

Simulação numérica de um sistema de agitação laboratorial assistido por Computational Fluid Dynamics.

Aline Apolinário Uliana¹, Maykon Cargnin²

Resumo Os reatores de misturas possuem grande aplicabilidade na indústria química, onde umas das suas principais finalidades são a formação de misturas de reagentes e uniformização de temperatura. São compostos por chicanas e agitadores. As chicanas possuem como objetivo redirecionar os fluxos e auxiliar numa maior ação de mistura, já os agitadores possuem como função gerar a movimentação do fluido. Como forma de verificar a influência das chicanas, dos agitadores e da velocidade de rotação de reator de mistura, sobre a velocidade do fluido, tensão de cisalhamento, turbulência cinética e dissipativa, foram efetuadas simulações com base de uma geometria de um reator de bancada, a partir do software CFX comercializado pela ANSYS In, juntamente com testes de sensibilidade de malha. Nas simulações foram adotadas condições de contorno de escorregamento, escorregamento livre e de interface do tipo *Frozen Rotor* e o modelo de turbulência k- ϵ . Após os dados obtidos pelo software, realizou-se uma análise do planejamento fatorial 2^k , através do *software* Minitab 17. De acordo com os resultados da simulação, observou-se que em direção das pás, o campo de velocidade é maior em comparação com outras partes do tanque, já as chicanas promovem a redução de vórtices na mistura e a diminuição de velocidade em sua proximidade. Através da análise estatística pode-se notar uma maior influência da velocidade do rotor e do número de pás, no entanto as chicanas representam um papel importante no sistema de agitação. A utilização de um número menor de chicanas demonstrou alguns resultados não compatível a literatura, no entanto, pode-se observar que para sistemas com menor número de chicanas é mais aconselhável a utilização de outro sistema de turbulência. Por fim, os restantes dos resultados foram compatíveis com a literatura.

Palavras-chave sistema de agitação, CFD, turbulência, análise estatística.

✉ ¹ lineuliana@hotmail.com

✉ ² maykon.cargnin@unesc.net

1 Introdução

Os reatores de misturas são muito utilizados na indústria química para diversos tipos de operações, como a polimerização e misturas de reagentes. Essas operações requerem agitação do produto, para cumprir algumas finalidades, como formação de dispersões, transmissão de calor, uniformização de temperatura e mistura dos reagentes. Para isso é necessário o conhecimento do sistema de agitação, onde a geometria do tanque também se faz necessário para melhores condições do processo (Silva, 2002).

Conforme mencionado por Silva (2002), os equipamentos que integram o sistemas de agitação, são tanques de agitação, chicanas, agitadores e pode-se incluir serpentinas ou camisas para troca de calor. As chicanas são capas mecânicas que provocam um distúrbio ou redirecionamento dos fluxos, sendo mais usual a vertical. Elas promovem uma maior ação de mistura, dispersão e geralmente transporte, maximizam a transferência de potência para o fluido, minimizam a rotação sólida do fluido no tanque e previnem formação de um vórtice central. As camisas ou serpentinas são acessórios utilizados para manter a temperatura constante na operação.

Segundo Cremasco (2014), os agitadores tem como função provocar a movimentação do fluido e são classificados de acordo com sua geometria, onde têm-se turbinas, hélice e pás. As turbinas são caracterizadas por um ângulo inclinado com a vertical, onde sua mistura é dada pela entrada e descarga do fluido pelas lâminas nas turbinas com fluxo radial que atinge as paredes do recipientes, pode-se citar como exemplo as de pás retas 90 e pás inclinadas. A hélice é caracterizada pelo fluxo axial, transformando o movimento de rotação do motor em movimento linear, gerando bombeamento de rotação do motor, promovendo um menor tempo de mistura em relação as turbinas e pás. As pás constituem-se de duas ou mais lâminas na vertical, sendo sua principal vantagem a simplicidade. Pode-se citar exemplo o impelidor tipo âncora, que provoca um fluxo tangencial e normalmente utiliza-se raspadores. De acordo com Vergel (2013), dois dos mais empregados em regimes turbulentos são impelidores de pás retas e de pás inclinadas.

Segundo Lane et al (2000), as operações em tanques agitados são processos complexos, pois as variações do projeto necessitam da utilização de métodos mais precisos para obter resultados e entender os mecanismos de transferência de massa, energia e momento no interior do tanque. O modelo (CFD) tem grande aplicabilidade nos estudos de tanques agitados. Sua vantagem é a precisão nos resultados. No início dos anos 80, se teve crescente interesse em simulação de tanques de mistura por método (CFD), pois além da sua precisão, também é possível analisar parâmetros como, por exemplo, turbulência, energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação de energia turbulenta. Conforme Vergel (2013), além da estimativa de dados globais de eficiência, a simulação proporciona estimar o comportamento local dos sistemas de mistura, facilitando encontrar em pontos específicos a ineficiência da mistura, permitindo assim compreender melhor os fenômenos de transporte que acontecem no sistema.

O modelo de turbulência mais utilizado para tanques de mistura na modelagem é o modelo de turbulência κ - ϵ . Segundo Vergel (2013), este modelo é aplicável para uma ampla faixa de escoamentos turbulentos. Este é baseado nas análises de escoamento com alto número de Reynolds e assumindo uma turbulência isotrópica. O modelo κ - ϵ utiliza-se como variáveis a energia cinética turbulenta " κ " e a taxa de dissipação turbulenta " ϵ ". Segundo Deglon et al (2006), a limitação desse modelo, tem sido atribuída pela má previsão de quantidades de turbulência e, especialmente, a suposição de turbulência isotrópica. Conforme dados de alguns autores (Jenne e Reuss, 1999; Jaworski e Zakrzewska, 2002), onde fizeram comparações com modelos de κ - ϵ , Chen-kim e RNG, notaram pequenas variações em previsões de turbulência. Deglon et al (2006) sugeriram a utilização de modelos que não são baseados na hipótese de turbulência isotrópica, porém estudos demonstram que a utilização de turbulência não isotrópica apresentou perfis de energia cinética turbulenta com desvios maiores, fato que é demonstrado nos estudos de Jaworski e Zakrzewska (2002) onde obteve-se melhores resultados em métodos κ - ϵ e Chein- Kim.

Nogueira et al (2014) mostraram a influência dos tipos de chicanas no tanque de mistura, eles observaram que para todos os casos estudados obteve-se bombeamento descendente, concordando com as características de fluxo axial dos impelidores. No caso da chicana angular radial, o fluxo é impulsionado em direção a parede do tanque. Eles observaram que esse movimento favorece a redução do tempo de mistura do sistema, já as chicanas afastadas apresentam um padrão

mais circulatório, não auxiliando na homogeneização da mistura. A chicana padrão e a meia chicana apresentaram um fluxo mais intenso na região do eixo do impelidor do que as outras geometrias de chicana. Com isso pode-se observar que a chicana com ângulo reduz consideravelmente o tempo de mistura em relação a chicana padrão, apresentando resultados mais compatíveis.

Cides et al (2014) realizaram estudos por meio do CFD, para verificar a influência de um segundo impelidor na otimização de um tanque de mistura. Adicionaram um impelidor de pás inclinadas juntamente ao agitador tipo âncora já existente no processo. Os resultados apontaram uma mistura favorecida, por conta do impelidor PBT ajudar na recirculação axial do fluido com redução de até 80 vezes do tempo em fluidos altamente viscosos, porém foi observado o aumento na potência do sistema, em contrapartida a uma redução do tempo de operação, resultando num aumento de produtividade e menor gasto energético.

Estudos realizados por Lane (2000), tiveram como objetivo investigar melhorias nos métodos de modelagem de CFD aplicados a simulação de um tanque agitado. Verificaram e que a precisão da modelagem é dependente do uso de uma malha suficientemente alta de um design apropriado em combinação com uma escolha apropriada do modelo de turbulência. Analisou que o modelo κ - ϵ teve um desempenho inferior em relação ao método Shear Stress Transport (SST). A utilização de uma malha de 10,4 milhões de nós, com a maioria dos nós concentrados próximo ao impulsor, cerca de 90% da entrada de energia esperada poderia ser contabilizada pela integração das taxas de dissipação de energia sobre o volume do tanque, enquanto as malhas maiores não houve melhoras. Com ua maior densidade de malha, com 28 milhões de nós mostrou uma resolução maior nas estruturas de fluxos em torno das pás do impulsor, incluindo vórtices de arrasto e também demonstrou a presença de separação de fluxo sobre a parte da superfície da lâmina da pá. Lane (2000) recomenda a utilização de densidade de malha mais alta na região do impulsor, para obter resultados mais precisos nos parâmetros de turbulência e recomenda que a utilização da malha com 28 milhões de nós pode ser impraticável por conta da demanda computacional ser muito alta.

Segundo Barcelos (2016), a malha em simulação computacional exerce grande influência nos resultados, como no tempo de resolução do *solver*. Para malhas muito finas os resultados obtidos podem possuir divergências, podendo demorar muito tempo

para processar, porém malhas muito grosseiras podem afetar os resultados por conta das aproximações grosseiras para a convergência e deformar algumas regiões da geometria, como demonstrado nos resultados obtidos por Vergel (2012). Um dos aspectos que pode-se observar de acordo com Barcelos (2016), é o nível de assimetria (*Skewness*), calculado através da comparação do tamanho ideal da célula com seu tamanho real. Malhas com qualidade boa em simulações bidimensionais abrangem valores entre 0,25 a 0,5, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação de assimetria por qualidade de malha.

<i>Skewness</i>	Qualidade da malha
1	Corrompida
0.9 - <1	Ruim
0.75 - 0.9	Medíocre
0.5 - 0.75	Aceitável
0.25 - 0.5	Boa
>0 - 0.25	Excelente
0	Equilateral

Fonte: (Barcelos, 2016)

Quando deseja-se avaliar a influência de determinados tipos de parâmetros sobre uma variável, utilizando um conjunto otimizados de experimentos, o planejamento fatorial de experimentos, torna-se uma alternativa interessante. Conforme Montgomery (2013), entre os diversos tipos de planejamento, o planejamento fatorial é o mais utilizado, Ele possui como objetivo o estudo de dois ou mais fatores, tanto quantitativos quanto qualitativos, onde por meio de combinações dos níveis dos fatores pode-se conhecer como influencia determinado fenômeno.

De acordo com Segundo (2017), a quantidade de rodadas experimentais (n) de um planejamento fatorial está ligado a quantidade de fatores a serem estudados e de quantos níveis l (valores de um fator) será avaliado, através da relação $n = l^k$.

O presente artigo teve como objetivo verificar a influência da velocidade de rotação do impelidor, número de chicanas e número de pás no impelidor na velocidade do fluido, turbulência cinética e dissipativa e na tensão de cisalhamento nas paredes do tanque.

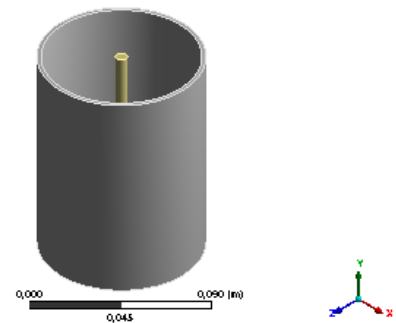
2 Materiais e métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o software CFX na versão 16.0 comercializado pela ANSYS Inc.

2.1 Geometria

A geometria utilizada para representar o reator no projeto de simulação foi baseada nas dimensões de um reator de bancada que encontra-se no laboratório de operações unitárias do Parque Científico e Tecnológico da Universidade do Extremo Sul Catarinense. Suas dimensões são de 84 mm diâmetro, com uma espessura de parede de 4 mm, e altura 110 mm. O desenho do reator foi realizado no módulo *Design Modeler* do software Ansys conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1 – Geometria do reator em análise.



Fonte: O autor (2018).

2.2 Malha computacional

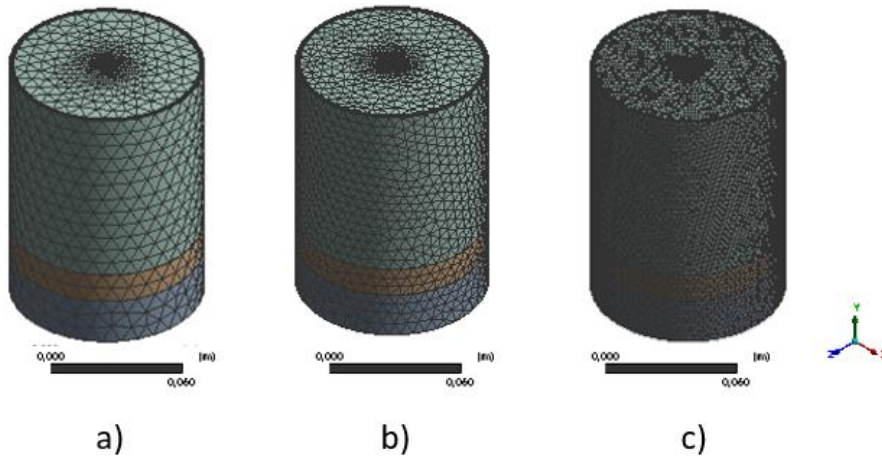
A malha computacional para as simulações deste estudo é obtida através do módulo *MeshingTM*, configurando-o para que seja obtida uma malha seguindo as especificações da Tabela 1.

As malhas foram geradas em formato triangular (não-estruturada) onde no sistema de agitação (rotor e pás) foi aplicado uma condição de refino de malhas, ou seja, a densidade de elementos nestas regiões é maior do que nas demais regiões do sistema, a fim de garantir uma melhor percepção do comportamento das variáveis nestas regiões.

O teste de malha foi realizado para verificar a necessidade do refinamento da malha utilizada na simulação. A análise foi realizada a partir da variação dos tamanhos da malha do fluido, onde adotou-se 3 variações, considerando assim, uma malha grosseira, uma mediana e outra refinada. Os valores de tamanhos adotados foram de 2,5 mm para refinada, 5,0 mm para a mediana e 7,5 mm para grosseira, conforme Figura 2. Adotou-se para estas simulações a velocidade de rotação do rotor como 10 rpm, com a ausência de chicanas e com a presença de duas pás no rotor. O tempo para realização das simulações foi adotado até que o sistema atingisse o estado estacionário (2000 s). O passo de avanço das simulações foi de 10 segundos. O monitoramento das velocidades foi realizado em pontos fixos no sistema localizados a 33 mm (ponto 3),

63 mm (ponto 5) e 93 mm (ponto 7) a partir do fundo do tanque e a 30 mm a partir do centro do tanque.

Figura 2 – Representação das malhas obtidas para o teste de independência de malha: a) 7,5 mm; b) 5,0 mm e c) 2,5 mm.



Fonte: o autor (2018).

2.3 Implementação do reator no software Ansys CFX

O fluido utilizado para a realização das simulações foi à água, considerando suas propriedades inseridas no banco de dados do Ansys CFX® na temperatura de 25 °C.

As condições de contorno do sistema foram estabelecidas como condições de não escorregamento (*no slip*) nas paredes do tanque em contato com o fluido. Na parte superior do tanque foi aplicada uma condição de escorregamento livre (*free slip*) e na região do sistema de agitação (rotor e eixo) foi imposta uma condição de interface do tipo *Frozen Rotor*. Este tipo de condição trata a transição do escoamento da componente rotativa para a componente fixa pela mudança do sistema de referência, mantendo a posição relativa dos componentes sem fazer médias das propriedades, possibilitando que as características locais do escoamento tais como recirculações e ondas de choque sejam transportadas através das interfaces. Este tipo de modelo causa um menor esforço computacional, tem uma robustez e capacidade de trabalhar com estruturas reduzidas em virtude da simetria e da periodicidade.

Para a interação da turbulência foi selecionado o modelo κ - ϵ , que conforme Maitelli (2010) e Sabino (2015), possui uma grande estabilidade numérica, uma confiabilidade no que diz respeito aos domínios fechados, e é muito aplicado para tanques de misturas. O modelo κ - ϵ introduz duas variáveis no sistema de equações, a energia cinética turbulenta “ κ ” e a taxa de dissipação de turbulência “ ϵ ”. O modelo é

fundamentado na presunção de que existe uma analogia entre a ação das tensões viscosas e as tensões de Reynolds no escoamento médio e também na existência da viscosidade turbulenta, que é calculada como uma função dos parâmetros de turbulência “ κ ” e “ ϵ ”. Foram utilizadas por meio do *software* as Equações 1, 2, 3 e 4 para análise do comportamento do fluido.

Equação 1 – Equação da continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0$$

Fonte: BIRD, 2017.

Equação 2 – Equação de movimento do fluido em r, θ, z

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial \rho}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} \right] + \rho g_r$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} - \frac{v_r v_\theta}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta} \right] + \rho g_\theta$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z$$

Fonte: BIRD, 2017.

Equação 3 – Equação de momento no modelo κ - ε .

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_m$$

Fonte: ANSYS, 2018.

Equação 4 – Viscosidade turbulenta

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Fonte: ANSYS, 2018.

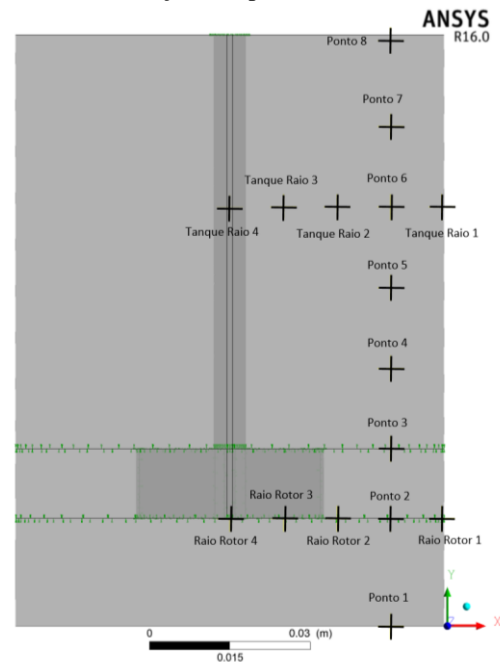
Foram implantados pontos de monitoramentos ao longo do reator para análise dos resultados, conforme descrito pela Tabela 2.

Tabela 2 – Localização dos pontos de monitoramento.

Pontos de monitoramentos	Coordenadas		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Ponto 1	30	0	0
Ponto 2	30	20	0
Ponto 3	30	33	0
Ponto 4	30	48	0
Ponto 5	30	63	0
Ponto 6	30	78	0
Ponto 7	30	93	0
Ponto 8	30	109	0
Raio Rotor 1	0	20	0
Raio Rotor 2	10	20	0
Raio Rotor 3	20	20	0
Raio Rotor 4	39,5	20	0
Raio Tanque 1	0	78	0
Raio Tanque 2	10	78	0
Raio Tanque 3	20	78	0
Raio Tanque 4	39,5	78	0

Fonte: o autor (2018).

Figura 3 – Localização dos pontos de monitoramento



Fonte: O autor (2018).

2.4 Planejamento fatorial de experimentos

A análise fatorial foi desenvolvida de acordo com a Tabela 3, onde tem-se os fatores e níveis que foram abordados nesse estudo. Cada fator possui dois níveis, um inferior (-) e um superior (+), tornando-se um planejamento fatorial 2^k . Como existem três fatores a serem analisados, têm-se 8 rodadas para cada observação dos efeitos dos fatores. Foi utilizado o Minitab 17 *Statistical Software* para a realização da análise, obtendo-se assim, os resultados desejados. Comumente é definido um ponto central e duas réplicas deste ponto a fim de identificar erros durante a realização dos experimentos, mas neste caso não tem-se a necessidade deste recurso, pois no caso de simulação, os resultados das réplicas serão idênticos.

Tabela 3 – Fatores e níveis definidos neste estudo para serem analisados nas simulações.

Fatores	Níveis	
	Codificação	Valores
Velocidade de rotação do rotor	-	10 RPM
	+	30 RPM
Número de chicanas	-	0
	+	2
Número de pás	-	2
	+	4

Fonte: o autor(2018).

A Tabela 4 apresenta o número de simulações a serem realizadas com as combinações entre os fatores que foram avaliados.

Tabela 4 – Simulações realizadas neste estudo.

Simulações	Velocidade de rotação do rotor	Número de chicanas	Número de pás
S01	-	-	-
S02	-	-	+
S03	-	+	-
S04	-	+	+
S05	+	-	-
S06	+	+	-
S07	+	+	+
S08	+	-	+

Fonte: o autor (2018).

3. Resultados e Discussões

3.1 Teste de independência de malha

Conforme descrito em Barcelos (2016), uma malha para ser considerada de excelente qualidade, deve apresentar uma condição de assimetria (*skewness*) entre 0 e 0,25. Todas as malhas apresentaram condição de assimetria dentro deste intervalo, o que garante uma boa resolução das equações nos elementos da malha, conforme demonstrado pela Tabela 5. À medida que o tamanho do elemento da malha diminui, a condição de assimetria também diminui, mas aumenta o número de nós e elementos o que demanda um maior esforço computacional para resolução das simulações.

Tabela 5 – Tabela de comparação dos tamanhos de malha.

Mesh	Skewness (média)	Tamanho dos elementos	Nós	Elementos
------	------------------	-----------------------	-----	-----------

		(mm)		
a	0,20962	7,5	74722	274634
b	0,20607	5,0	87879	308391
c	0,12882	2,5	183779	627029

Fonte: o autor (2018).

Os resultados apresentados pela Tabela 6 confirmam que com um maior refinamento da malha computacional, os valores de velocidade obtiveram pequenas alterações se comparados com o valor da malha mais refinada (2,5 mm). Logo, é possível fazer as demais simulações com um tamanho de elemento de malha igual a 5,0 mm.

Tabela 6 – Monitoramento das velocidades em pontos específicos.

Tamanho do elemento (mm)	Velocidades (m/s)		
	Ponto 3	Ponto 5	Ponto 7
7,5	3,65E-03	4,79E-03	4,83E-03
5,0	3,66E-03	4,86E-03	4,86E-03
2,5	3,68E-03	4,86E-03	4,86E-03

Fonte: o autor(2018).

Estes resultados também podem ser confirmados pelos perfis de velocidade no tempo de simulação igual a 1000 s apresentado na Figura 4. As diferenças entre os perfis de velocidade são muito pequenas, demonstrando que até mesmo, uma malha mais grosseira poderia ter sido utilizada.

3.2 Avaliação do comportamento do fluido.

Todas as simulações foram representadas por um tempo de 2000 segundos para análise dos dados. A Figura 5 apresenta o comportamento da velocidade do fluido para três condições de simulação: (a) 10 RPM, sem chicanas e 2 pás; (b) 10 RPM, sem chicanas e 4 pás; (c) 30 RPM, sem chicanas e 4 pás, localizada na região próxima ao superfície superior do rotor.

Figura 4 – Perfis de velocidades nas simulações de teste de malha: a) 7,5 mm; b) 5,0 mm e c) 2,5 mm.

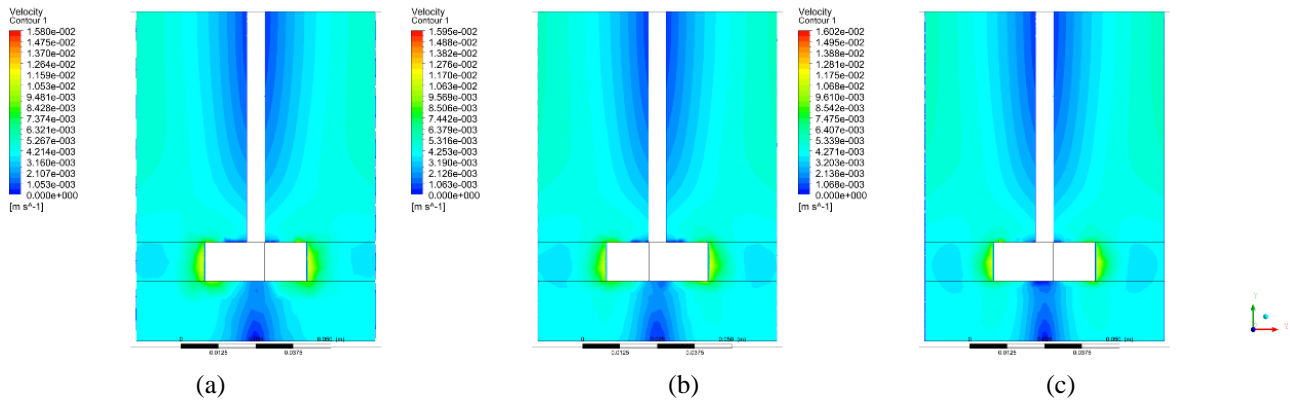


Figura 5 – Perfil de velocidade em relação as pás. (a) 10 RPM, sem chicana, 2 pás; (b) 10 RPM, sem chicana, 4 pás e (c) 30 RPM, sem chicana, 4 pás.

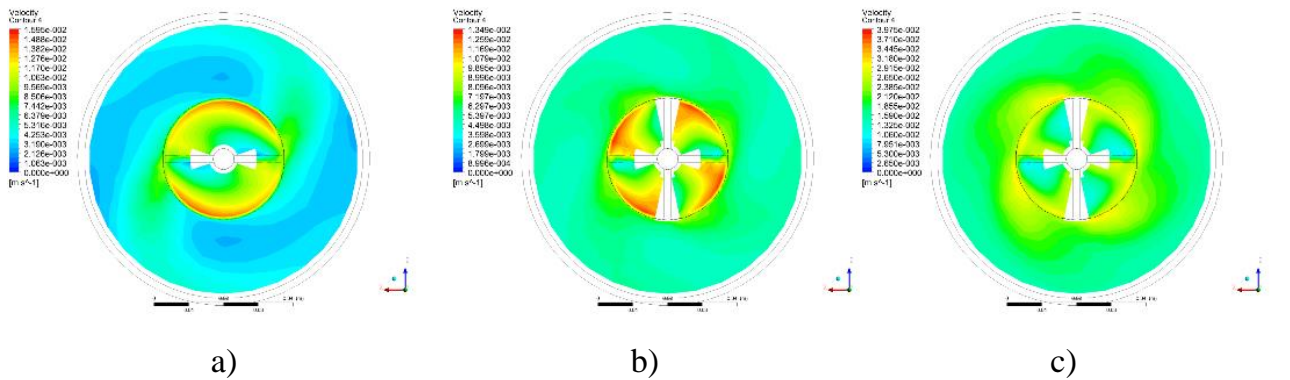
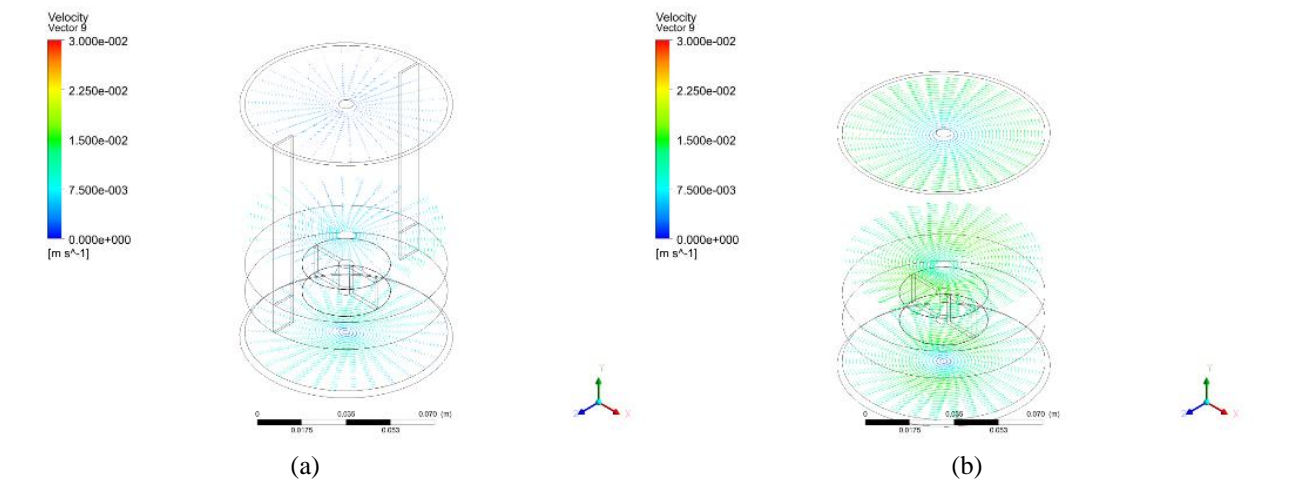


Figura 6 – Análise de vórtice sem/com a presença de chicanas. (a) 30 RPM, com chicanas, 2 pás e (b) 30 RPM, sem chicanas, 2 pás.



Os dados obtidos demonstram que o número de pás e a velocidade de rotação influenciam significativamente no comportamento de escoamento do fluido, pois na proximidade das pás, obteve-se uma velocidade maior comparado com o restante do fluido. Este comportamento também é observado pelos resultados apresentados por Patil e Johansen (2015), que analisaram um sistema de agitação com 4 pás retas e com velocidade de rotação de 3000 RPM,

identificando que as maiores velocidades estão próximas a extremidade das pás. Comparando as Figuras 5a e 5b é possível observar que há uma maior distribuição da velocidade do fluido com 4 pás no rotor. Ou seja, a velocidade de rotação é melhor distribuída ao longo de todo o fluido. Este efeito, também é intensificado com o aumento da velocidade de rotação do rotor, conforme apresentado pela Figura 4c. Em todos os casos, a velocidade do fluido na

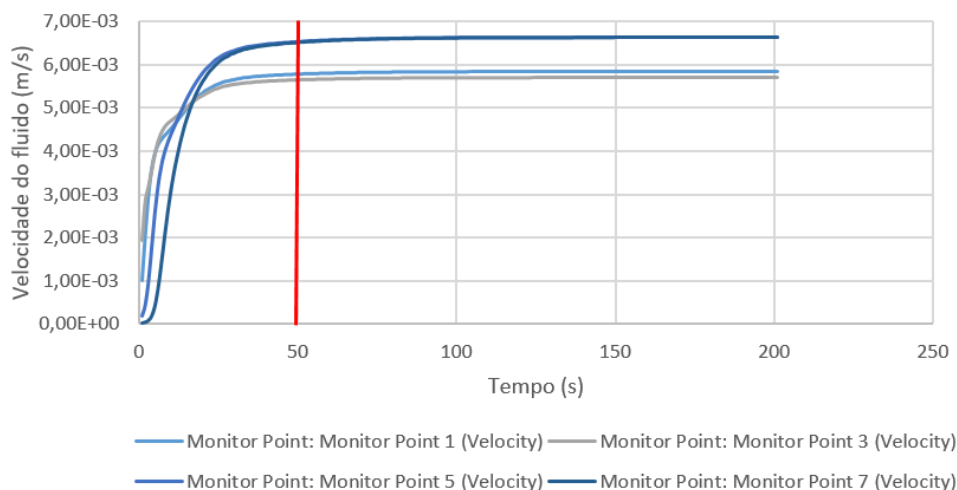
parede do tanque é menor do que próximo ao sistema de agitação. Esta percepção também é observada por Liu et al (2017) para diferentes tipos de rotores.

A Figura 6 demonstra a influência das chicanas avaliada na simulação de 30 RPM, 2 pás e sem chicanas em comparação com a simulação de 30 RPM, 2 pás e com chicanas. Nota-se que com a presença da chicana não obteve-se uma quantidade significativa de vórtices, conforme Vergel (2013), esse fato ocorre pois a chicana tem como objetivo impedir a formação de vórtices provocando a formação de uma superfície livre e plana acima do fluido. No trabalho realizado por Torr e et al (2007) ficou evidente que áreas de baixa velocidade são identificadas em regiões próximas das chicanas devido ao choque do fluido com as mesmas.

3.3 Avalia o dos fatores no sistema de agita o.

Na tentativa de avaliar a influência da velocidade do rotor, do número de p s e do número de chicanas sobre o sistema de agita o, foram selecionadas as seguintes respostas do sistema: turbulência dissipativa “ ϵ ”, turbulência cinética “ κ ”, velocidade do fluido e tensão de cisalhamento “ τ ”. Para isto, foram utilizados os pontos de monitoramento 1 e 3 para avaliar estatisticamente a influência dos fatores. Para a avalia o dos dados, optou-se pela condi o em estado estacionário, conforme a Figura 7, o tempo de 500 segundos encontra-se no estado estacionário, portanto adotou-se este como base para obten o dos dados.

Figura 7 – Demonstr o do estado estacionário para a simula o de 10 RPM, sem chicanas e 4 p s.



A análise estatística de Pareto permite identificar a significância dos fatores individuais e de suas intera es sobre as variáveis de resposta no sistema de agita o. As Figuras 8a, 8b, 9a e 9d apontam que a turbulência dissipativa “ ϵ ” e a turbulência cinética “ κ ”, nos pontos de monitoramento

selecionados, são influenciadas pelos fatores individuais da velocidade de rota o (B) e do número de p s do rotor (A) e pela intera o entre estes mesmos fatores (AB). Esta influência   mais significativa para o ponto 1, localizado no fundo do tanque, se comparado ao ponto 3, localizado na superfície superior do rotor.

Figura 8 – Análise estatística de Pareto para a turbulência dissipativa “ε”. a) Ponto 1; b) Ponto 3.

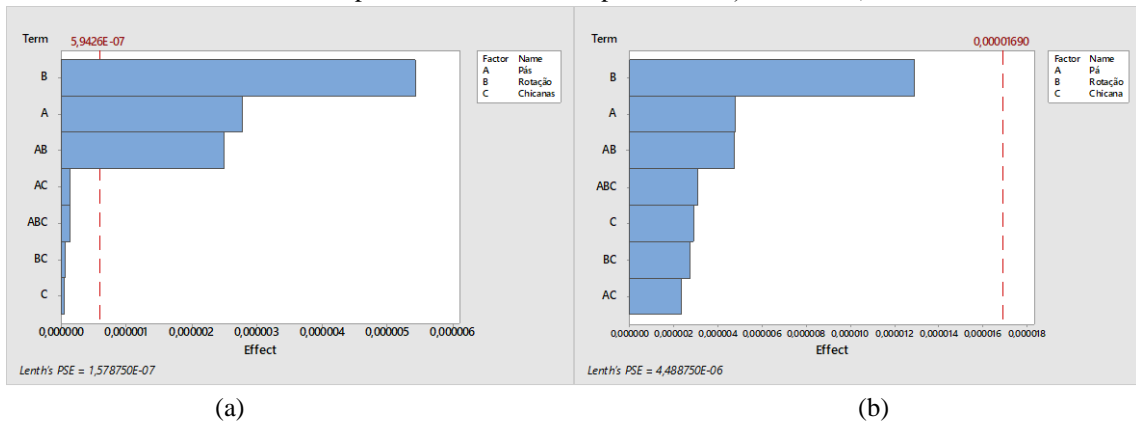
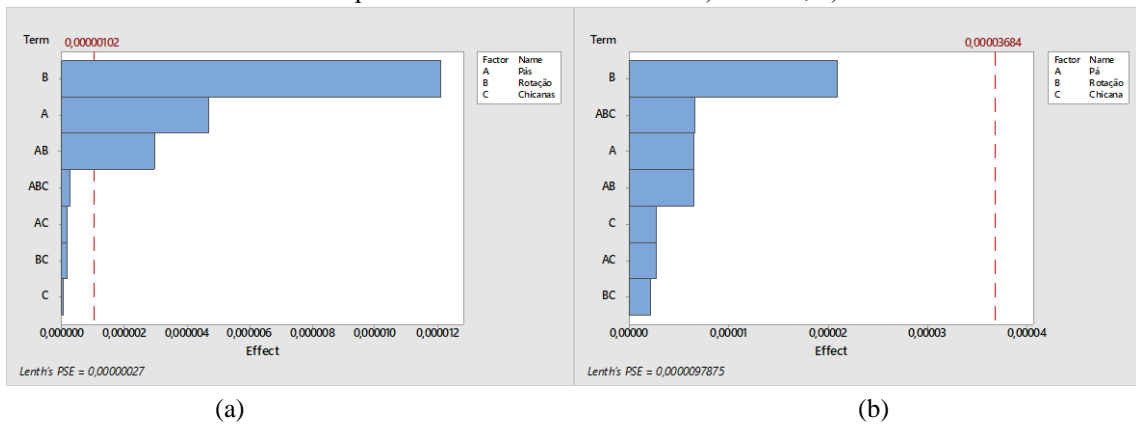


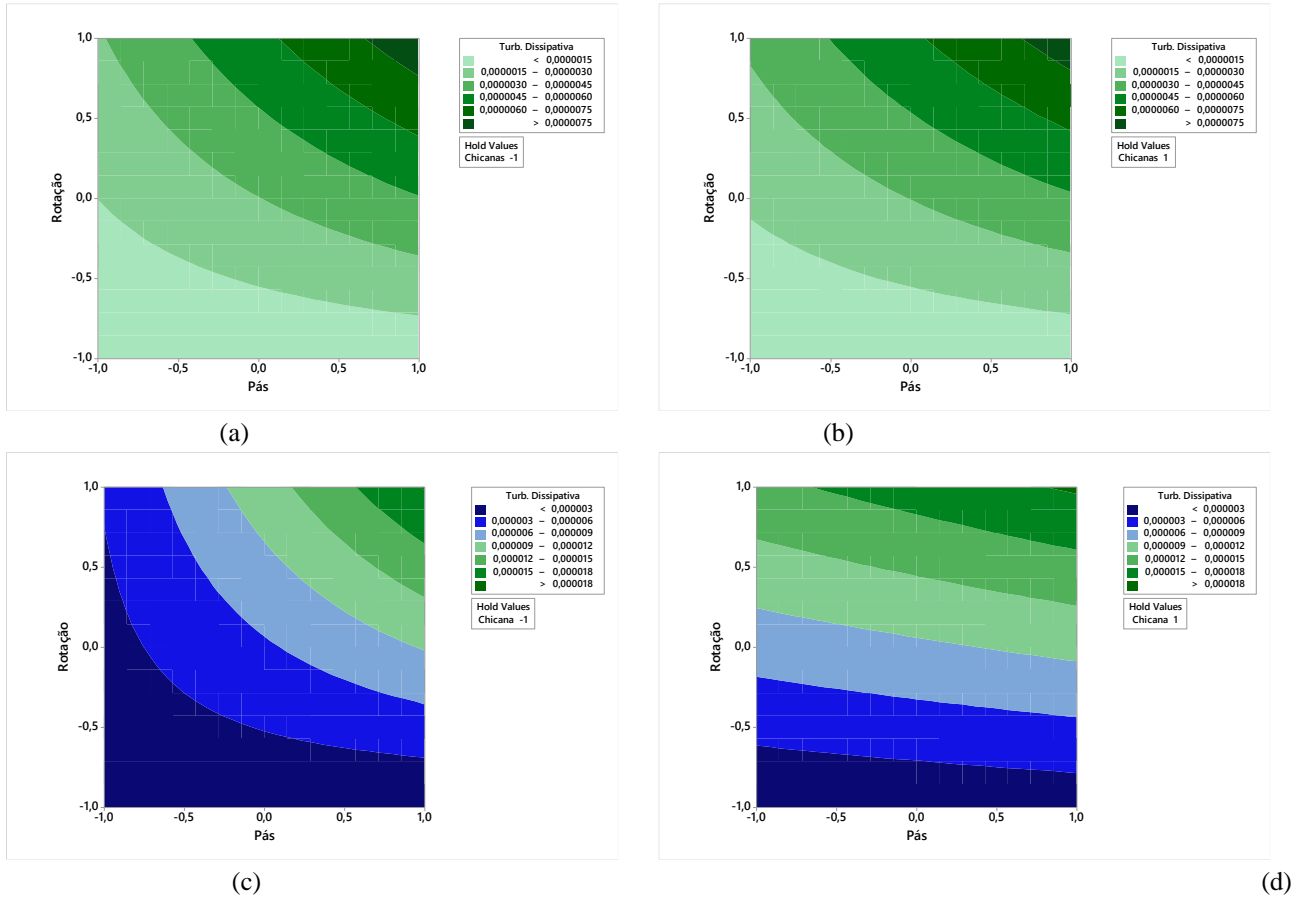
Figura 9 – Análise estatística de Pareto para a turbulência cinética “κ”. a) Ponto 1; b) Ponto 3



As Figuras 10a e 10b demonstram a projeção da influência da velocidade de rotação e números de pás na turbulência dissipativa no ponto 1, onde a ausência e presença de chicanas são mostradas respectivamente. Pode-se verificar que não há diferença significativa ao acrescentar a chicana, pois as mesmas são colocadas ao nível do rotor. Com o aumento do número de pás e da velocidade de rotação, nos dois casos demonstrados, ocorre o aumento da turbulência dissipativa, já que esta representa a “dispersão” da turbulência cinética. As Figuras 10c e 10d representam a projeção da influência

da velocidade de rotação e número de pás na turbulência dissipativa no ponto 3, com ausência e presença de chicanas respectivamente. Um aumento na turbulência dissipativa ocorre devido à proximidade do rotor e também pela presença das chicanas. As chicanas promovem um aumento na dispersão da turbulência dissipativa na posição analisada (Figura 10d). Isto comprova a funcionalidade das chicanas, em evitar a formação de “caminhos” ou “vórtex” durante a agitação do fluido.

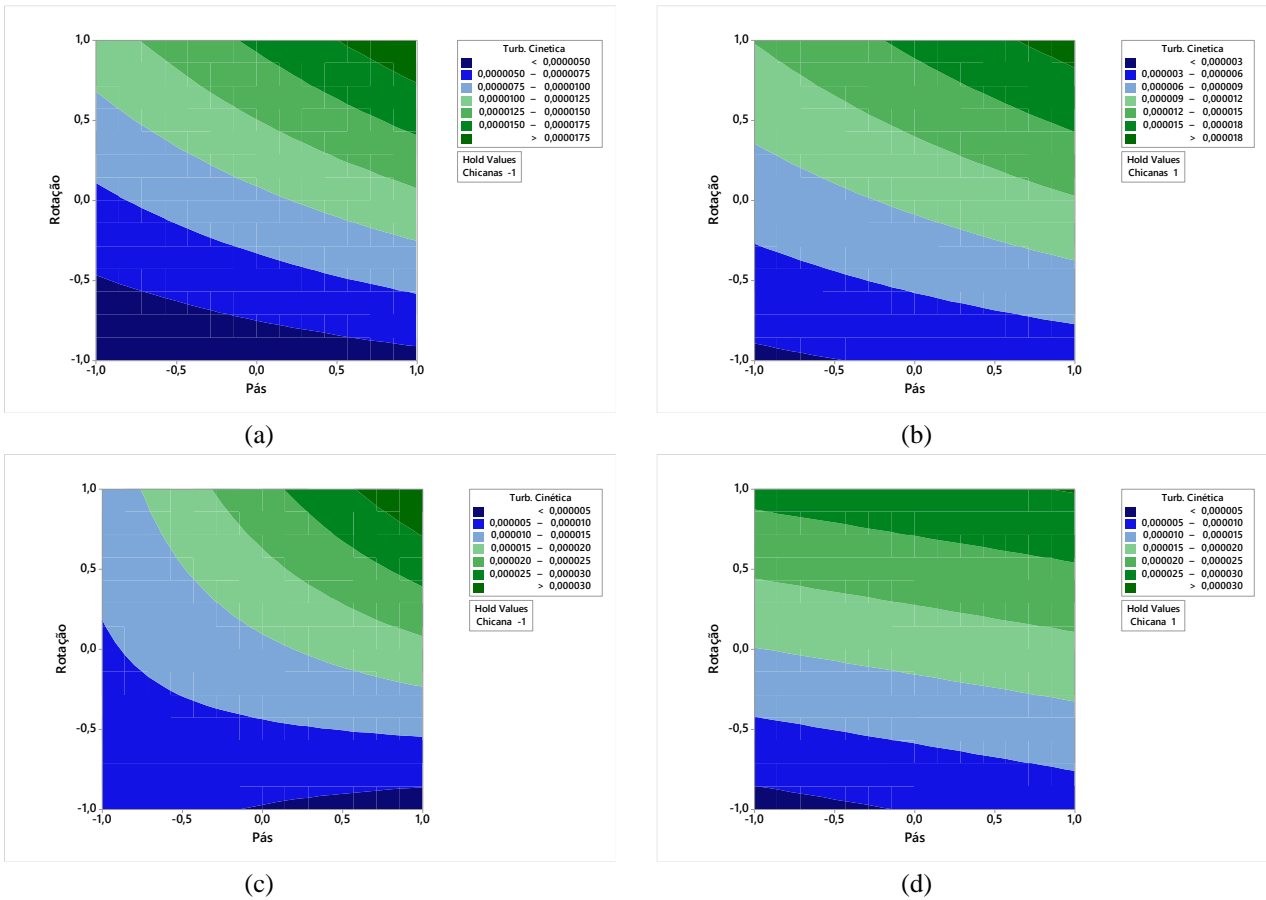
Figura 10 – Influência da velocidade de rotação e número de pás na turbulência dissipativa. a) Ponto 1 sem presença de chicanas; b) Ponto 1 com presença de chicanas; c) Ponto 3 sem presença de chicanas d) Ponto 3 com presença de chicanas.



O papel das chicanas sobre a turbulência cinética do sistema de agitação é confirmado neste estudo, pois no ponto 3 há uma maior uniformidade na distribuição do campo de velocidade, logo, afeta diretamente no comportamento do campo de turbulência do sistema de agitação, mesmo que na análise de Pareto apresentou como as chicanas não possuem interferência significativa. O número máximo de chicanas adotado neste estudo não é o mais utilizado, já que diversas literaturas recomendam o uso de no mínimo 4 chicanas. Portanto, a utilização de um número maior de chicanas, pode influenciar de maneira

muito mais significativa no comportamento dos campos de turbulência do sistema. Uma alternativa para melhor avaliar os resultados obtidos é utilizar outros modelos de turbulência, como os estudados por Vergel (2013), que demonstrou que o modelo de turbulência utilizado neste estudo, modelo “ κ - ϵ ”, obteve melhores resultados em regiões próximas do jato de descarga do rotor/impelidor. Uma segunda alternativa é realizar simulações com diferentes tipos de fluidos, com características bem distintas, como por exemplo os fluidos de Bingham.

Figura 11 – Influência da velocidade de rotação e número de pás na turbulência cinética. a) Ponto 1 sem presença de chicanas; b) Ponto 1 com presença de chicanas; c) Ponto 3 sem presença de chicanas; d) Ponto 3 com presença de chicanas.



A análise estatística de Pareto sobre a velocidade do fluido para os pontos de monitoramento é apresentada pelas Figuras 12a e 12b e sobre tensão de cisalhamento é apresentada pelas Figuras 13a e 13b. A velocidade de rotação (B) é o fator mais significativo para estas variáveis, onde para o ponto 1, todos os termos do modelo analisado demonstraram não ter

significância. Entretanto, a velocidade de rotação (B) tem uma significativa influência sobre a velocidade do fluido e tensão de cisalhamento no ponto 3 (Figura 12b e 13b), já que este se localiza próximo ao sistema de agitação (rotor), conforme pode-se visualizar pelo perfil de velocidade apresentado pela Figura 4.

Figura 12 – Análise estatística de Pareto para a velocidade do fluido. a) Ponto 1; b) Ponto 3.

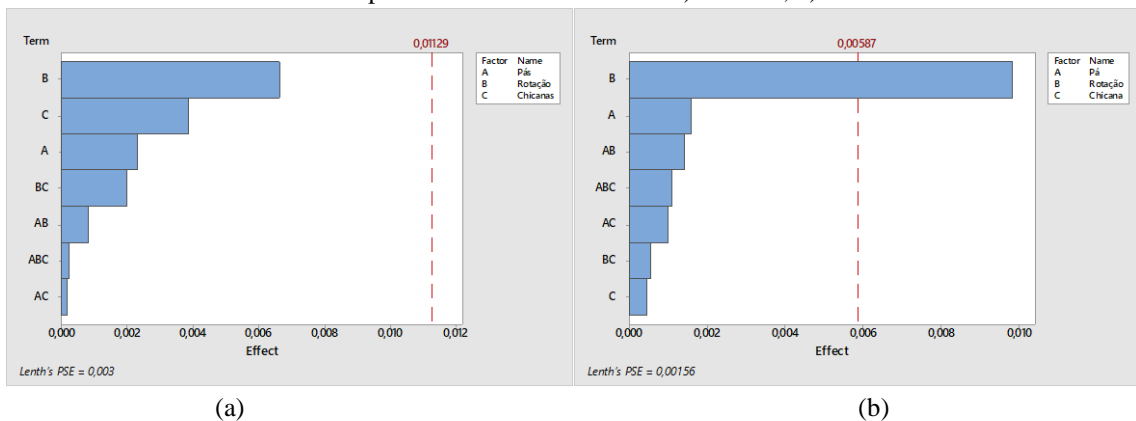
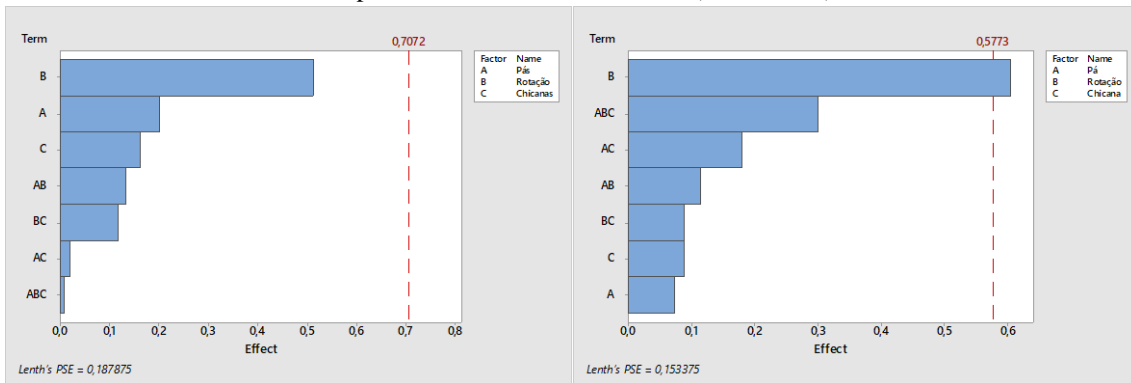


Figura 13– Análise estatística de Pareto para a tensão de cisalhamento. a) Ponto 1; b) Ponto 3.



(a)

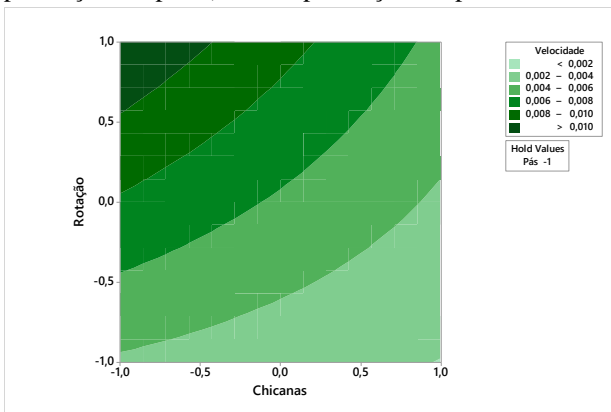
(b)

As Figuras 14a e 14b apresentam a influência do número de chicanas e velocidade de rotação na velocidade do fluido no ponto 1. Observou-se que mantendo o número máximo de chicanas e aumentando a velocidade de rotação, a velocidade do fluido é menor, quando comparada utilizando um número menor de chicanas. Esse fato ocorre, pois a chicana proporciona a diminuição da velocidade devido ao choque do fluido com as mesmas, de acordo com estudos realizado por Torr e et al (2007). Outro fator importante nesta análise,   a influência do número de p s no rotor, demonstrando que o comportamento da

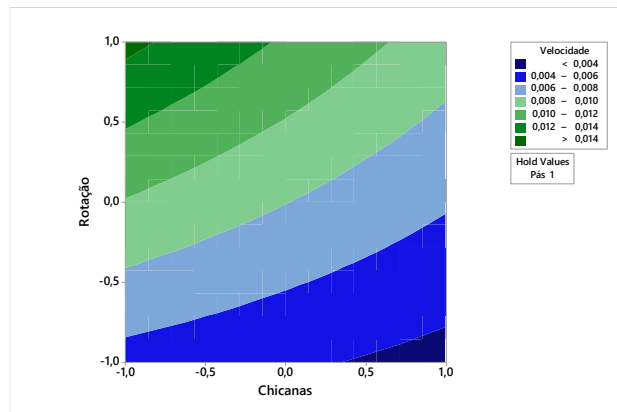
velocidade do fluido   mantido, mas o valor absoluto aumenta, confirmado pela análise realizada nos perfis de velocidade.

As Figuras 15a e 15b demonstram a influência da velocidade de rota o e do número de p s na velocidade do fluido no ponto 3. Como este ponto   localizado próximo ao rotor, a tendência do aumentado da velocidade do fluido em fun o destes fatores   confirmada. Novamente,   possível identificar uma pequena influência da presença das chicanas no valor absoluto da velocidade do fluido.

Figura 14 – Influência da velocidade de rota o e número de chicanas (ponto 1) na velocidade do fluido; a) Com a presença de 2 p s b) Com a presença de 4 p s.

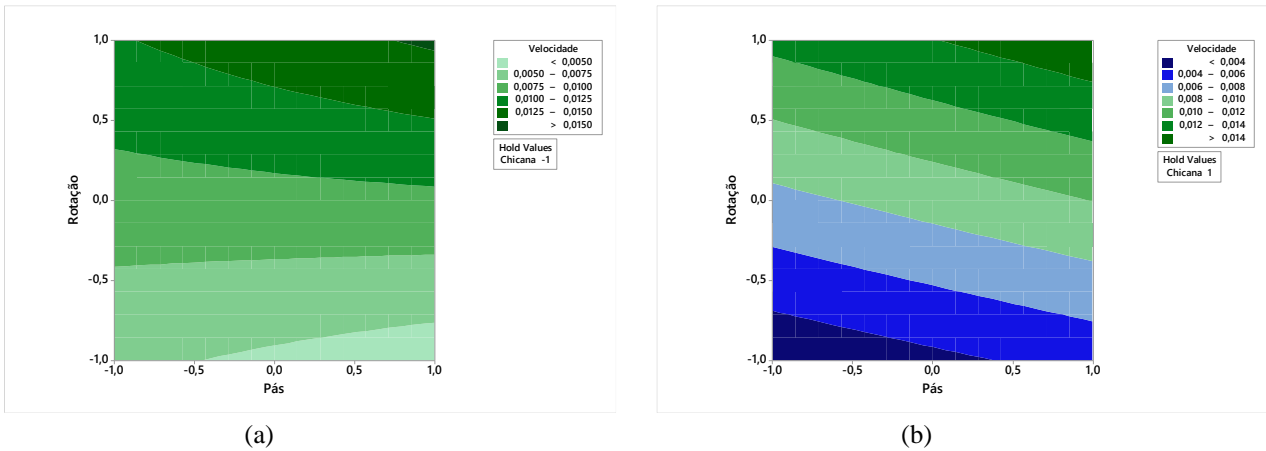


(a)



(b)

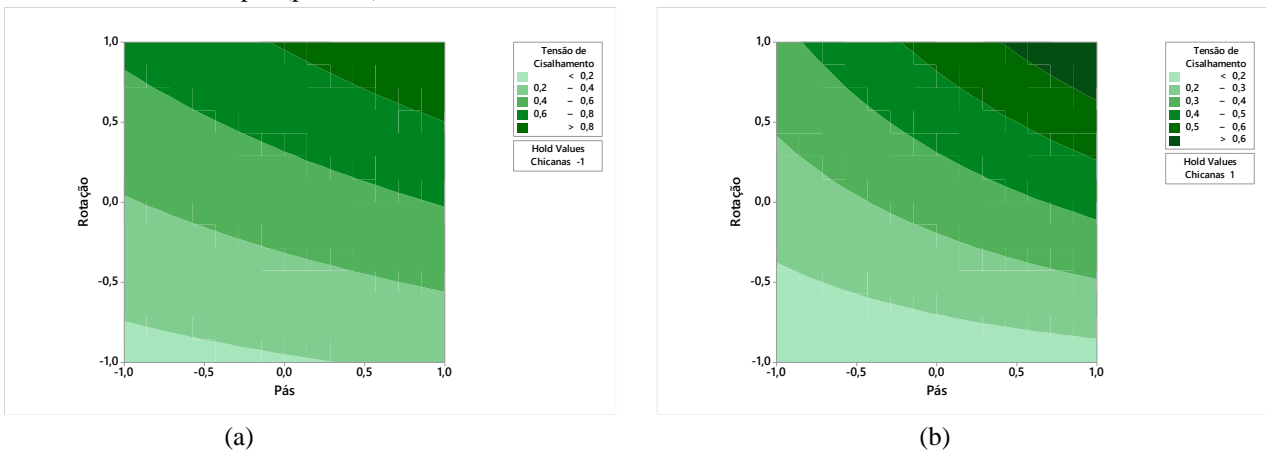
Figura 15 - Influência da velocidade de rotação e número de pás (ponto 3) na velocidade do fluido. a) Sem chicanas; b) Com chicanas.

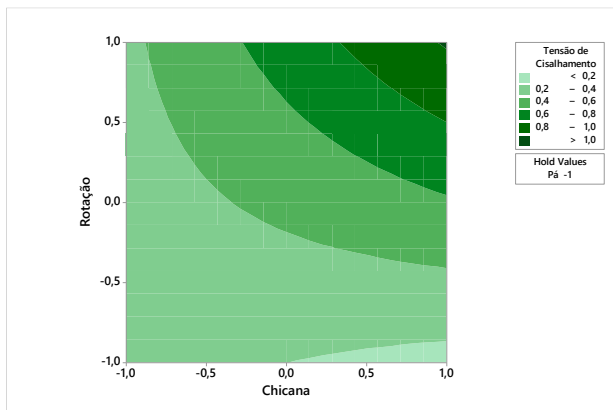


As Figuras 16a e 16b denotam a influência da velocidade de rotação e o número de pás em relação à tensão de cisalhamento, sem e com a presença das chicanas, respectivamente. Pode-se notar que a quantidade de chicanas intervém nos resultados obtidos, onde sem a presença de chicanas, encontra-se uma maior tensão de cisalhamento. Pode-se observar que com aumento do número de chicanas e da velocidade de rotação, a tensão de cisalhamento diminui nos dois casos. As Figura 16c e 16d mostram a

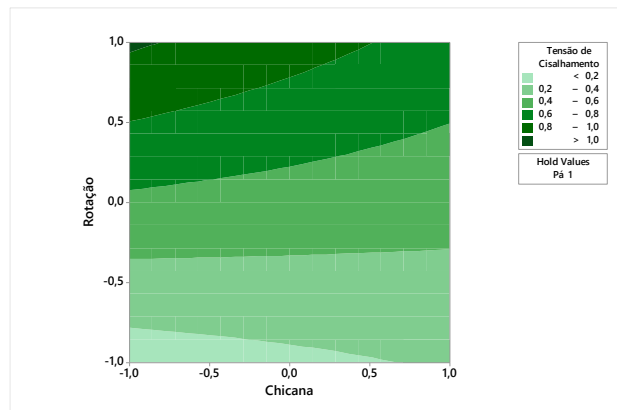
influência da velocidade de rotação e o número de chicanas com 2 pás e 4 pás respectivamente na análise da tensão de cisalhamento. Foi possível verificar que a quantidade de pás interfere nos dados. Para a Figura 16c com a diminuição do número de chicanas, e aumento da velocidade de rotação, a tensão de cisalhamento é maior, diferentemente da projeção com a presença de 4 pás, onde com diminuição de número de chicanas e aumento da velocidade de rotação a tensão de cisalhamento é menor.

Figura 16 - Influência da velocidade de rotação e número de pás (ponto 1); influência do número de chicanas e número de pás (ponto 3) na velocidade tensão de cisalhamento.





(c)



(d)

4. Conclusão

O estudo através da Fluidodinâmica Computacional (CFD) demonstra ser uma grande ferramenta para modernizar a análise de processos e projetos, onde baseia-se em teorias mais sofisticadas comparadas aos modelos empíricos e experimentais.

Um estudo para observar a influência da velocidade de rotação, número de chicanas e número de pás em tanques de mistura, foi obtido através de uma representação fluidodinâmica, baseando-se em análise estatística. Dessa forma, pode-se concluir que a análise da malha exerceu uma função de grande importância para simulação, uma vez que analisada a constância dos resultados de simulações envolvendo três tipos de malhas, pode-se notar que a utilização da malha contendo 87879 nós e *skewness* médio de 0,20607, é a melhor condição para a representação do comportamento do fluido para as diversas condições do estudo.

Conforme as simulações realizadas, observou-se a influência das pás no sistema de agitação, onde notou-se que em sua proximidade o campo da velocidade do fluido é maior em relação as outras partes do tanque. As chicanas representaram um papel importante no sistema de agitação, mesmo a análise estatística indicando para certas variáveis e pontos de monitoramento que possui pouca significância estatística. Observou-se que com a sua presença não ocorre a formação de vórtice em comparação ao sistema sem chicanas, apresentando resultados condizentes a literatura.

A partir da análise de estatística, notou-se que a rotação e as pás são os fatores que mais influenciam a velocidade do fluido, tensão de cisalhamento, turbulência cinética e dissipativa.

Pode-se concluir que o número de chicanas adotado não é o mais adequado para analisar o comportamento dos campos de turbulência no sistema, onde conforme a literatura recomenda-se no mínimo 4

chicanas, ou a utilização de outros modelos de turbulência para uma melhor avaliação dos resultados. No entanto, as análises de influências do rotor e pás, encontram-se de acordo com a literatura, onde o modelo adotado possui melhores resultados nas regiões próximas do jato de descarga do rotor/impelidor.

5. Referências

- [1] J. L. G. Silva, Análise crítica das correlações e parâmetros fundamentais em sistemas de agitação, Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- [2] M.A. Cremasco, Operações unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos. Blucher, São Paulo 2014.
- [3] G. L. Lane; M. P. Schwarz; E G. M. Evans, Chapter 34 - Comparison of CFD Methods for Modelling of Stirred Tanks. 10th European Conference on Mixing, (eds.) Akker, H. E. A. V. D. & Derksen, J. J., Elsevier Science, Amsterdam, 2000
- [4] J. L. G. Vergel, Estudo da Influência da Malha Computacional, Modelos de Turbulência e Aspectos Numéricos da Modelagem CFD em Impelidores PBT Usando Malhas Não-estruturadas, Universidade Estadual de Campinas, 2012.
- [5] D. A. Deglon, C. J. Meyer CFD modelling of stirred tanks: Numerical considerations. Minerals Engineering, 19, 1059-1068, 2006.
- [6] F. L. A. S. Segundo, Avaliação de escoamentos líquido-sólido em duto horizontal mediante simulação CFD: Transporte de rejeito de minério de ferro. Universidade Federal de São João Del-Rei, 2017..
- [7] Douglas C. Montgomery Design and analysis of experiments. 8. ed. John Wiley & Sons, Inc., 2013.

-
- [8] A. C. Cides, et al. Análise comparativa da eficiência de agitação em tanques de mistura com duplo impelidor (âncora – PBT) em regime laminar através de CFD. In: Congresso brasileiro de engenharia química,2014,
- [9] M. Jenne,M. Reuss, A critical assessment on the use of k- ϵ turbulence models for simulation of the turbulent liquid flow induced by a Rushton-turbine in baffled stirred-tank reactors, *Chem Engng Sci*, 54: 3921–3941, 1999.
- [10] B. Zakrzewska, Z. Jaworski, Modelling of the turbulent wall jet generated by a pitched blade turbine impeller. The effect of grid density, *Inz Apar Chem*, 4S: 149–150, 2002.
- [11] L. F. S. Barcelos Simulação computacional da fluidodinâmica em um reator de produção de uréia a partir do gás carbônico e amônia., Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2016.
- [12] A. Nogueira, et al. Estudo de cfd sobre a influência da configuração da chicana em tanques de mistura. In: Congresso brasileiro de engenharia química,2014.
- [13] C. W. S. P. Maitelli. Simulação do escoamento monofásico em um estágio de uma bomba centrífuga utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional. Universidade Federal do Rio Grande do Norte,2010.
- [14] R. H. G. Sabino Análise da dinâmica de uma bolha de gás em uma bomba centrífuga. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- [15] A. V. Patil;, S.T. Johansen.Computacional and experimental study of oil-water emulsion flow and stability in a stirred tank. Eleventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. 2015.
- [16] B. Liu, Y. Zheng, M. Chen;, X. Chen; Z Jin. CFD simulation of the mixing and dispersing of floating particles in a viscous system. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. v. 34; n. 4; p. 1175-1189, 2017.
- [17] J.P. Torré; D.F. Fletcher, T. Lasuye; C. Xuereb, Single and multiphase CFD approaches for modelling partially baffled stirred vessels: Comparison of experimental data with numerical predictions. *Chemical Engineering Science*. v.62; p. 6246-6262; 2007.
- [18] B.B. Robert, S.E. Warren, L. N. Warren. Fenômenos de transporte. LTC, Rio de Janeiro 2017.