Gestão:

Reunião de Acompanhamento
e Avaliação - RAA 2026

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS EM GEOMETRIAS AXISSIMÉTRICAS USANDO MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA GERAÇÃO DE MALHAS ESTRUTURADAS

Kaynan Gabriel do E. S. Leal[1]; Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca[2]; Prof. Dr. Jerson Rogério Pinheiro Vaz[2]

[1]Bolsista do PRH-ANP 60/UFPA – Mestrado em Engenharia Mecânica, UFPA, Ananindeua – PA. E-mail: kaynan.leal@itec.ufpa.br

[2]Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará (UFPA)

1. MOTIVAÇÃO

A indústria de petróleo e gás demanda ferramentas computacionais eficientes para a análise de escoamentos em dutos cilíndricos, visando segurança operacional, redução de custos e prevenção de falhas.

Em CFD, o processo de geração de malha define a precisão da simulação: há dependência direta entre precisão, densidade da malha e tempo computacional. As abordagens de volumes finitos discretizam os domínios em elementos majoritariamente hexaédricos, com refinamento local ajustado ao tamanho dos elementos.

Em sistemas de dutos, a camada limite — região em que a velocidade cresce de zero até a do escoamento principal por efeito viscoso — exige resolução adequada, o que eleva o custo do problema.

As condições de contorno do tipo wedge (cunha) reduzem drasticamente esse custo ao simplificar problemas fisicamente tridimensionais em domínios numericamente bidimensionais, desde que a geometria apresente simetria axial.

2. OBJETIVOS

Geral: desenvolver uma metodologia para geração de malhas do tipo wedge (cunha) com o utilitário blockMesh do OpenFOAM — que reduzem o custo computacional ao simplificar domínios 3D em 2D — e avaliar a independência de malha na simulação de escoamento laminar em duto cilíndrico pelo método GCI.

Específicos: (i) gerar quatro malhas com diferentes níveis de refinamento; (ii) verificar a qualidade das malhas com o utilitário checkMesh; (iii) simular o escoamento com o solver icoFoam; (iv) quantificar a incerteza de discretização pelo GCI; e (v) definir uma malha-base verificada para simulações futuras.

3. METODOLOGIA: GEOMETRIA E DOMÍNIO

Duto cilíndrico com comprimento axial de 250 mm e raio de 10 mm, escolhido por possuir solução analítica conhecida (Poiseuille).

Para explorar a simetria axial, o domínio foi modelado como um setor circular de 5° (wedge) — 2,5° para cada lado do plano de simetria — obtendo-se y = 9,990482 mm e z = ±0,436194 mm, com as coordenadas calculadas no GNU Octave.

A superfície curva é representada pela aresta de arco (arc) do blockMesh e a direção tangencial é discretizada por uma única célula, como exige a condição wedge.

Condições de contorno: velocidade fixa de 0,1 m/s na entrada; pressão fixa na saída; não deslizamento na parede; wedge nas faces front e back; empty no eixo. Fluido: $\nu = 3{,}2 \times 10^{-5}$ m²/s, $\rho = 1000$ kg/m³, Re = 62,5 (laminar).

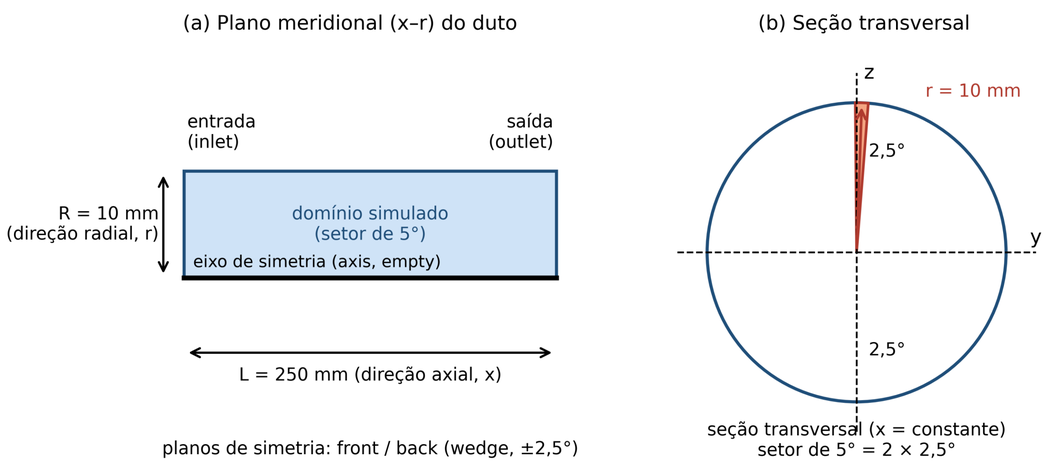


Figura 1 – Domínio computacional (setor de 5°) e condições de fronteira. Fonte: autores.

4. GERAÇÃO E VERIFICAÇÃO DAS MALHAS

Quatro malhas geradas com o blockMesh, com refinamento sistemático e simultâneo nas direções radial e axial e razão de aspecto de célula constante ($\Delta x/\Delta r = 12{,}5$). Razões de refinamento: r = 1,125 (M1→M2), 1,111 (M2→M3) e 1,800 (M3→M4).

Qualidade verificada com o checkMesh: predominância hexaédrica acima de 99,5 %, não-ortogonalidade máxima de 0° e skewness máximo de 0,331 — limites recomendados pela literatura: 65° e 4,0. O volume total do domínio permaneceu constante em $1{,}08945 \times 10^{-6}$ m³ nas quatro malhas, garantindo a consistência geométrica.

Simulações com o icoFoam (OpenFOAM v2312 para M1–M2 e v10 para M3–M4), Δt entre 2×10^{-5} e 5×10^{-5} s, t = 0,2 s, número de Courant máximo abaixo de 0,13.

Tabela 1 – Características das malhas geradas.

Malha	Células	Divisões (rad.×tang.×ax.)	Hexaedros (%)	Razão de aspecto máx.	Skewness máx.	Não-ortog. máx. (°)	Δx (mm)
M1	80.000	200 × 1 × 400	99,50	63,96	0,331	0	0,625
M2	**101.250**	**225 × 1 × 450**	**99,56**	**63,96**	**0,331**	**0**	**0,556**
M3	125.000	250 × 1 × 500	99,60	63,97	0,331	0	0,500
M4	405.000	450 × 1 × 900	99,78	63,99	0,331	0	0,278

5. RESULTADOS

As grandezas de interesse variaram menos de 1,1 % entre as malhas. A queda de pressão cresce monotonicamente de 79,62 Pa (M1) a 80,68 Pa (M4), comportamento coerente com a redução do erro de discretização; a velocidade máxima oscila em faixa estreita, entre 0,176945 e 0,177182 m/s, com variação inferior a 0,11 % entre malhas consecutivas.

A análise GCI confirmou a independência de malha a partir da M2 (101.250 células): GCI = 0,025 % para U_{max} = 0,1770 m/s e GCI = 0,53 % para Δp = 79,8 Pa. Todas as malhas apresentaram mais de 99,5 % de células hexaédricas, não-ortogonalidade de 0° e skewness de 0,331.

A malha M4 (405.000 células), apesar do maior refinamento, não trouxe ganho de precisão: consumiu 19,33 h de CPU contra 4,28 h da M2 (4,5× mais) e apresentou erro de continuidade acumulado cerca de dezesseis vezes maior que o da M3.

Tabela 2 – Grandezas de interesse e parâmetros numéricos por malha.

Malha	Células	Umax (m/s)	Δp (m²/s²)	Δp (Pa)	ε rel. Umax (%)	ε rel. Δp (%)	Tempo de CPU (h)
M1	80.000	0,176945	0,07962	79,62	—	—	2,04
M2	**101.250**	**0,177011**	**0,07978**	**79,78**	**0,037**	**0,20**	**4,28**
M3	125.000	0,177001	0,07992	79,92	0,006	0,18	6,07
M4	405.000	0,177182	0,08068	80,68	0,10	0,94	19,33

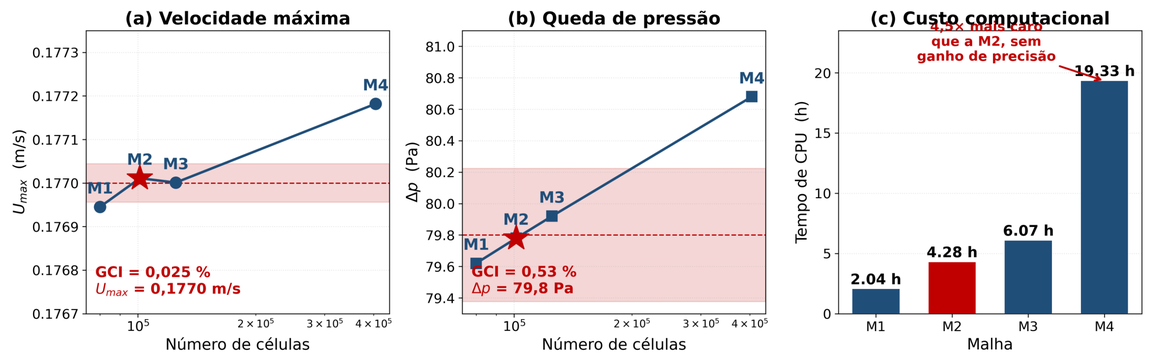


Figura 2 – (a) Velocidade máxima, (b) queda de pressão e (c) custo computacional em função do refinamento. A malha M2 (estrela) é a malha-base recomendada.

6. MÉTODO GCI

O Grid Convergence Index (GCI), baseado na extrapolação de Richardson, quantifica a incerteza numérica associada à convergência de malha:

$$GCI = (F_s \cdot e_{ij}) / (r^p - 1) \times 100$$

Onde F_s é o fator de segurança (3,0 para duas malhas e 1,25 para três ou mais), e_{ij} o erro relativo, r a razão de refinamento e p a ordem aparente de convergência. A ordem aparente obtida da tripla M2–M3–M4 foi p = 3,07 para a velocidade máxima; para a queda de pressão a tripla não define p de forma consistente, adotando-se a ordem teórica do esquema espacial (p = 2) e o par mais fino (M3–M4).

7. CONCLUSÕES

A metodologia de geração de malhas wedge com o blockMesh mostrou-se eficaz para representar geometrias curvas com simetria axial, produzindo malhas estruturadas predominantemente hexaédricas e de qualidade adequada ao escoamento investigado.

A independência de malha é alcançada a partir da M2 (101.250 células), com GCI de 0,025 % para a velocidade máxima e 0,53 % para a queda de pressão.

A M2 oferece o melhor equilíbrio entre precisão numérica e eficiência computacional, sendo recomendada como malha-base verificada.

Perspectivas: aplicar a malha-base a estudos de perda de carga, transferência de calor, campos de velocidade e fração de vazio em dutos da indústria de petróleo e gás.

Referências: AL-BANA et al. (2022); AYAN et al. (2023); GREENSHIELDS, C. J. OpenFOAM User Guide (2025); RETTENMAIER et al. (2019); QIAN et al. (2024); LIU et al. (2026).

Agradecimentos: Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e do Programa de Recursos Humanos da ANP – PRH-ANP nº 60/UFPA.