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 + \cos(y^2) = x^2; \quad y(0) = 0.$$

Em princípio, ela não pode ser resolvida analiticamente, mas pode ser resolvida numericamente com facilidade com o método de Runge-Kutta de 4ª ordem. Para a rotina padrão de solução com Runge-Kutta,

```
def rk4(x,y,h,ff):  
    '''  
    rk4 implementa um passo do método de Runge-Kutta de ordem 4  
    '''  
    k1 = h*ff(x,y)  
    k2 = h*ff(x+h/2,y+k1/2)  
    k3 = h*ff(x+h/2,y+k2/2)  
    k4 = h*ff(x+h,y+k3)  
    yn = y + k1/6.0 + k2/3.0 + k3/3.0 + k4/6.0  
    return yn
```

basta escrever uma ff adequada. Escreva a ff que resolve a equação acima. **Indique a indentação cuidadosamente, com linhas verticais.**

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

```
1 def ff(x,y):  
2     return (x**2 - cos(y**2))*(0.5)
```

2 [20] Sabendo o valor do determinante

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 1 \\ 5 & 4 & 3 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 5 \\ 3 & 3 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} = -12,$$

obtenha

$$\begin{vmatrix} 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 1 \\ 5 & 4 & 3 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 5 \\ 3 & 3 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} = ?$$

Justifique sua resposta.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

-36, pois o determinante é linear em cada linha ou coluna ■

3 [20] Sabendo que

$$\operatorname{erf}(x) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\xi=0}^x e^{-\xi^2} d\xi,$$

resolva a EDO

$$\frac{dy}{dx} - 2xy = 1, \quad y(0) = 1.$$

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

Faça $y = uv$ e substitua:

$$u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx} - 2xuv = 1$$
$$u \underbrace{\left[\frac{dv}{dx} - 2xv \right]}_{=0} + v \frac{du}{dx} = 1$$

$$\frac{dv}{dx} - 2xv = 0$$

$$\frac{dv}{v} = 2x dx$$

$$\int_{v_0}^v \frac{d\eta}{\eta} = 2 \int_0^x \xi d\xi = x^2$$

$$\ln \frac{v}{v_0} = x^2$$

$$v = v_0 e^{x^2} \Rightarrow$$

$$v_0 e^{x^2} \frac{du}{dx} = 1$$

$$u = \frac{1}{v_0} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi + u_0 = \frac{\sqrt{\pi}}{2v_0} \operatorname{erf}(x) + u_0 \Rightarrow$$

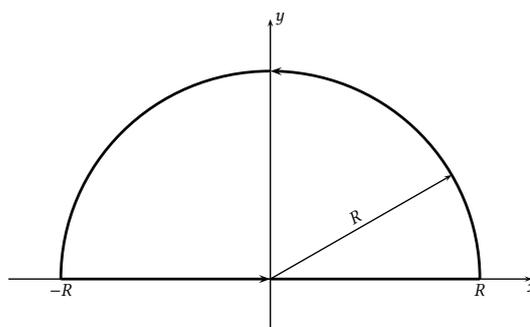
$$y = uv = \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2v_0} \operatorname{erf}(x) + u_0 \right] v_0 e^{x^2}$$

$$y = \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{x^2} \operatorname{erf}(x) + K e^{x^2}; \quad y(0) = 1 \Rightarrow K = 1 \blacksquare$$

4 [20] Utilizando obrigatoriamente integração de contorno com variáveis complexas, calcule

$$I = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \frac{1}{x^2 + i} dx.$$

onde x é o eixo dos reais e $i = \sqrt{-1}$. Utilize o contorno mostrado na figura ao lado.

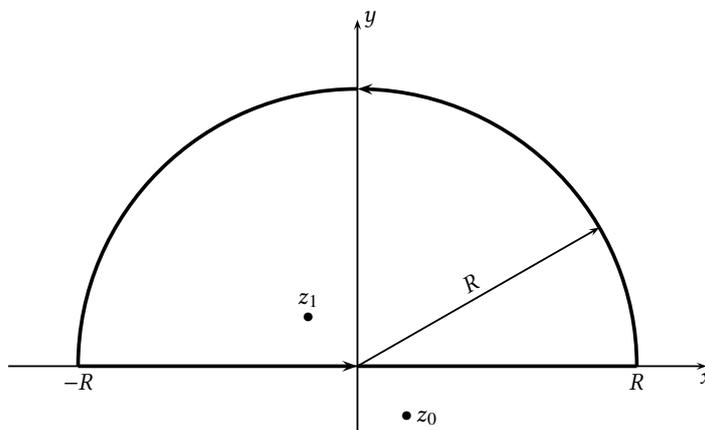


SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

Considere a função $f(z) = 1/(z^2 + i)$. Esta função possui singularidades em

$$\begin{aligned} z^2 + i &= 0, \\ z^2 &= -i = e^{(-i\pi/2 + 2k\pi)}; \\ z &= e^{(-i\pi/4 + k\pi)}. \end{aligned}$$

Consequentemente, apenas a singularidade em z_1 mostrada abaixo precisa ser considerada no teorema dos resíduos.



Para verificar a integral sobre o semi-círculo \mathcal{L}_S quando $R \rightarrow \infty$:

$$\begin{aligned} \lim_{R \rightarrow \infty} \left| \int_{\mathcal{L}_S} \frac{1}{z^2 + i} dz \right| &\leq \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{\mathcal{L}_S} \left| \frac{1}{z^2 + i} \right| |dz| \\ &= \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{\theta=0}^{\pi} \left| \frac{iRe^{i\theta}}{R^2 e^{2i\theta} + i} \right| d\theta \\ &\leq \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{\theta=0}^{\pi} \left| \frac{iRe^{i\theta}}{R^2 e^{2i\theta}} \right| d\theta = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{\pi}{R} = 0. \end{aligned}$$

Portanto, pelo teorema dos resíduos, devemos ter

$$\int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \frac{1}{x^2 + i} dx = 2\pi i c_{-1},$$

onde o resíduo c_{-1} em z_1 é calculado como se segue:

$$\frac{1}{z^2 + i} = \frac{1}{(z - z_0)(z - z_1)};$$

logo, nas proximidades de z_1 ,

$$f(z) \sim \frac{1}{(z_1 - z_0)(z - z_1)},$$

donde z_1 é claramente um polo de primeira ordem, e

$$\begin{aligned}c_{-1} &= \frac{1}{(z_1 - z_0)} \\&= \frac{1}{\left[-\frac{\sqrt{2}}{2} + i\frac{\sqrt{2}}{2}\right] - \left[\frac{\sqrt{2}}{2} - i\frac{\sqrt{2}}{2}\right]} \\&= \frac{1}{-\sqrt{2} + i\sqrt{2}} \\&= \frac{1}{\sqrt{2}(-1 + i)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{(-1 - i)}{(-1 + i)(-1 - i)} \\&= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{(-1 - i)}{1 - i^2} \\&= -\frac{1}{2\sqrt{2}}(1 + i)\end{aligned}$$

Finalmente,

$$\begin{aligned}I &= 2\pi i c_{-1} = (2\pi i) \times \left[-\frac{1}{2\sqrt{2}}(1 + i)\right] \\&= 2\pi i c_{-1} = (\pi i) \times \left[-\frac{1}{\sqrt{2}}(1 + i)\right] \\&= -\frac{\pi}{\sqrt{2}}(i^2 + i) = -\frac{\pi}{\sqrt{2}}(-1 + i) \\&= \frac{\pi}{\sqrt{2}}(1 - i) \blacksquare\end{aligned}$$

5 [20] Resolva a equação de Airy

$$y'' - xy = 0$$

em série de potências $y = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ (note que $x = 0$ é um ponto regular, e que portanto isto não é o método de Frobenius); em particular mostre que se deve ter necessariamente $a_2 = 0$, e obtenha os 3 primeiros termos das séries que multiplicam, respectivamente, a_0 e a_1 (isto é: as duas soluções LI).

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

Como sempre:

$$y = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, \quad y' = \sum_{n=0}^{\infty} n a_n x^{n-1}, \quad y'' = \sum_{n=0}^{\infty} (n-1) n a_n x^{n-2}.$$

Substituindo na equação diferencial:

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n-1) n a_n x^{n-2} - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+1} = 0$$

Fazendo $n - 2 = m + 1$, isto é: fazendo $m = n - 3$,

$$0 = \sum_{m=-3}^{\infty} (m+2)(m+3) a_{m+3} x^{m+1} - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+1},$$

$$0 = \sum_{m=-1}^{\infty} (m+2)(m+3) a_{m+3} x^{m+1} - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+1},$$

$$0 = 2a_2 + \sum_{n=0}^{\infty} [(n+2)(n+3) a_{n+3} - a_n] x^{n+1}.$$

A relação de recorrência é

$$a_{n+3} = \frac{a_n}{(n+2)(n+3)}.$$

Claramente, $a_2 = a_5 = a_8 = \dots = 0$; partindo de $a_0 = 1$: $a_3 = 1/6$, $a_6 = 1/180$, $a_9 = 1/12960$; partindo de $a_1 = 1$: $a_4 = 1/12$, $a_7 = 1/504$, $a_{10} = 1/45360$, e as duas soluções LI são:

$$y_1(x) = 1 + \frac{x^3}{6} + \frac{x^6}{180} + \frac{x^9}{12960} + \dots,$$
$$y_2(x) = x + \frac{x^4}{12} + \frac{x^7}{504} + \frac{x^{10}}{45360} + \dots \blacksquare$$

Continue a solução no verso \implies

Declaro que segui o código de ética do Curso de Engenharia Ambiental ao realizar esta prova

NOME: GABARITO

Assinatura: _____

AO REALIZAR ESTA PROVA, VOCÊ DEVE JUSTIFICAR TODAS AS PASSAGENS. EVITE “PULAR” PARTES IMPORTANTES DO DESENVOLVIMENTO DE CADA QUESTÃO. JUSTIFIQUE CADA PASSO IMPORTANTE. SIMPLIFIQUE AO MÁXIMO SUAS RESPOSTAS.

ATENÇÃO PARA A NOTAÇÃO VETORIAL E TENSORIAL! VETORES MANUSCRITOS DEVEM SER ESCRITOS COMO \underline{v} ; TENSORES DE ORDEM 2 COMO $\underline{\underline{A}}$.

1 [25] A expressão

$$\mathcal{T}_m = \oint_{\mathcal{S}} \epsilon_{lim} r_l n_k T_{ki} dA = \oint_{\mathcal{S}} (\underline{n} \cdot \underline{v}) dA,$$

onde \mathcal{S} é uma superfície fechada que limita uma região \mathcal{C} do \mathbb{R}^3 , e $\underline{n} = n_k \underline{e}_k$ é o vetor unitário normal a \mathcal{S} apontando para fora em cada ponto, é um escalar.

- [15] Identifique o vetor \underline{v} . Escreva-o da forma mais simples que você conseguir.
- [10] Agora aplique o teorema da divergência à expressão acima. Não é necessário calcular a divergência que vai aparecer.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

a)

$$\underline{v} = \epsilon_{lim} r_l T_{ki} \underline{e}_k.$$

b)

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_m &= \oint_{\mathcal{S}} \epsilon_{lim} r_l n_k T_{ki} dA \\ &= \int_{\mathcal{C}} \frac{\partial}{\partial x_k} (\epsilon_{lim} r_l T_{ki}) dV \blacksquare \end{aligned}$$

2 [25] Obtenha a solução geral de

$$\frac{dy}{dx} + \frac{y}{x} = 3x.$$

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

$$\begin{aligned}y &= uv; \\ \frac{d(uv)}{dx} + \frac{uv}{x} &= 3x; \\ u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx} + \frac{uv}{x} &= 3x; \\ u \underbrace{\left[\frac{dv}{dx} + \frac{v}{x} \right]}_{=0} + v \frac{du}{dx} &= 3x. \\ \frac{dv}{dx} + \frac{v}{x} &= 0; \\ \frac{dv}{dx} &= -\frac{v}{x}; \\ \frac{dv}{v} &= -\frac{dx}{x}; \\ \frac{dv}{v} + \frac{dx}{x} &= 0; \\ \ln |v| + \ln |x| &= c_1; \\ \ln |vx| &= e^{c_1}; \\ vx &= \pm e^{c_1} = v_0; \\ v &= \frac{v_0}{x}. \\ \frac{v_0}{x} \frac{du}{dx} &= 3x; \\ \frac{du}{dx} &= \frac{3}{v_0} x^2; \\ u(x) &= \frac{x^3}{v_0} + u_0; \\ y(x) &= \left[\frac{x^3}{v_0} + u_0 \right] \frac{v_0}{x}; \\ y(x) &= x^2 + \frac{C}{x} \blacksquare\end{aligned}$$

Continue a solução no verso \implies

3 [25] Usando obrigatoriamente variáveis complexas, integração de contorno e o teorema dos resíduos, calcule

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{2 - \operatorname{sen} \theta}.$$

Sugestão: faça a transformação de variável $z = e^{i\theta}$ e transforme a integral acima em uma integral sobre o círculo unitário no plano complexo envolvendo um polo.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

Fazendo a substituição sugerida, se $z = e^{i\theta}$, quando θ vai de 0 a 2π , z percorre o círculo unitário C no plano complexo; então:

$$\begin{aligned}z &= e^{i\theta}, \\dz &= ie^{i\theta}, \\ \frac{dz}{iz} &= d\theta\end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned}z - \frac{1}{z} &= e^{i\theta} - e^{-i\theta} \\ &= 2i \operatorname{sen} \theta \Rightarrow \\ \operatorname{sen} \theta &= \frac{z^2 - 1}{2iz}.\end{aligned}$$

Retornando à integral,

$$\begin{aligned}\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{2 - \operatorname{sen} \theta} &= \oint_C \frac{1}{2 - \frac{z^2 - 1}{2iz}} \frac{dz}{iz} \\ &= \oint_C \frac{-2dz}{z^2 - 4iz - 1}\end{aligned}$$

O integrando possui dois polos, $z_1 = (2 - \sqrt{3})i$ e $z_2 = (2 + \sqrt{3})i$, mas apenas z_1 está dentro do círculo unitário. Portanto,

$$\begin{aligned}\oint_C f(z) dz &= 2\pi i c_{-1} \\ &= 2\pi i \lim_{z \rightarrow z_1} \left[(z - z_1) \frac{-2}{(z - z_1)(z - z_2)} \right] \\ &= 2\pi i \frac{-2}{z - z_2} = \frac{2\pi}{\sqrt{3}}. \blacksquare\end{aligned}$$

4 [25] Obtenha as duas soluções LI de

$$y'' - x^3y = 0$$

em torno de $x = 0$ na forma $y_{1,2}(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$. **Para cada uma das duas soluções encontre obrigatoriamente os 4 primeiros termos.** Note que $x = 0$ é um ponto regular, e que não se trata de aplicar o método de Frobenius.

SOLUÇÃO DA QUESTÃO:

Compare com

$$y'' + p(x)y' + q(x)y = 0 :$$

Em $x = 0$, $xp(x) = 0$, é uma função analítica, e $x^2q(x) = x^5$ também. O ponto $x = 0$ é um ponto *regular*. Não se trata, portanto, de aplicar o método de Frobenius, mas sim de procurar uma solução em série simples,

$$y = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n,$$

$$y' = \sum_{n=0}^{\infty} n a_n x^{n-1},$$

$$y'' = \sum_{n=0}^{\infty} (n-1) n a_n x^{n-2}.$$

Substituindo,

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n-1) n a_n x^{n-2} - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+3} = 0.$$

Tente

$$m-2 = n+3 \Rightarrow m = n+5; n=0 \Rightarrow m=5 :$$

$$\sum_{m=0}^{\infty} (m-1) m a_m x^{m-2} - \sum_{m=5}^{\infty} a_{m-5} x^{m-2} = 0,$$

$$\sum_{m=2}^{\infty} (m-1) m a_m x^{m-2} - \sum_{m=5}^{\infty} a_{m-5} x^{m-2} = 0,$$

$$2a_2 = 0 \Rightarrow a_2 = 0,$$

$$6a_3x = 0 \Rightarrow a_3 = 0,$$

$$12a_4x^2 = 0 \Rightarrow a_4 = 0,$$

$$\sum_{m=5}^{\infty} [(m-1)ma_m - a_{m-5}] x^{m-2} = 0.$$

Claramente, as constantes arbitrárias da solução geral são a_0 e a_1 . A relação de recorrência é

$$a_m = \frac{a_{m-5}}{(m-1)m} :$$

$$a_5 = \frac{a_0}{20},$$

$$a_{10} = \frac{a_0}{1800},$$

$$a_{15} = \frac{a_0}{378000},$$

$$a_{20} = \frac{a_0}{14364000},$$

...

$$a_6 = \frac{a_1}{30}$$

$$a_{11} = \frac{a_1}{3300}$$

$$a_{16} = \frac{a_1}{792000}$$

$$a_{21} = \frac{a_1}{332640000}$$

A solução geral é

$$y(x) = a_0 [1 + x^5/20 + x^{10}/1800 + x^{15}/378000 + x^{20}/14364000 + \dots] \\ + a_1 [x + x^6/30 + x^{11}/3300 + x^{16}/792000 + x^{21}/332640000 + \dots] \blacksquare$$