



RYO SATO¹, PAULA T da SILVA¹, HELDER L de MOURA¹, RODRIGO de L AMARAL² e GUILHERME J de CASTILHO¹

¹ Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Departamento de Engenharia de Processos

² Universidade de São Paulo, POLI, Departamento de Engenharia Mecânica, NDF
E-mail para contato: r205631@dac.unicamp.br; guijcas@unicamp.br

Resumo

Resumo - O trabalho realizado por esta iniciação científica simulou 2 sistemas de escoamento turbulento em um tanque de mistura com impelidores de pás inclinadas à 45 ° (PBT 45). Neste contexto, utilizou-se dois tipos de impelidores PBT 45, sendo o primeiro com bombeamento ascendente e o segundo com bombeamento descendente, respectivamente, PBTU e PBTD 45°. As simulações foram criadas para avaliar se há uma maior eficiência de mistura pela alteração do sentido do bombeamento axial. Para isso, analisou-se a distribuição de velocidade no volume do tanque, e calculou-se o parâmetro denominado índice de mistura apresentada por (Mavros e Baudou, 1997; Aubin et al., 2001) para quantificar a eficiência da mistura pelos dois impelidores desse estudo. A partir dos campos de velocidade média obtido não foi possível encontrar uma diferença que pudesse considerar uma maior eficiência de um sistema acima do outro. Entretanto, o índice de mistura para a configuração PBTU apresentou um valor de 3% maior que a configuração PBTD.. As simulações foram conduzidas no *software open source*, denominado *OpenFOAM*.

1. Introdução

Sistemas de tanques de mistura tem inúmeras aplicabilidades em diversos processos industriais, como fermentação, polimerização, entre outros. Isso é possível graças ao seu bom desempenho no processo de mistura por agitadores mecânicos. Uma mistura eficiente nestes sistemas de agitação ocorre mediante um contato eficiente entre as fases e uma alta taxa de transferência de calor, massa e momento (BASHIRI et al., 2016).

O sistema de agitação básico é composto por um tanque, seja ele abaulado ou reto, acessórios como, chicanas, e um ou mais agitadores, este último, também chamado de impelidor. A chicana age redirecionando os fluxos, auxiliando no processo da mistura, assim como evitando a formação de vortex, enquanto o impelidor é o responsável por transferir a energia cinética para o fluido. Para otimizar esse sistema de forma que atenda de maneira mais eficiente o objetivo de mistura, é preciso entender a fluidodinâmica do processo. Um método para resolução deste problema são experimentos de visualização do escoamento, porém esses métodos podem requerer maiores custos de implementação, uma vez que reatores industriais podem chegar a escalas de vários metros. Assim, uma alternativa é o uso de simulações computacionais da fluidodinâmica (CFD) do escoamento de interesse.

Porém o processo de simulação não é simples, uma vez que em tanques agitados, os processos ocorrem, em grande parte, em regime turbulento. As simulações em regime



turbulento são mais complexas, e podem requerer um maior poder computacional, especialmente em sistemas com geometria complexa.

O uso de softwares em código aberto, como o OpenFOAM, é recente, especialmente para simulações de tanques de agitação, onde a maioria das simulações foram efetuadas por softwares comerciais, como FLUENT (Aubin et al., 2006; Ge et al., 2014).

Dessa maneira, neste trabalho todas as etapas da simulação, desde a confecção da geometria e malha ao setup das simulações foram efetuadas em código aberto, OpenFOAM, uma vez que foi considerado a importância de trazer conhecimento sobre um software de simulação gratuito e avaliar a implementação das ferramentas em CFD neste software para o contexto de agitação de tanques.

O objetivo deste trabalho foi de investigar o efeito da configuração axial do impelidor PBT 45 no escoamento em um tanque agitado por meio da fluidodinâmica computacional utilizando OpenFOAM. A partir desse estudo foi possível determinar o campo de velocidade média e o índice de agitação para avaliar o desempenho do impelidor PBT 45 nas configurações axiais ascendente (PBTU) e descendente (PBDT).

2. Materiais e métodos

O sistema de agitação compõe um tanque cilíndrico abaulado de 50L, de altura (H) igual 0,38 m, sendo a mesma medida que o diâmetro (T), ($H=T$). Além disso, 4 chicanas foram dispostas ao seu redor, com largura (B) ($B = 0,11 T$). O impelidor PBT 45 foi posicionado a uma distância (C) do fundo igual a um terço do diâmetro do tanque, $C / T = 1/3$. A agitação ocorreu em regime turbulento, cujo número de Reynolds obtido ($Re = \rho N D^2 / \mu \cong 1,7 \cdot 10^5$) foi descrito em termos da velocidade rotacional do impelidor ($N = 660$ rpm), seu diâmetro ($D = 0,125$ m), massa específica e viscosidade da água à 25 °C.

Para a simulação foi criada a malha do sistema, esta composta por dois domínios computacionais. O domínio estacionário foi obtido por uma malha hexahédrica estruturada (*O-grid*). Para o domínio rotativo, que consiste em uma região ao redor do impelidor, foi utilizada uma malha hexahédrica não estruturada, resultando em um domínio com um total de 1,6 milhões de células computacionais totais.

Definido a malha, escolheu-se a metodologia para obtenção dos resultados da simulação, para a obtenção do campo de velocidade. Utilizou-se o método *multiple reference frames – MRF* para a modelagem do sistema rotativo. As simulações foram resolvidas em estado estacionário para um fluido incompressível, por meio do *solver SIMPLE*. Quanto a solução do escoamento turbulento, foi utilizado o método *Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS)*, modelo baseado nas soluções das equações de Navier – Stokes considerando o pressuposto de isotropia da viscosidade turbulenta. Utilizou o modelo de fechamento de duas equações *Standard k-ε*.

Obtido os dados de velocidade média pelas simulações, a eficiência das duas configurações de agitação foi avaliada por meio do campo de velocidade média, distribuição de velocidade no volume do tanque e índice de agitação. A propriedade de índice de agitação foi definido por Mavros e Baudou (1997) para avaliar a efetividade de agitação do impelidor, a definição e formulas estão apresentadas no artigos.



3. Resultados e discussões

A Figura 1 descreve a frequência de velocidade no volume do tanque para o PBTB (Figura 1-a) e PBTU (Figura 1-b). Além disso, essa Figura apresenta os campos de velocidade média normalizada pela velocidade na ponta do impelidor para PBTB (Figura 1-c) para PBTU (Figura 1-d).

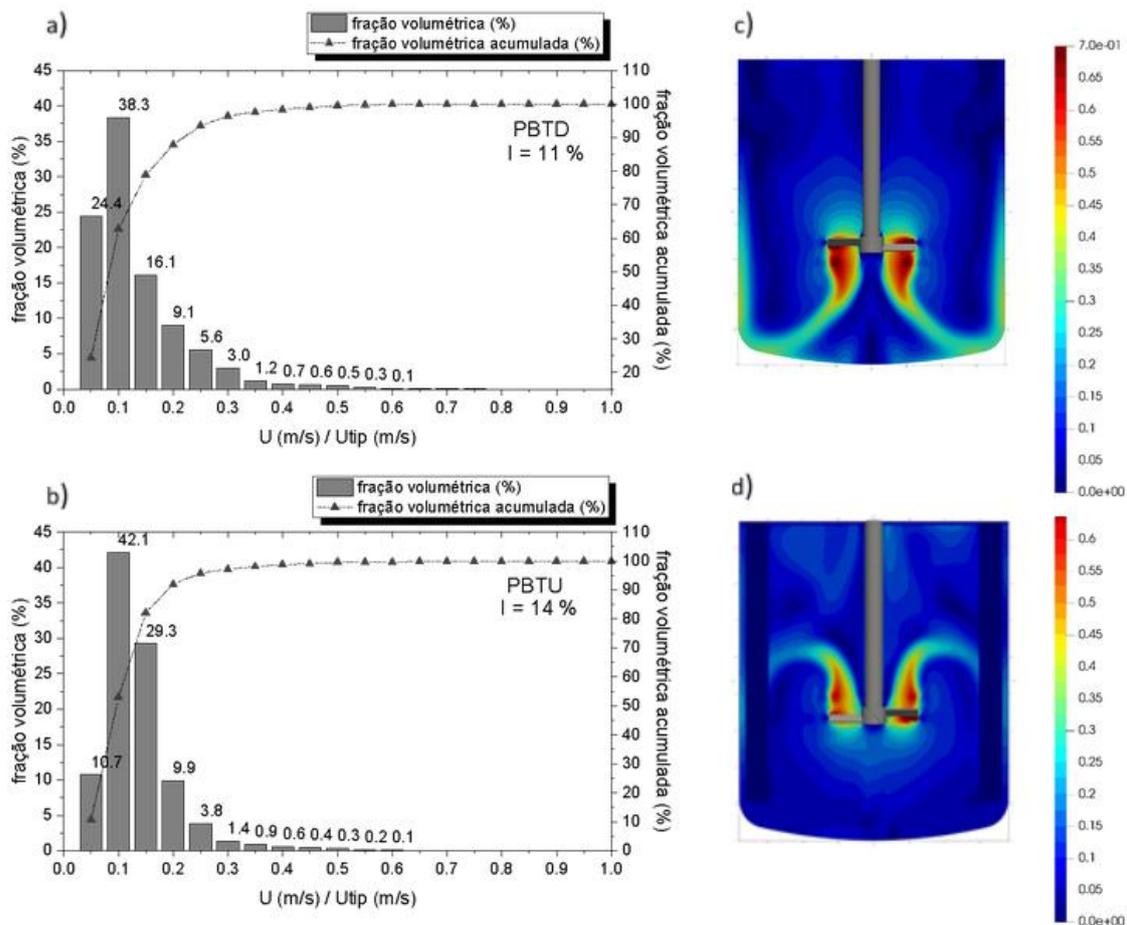


Figura 1 – Representação da frequência de velocidade no volume nas configurações do PBT: **1-a.** PBTB, **1-b.** PBTU; Campo de velocidade médio: **1-c.** PBTB, **1-d.** PBTU.

Nas Figuras 1-c e 1-d é possível verificar o mesmo formato de jato, na forma de J, se diferenciando no sentido desse jato. Quanto as velocidades, esta é dada pelo valor normalizado que é a velocidade da posição dividido pela velocidade na ponta do impelidor, percebe-se uma maior magnitude de velocidade próximo ao impelidor no valor aproximado de 0.7, acompanhando o caminho do fluxo a velocidade vai diminuindo estendendo até a parede do tanque, onde o fluxo é reciclado, e o resto do sistema apresenta velocidades baixas próximas de 0. Quanto ao sentido do fluxo, o sistema PBTB apresenta um movimento do fluido inicial de baixo para cima, enquanto o sistema PBTU apresenta um movimento do fluido de cima para baixo.



As Figuras 1-a e 1-b permitem comparar as distribuições de frequência de velocidade para os dois casos, sendo que ambas mostraram que a maior parte do volume do tanque circula com velocidades baixas com valores entre $0,05 - 0,25 U/U_{tip}$. Essa região de baixa velocidade média caracteriza a circulação global do tanque e, no caso do PBTU, a frequência dessa faixa de velocidade ($0,05-0,25$) no volume é aproximadamente 30% maior do que a configuração PBDT, que apresenta um acumulado de 68,1% para a mesma região. Essa diferença reflete no cálculo do índice de mistura e consequentemente na efetividade de agitação. Os índices de mistura encontrados foram de 11% e 14% para o PBDT e PBTU, respectivamente. Tais resultados indicam que, para o sistema de agitação turbulenta avaliado neste trabalho, há melhor efetividade de mistura e, portando, melhor circulação, quando se utiliza o ângulo de bombeamento ascendente.

4. Conclusão

Foi possível fazer a análise do escoamento de interesse com o *software open source OpenFoam*, obtendo 2 sistemas de agitação distintos: PBDT, com bombeamento descendente, e PBTU, com bombeamento ascendente, com modelos de turbulência Standard k- ϵ . Assim dos campos de velocidade média obtido não foi possível encontrar uma diferença que pudesse considerar uma maior eficiência de um sistema acima do outro. Entretanto a propriedade de índice de mistura encontrada no gráfico de frequência de velocidades apresenta um valor de 3% maior para configuração PBTU seguindo a lógica de resultados obtidos por Aubin et al. (2001) que efetuaram a análise similar para os mesmos tipos impelidores, porém com 6 pás, indicando assim uma maior eficiência de mistura para os sistemas PBTU.

5. Referencias

- AMIRA, B. B.; DRISS, Z.; ABID, M. S. Experimental study of the up-pitching blade effect with a PIV application. *Elsevier*, v. 102, p. 95–104, 2015.
- AUBIN, J.; FLETCHER, D.; XUEREB, C. Modeling turbulent flow in stirred tanks with CFD : the influence of the modeling approach , turbulence model and numerical scheme. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 28, p. 431–445, 2006.
- BHATTACHARYA, S. ; KRESTA, S. M. Surface feed with minimum by-product formation for competitive reactions. *ICHEME*, v. 82, p. 1153–1160, 2004.
- BOON, L. A. *et al.* Comparing a range of impellers for ‘ stirring as foam disruption ’. *Biochemical Engineering Journal*, v. 10, p. 183–195, 2002.
- HICKS, M. T.; MYERS, K. J.; BAKKER, A. Cloud height in solids suspension agitation. *Chemical Engineering Communications*, v. 160, p. 137–155, 1997.
- MAVROS, P.; BAUDOU, C. QUANTIFICATION OF THE PERFORMANCE OF AGITATORS IN STIRRED VESSELS: Definition and Use of an Agitation Index. *ICHEME*, V. 75, p. 737–74, 1997.



SARDEING, R.; AUBIN, J. ; XUEREB, C. GAS – LIQUID MASS TRANSFER: A Comparison of Down- and Up-pumping Axial Flow Impellers with Radial Impellers. *ICHEME*, v. 82, p. 1589–1596, 2004.

AMIRA, B. B.; DRISS, Z.; ABID, M. S. Experimental study of the up-pitching blade effect with a PIV application. *Elsevier*, v. 102, p. 95–104, 2015.

AUBIN, J.; FLETCHER, D.; XUEREB, C. Modeling turbulent flow in stirred tanks with CFD : the influence of the modeling approach , turbulence model and numerical scheme. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 28, p. 431–445, 2006.

BHATTACHARYA, S. ; KRESTA, S. M. Surface feed with minimum by-product formation for competitive reactions. *ICHEME*, v. 82, p. 1153–1160, 2004.

BOON, L. A. *et al.* Comparing a range of impellers for ‘ stirring as foam disruption ’. *Biochemical Engineering Journal*, v. 10, p. 183–195, 2002.

HICKS, M. T.; MYERS, K. J.; BAKKER, A. Cloud height in solids suspension agitation. *Chemical Engineering Communications*, v. 160, p. 137–155, 1997.

MAVROS, P.; BAUDOU, C. QUANTIFICATION OF THE PERFORMANCE OF AGITATORS IN STIRRED VESSELS: Definition and Use of an Agitation Index. *ICHEME*, V. 75, p. 737–74, 1997.

SARDEING, R.; AUBIN, J. ; XUEREB, C. GAS – LIQUID MASS TRANSFER: A Comparison f Down- and Up-pumping Axial Flow Impellers with Radial Impellers. *ICHEME*, v. 82, p. 1589–1596, 2004.