

Modelagem fluidodinâmica do processo de pirólise de resíduos de cana de açúcar

Palavras-chave: *computational fluid dynamics (CFD)* , escoamento multifásico, pirólise rápida, transição energética, processos termoquímicos

Autores:

Caio Brait, FEM – UNICAMP

Prof^ª. Dr^ª. Ingrid Lopes Motta (orientadora), FEM - UNICAMP

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas configuram-se como um dos maiores desafios da atualidade, impulsionadas principalmente pelas emissões descontroladas de gases de efeito estufa (GEE) oriundos de atividades humanas. O setor energético destaca-se nesse cenário como o principal responsável pelas emissões de GEE (EI, 2024) e, diante disso, a biomassa surge como uma das alternativas mais promissoras devido à sua natureza renovável e à capacidade de sequestrar carbono atmosférico durante o crescimento vegetal (IEA, 2024), sendo a cana-de-açúcar uma das culturas disponíveis.

O processamento industrial da cana-de-açúcar gera grandes volumes de resíduos lignocelulósicos, resultando em mais de 534 milhões de toneladas de resíduos ao ano (EMBRAPA, 2022). Para superar esse cenário, os processos termoquímicos têm ganhado destaque como rotas tecnológicas capazes de converter resíduos carbonáceos em produtos com maior valor agregado (CHANG et al., 2025), sendo o processo de pirólise especialmente atrativo por operar em temperaturas moderadas (400–600 °C) e tempos de residência curtos (0,5 a 2 s), possibilitando a produção simultânea de bio-óleo, biochar e gases combustíveis (MIRANDA et al., 2021).

O desempenho da pirólise depende fortemente das características físico-químicas da biomassa, bem como das variáveis operacionais envolvidas, como temperatura, granulometria e taxa de aquecimento (MIRANDA et al., 2021). Nesse sentido, a modelagem baseada em Computational Fluid Dynamics (CFD) oferece uma alternativa mais robusta para descrever os fenômenos físicos e químicos com resolução espacial e temporal adequada (DADI et al., 2023), permitindo simular o escoamento do fluido, a transferência de calor e a cinética das reações de forma acoplada, além de analisar os efeitos locais de diferentes condições operacionais sobre o desempenho do reator (NAIDU et al., 2025). Apesar do seu potencial, ainda são poucos os estudos aplicando CFD à pirólise de resíduos de cana-de-açúcar, o que evidencia uma importante lacuna na literatura atual (DADI et al., 2023; NAIDU et al., 2025).

Dessa forma, este trabalho busca contribuir para esse campo por meio do desenvolvimento e validação de um modelo CFD bidimensional, visando simular a pirólise rápida de resíduos da cana-de-açúcar com maior fidelidade física. A proposta se alinha à necessidade de promover a valorização energética de resíduos agroindustriais abundantes no Brasil, contribuindo para a bioeconomia nacional e a transição energética sustentável (IEA, 2024).

METODOLOGIA

As simulações computacionais foram realizadas no software ANSYS Fluent e a implementação da modelagem do processo de pirólise de resíduos de cana-de-açúcar foi desenvolvida por meio de uma abordagem sequencial, fundamentada na construção de um modelo representativo e numericamente robusto lastreada pela literatura:

- I. **Definição da geometria computacional:** adoção de reator tubular de seção circular, com comprimento de 0,57 m e diâmetro interno de 0,052 m, em conformidade com o experimento de referência proposto por (PiENIHÄKKINEN et al., 2022).
- II. **Geração da malha geométrica no ANSYS Meshing:** foi adotada uma configuração estruturada com elementos quadriláteros, com refinamento especial nas regiões próximas às paredes, definido a partir do cálculo do número adimensional y^+ , de modo a garantir a adequada resolução da camada-limite térmica e fluidodinâmica. A verificação da qualidade da malha foi realizada por meio de métricas como *skewness* e *aspect ratio*, além da condução de testes de independência de malha (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).
- III. **Implementação de modelo monofásico:** essa etapa consistiu no estudo inicial do *software* e na validação da malha adotada, realizada por meio da comparação dos perfis de velocidade do escoamento de nitrogênio com a solução analítica de Poiseuille para escoamento laminar (WHITE, 2008) e com as curvas teóricas da camada-limite turbulenta para escoamento turbulento (POPE, 2015). Vale ressaltar que, nesta etapa inicial, as condições de contorno nas paredes do reator foram configuradas com condição de não deslizamento (*no-slip*) e condição térmica adiabática. A saída foi definida como condição de escoamento livre (*outflow*), enquanto a entrada foi testada com dois perfis de velocidade uniformes: 0,05 m/s para o regime laminar e 10 m/s para o regime turbulento, resultando em números de Reynolds de aproximadamente 178 e 35.491, respectivamente. Quando aplicável, utilizou-se o modelo de turbulência $k - \omega SST$, devido à sua boa acurácia tanto para escoamentos viscosos quanto para escoamentos de corrente livre, além do baixo custo computacional, por se tratar de um modelo simples de duas equações (POPE, 2015).
- IV. **Implementação de modelo multifásico:** concluída a etapa anterior e mantendo as mesmas condições de contorno apenas para as paredes e para a saída, iniciou-se o desenvolvimento do modelo multifásico utilizando a abordagem Euler–Euler. A fase gasosa foi representada por nitrogênio, enquanto a fase sólida consistiu em biomassa particulada. Os efeitos de colisão e movimento das partículas foram modelados com base na teoria cinética apresentada em Andreotti, Forterre e Pouliquen (2013), incluindo contribuições colisional, cinética e friccional para a viscosidade granular. A validação do modelo multifásico foi conduzida por meio da verificação da conservação de massa de ambas as fases e pela comparação dos perfis de fração volumétrica de partículas ao longo do eixo do reator com dados disponíveis na literatura para escoamentos em leitos fluidizados de características semelhantes. Consideraram-se aceitáveis desvios inferiores a 5 % na conservação de massa e estabilidade temporal nos perfis.
- V. **Implementação de modelo para transferência de calor:** a implementação dos fenômenos térmicos, considerando condições de contorno com temperatura constante nas paredes, foi baseada na analogia entre as camadas-limite térmica e fluidodinâmica. Para isso, utilizou-se o número de Prandtl, cujo valor para o escoamento de nitrogênio é aproximadamente 0,7 (INCROPERA et al., 2014).

É importante mencionar que, com relação aos parâmetros de simulação, foi utilizado o solver pressure-based, operando em regime pseudo-transiente com a formulação Second Order Implicit. O acoplamento entre pressão e velocidade foi realizado por meio do método Phase Coupled SIMPLE. A discretização espacial adotou o esquema Least Squares Cell Based para o gradiente, Second Order para a pressão, Second Order Upwind para o momentum, a energia cinética turbulenta

e a taxa específica de dissipação, além de First Order Upwind para a fração volumétrica. Cabe destacar ainda que, em razão da complexidade do estudo, optou-se por concentrar os esforços na implementação adequada até a parte térmica nesta etapa. As abordagens relativas à modelagem de massa e cinética serão implementadas na sequência do trabalho, durante o TCC.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Até o momento, os resultados obtidos referem-se aos perfis de velocidade simulados na etapa de validação do escoamento monofásico, os quais foram comparados com os perfis teóricos esperados. Na Figura 1a, apresenta-se a comparação entre o perfil de velocidade obtido por CFD para o escoamento laminar e a solução teórica de Poiseuille, conforme descrita por White (2008), evidenciando boa concordância. Já na Figura 1b, é apresentado o campo de velocidades do escoamento simulado.

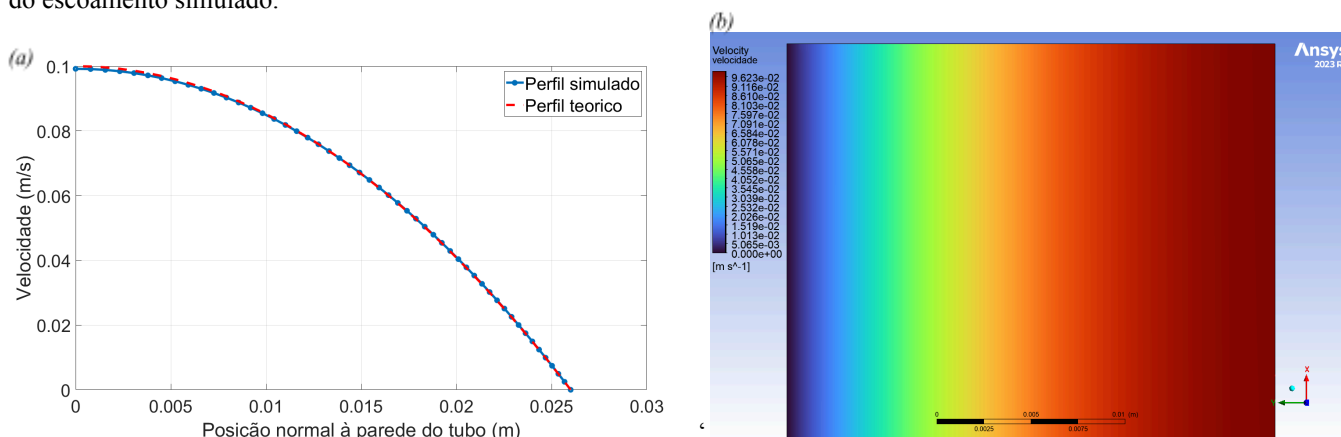


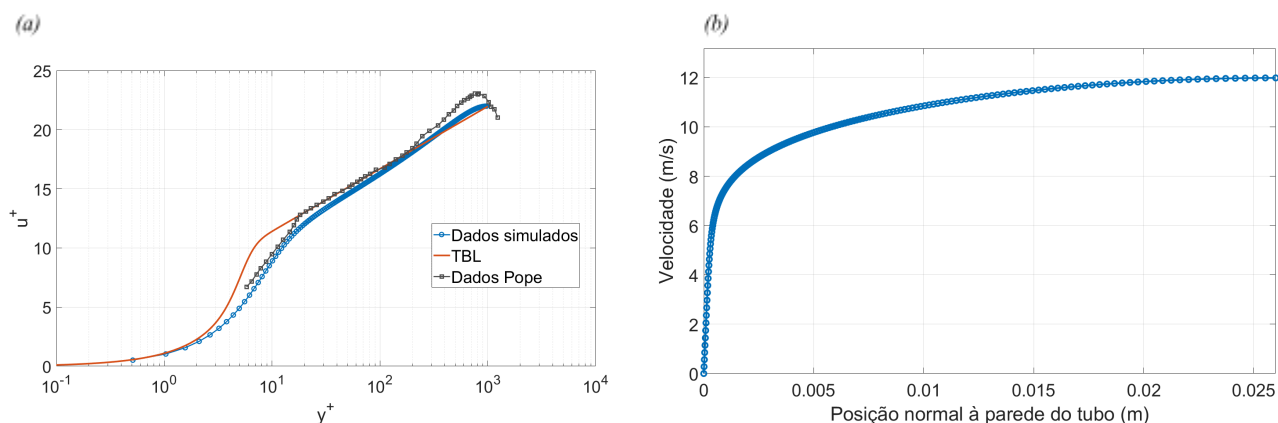
Figura 1– Resultados para escoamento laminar: comparação com a solução teórica e campo de velocidade simulado.

(a) Comparação do perfil de velocidade laminar simulado com o perfil de Poiseuille;

(b) Campo de magnitude da velocidade para escoamento laminar

Fonte: autoral

Já a Figura 2a exibe a comparação do escoamento turbulento com a Turbulent Boundary Layer curve (TBL curve), apresentada em Pope (2015), evidenciando boa concordância entre os resultados simulados e o perfil adimensional teórico. A Figura 2b apresenta o perfil de velocidade simulado, enquanto a Figura 2c mostra o campo de velocidades correspondente. Na sequência, simulou-se com sucesso um leito fluidizado borbulhante, conforme ilustrado na Figura 3, que apresenta o campo de frações volumétricas do escoamento. Observa-se, no campo simulado, uma boa concordância visual com os perfis característicos desse tipo de escoamento.



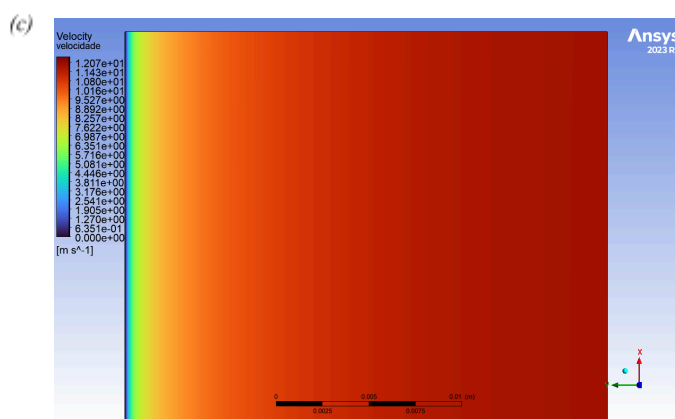


Figura 2– Resultados para escoamento turbulento: comparação com o perfil de camada limite e campo de velocidade simulado.
(a) Comparação do perfil de velocidade turbulento adimensional simulado com a TBL curve; (b) Perfil de velocidade turbulento
(c) Campo de magnitude da velocidade para escoamento turbulento
Fonte: autoral

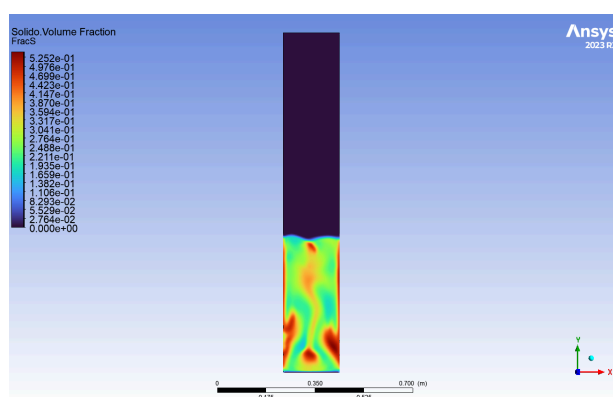


Figura 3– Resultados para escoamento turbulento: comparação com o perfil de camada limite e campo de velocidade simulado.
Fonte: autoral

No entanto, ao simular regimes com maiores velocidades de fluidização, Figura 2 observou-se a ocorrência de problemas de não convergência na equação da continuidade. Acredita-se, no momento, que essa instabilidade esteja relacionada aos modelos de acoplamento multifásico empregados, embora a causa exata ainda esteja em investigação.

CONCLUSÕES

A execução deste trabalho envolveu desafios significativos, desde o domínio conceitual da teoria granular até a curva de aprendizado do software ANSYS Fluent, mas, com eles, veio também um grande aprendizado. Ainda assim, foram obtidas contribuições concretas e relevantes: validou-se com sucesso um modelo CFD para escoamentos monofásicos, cujos perfis de velocidade, em regime laminar, apresentaram desvio inferior a 2% em relação à solução analítica de Poiseuille e boa concordância com o perfil teórico da camada-limite turbulenta (TBL curve). Também foi desenvolvido e validado um modelo multifásico Euler–Euler para leitos fluidizados borbulhantes, com conservação de massa satisfatória (desvio < 5%) e distribuição de partículas coerente com dados experimentais da literatura.

Essa base metodológica estabelece fundamentos fluidodinâmicos sólidos para as próximas etapas do estudo. Destaca-se que, até o final da vigência desta iniciação científica, pretende-se concluir a modelagem multifásica, incorporando adequadamente os efeitos térmicos e, se possível, iniciar a implementação das reações de pirólise para simulações termoquímicas acopladas. Por fim, ressalta-se que, no Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), a presente pesquisa será continuada com o desenvolvimento da modelagem cinética das reações e com melhorias na metodologia já desenvolvida, buscando uma representação integrada e realista do escoamento multifásico reacional.

BIBLIOGRAFIA

ANDREOTTI, B.; FORTERRE, Y.; POULIQUEN, O. **Granular Media: Between Fluid and Solid**. 1. ed. Cambridge University Press, 2013. ISBN 9781107034792 9781139541008. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781139541008/type/book>>.

BRENNEN, C. E. **Fundamentals of Multiphase Flow**. 1. ed. Cambridge University Press, 2005. ISBN 9780521848046 9780521139984 9780511807169. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9780511807169/type/book>>.

CHANG, J.-H. et al. **A comprehensive review of biomass utilization for sustainable biofuel and biocomponent development**. Biomass and Bioenergy, v. 202, artigo 108167, jul. 2025. ISSN 0961-9534. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108167>>.

DADI, V. S.; VELURU, S.; TANNERU, H. K.; BUSIGARI, R. R.; POTNURI, R.; KULKARNI, A.; MISHRA, G.; BASAK, T. Recent advancements of CFD and heat transfer studies in pyrolysis: A review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 175, p. 106163, out. 2023. ISSN 01652370. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237023003078>>.

EL. **Statistical Review of World Energy 2024**. London, 2024. Disponível em: <<https://www.energyinst.org/statistical-review>>.

EMBRAPA. **Cana**. 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar/outros-produtos>>

IEA. **World Energy Outlook 2024**. [S.l.], 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>>.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

LUN, C. K. K.; SAVAGE, S. B.; JEFFREY, D. J.; CHEPURNIY, N. Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flowfield. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 140, p. 223–256, mar. 1984. ISSN 0022-1120, 1469-7645. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0022112084000586/type/journal_article>.

MIRANDA, N. T.; MOTTA, I. L.; FILHO, R. M.; MACIEL, M. R. W. Sugarcane bagasse pyrolysis: A review of operating conditions and products properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, p. 111394, out. 2021. ISSN 13640321. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032121006791>>.

NAIDU, S.; PANDEY, H.; PASSALACQUA, A.; HAMEED, S.; JOSHI, J.; SHARMA, A. Advancements in modeling and simulation of biomass pyrolysis: A comprehensive review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 188, p. 107030, jun. 2025. ISSN 01652370. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016523702500083X>>.

PIENIHÄKKINEN, E.; LEIJENHORST, E. J.; WOLTERS, W.; LINDFORS, C.; LAHTINEN, J.; OHRA-AHO, T.; OASMAA, A. Valorization of Eucalyptus, Giant Reed Arundo, Fiber Sorghum, and Sugarcane Bagasse via Fast Pyrolysis and Subsequent Bio-Oil Gasification. **Energy & Fuels**, v. 36, n. 19, p. 12021–12030, out. 2022. ISSN 0887-0624, 1520-5029. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.2c01968>>.

POPE, S. B. **Turbulent flows**. 1. publ., 12. print. ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2015. ISBN 9780521598866 9780521591256.

RANZI, E.; DEBIAGI, P. E. A.; FRASSOLDATI, A. Mathematical Modeling of Fast Biomass Pyrolysis and Bio-Oil Formation. Note I: Kinetic Mechanism of Biomass Pyrolysis. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 5, n. 4, p. 2867–2881, abr. 2017. ISSN 2168-0485, 2168-0485. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.6b03096>>.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2. ed., [nachdr.]. ed. Harlow: Pearson/Prentice Hall, 2007. ISBN 9780131274983.

WHITE, F. M. **Fluid mechanics**. 6. ed., 3. print. ed. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2008. (McGraw-Hill series in mechanical engineering). ISBN 9780072938449 9780071286466 9780072938463.