

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA DE UM LEITO DE JORRO

*Data de submissão: 08/04/2024*

*Data de aceite: 03/06/2024*

### **Alysson Dantas Ferreira**

Universidade Federal de Campina Grande  
Campina Grande -PB  
<http://lattes.cnpq.br/3415847633690777>

### **Suzana Dantas**

Universidade Federal de Campina Grande  
Campina Grande -PB  
<http://lattes.cnpq.br/8371474392585192>

### **Severino Rodrigues de Farias Neto**

Universidade Federal de Campina Grande  
Campina Grande -PB  
<http://lattes.cnpq.br/5029314237107938>

**RESUMO:** O leito jorro é um equipamento amplamente utilizado em vários setores industriais devido à sua ampla aplicabilidade. Este equipamento apresenta algumas limitações, especialmente quando é necessário ampliar a escala, o que depende das condições geométricas e operacionais. Neste contexto, um modelo matemático preciso e que represente com precisão os fenômenos envolvidos pode auxiliar no desenvolvimento de leito de jorro mais eficientes. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi simular através do modelo DPM, o comportamento característico de um leito jorro retangular. Para este propósito, o

software OpenFOAM foi empregado para resolver as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e turbulência, em conjunto com as equações das partículas discreta. O comportamento das partículas do leito de jorro foi comparado com dado experimental obtido na literatura, que indicou que os modelos utilizados por esse trabalho conseguiram representar os fenômenos envolvidos na fluidodinâmica das partículas do equipamento. Portanto, podemos concluir que o modelo DPM conseguiu representar adequadamente o comportamento das partículas durante a operação de um leito de jorro, tornando-o uma opção viável para estudos envolvendo ampliação e otimização deste equipamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** CFD, DPM, Lagrangeano, OpenFoam

## MODELING AND SIMULATION OF THE FLUID DYNAMICS OF A SPOUTED BED

**ABSTRACT:** A spouted bed is widely used in various industrial sectors due to its broad applicability. This equipment presents some limitations, especially when a scale-up is needed, which depends on geometric and operational conditions. In this context, a

precise mathematical model that accurately represents the involved phenomena can assist in the development of more efficient spouted beds. In this regard, the objective of this study was to simulate, using the DPM model, the characteristic behavior of a rectangular spout bed. For this purpose, the OpenFOAM software was employed to solve the mass conservation, momentum, and turbulence equations, incorporating the discrete particle equations. The behavior of the spout bed particles was compared with experimental data obtained from the literature, which indicated that the models used by this study were able to represent the phenomena involved in the fluid dynamics of the equipment particles. Therefore, we can conclude that the DPM model adequately represented the behavior of the particles during the operation of a spout bed, making it a viable option for studies involving the scaling up and optimization of this equipment.

**KEYWORDS:** CFD, DPM, Lagrangean, OpenFoam

## INTRODUÇÃO

O leito de jorro convencional foi desenvolvido por Mathur e Epstein em 1954. Esse equipamento é caracterizado por movimentos cíclicos e mais uniformes do que o leito fluidizado, permitindo um contato mais eficaz entre as fases envolvidas e alcançando altos coeficientes convectivos de transferência de massa, energia e quantidade de movimento. Além disso, este equipamento possui baixos custos de instalação, operação e manutenção, o que são algumas das razões pelas quais tem sido aplicado em diversas atividades industriais como secagem, pirólise, granulação, revestimento e dessulfurização (DUARTE et al., 2015; Zhou et al., 2020; CHE et al., 2022).

Entre os setores industriais onde o leito de jorro é usado, WU et al. (2018) destaca sua importância nas indústrias petroquímica, farmacêutica, alimentícia, química, nuclear e metalúrgica. Há uma ampla variedade de estudos analisando o leito de jorro, como os de ARABIOURRUTIA et al. (2017), que estuda a pirólise de poliolefinas em um leito de jorro; o de MARSHALL (2017), que investigou a aplicação de leitos de jorro para revestimento de partículas de combustível nuclear; o de SANTOS et al. (2016) [8], que vem trabalhando na secagem de frutas; e o de YANG et al. (2020b) [9], que estudou o processo de gaseificação de biomassa.

Apesar das vantagens do leito de jorro, BRITO et al. (2017) afirma que algumas limitações dificultam e restringem sua aplicação em escala industrial. Essas limitações incluem alta queda de pressão antes de alcançar um leito estável, dimensões geométricas que limitam a operação eficiente, o fluxo de gás é limitado pelos requisitos de estabilidade do leito, resultando em uma faixa estreita de condições operacionais, e dificuldades no scale-up.

Uma das principais metodologias de simulação numérica usadas para resolver problemas fenomenológicos é a abordagem de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), que oferece a vantagem de detalhar o comportamento de fluidos e partículas dentro do

equipamento. Ela pode abranger transferência de calor e massa entre as fases envolvidas, fornecendo uma melhor compreensão do comportamento dos fenômenos. Isso ajuda na otimização de parâmetros operacionais e no desenvolvimento de novas configurações geométricas sem as desvantagens de custo e tempo associadas aos experimentos de laboratório.

Atualmente, existem duas abordagens principais para modelar o fluxo de partículas em simulações de CFD. A primeira é a abordagem Euler-Euler, que utiliza a teoria cinética dos fluxos granulares para prever o comportamento das partículas. A segunda é a abordagem Euler-Lagrange, que usa modelos como DEM, DPM e MP-PIC para modelar o comportamento da fase sólida. Ambas as abordagens tratam a fase gasosa como um meio contínuo e diferem em como a fase sólida é considerada, tratando-a como contínua na abordagem Euler-Euler e discreta na abordagem Euler-Lagrange. Essa diferença leva a vantagens e desvantagens específicas (MARCHELLI et al., 2019; WANG et al., 2020).

O modelo Euleriano-Euleriano da teoria cinética do fluxo granular (KTGF), os movimentos individuais das partículas não são resolvidos, mas sim abordados por meio de equações estatísticas e equações de fechamento, com o sucesso dos resultados dependendo de suas formulações escolhidas, que variam com base na situação analisada. Devido essa aproximação na modelagem do comportamento das partículas, a abordagem Euleriano-Euleriano requer baixos custos computacionais. No entanto, ela carece de informações detalhadas sobre as partículas, como encolhimento, aquecimento e tempo de residência (YANG et al., 2016; XIE et al., 2018; KIECKHEFEN et al., 2018; WANG et al., 2020).

A abordagem Euleriano-Lagrangiana supera as dificuldades apresentadas pela abordagem Euleriano-Euleriano. Ela resolve o fluxo de fluido dentro da malha computacional e rastreia as partículas discretas, mantendo assim as propriedades físicas e termodinâmicas das partículas. Os métodos DEM e DPM resolvem o contato partícula-partícula usando leis de colisão físicas, enquanto o modelo MP-PIC simplifica as interações partícula-partícula empregando equações de fechamento empíricas para modelar tensões entre partículas, reduzindo assim colisões excessivas. Em ambos os casos, o custo computacional se torna mais alto quando comparado à abordagem Euleriano-Euleriano, mas o método MP-PIC oferece uma alternativa para minimizar o custo computacional de cálculos de colisão e é aplicado em problemas com um grande número de partículas (YANG et al., 2016; XIE et al., 2018; KIECKHEFEN et al., 2018; DEEN et al., 2007; LIU et al., 2020).

Com base nas informações fornecidas, é crucial ter um modelo matemático que possa fornecer informações da dinâmica de fluidos de um leito de jorro, contribuindo para a compreensão fenomenológica deste equipamento em operações específicas. Isso ajuda a melhorar o controle do processo e permite simulações confiáveis que prevejam seu desempenho sem investimentos significativos em plantas piloto ou industriais em escala. Portanto, este estudo tem como objetivo avaliar se o modelo Euleriano-Lagrangiano DPM consegue simular o comportamento das partículas de um leito de jorro retangular.

## MODELAGEM MATEMÁTICA

Três equações descrevem a fase gasosa em um gás sólido denso sem considerar o fluxo térmico e reativo: continuidade, momento e turbulência.

### Fase gasosa

A equação da continuidade da fase gasosa pode ser descrita por:

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g) = 0 \quad (1)$$

onde  $\alpha_g$ ,  $\rho_g$ , e  $\mathbf{u}_g$  são a fração volumétrica, densidade e velocidade da fase gasosa, respectivamente.

A equação de quantidade de movimento pode ser escrita por:

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = -\alpha_g \nabla p_g + \rho_g \alpha_g \mathbf{g} + \nabla \cdot (\alpha_g \boldsymbol{\tau}_g) + \mathbf{F}_{gs} \quad (2)$$

onde  $p_g$  e  $\mathbf{g}$  são os termos da pressão do gás e a aceleração da gravidade, respectivamente. O termo  $\boldsymbol{\tau}_g$  representa o tensor tensão calculado por:

$$\boldsymbol{\tau}_g = (\mu_l + \mu_t)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\mu_l + \mu_t)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \quad (3)$$

onde  $\mu_l$  e  $\mu_t$  são a viscosidade laminar e turbulenta, respectivamente. O termo  $\mathbf{F}_{gs}$  na Equação 2 representa a troca de quantidade de movimento entre as fases sólidas e gasosa e pode ser calculada por:

$$\mathbf{F}_{gs} = \frac{1}{V_{elem}} \sum_{i=0}^{N_p} W_{p,i} f_{t,i} \quad (4)$$

onde  $f_{t,i}$  são todas as forças de interação fluido-partícula atuando na partícula  $i$ .

O modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  model foi usado para similar os efeitos da turbulência durante o escoamento de gás em sistemas particulados. A equação  $\kappa$  representa a energia turbulenta, enquanto a equação  $\varepsilon$  representa a taxa de dissipação de energia. Ambas as equações são apresentadas abaixo:

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g \kappa)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g \kappa) = \nabla \cdot \left[ \alpha_g \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla \kappa \right] + \alpha_g (G_g + P_g - \rho_g \varepsilon_g) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_g \rho_g \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g \varepsilon) \\ = \nabla \cdot \left[ \alpha_g \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \alpha_g \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_1 P_g + C_3 |G_g| - C_2 \rho_g \varepsilon) \end{aligned} \quad (6)$$

Nessas equações,  $G_g$  representa a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes da velocidade média, onde  $C_1 = 1.44$ ,  $C_2 = 1$  e  $C_3 = 1.92$ ; E  $\sigma_k = 1.0$  e  $\sigma_\varepsilon = 1.3$  são os números de Prandtl turbulentos para  $k$  e  $\varepsilon$ , respectivamente.

## Fase sólida – Discrete Particle Model (DPM)

A abordagem do Modelo de Partículas Discretas (DPM) descreve o movimento e colisões das partículas. Neste trabalho, utilizamos o modelo de esfera macia para representar colisões entre partículas. Esta abordagem assume que as partículas sofrem uma pequena deformação durante o contato com outras partículas ou paredes. Essa deformação é calculada usando uma simples analogia envolvendo uma mola mecânica, um potenciômetro e um deslizador. Isso permite calcular a dissipação de energia devido às interações das partículas usando coeficientes empíricos de restituição normal e tangencial, e o coeficiente de atrito (DEEN et al., 2007; BUIJTENEN et al., 2011). O movimento individual de cada partícula com massa ( $m_p$ ) e volume  $V_p$  é calculado usando a segunda lei de Newton, dada por:

$$m_i \frac{du_i}{dt} = f_i^{g-p} + \sum_{j=2}^{N_p} f_{i,j}^c + f_i^g \quad (7)$$

O momento angular da partícula é calculado por:

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = T_i \quad (8)$$

onde  $I_i$  é o momento de inércia, que é igual a  $2m_i R_i^2 / 5$ ,  $\omega_i$  é a velocidade de rotação da partícula  $i$ , e  $T_i$  representa o torque causado pela força de contato na partícula  $i$ . A força de contato  $f_{i,j}^c$  neste trabalho é calculada usando a abordagem de esfera suave inicialmente proposta por CUNDALL AND STRACK (1979). A força de contato é dividida em força normal  $f_{i,j}^{cn}$  e força tangencial  $f_{i,j}^{ct}$ :

$$f_{i,j}^c = f_{i,j}^{cn} + f_{i,j}^{ct} \quad (9)$$

As forças de contato são modeladas usando os parâmetros: rigidez ( $k$ ), coeficiente de amortecimento ( $\eta$ ), e coeficiente de fricção ( $\mu_f$ ). De acordo com o modelo Hertzian springdashpot (HSD), eles são escritos como:

$$f_{i,j}^{cn} = \left( -k_n \delta_{nij}^{\frac{3}{2}} - \eta_n \mathbf{u}_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ij} \right) \mathbf{n}_{ij} \quad (10)$$

$$f_{i,j}^{ct} = -k_t \delta_{tij} - \eta_t \mathbf{u}_{d,ij} \quad (11)$$

$\delta$  é o deslocamento,  $\mathbf{n}_j$  é o vetor unitário da partícula  $i$  para a partícula  $j$ .  $\mathbf{u}_{ij}$  e  $\mathbf{u}_{d,ij}$  são, respectivamente, o vetor de velocidade relativa entre a partícula  $i$  e a partícula  $j$ , e a velocidade de deslizamento no ponto de contato, que é dada por:

$$\mathbf{u}_{d,ij} = \mathbf{u}_{ij} - (\mathbf{u}_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ij}) \mathbf{n}_{ij} + (r_i \omega_i + r_j \omega_j) \times \mathbf{n}_{ij} \quad (12)$$

Se a força tangencial satisfizer a seguinte relação:

$$|f_{i,j}^{ct}| > \mu_f |f_{i,j}^{cn}| \quad (13)$$

ocorre deslizamento e a força tangencial é calculada como:

$$|f_{i,j}^{ct}| = -\mu_f |f_{i,j}^{cn}| \frac{\mathbf{u}_{d,ij}}{|\mathbf{u}_{d,ij}|} \quad (14)$$

A determinação dos valores de rigidez  $k$ , coeficiente de amortecimento  $\eta$ , e o coeficiente de atrito  $\mu_f$  pode ser encontrada em TSUJI et al. (1992). O coeficiente de atrito é considerado um parâmetro empírico. A teoria de contato de Hertzian calcula a rigidez normal e tangencial não linear da mola entre as partículas  $i$  e  $j$  em contato, com base no módulo de Young  $E$  e no coeficiente de Poisson  $\sigma$ :

$$k_n = \frac{4}{3} \sqrt{r_{eff}} \frac{E}{2(1-\sigma^2)} \quad (15)$$

$$k_t = 8 \sqrt{r_{eff} \delta_{n,ij}} \frac{G}{2(2-\sigma)} \quad (16)$$

onde  $G = \frac{E}{2(1+\sigma)}$  e  $r_{eff} = \frac{r_i r_j}{r_i + r_j}$ . Quanto ao coeficiente de amortecimento  $\eta$ , considera-se estar relacionado ao coeficiente de restituição  $e$ . TSUJI et al. (1992) derivaram um modelo analítico dado pela seguinte expressão:

$$\eta = \lambda(m_{eff}k_n)^{1/2} \delta_n^{1/4} \quad (17)$$

onde  $m_{eff}$  é a massa efetiva calculada por  $m_{eff} = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}$ .  $\lambda$  é chamado de coeficiente de amortecimento, o qual é uma constante empírica relacionada ao coeficiente de restituição  $e$ , e é dado pela seguinte equação:

$$\lambda = -0.719 \ln\left(\frac{e + 0.08}{1.078}\right) \quad (18)$$

No presente trabalho, assume-se que o coeficiente de amortecimento na direção tangencial  $\eta_t$  é igual ao da direção normal  $\eta_n$  conforme sugerido por TSUJI et al. (1992) e LI et al. (2017).

## Interação gás-partícula

O modelo de arrasto é vital na descrição de um sistema gás-partícula, representando a troca de quantidade de movimento entre as fases. A força de arrasto de uma única partícula  $i$  é dada por:

$$\mathbf{f}_i^{g-s} = \mathbf{f}_{D,i} = \frac{V_i D_i}{1 - \alpha_g} (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_i) \quad (27)$$

O leito de jorro apresenta três regiões distintas: o jorro, o ânulo e a fonte. A região de fonte é formada pela vazão de entrada da fase gasosa de alta velocidade e contém uma baixa concentração de sólidos, enquanto na região anular, o leito se move com baixa velocidade e com alta concentração de sólidos (YANG et al., 2021; GONIVA et al., 2012; YANG et al., 2014). Portanto, o modelo de arrasto de Gidaspow, que combina a correlação de Ergun aplicável a sistemas densos com a correlação de Wen-Yu usada para sistemas diluídos (YANG et al., 2021), é adequado para modelar um leito de jorro. O modelo de Gidaspow é escrito da seguinte forma:

$$D_p = \begin{cases} \frac{150(1 - \alpha_g)^2 \mu_g}{\alpha_g d_i^2} + \frac{1.75 \rho_g (1 - \alpha_g) |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_i|}{d_i}, \alpha_g \leq 0.8 \\ \frac{3 \alpha_g \rho_g (1 - \alpha_g) |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_i|}{4} C_D \alpha_g^{-2.65}, \alpha_g > 0.8 \end{cases} \quad (28)$$

onde

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_i} (1 + 0.15 Re_i^{0.687}), Re_i < 1000 \\ 0.44, Re_i \geq 1000 \end{cases} \quad (29)$$

e

$$Re_i = \frac{\rho_g \alpha_g |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_i| d_i}{\mu_g} \quad (30)$$

A força da gravidade atuando na partícula é dada por:

$$f_i^{\text{grav}} = \frac{\mathbf{g}(\rho_g - \rho_s)}{\rho_g} \quad (31)$$

onde  $\rho_s$  é a densidade da partícula e  $\mathbf{g}$  é a aceleração da gravidade.

## CONSIDERAÇÕES PARA A SIMULAÇÃO

O presente trabalho foi baseado em um estudo conduzido por XU et al. (2017). O leito de jorro retangular tem uma espessura de 32 mm, uma largura de 134 mm e uma altura de 600 mm. O gás entra uniformemente distribuído através de um orifício retangular com uma largura de 6 mm e uma espessura de 32 mm.

Em simulações de CFD empregando a abordagem Euleriano-Lagrangiana resolvida pelo método do Modelo de Fase Discreta (DPM) ou resolvida pelo Método de Partícula em Células Multiphásic (MP-PIC), o tamanho do elemento da malha é limitado pelo tamanho da partícula, que deve ser suficientemente pequeno para alcançar precisão e, ao mesmo tempo, grande o suficiente para garantir uma variação temporal e espacial adequada das frações de partículas sólidas (HU et al., 2019). Por isso, recomenda-se utilizar estudos anteriores para definir o tamanho da malha (HU et al., 2019).

Com base nas informações apresentadas, BOYCE et al. (2015) recomendaram uma relação ( $Sc/dp$ ) em torno de 3-4 para obter o melhor acordo entre dados experimentais e numéricos em problemas de leito de jorro/fluidizado. Portanto, neste estudo, seguimos essas recomendações e usamos uma relação ( $Sc/dp$ ) de 3. Conseqüentemente, a malha computacional foi composta por 32 x 4 x 60 elementos nas direções x, y e z. Enquanto XU et al. (2017) usaram uma malha computacional com 17, 4 e 60 elementos nas direções x, y e z, respectivamente.

O conjunto experimental de XU et al. (2017), a geometria construída e a malha computacional gerada são apresentadas na Figura 1.



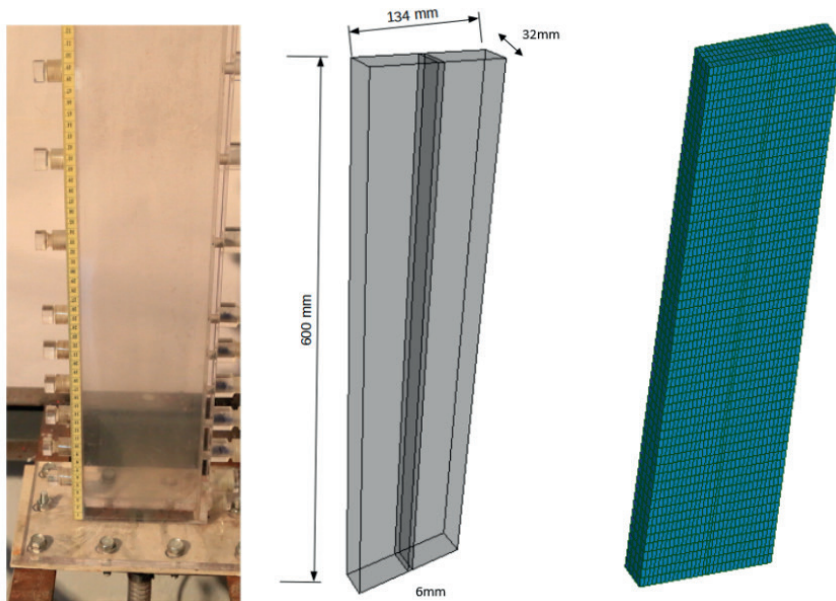


Figura 1 - Aparato experimental de Xu et al. (2017), geometria e malha do leito de jorro retangular.

As simulações foram realizadas no OpenFOAM, um software de código aberto com o modelo DPM implementado. Inicialmente, o leito de jorro foi preenchido com ar estagnado, e as partículas foram introduzidas aleatoriamente no domínio computacional, se estabelecendo no fundo do equipamento para formar um leito de partículas com uma altura de 100 mm. Uma vez que todas as partículas foram depositadas no leito, o fluxo de ar foi ativado na base do leito fluidizado com uma velocidade fixa de 46,9 m/s. A saída do leito fluidizado foi configurada para pressão atmosférica, e as paredes foram consideradas não deslizantes. Os parâmetros para as partículas e as propriedades da fase gasosa são apresentados na Tabela 1.

As equações foram resolvidas usando o método de volume finito (FVM). Nesta abordagem, o termo transitório foi discretizado usando o esquema de Euler, enquanto o termo de convecção e difusão foram discretizados usando os esquemas lineares Upwind e Gauss, respectivamente. Esses esquemas de discretização foram escolhidos porque demonstraram estabilidade numérica na resolução da matriz linear.

O resultado da discretização é um conjunto de equações algébricas construídas na forma  $\mathbf{A}[\phi] = \mathbf{b}$ . Os coeficientes das variáveis desconhecidas na matriz  $\mathbf{A}$  são obtidos por meio do procedimento de linearização das informações dentro da malha computacional. O vetor  $\mathbf{b}$  contém todos os termos de origem, incluindo constantes, condições de contorno e componentes não linearizáveis. As técnicas para resolver este sistema algébrico não dependem do método de discretização específico empregado. Neste estudo, o método GAMG foi usado para resolver o campo de pressão e o smoothSolver para o campo de velocidade e turbulência.

Simulations parameters	Values
$d_p$	$5 \times 10^{-4}$ m
$\rho_p$	700 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{air}$	Ideal gas
$\mu_{air}$	$2 \times 10^{-5}$ Pa s
$H_0$	100 mm
$N_p$	29110
$e$	0.9
$\mu_p$	0.1
$\mu_w$	0.1
$\gamma$	0.3
G	$3 \times 10^6$
Collision Model (DPM)	pairCollision
Pair Model	springSliderDashpot

Tabela 1 – Parâmetros da simulação.

A simulação foi configurada para apresentar um tempo físico de 5 segundo, com um intervalo de tempo variável e um número de Courant fixado em 0,5. As simulações foram realizadas em um computador com processador Intel Core i9-12900k e 32 GB de RAM, levando 16 horas para serem concluídas, utilizando oito núcleos de processamento.

## RESULTADOS

Para comparar o comportamento das partículas no modelo estudado, os resultados obtidos a partir do modelo de Modelagem de Fase Discreta (DPM) foram comparados com os resultados experimentais (Figura 2 (b)) e os resultados dos Métodos de Elementos Discretos (CFD-DEM) (Figura 2 (a)), reportados por XU et al. (2017).

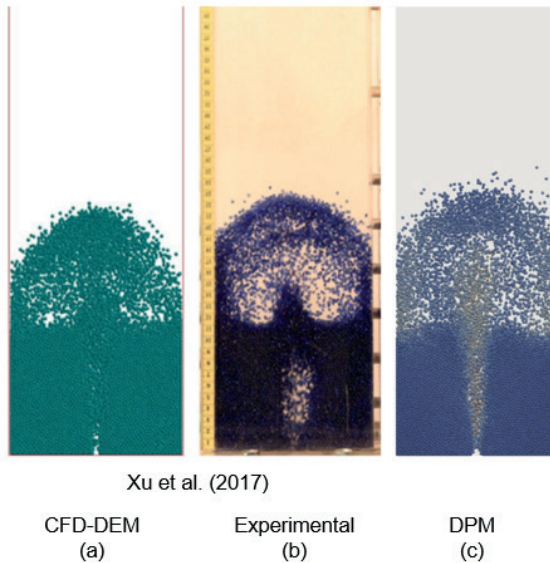


Figura 2 – Comparação do modelo estudado com os resultados reportados por XU et al. (2017).

Ao analisar a Fig. 2, pode-se observar que o comportamento do leito de partículas inertes no modelo estudado neste trabalho apresenta semelhanças com os resultados experimentais e os resultados numéricos obtidos por XU et al. (2017). A altura do leito de partículas no modelo DPM atingiu 0,10 m, enquanto a altura do leito de partículas medida experimentalmente foi de 0,12 m, o que está próximo do modelo estudado.

Ao comparar a altura da fonte do leito de jorro, observa-se que o modelo DPM alcançou os mesmos valores encontrados no experimento de XU et al. (2017), aproximadamente 0,23 m. Ao comparar o formato da fonte, observa-se que o modelo DPM mostra uma semelhança com o experimento do que a simulação conduzida por XU et al. (2017). O modelo DPM fornece uma representação mais precisa da dispersão de partículas e suas colisões com as paredes laterais do equipamento, exibindo um comportamento que se assemelha de perto aos resultados experimentais. Esse comportamento não foi observado na simulação conduzida por XU et al. (2017).

Na região do jorro, o comportamento do modelo estudado mostra uma leve diferença em comparação com os dados experimentais, onde a formação de um bolsão de ar pode ser observada no experimento de XU et al. (2017). Esse fenômeno não foi observado no resultado da simulação deste estudo ou na simulação conduzida por XU et al. (2017).

O modelo DPM foi capaz de descrever o comportamento das partículas de cada região dentro de um leito de jorro, onde cada uma delas apresenta um movimento de partículas diferente. Portanto, pode-se afirmar que o modelo DPM, juntamente com o modelo de colisão de partículas macia proposto neste estudo, conseguiu representar o comportamento do leito de partículas inertes e mostrou melhores resultados do que a simulação conduzida por XU et al. (2017).

## CONCLUSÃO

Com base na simulação numérica, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- a. O DPM foi capaz de descrever o comportamento de cada uma das regiões características do leito de jorro, o que indica ser capaz de representar o comportamento da dinâmica dos fluidos e das partículas de um leito de jorro.
- b. O modelo proposto por este trabalho possibilitará estudos de otimização de processo ou até mesmo estudos de scale-up envolvendo leitos de jorro.

## REFERÊNCIAS

ARABIOURRUTIA, M.; ELORDI, G.; OLAZAR, M.; BILBAO, J. Pyrolysis of polyolefins in a conical spouted bed reactor: A way to obtain valuable products. **Pyrolysis**, p.285-304, 2017.

BRITO, R.; BETTEGA, R.; FREIRE, J. Análise energética da aplicação da intermitência sobre o processo de secagem de alumina em leito de jorro. **XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. 2017.

BOYCE, C.; HOLLAND, D.; DENNIS, J.; SCOTT, S. Limitations on fluid grid sizing for using volume-averaged fluid equations in discrete element models of fluidized beds. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v. 54, n. 43, p. 10684-10697, 2015.

CHE, X.; GUO, R.; WU, F.; MA, X.; WANG, J. Experiment and CFD study on the hydrodynamics in novel internal-intensified spouted beds. **Powder Technology**, v. 412, p. 118009, 2022.

CUNDALL P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Geotechnique**, v. 29, n. 1, p. 47–65, 1979.

DEEN, N. G.; GONIVA, C.; KLOSS, C.; KUIPERS, J. A.; PIRKER, S. Influence of rolling friction on single spout fluidized bed simulation. **Particuology**, v. 10, n. 5, p. 582– 591, 2012.

DEEN, N.; VAN SINT ANNALAND, M.; VAN DER HOEF, M.; KUIPERS, J. Review of discrete particle modeling of fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 1, p. 28– 44, 2007.

DUARTE, C. R.; JUNIOR, I. P.; DOS SANTOS, D. A. Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica de um leito de jorro operando em fase diluída. **Horizonte Científico**, v. 9, n. 1, p. 1–21, 2015.

Goniva, C.; Kloss, C.; Deen, N. G.; Kuipers, J. A.; Pirker, S. Influence of rolling friction on single spout fluidized bed simulation. **Particuology**, vol. 10, n. 5, pp. 582– 591, 2012.

HU, C.; LUO, K.; WANG, S.; SUN, L.; FAN, J. Computational fluid dynamics/discrete element method investigation on the biomass fast pyrolysis: The influences of shrinkage patterns and operating parameters. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 58, n. 3, p. 1404–1416, 2019.

KIECKHEFEN, P.; PIETSCH, S.; HOFERT, M.; SCHONHERR, M.; HEINRICH, S.; KLEINE JAGER, F. Influence of gas inflow modelling on cfd-dem simulations of three-dimensional prismatic spouted beds. **Powder Technology**, v. 329, p. 167–180, 2018.

- LI, L.; LI, B.; LIU, Z. Modeling of spout/fluidized beds and investigation of drag closures using openfoam. **Powder Technology**, v. 305, p. 364–376, 2017.
- LIU, X.; GAN, J.; ZHONG, W.; YU, A. Particle shape effects on dynamic behaviors in a spouted bed: CFD-DEM study. **Powder Technology**, v. 361, p. 349–362, 2020.
- MARSHALL, D. W. Spouted bed design considerations for coated nuclear fuel particles. **Powder Technology**, v. 316, p. 421–425, 2017.
- MARCHELLI, F.; MOLINER, C.; BOSIO, B.; ARATO, E. A cfd-dem sensitivity analysis: The case of a pseudo-2d spouted bed. **Powder Technology**, v. 353, p. 409–425, 2019.
- SANTOS, J. T. S.; SOARES, D. S. C.; SOUZA, P. M.; SANTANA SOUZA, D. F.; OLIVEIRA JUNIOR, A. M. Secagem de alimentos em leito de jorro sob a ótica da análise de patentes. **Proceeding of ISTI/SIMTEC**, v. 3, n.1, p. 186-191, 2016.
- TSUJI, Y.; TANAKA, T.; ISHIDA, T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. **Powder Technology**, v. 71, n. 3, p. 239–250, 1992.
- VAN BUIJTENEN, M. S.; VAN DIJK, W. J.; DEEN, N. G.; KUIPERS, J.; LEADBEATER, T.; PARKER, D. Numerical and experimental study on multiple-spout fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, v. 66, n. 11, p. 2368–2376, 2011.
- WANG, J. Continuum theory for dense gas-solid flow: a state-of-the-art review, **Chem. Eng. Sci.**, v. 215, p. 11528, 2020.
- WU, F.; GAO, W.; ZHANG, J.; MA, X.; ZHOU, W. Numerical analysis of gas-solid flow in a novel spouted bed structure under the longitudinal vortex effects. **Chemical Engineering Journal**, v. 334, p. 2105 – 2114, 2018.
- XIE, J.; ZHONG, W.; YU, A. Mp-pic modeling of cfb risers with homogeneous and heterogeneous drag models. **Advanced Powder Technology**, v. 29, n. 11, p. 2859–2871, 2018.
- XU, H.; ZHONG, W.; YUAN, Z.; YU, A. Cfd-dem study on cohesive particles in a spouted bed. **Powder Technology**, v. 314, p. 377– 386, 2017.
- YANG, S.; DONG, R.; DU, Y.; WANG, S.; WANG, H. Numerical study of the biomass pyrolysis process in a spouted bed reactor through computational fluid dynamics. **Energy**, v. 214, p. 118839, 2021.
- YANG, S.; FAN, F.; WEI, Y.; HU, J.; WANG, H.; WU, S. Three-dimensional mp-pic simulation of the steam gasification of biomass in a spouted bed gasifier. **Energy Conversion and Management**, v. 210, p. 112689, 2020.
- YANG, S.; WAN, Z.; WANG, S.; WANG, H. Reactive mp-pic investigation of heat and mass transfer behaviors during the biomass pyrolysis in a fluidized bed reactor. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 2, p. 105047, 2021.
- YANG, S.; LUO, K.; FAN, J.; CEN, K. Particle-scale investigation of the solid dispersion and residence properties in a 3-d spout-fluid bed. **AIChE Journal**, v. 60, n. 8, p. 2788–2804, 2014.
- ZHOU, L.; HAN, C.; BAI, L.; LI, W.; EL-EMAM, M.; SHI, W. CFD-DEM bidirectional coupling simulation and experimental investigation of particle ejections and energy conversion in a spouted bed. **Energy**, v. 211, p. 118672