

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

LEON CARVALHO VIEIRA CAVALCANTE

**ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES
OPERACIONAIS SOBRE A SUSPENSÃO DE SÓLIDOS EM TANQUES
MECANICAMENTE AGITADOS**

Maceió

2023

LEON CARVALHO VIEIRA CAVALCANTE

**ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES
OPERACIONAIS SOBRE A SUSPENSÃO DE SÓLIDOS EM TANQUES
MECANICAMENTE AGITADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão

Coorientador: Prof. Ms. Felipe de Alcântara Moura Vilela

Maceió

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

C376e Cavalcante, Leon Carvalho Vieira.

Estudo numérico da influência das condições operacionais sobre a suspensão de sólidos em tanques mecanicamente agitados / Leon Carvalho Vieira Cavalcante. – 2023.

56 f. il. : figs. ; tabs. color.

Orientador: Rodolfo Junqueira Brandão.

Coorientador: Felipe de Alcântara Moura Vilela.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química).
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 52-56.

1. Projeto de impelidor. 2. Fluidodinâmica computacional. 3. Suspensão de sólidos. 4. Agitação de líquidos. 5. Planejamento experimental. I. Título.


CDU: 536.7




LEON CARVALHO VIEIRA CAVALCANTE

***ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS
SOBRE A SUSPENSÃO DE SÓLIDOS EM TANQUES MECANICAMENTE
AGITADOS***


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 RODOLFO JUNQUEIRA BRANDAO
Data: 29/05/2023 15:14:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão

Documento assinado digitalmente
 WAGNER ROBERTO DE OLIVEIRA PIMENTE|
Data: 29/05/2023 20:10:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wagner Roberto de Oliveira Pimentel

Documento assinado digitalmente
 FREDE DE OLIVEIRA CARVALHO
Data: 29/05/2023 16:42:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Frede de Oliveira Carvalho

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais por disponibilizarem seu tempo, esforços e carinho para que eu pudesse ser educado da melhor forma possível. Sei que sem a ajuda deles, não teria chegado onde cheguei. Agradeço aos meus irmãos e demais familiares pelo apoio e incentivo nos momentos cruciais. Não poderia ter uma família melhor!

Expresso minha gratidão ao meu orientador, Professor Doutor Rodolfo Brandão, e ao meu coorientador Felipe Vilela, por todo o suporte técnico e conhecimento transmitido. Vocês são pessoas brilhantes e este trabalho só está sendo realizado devido a todo o apoio oferecido. Ao ver o trabalho de vocês, acredito que existem pessoas que realmente nasceram para certas vocações.

Agradeço aos meus amigos de graduação e de longa data, Iury, Tertu, Gaby, Vini, Erick, Gabizinha, Ruhan, Orlando, Jardiel, Thalyta, Carlos e demais colegas que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, por todos os momentos compartilhados, sejam de comemoração ou de derrota, risos ou lágrimas. Sempre tornando os momentos mais difíceis em momentos de alegria e aprendizado. Parte do que sou hoje é devido a cada um de vocês.

Quero agradecer em especial à minha companheira de vida, Iarisa, por me tornar uma pessoa melhor a cada dia, por aguentar minhas lamentações, por me fazer ter forças para continuar sempre. Espero passar inúmeros momentos de conquistas ao seu lado.

Gostaria de estender meus agradecimentos a todos aqueles que se dedicam à divulgação científica, criando conteúdo acessível e tornando o conhecimento disponível para qualquer pessoa interessada em aprender.

RESUMO

Diversos processos industriais são afetados pela qualidade da suspensão de sólidos que, quando feita de forma adequada, favorece os mecanismos de transferência de massa, calor e momento, principalmente por aumentar a área superficial exposta e o contato entre partículas. Parâmetros como distribuição de sólidos, velocidade das partículas e a altura da nuvem de sólidos são essenciais para a avaliação da qualidade da suspensão de sólidos em tanques agitados. Deste modo, uma forma de avaliar tal fenômeno é a partir do uso de técnicas computacionais para predição dessas variáveis, visto que, tem sido uma alternativa de redução de custos aos complexos métodos experimentais. O presente 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 neste processo a partir de uma abordagem fluidodinâmica monofásica no interior de um tanque mecanicamente agitado. As modelagens geométricas, construção das malhas e as simulações em fluidodinâmica computacional (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, foi empregado o planejamento experimental do tipo composto central (PCC), sendo os fatores avaliados: angulação de ataque das pás (θ), razão entre o diâmetro do impelidor e o diâmetro do tanque (D/T), número de pás do impelidor (NI), razão entre a altura em relação ao tampo e o diâmetro do tanque (C/T) e velocidade de agitação (ω). Os resultados mostram que a razão entre o diâmetro do impelidor e o diâmetro do tanque, a velocidade de rotação dos impelidores, a relação entre o diâmetro e a velocidade de rotação, razão entre a altura em relação ao tampo e o diâmetro do tanque e a angulação das pás têm influência linear significativa na resposta.

Palavras-Chave: Projeto de impelidor; CFD; Suspensão de sólidos; Velocidade de agitação; Planejamento experimental.

ABSTRACT

Various industrial processes are affected by the quality of solid suspension, which, when done properly, enhances mass, heat, and momentum transfer mechanisms, primarily by increasing the exposed surface area and contact between particles. Parameters such as solid distribution, particle velocity, and the height of the solid cloud are essential for evaluating the quality of solid suspension in agitated tanks. Therefore, one way to assess this phenomenon is by using computational techniques to predict these variables, as it has been an alternative to cost reduction compared to complex experimental methods. The present study aims to determine operational and design conditions in the solid suspension process, particularly the influence of impeller geometric characteristics, using a monophasic fluid dynamics approach within a mechanically agitated tank. Geometric modeling, mesh construction, and computational fluid dynamics (CFD) simulations were performed using the commercial software ANSYS® student. In analyzing the influence of impeller geometric variables on solid suspension in a liquid medium, a central composite design (CCD) experimental plan was employed, with the following factors evaluated: blade attack angle (θ), impeller diameter to tank diameter ratio (D/T), number of impeller blades (NI), height to tank diameter ratio (C/T), and agitation speed (ω). The results show that the impeller diameter to tank diameter ratio, impeller rotation speed, diameter-speed ratio, height to tank diameter ratio, and blade angle have a significant linear influence on the response.

Key words: Impeller design; CFD; Solid suspension; Agitation speed; Experimental design.

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>H</i>	Nível do tanque (<i>mm</i>)
<i>T</i>	Diâmetro do tanque (<i>mm</i>)
<i>D</i>	Diâmetro do impelidor (<i>mm</i>)
<i>C</i>	Altura em relação ao tampo (<i>mm</i>)
θ	Angulação de ataque das pás ($^{\circ}$)
<i>D/T</i>	Razão entre o diâmetro do impelidor e o diâmetro do tanque (—)
<i>NI</i>	Número de pás no impelidor (—)
<i>v_r</i>	Velocidade terminal das partículas (<i>m/s</i>)
<i>H_v</i>	Altura de suspensão de sólidos (—)
ω	Velocidade de rotação do impelidor (<i>RPM</i>)
<i>C/T</i>	Razão entre a altura em relação ao tampo e o diâmetro do tanque (-)
<i>N_{js}</i>	Velocidade mínima de suspensão (<i>m/s</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 OBJETIVOS	7
2.1 Geral.....	7
2.2 Específicos	7
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
3.1 Agitação e mistura.....	8
3.2 Agitadores	9
3.2.1 Relações geométricas	11
3.2.2 Tipos de impelidores	12
3.3 Sistemas com suspensão de partículas sólidas	13
3.3.1 Suspensão parcial	15
3.3.2 Suspensão completa	15
3.3.3 Suspensão uniforme	16
3.4 Fluidodinâmica computacional	16
3.4.1 Modelagem CFD na análise e projeto de equipamentos industriais	17
3.4.2 Modelagem do escoamento rotacional.....	19
3.4.3 Modelos de turbulência.....	22
3.5 Planejamento experimental	23
3.5.1 Planejamento Fatorial.....	23
3.5.2 Planejamento Composto Central.....	24
4 METODOLOGIA	24
4.1 Determinação da velocidade mínima de suspensão de sólidos	25
4.2 Planejamento das simulações.....	26
4.3 Modelagem do tanque de agitação.....	27
4.3.1 Geometria do sistema.....	27
4.3.2 Malha computacional	29

4.4 Modelagem e simulação em CFD para um sistema estacionário monofásico	30
4.5 Pós processamento	30
4.6 Análise de influência das variáveis	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1 Efeito da angulação de ataque das pás (θ).....	33
5.2 Efeito do número de pás (NI).....	35
5.3 Efeito da razão do diâmetro do impelidor (D/T).....	37
5.4 Efeito da razão entre a altura em relação ao tampo e o diâmetro do tanque (C/T).....	39
5.5 Efeito da velocidade de rotação dos impelidores (ω).....	42
5.6 Avaliação do planejamento experimental	44
6 CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores para os parâmetros da correlação para a constante da correlação de Zwietering.....	14
Tabela 2 - Parâmetros utilizados no cálculo para determinação de N_{js} e v_r	25
Tabela 3 - Planejamento Composto Central: Variáveis do impelidor.....	27
Tabela 4 - Dimensões do reator e acessórios.....	28
Tabela 5 - Métricas para qualidade de malha.....	30
Tabela 6 - Efeito do ângulo de ataque das pás do impelidor sobre Hvt.....	35
Tabela 7 - Efeito do número de pás do impelidor sobre Hvt.....	37
Tabela 8 - Efeito do diâmetro do impelidor sobre Hvt.....	38
Tabela 9 - Efeito da folga do fundo sobre Hvt.....	41
Tabela 10 - Efeito da folga do fundo sobre Hvt.....	44
Tabela 11 - Planejamento Composto Central: Variáveis controláveis sobre Hvt.....	45
Tabela 12 - Efeitos dos fatores controláveis.....	46

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Padrões de fluxos para componente da velocidade. a) Padrão de fluxo axial, b) Padrão de fluxo radial e c) padrão de fluxo tangencial.	9
Figura 2 - Esquemática do tanque de agitação.....	10
Figura 3 - Principais dimensões de um tanque agitado.	11
Figura 4 - Diferentes tipos de impelidores.	12
Figura 5 - Níveis de suspensão. (a) Parcial; (b) Completa; (c) Uniforme.	15
Figura 6 - Malha de volume finito de cerca de 300.000 células para uma caldeira com cinco fornos ciclônicos.	18
Figura 7 - Exemplo de uma geometria com domínio para o modelo SRF.	20
Figura 8 - Exemplo de uma geometria com domínio para o modelo MRF.	21
Figura 9 - Exemplo de uma geometria com domínio para o modelo de malhas deslizantes.....	21
Figura 10 - Etapas sequenciais da metodologia.....	25
Figura 11 - a) Geometria do tanque particionada e b) geometria do impelidor.	29
Figura 12 - Malha computacional em a) corte horizontal na altura central do impelidor e b) corte vertical central.	30
Figura 13 - Malha computacional em a) corte horizontal na altura central do impelidor e b) corte vertical central.	31
Figura 14 - Efeito da angulação de ataque das pás dos impelidores na magnitude da velocidade.....	33
Figura 15 - Efeito da angulação de ataque das pás dos impelidores na velocidade axial.	34
Figura 16 - Efeito do número de pás dos impelidores na magnitude da velocidade.	36
Figura 17 - Efeito do número de pás dos impelidores na velocidade axial.	36
Figura 18 - Efeito do número de pás dos impelidores na velocidade radial.....	37
Figura 19 - Efeito do diâmetro do impelidor na magnitude da velocidade.	38
Figura 20 - Efeito do diâmetro do impelidor na velocidade axial.	39
Figura 21 - Efeito do <i>clearance</i> na magnitude da velocidade.	40
Figura 22 - Efeito do <i>clearance</i> na velocidade axial.....	40
Figura 23 - Linhas de fluxo gerados a) $C/T = 0,4$ e b) $C/T = 0,2$	41

Figura 24 - Efeito da velocidade de rotação dos impelidores na magnitude de velocidade.	43
Figura 25 - Efeito da velocidade de rotação dos impelidores na velocidade axial.....	43
Figura 26 - Efeito da velocidade de rotação dos impelidores na pressão.....	44
Figura 27- Altura da suspensão de sólidos (Hvt) em função da velocidade de rotação do impelidor (ω) e a razão do diâmetro do impelidor (D/T).	47
Figura 28 - Altura da suspensão de sólidos (Hvt) em função da velocidade de rotação do impelidor (ω) e razão entre a altura em relação ao tampo e o diâmetro do tanque (C/T). ..	48
Figura 29 - Altura da suspensão de sólidos (Hvt) em função do número de impelidores (NI) e a inclinação das pás (θ).	49

1 INTRODUÇÃO

A mistura é uma das operações unitárias mais amplamente utilizadas na indústria química, justamente por ser um fator crucial em diversas áreas, tais como nas indústrias de: polímeros, química fina, petroquímica, biotecnologia, farmacêuticos, tintas, alimentos e tratamento de águas residuais. O processo de mistura realizada em tanques mecanicamente agitados consta com uma variedade de objetivos, sendo uma delas a homogeneização de duas ou mais fases em termos de gradiente de concentração.

O tipo de mistura sólido-líquido é uma das mais importantes exatamente por desempenhar um ponto chave em diversas operações unitárias, como polimerização em suspensão, reação catalisada por sólidos, dispersão de sólidos, dissolução e lixiviação, cristalização e precipitação, adsorção, dessorção e liberação de íons (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

Em diversos processos sólido-líquido, as partículas sólidas estão completamente suspensas. No entanto, essas partículas podem não estar distribuídas uniformemente por todo o recipiente. O desempenho de alguns processos é afetado pela distribuição não uniforme dessas partículas. Uma suspensão de sólidos adequada favorece os mecanismos de transferência de massa, principalmente por aumentar a área superficial de contato das partículas. Neste contexto, em processos reativos, 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; 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 (STUPARU et al., 2021). Portanto, uma boa compreensão da distribuição de partículas sólidas em todo o recipiente é essencial para o projeto de um equipamento.

Alguns pesquisadores, como Soares et al. (2015), Liu et al. (2016) e Sardeshpande et al. (2015), adotaram uma prática geral para avaliação da mistura sólido-líquido em tanques agitados por meio de investigação experimental, entretanto, é difícil obter a distribuição de sólidos em todo o tanque por meio de medições experimentais. Essa abordagem geralmente é demorada, cara e, às vezes, impraticável (HOSSEINI et al., 2010).

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 (Fluidodinâmica Computacional), através desta técnica é possível reduzir

custos como utilização de insumos, instrumentação e projeto de equipamentos (BRODNY; TUTAK, 2021; TAMBURINI et al., 2012).

O uso de CFD tem destaque 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).

A técnica de planejamento fatorial é uma estratégia analítica para o planejamento das simulações, visto que, 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.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Determinar condições operacionais e de projeto no processo de suspensão de sólidos, em principal, a influência das características geométricas do impelidor no processo de suspensão de sólidos em meio líquido a partir de uma abordagem fluidodinâmica monofásica no interior de um tanque mecanicamente agitado.

2.2 Específicos

- Avaliar as influências das variáveis independentes: angulação de ataque das pás (θ), razão entre o diâmetro do impelidor e o diâmetro do tanque (D/T), número de pás do impelidor (NI), razão entre a altura em relação ao tampo e o diâmetro do tanque (C/T) e velocidade de rotação dos impelidores (ω) na altura da suspensão de sólidos (H_{vt});
- Averiguar o nível de significância das variáveis avaliadas a partir de uma análise de superfície e de regressão múltipla.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Agitação e mistura

Agitação e mistura são processos essenciais para a eficiência de diversas operações na indústria química. Um processo de mistura, onde a transferência de massa pode ser um fator limitante, quando realizado em um tanque mecanicamente agitado pode fornecer altos rendimentos e implica na redução de custos operacionais e investimentos.

A agitação pode ser definida como a ação de induzir o movimento de um fluido para que este desenvolva um padrão de fluxo desejado dentro do recipiente em que está inserido, usualmente provocada por ação mecânica. O termo mistura implica na distribuição aleatória de duas ou mais fases distintas em um sistema ou volume de controle (GEANKOPOLIS, 1983; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993).

O escoamento de fluidos em um tanque agitado, apesar de bastante complexo, costuma ser bem definido e apresentar reprodutibilidade, o que raramente se observa em estudos sobre misturas, em que o critério mais comum adotado para verificar uma boa mistura é através da observação visual ou por técnicas complexas e de alto custo. Outros critérios, como as variações de concentração, de temperatura e o deslocamento de partículas na mistura, também podem ser adotados (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993).

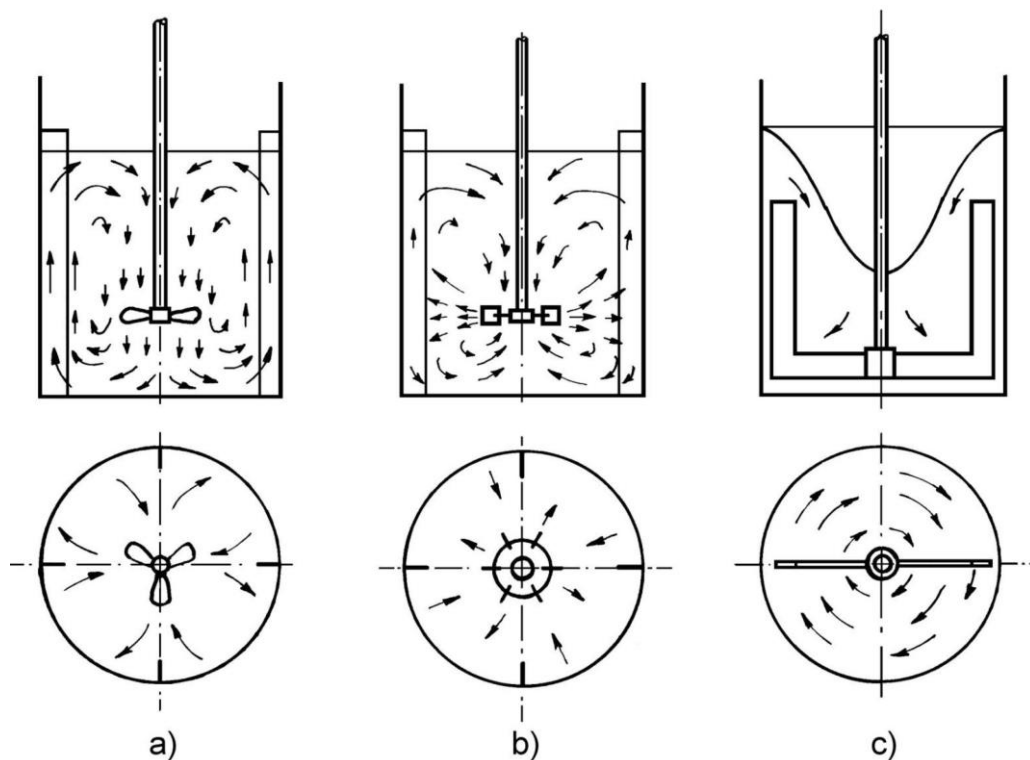
Quando se fala em agitação em tanques deve-se atentar às três componentes da velocidade do fluido: velocidade radial, axial e tangencial.

A velocidade axial (ou longitudinal), caracterizada pela componente paralela ao eixo do misturador, é particularmente útil quando são necessárias fortes correntes verticais. O fluxo axial é comumente gerado por impulsores com pás inclinadas. O tipo de padrão de fluxo configurado por um impulsor de fluxo axial típico é ilustrado na Figura 1a. O fluido que passa pelo impelidor é conduzido em um ângulo descendente até se chocar contra o fundo do recipiente. Em seguida, ele escoar radialmente no fundo do tanque e flui ascendentemente ao longo das paredes antes de ser puxado de volta para o impelidor (DORAN, 2013).

Na velocidade radial, que corresponde à componente perpendicular ao eixo do misturador, o fluxo radial apresenta correntes horizontais intensas. Observa-se pelo padrão típico gerado pelo fluxo radial de alta velocidade, ilustrado na Figura 1b, que o fluido é conduzido radialmente do impelidor em direção às paredes do tanque, e que ao se chocar contra a parede divide-se em duas correntes, uma que flui no sentido ao topo e a outra para o fundo do tanque. Esses fluxos eventualmente atingem o eixo central do tanque e são atraídos de volta para o impelidor (DORAN, 2013).

Por fim, a velocidade tangencial (ou rotacional) constitui a componente tangencial ao eixo do misturador, o fluxo tangencial leva ao desenvolvimento de vórtices, conforme mostrado na Figura 1c. A predominância desta componente da velocidade não favorece a mistura entre as fases sólida e líquida. Em altas velocidades, o vórtice gerado pode atingir o impulsor de modo que o gás atmosférico circundante é arrastado para o líquido. Isso é indesejável, pois produz tensões mecânicas muito altas no eixo do agitador, rolamentos e vedações. A atenuação do fluxo circular tem alta prioridade no projeto de sistemas de mistura. Geralmente é minimizado pela instalação de chicanas para interromper o padrão de fluxo rotacional e criar turbulência no fluido (DORAN, 2013).

Figura 1 - Padrões de fluxos para componente da velocidade. a) Padrão de fluxo axial, b) Padrão de fluxo radial e c) padrão de fluxo tangencial.



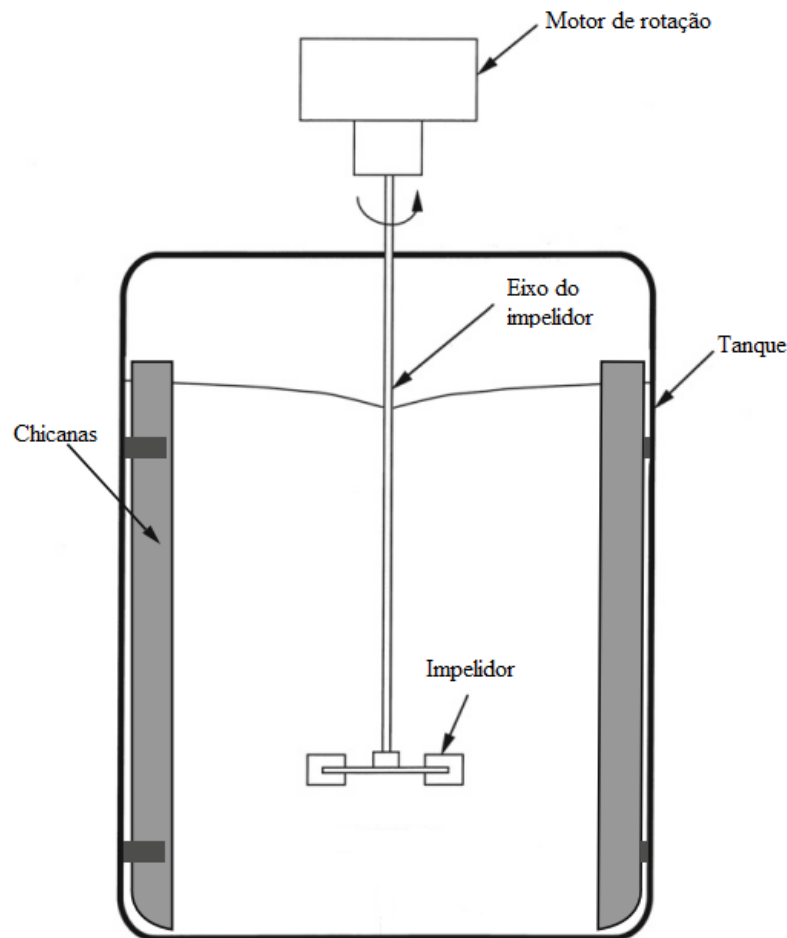
Fonte: SOLEXYSTEM (2019).

3.2 Agitadores

O agitador tem a função de movimentar o fluido. É considerado o equipamento fundamental para que ocorra a mistura e protagonista na determinação das características do escoamento. Um agitador típico é constituído por motor, redutor, selo, eixo e impulsor (RIBEIRO, 2012). Esses equipamentos são mais frequentes na forma de tanques cilíndricos mecanicamente agitados, como mostrado na Figura 2. As chicanas, que são placas verticais de metal montadas contra a parede do tanque, são instaladas para reduzir a formação do vórtice ao

redor do eixo central e aumentar a turbulência no meio líquido. A mistura é alcançada usando um impelidor montado em um eixo agitador, normalmente, posicionado no centro do tanque. O eixo do agitador é acionado rapidamente pelo motor do agitador; o efeito do impelidor rotativo é transferir momento para o líquido e criar um padrão de fluxo regular. O líquido passa pelo impelidor, circula pelo tanque e retorna periodicamente à região do impelidor (DORAN, 2013).

Figura 2 - Esquemática do tanque de agitação.



Fonte: Adaptado de DORAN (2013).

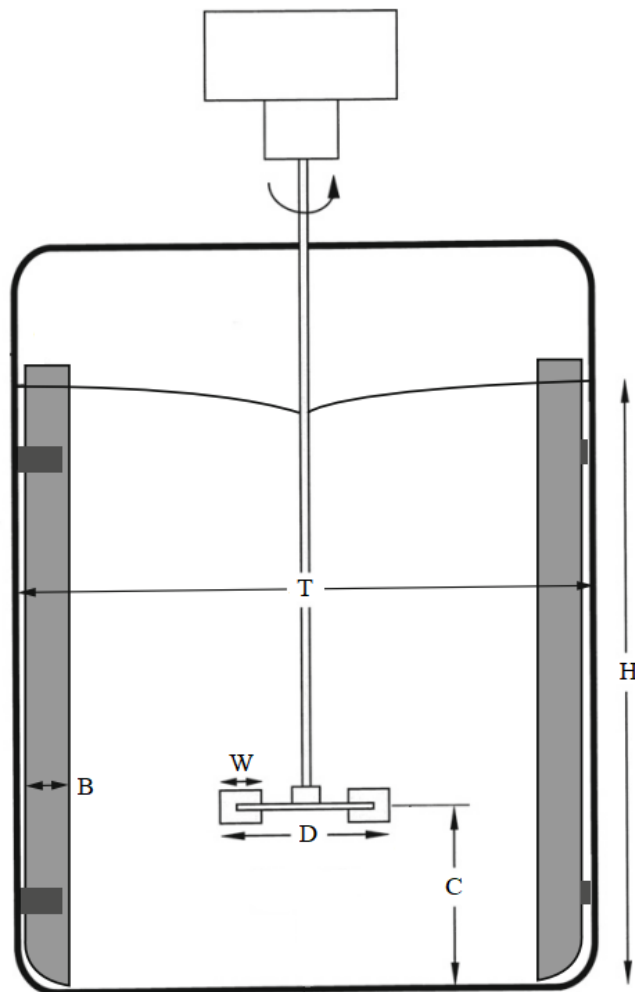
Tanques agitados são utilizados para suspensão de sólidos que naturalmente sedimentam ou flutuam. Para sólidos que sedimentam é mais propício o uso de impelidores que promovam um escoamento axial e quando a transferência de massa é essencial pode-se buscar um nível de suspensão uniforme.

O equipamento escolhido para as operações de mistura exerce uma influência significativa no resultado do processo. As características operacionais do tanque e dos diferentes impelidores são primordiais na hora de planejar o equipamento.

3.2.1 Relações geométricas

Para agitadores com um único impelidor, o diâmetro do impelidor (D) apresenta uma extensão entre $1/4$ e $4/5$ do diâmetro do tanque (T). Outro aspecto da geometria do tanque que influencia a eficiência da mistura é a altura do impelidor em relação ao fundo (C), comumente chamada de *clearance* (Figura 3). Essa folga entre o impelidor e o fundo afeta a suspensão de sólidos, a dispersão de bolhas de gás e a estabilidade hidrodinâmica. Na maioria das operações práticas de agitação, C está dentro da faixa de $1/6$ a $1/2$ do diâmetro do tanque. A presença de quatro chicanas igualmente espaçadas são geralmente suficientes para evitar a formação do vórtice central. A largura ideal das chicanas (B) depende do projeto do impulsor e da viscosidade do fluido, mas é da ordem de $1/10$ a $1/12$ do diâmetro do tanque (DORAN, 2013).

Figura 3 - Principais dimensões de um tanque agitado.



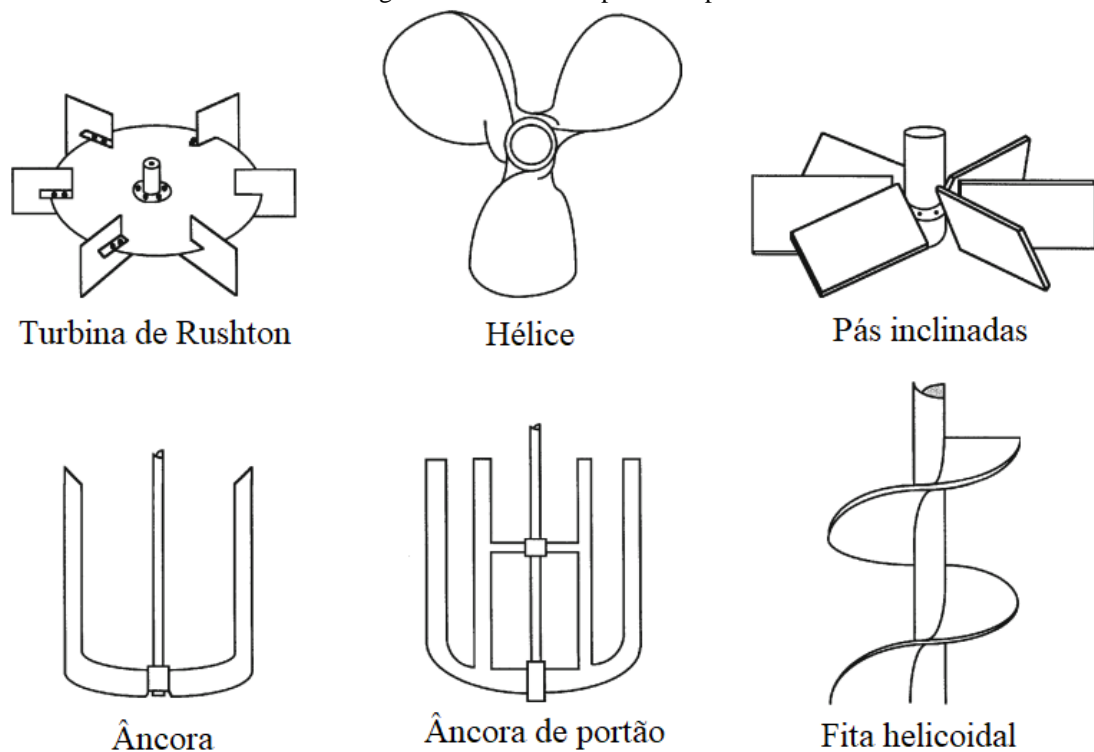
Fonte: Adaptado de DORAN, 2013.

3.2.2 Tipos de impelidores

São inúmeros os diferentes projetos de impelidores encontrados na literatura e na indústria. A quantidade de lâminas, formatos, dimensões, angulações, posições no eixo etc., podem variar de incontáveis formas para melhor se adaptarem aos requisitos de mistura apresentados pelo sistema (VILELA, 2021).

O impelidor pode ser classificado, de acordo com a viscosidade da mistura agitada, em turbinas (para baixas e médias viscosidades) e em de pouca-folga (para altas viscosidades), os impelidores tipo turbina podem ser divididos, de acordo com o tipo de escoamento que proporcionam, em axial, radial e de alto cisalhamento. Existem também vários impelidores especializados e customizados, projetados para necessidades específicas de cada sistema, como mostra a Figura 4 (VILELA, 2021).

Figura 4 - Diferentes tipos de impelidores.



Fonte: Adaptado de DORAN (2013).

A escolha do impelidor a ser utilizado deve ser baseada no entendimento das necessidades do processo e das propriedades físicas das misturas envolvidas (DE SOUSA, 2007; PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004). Apesar da diversidade dessas peças, 80% das aplicações industriais utilizam impelidores tipo hélice, turbinas de Rushton e pás inclinadas (DE SOUSA, 2007).

Os impelidores do tipo turbina de Rushton são comumente utilizados em processo de fermentação, pois são muito eficazes em casos de dispersão de gás. As turbinas de Rushton caracterizam-se pela formação de padrões de fluxo radial. Em comparação com outros tipos de turbinas, os impulsores Rushton têm baixa capacidade de bombeamento ou circulação por unidade de potência consumida (DORAN, 2013).

As hélices são impelidores de fluxo axial. Eles podem ser operados para bombear o fluido de forma ascendente e descendente. São comumente usados com fluidos de baixa e média viscosidade e geralmente são instalados com diâmetro em torno de um terço do diâmetro do tanque. Com gaseificação, hélices operadas em alta velocidade podem gerar instabilidades de fluxo e torque. No entanto, as hélices são muito eficazes para sólidos suspensos, superando as turbinas Rushton nesse aspecto (DORAN, 2013).

As turbinas de pás inclinadas embora comumente referidas como impulsores de fluxo axial, geram fluxos de descarga significativos das componentes de velocidade radiais e axiais. Elas produzem fortes fluxos de fluido e uma eficiência de bombeamento maior do que as turbinas Rushton, tornando-as eficazes para aplicações de mistura sólido-líquido. Podem ser operadas nos modos de bombeamento descendente ou ascendente (DORAN, 2013).

3.3 Sistemas com suspensão de partículas sólidas

A agitação em sistemas com líquidos e sólidos pode ser utilizada para obtenção de misturas homogêneas, dissolução, cristalização, lixiviação, dispersão de sólidos, precipitação, polimerização, adsorção e dessorção.

Nesses sistemas a fase líquida é a fase contínua e os sólidos a fase dispersa, ou seja, as partículas estão separadas e são mantidas em movimento pelo fluido que escoava através delas. Uma das principais funções da agitação nestes sistemas é levantar os sólidos para que toda sua área superficial fique exposta para transferência de massa ou para uma reação (DE SOUSA, 2007; KASAT; PANDIT, 2008; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993).

Um parâmetro de destaque para sistemas com suspensão de partículas sólidas é a velocidade mínima de agitação em que se atinge a suspensão completa, chamado de velocidade mínima de suspensão ou de velocidade crítica (N_{js}). Operar abaixo dessa velocidade pode implicar numa transferência de massa insuficiente e acima dessa velocidade pode significar desperdícios no consumo energético da operação. Os fatores que influenciam na velocidade mínima de suspensão são as propriedades físicas do líquido e do sólido, a concentração de sólidos e a geometria do tanque e do impelidor usados. Este parâmetro é utilizado como um dos

principais critérios para projetos com suspensão de sólidos (DE SOUSA, 2007; KASAT; PANDIT, 2008; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993).

A velocidade mínima de suspensão de sólidos pode ser verificada tanto de forma visual quanto por instrumentos, como por exemplo o medidor de vazão ultrassônico de doppler e condutivímetros com sonda. Outra forma de avaliar a velocidade mínima de suspensão é pela correlação empírica desenvolvida por Zwietering (1958) a partir de análises dimensionais e expressa pela Equação 1.

$$N_{js} = Sv^{0,1}d_p^{0,2}(g\Delta\rho/\rho_l)^{0,45}X^{0,13}D^{-0,85} \quad (1)$$

Onde, S é uma constante adimensional que leva em conta o tipo de impelidor e as relações geométricas do sistema, ν é a viscosidade cinemática, d_p é o diâmetro da partícula, g é a aceleração da gravidade, $\Delta\rho$ é a diferença de densidade entre o sólido e o líquido, ρ_l é a densidade do líquido, X é a razão entre massa de sólido e massa de líquido e D é o diâmetro do impelidor. Esta correlação serve de base para inúmeras outras que seguiram depois (KASAT; PANDIT, 2008; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993; ZWIETERING, 1958).

A constante S da equação Zwietering pode ser obtida a partir de outra correlação (Equação 2) desenvolvida por Devarajulu; Loganathan (2016).

$$S = [a\left(\frac{C}{T}\right)^b\left(\frac{H}{T}\right)^c] \quad (2)$$

Onde, S é a constante geométrica da correlação de Zwietering, C é a distância, entre impelidor e fundo do tanque, H é o nível da fase líquida, T é o diâmetro do tanque e a , b e c são os parâmetros empíricos. Valores para a , b e c para tipos comuns de impelidores estão na Tabela 1.

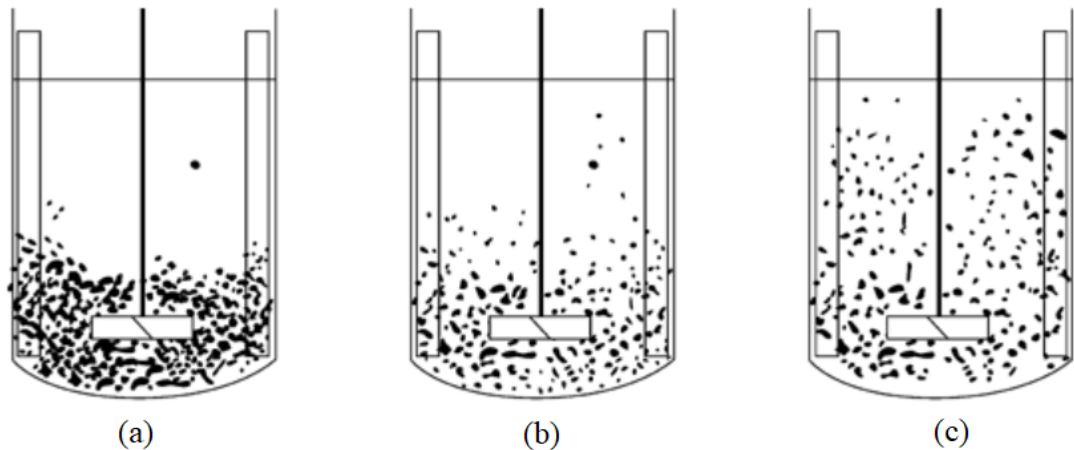
Tabela 1 - Valores para os parâmetros da correlação para a constante da correlação de Zwietering.

Tipo de impelidor	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Turbina de Rushton	8,54	0,218	-0,248
Pás retas	13,98	0,639	-0,055
Pás inclinadas	10,42	0,455	-0,107
Hélices	12,53	0,306	-0,120

Fonte: Adaptado de DEVARAJULU; LOGANATHAN (2016).

Existem diferentes níveis de suspensão de sólidos em um líquido, tais como: suspensão parcial, suspensão completa e suspensão uniforme (Figura 5). Compreender em qual nível de suspensão o sistema se encaixa é importante no projeto e no escalonamento de uma planta (DE SOUSA, 2007; KASAT; PANDIT, 2008; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993; PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

Figura 5 - Níveis de suspensão. (a) Parcial; (b) Completa; (c) Uniforme.



Fonte: Adaptado de DYNAMIX AGITATORS INC (2020).

3.3.1 Suspensão parcial

Parte dos sólidos está suspensa, porém alguns pontos do tanque, como fundo e periferias, possuem partículas estagnadas ou que só se movem no fundo, estas partículas no fundo possuem uma transferência de massa baixa e podem afetar o desempenho da unidade. Esta condição pode ser permitida em tanques de alimentação, desde que os sólidos não se aglomerem e cresçam, ou na dissolução de sólidos muito solúveis.

3.3.2 Suspensão completa

Todas as partículas estão em suspensão e nenhuma permanece no fundo por mais de 2 segundos. Nesta condição é comum a observação de um gradiente de concentração e que a região no topo do nível do líquido não apresente sólidos.

Este ponto é de suma importância, o gradiente de concentração de sólidos neste ponto tem pouco efeito sobre o desempenho de uma unidade de dissolução ou em um reator químico e o coeficiente de transferência de massa crescerá pouco com o aumento da velocidade de agitação. Este estado de agitação é considerado satisfatório para maioria dos casos e é o utilizado na maioria das correlações que tentam prever o comportamento de suspensões.

3.3.3 Suspensão uniforme

Os sólidos estão bem distribuídos por todo volume de líquido, um grau de uniformidade na concentração de sólidos de 95% é usualmente considerado suficiente para se considerar a suspensão uniforme.

A distribuição de sólidos em tanques agitados não é de fácil determinação. Um grande número de métodos foram desenvolvidos nos últimos 50 anos. Eles podem ser separados em duas categorias distintas: métodos não intrusivos e métodos intrusivos.

Para a primeira categoria, os métodos mais simples são baseados em observações visuais diretas (EINENKEL; MERSMANN, 1977; ZWIETERING, 1958). No entanto, eles permanecem limitados a vasos transparentes e sistemas de baixa concentração (OLDSHUE; SHARMA, 1992). Outros métodos não intrusivos incluem análises de variação do número de potência e técnicas baseadas em variações de intensidade de luz, rastreamento de partículas radioativas, medições de pressão e tomografia de resistência elétrica (DELACROIX et al., 2021).

Os métodos intrusivos são relativamente problemáticos por interromperem o fluxo medindo as concentrações de partículas em diferentes locais diretamente no vaso usando amostragem ou medições físicas (por exemplo, condutividade) (GODFREY; ZHU, 1994).

Por fim, as simulações computacionais são outra maneira de abordar o problema e que destaca-se por ser uma opção menos onerosa para se avaliar tais parâmetros.

3.4 Fluidodinâmica computacional

Fluidodinâmica computacional, ou CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*), trata-se da análise de sistemas envolvendo o escoamento de um fluido, transferência de calor e fenômenos associados, como reações químicas, por meio de simulações computacionais (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Exemplos de aplicações de CFD vão desde a simulação da aerodinâmica de veículos, hidrodinâmica de navios e processos de mistura e separação.

Programas de CFD são construídos em torno de algoritmos numéricos que buscam solucionar as equações de conservação e transferência de quantidade de momento, energia térmica e massa. Os programas de CFD apresentam três elementos fundamentais: um pré-processador, um solucionador e um pós-processador (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

No pré-processador o usuário fornece os dados de entrada para o programa, definindo parâmetros da natureza física do fenômeno a ser analisado. É nesta etapa que se determina a geometria da região de interesse (o domínio computacional), gera-se a malha computacional (subdivisão do domínio em vários elementos de menor volume, chamados de células), selecionam-se os fenômenos físicos e químicos que precisam ser modelados, define-se as propriedades dos fluidos envolvidos e especificam-se as condições de contorno que envolvem o domínio (VILELA, 2021).

A solução para um problema de transporte é definida em nódulos dentro de cada célula. A precisão de uma solução de um problema de CFD é dependente do número de células existentes na malha. De forma geral, quanto maior o número de células, mais precisa se torna a solução. Porém, malhas refinadas (com maior número de células) aumentam os custos computacionais, exigindo computadores mais robustos e um maior tempo de cálculo (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

No solucionador, o usuário escolhe as técnicas de solução numérica responsáveis por solucionar as equações de transporte. A técnica mais amplamente utilizada é a do método dos volumes finitos. De forma geral, o algoritmo numérico é composto pelos seguintes processos: integração das equações governantes do escoamento do fluido em todas as células do domínio, discretização (conversão das equações integrais resultantes em um sistema de equações algébricas) e solução das equações algébricas através de um método iterativo (VILELA, 2021).

Programas de CFD possuem técnicas de discretização especializadas no tratamento e resolução de cada um dos termos da equação de transporte. Por se tratar de problemas fisicamente complexos com equações não-lineares, soluções iterativas são aplicadas. Alguns algoritmos populares para solução iterativa desses problemas são o SIMPLE, PISO e COUPLED (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

No pós-processador o usuário tem a possibilidade de visualizar os resultados gerados pelo solucionador. Com o crescimento da popularidade dos CFD houve um impressionante aumento das capacidades gráficas destes programas. Os principais pacotes de CFD incluem ferramentas gráficas como visualização tridimensional da geometria e da malha do domínio, gráficos vetoriais, plotagem das linhas de perfil, gráficos de superfície 2D e 3D e rastreamento de partículas (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

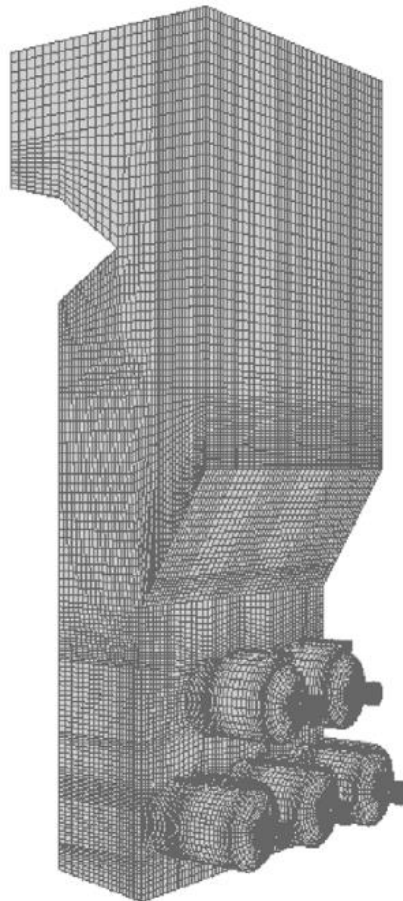
3.4.1 Modelagem CFD na análise e projeto de equipamentos industriais

A modelagem em CFD é amplamente aplicada como uma ferramenta de desenvolvimento de plantas industriais e otimização de processos. Devido ao aumento

constante do poder computacional nos últimos anos permitindo que engenheiros desenvolvessem modelos de reação de fluxos multifásicos em geometrias cada vez mais realistas. Como resultado, o número de aplicações de CFD em processos industriais também está crescendo rapidamente e aumentando em sofisticação (STOPFORD, 2002).

Stopford (2002) em seu estudo analisou a aplicação de modelagem CFD nas indústrias de geração de energia e combustão. Os exemplos averiguados por Stopford incluem projetos de queimadores de carvão de baixo NOX, além da otimização do forno a partir de um melhor entendimento do ar de queima excessiva, processo de requeima de gás e chamas laminares (Figura 6). De acordo com Stopford (2002), a modelagem CFD estabeleceu de forma bem sucedida uma ferramenta de projeto para queimadores e fornos que tem sido amplamente aplicado na indústria de geração de energia para ajudar os engenheiros de combustão a reduzir as emissões, aumentar a eficiência térmica, selecionar combustíveis e prolongar a vida útil da planta.

Figura 6 - Malha de volume finito de cerca de 300.000 células para uma caldeira com cinco fornos ciclônicos.



Fonte: STOPFORD (2002).

Outra análise realizada sobre a aplicação do CFD na indústria foi realizada por FOX (2006) que avalia a capacidade de modelagens CFD na predição de reatores químicos e seus

benefícios na indústria química. O aumento da acessibilidade de computação em larga escala permitirá que se explore a complexidade das reações químicas utilizando simulações diretas para problemas específicos em pequena escala que podem ser usados para testar modelos necessários para simulações CFD de reatores industriais.

A aplicação da fluidodinâmica computacional em reatores do tipo tanque mecanicamente agitado teve início no final dos anos 1970, porém foi nos últimos anos que esse tipo de reator se tornou um importante foco para o desenvolvimento de simulações em CFD. A realização de simulações CFD em reatores de tanque agitado contendo chicanas pode ser altamente benéfica, uma vez que fornece informações complementares valiosas para os critérios de aumento de escala. Tais critérios, normalmente projetados em conjunto com os resultados obtidos em laboratório ou escala piloto, não são bem estabelecidos (HARRIS et al., 1996).

Algumas particularidades devem ser consideradas quando se trabalha com modelagens de tanques de agitação, dentre elas a modelagem do escoamento rotacional e da turbulência do fluido.

3.4.2 Modelagem do escoamento rotacional

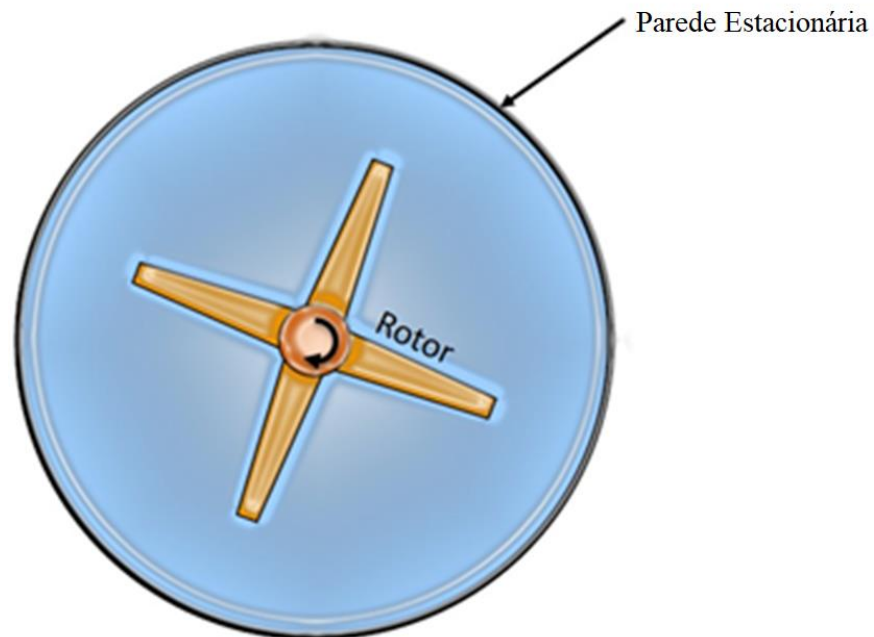
Uma das questões mais importantes na modelagem e simulação em CFD de tanques agitados é justamente a representação da rotação do impelidor. A modelagem em questão apresenta particularidades como o escoamento ser promovido por um domínio rotacional, com gradientes intensos de velocidade e pressão provocados pelo impelidor, presença de turbilhonamentos e formação de vórtice.

Para simulação de um impelidor em movimento rotacional três técnicas de modelagem se destacam: *Single Reference Frame* (SRF), *Multiple Reference Frame* (MRF) e malhas deslizantes (SM) (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

O modelo SRF utiliza um quadro de referência que rotaciona junto com o impelidor (Figura 7). Desta forma, para a maioria dos casos, o escoamento resultante é estacionário, o que economiza o custo computacional (VILELA, 2021).

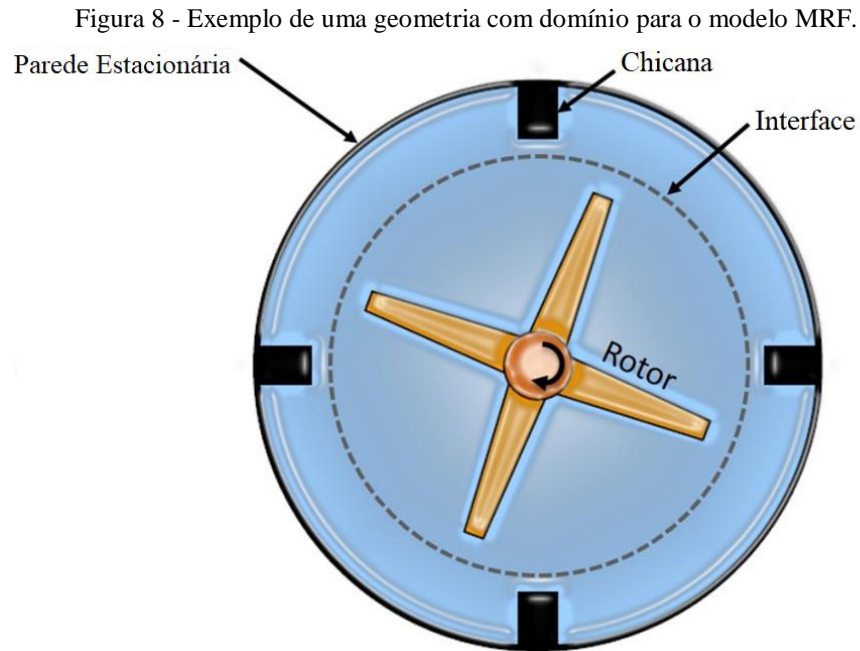
Na equação de conservação de quantidade de momento para este modelo dois termos fontes aparecem (um referente à velocidade da força centrífuga e outra devido ao efeito Coriolis) e a equação é solucionada para a velocidade relativa do quadro de referência. Uma grande desvantagem deste modelo é a incompatibilidade com geometrias mais complexas, não sendo possível assimilar tanques com chicanas ou com entradas e saídas (ANSYS INC, 2020; PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004; DELACROIX, 2021).

Figura 7 - Exemplo de uma geometria com domínio para o modelo SRF.



Fonte: Adaptado de LEARNCAX (2020).

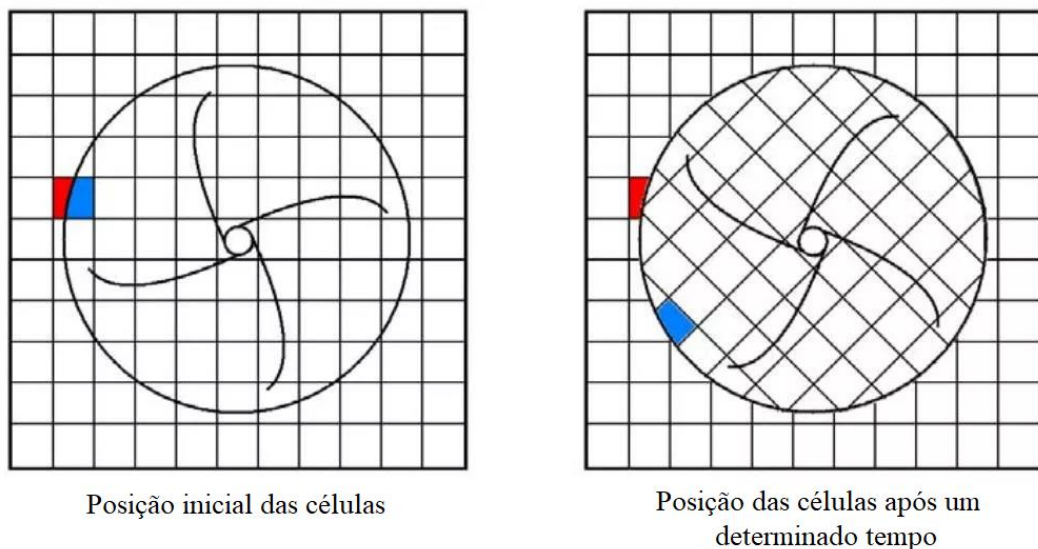
O MRF é um modelo que parte do SRF e que permite a solução de problemas com escoamento rotacional em geometrias mais complexas. O método MRF baseia-se na decomposição do domínio do tanque em duas partes, a primeira delas contemplando o referencial rotacional utilizando-se da abordagem Lagrangeana e um domínio estacionário utilizando-se da abordagem Euleriana (Figura 8). As velocidades no domínio rotacional são solucionadas como no SRF e no domínio estacionário são solucionados para uma velocidade absoluta (não mais relativa), partindo do campo de velocidade que é gerado pelo domínio rotacional (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).



Fonte: Adaptado de LEARNCAIX (2020).

A técnica de malhas deslizantes é a mais robusta destas três técnicas e é utilizada para resolução de problemas transientes. Neste modelo a malha rotacional desloca-se fisicamente em relação à malha estacionária a cada passo de tempo, como ilustra a Figura 9. As soluções obtidas tendem a ser mais precisas, porém este modelo exige um maior esforço computacional (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

Figura 9 - Exemplo de uma geometria com domínio para o modelo de malhas deslizantes.



Fonte: Adaptado de GOENGINEER (2016).

Apesar do modelo de malhas deslizantes ser mais preciso se comparado aos demais modelos Koh e Schwarz (2006) em seus estudos mostraram que o modelo MRF fornece resultados semelhantes ao modelo malhas deslizantes para a simulação em estado estacionário

de tanques de agitação, sugerindo que o custo computacional adicional é injustificada em tais condições.

3.4.3 Modelos de turbulência

3.4.3.1 Modelo k- ϵ

As equações do modelo Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) em conjunto com a hipótese de Boussinesq são tradicionalmente utilizadas para descrever a turbulência nestes tipos de problema. O modelo de turbulência k- ϵ é o mais popular dos modelos para solucionar a equação RANS. É um modelo já estabelecido e com baixo custo computacional, mas que gera resultados imprecisos para escoamentos rotacionais e escoamentos onde a interação entre o fluido e as paredes são significantes, como é o caso da maioria dos tanques agitados (LANE, 2017).

O modelo de turbulência k- ϵ apresenta algumas variações sendo o modelo k- ϵ Standard amplamente utilizado pela literatura, mas apresenta uma certa restrição em condições de perfis turbulentos em tanques agitados, como demonstra o estudo realizado por Murthy e Joshi (2008). Os resultados encontrados por Murthy e Joshi mostraram que o modelo Standard teve um desempenho insatisfatório na previsão dos perfis turbulentos, especialmente próximos às regiões das pás dos impelidores, onde o fluxo é considerado anisotrópico.

O estudo comparativo entre as três variações do modelo turbulência k- ϵ : Standard, RNG e Realizable na modelagem de tanques STR, realizado por Mendoza-Escamilla (2018) mostrou que o modelo k- ϵ Realizable apresentou uma melhor previsão dos resultados, visto que as mudanças no modelo o adaptaram para prever a curvatura de linhas de correntes.

3.4.3.2 Modelo k- ω

O modelo k- ω é uma variação do modelo de turbulência k- ϵ , que foi desenvolvido para simular escoamentos com altos valores do número de Reynolds, mas que apresenta algumas limitações em certas condições de fluxo. O modelo k- ω usa a hipótese de difusão em gradiente para relacionar as tensões de Reynolds com os gradientes de velocidade média e a viscosidade turbulenta (SERAM; GIESTAS, 2020).

Sua utilização gera certa vantagem justamente por ser mais preciso do que o modelo k- ϵ em fluxos focados na camada limite em que há forte gradiente de pressão, separação do fluxo e recirculação. Este modelo tem a capacidade de prever com acurácia satisfatória gradientes de pressão adversos localizados na proximidade das camadas limites e o comportamento de

escoamentos radiais onde a interação com as paredes é significativa. Entretanto, este modelo é muito sensível aos valores da energia cinética turbulenta e da taxa específica de dissipação na corrente livre, tornando a solução do modelo instável (ANSYS INC, 2020).

3.4.3.3 Modelo LES

Ao contrário dos modelos de turbulência RANS, que são baseados em modelos estatísticos para representar as propriedades da turbulência, o modelo LES (*Large Eddy Simulation*) é baseado na solução das equações de Navier-Stokes diretamente para as escalas maiores e em uma modelagem sub-grade para as escalas menores.

O modelo de turbulência LES realiza uma filtragem nas equações transientes de Navier-Stokes, resolvendo os fenômenos de turbulência superiores à dimensão do filtro e rejeitando os inferiores, que serão modelados. Ou seja, o modelo LES baseia-se na decomposição do campo de velocidade em escalas de comprimento diferentes, onde as maiores escalas são resolvidas diretamente, enquanto as menores são modeladas (POPE, 2000).

A técnica utilizada pelo modelo LES é particularmente adequada para simulações de fluxos complexos, como turbulência isotrópica, turbulência de parede, escoamentos separados e mistura de fluidos (BENTO, 2019).

3.5 Planejamento experimental

Ao se efetuar uma pesquisa com a realização de experimentos, o primeiro requisito é possuir de forma clara e bem definida qual o objetivo da investigação. A etapa subsequente é estruturar os passos necessários para a realização dos experimentos.

Segundo Lima et al (2022, apud MONTGOMERY, 2001) um experimento devidamente planejado permite a coleta de dados de forma correta e organizada e quando esse procedimento é feito inadequadamente, na maioria das vezes, não é possível obter resultados conclusivos. Sendo assim, o planejamento de experimento auxilia o pesquisador a organizar e orientar a execução de um experimento, de modo que os métodos estatísticos possam ser utilizados para analisar as respostas encontradas, resultando em conclusões válidas e objetivas.

3.5.1 Planejamento Fatorial

Um dos principais objetivos quando se realiza pesquisas é determinar a influência de um ou mais fatores sobre um fator resposta de interesse (BARROS et. al, 2001). Os fatores são as variáveis independentes que o pesquisador deseja e tem condições de manipular.

O planejamento fatorial permite avaliar todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores investigados e, dessa forma, consegue-se obter uma análise sobre as variáveis e sobre suas interações (MONTGOMERY, 2001; BOX; HUNTER, 2005).

3.5.2 Planejamento Composto Central

Planejamentos Compostos Centrais (PCC) são planejamentos fatoriais de 1ª ordem aumentados por pontos adicionais para permitir a estimação dos parâmetros de uma superfície de 2ª ordem.

A estrutura básica do projeto consiste em três partes (MANSON; GUNST; HESS, 2003; BERGER; MAURER; CELLI, 2018):

- Um planejamento fatorial de dois níveis (2^k), que estima os termos principais e suas interações;
- A adição ao planejamento 2^k de pontos axiais que ajudam a estimar os termos quadráticos. A quantidade de pontos axiais adicionados é o dobro do número de fatores analisados (2^k). Os pontos axiais são codificados e denotados de α . Sendo α uma constante que é determinada pelo pesquisador;
- A inclusão de um conjunto de pontos centrais, que estima o erro e ajuda a avaliar a curvatura da superfície com mais estabilidade.

Desta forma, cada variável é avaliada em cinco níveis ($-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$). O número de experimentos de um PCC pode ser determinado por: $2^k + 2k + n$ pontos centrais.

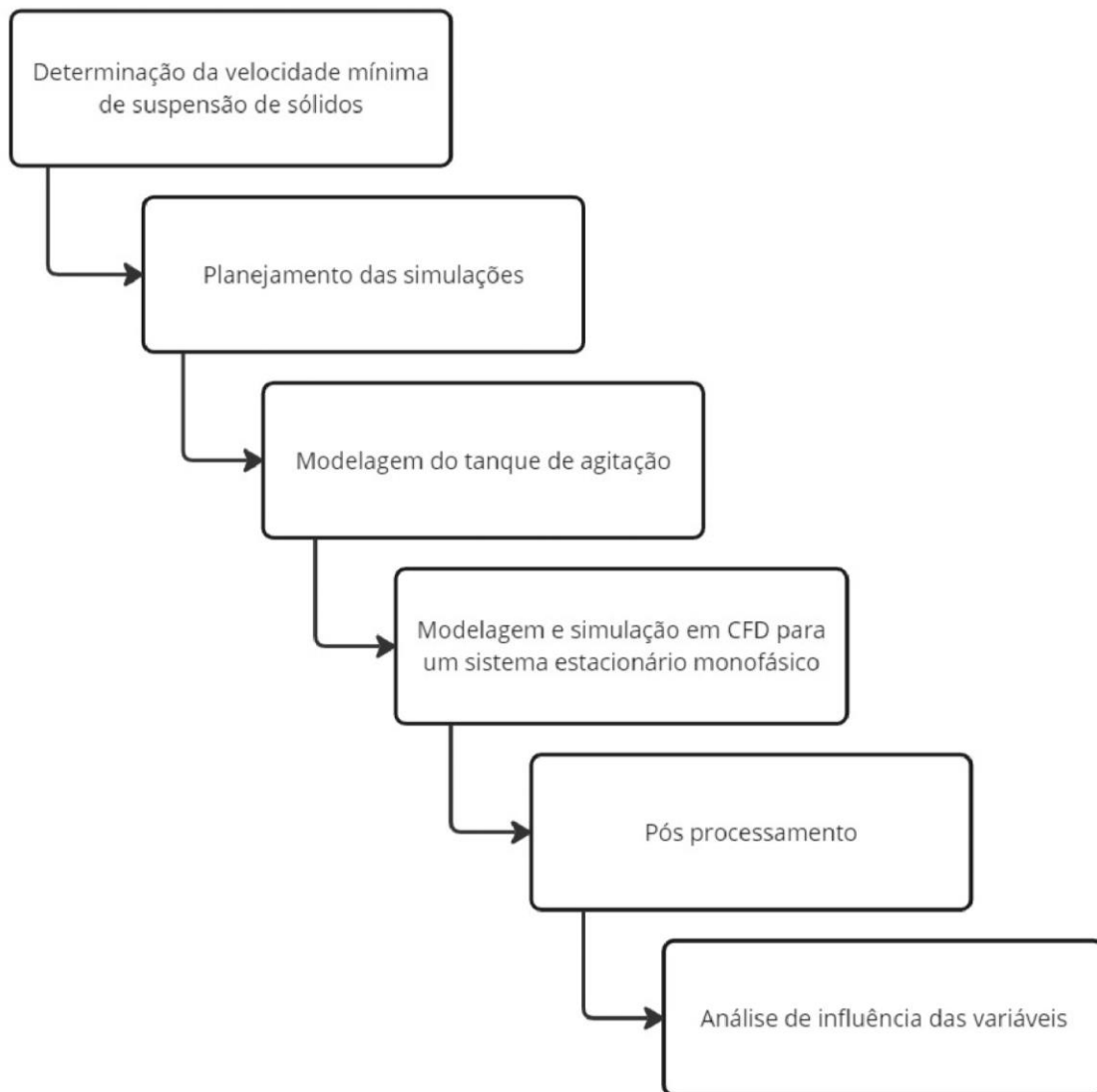
O PCC é um planejamento muito eficiente para ajustar o modelo de segunda ordem. Existem dois parâmetros no projeto que devem ser especificados: o valor de α e o número de pontos centrais (BOX; HUNTER; HUNTER, 2005).

Algo que se deve ficar atento ao utilizar um PCC é se as condições operacionais da pesquisa conseguem atender as exigências do planejamento. Devido aos valores encontrados para o α , os pontos axiais do planejamento acabam gerando condições experimentais em que o valores dos fatores analisados são número fracionários, com duas ou três casas após a vírgula. Assim, o PCC requer um maior refino no controle das variáveis independentes e nem todos experimentos conseguem atender tal precisão.

4 METODOLOGIA

A fim de realizar uma triagem dos fatores que afetam o processo de agitação entre as características do agitador, avaliando-se a mais viável para projeção em escala industrial, foram executadas etapas sequenciais, partindo da modelagem do tanque de agitação. As etapas são mencionadas na Figura 10 e explicadas mais detalhadamente em seguida.

Figura 10 - Etapas sequenciais da metodologia.



Fonte: AUTOR (2023).

4.1 Determinação da velocidade mínima de suspensão de sólidos

A velocidade mínima para as partículas estejam completamente suspensas é denominada velocidade mínima de suspensão (N_{js}) e pode ser calculada através da correlação de Zwietering (ZWIETERING, 1958), que foi apresentada na Equação (1). Os valores utilizados para o cálculo estão expressos na Tabela 2. Para determinar o valor da constante geométrica de Zwietering, foram utilizadas a Equação (3) e os dados da Tabela 1.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados no cálculo para determinação de N_{js} e v_r .

	Parâmetros	Valor	Unidade
Propriedades	Aceleração da gravidade (g)	9,81	m/s ²
	Viscosidade cinemática (ν)	1.10 ⁻⁶	kg ² /s

Condições de projeto e Processo	Densidade da fase líquida (ρ_l)	997	kg/m ³
	Densidade da fase sólida (ρ_s)	1500	kg/m ³
	Diâmetro médio das partículas (d_p)	1	mm
	Carga de sólidos (X)	5	-
	Nível do líquido (H)	120	mm
	Diâmetro do impelidor	60	mm

Fonte: AUTOR, 2023; DDBST, 2020.

Para a determinação da velocidade de rotação do impelidor (ω) foram utilizadas as velocidades mínimas de suspensão de sólidos (N_{js}) com as alterações propostas em cada sistema, visto que a constante S demonstrada na Equação 2 varia conforme as alterações geométricas presentes no tanque. Os resultados obtidos de velocidade de rotação correspondem a 615 RPM, 718 RPM e 1120 RPM.

4.2 Planejamento das simulações

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 os fatores controláveis: angulação das pás em relação ao eixo vertical (θ), razão entre o diâmetro do impelidor e o diâmetro do tanque (D/T), número de pás do impelidor (NI), razão entre a altura do tampo e o diâmetro do tanque (C/T) e velocidade de rotação dos impelidores (ω). A Tabela 3 mostra a matriz do planejamento composto central.

Tabela 3 - Planejamento Composto Central: Variáveis do impelidor.

Simulação	θ (°)	NI (-)	D/T (-)	ω (RPM)	C/T (-)
1	30 (-1)	3 (-1)	0,40 (-1)	1120 (+1)	0,35 (+1)
2	30 (-1)	3 (-1)	0,40 (-1)	615 (-1)	0,25 (-1)
3	30 (-1)	3 (-1)	0,60 (+1)	1120 (+1)	0,25 (-1)
4	30 (-1)	3 (-1)	0,60 (+1)	615 (-1)	0,35 (+1)
5	30 (-1)	5 (+1)	0,40 (-1)	1120 (+1)	0,25 (-1)
6	30 (-1)	5 (+1)	0,40 (-1)	615 (-1)	0,35 (+1)
7	30 (-1)	5 (+1)	0,60 (+1)	1120 (+1)	0,35 (+1)
8	30 (-1)	5 (+1)	0,60 (+1)	615 (-1)	0,25 (-1)
9	60 (+1)	3 (-1)	0,40 (-1)	1120 (+1)	0,25 (-1)
10	60 (+1)	3 (-1)	0,40 (-1)	615 (-1)	0,35 (+1)
11	60 (+1)	3 (-1)	0,60 (+1)	1120 (+1)	0,35 (+1)
12	60 (+1)	3 (-1)	0,60 (+1)	615 (-1)	0,25 (-1)
13	60 (+1)	5 (+1)	0,40 (-1)	1120 (+1)	0,35 (+1)
14	60 (+1)	5 (+1)	0,40 (-1)	615 (-1)	0,25 (-1)
15	60 (+1)	5 (+1)	0,60 (+1)	1120 (+1)	0,25 (-1)
16	60 (+1)	5 (+1)	0,60 (+1)	615 (-1)	0,35 (+1)
17	15 (- α)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)
18	75 (+ α)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)
19	45 (0)	2 (- α)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)
20	45 (0)	6 (+ α)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)
21	45 (0)	4 (0)	0,30 (- α)	718 (0)	0,30 (0)
22	45 (0)	4 (0)	0,70 (+ α)	718 (0)	0,30 (0)
23	45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	213 (- α)	0,30 (0)
24	45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	1223 (+ α)	0,30 (0)
25	45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,20 (- α)
26	45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,40 (+ α)
27	45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)

Fonte: AUTOR (2023).

Foram analisadas como fatores respostas do sistema a altura de suspensão de sólidos e também os perfis de magnitude de velocidade e as componentes de velocidade do fluido nas condições estabelecidas em cada simulação.

4.3 Modelagem do tanque de agitação

4.3.1 Geometria do sistema

A geometria utilizada foi modelada através do software DesignModeler, um dos pacotes CADs do ANSYS. O tanque utilizado para a modelagem é um tanque de agitação mecânica de tampo plano e presença de 4 chicanas distribuídas simetricamente.

As dimensões utilizadas para modelagem tiveram como base relações empíricas clássicas para relações geométricas com base no diâmetro e altura do tanque e relações determinadas pelos tutoriais fornecidos pela ANSYS para o volume do domínio rotacional. Os valores estão presentes na Tabela 4.

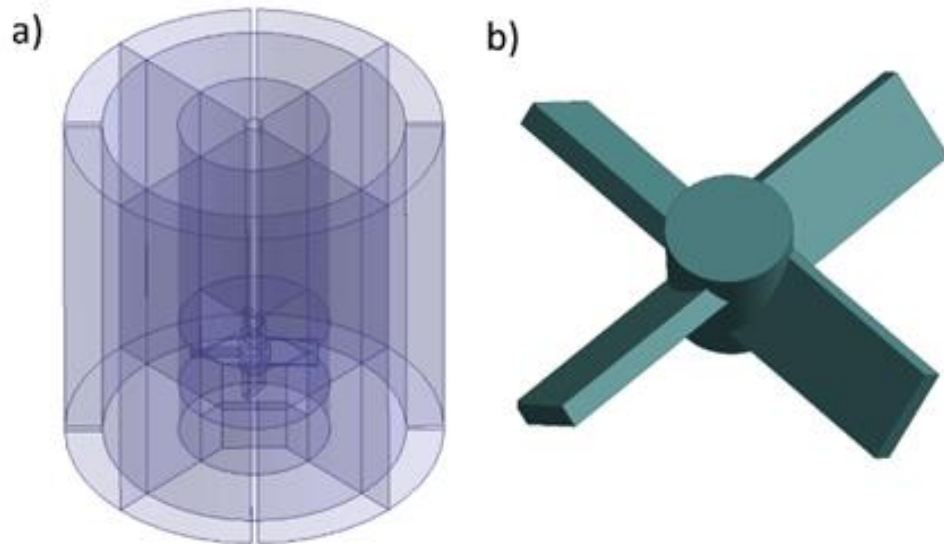
Tabela 4 - Dimensões do reator e acessórios.

Equipamento	Dimensão	Valor
Tanque	Diâmetro	120 mm
	Altura	120 mm
Acessórios	Diâmetro do eixo	6 mm
	Número de chicanas	4
	Altura da chicana	120 mm
	Comprimento da chicana	12 mm
	Espessura da chicana	2 mm
	Diâmetro do cubo	10 mm
	Altura do cubo	10 mm
Rotacional e impelidor de pás inclinadas	Diâmetro do domínio rotacional	1,2.D
	Altura do domínio rotacional	24 mm
	Altura da pá	8 mm
	Espessura da pá	2 mm

Fonte: AUTOR (2022).

Com o objetivo de garantir um maior controle sobre a geração da malha computacional, a geometria foi particionada, como pode ser visualizado na Figura 11a. Na Figura 11b é possível visualizar a geometria do impelidor de pás inclinadas.

Figura 11 - a) Geometria do tanque particionada e b) geometria do impelidor.



Fonte: AUTOR (2022).

4.3.2 Malha computacional

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.

A avaliação da qualidade da malha é verificada pelos parâmetros: qualidade dos elementos, que corresponde a uma medida da geometria e topologia dos elementos da malha em relação ao domínio físico; a razão de aspecto, que é definida como a razão entre o comprimento do maior lado do elemento e o comprimento do menor lado do mesmo elemento; a distorção, que é um parâmetro que se refere à deformação dos elementos da malha em relação à sua forma ideal, onde o elemento ideal é um elemento com ângulos internos iguais e lados de comprimentos iguais. Por fim, a qualidade ortogonal é uma medida da orientação dos vetores normais aos elementos da malha em relação aos elementos vizinhos (ANSYS INC, 2020).

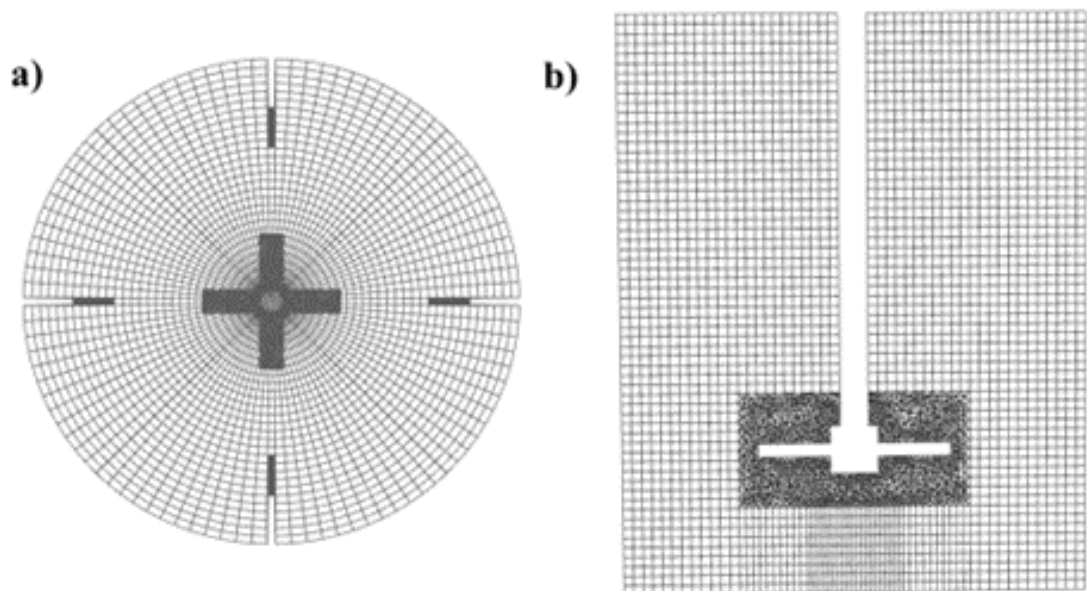
Os resultados das métricas de qualidade da malha estão dispostos na Tabela 5. A Figura 12a traz o perfil da malha em um plano horizontal que atravessa as chicanas e as pás do impelidor. Já a Figura 12b traz o corte vertical do tanque. Neste corte é possível visualizar as células tetraédricas e a maior densidade de células no domínio rotacional.

Tabela 5 - Métricas para qualidade de malha.

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

Fonte: AUTOR (2022).

Figura 12 - Malha computacional em a) corte horizontal na altura central do impelidor e b) corte vertical central.



Fonte: AUTOR (2023).

4.4 Modelagem e simulação em CFD para um sistema estacionário monofásico

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.

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; LUO, 2018) e como condição de contorno foi assumida a condição de não deslizamento nas paredes.

4.5 Pós processamento

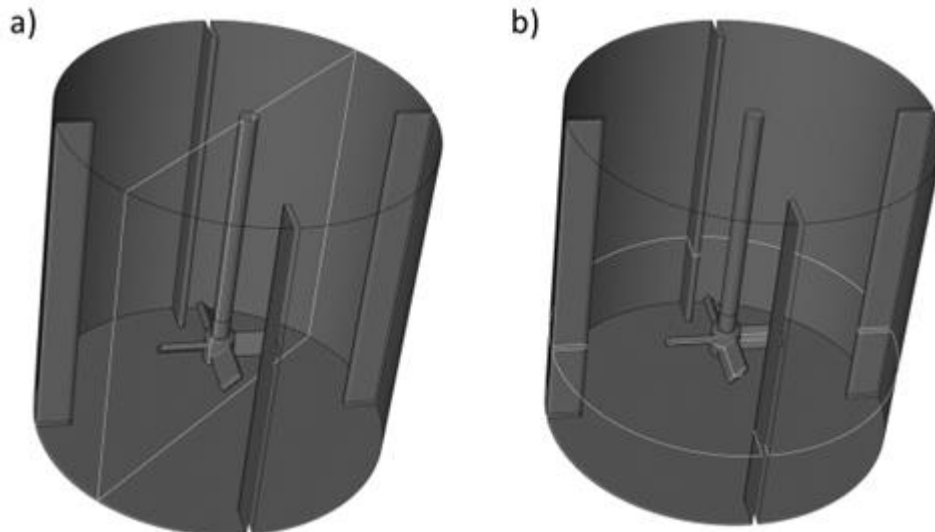
Para um melhor entendimento do comportamento do fluido e sua capacidade de suspensão de sólidos, foram criados isovolumes baseados na velocidade terminal (v_T) das

partículas imersas no fluido que compreendem a valores que são iguais e/ou maiores que a velocidade terminal. Essa por sua vez é determinada a partir da Equação 3. Os valores aplicados no cálculo de (v_r) estão expressos na Tabela 2.

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

No pós-processamento, foram gerados, a partir do software ParaView 5.10.1, gráficos de contorno no interior dos isovolumes para avaliar o comportamento da magnitude da velocidade e as componentes de velocidade, assim como a altura de suspensão de sólidos que corresponde à altura máxima do isovolume criado em cada condição de simulação. 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 13a. 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 13b.

Figura 13 - Malha computacional em a) corte horizontal na altura central do impelidor e b) corte vertical central.



Fonte: AUTOR (2023).

4.6 Análise de influência das variáveis

Os perfis de influência dos fatores controláveis foram realizados tomando a variação de cada um dos fatores por vez e fixando as demais em seus pontos centrais. Como pontos avaliativos, foram analisados tanto qualitativamente a partir dos perfis de magnitude da velocidade e velocidade axial nos planos 1 e 2, quanto quantitativamente pelas alturas máximas

de suspensão de sólidos (H_{vt}) obtidas em cada uma das simulações do planejamento experimental.

Foram aplicadas técnicas de regressão múltipla aos dados obtidos no planejamento experimental utilizando o software STATISTICA 13.3, a fim de quantificar os efeitos dos fatores controláveis sobre a resposta H_{vt} .

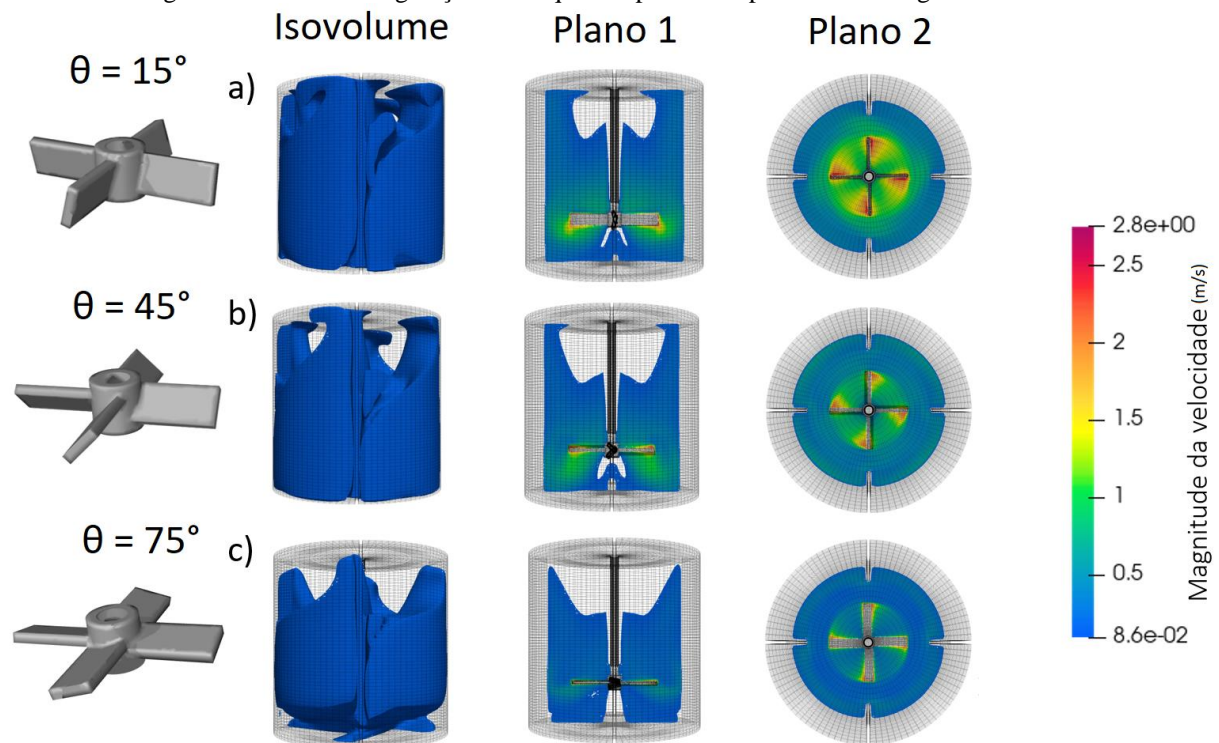
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Efeito da angulação de ataque das pás (θ)

A Figura 13 mostra o perfil da influência da angulação das pás na magnitude da velocidade nos Plano 1 e Plano 2 com a condição do impelidor com 4 pás, razão de diâmetro de $0,5T$, razão entre a altura em relação ao tampo e o diâmetro do tanque de $0,3T$ e velocidade de rotação do impelidor de 718 RPM.

Nota-se que para a angulação de 75° (Figura 14c) a velocidade resultante do fluido próximo ao tampo não apresenta magnitude elevada o suficiente para preencher totalmente o fundo do tanque, 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 14 - Efeito da angulação de ataque das pás dos impelidores na magnitude da velocidade.

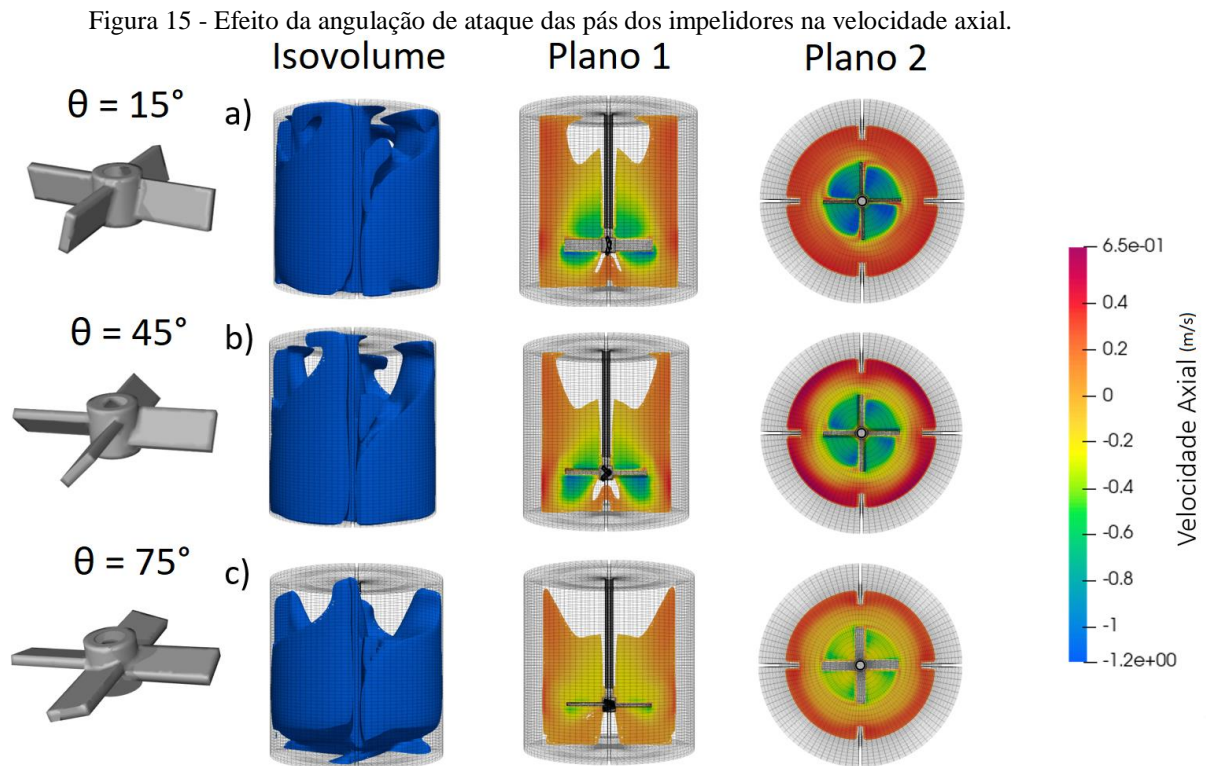


Fonte: AUTOR (2023).

Para as angulações de 15° (Figura 14a) e 45° (Figura 14b) é observada uma maior intensidade da magnitude da velocidade, quando comparada com a simulação com pás de 75° de angulação. Nota-se ainda, nas configurações (a) e (b), que o isovolume correspondente às velocidades superiores à velocidade terminal das partículas, preenchem quase que totalmente a

região do tampo do equipamento. Desta forma, o acúmulo de sólidos na região tende a ser minimizado.

De modo a corroborar com a análise realizada na Figura 14, foi também avaliado o efeito da angulação das pás na componente axial de velocidade (Figura 15).



Fonte: AUTOR (2023).

A componente axial da velocidade apresenta-se como uma variável de fundamental importância para a 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 15 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 6 são apresentados os resultados da variável resposta proposta neste estudo: altura máxima normalizada do campo de velocidade superior à velocidade terminal da partícula (H_{vt}) em relação a variação do ângulo das pás.

Tabela 6 - Efeito do ângulo de ataque das pás do impelidor sobre H_{vt} .

θ (°)	NI (-)	D/T (-)	ω (RPM)	C/T (-)	H_{vt} (-)
15 ($-\alpha$)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)	0,995
45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)	0,990
75 ($+\alpha$)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)	0,959

Fonte: AUTOR (2023).

Observa-se, ainda na Tabela 6, uma relação inversamente proporcional, na região avaliada, entre o aumento da angulação e o fator resposta. Tal fato encontra-se em consonância com a avaliação qualitativa apresentada na Figura 15.

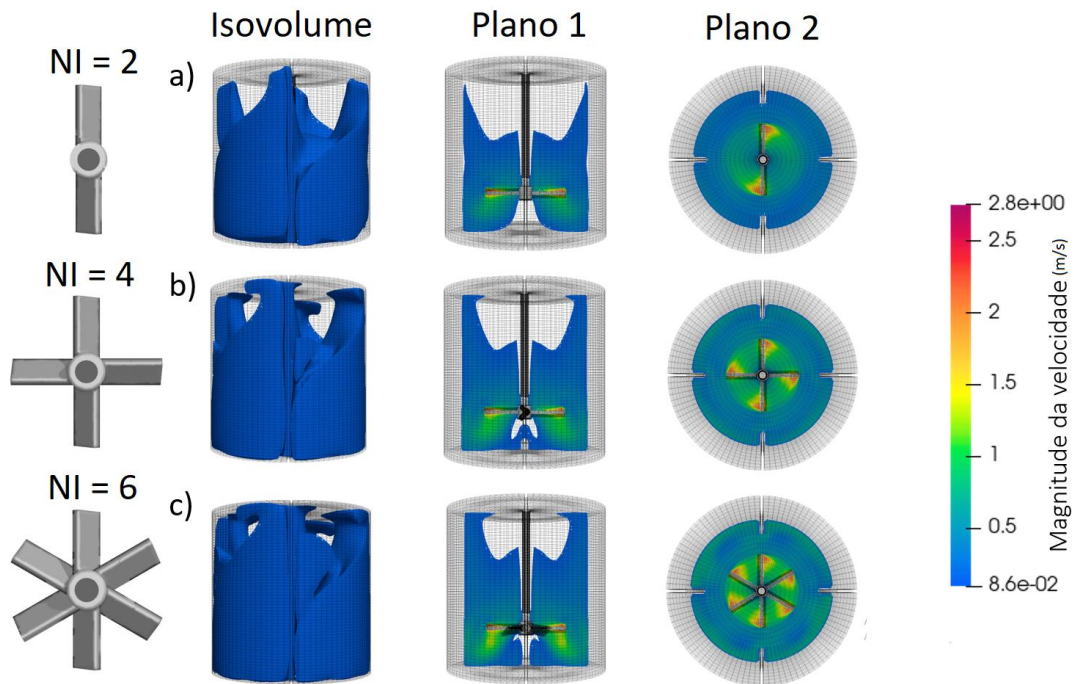
Este fato deve-se à forma com que o fluxo é direcionado ao se chocar com as pás. Murthy e Josh (2008) avaliaram a influência da angulação das pás entre 30° e 60° em seu trabalho. Os autores afirmam que a redução da angulação das pás até a angulação de 30° favorece o fluxo axial em detrimento do radial, este trabalho apresenta uma tendência de comportamento semelhante para uma faixa mais ampla, entre 15° e 75°.

5.2 Efeito do número de pás (NI)

As Figuras 16 e 17 apresentam os perfis da influência do número de pás na magnitude da 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 angulação de ataque de 45°, diâmetro de 0,5T, razão entre a altura em relação ao tampo e o diâmetro do tanque de 0,3T e velocidade de rotação do impelidor de 718 RPM.

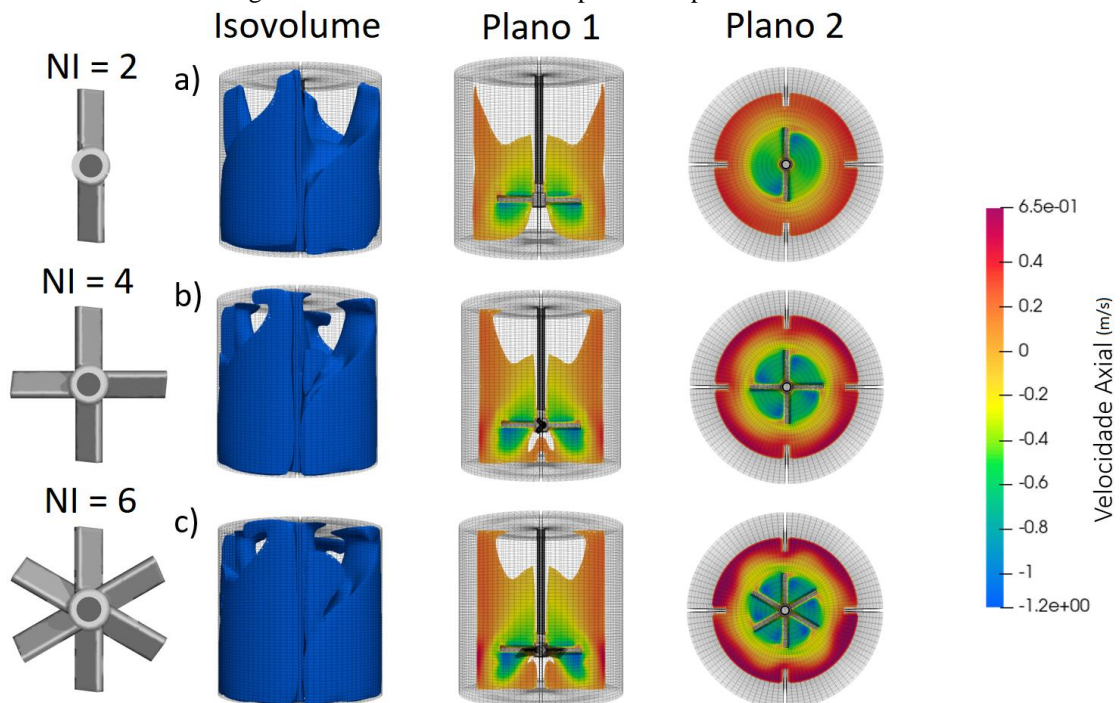
A partir da análise das Figuras 16 e 17, observa-se, principalmente no Plano 2, a influência da intensidade radial conforme o número de pás é aumentado, fazendo com que o fluido alcance as paredes do tanque com velocidade superior a velocidade terminal das partículas em estudo. Tal informação é confirmada pela análise da Figura 18, em que é possível visualizar as zonas de recirculação sendo intensificadas à medida que o número de pás é aumentado. 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 (KRESTA et al., 2016).

Figura 16 - Efeito do número de pás dos impelidores na magnitude da velocidade.



Fonte: AUTOR (2023).

Figura 17 - Efeito do número de pás dos impelidores na velocidade axial.



Fonte: AUTOR (2023).

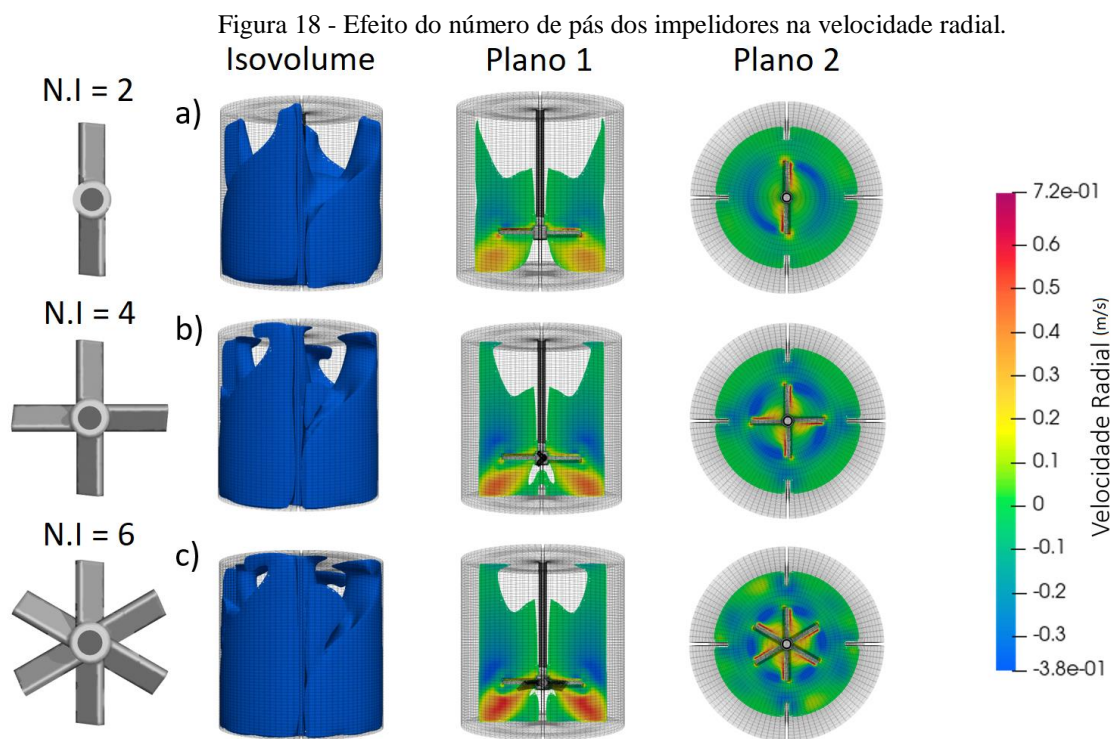
Na Tabela 7 é apresentado os resultados da variável resposta H_{vt} em relação ao número de pás do impelidor.

Tabela 7 - Efeito do número de pás do impelidor sobre H_{vt} .

θ (°)	NI (-)	D/T (-)	ω (RPM)	C/T (-)	H_{vt} (-)
45 (0)	2 (- α)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)	0,984
45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)	0,990
45 (0)	6 (+ α)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)	0,994

Fonte: AUTOR (2023).

A partir da análise da Tabela 7, 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, como pode ser observado na Figura 18. Kumaresan e Joshi 2016, ao avaliar o efeito do número de pás observaram comportamento semelhante.



5.3 Efeito da razão do diâmetro do impelidor (D/T)

A configuração selecionada para avaliação deste efeito foi a que apresenta impelidor com quatro pás, angulação de ataque de 45° , razão entre a altura em relação ao tanque e o diâmetro do tanque de 0,3T e velocidade de rotação do impelidor de 718 RPM.

É possível observar a partir da análise da influência na magnitude da velocidade e na componente axial, representadas respectivamente nas Figuras 19 e 20, que o aumento do

diâmetro do impelidor gera uma maior intensidade no campo de magnitude de velocidade e velocidade axial, sendo este fato associado a uma maior quantidade de movimento para o fluido devido justamente a maior área de contato superficial atribuída com o aumento do diâmetro. Todavia, com a elevação desta área de contato não apenas eleva-se a taxa de transferência de quantidade de movimento como também o torque necessário para movimentação dos impelidores utilizados.

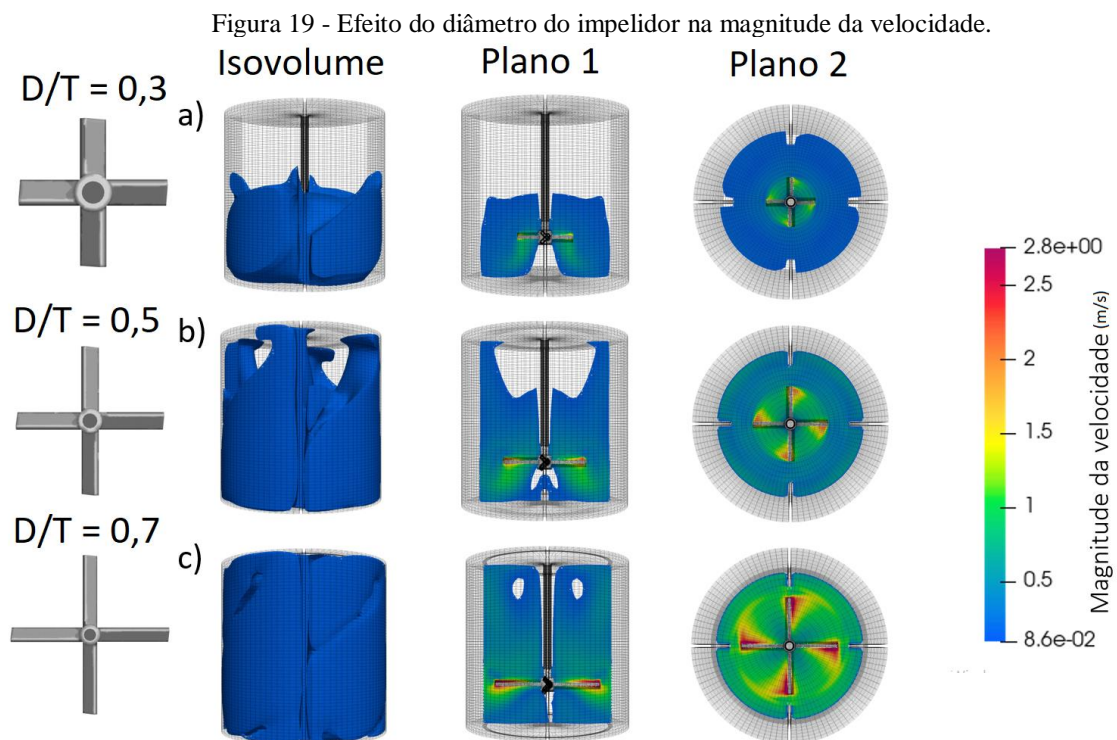
A Tabela 8 ilustra quantitativamente a influência do aumento do diâmetro do impelidor sobre a suspensão de sólidos.

Tabela 8 - Efeito do diâmetro do impelidor sobre H_{vt} .

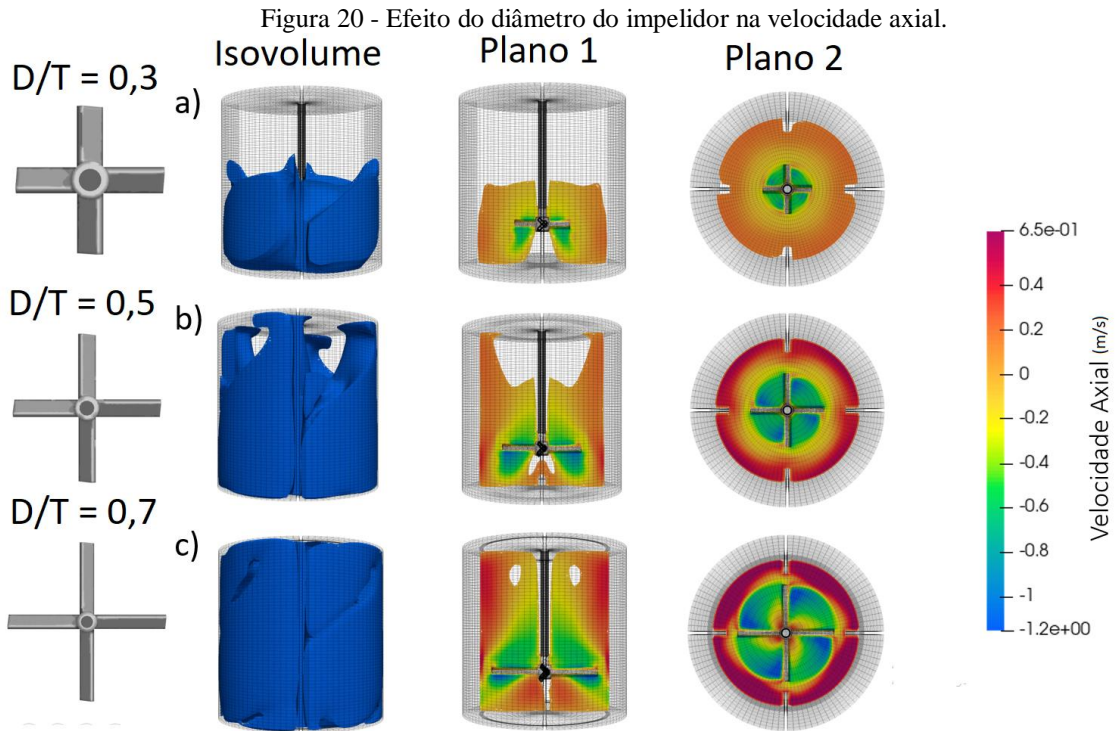
θ (°)	NI (-)	D/T (-)	ω (RPM)	C/T (-)	H_{vt} (-)
45 (0)	4 (0)	0,30 (- α)	718 (0)	0,30 (0)	0,653
45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)	0,990
45 (0)	4 (0)	0,70 (+ α)	718 (0)	0,30 (0)	0,997

Fonte: AUTOR (2023).

Assim como avaliado qualitativamente nas Figuras 19 e 20, a partir da avaliação da Tabela 8, nota-se que a influência da razão de diâmetros dá-se de modo não linear.



Fonte: AUTOR (2023).

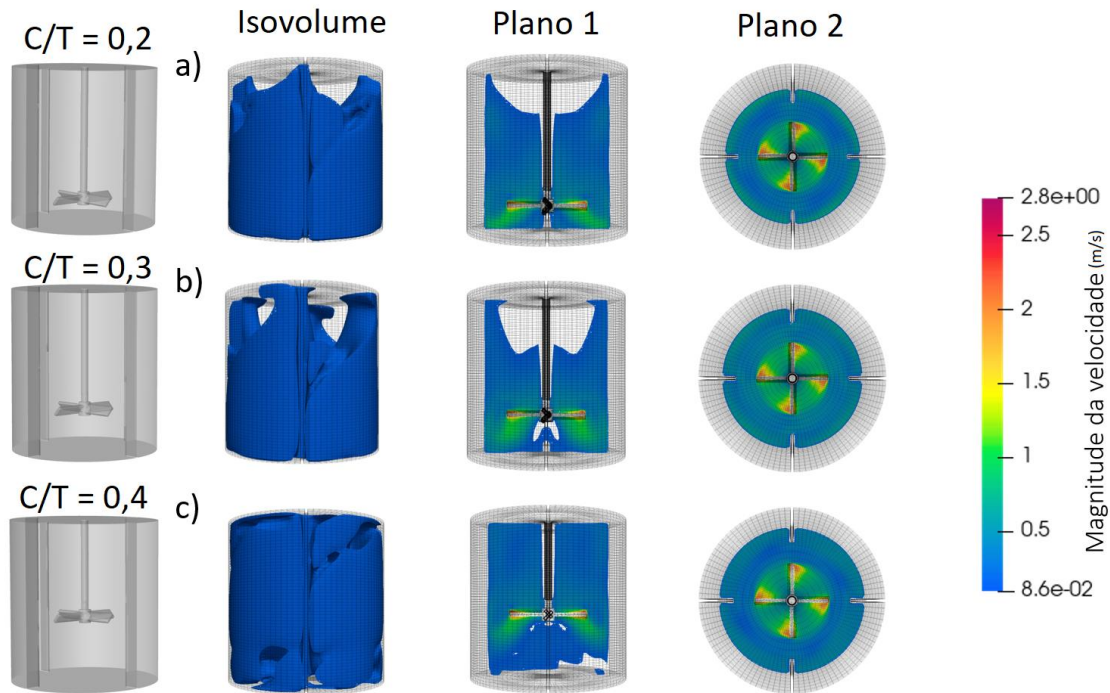


Fonte: AUTOR (2023).

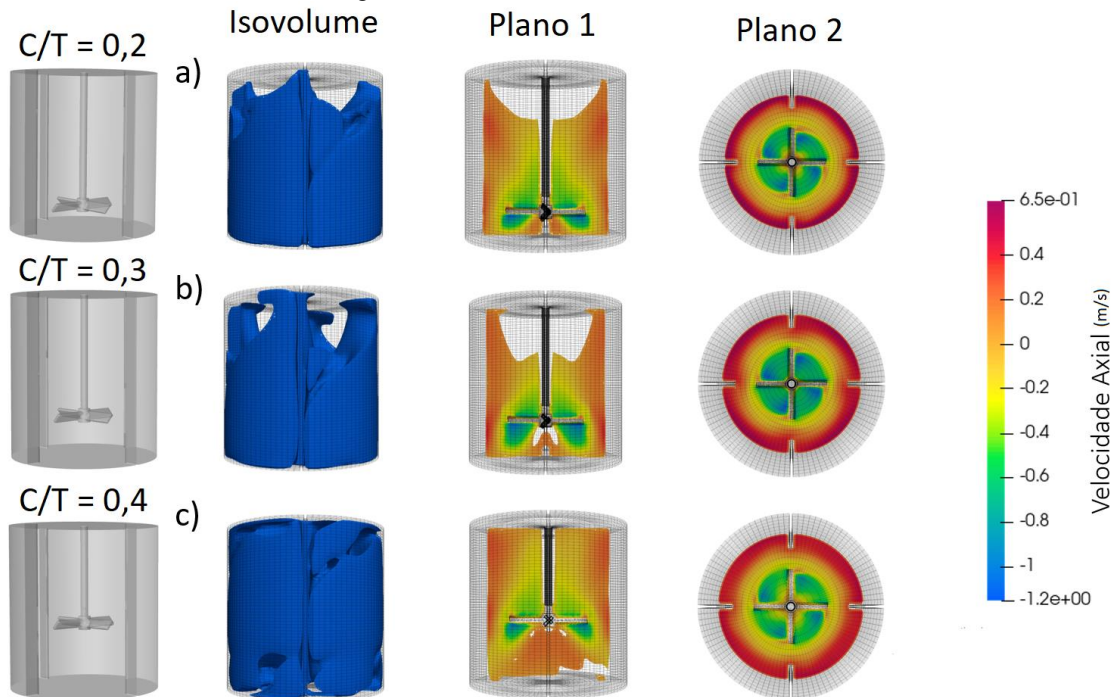
5.4 Efeito da razão entre a altura em relação ao tampo e o diâmetro do tanque (C/T)

As Figuras 21 e 22 mostram os perfis da influência da razão entre a altura em relação ao tampo (*clearance*) e o diâmetro do tanque na magnitude da 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, angulação de ataque de 45° , razão entre o diâmetro e o diâmetro do tanque de $0,5T$ e velocidade de rotação do impelidor de 718 RPM.

Como observado nas Equações 1 e 2 há uma relação diretamente proporcional entre o *clearance* e a velocidade mínima de suspensão de sólidos (N_{js}). Kazemzadeh (2020), em seus estudos, descreve uma relação proporcionalmente indireta em relação ao fator resposta, tanto na relação com a magnitude de velocidade quanto na relação com a velocidade axial, assim como descreve as Figura 21 e 22.

Figura 21 - Efeito do *clearance* na magnitude da velocidade.

Fonte: AUTOR (2023).

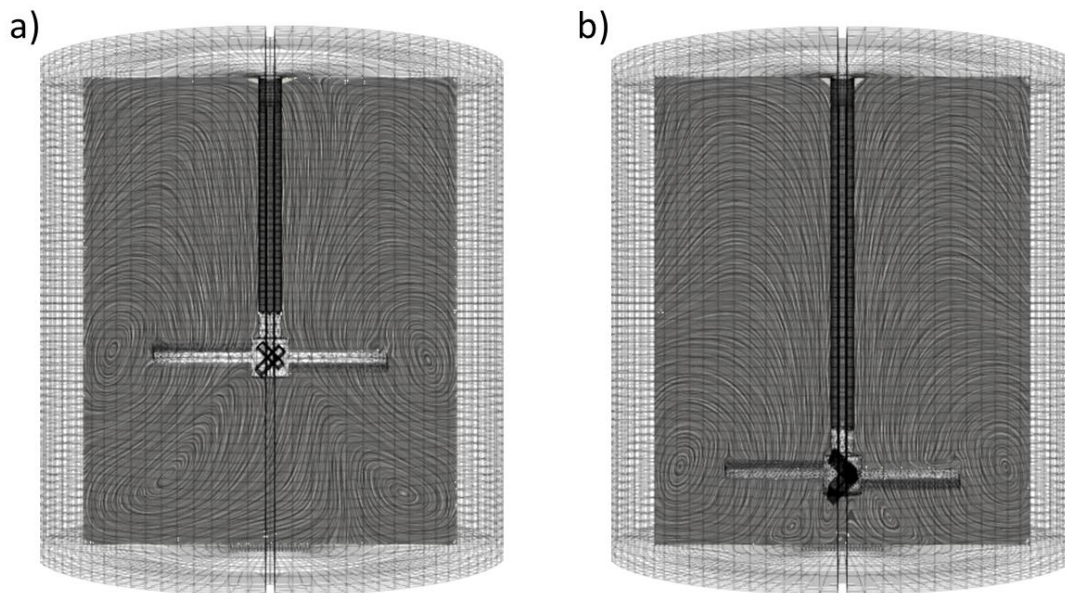
Figura 22 - Efeito do *clearance* na velocidade axial.

Fonte: AUTOR (2023).

Outro ponto importante observado na influência do *clearance* é seu efeito nos padrões de fluxo produzido. Nienow (1968) e Conti et al. (1981) observaram que dois tipos muito diferentes de padrões de fluxo são produzidos, dependendo da magnitude do *clearance* empregado. Para grandes comprimentos do *clearance*, grandes fluxos de recirculação são

gerados tanto acima quanto abaixo do impulsor, padrão esse denominado de regime de fluxo “*double-eight*”, com base na Figura 23a é possível notar as linhas de fluxo geradas pelo aumento do comprimento do *clearance* ($C/T = 0,4$). Em casos de comprimentos baixos do *clearance* o fluxo de recirculação inferior está ausente (regime de fluxo '*single-eight*'), a Figura 23b ilustra as linhas de fluxo na condição de $C/T = 0,2$. Neste último caso, N_{js} e a potência dissipada no tanque quando na condição em que a velocidade de agitação é constante, são menores. A alteração do padrão do fluxo gerado pela modificação no comprimento do *clearance* afeta de forma inversamente proporcional a homogeneidade das partículas presentes no meio, entretanto, valores pequenos de *clearance* podem levar a uma maior interação com as paredes do tanque de agitação e, conseqüentemente a uma maior perda de energia (KAZEMZADEH, 2020).

Figura 23 - Linhas de fluxo gerados a) $C/T = 0,4$ e b) $C/T = 0,2$.



Fonte: AUTOR, 2023.

Na Tabela 9 é apresentado os resultados do fator resposta H_{vt} em relação à razão entre a altura em relação ao tanpo e o diâmetro do tanque.

Tabela 9 - Efeito da folga do fundo sobre H_{vt} .

θ (°)	NI (-)	D/T (-)	ω (RPM)	C/T (-)	H_{vt} (-)
45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,20 (- α)	0,991
45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)	0,990
45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,40 (+ α)	0,996

Fonte: AUTOR (2023).

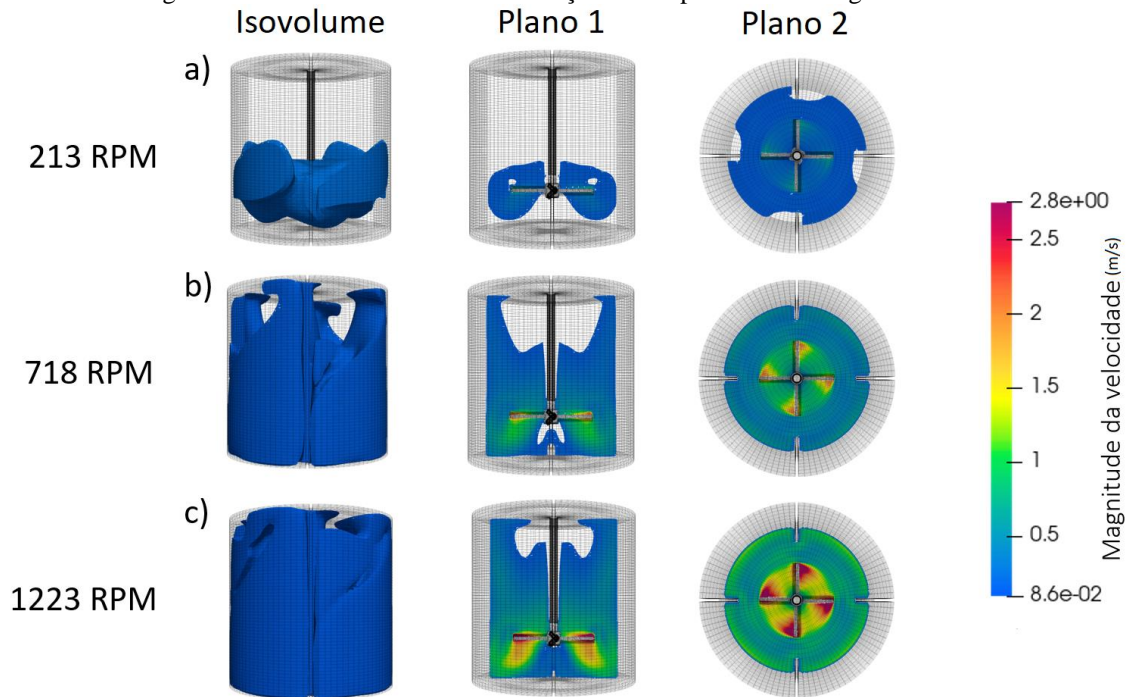
Com base na análise da Tabela 9, é possível avaliar que a variação do *clearance* apresenta pouca influência sobre a variável H_{vt} . O maior valor do fator resposta é quando a razão $C/T = 0,4$, fato este, explicado pela posição do impelidor frente ao topo do tanque, fazendo com que o fluido alcance mais facilmente alturas maiores. Por outro lado, se a distância entre a ponta do impelidor e o fundo do tanque for muito grande, pode haver uma redução na eficiência da suspensão dos sólidos. Isso ocorre porque a turbulência gerada pelo impelidor pode não ser suficiente para manter os sólidos em suspensão, levando à formação de camadas sedimentares no fundo do tanque e a uma má homogeneização.

5.5 Efeito da velocidade de rotação dos impelidores (ω)

As Figuras 24 e 25 mostram os perfis da velocidade de rotação dos impelidores na magnitude da 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, angulação de ataque de 45° , razão entre o diâmetro do impelidor e o diâmetro do tanque de $0,5T$ e razão entre a altura em relação ao tampo e o diâmetro do tanque de $0,3T$.

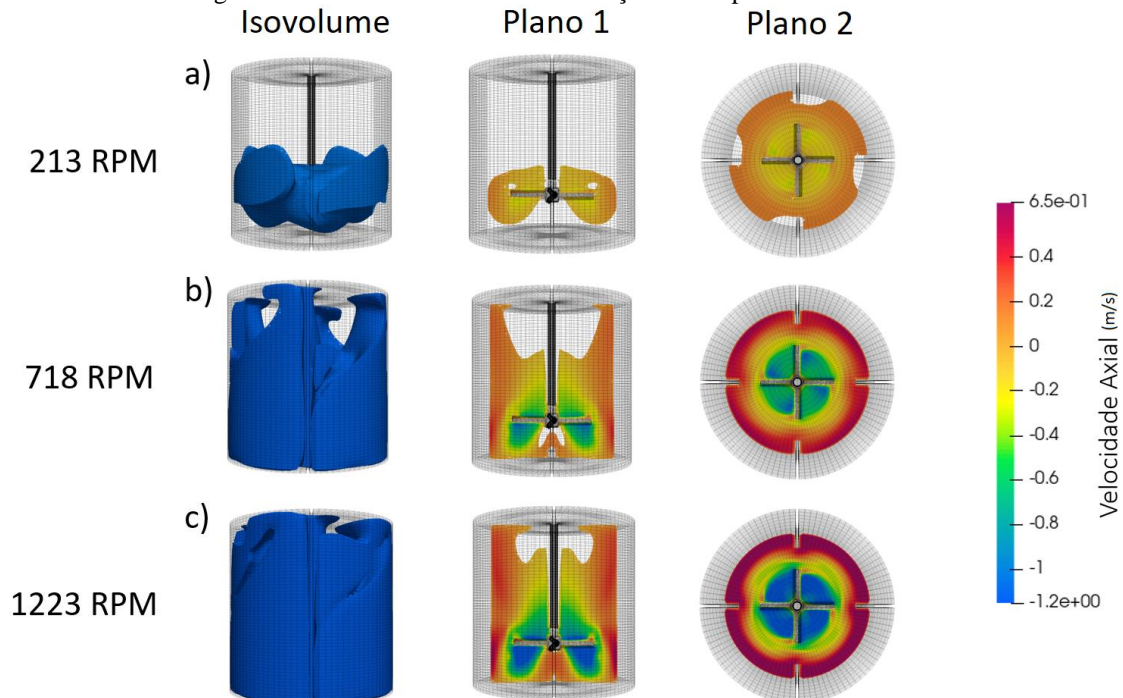
Nota-se a partir da análise das Figuras 24 e 25 que com o acréscimo na velocidade de rotação dos impelidores há uma maior região nos campos de magnitude de velocidade e velocidade axial devido justamente ao fato de uma maior quantidade de movimento ser transferida ao fluido. Porém, com a elevação desta quantidade de movimento não apenas elevam-se as taxas de transferência de quantidade de movimento como também o custo energético necessário para movimentação dos impelidores, desgaste excessivo nos componentes dos equipamentos, reduzindo sua vida útil e aumentando a necessidade de manutenção (COUPER, 2005; DENN, 1980).

Figura 24 - Efeito da velocidade de rotação dos impelidores na magnitude de velocidade.



Fonte: AUTOR (2023).

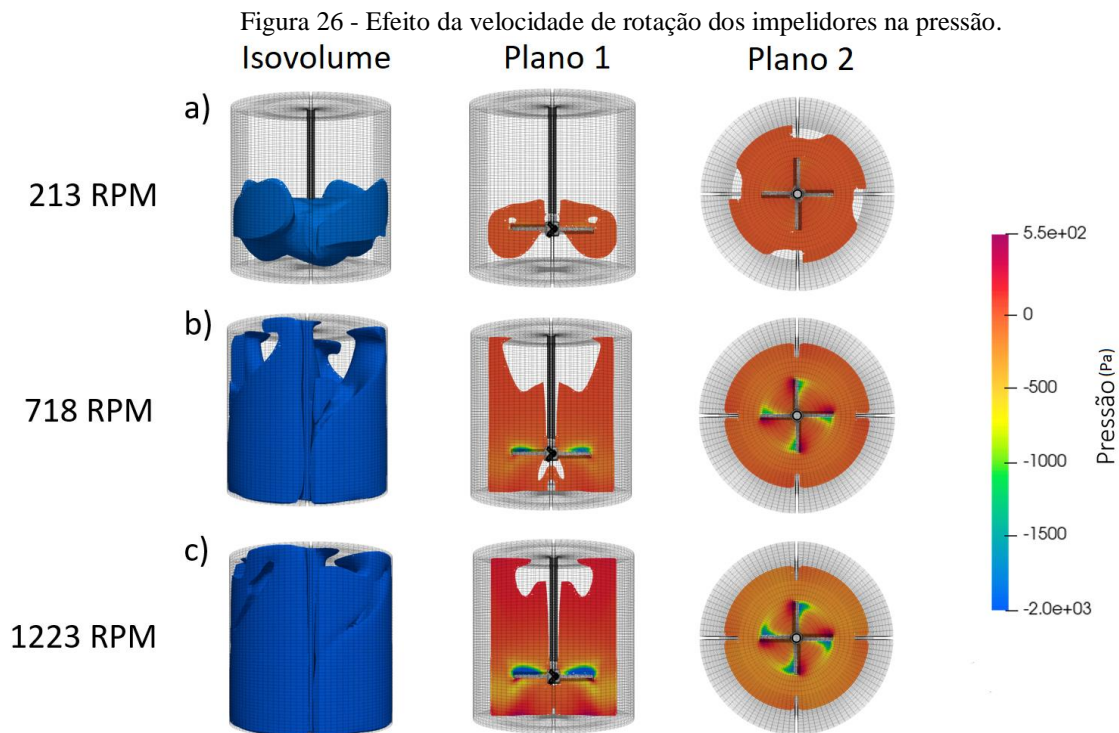
Figura 25 - Efeito da velocidade de rotação dos impelidores na velocidade axial.



Fonte: AUTOR (2023).

Outros pontos consequentes do aumento da velocidade de rotação dos impelidores é o risco de formação de cavitação, que é a formação e colapso de bolhas de vapor no fluido, podendo trazer riscos aos equipamentos e diminuir a eficiência do processo (COUPER, 2005 e DENN, 1980). A avaliação do comportamento da pressão e sua relação com o aumento da

velocidade de rotação dos impelidores pode ser observada na Figura 26, em que é perceptível o aumento de zonas de baixa pressão conforme há o aumento da velocidade de rotação.



A Tabela 10 mostra quantitativamente a relação diretamente proporcional que o aumento da velocidade de rotação dos impelidores gera na suspensão de sólidos.

Tabela 10 - Efeito da folga do fundo sobre H_{vt} .

θ (°)	NI (-)	D/T (-)	ω (RPM)	C/T (-)	H_{vt} (-)
45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	213 (- α)	0,30 (0)	0,560
45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)	0,990
45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	1223 (+ α)	0,30 (0)	0,995

Fonte: AUTOR (2023).

A partir da avaliação da Tabela 10, nota-se, assim como observado com a relação entre D/T e o fator resposta, que a relação da velocidade de rotação e o fator resposta é expresso de forma não linear e ou até mesmo sendo influenciado com os demais fatores controláveis, sendo assim é necessário a avaliação do planejamento de forma completa.

5.6 Avaliação do planejamento experimental

Considerando todas as simulações numéricas (1-27), os valores de H_{vt} variaram de 0,560 a 0,998. A expressão para predição de H_{vt} , Equação 4, foi ajustada aos dados presentes na

Tabela 11 usando técnicas de regressão múltipla através do software Statistica® para avaliar os efeitos dos fatores controláveis sobre a resposta. Com isso foi possível criar um modelo com coeficiente de correlação (R^2) superior a 0,85.

Tabela 11 - Planejamento Composto Central: Variáveis controláveis sobre H_{vt} .

Simulação	θ (°)	NI (-)	D/T (-)	ω(RPM)	C/T (-)	H_{vt} (-)
1	30 (-1)	3 (-1)	0,40 (-1)	1120 (+1)	0,35 (+1)	0,946
2	30 (-1)	3 (-1)	0,40 (-1)	615 (-1)	0,25 (-1)	0,601
3	30 (-1)	3 (-1)	0,60 (+1)	1120 (+1)	0,25 (-1)	0,997
4	30 (-1)	3 (-1)	0,60 (+1)	615 (-1)	0,35 (+1)	0,996
5	30 (-1)	5 (+1)	0,40 (-1)	1120 (+1)	0,25 (-1)	0,997
6	30 (-1)	5 (+1)	0,40 (-1)	615 (-1)	0,35 (+1)	0,987
7	30 (-1)	5 (+1)	0,60 (+1)	1120 (+1)	0,35 (+1)	0,998
8	30 (-1)	5 (+1)	0,60 (+1)	615 (-1)	0,25 (-1)	0,995
9	60 (+1)	3 (-1)	0,40 (-1)	1120 (+1)	0,25 (-1)	0,935
10	60 (+1)	3 (-1)	0,40 (-1)	615 (-1)	0,35 (+1)	0,745
11	60 (+1)	3 (-1)	0,60 (+1)	1120 (+1)	0,35 (+1)	0,998
12	60 (+1)	3 (-1)	0,60 (+1)	615 (-1)	0,25 (-1)	0,996
13	60 (+1)	5 (+1)	0,40 (-1)	1120 (+1)	0,35 (+1)	0,875
14	60 (+1)	5 (+1)	0,40 (-1)	615 (-1)	0,25 (-1)	0,585
15	60 (+1)	5 (+1)	0,60 (+1)	1120 (+1)	0,25 (-1)	0,997
16	60 (+1)	5 (+1)	0,60 (+1)	615 (-1)	0,35 (+1)	0,996
17	15 (- α)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)	0,995
18	75 (+ α)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)	0,959
19	45 (0)	2 (- α)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)	0,984
20	45 (0)	6 (+ α)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)	0,994
21	45 (0)	4 (0)	0,30 (- α)	718 (0)	0,30 (0)	0,653
22	45 (0)	4 (0)	0,70 (+ α)	718 (0)	0,30 (0)	0,997
23	45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	1223 (+ α)	0,30 (0)	0,995
24	45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	213 (- α)	0,30 (0)	0,560
25	45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,20 (- α)	0,991
26	45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,40 (+ α)	0,996
27	45 (0)	4 (0)	0,50 (0)	718 (0)	0,30 (0)	0,990

Fonte: AUTOR, 2023.

Na Tabela 12 são apresentados os efeitos dos fatores controláveis e sua interação que são estatisticamente significativos sobre a resposta H_{vt} com um grau de confiança de 95%.

Tabela 12 - Efeitos dos fatores controláveis.

	Efeito	Erro padrão	t_{calc}	valor-p	Limite de confiança ± 95%
Média	0,9962	0,0213	46,6698	0,0000	(0,9515; 1,0409)
D/T (L)	0,1658	0,0261	6,3415	0,0000	(0,1111; 0,2201)
D/T (Q)	-0,0773	0,0253	-3,0552	0,0065	(-0,1303; -0,0244)
ω(L)	-0,1427	0,0261	-5,4579	0,0000	(-0,1974; -0,0880)
ω(Q)	-0,1009	0,0253	-3,9867	0,0008	(-0,1539; -0,0479)
θ x NI	-0,0820	0,0320	-2,5620	0,0191	(-0,1491; -0,0150)
D/T x ω	0,1034	0,0320	3,2304	0,0044	(0,0364; 0,1704)
ω x C/T	0,0820	0,0320	2,5604	0,0191	(0,0150; 0,1490)

Fonte: AUTOR (2023).

O valor-*p* pode variar de 0 a 1 e simboliza a probabilidade ou chance do efeito observado pelas variáveis ser devido aos fatores que estão sendo investigados. Para que os efeitos observados sejam significativos estatisticamente, o valor-*p* deve ser menor ou igual a 0,05, assumindo como margem de segurança 5% de chances de erro. Portanto, estatisticamente, dentre os fatores controláveis tanto a razão entre o diâmetro do impelidor e o diâmetro do tanque quanto a velocidade de rotação dos impelidores apresentam influência significativa linear sobre as respostas, corroborando com as análises dos fatores realizadas de forma individual anteriormente. Em relação aos efeitos combinados das variáveis, observa-se que as relações entre a angulação e o número de pás, diâmetro e velocidade de rotação, e por fim, velocidade de rotação e o *clearance* são considerados significativamente relevantes para o processo.

A partir da Tabela 12, obteve-se o modelo reparametrizado (Equação 4) e suas respectivas superfícies de resposta (Figuras 26, 27 e 28), permitindo, assim, quantificar os efeitos das variáveis independentes sobre a resposta.

$$H_{vt} = 0,9962 + 0,0828 \cdot x_3 - 0,0386 \cdot x_3^2 - 0,0713x_4 - 0,0504 \cdot x_4^2 - 0,0410 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0517 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0,0409 \cdot x_4 \cdot x_5 \quad (4)$$

$$x_1 = \frac{(\theta - 45^\circ)}{15} \quad (5)$$

$$x_2 = NI - 4 \quad (6)$$

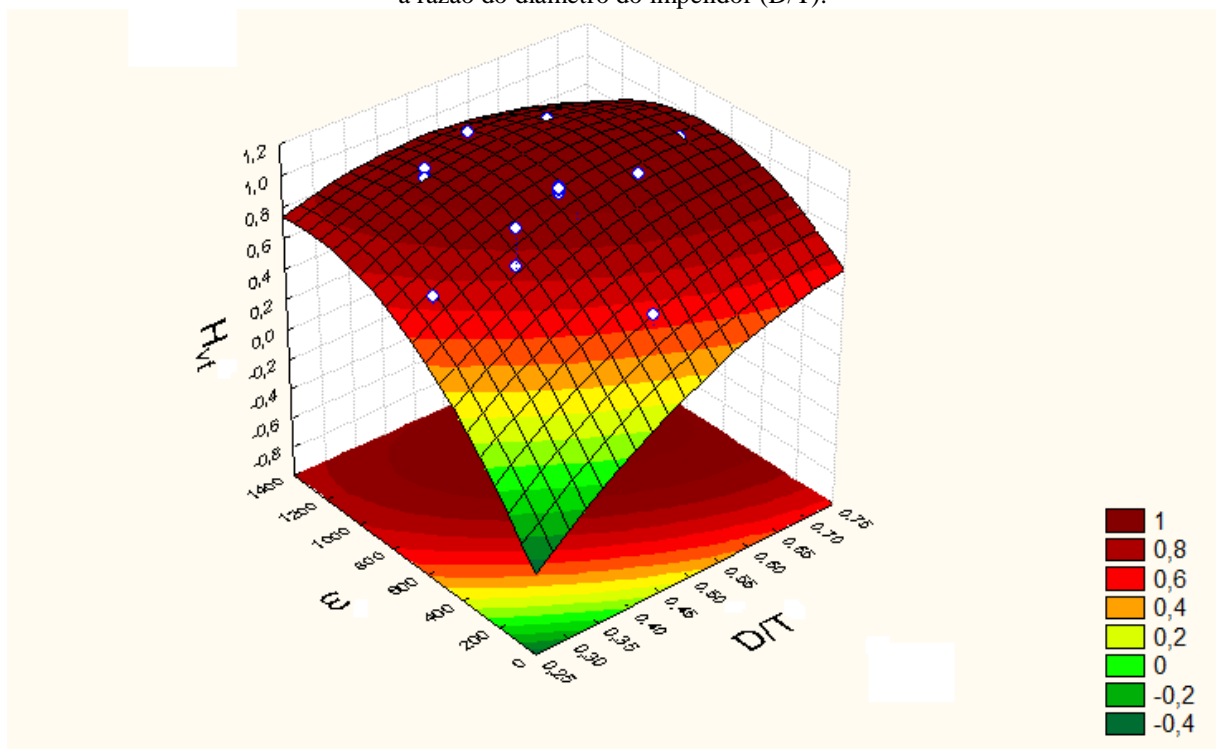
$$x_3 = \frac{(D/T - 0,5)}{0,1} \quad (7)$$

$$x_4 = \frac{(\omega - 718)}{103} \quad (8)$$

$$x_5 = \frac{(C/T - 0,3)}{0,05} \quad (9)$$

Observando as superfícies de resposta obtêm-se também indícios que um modelo quadrático parece representar bem a relação entre a resposta (H_{vt}) e os fatores controláveis. A Figura 27 mostra a superfície de resposta para o fator dependente (H_{vt}) em função da velocidade de rotação do impelidor (ω) e a razão do diâmetro do impelidor (D/T).

Figura 27- Altura da suspensão de sólidos (H_{vt}) em função da velocidade de rotação do impelidor (ω) e a razão do diâmetro do impelidor (D/T).

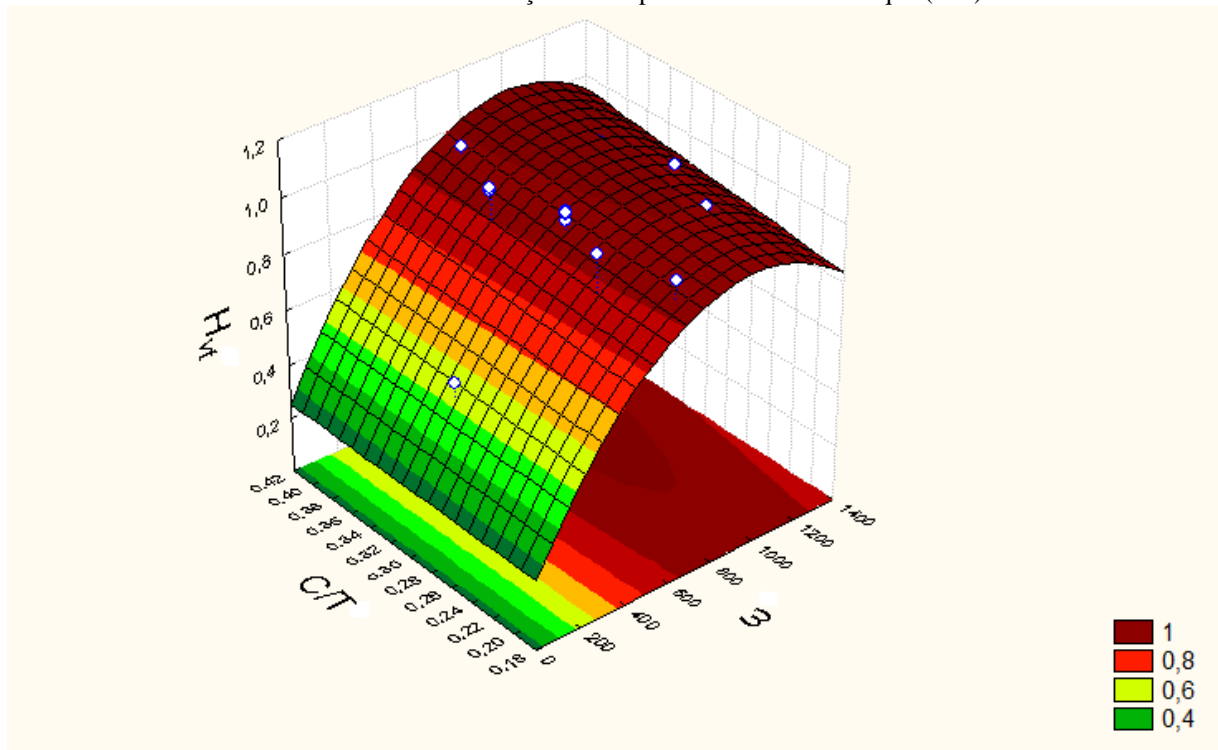


Fonte: AUTOR (2023).

A Figura 27 mostra que a altura de suspensão dos sólidos aumenta com a elevação da velocidade de rotação e diâmetro do impelidor. Entretanto, há a presença de um ponto crítico em que valores de fatores controláveis acima de tal ponto podem trazer efeitos negativos no fator resposta. Observando a Figura 27, nota-se que valores de rotação acima de 1200 RPM combinadas com diâmetros de impelidores acima de 0,55T afetam negativamente a altura de suspensão de sólidos. Tal fator pode ser relacionado com a formação de áreas de alta vorticidade na região inferior do tanque, o que pode fazer com que as partículas sólidas sejam aglutinadas ou aglomeradas, em vez de serem mantidas em suspensão.

A Figura 28 demonstra que fator resposta aumenta com a elevação da velocidade de rotação, mas permanece inalterado com a variação de C/T . O ponto crítico da superfície situa-se fixando a velocidade de rotação em torno de 900 RPM juntamente com valores de *clearance* superiores a $0,30T$. Verifica-se que mais uma vez a influência da rotação do impelidor pode ser prejudicial em altas velocidades.

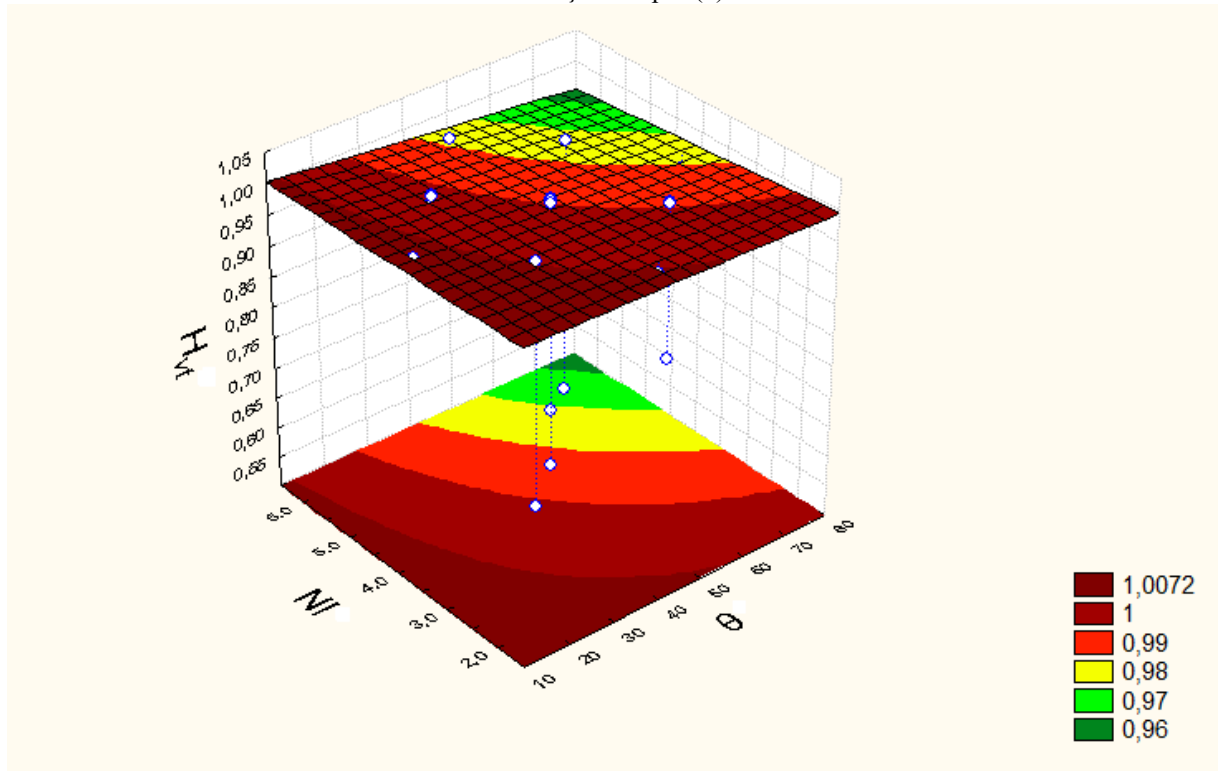
Figura 28 - Altura da suspensão de sólidos (H_{vt}) em função da velocidade de rotação do impelidor (ω) e razão entre a altura em relação ao tempo e o diâmetro do tanque (C/T).



Fonte: AUTOR (2023).

Já para a Figura 29 que mostra a superfície de resposta para a altura de suspensão de sólidos em função do número de impelidores (NI) e a angulação de ataque das pás (θ), evidencia-se que os dois fatores estudados apresentam pouca influência na altura de suspensão de sólidos. Sendo o ponto de máximo, alcançado com os valores de angulação das pás igual a 20° justamente com o número de pás igual a 2.

Figura 29 - Altura da suspensão de sólidos (Hvt) em função do número de impelidores (NI) e a inclinação das pás (θ).



Fonte: AUTOR (2023).

6 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.

A respeito da influência 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.

O efeito da razão entre a altura em relação ao tampo e o diâmetro do tanque mostrou que para grandes comprimentos do clearance, grandes fluxos de recirculação são gerados, enquanto para comprimentos baixos, o fluxo de recirculação inferior é ausente. Tal alteração no padrão de fluxo afetam de forma inversamente proporcional a homogeneidade do meio, porém, valores baixos de *clearance* podem levar a uma maior interação com as paredes do tanque de agitação e, conseqüentemente, a uma maior perda de energia. A variação do clearance apresenta pouca influência sobre a variável H_{vt} , mas pode gerar redução na eficiência da suspensão dos sólidos se a distância entre a ponta do impelidor e o fundo do tanque for muito grande.

Com base na análise do efeito da velocidade de rotação do impelidor, foi observado que com o aumento na velocidade de rotação houve uma maior região nos campos de magnitude de velocidade e velocidade axial, mas acarretando em aumento no custo energético e o desgaste nos componentes dos equipamentos, reduzindo sua vida útil e aumentando a necessidade de manutenção. Além disso, o aumento excessivo da velocidade de rotação pode gerar risco de formação de cavitação, o que pode trazer problemas aos equipamentos e diminuir a eficiência do processo.

Por fim, a análise da regressão e dos gráficos de superfície de resposta, demonstrou que tanto a razão entre o diâmetro do impelidor e o diâmetro do tanque quanto a velocidade de rotação dos impelidores, assim como as influências entre razão do diâmetro e velocidade de rotação, *clearance* e velocidade de rotação e angulação de ataque das pás e número de pás apresentam influência significativa lineares sobre a resposta.

REFERÊNCIAS

- ANSYS INC. ANSYS© Fluent user's guide. R2020.2 ed. Canonsburg, PA: ANSYS inc, 2020.
- BARROS NETO, B., SCARMINIO, I.S. & BRUNS, R.E. Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. Unicamp, 2001.
- BENTO, T. F. Medição de Vazão de Escoamentos Monofásicos Turbulentos Utilizando Sistemas de Tubulações Instrumentadas com Sensores Piezoelétricos e Acelerômetros. **Dissertação (Mestrado)** — Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019.
- BERGER, P.D., MAURER, R.E. & CELLI, G.B. Experimental design with applications in management, engineering, and the sciences. **Springer**, 2 ed., 2018.
- BOX, G.E.P., HUNTER, J.S. & HUNTER, W.G. Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis, and model building. **John Wiley & Sons**, 2 ed., 2005.
- 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.
- CHANGI, S. M.; WONG, S. W. Kinetics Model for Designing Grignard Reactions in Batch or Flow Operations. *Organic Process Research and Development*, v. 20, n. 2, p. 525–539, 2016.
- COUPER, James R.; PENNEY, W. Roy; FAIR, James R.; *et al.* **Chemical Process Equipment: Selection and Design**. [s.l.]: Gulf Professional Publishing, 2005.
- DE SOUSA, P. R. M. Ampliação de escala de tanques condicionadores utilizados na flotação de apatita. **Tese de Doutorado**, 2007.
- DELACROIX, B.; RASTOUEIX, J.; FRADETTE, L.; *et al.* CFD-DEM simulations of solid-liquid flow in stirred tanks using a non-inertial frame of reference. **Chemical Engineering Science**, v. 230, p. 116137, 2021.
- DEVARAJULU, C.; LOGANATHAN, M. Effect of impeller clearance and liquid level on critical impeller speed in an agitated vessel using different axial and radial impellers. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, v. 9, n. 6, p. 2753–2761, 2016.
- DORAN, P. M. Mixing. *In: Bioprocess Engineering Principles*. [s.l.]: Elsevier, 2013, p. 255–332. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-220851-5.00008-3>>. Acesso em: 7

Feb. 2023.

EINENKEL, W.D., MERSMANN, A. The agitator speed for particle suspension. **Verfahrenstechnik** 11, 90, 1977.

FELLOWS, P. J. **Food Processing Technology. Principles and Practice**. 2a ed. Cambridge: CRC Press, 2000.

FOX, Rodney O. CFD Models for Analysis and Design of Chemical Reactors. *In: Computational Fluid Dynamics*. [s.l.]: Elsevier, 2006, p. 231–305. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s0065-2377\(06\)31004-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0065-2377(06)31004-6)>. Acesso em: 27 Mar. 2023.

GEANKOPOLIS, C. J. **Transport Process and Unit Operations**. 3. ed. Boston: Allyn and Bacon, 1983.

GODFREY, J. C.; ZHU Z. M. Measurement of particle-liquid profiles in agitated tanks. In **Alche Symposium Series**, volume 90, pages 181–185. New York, NY: American Institute of Chemical Engineers, 1971-c2002.,1994.

HARRIS, C.K.; ROEKAERTS, D.; ROSENDAL, F.J.J.; *et al.* Computational fluid dynamics for chemical reactor engineering. **Chemical Engineering Science**, v. 51, n. 10, p. 1569–1594, 1996.

HOSSEINI, Seyed; PATEL, Dineshkumar; EIN-MOZAFFARI, Farhad; *et al.* Study of Solid–Liquid Mixing in Agitated Tanks through Computational Fluid Dynamics Modeling. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 9, p. 4426–4435, 2010.

JADIDI, Behrooz; EBRAHIMI, Mohammadreza; EIN-MOZAFFARI, Farhad; *et al.* Mixing and segregation assessment of bi-disperse solid particles in a double paddle mixer. **Particuology**, v. 74, p. 184–199, 2023.

KASAT, G. R.; PANDIT, A. B. Review on Mixing Characteristics in Solid-Liquid and SolidLiquid-Gas Reactor Vessels. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 83, n. 4, p. 618–643, 2008.

KAZEMZADEH, Argang; EIN-MOZAFFARI, Farhad; LOHI, Ali. 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**, v. 360, p. 635–648, 2020.

KOH, P.T.L.; SCHWARZ, M.P. CFD modelling of bubble–particle attachments in flotation cells. **Minerals Engineering**, v. 19, n. 6–8, p. 619–626, 2006.

LANE, G. L. Improving the accuracy of CFD predictions of turbulence in a tank stirred by a hydrofoil impeller. **Chemical Engineering Science**, v. 169, p. 188–211, 2017.

LIMA, R. M. et al. Planejamento de experimentos aplicado no aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais. **Série Rochas e Minerais Industriais**. Centro de Tecnologia Mineral, 2022.

LIU, Y.; ZHU, Y.; XIAO, Y.; CHEN, X.; WANG, X.; LI, Y. Quantification of solid-liquid mixing using electrical resistance and positron emission tomography. **Chemical Engineering Science**, v. 141, p. 293-301, 2016.

MANSON, R.L., GUNST, R.F. & HESS, J.L. Statistical design and analysis of experiments: with applications to engineering and Science. **John Wiley & Sons**, 2 ed., 2003.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. Unit Operations of Chemical Engineering. 5a ed. Cingapura: McGraw-Hill International Editions, 1993.

MENDOZA-ESCAMILLA, Víctor X.; ALONZO-GARCÍA, Alejandro; MOLLINEDO, Helvio R.; *et al.* Assessment of $k - \epsilon$ models using tetrahedral grids to describe the turbulent flow field of a PBT impeller and validation through the PIV technique. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 26, n. 5, p. 942–956, 2018.

MONTGOMERY, D. C.; GRICE, J. V.; Design and Analysis of Experiments. **Technometrics**, v. 42, n. 2, p. 208, 2001.

MURTHY, B. N.; JOSHI, J. B. Assessment of standard $k-\epsilon$, RSM and LES turbulence models in a baffled stirred vessel agitated by various impeller designs. **Chemical engineering science**, v. 63, n. 22, p. 5468-5495, 2008.

OLDSHUE, J.Y., SHARMA, R.N. The effect of off-bottom distance of an impellar for the just suspended speed N_{js} . In: AIChE Symposium Series, vol. 88, **American Institute of Chemical Engineers**, pp. 72–72, 1992.

PAUL, E. L.; ATIEMO-OBENG, V. A.; KRESTA, S. M. **Handbook of Industrial Mixing**. 1a ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004.

PAUL, Edward L.; MIDLER, Michael; SUN, Yongkui. Mixing in the Fine Chemicals and

Pharmaceutical Industries. *In: Handbook of Industrial Mixing*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004, p. 1027–1069.

PEITER, A. S.; SOLETTI, J. I.; CARVALHO, S. H. V. de; *et al.* Avaliação do efeito de agitação e mistura na produção de biodiesel de soja. *In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-0811-23615-180926>>. Acesso em: 2 Feb. 2023.

POPE, S. B.; POPE, Stephen B. **Turbulent Flows**. [s.l.]: Cambridge University Press, 2000.

RIBEIRO, D. DA C. Modelagem e simulação do escoamento de sistemas multifásicos em reatores agitados mecanicamente. **Tese de Doutorado**, 2012.

SARDEHPANDE, M. V. et al. Suspensão sólida e mistura de fase líquida em tanques agitados sólido-líquido. **Pesquisa em química industrial e de engenharia**, v. 48, n. 21, pág. 9713-9722, 2009.

SERAM, Victor; GIESTAS, Margarida Canedo. Modelos de turbulência aplicados a armazenamento de energia com THERMOCLINE. **CIES2020 - XVII Congresso Ibérico e XIII Congresso Ibero-americano de Energia Solar**, p. 489–496, 2020.

SOARES, R. R.; RESENDE, R. M.; ARAGÃO, D. D. L.; COSTA, M. A.; GOMES, S. N. Particle-resolved PIV experiments of solid-liquid mixing in a turbulent stirred tank. **Chemical Engineering Science**, v. 138, p. 1-15, 2015.

STOPFORD, Philip J. Recent applications of CFD modelling in the power generation and combustion industries. **Applied Mathematical Modelling**, v. 26, n. 2, p. 351–374, 2002.

STUPARU, A., SUSAN-RESIGA, R., BOSIOC, A., 2021. CFD simulation of solid suspension for a liquid–solid industrial stirred reactor. *Applied Sciences (Switzerland)* 11.

TAMBURINI, A., CIPOLLINA, A., MICALÈ, 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.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. 2. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007. v. 1.

VILELA, F. A. M. Avaliação das condições operacionais de agitação do processo reativo da produção de rincoforol. **Dissertação de Mestrado**, 2021.

ZWIETERING, T. N. Suspending of solid particles in liquid by agitators. **Chemical Engineering Science**, v. 9, p. 244–253, 1958.