



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2025) v. 12, n. 3, p. 249–256
<https://doi.org/10.21712/lajer.2025.v12.n3.p249-256>

1º Encontro Interdisciplinar em Energia, Programa de Pós-graduação em Energia, Ufes



Simulação CFD do grau de mistura gás-sólido em leito de jorro aplicados à conversão de resíduos poliolefínicos

CFD Simulation of gas-solid mixing in a spouted bed applied to the conversion of polyolefin waste

Inácio Pessanha Layber Ramos¹, Renata Falqueto Louvem², Renato do Nascimento Siqueira³, Daniel da Cunha Ribeiro⁴, Marcelo Silveira Bacelos^{4,*}

¹ Aluno da Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

² Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

³ Coordenadoria de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Instituto Federal do Espírito Santo (IFES)

⁴ Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: marcelo.bacelos@ufes.br

Resumo: A pirólise em reatores de leito de jorro pode recuperar alumínio e produzir combustível a partir de resíduos de embalagens cartonadas. Entretanto, reatores com misturas de partículas de compósito de polietileno/alumínio (PEBD/Al) e areia com diferentes tamanhos e massa específica podem levar a regimes de jorro instáveis devido à segregação de partículas. Dessa forma, este estudo visa simular o escoamento gás-sólido em leitos com misturas de areia e PEBD/Al usando o modelo 2D Euler-Euler Granular, com o objetivo de identificar condições operacionais estáveis e com baixa segregação de partículas. Os resultados revelam que a previsão do índice de mistura (Im) do leito em regime de jorro está de acordo com os dados experimentais. A previsão do efeito das condições operacionais e propriedades das misturas sobre o grau de mistura do leito contribuem para a partida de reatores de pirólise, para a produção de combustíveis derivados de resíduos e para a recuperação de alumínio.

Palavras-chave: combustível; leito de jorro; fluidodinâmica computacional; mistura binária; pirólise.

Abstract: Pyrolysis in spouted bed reactors can recover aluminum and produce waste-derived fuel from carton packages. However, reactors with polyethylene/aluminum composite (LDPE/Al) and sand mixing (of different sizes and specific densities) can lead to unstable spouting regimes. Therefore, this research aims to simulate the gas-solid flow in beds with mixtures of sand and LDPE/Al using a 2D Euler-Euler Granular model. This allows for the identification of stable operational conditions with low particle segregation. Results show that the mixing index predictions agree with experimental data. Predicting the effect of operating conditions and mixture properties on the degree of bed mixing aids in the start-up of pyrolysis reactors for producing waste-derived fuels and aluminum recovery.

Keywords: waste-derived fuel; spouted bed; computational fluid dynamics; binary mixture; pyrolysis.

1 Introdução

O leito de jorro com mistura de partículas tem alcançado qualidade de equipamento intensificado e pode ser aplicado na conversão térmica de resíduos em combustíveis e energia. Devido ao movimento cíclico das partículas no regime de jorro, este sistema de contato gás-sólido pode promover tanto a mistura de

partículas quanto auxiliar no rápido aquecimento dos resíduos (Epstein e Grace, 2010). Essa característica torna o leito de jorro particularmente promissor em processos de conversão termoquímica, como a pirólise, nos quais a transferência de calor eficiente é essencial para garantir a degradação uniforme do material de alimentação.

A pirólise de resíduos sólidos tem se consolidado como uma rota sustentável para valorização de materiais poliméricos e compósitos de embalagens multicamadas. Entre esses resíduos, destaca-se o compósito de polietileno e alumínio (PEBD/Al), subproduto do processamento e da reciclagem de embalagens cartonadas tipo Tetra Pak. Esse material é composto por camadas poliméricas e metálicas, cuja separação física é inviável por métodos convencionais. A pirólise, nesse contexto, surge como alternativa de dupla finalidade: produzir combustíveis líquidos e gasosos a partir da fração polimérica e recuperar o alumínio metálico presente no compósito (Mantegazini et al., 2021).

A operação estável de reatores de leito de jorro, entretanto, depende de parâmetros hidrodinâmicos e das propriedades físicas das partículas que compõem o leito. Quando misturas de partículas com diferentes diâmetros e densidades são utilizadas — como é o caso da areia e do resíduo PEBD/Al — ocorre frequentemente a segregação de partículas, que compromete o regime de jorro e, consequentemente, a eficiência do processo térmico (Makibar et al., 2011; Bacelos e Freire, 2006). A segregação pode gerar zonas de estagnação, redução da taxa de transferência de calor e instabilidades hidrodinâmicas que dificultam o controle da temperatura e da fluidização durante a pirólise. Assim, a manutenção de um grau de mistura adequado entre as partículas é uma condição indispensável para o sucesso da operação e para a recuperação eficiente do alumínio.

Diversos estudos experimentais e numéricos têm investigado os fenômenos de segregação e mistura em leitos de jorro. San José et al. (1994) e Rovero e Piccinini (2011) observaram que o padrão de circulação das partículas no leito é fortemente afetado pela velocidade do gás de jorro, pela geometria da coluna e pela distribuição granulométrica. Bacelos e Freire (2006) demonstraram que ajustes sutis na velocidade de jorro podem alterar significativamente a estabilidade do regime, favorecendo a homogeneidade do leito. Mais recentemente, Almeida, De Lira e Silvério (2024) mostraram que a razão entre os diâmetros das partículas da mistura exerce influência direta sobre o índice de mistura e a taxa de segregação. Esses avanços experimentais, contudo, ainda demandam suporte de modelos numéricos robustos que permitam compreender em detalhe os mecanismos de interação gás-sólido em condições operacionais complexas.

Nesse contexto, a modelagem computacional baseada em fluidodinâmica computacional (CFD) tem se mostrado uma ferramenta poderosa para a análise do comportamento de leitos de jorro. Entre os modelos disponíveis, o modelo Euler-Euler Granular destaca-se por tratar ambas as fases — gás e sólido — como contínuas e interpenetrantes, possibilitando a descrição detalhada da distribuição de velocidades, frações volumétricas e campos de pressão (Melo et al., 2016). Essa abordagem é particularmente útil para simular sistemas multifásicos em que o número de partículas é elevado, tornando inviável o uso de modelos lagrangeanos, como o Euleriano-Lagrangeano. Além disso, o modelo granular incorpora o tratamento das colisões entre partículas, permitindo estimar parâmetros macroscópicos relevantes, como o índice de mistura (Im) e o tempo de residência das partículas no leito.

A literatura recente apresenta esforços crescentes no uso do modelo Euler-Euler para investigar o comportamento de leitos de jorro em escala laboratorial e industrial. A precisão deste modelo na previsão de regimes fluidodinâmicos depende fortemente da calibração de parâmetros constitutivos, como o coeficiente de restituição e a viscosidade granular. Trabalhos como o de Melo et al. (2016) indicam que o modelo é capaz de prever adequadamente as regiões de jorro, anel e zona de fonte, fornecendo informações úteis para o dimensionamento e a otimização de reatores. Dessa forma, a integração entre modelagem CFD e validação experimental tem se mostrado fundamental para o avanço do conhecimento sobre sistemas gás-sólido e para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes de conversão térmica de resíduos.

Apesar desses avanços, a predição do grau de mistura em leitos de jorro com misturas binárias de partículas de densidades e tamanhos distintos ainda representa um desafio. O comportamento dinâmico do leito é altamente sensível às condições operacionais, como a velocidade do gás, a razão de diâmetros entre as partículas e o formato geométrico do reator. Pequenas variações nesses parâmetros podem resultar em segregação acentuada ou até mesmo na perda completa do regime de jorro. Ademais, estudos específicos envolvendo o compósito PEBD/Al ainda são escassos, apesar de seu grande potencial tecnológico e ambiental. A ausência de dados consolidados sobre o comportamento fluidodinâmico dessas misturas dificulta o dimensionamento e a operação de reatores de pirólise destinados à valorização de embalagens cartonadas pós-consumo.

Assim, torna-se evidente a necessidade de investigações numéricas que explorem o impacto das condições operacionais sobre o grau de mistura e a estabilidade do jorro em leitos compostos por areia e

compósito PEBD/Al. A utilização de modelos CFD validados experimentalmente permite compreender de forma detalhada os mecanismos responsáveis pela segregação e propor estratégias para mitigá-la, contribuindo diretamente para o aumento da eficiência energética e da confiabilidade dos processos de pirólise.

A recuperação do alumínio e a produção de combustíveis por meio da pirólise térmica ainda apresentam desafios associados ao grau de mistura das partículas e à estabilidade do jorro. Por esta razão, previsões do índice de mistura suportadas por dados experimentais são essenciais para despertar o interesse industrial e permitir o aumento de escala do processo.

Dessa maneira, este trabalho tem como foco analisar o impacto da velocidade do gás e da razão de diâmetros entre as partículas sobre o índice de mistura previsto pelo modelo Euler-Euler Granular, avaliando suas implicações na partida de plantas de pirólise desses resíduos. Os resultados obtidos podem indicar condições operacionais estáveis e com baixos índices de segregação, oferecendo subsídios relevantes para o projeto e a otimização de reatores de leito de jorro aplicados à conversão termoquímica de resíduos poliolefinicos e à recuperação de alumínio metálico.

2 Metodologia

2.1 Formulação matemática

A modelagem CFD de um leito de jorro envolve a discretização do domínio do problema em uma malha computacional, a definição das equações que governam o escoamento e a aplicação de modelos que descrevem o comportamento das partículas e interações com o fluido. Logo, a seleção do modelo adequado é um fator de suma importância na determinação correta do padrão de escoamento do leito de jorro.

O modelo Euler-Euler granular permite descrever o escoamento gás-sólido em leito de jorro com misturas binárias de areia e compósito reportadas na literatura por Mantegazini et al. (2021).

Para este modelo são utilizadas as equações de balanço de massa e quantidade de movimento. Inicialmente temos a equação da continuidade para a fase fluida e sólida Eqs. 1 e 2 respectivamente, com a restrição da fração de volume Eq. 3.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_{si} \rho_{si}) + \nabla \cdot (\alpha_{si} \rho_{si} \vec{v}_{si}) = 0, \quad (2)$$

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1, \quad (3)$$

em que ρ_q e \vec{v}_q são a densidade e velocidade da fase q respectivamente e α representa a fração volumétrica. Além disso, são necessárias as equações de momento para a fase fluida Eq. 4 e para a fase sólida Eq. 5.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (K_{pq}(\vec{v}_p - \vec{v}_q) + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) + (F_{q} + F_{lift,q} + F_{wl,q} + F_{vm,q} + F_{td,q}), \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla \rho_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \sum_{i=1}^n (K_{ls}(\vec{v}_l - \vec{v}_s) + \dot{m}_{ls} \vec{v}_{ls} - \dot{m}_{sl} \vec{v}_{sl}) + (F_s + F_{lift,s} + F_{vm,s} + F_{td,s}), \quad (5)$$

em que K_{pq} representa o coeficiente de troca de momento interfase, K_{ls} é o coeficiente de troca de momento entre a fase fluida ou sólida e a fase sólida, p é a pressão, \vec{g} é a aceleração gravitacional, \dot{m}_{pq} é a transferência de massa da fase p para a fase q , \dot{m}_{qp} é a transferência de massa da fase q para a fase p , F_s é força do corpo externo, $F_{lift,s}$ é a força de sustentação, $F_{wl,q}$ é uma força de lubrificação das paredes, $F_{vm,s}$ é uma força de massa virtual, $F_{td,s}$ é uma força de dispersão turbulenta (apenas no caso de fluxos turbulentos) e $\bar{\tau}_q$ representa o tensor tensão-deformação de fase, dado pela Eq. 6:

$$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \left(\alpha_s \lambda_s - \frac{2}{3} \alpha_s \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I}, \quad (6)$$

onde μ_s e λ_s são a viscosidade cisalhante e de bulk para a fase s e \bar{I} o tensor unitário. As equações de conservação apresentam uma estrutura semelhante para cada fase. Para lidar com a descrição contínua da fase particulada, os modelos Euler-Euler granular necessitam de leis de fechamento para descrever as interações entre partículas e entre partículas e fluido. As equações constitutivas do modelo Euler-Euler são descritas abaixo.

Modelo de pressão de sólidos para misturas binárias - Lun et al. (1984), Eq. 7:

$$p_s = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2\rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \Theta_s, \quad (7)$$

Viscosidade cisalhante - Syamlal et al. (1993), Eq. 8:

$$\mu_s = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\Theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha_s + \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{96 \alpha_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[1 + \frac{4}{5} (1 + e_{ss}) \alpha_s g_{0,ss} \right]^2 \alpha_s, \quad (8)$$

Viscosidade bulk - Lun et al. (1984), Eq. 9:

$$\lambda_s \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\Theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

Distribuição radial - Lun et al. (1984), Eq. 10:

$$g_{0,ii} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} + \frac{1}{2} d_i \sum_{k=1}^N \frac{a_k}{d_k}, \quad (10)$$

Modelo de arraste - Gidaspow et al (1994), Eqs. 11 e 12:

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \alpha_g^{-2.65}, \quad \alpha > 0.8, \quad (11)$$

$$\beta = 150 \frac{\alpha_s (\alpha_g - 1) \mu_g}{\alpha_g d_s^2} + 1.75 \frac{\alpha_s \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s}, \quad \alpha \leq 0.8, \quad (12)$$

Modelo da temperatura granular, Eq. 13:

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \Theta_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \Theta_s \vec{v}_s) \right] = (-\rho_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla v_s + (k_{\Theta_s} \nabla \Theta_s) - \gamma_{\Theta_s} + \phi_{gs}, \quad (13)$$

em que Θ representa a temperatura granular, e_{ss} o coeficiente de restituição entre partículas, μ a viscosidade cisalhante de sólidos, λ a viscosidade bulk de sólidos, \bar{I} o tensor unitário, d o diâmetro da partícula, C_D o coeficiente de arrasto, ϕ_{gs} a troca de energia entre fases, γ_{Θ} a energia de dissipação colisional, β o coeficiente de troca de momento entre fases.

Todas as equações do modelo foram tratadas com o esquema de interpolação Upwind de primeira ordem, enquanto o acoplamento pressão-velocidade foi realizado através do algoritmo SIMPLE. Adotou-se um critério de convergência da ordem de 1×10^{-4} , com passo de tempo de 1×10^{-4} s. A Tabela 1 mostra os parâmetros de configuração usados no Ansys Fluent.

Tabela 1. Configuração do Ansys Fluent.

Item	Parâmetro	Descrição/valor
Solver	Pressure-based transitente 2D axissimétrico	-
Modelos	Modelo Euler-Euler multifásico	3 fases (ar, areia e compósito)
	Modelo de turbulência	K-epsilon disperso
Materiais	Densidade do ar	1,162 kg·m ⁻³
	Viscosidade do ar	1,862 x 10 ⁻⁵ kg/m·s
	Modelo de arraste	Gidaspow
	Viscosidade granular	Syamlal- O'brien
	Viscosidade granular bulk	Lun et al
	Pressão de sólidos	Lun et al
	Distribuição radial	Lun et al
	Diâmetro da Areia	0,00258 m
	Diâmetros de Compósito	0,00102 m 0,00185 m 0,00258 m
	Densidade da Areia	2620 kg·m ⁻³
	Densidade do Compósito	1077 kg·m ⁻³
Condições Contorno	Entrada	Inlet velocity – o gás entre na direção axial com um perfil plano de velocidade.
	Saída	Pressão definida (Outlet pressure) – pressão atmosférica.
	Eixo de simetria	Axissimétrico.

2.2 Especificação do problema

As dimensões do leito de jorro de coluna cônica estão dispostas na Tabela 2. Para descrever o escoamento gás-sólido em leito de jorro as simulações foram conduzidas usando uma malha 2D previamente testada (Louvem et al., 2025).

Tabela 2. Dimensões do leito estudado.

Sigla	Propriedade	Tamanho
D_0	Diâmetro de entrada do	0,039m
H_c	Altura de cone	0,200m
H_L	Altura do leito	0,180m
H_{ci}	Altura do cilindro	0,395m
D_c	Diâmetro do cone	0,195m
D_i	Diâmetro da base do cone	0,045m

O índice de mistura (Im) pode ser calculado pela Eq. 14:

$$Im = \frac{W_i}{W_0}, \quad (14)$$

em que W_i é a fração mássica de compósito encontrada por meio da simulação CFD na metade superior do leito e W_0 é a fração mássica inicial de compósito no leito. Os valores de Im próximos de 1 indicam mistura de partículas. Valores de $Im > 1$ indicam maior concentração de compósito PEBD/Al na respectiva região do leito. Enquanto valores de $Im < 1$ resultam em uma maior concentração de areia.

3 Resultados e discussões

Para diferentes velocidades e concentrações de compósito, as Figuras 1 mostra o índice de mistura (Im) médio, parametrizado em $D_a = 0,00258$ m, $D_c = 0,00185$ m, fração de compósito 10%. Nota-se que não há efeito da velocidade do ar sobre o Im . Nesta situação, pode-se concluir que as partículas se encontram bem misturadas ao longo da coluna cônica, pois os valores de Im se aproximam de 1. Baseado na análise da Figura 1, observa-se que o modelo Euler-Euler 2D é capaz de prever os dados experimentais de Im reportados por Mantegazini et al. (2021). Considerado um intervalo de confiança de 10% aos dados experimentais pode-se constatar que a previsão está de acordo, pois o erro absoluto (EA) para o modelo é menor do que 0,05.

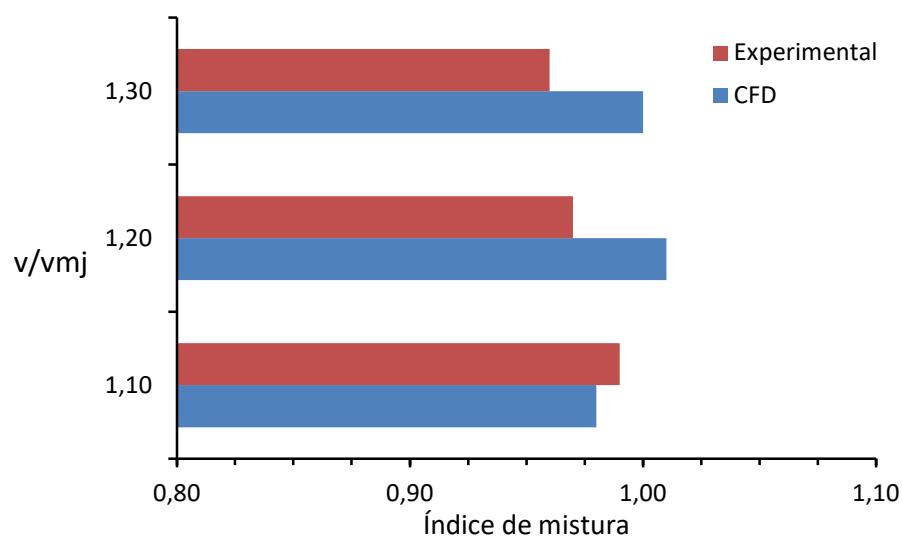


Figura 1. Índice de mistura para diferentes velocidades do ar e 10% de fração mássica de compósito.

A Tabela 3 exibe o índice de mistura médio em função da razão de diâmetro das partículas (Diâmetro areia/Diâmetro compósito), parametrizado em 50% de compósito e velocidade do ar superior a 10% da mínima de jorro.

Para as condições operacionais e propriedades das misturas investigadas, observa-se que o modelo foi capaz de prever satisfatoriamente o Im do leito para todas as razões de diâmetro. Nota-se também que o Im aumenta à medida que a razão de diâmetro aumenta, indicando segregação para $D_a/D_c = 2,54$. Isso pode ser explicado devido ao tempo de ciclo diferente para cada partícula no jorro. Desta forma, na fonte, sob ação

da gravidade, quanto menor o diâmetro do compósito maior altura ele alcança, caindo sobre o ânulo mais próximo da parede, explicado o maior tempo de ciclo comparado ao da areia.

Tabela 3. Índice de mistura para diferentes razões de diâmetro com 50% de concentração de compósito e $v = 1,1v_{mj}$.

D_a/D_c	Índice de mistura		Erro relativo
	CFD	Simulado	
1,00	1,03	1,01	1,98%
1,39	1,03	1,02	0,98%
2,54	1,14	1,13	0,88%

Portanto, na partida de reatores de pirólise com misturas de compósito e areia, deve-se levar em conta a razão de diâmetro entre as partículas e a composição da mistura para que não ocorra segregação, dificultando o aquecimento das partículas de compósito.

Para as razões de diâmetro $D_a/D_c \leq 1,39$, o grau de mistura de partículas promove estabilidade do jorro (verificado experimentalmente), diminui a resistência a condução de calor e, consequentemente, promove altas taxas de aquecimento dos resíduos, podendo resultar em uma degradação térmica uniforme. O modelo fluidodinâmico de previsão do índice de mistura é uma etapa inicial que pode auxiliar futuramente no projeto e operação de reatores de leito de jorro para produção de combustíveis e recuperação do alumínio a partir de resíduos Tetra Pak.

4 Conclusões

Com base na avaliação dos resultados utilizando o modelo 2D-Euler-Euler Granular é possível concluir que:

- A previsão do índice de mistura para diferentes velocidades e concentrações de compósito está de acordo com os dados experimentais.
- O modelo foi capaz de prever o efeito da razão de diâmetro sobre o índice de mistura.

A capacidade do modelo em prever cenários de mistura de partículas favorece altas taxas de aquecimento do resíduo na coluna permitindo aplicá-lo na produção de combustível por meio da pirólise leito de jorro.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). A autora Renata Falqueto Louvem agradece à FAPES pela concessão da bolsa de doutorado e o coautor Inacio Pessanha Layber Ramos agradece ao CNPq pela concessão da bolsa de iniciação científica.

Referências bibliográficas

- Almeida, NP, de Lira, TS and Silverio, BC (2024) 'Fluid dynamics and segregation of sand-malt waste mixture in conical spouted bed', *Latin American Journal of Energy Research*, v. 11, n. 1, p. 45-56. <https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n1.p45-56>
- Bacelos, MS and Freire, JT (2006) 'Stability of spouting regimes in conical spouted beds with inert particle mixtures', *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 45, n. 2, p. 808–817. <https://doi.org/10.1021/ie050633s>
- Epstein, N and Grace, JR (2010) *Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Louvem, RF, Ribeiro, DC, Siqueira, RN, Santos, KG e Bacelos, MS (2023) 'Valorization of Tetra Pak Waste in a Conical Spouted Bed: Predicting the Polyethylene/Aluminum Mixing Index Using CFD Designs', *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 64, n. 33, p. 16359–16374. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5c01756>

Makibar, J, et al. (2011) ‘Investigations on heat transfer and hydrodynamics under pyrolysis conditions of a pilot plant draft tube conical spouted bed reactor’, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 50, n. 8, p. 790–798. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.05.013>

Mantegazini, DZ, Xavier, TP and Bacelos, MS (2021) ‘Conical spouted beds for waste valorization: assessment of particle segregation in beds composed of sand and Tetra Pak residues’, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 47, p. 101334. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101334>

Melo, JLZ et al. (2016) ‘CFD modeling of conical spouted beds for processing LDPE/Al composite’, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 108, p. 93–108. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.07.011>

Rovero, G and Piccinini, N (2011) ‘Particle mixing and segregation’ em *Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications*. New York: Cambridge University Press, p. 141–160.