

---

# Equações Elípticas

## Trabalho 1

SME0202 Métodos Numéricos em Equações Diferenciais

Cody Stefano Barham Setti – 4856322

Ian de Holanda Cavalcanti Bezerra – 13835412

25 de Abril de 2025

---

## 0 PVC de Interesse

Para o domínio retangular  $\Omega = [0, 1] \times [-1, 1]$ , queremos resolver a seguinte equação de convecção-difusão anisotrópica em regime estacionário:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 3 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = c \frac{\partial u}{\partial y}.$$

com condição de Dirichlet  $u(0, y) = u(1, y) = 0$  em seus bordos verticais, de Robin no bordo superior e de Neumann no inferior, conforme a figura abaixo.

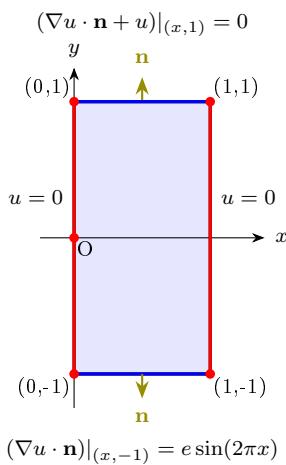


Figura 1: Domínio  $\Omega = [0, 1] \times [-1, 1]$  com suas condições de contorno

Para  $c = 4\pi^2 - 3$ , tal problema de valor de contorno (PVC) possui solução analítica

$$u(x, y) = e^{-y} \sin(2\pi x).$$

Entretanto, elaboraremos um esquema para solucioná-la numericamente.

## 1 Solução Numérica e Seu Gráfico

### 1.1 Discretização do Domínio (Geração da Malha)

Primeiramente, para discretizar o domínio, utilizaremos uma malha uniforme, com espaçamento  $h$  em ambas as direções. Logo, o eixo-x do domínio torna-se o conjunto discreto  $\{0, h, 2h, \dots, 1-h, 1\}$ ,

de  $N_x = \frac{1}{h} + 1$  pontos, e o eixo-y torna-se o conjunto discreto  $\{-1, -1+h, -1+2h, \dots, 1-h, 1\}$ , de  $N_y = \frac{1-(-1)}{h} + 1 = \frac{2}{h} + 1$  pontos. Portanto, no total, o domínio será composto de  $N_x \times N_y$  pontos.

Todavia, vale salientar que, como as laterais do domínio são de Dirichlet, por mais que a malha terá  $N_x \times N_y$  pontos, teremos apenas  $N := (N_x - 2) \times N_y$  incógnitas.

## 1.2 Discretização do PVC (Construção do Sistema Linear)

Agora que esta clara a disposição dos pontos da malha (e quais deles são incógnitas), está claro que transformaremos nosso PVC em um sistema linear de dimensões

$$A_{N \times N} U_{N \times 1} = F_{N \times 1},$$

lembrando que  $N := (N_x - 2) \times N_y$ .

### 1.2.1 Pontos Interiores

Primeiramente, para os pontos interiores de nosso domínio, a partir de um estêncil de 5 pontos em formato de cruz, temos uma discretização conveniente para a EDP, que nos produz, para cada ponto interior, uma respectiva equação linear.

Mais precisamente, já que queremos uma precisão de ordem 2, aproximaremos as derivadas segundas por uma diferença centrada de 3 pontos, ao passo que, para a derivada primeira, basta uma diferença centrada de 2. Logo, teremos as equações lineares:

$$\frac{U_{i+1j} - 2U_{ij} + U_{i-1j}}{h^2} + 3 \left( \frac{U_{ij+1} - 2U_{ij} + U_{ij-1}}{h^2} \right) = c \left( \frac{U_{ij+1} - U_{ij-1}}{2h} \right).$$

Logo, isolando as incógnitas do lado esquerdo da equação,

$$\left( \frac{3}{h^2} + \frac{c}{h} \right) U_{ij-1} + \left[ U_{i-1j} - \frac{8}{h^2} U_{ij} + \frac{1}{h^2} U_{i+1j} \right] + \left( \frac{3}{h^2} - \frac{c}{2h} \right) U_{ij+1} = 0.$$

Vale salientar duas coisas aqui:

1. Para os pontos interiores da forma  $(i, 1)$  e  $(i, N_y - 1)$ , haverão índices que passam dos limites de indexação das incógnitas. Entende-se que, para tais pontos, os termos de índices fora de escopo devem ser tomados como sendo nulos, o que corresponde às condições de contorno de Dirichlet  $u(x, -1) = u(x, 1) = 0$ .
2. Ademais, os índices da forma bidimensional  $(i, j)$  são utilizados apenas por conveniência, já que remetem claramente ao formato do domínio. Entretanto, para a montagem do sistema linear, eles são, na realidade, reindexados com um único índice  $k$ , seguindo a ordem natural de ordenação da malha, isto é, dados  $i, j$ , o respectivo  $k$  terá valor  $k = (i - 1)N_y + j$ .

### 1.2.2 Bordo Superior

Os pontos da malha no bordo superior, isto é, da forma  $(i, N_y)$ , também têm valor desconhecido. Determinamo-nos por meio da condição de Robin

$$(\nabla u \cdot \mathbf{n} + u) |_{(x,1)} = 0, \quad \forall x \in [0, 1].$$

Isto é,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + u = 0, \quad \forall x \in [0, 1].$$

Ou, mais simplesmente,

$$\frac{\partial u}{\partial y} + u = 0, \quad \forall x \in [0, 1].$$

Portanto, novamente, para obter convergência de ordem 2, discratizaremos tal ED por uma diferença **progressiva** para  $\frac{\partial u}{\partial y}$  utilizando 3 pontos:

$$\frac{3U_{ij} - 4U_{ij-1} + U_{ij-2}}{2h} + U_{ij} = 0.$$

Reorganizando os índices em ordem crescente,

$$\frac{1}{2h}U_{ij-2} - \frac{4}{2h}U_{ij-1} + \left(\frac{3}{2h} + 1\right)U_{ij} = 0.$$

### 1.2.3 Bordo Inferior

Os pontos da malha no bordo inferior, aqueles da forma  $(i, 1)$ , por fim, também têm valor desconhecido. Determinemo-nos pela condição de Neumann

$$(\nabla u \cdot \mathbf{n})|_{(x,-1)} = e \sin(2\pi x), \quad \forall x \in [0, 1].$$

Isto é,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} = e \sin(2\pi x), \quad \forall x \in [0, 1].$$

Ou, mais simplesmente,

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -e \sin(2\pi x), \quad \forall x \in [0, 1].$$

Portanto, novamente, para obter convergência de ordem 2, discratizaremos tal ED por uma diferença **regressiva** para  $\frac{\partial u}{\partial y}$  utilizando 3 pontos:

$$\frac{3U_{ij} - 4U_{ij-1} + U_{ij-2}}{2h} = -e \sin(2\pi x_{ij}).$$

Reorganizando os índices em ordem crescente,

$$\frac{1}{2h}U_{ij-2} - \frac{4}{2h}U_{ij-1} + \frac{3}{2h}U_{ij} = -e \sin(2\pi x).$$

Vale salientar que apenas para esses pontos as respectivas componentes do termo independente são não nulas, assumindo o valor  $-e \sin(2\pi x_{ij})$ .

## 1.3 Gráfico da Solução Numérica

Com a discretização descrita acima, tomando-se um passo  $h = 0.01$ , chegamos na solução numérica mostrada na figura a seguir:

## 2 Solução Exata e Análise dos Erros na Aproximação

### 2.1 Gráfico da Solução Exata

Avaliando-se os valores exatos da função-solução do PVC nos mesmos pontos do domínio utilizados para construir-se a malha da solução numérica, obtemos a figura a seguir:

### 2.2 Análise dos Erros na Aproximação

Agora, com tanto a solução numérica, quanto a exata em mãos, basta calcularmos a diferença absoluta entre seus valores em cada ponto da malha que sai de imediato o *heat-map* abaixo, identificando as regiões do domínio onde a aproximação é mais e menos fidedigna:

Ademais, fizemos um gráfico do erro (com sinal, não valor absoluto) no mesmo formato tridimensional das soluções numérica e exata, apenas para tornar ainda mais fácil a localização das regiões do domínio onde um erro maior é cometido na aproximação. Vide-o abaixo:

Claramente, a região de maior erro é onde a temperatura da chapa varia mais violentamente. Isso é natural de se esperar, pois

`solucao-numerica.png`

Figura 2: Solução numérica

`solucao-exata.png`

Figura 3: Solução exata



erro-heatmap.png

Figura 4: Erro na aproximação

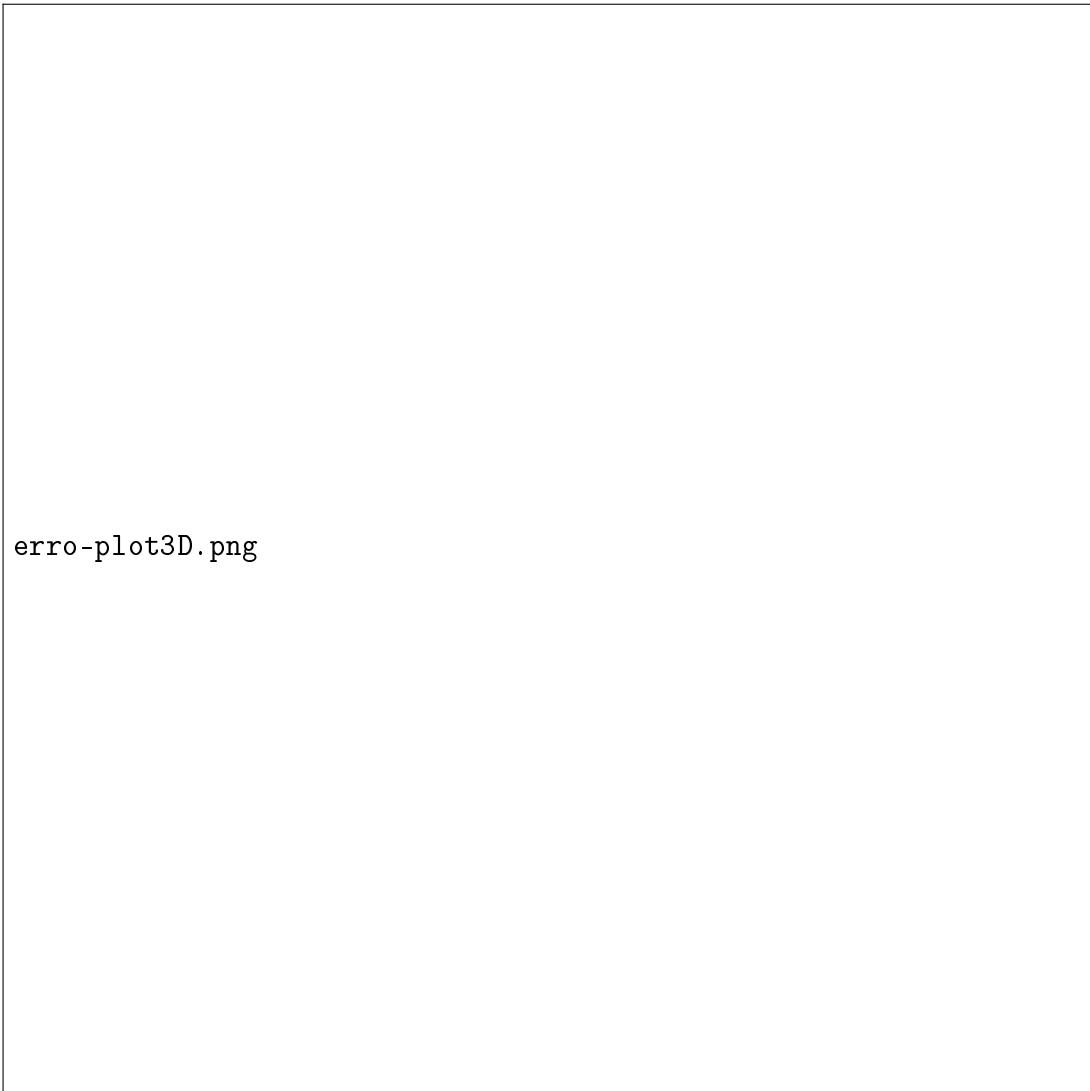


Figura 5: Erro na aproximação

### 3 Análise de Convergência

Por fim, analisemos o erro global cometido para diferentes valores de espaçamento  $h$ , cada vez menores.

No caso, por erro global, ja que temos a solução exata em mãos, entendemo-no como sendo a media aritmetica dos erros em cada ponto da malha (erros locais).

O decaimento do erro global é mostrado no gráfico abaixo: Como esperado, a convergência à



Figura 6: Decaimento do erro global

solução exata é praticamente de ordem 2.