



## **SIMULAÇÃO EM CFD DA SUSPENSÃO DE SÓLIDOS EM UM TANQUE MECANICAMENTE AGITADO: UMA MODELAGEM MONOFÁSICA**

LEON C. V. CAVALCANTE, FELIPE A. M. VILELA\*, JOÃO R. C. SOLETTI, RODOLFO J.  
BRANDÃO, SANDRA H. V. DE CARVALHO, JOÃO I. SOLETTI

Universidade Federal de Alagoas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química  
\*e-mail: felipe.vilela@ctec.ufal.br

**RESUMO** - A qualidade da suspensão de sólidos em tanques agitados é dependente de condições de projeto do impelidor. A fluidodinâmica computacional (CFD) é uma ferramenta que pode ser aplicada para reduzir os custos no projeto destes equipamentos, porém, a modelagem multifásica demanda um alto custo computacional. Através do planejamento composto central, foi analisado o impacto de três fatores de projeto de impelidores (ângulo das pás ( $\theta$ ), número de pás (N.P.) e a razão entre o diâmetro do impelidor e do tanque (D/T)) sobre a altura máxima normalizada do campo de velocidade superior à velocidade terminal da partícula ( $H_{vt}$ ), uma variável proposta neste trabalho para estimativa do grau da suspensão de sólidos a partir de simulações monofásicas. Para isto, foram utilizados os softwares Design Modeler, Meshing e Fluent para modelagem das geometrias, confecção das malhas, modelagem matemática e resolução das equações. Foi utilizado um modelo estacionário monofásico com modelo de turbulência  $k-\epsilon$  realizável e com MRF para modelar as partes rotacionais. Para cada caso, foram discutidas a variação da magnitude da velocidade e de sua componente axial na região onde a velocidade é superior à velocidade terminal. Os resultados mostram que os fatores  $\theta$  e D/T são significativos sobre a variável  $H_{vt}$ .

### **INTRODUÇÃO**

Reações catalíticas heterogêneas, reações com reagentes sólidos, cristalização, lixiviação e tratamento de águas são alguns exemplos de processos industriais afetados pela qualidade da suspensão de sólidos (Gu et al., 2020).

Uma suspensão de sólidos adequada favorece os mecanismos de transferência de massa, principalmente por aumentar a área superficial de contato das partículas. Neste contexto, a taxa de transferência de massa deixa de ser o fator limitante quando a velocidade de rotação do impelidor é igual à velocidade mínima de suspensão (Changi and Wong, 2016; Kazemzadeh et al., 2020).

A distribuição de sólidos, a velocidade das partículas e a altura da nuvem de sólidos são parâmetros fundamentais para avaliação da qualidade da suspensão de sólidos em tanques agitados. (Ochieng and Onyango, 2010; Stuparu et al., 2021).

O uso de técnicas computacionais para predição dessas variáveis tem sido uma alternativa de redução de custos aos complexos métodos experimentais. Entre estes métodos destaca-se o CFD (Fluido Dinâmica Computacional), através desta técnica é possível reduzir custos como utilização de insumos, instrumentação e projeto de equipamentos (Brodny and Tutak, 2021; Tamburini et al., 2012).

O uso de CFD destaca-se pela praticidade que oferece no projeto de operações sensíveis às alterações na sua geometria, como no caso de processos de agitação, altamente dependentes do formato do impelidor, do tanque, da presença de chicanas e das posições desses elementos no equipamento (Peiter, 2017).

O planejamento fatorial é uma estratégia analítica e sua principal aplicação reside na triagem das variáveis mais relevantes de um determinado sistema analítico. Após este processo de triagem das variáveis mais significativas, são executados experimentos

que permitem refinamento e um melhor conhecimento do sistema em estudo (Jadidi et al., 2023).

Deste modo, este trabalho tem como objetivo determinar condições operacionais e de projeto no processo de suspensão de sólidos, em principal, a influência das características geométricas do impelidor no processo na suspensão de sólidos em meio líquido a partir de uma abordagem fluidodinâmica monofásica no interior de um tanque mecanicamente agitado.

## METODOLOGIA

As modelagens geométricas, construção das malhas e as simulações em CFD foram realizadas utilizando o software comercial ANSYS® *student*.

Na análise da influência das variáveis geométricas do impelidor, no processo de suspensão de sólidos em meio líquido, empregou-se o planejamento experimental Composto Central (PCC), sendo as variáveis independentes: angulação entre as pás ( $\theta$ ), razão entre o diâmetro do impelidor e a altura do tanque (D/T) e número de pás do impelidor (N.I.). O planejamento experimental realizado pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Planejamento Composto Central: Variáveis geométricas do impelidor.

Simulação	$\theta$ (°)	N.P. (-)	D/T (-)
1	30° (-1)	0,2 (-1)	3 (-1)
2	30° (-1)	0,2 (-1)	5 (+1)
3	30° (-1)	0,4 (+1)	3 (-1)
4	30° (-1)	0,4 (+1)	5 (+1)
5	60° (+1)	0,2 (-1)	3 (-1)
6	60° (+1)	0,2 (-1)	5 (+1)
7	60° (+1)	0,4 (+1)	3 (-1)
8	60° (+1)	0,4 (+1)	5 (+1)
9	15° (- $\alpha$ )	0,3 (0)	4 (0)
10	75° (+ $\alpha$ )	0,3 (0)	4 (0)
11	45° (0)	0,1 (- $\alpha$ )	4 (0)
12	45° (0)	0,5 (+ $\alpha$ )	4 (0)
13	45° (0)	0,3 (0)	2 (- $\alpha$ )
14	45° (0)	0,3 (0)	6 (+ $\alpha$ )
15	45° (0)	0,3 (0)	4 (0)

Foram analisadas como variáveis resposta do sistema a altura de suspensão de sólidos e também os perfis de magnitude de velocidade e velocidade axial do fluido nas condições estabelecidas.

No estudo foram propostas simulações em regime estacionário e monofásicas como forma de reduzir os custos computacionais de cálculo em problemas de suspensão de sólidos.

A geometria e a malha computacional foram modeladas a partir de um reator de tanque plano com a presença de quatro chicanas distribuídas simetricamente.

Com o objetivo de garantir um maior controle sobre a geração da malha computacional, a geometria foi particionada, como pode ser visualizado na Figura 1a. Na Figura 1b é disposto um modelo geométrico de um dos impelidores de pás inclinadas avaliado no presente trabalho.

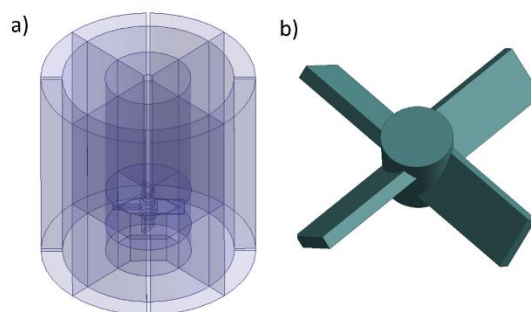


Figura 1: a) Geometria particionada e b) geometria do impelidor.

A malha computacional do tanque agitado foi confeccionada através do *software* MESHING da ANSYS *student*. Foram utilizadas células hexaédricas para compor o domínio estático da geometria e células tetraédricas para o domínio rotacional. Esta malha foi composta por cerca de 318 mil células. Os resultados das métricas de qualidade da malha estão dispostos na Tabela 2. A malha gerada pode ser vista na Figura 2.

Tabela 2 - Métricas para qualidade de malha.

Métrica de malha	Média
Qualidade dos elementos	0,83
Razão de aspecto	1,97
Distorção	0,13
Qualidade ortogonal	0,88

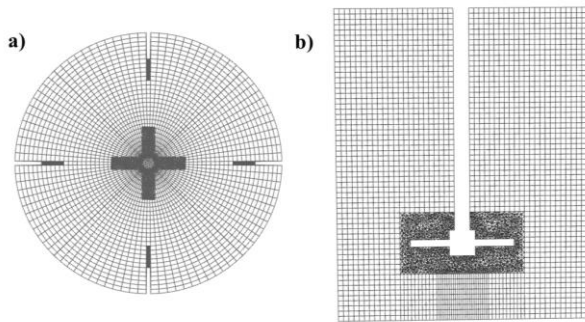


Figura 2: Malha computacional em a) corte horizontal na altura central do impelidor e b) corte vertical central.

O processo de agitação mecânica teve seus fenômenos de turbulência calculados utilizando modelo  $k-\varepsilon$  *realizable* (Scargiali et al., 2020), para simular o movimento rotacional no interior do tanque foi utilizado o modelo MRF (Patil et al., 2021; Xie and Luo, 2018) e como condição de contorno foi assumida a condição de não deslizamento nas paredes.

A determinação da velocidade terminal ( $v_r$ ) das partículas foi feita a partir da Equação 1.

$$v_r = \sqrt{4d_p g (\rho_p - \rho_f) / 3C_p \rho_f} \quad (1)$$

A velocidade de rotação do impelidor ( $N_{JS}$ ), foi estimada através da correlação empírica, (DEVARAJULU; LOGANATHAN, 2016; ZWIETERING, 1958), onde foram obtidos valores de 615 rpm para um D/T de 0,2, 718 rpm para o D/T de 0,3 e 1110 rpm para o D/T de 0,4. O cálculo das velocidades foram realizados a partir das condições dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados para determinação da  $v_r$  e  $N_{JS}$ .

Parâmetro	Valor
Aceleração da gravidade ( $g$ )	9,81 m/s <sup>2</sup>
Viscosidade cinemática ( $\nu$ )	5,4.10 <sup>-7</sup> Kg <sup>2</sup> /s
Densidade do sólido ( $\rho_s$ )	1738 Kg/m <sup>3</sup>
Densidade do líquido ( $\rho_l$ )	889 Kg/m <sup>3</sup>
Diâmetro da partícula ( $d_p$ )	2 mm
Coefficiente de arraste ( $C_d$ )	0,44

Um isovolume foi definido a partir da velocidade terminal das partículas imersas no

fluido e compreende valores iguais e/ou maiores que a velocidade terminal.

No pós-processamento, foram gerados gráficos de contorno no interior dos isovolumes para avaliar o comportamento da magnitude da velocidade e a velocidade axial Figura 2. Foram criados dois planos de referência para análise dos resultados: o primeiro plano (Plano 1) foi um corte vertical que atravessa a geometria do tanque em um ponto entre as chicanas, Figura 3 (a). Já o segundo plano (Plano 2) foi um corte horizontal que atravessa o tanque na altura do centro do impelidor, conforme pode ser visualizado na Figura 3b.

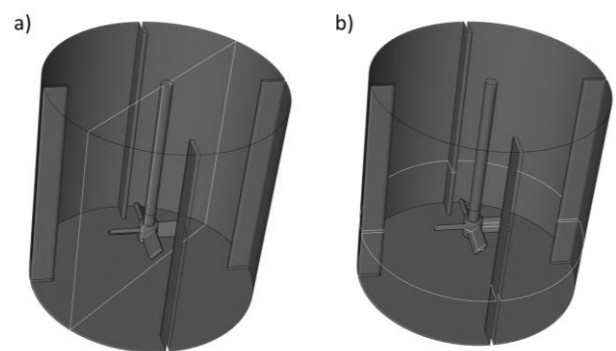


Figura 2: Planos utilizados para avaliar os contornos gerados: (a) Plano 1; (b) Plano 2.

Os perfis de influência das variáveis independentes foram realizados tomando a variação de uma das variáveis independentes por vez e fixando as demais em seus pontos centrais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Efeito da Inclinação das pás ( $\theta$ )

A Figura 4 mostra o perfil da influência da angulação das pás na magnitude de velocidade, nos Plano 1 e Plano 2 e para a condição do impelidor com 4 pás, razão de diâmetro de 0,3T e velocidade de rotação do impelidor de 718 RPM.

Nota-se que para a angulação de 75° (Figura 4c) a velocidade resultante do fluido próximo ao tampo não apresenta magnitude elevada o suficiente, quando comparada com a velocidade terminal, permitindo avaliar que nesta condição a suspensão de sólidos encontra-se limitada. Nesta configuração, regiões de possível acúmulo de sólidos são previstas.

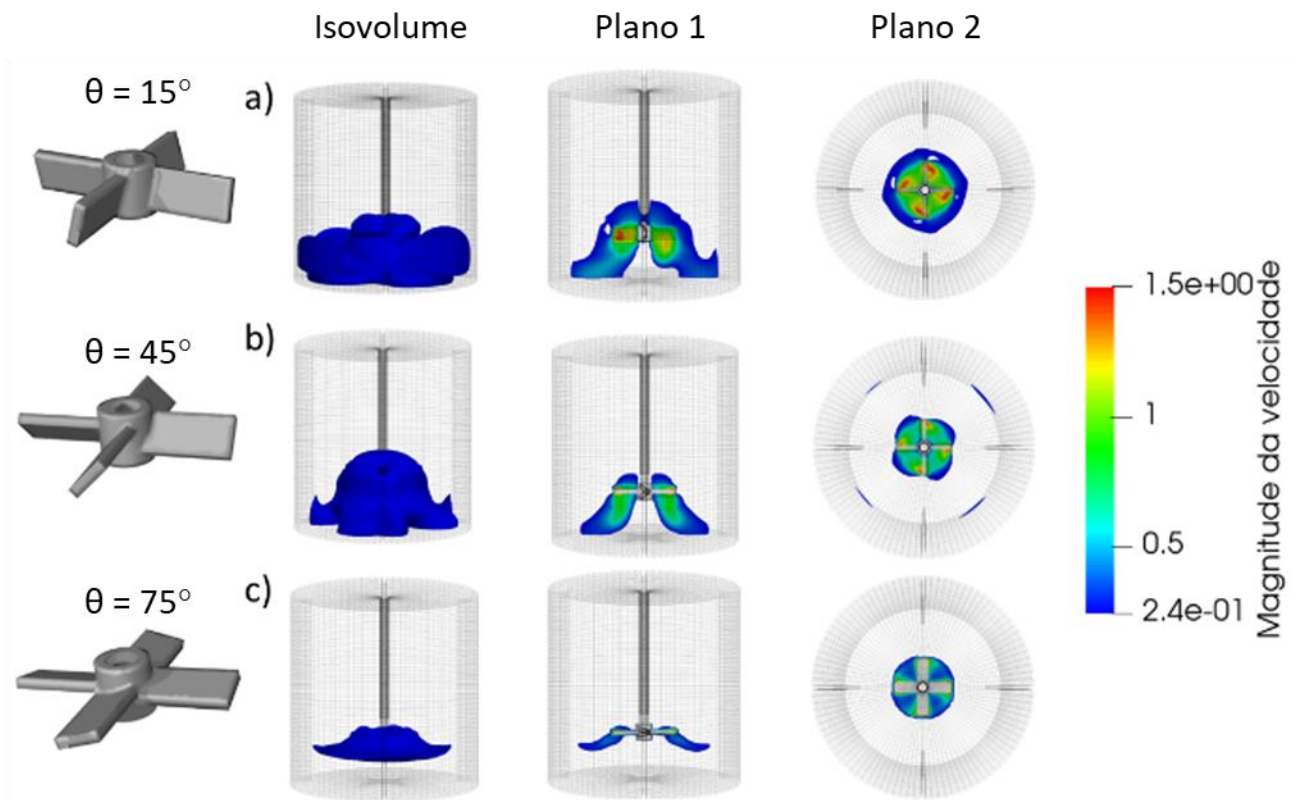


Figura 4: Efeito da angulação das pás dos impelidores na magnitude de velocidade.

Para as angulações de  $15^\circ$  (Figura 4a) e  $45^\circ$  (Figura 4b) é observada uma maior intensidade da magnitude da velocidade, quando comparada com a simulação com pás de  $75^\circ$  de angulação. Nota-se ainda, nas

configurações (a) e (b), que o isovolume correspondente às velocidades superiores à velocidade terminal das partículas alcança o tempo do equipamento. Desta forma, o acúmulo de sólidos na região tende a ser minimizado.

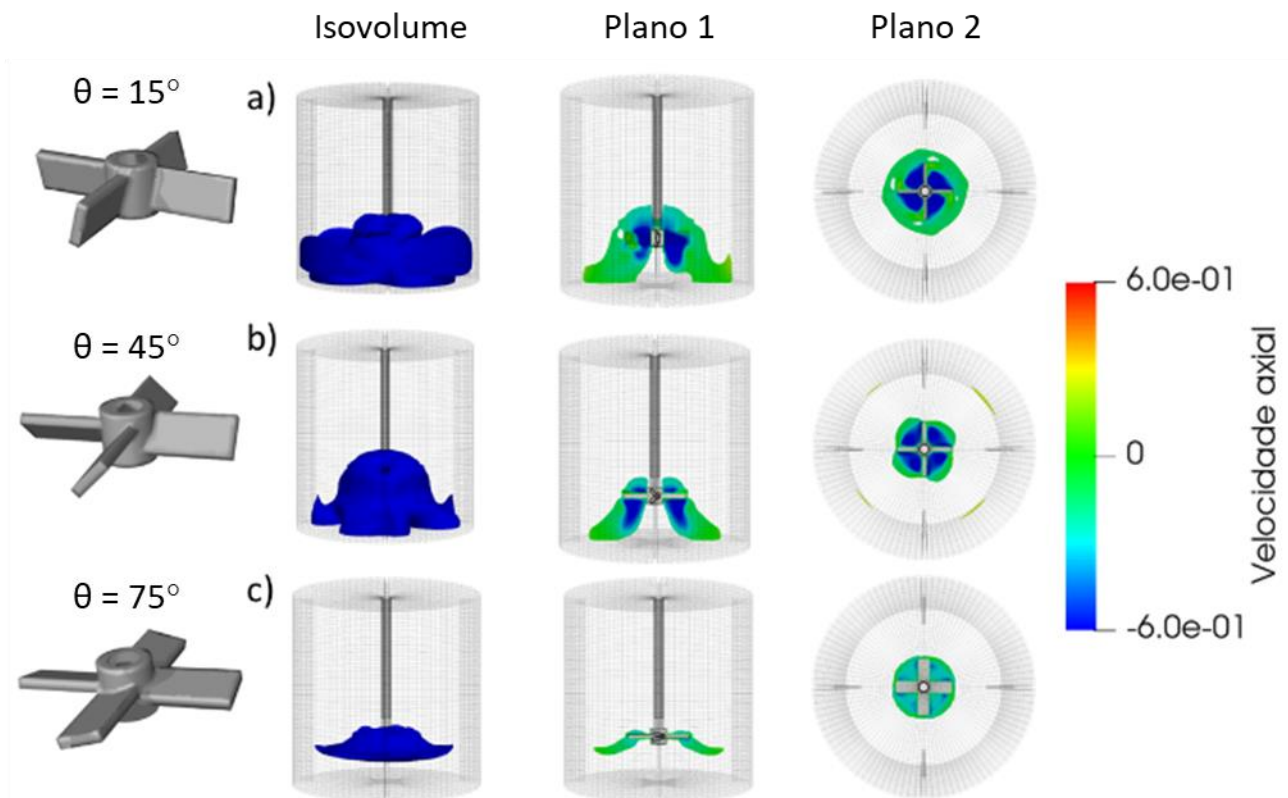


Figura 5: Efeito da angulação das pás dos impelidores na velocidade axial.

De modo a corroborar com a análise realizada na Figura 4, foi também avaliado o efeito da angulação das pás na componente axial de velocidade (Figura 5).

A componente axial da velocidade apresenta-se como uma variável de fundamental importância para suspensão de sólidos. As velocidades negativas indicam que a direção é oposta à do eixo de referência, ou seja, são direcionadas para o fundo do tanque, enquanto as velocidades positivas indicam um fluxo ascendente, em direção ao topo do reator.

No Plano 2, observa-se que o escoamento é predominantemente descendente na região central, próximo ao impelidor, e ascendente próximo às paredes, formando assim uma região de recirculação de sólidos.

É possível identificar na Figura 5 que, para a angulação de 15°, a intensidade do fluxo na direção axial foi mais acentuada, devido ao maior direcionamento do fluxo nesta direção.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados da variável resposta proposta neste estudo: altura máxima normalizada do campo de velocidade superior a velocidade terminal da partícula ( $H_{vt}$ ) em relação a variação do ângulo das pás.

Tabela 3 - Efeito do ângulo das pás do impelidor sobre  $H_{vt}$ .

Vr (rpm)	$\theta$ (°)	N.P. (-)	D/T (-)	$H_{vt}$ (-)
718	15°	4	0,3	0,43
718	45°	4	0,3	0,36
718	75°	4	0,3	0,30

Observa-se uma relação inversamente proporcional, na região avaliada, entre o aumento da inclinação e a variável resposta. Esta resposta encontra-se em consonância com a avaliação qualitativa apresentada na Figura 5.

Este fato deve-se a forma com que o fluxo é direcionado ao se chocar com as pás. Murthy e Josh (Murthy and Joshi, 2008) avaliaram a influência da inclinação das pás entre 30° e 60° em seu trabalho. Os autores afirmam que a redução da inclinação das pás até a angulação de 30° favorece o fluxo axial em detrimento do

radial, este trabalho apresenta uma tendência de comportamento semelhante para uma faixa mais ampla, entre 15° e 75°.

### Efeito do Número das pás (NP)

As Figuras 6 e 7 apresentam os perfis da influência do número de pás na magnitude de velocidade e na sua componente axial, respectivamente, avaliados no Plano 1 e no Plano 2. A configuração selecionada para avaliação deste efeito foi a que apresenta impelidor com pás inclinadas em 45°, diâmetro de 0,3T e velocidade de rotação do impelidor de 718 rpm.

A partir da análise das Figuras 6 e 7, observa-se, principalmente no Plano 2, a influência da intensidade radial conforme o número de pás é aumentado, fazendo com que o fluido alcance as paredes do tanque com velocidade superior a velocidade terminal das partículas em estudo. Entretanto, apesar do aumento do número de pás intensificar a dispersão radial, deve-se levar em consideração o aumento do torque necessário para a movimentação do impelidor e consequente custos com equipamento (Suzanne M. Kresta et al., 2016).

Na Tabela 4 é apresentado os resultados da variável resposta  $H_{vt}$  em relação ao número de pás do impelidor.

Tabela 4 - Efeito do número de pás do impelidor sobre  $H_{vt}$ .

Vr (rpm)	$\theta$ (°)	N.P. (-)	D/T (-)	$H_{vt}$ (-)
718	45°	2	0,3	0,38
718	45°	4	0,3	0,36
718	45°	6	0,3	0,39

A partir da análise da Tabela 4, é possível avaliar que a variação do número de pás do impelidor apresenta pouca influência sobre a variável  $H_{vt}$ . Este comportamento deve-se ao fato de que a elevação do número de pás está relacionada ao fluxo radial do fluido. Kumaresan e Joshi, ao avaliar o efeito do número de pás observaram comportamento semelhante (Kumaresan and Joshi, 2006).

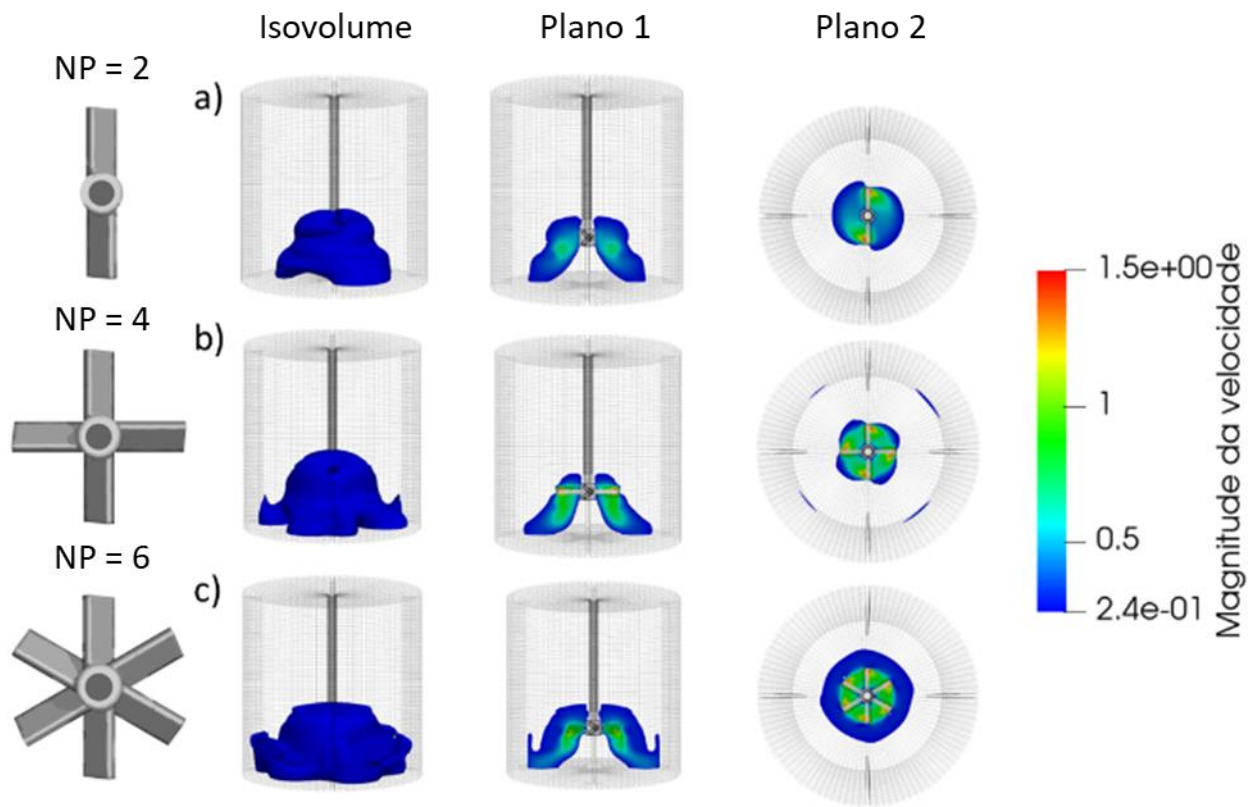


Figura 6: Efeito do número de pás dos impelidores na magnitude de velocidade.

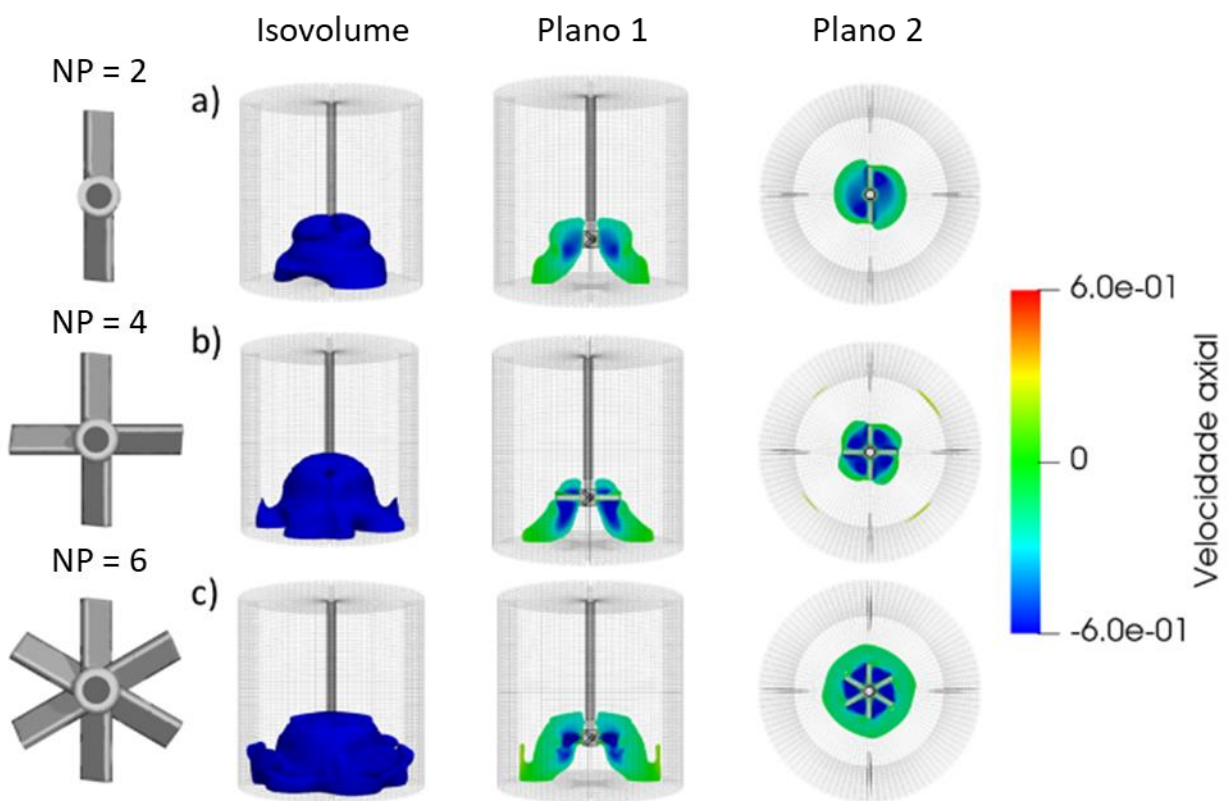


Figura 7: Efeito do número de pás dos impelidores na velocidade axial.

### Efeito da razão do diâmetro do Impelidor (D/T)

As Figuras 8 e 9 apresentam os perfis da influência da razão entre o diâmetro do impelidor e a altura do tanque na magnitude de velocidade e na sua componente axial, respectivamente, avaliados no Plano 1 e no Plano 2. A configuração selecionada para avaliação deste efeito foi a que apresenta impelidor com quatro pás inclinadas em 45° e velocidade de rotação do impelidor de 718 rpm.

É possível observar a partir da análise das Figuras 8 e 9 que com o aumento do diâmetro do impelidor uma maior região com campo de magnitude de velocidade e velocidade axial, sendo este fato associado a uma maior quantidade de movimento para o fluido devido a maior área de contato superficial. Todavia, com a elevação desta área de contato não apenas eleva-se as taxas de transferência de quantidade de movimento como também o torque necessário para movimentação dos impelidores utilizados.

A Tabela 5 ilustra quantitativamente a influência que o aumento do diâmetro do impelidor sobre a suspensão de sólidos.

Tabela 5 - Efeito da razão entre o diâmetro do impelidor e a altura do tanque sobre  $H_{vt}$ .

Vr (rpm)	$\theta$ (°)	N.P. (-)	D/T (-)	$H_{vt}$ (-)
718	45°	4	0,1	0,30
718	45°	4	0,3	0,36
718	45°	4	0,5	0,65

Assim como avaliado qualitativamente nas Figuras 8 e 9, a partir da avaliação da Tabela 5, nota-se que inicialmente a elevação do valor de D/T de 0,1 para 0,3 promoveu um incremento em  $H_{vt}$  de 20%. Todavia, para um mesmo aumento em D/T, entretanto partindo do valor de 0,3 para 0,5, a variável resposta foi elevada em 30%, demonstrando que a influencia da razão de tamanho dar-se de modo não linear e ou até mesmo apresentando interação com as demais variáveis, sendo assim necessário a avaliação do planejamento de forma completa.

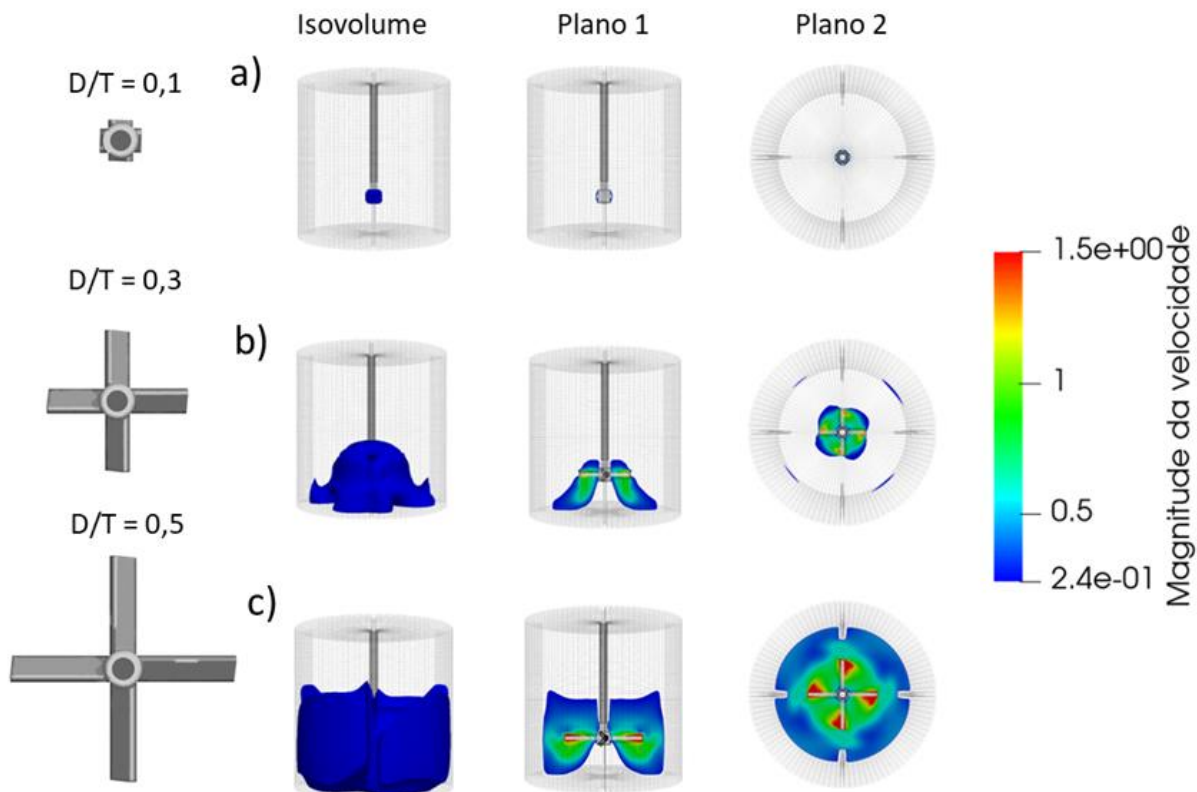


Figura 8: Efeito da razão entre o diâmetro do impelidor e a altura do tanque na magnitude de velocidade.

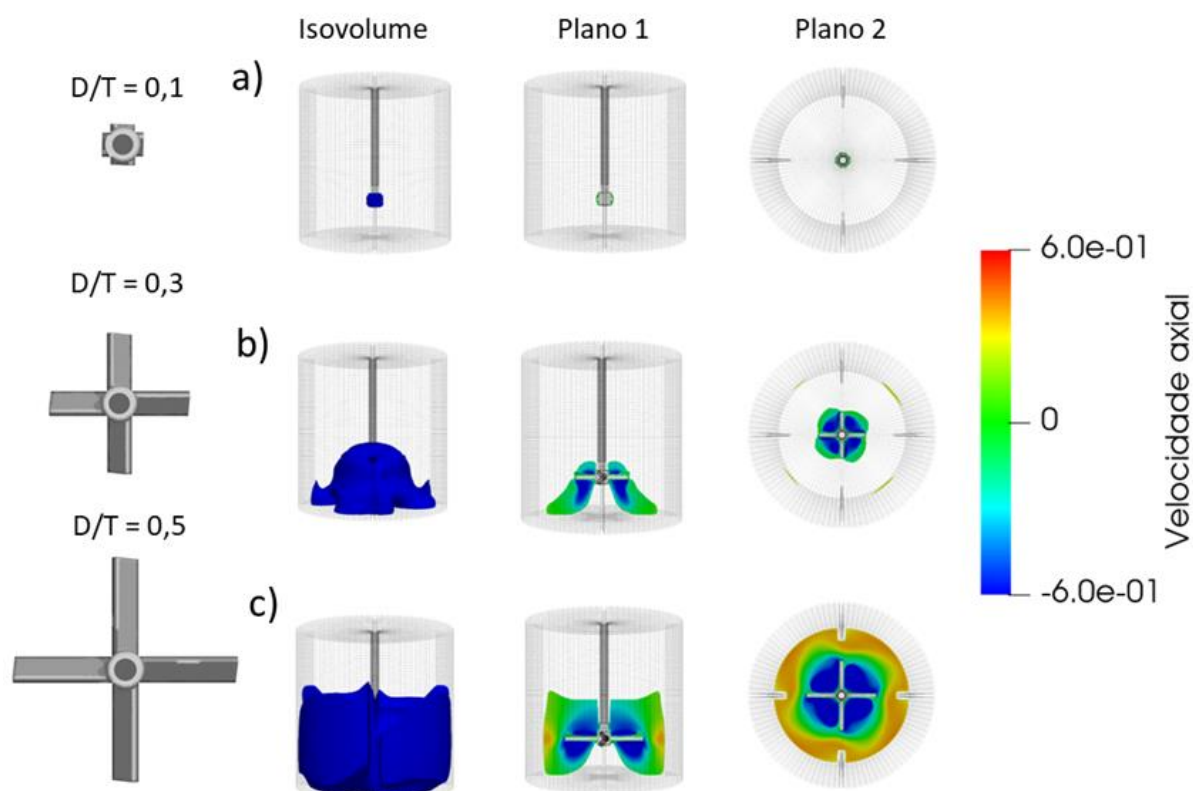


Figura 9: Efeito da razão entre o diâmetro do impelidor e a altura do tanque na velocidade axial.

#### Avaliação do planejamento experimental

Considerando todas as simulações numéricas (1-15), os valores de  $H_{vt}$  variaram de 0,297 a 0,654. A expressão para predição de  $H_{vt}$ , Equação 2, foi ajustada aos dados presentes na Tabela 6 usando técnicas de regressão múltipla, apresentando coeficiente de correlação ( $r^2$ ) de 0,99, permitindo, assim, quantificar os efeitos das variáveis independentes sobre a resposta.

$$H_{vt} = 0,3586 - 0,0413 \cdot x_1 + 0,0923 \cdot (x_2) + 0,0923 \cdot (x_2)^2 + 0,0069x_3^2 - 0,0499 \cdot x_1 \cdot (x_2) \quad (2)$$

$$x_1 = \frac{\theta - 45^\circ}{15^\circ} \quad (3)$$

$$x_2 = D/T - 4 \quad (4)$$

$$x_3 = \frac{NP - 0,3}{0,1} \quad (5)$$

Tabela 6 - Planejamento Composto Central: Variáveis geométricas do impelidor sobre  $H_{vt}$ .

Simulação	$\theta$ (°)	N.P. (-)	D/T (-)	$H_{vt}$ (-)	Simulação	$\theta$ (°)	N.P. (-)	D/T (-)	$H_{vt}$ (-)
1	30° (-1)	0,2 (-1)	3 (-1)	0,31	9	15° (- $\alpha$ )	0,3 (0)	4 (0)	0,43
2	30° (-1)	0,2 (-1)	5 (+1)	0,30	10	75° (+ $\alpha$ )	0,3 (0)	4 (0)	0,30
3	30° (-1)	0,4 (+1)	3 (-1)	0,59	11	45° (0)	0,1 (- $\alpha$ )	4 (0)	0,30
4	30° (-1)	0,4 (+1)	5 (+1)	0,60	12	45° (0)	0,5 (+ $\alpha$ )	4 (0)	0,65
5	60° (+1)	0,2 (-1)	3 (-1)	0,30	13	45° (0)	0,3 (0)	2 (- $\alpha$ )	0,38
6	60° (+1)	0,2 (-1)	5 (+1)	0,30	14	45° (0)	0,3 (0)	6 (+ $\alpha$ )	0,39
7	60° (+1)	0,4 (+1)	3 (-1)	0,38	15	45° (0)	0,3 (0)	4 (0)	0,36
8	60° (+1)	0,4 (+1)	5 (+1)	0,40					



A partir da análise da regressão e dos gráficos de superfície de resposta (Figura 10), verifica-se que tanto a inclinação das pás quanto a razão entre o diâmetro do impelidor e a altura do tanque apresentam influência

significativa lineares sobre as respostas, corroborando com as análises dos fatores realizada de forma individual anteriormente.

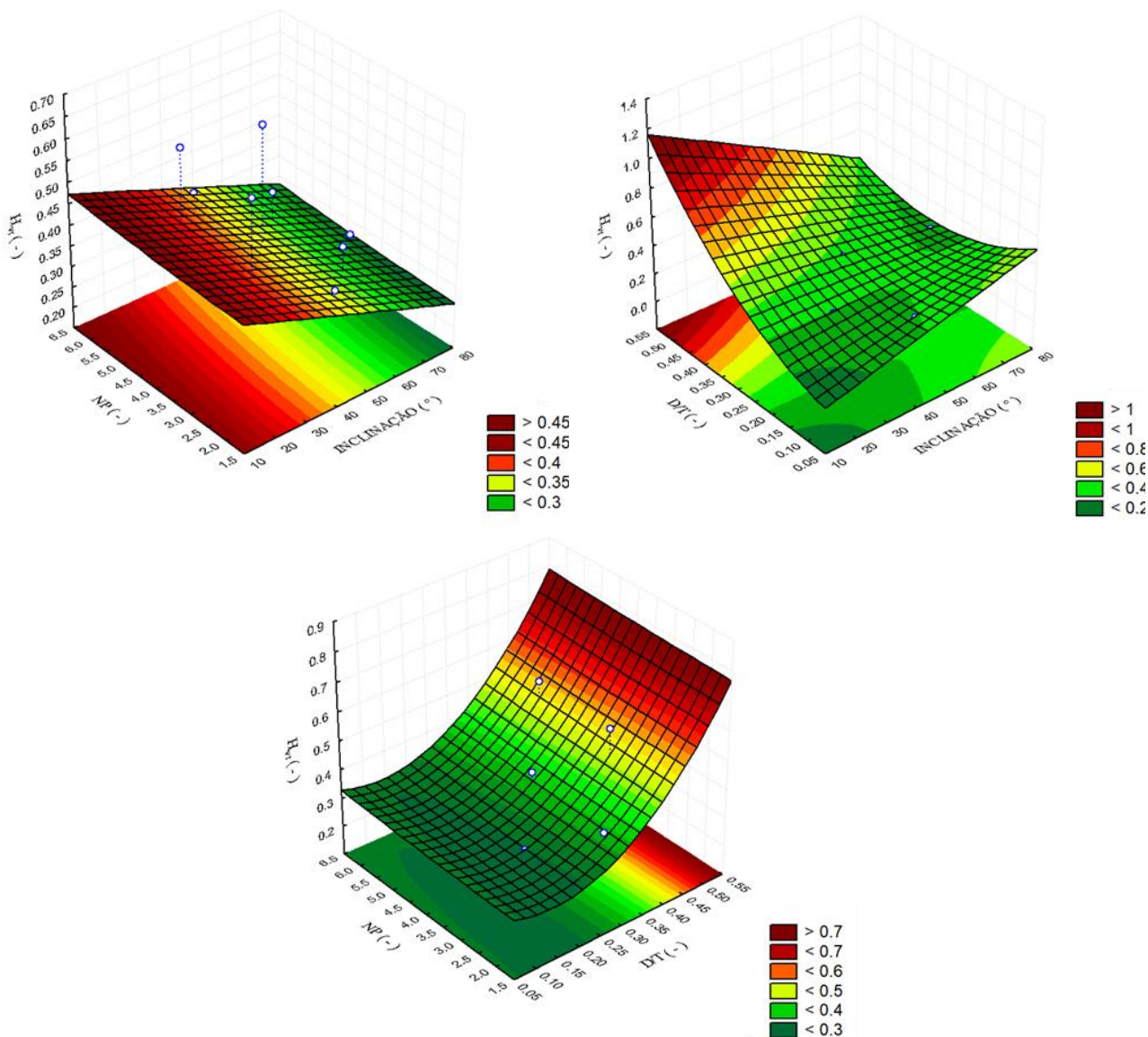


Figura 10: Superfície de resposta para avaliação das variáveis: Inclinação, número de pás e razão entre o diâmetro do impelidor e a altura do tanque sobre o  $H_{vt}$ .

## CONCLUSÃO

As análises realizadas para o efeito do ângulo das pás do impelidor sobre  $H_{vt}$  mostrou a relação inversamente proporcional que a redução da angulação gera sobre  $H_{vt}$  devido ao direcionamento do fluxo ao se chocar com as pás fazendo com que haja um favorecimento do fluxo axial em relação ao fluxo radial.

Nas análises relacionadas ao efeito do número de pás sobre a variável resposta, foi

possível avaliar que a variação do número de pás do impelidor apresenta pouca influência sobre a variável  $H_{vt}$ . O comportamento deve-se ao fato de que a elevação do número de pás está relacionada ao fluxo radial do fluido e gera aumento do torque necessário para a movimentação do impelidor e conseqüente custos com equipamento.

Também foi possível verificar a influencia da razão do diâmetro do impelidor sobre a variável resposta em que o aumento do

diâmetro do impelidor gerou uma maior região de campo de magnitude de velocidade e velocidade axial, sendo tal fato atrelado a uma maior quantidade de movimento para o fluido devido a maior área de contato superficial. Entretanto, com a elevação da área de contato não apenas eleva-se as taxas de transferência de quantidade de movimento como também o torque necessário para movimentação dos impelidores utilizados gerando mais uma vez custos ao equipamento. Por fim, a análise da regressão e dos gráficos de superfície de resposta, confirmou que tanto a inclinação das pás quanto a razão entre o diâmetro do impelidor e a altura do tanque apresentam influência significativa lineares sobre as respostas.

### NOMENCLATURA

<b>H</b>	Altura do tanque	mm
<b>D</b>	Diâmetro do tanque	mm
<b><math>\theta</math></b>	Angulação entre as pás	°
<b>D/T</b>	Razão entre o diâmetro do impelidor e a altura do tanque	
<b>N.P.</b>	Número de pás	
<b><math>v_r</math></b>	Velocidade terminal das partículas	m/s

### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com Laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos (LASSOP) e à Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

### REFERÊNCIAS

- Brodny, J., Tutak, M., 2021. Applying computational fluid dynamics in research on ventilation safety during underground hard coal mining: A systematic literature review. *Process Safety and Environmental Protection* 151, 373–400. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.05.029>
- Changi, S.M., Wong, S.W., 2016. Kinetics Model for Designing Grignard Reactions in Batch or Flow Operations. *Organic Process Research and Development* 20, 525–539. <https://doi.org/10.1021/acs.oprd.5b00281>
- Gu, D., Ye, M., Liu, Z., 2020. Computational fluid dynamics simulation of solid-liquid suspension characteristics in a stirred tank with punched circle package impellers. *International Journal of Chemical Reactor Engineering* 18. <https://doi.org/10.1515/ijcre-2020-0026>
- Jadidi, B., Ebrahimi, M., Ein-Mozaffari, F., Lohi, A., 2023. Mixing and segregation assessment of bi-disperse solid particles in a double paddle mixer. *Particuology* 74, 184–199. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2022.06.006>
- Kazemzadeh, A., Ein-Mozaffari, F., Lohi, A., 2020. Hydrodynamics of solid and liquid phases in a mixing tank containing high solid loading slurry of large particles via tomography and computational fluid dynamics. *Powder Technology* 360, 635–648. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.040>
- Kumaresan, T., Joshi, J.B., 2006. Effect of impeller design on the flow pattern and mixing in stirred tanks. *Chemical Engineering Journal* 115, 173–193. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2005.10.002>
- Murthy, B.N., Joshi, J.B., 2008. Assessment of standard k -  $\epsilon$ , RSM and LES turbulence models in a baffled stirred vessel agitated by various impeller designs. *Chemical Engineering Science* 63, 5468–5495. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.06.019>
- Ochieng, A., Onyango, M.S., 2010. CFD simulation of solids suspension in stirred tanks: Review. *Hemijaska Industrija* 64, 365–374. <https://doi.org/10.2298/HEMIND100714051O>
- Patil, H., Patel, A.K., Pant, H.J., Venu Vinod, A., 2021. CFD simulation model for mixing tank using multiple reference frame (MRF) impeller rotation. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 27, 200–209. <https://doi.org/10.1080/09715010.2018.1535921>
- Peiter, A.S., 2017. Estudo experimental, simulação e modelagem do efeito de agitação e mistura no processo da

produção de biodiesel de soja (*Glycine max*) metílico e etílico 200.

Scargiali, F., Brucato, A., Micale, G., Tamburini, A., 2020. On the reduction of power consumption in vortexing unbaffled bioslurry reactors. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 59, 8037–8045.

<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c00726>

Stuparu, A., Susan-Resiga, R., Bosioc, A., 2021. CFD simulation of solid suspension for a liquid–solid industrial stirred reactor. *Applied Sciences (Switzerland)* 11. <https://doi.org/10.3390/app11125705>

Suzanne M. Kresta, Arthur W. Etchells III, David S. Dickey, Victor A. Atiemo-Obeng, 2016. *Advances in industrial mixing a companion to the Handbook of industrial mixing*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ.

Tamburini, A., Cipollina, A., Micale, G., Brucato, A., Ciofalo, M., 2012. CFD simulations of dense solid-liquid suspensions in baffled stirred tanks: Prediction of the minimum impeller speed for complete suspension. *Chemical Engineering Journal* 193–194, 234–255. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.04.044>

Xie, L., Luo, Z.H., 2018. Modeling and simulation of the influences of particle-particle interactions on dense solid–liquid suspensions in stirred vessels. *Chemical Engineering Science* 176, 439–453. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.11.017>