

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Ana Carolina de Paiva Cides

**Análise comparativa da eficiência de agitação em tanques de
mistura com duplo impelidor (Âncora - PBT) em regime laminar
através de CFD**

**São Paulo
2014**

Ana Carolina de Paiva Cides

Análise comparativa da eficiência de agitação em tanques de mistura com duplo impelidor (Âncora - PBT) em regime laminar através de CFD

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Processos Industriais

Data da aprovação ____/____/____

Prof. Dr. Efraim Cekinski (Orientador)
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
do Estado de São Paulo

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Efraim Cekinski (Orientador)
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Prof. Dr. José Roberto Nunhez (Membro)
UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Celso Fernandes Joaquim Júnior (Membro)
FATEC – Faculdade de Tecnologia de Botucatu

Ana Carolina de Paiva Cides

Análise comparativa da eficiência de agitação em tanques de mistura com duplo impelidor (Âncora - PBT) em regime laminar através de CFD

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Processos Industriais

Área de Concentração: Otimização e Desenvolvimento de processos industriais

Orientador: Prof. Dr. Efraim Cekinski

São Paulo
Julho/2014

Ficha Catalográfica

Elaborada pelo Departamento de Acervo e Informação Tecnológica – DAIT
do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT

C568a

Cides, Ana Carolina de Paiva

Análise comparativa da eficiência de agitação em tanques de mistura com duplo impelidor (Âncora - PBT) em regime laminar através de CFD. / Ana Carolina de Paiva Cides. São Paulo, 2014.
96p.

Dissertação (Mestrado em Processos Industriais) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Desenvolvimento e Otimização de Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Efraim Cekinski

1. Tanque de mistura 2. Impelidor Âncora - PBT 3. Modelagem CFD 4. Eficiência da agitação 5. Tese I. Cekinski, Efraim, orient. II. IPT. Coordenadoria de Ensino Tecnológico III. Título

15-10

CDU 66.063(043)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, João e Neusa, por me darem força e coragem para seguir sempre adiante, ao meu marido Marcelo pelo apoio e compreensão e especialmente a minha filha Ana Luísa, que deu um sentido especial à minha vida.

Aos verdadeiros amigos e familiares que estiveram presentes em toda esta caminhada.

A minha amiga Andressa, companheira em todos os momentos de alegria, dúvidas e incertezas e que sempre esteve muito presente na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Efraim Cekinski por toda orientação técnica e pela amizade desenvolvida, sua ajuda e conselhos durante todo o projeto.

Ao Prof. Dr. Jose Roberto Nunhez pelo apoio e integração no grupo do Laboratório de Fluidodinâmica Computacional da UNICAMP, e também pelas discussões acadêmicas que ajudaram a e enriquecer meus fundamentos teóricos.

Ao Diener e a todos meus colegas do laboratório de LCFD, por todo apoio e discussões técnicas, Sebastian, Urbano, Ronald e em especial ao colega José Luis por toda ajuda com temas técnicos, pela incrível disponibilidade oferecida, os meus mais sinceros agradecimentos.

A Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP e Instituto de Pesquisas Tecnológicas IPT, docentes e servidores pela excelente estrutura acadêmica oferecida.

E especialmente a Deus, por estar sempre presente na minha vida, iluminando meus passos.

*"O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada.
Caminhando e semeando, no fim terás o que colher".*

Cora Coralina

RESUMO

As operações em tanques agitados são amplamente utilizadas e envolvem transformações físicas e químicas durante sua operação. Atualmente existe uma busca contínua na otimização dos processos através de aperfeiçoamento dos equipamentos já existentes, visando à qualidade do produto, aumento da capacidade, eficiência e redução do custo operacional. Por isso é importante uma escolha adequada do sistema de agitação, a fim de evitar zonas de estagnação, falta de homogeneidade e aumento dos tempos de processo. No entanto, o estudo de sistemas de mistura apresenta diversas dificuldades e desafios que vem sendo estudados por diversos pesquisadores, porém, existem poucos trabalhos na literatura para sistemas com mais de um impelidor, principalmente relacionados a regime laminar. Neste trabalho avalia-se a influência do acoplamento de um segundo impelidor em um tanque de mistura com impelidor Âncora já existente visando sua otimização, através da modelagem CFD. Foi contemplado um segundo impelidor tipo pás inclinadas (PBT) no intuito de proporcionar características de fluxo diferente ao impelidor existente. O objetivo é conseguir um aumento da eficiência da agitação e redução do tempo de processamento. Assim, foram realizadas análises da influência do *clearance* e da viscosidade para o arranjo de duplo impelidor Âncora-PBT utilizando um traçador numérico. Finalmente, os resultados sobre o padrão de escoamento, potência e consumo de energia no tanque de mistura foram comparados com o sistema já existente e discutidos. Os resultados indicam um aumento na eficiência da agitação e redução do consumo de energia para o arranjo proposto.

Palavras Chaves: Agitação; laminar; âncora; PBT; fluidodinâmica computacional (CFD).

ABSTRACT

Comparative analysis on the efficiency of agitation in stirred tanks using dual impeller and laminar flow via CFD

Operations in stirred tanks are widely used and involve physical and chemical changes during its working. Newly, exist a continuous searching toward the process optimization through to improve the current equipment looking for increase quality, capacity and efficiency in order to decrease operational costs. For thus is important choose a suitable agitation system to avoid stagnant zones, poor mixtures and long times of process. However, the study of mixing systems has various difficulties and challenges that are being investigated by many researchers. Moreover, there are few works in the literature about multiple impellers, especially, in laminar flow. In this work was assessed the influence of two impeller assembly in a stirred vessel looking for process optimization through CFD modelling. It was considered an arrangement PBT-Anchor in order to provide different flow pattern in the vessel which improve the mixing and decreasing the process time. Otherwise, the analysis of the influence of clearance and viscosity were carried out for the arrangement Anchor-PBT using a numerical tracer. Finally, the results on the flow pattern, power and energy consumption were compared and discussed in regard to stirred vessel using Anchor impeller. The results indicated an increase in the efficiency of agitation and a reduction in energy consumption in the proposed system.

Key words: stirred vessel, Anchor, PBT, laminar flow, computational fluid-dynamics (CFD).

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Relações geométricas padrões de um tanque agitado	34
Figura 2 - Curva tempo de mistura.....	41
Figura 3 - Redução na variância da concentração do traçador com o tempo	42
Figura 4 – Detalhes da geometria do Sistema de Agitação 2.....	66
Figura 5 - Geometria do tanque e impelidor: a) Sistema Âncora. b) Sistema Âncora-PBT	68
Figura 6 - Sistema de Agitação: a) Sistema Âncora. b) Sistema Âncora-PBT	69
Figura 7 – Elementos prismáticos e tetraédricos: Sistema Âncora-PBT	70
Figura 8 - Detalhes das malhas: a) Sistema Âncora. b) Sistema Âncora-PBT.....	71
Figura 9 - Monitoramento do critério de convergência no decorrer da solução para o sistema 1	76
Figura 10 - Monitoramento do critério de convergência no decorrer da solução do sistema 1	77
Figura 11 - Plano para diferentes densidades de malha: 1, 2 e 3 respectivamente .	80
Figura 12 – Perfil de velocidade do impelidor âncora.....	81
Figura 13 – Perfil de velocidade do conjunto de impelidos Âncora – PBT para clearance 1/3.....	82
Figura 14 - Perfis de velocidade para os três <i>clearances</i> 1/2; 1/3 e 1/4, viscosidade 50 Pa.s	83
Figura 15 - Linhas de corrente para os três <i>clearances</i> 1/2, 1/3 e 1/4 e viscosidade 50 Pa.s	83
Figura 16 - Localização dos monitores no sistema 2	85
Figura 17 – Coeficiente de variância no decorrer do tempo: Sistema Âncora.....	86
Figura 18 – Coeficiente de variância no decorrer do tempo: Sistema Âncora – PBT	86
Figura 19 - Comportamento dos traçadores em função do tempo no sistema 1	87
Figura 20 - Comportamento dos traçadores em função do tempo no sistema 2	88

Figura 21 - Comportamento dos traçadores em função do tempo: Sistema Âncora .	88
Figura 22 - Comportamento dos traçadores em função do tempo: Sistema Âncora – PBT	89

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Relações geométricas padrões	34
Tabela 2: Relações geométricas do tanque em estudo	67
Tabela 3: Condições de contorno.....	73
Tabela 4: Parâmetros numéricos	74
Tabela 5: Denominação do tipo de malha conforme o número de elementos	78
Tabela 6: Informações da malha do sistema 1	79
Tabela 7: Resultados para cada <i>clearance</i> estudado	84
Tabela 8: Comparação do consumo de energia os sistemas de estudo	90
Tabela 9: Influência da localização do impelidor PBT no consumo de energia.....	90
Tabela 10: Descrição das viscosidades para cada caso estudado	91
Tabela 11: Influência da viscosidade do fluido no consumo de energia.....	91
Tabela 12: Velocidade de rotação do impelidor para as diferentes viscosidades	92

Lista de Abreviaturas e Siglas

CFD Fluidodinâmica computacional

MFR Multiple Frames of Reference

MVF Finite Volume Methodology

RMS Root Mean Square

PBT Pitch Blade Turbine

CAD Computer Aided Design

VC Volume Control

Lista de Símbolos

T: Diâmetro interno

D: Diâmetro do impelidor

w: Largura da pá

C: Distância entre o fundo e o impelidor

B: Largura da pá do impelidor

V: Volume

Z: Altura de líquido

B_{chi} : Largura das chicanas

τ : Torque

P: Potência

N: Velocidade do impelidor

K: Constante de proporcionalidade

μ : Viscosidade dinâmica

ρ : Densidade

σ^2 : Variância da concentração

C_{∞} : Concentração no equilíbrio

C_i : Concentração do marcador no tempo

t: Tempo

i: Detector i

t_m : Tempo de mistura

g : Gravidade

Re : Número de Reynolds

Fr : Número de Froude

N_p : Número de potência

γ : Peso específico

H_m : Perda de carga durante a circulação do produto

Q : Velocidade de circulação ou vazão de circulação média no tanque

N_Q : Número de bombeamento

Q_i : Taxa de fluxo produzido pelo impelidor

Θ : Tempo de mistura

N_θ : Número de mistura

E : Energia

h : Entalpia

m_j : Frações mássicas

$J_{i'}$ = Componente i do fluxo de difusão da espécie química i' na mistura

$R_{i'}$ = Taxa em que a espécie i é consumida ou produzida

S_{j_i} = Termo fonte geral para a espécie i

M_i : Identificação do monitor

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação pelo Projeto	17
2	OBJETIVO	19
2.1	Objetivo Global	19
2.2	Objetivos Específicos	19
2.3	Organização da Dissertação	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: SISTEMAS DE MISTURA	21
3.1	Introdução	21
3.2	CFD aplicado a sistemas de agitação	22
3.3	Processos de mistura em tanques industriais	25
3.3.1	Agitação de mistura com alta viscosidade	26
3.3.2	Tipos de impelidores	27
3.3.3	Seleção do impelidor	28
3.3.3.1	Impelidor de fluxo radial e axial	28
3.3.3.2	Impelidor pás inclinadas a 45°	29
3.3.3.3	Impelidor de fluxo tangencial	30
3.3.3.3.1	Impelidor tipo âncora	30
3.3.4	Tanques agitados	32
3.3.4.1	Geometria	32
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: PROJETO DE SISTEMAS DE MISTURA	35
4.1	Introdução	35
4.2	Os mecanismos de mistura	36
4.2.1	Regime Laminar	36
4.2.2	Regime Turbulento	37
4.3	Variáveis de projetos	38
4.3.1	Torque	38
4.3.2	Potência	39
4.3.3	Tempo de Mistura	40
4.4	Números adimensionais	43
4.4.1	Número de Reynolds (Re)	43
4.4.2	Número de potência (Np)	44
4.4.3	Número de bombeamento (N _Q)	45
4.4.4	Número de Froude (Fr)	46

4.4.5	Número de Mistura (N_θ)	47
5	MODELAGEM MATEMÁTICA	48
5.1	Introdução	48
5.1.1	Equações de conservação	49
5.1.1.1	Conservação de Massa.....	50
5.1.1.2	Conservação da Quantidade de Movimento	50
5.1.1.3	Conservação da Quantidade de Energia	51
5.1.1.4	Conservação da Massa da Espécie Química.....	53
5.1.2	Métodos Numéricos	53
5.1.2.1	Solução discretizada das variáveis de fluxo.....	53
5.1.3	Malha Computacional.....	54
5.1.3.1	Malha Hexaédrica	56
5.1.3.2	Malha Tetraédrica	56
5.1.4	Discretização.....	57
5.1.4.1	Método discretização Volumes Finitos.....	57
5.2	Abordagem de rotação do impelidor	58
5.2.1	Modelagem com o uso de um sistema de referência rotacional	58
5.2.2	Modelagem com múltiplos sistemas de referência rotacional – MFR	58
5.2.3	Modelagem com malhas deslizantes	59
6	METODOLOGIA CFD.....	61
6.1	Pré processamento e Solver	62
6.1.1	Geração das geometrias.....	62
6.1.2	Configuração do caso	63
6.2	Acompanhamento da solução.....	63
6.2.1	Consistência, estabilidade e convergência	64
6.3	Pós processamento.....	65
6.4	Aspectos geométricos	65
6.5	Geração dos domínios	68
6.6	Geração da malha.....	69
6.6.1	Impelidor Tipo Âncora	72
6.6.2	Impelidor de Pás Inclinaadas – 4 Pás a 45°.....	72
6.7	Configuração do modelo CFD.....	72
6.7.1	Propriedades do fluido	72
6.7.2	Condições de contorno	73
6.7.2.1	Modelo físico	74
7	RESULTADOS.....	75

7.1	Monitoramento da Solução	75
7.2	Teste de independência da malha	77
7.3	Caracterização dos Fluxos.....	80
7.3.1.1	Estudo do efeito do <i>clearance</i> no sistema 2.....	82
7.3.2	Tempo de Mistura calculado através do coeficiente de variância.....	84
7.3.3	Estimativa da potência e consumo de energia.....	89
8	CONCLUSÕES	93
9	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

Conforme Shreve e Brink Jr. (1997), o projeto inicial adequado e flexível é intrínseco a qualquer processo químico. Os sistemas químicos constituem a forma moderna de encarar quaisquer dos variados processos nas indústrias. Em virtude da crescente complexidade destas indústrias e visando ao emprego moderno de computadores, de outros instrumentos e das formulações matemáticas aplicadas às indústrias, é apropriado resumir os fundamentos gerais, realçando a natureza dos sistemas e o suporte que recebemos dos computadores e outros instrumentos. A alteração potencial de quaisquer processos tem importância não só quando a indústria é projetada, mas também deve passar por avaliação constante dos engenheiros.

A agitação é um processo que fornece movimento ao líquido e auxilia a realização dos processos químicos e processamentos físicos de diferentes aplicações. A mistura de líquidos miscíveis é um dos processos mais comuns e pode ter o objetivo de efetuar uma mistura homogênea entre dois líquidos (processamento físico) ou promover uma reação química entre duas matérias-primas que se encontram na fase líquida (processamento químico). (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

Durante a elaboração de projetos e dimensionamento dos equipamentos pode ser útil a utilização de ferramentas computacionais tais como a fluidodinâmica computacional, que possam ajudar com o entendimento do escoamento em tanque de mistura (VERSTEEG ; MALALASEKERA, 1995), sendo o software ANSYS-CFX um dos mais usados.

O projeto de um sistema de mistura deve escolher o impelidor que proporcionará o nível exigido de mistura para obtenção do produto desejado. Simulações recentes são capazes de gerar aproximações que provêm melhorias consideráveis no fluxo de um sistema agitado e reduzem custos com dimensionamento e execução de projetos.

A simulação numérica permite uma avaliação, de forma muito mais rápida, de melhorias no sistema de mistura comparada a análise experimental.

Segundo Joaquim Jr. et al. (2007), a operação de agitação deve ser analisada de diversos ângulos e em cada caso deve-se verificar qual é a etapa crítica do processo em estudo. Dentre os sistemas que promovem a agitação, o mais utilizado é aquele provido de tanques com impelidores que contém líquidos de viscosidades baixas a moderadas. É importante notar que o fluxo característico no tanque pode ser alterado por alguns parâmetros geométricos do impelidor, propriedades do fluido ou a utilização de diversos impelidores.

Portanto, durante a elaboração do projeto deverão ser analisadas as propriedades críticas dos produtos e do processo, afim de que o projeto do agitador e seus componentes contemplem todas as características dos produtos desejados.

Embora sob um ponto de vista geométrico, o tanque agitado, na maior parte das vezes, seja relativamente simples quando comparado a outras operações unitárias, existem alguns fatores que podem aumentar o nível de complexidade de um bom projeto, tais como a existência de múltiplas fases e frações volumétricas no processo; a utilização de fluidos não newtonianos; o regime de escoamento estar localizado em uma faixa de transição entre laminar e turbulento e a existência de condições iniciais complexas (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

1.1 Motivação pelo Projeto

A Engenharia vem fazendo uso extenso de pacotes disponíveis através da fluidodinâmica computacional para avaliar a eficiência das operações de mistura. O projeto de um sistema de mistura deve escolher o impelidor que proporcionará o nível exigido de mistura para obtenção do produto desejado.

O padrão de escoamento pode ser alterado modificando a geometria do agitador e essa análise deve ser feita buscando sempre o menor tempo de mistura e consumo de energia, quando possível. Selecionando a apropriada combinação dos componentes do equipamento, o engenheiro de projeto garantirá que o tipo de escoamento resultante seja adequado ao seu objetivo final.

As ferramentas da fluidodinâmica computacional tem contribuído amplamente na indústria e na área acadêmica para avaliar a maneira como fluidos podem se

comportar em determinadas condições especificadas e gerar conhecimentos para, associado à validação experimental, melhorar o projeto dos sistemas de agitação. Os resultados calculados através desta ferramenta para tanques de mistura têm mostrado estarem em acordo com os resultados experimentais.

É importante ressaltar que a maioria das correlações são baseadas em medidas com um único impelidor, enquanto sistemas de múltiplos impelidores são comuns em tanques de mistura na indústria, porém não são tão explorados nos trabalhos científicos.

O estudo do sistema proposto com duplo impelidor através de resultados de simulação irá contribuir para gerar dados para sistemas de múltiplos impelidores para regimes laminares contribuindo para um melhor entendimento dos processos de agitação e mistura na indústria.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Global

Avaliar a influência do acoplamento de um segundo impelidor tipo pás inclinadas (PBT 45°) como proposta de otimização de um tanque de mistura com agitador tipo âncora já existente, com o objetivo de aumentar a eficiência da agitação e reduzir o tempo de processamento.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos compreendem:

1. Análises da influência do *clearance* e da viscosidade no arranjo de duplo impelidor Âncora-PBT utilizando um traçador numérico.
2. Avaliação de diferentes alternativas para melhor operação de mistura do sistema existente, contemplando uma análise da influência no tempo de mistura e conseqüentemente do consumo energético do processo em relação aos diferentes *clearances* propostos para instalação do impelidor PBT.
3. Comparação dos resultados de padrão de escoamento, potência e consumo de energia no tanque de mistura com o sistema já existente.

2.3 Organização da Dissertação

Capítulo 1 – Introdução: Nesta primeira parte é apresentada a introdução deste trabalho e como CFD pode ajudar na elaboração de projetos e dimensionamento dos equipamentos.

Capítulo 2 – Objetivos: Neste capítulo, são apresentados os objetivos deste trabalho (geral e específicos).

Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica: Neste capítulo, são citados os trabalhos mais relevantes de CFD em tanques equipados com impelidores tipo âncora. Além disso,

são apresentados os tipos de impelidores, como selecionar e detalhes importantes dos sistemas de misturas.

Capítulo 4 – Revisão Bibliográfica: São explicados os parâmetros mais relevantes para a análise e projeto de processos de mistura e principais equações e números adimensionais relacionados a sistema de agitação, dentre os mais importantes, podemos citar o Número de Reynolds, Número de Bombeamento e o Número de Potência.

Capítulo 5 – É apresentada a modelagem matemática, com descrição dos métodos numéricos.

Capítulo 6 – Abordagem Computacional: Nesta seção é explicado detalhadamente o procedimento computacional com as condições de contorno, propriedades do fluido e características das geometrias e malhas utilizadas para a simulação.

Capítulo 7 – Resultados e Discussões: São apresentados os principais resultados computacionais.

Capítulo 8 – Conclusões

Capítulo 9 – Sugestões para trabalhos futuros

Referências

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: SISTEMAS DE MISTURA

3.1 Introdução

A agitação e mistura são operações unitárias fundamentais nos processos industriais. São aplicadas a fim de obter um produto acabado com as características finais desejadas, tais como aspecto, textura, características físico - químicas e sensoriais.

A agitação é o coração de um grande número de processos industriais em diversas áreas e deve ser analisada de diversos ângulos e em cada caso deve-se verificar qual a etapa crítica do processo em estudo. Dentre os sistemas que promovem a agitação, o mais utilizado é aquele provido de tanques com impelidores (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

A geometria do impelidor é determinante no processo de agitação e mistura e uma das formas de avaliar um bom projeto é relacionar sua eficiência de mistura, o que leva a minimizar os tempos de processos, com o seu consumo de potência. A configuração do agitador tem um forte impacto nas características da agitação e nas necessidades energéticas.

O tipo de escoamento do fluido depende da geometria do agitador, tanque e da reologia do fluido. Selecionando a apropriada combinação dos componentes do equipamento é possível garantir que o tipo de escoamento resultante seja adequado ao seu objetivo final.

Atualmente há um aumento da necessidade de processos cada vez mais eficientes, rápidos e controlados. Existe uma contínua busca por melhores projetos de tanques e impelidores em projetos de novas instalações ou melhorias de projetos já existentes, sendo que os objetivos principais estão diretamente relacionados a melhoria da qualidade, capacidade, eficiência dos processos, eficiência energética e redução de custo.

Nas indústrias, as relações estabelecidas entre qualidade dos produtos e os parâmetros de processamento são bem definidos e, portanto, os projetos de sistemas de mistura devem ser baseados em princípios técnicos bem estabelecidos.

Segundo Paul et al., (2004), os estudos relacionados à mistura com fluxos laminares tendem a ser complexos. No contexto de produtos farmacêuticos, alimentícios, poliméricos, processos biotecnológicos, processos de agitação e mistura líquido – líquido são freqüentemente realizadas em baixas velocidades e envolvem produtos de altas viscosidades, tais como detergentes, pomadas, cremes, suspensões, antibióticos, fermentações e emulsões. Durante os últimos anos tem aumentado a preocupação com problemas relacionados à misturas incompletas ou ineficientes em várias etapas destes processos de fabricação.

Além disso, atualmente, um ponto muito importante está relacionado à necessidade de dar flexibilidade aos sistemas de agitação, já que na indústria um mesmo agitador é utilizado na fabricação de vários produtos de características diferentes.

Este capítulo tem como objetivo principal fazer uma descrição dos trabalhos encontrados na literatura que têm relação com este estudo, baseados na análise da fluidodinâmica computacional.

Adicionalmente são explicados os parâmetros mais importantes para a avaliação de sistemas de mistura.

3.2 CFD aplicado a sistemas de agitação

Paul et al., (2004) evidencia que a agitação num tanque é uma das operações mais comuns, no entanto, apresenta um dos maiores desafios na área de simulação usando a fluidodinâmica computacional.

Tanques agitados contêm tipicamente um impelidor e opcionalmente, podem conter chicanas e outros componentes internos, como por exemplo, serpentinas etc. Modelar um tanque agitado com a fluidodinâmica computacional (CFD) exige a consideração dos aspectos importantes do processo, do produto e dos equipamentos.

A simulação computacional utiliza um conjunto de métodos, ferramentas e formulações direcionadas à solução de problemas complexos, envolvendo grande número de variáveis, dados, processamento e interpretação dos resultados. Todo

modelo computacional requer um domínio de interesse, neste caso, o volume ocupado pelo fluido no interior do tanque.

Segundo, a modelagem do movimento do impelidor no tanque deve ser tratado de uma maneira especial, principalmente se o tanque contém chicanas ou outros componentes internos. O tratamento especial empregado afeta tanto a construção da malha computacional quanto o método utilizado (PAUL et al., 2004).

As técnicas de CFD envolvem a solução das equações de Navier-Stokes. As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais que descrevem o escoamento de fluidos. São equações que permitem determinar os campos de velocidade e de pressão num escoamento.

Nagata (1975) estudou a potência consumida em um sistema com agitação. Através de dados empíricos, o pesquisador verificou que ao aumentar a larguras das pás dos impelidores o consumo de potência se eleva. O autor verificou que o número de Reynolds influencia na inclinação das pás e na altura da superfície do líquido.

Kresta e Wood (1993) indicaram que fatores geométricos, em impelidores de pás inclinadas, têm grande influência na circulação e no bombeamento de fluxo no tanque de mistura.

Patwardhan e Joshi (1999) indicaram um escopo de trabalho para a melhoria da eficiência dos processos de mistura (tempo de mistura por unidade de consumo de energia) através de uma combinação de energia cinética analisada em várias partes do tanque agitado.

Pedrosa (2000) utilizou a CFD para a simulação do tanque de mistura com agitador tipo âncora abordando o problema com uma malha bi-dimensional. Os resultados mostram que a CFD é uma ferramenta eficiente para o problemas em tanques agitados. O artigo reafirma a adequação do agitador tipo âncora para fluidos altamente viscosos e tixotrópicos.

Rudinger (2002) mostrou um trabalho que teve como objetivo modelar tridimensionalmente um tanque agitado por um impelidor tipo âncora, amplamente utilizado para fluidos altamente viscosos (10-100 Pa.s), em que avaliou-se a influência de parâmetros importantes para a simulação computacional de tanques

agitados. O estudo por sua vez, através do entendimento dos fluxos no interior do tanque, teve como objetivo propor soluções e modificações a fim de melhorar a mistura e minimizar o gasto de energia no processo.

Souza (2011) verificou que o projeto de agitadores envolve um grande número de variáveis, além da necessidade de utilização das relações empíricas para que se possa elaborar um projeto eficiente. O objetivo foi obter dados experimentais e modelos confiáveis, com a finalidade de dar subsídios aos pesquisadores e projetistas de agitadores rápidos do tipo discos dispersores, possibilitando aliar alta eficiência de processo com otimização da potência consumida. Além disso, o autor obteve de forma experimental as equações do torque em função da rotação e as curvas do número de potência em função do número de Reynolds para impelidores do tipo disco dispersores de diversas geometrias.

Spogi (2011) estudou os impelidores mais comuns utilizados na indústria determinando curvas para Número de Potência versus Número de Reynolds através de CFD, tanto para escoamentos laminares quanto turbulentos, calculando-se o bombeamento gerado e os padrões de circulação gerados no tanque. Através dos resultados numéricos gerados pelo modelo proposto, foram determinadas correlações empíricas para as curvas para Número de Potência versus Número de Reynolds. O trabalho também teve como objetivo mostrar que um projeto adequado de um sistema de mistura pode minimizar os gastos energéticos do equipamento e seu tempo de processamento, além de melhorar a uniformidade do processo.

Vergel (2013) mostrou que malhas tetraédricas podem fornecer bons resultados em simulações de processos de mistura. Além disso, outro objetivo do autor foi mostrar o efeito do refinamento em malhas tetraédricas e investigar a influência dos elementos prismáticos perto da parede sobre parâmetros globais, tais como o número de potência e número de bombeamento. Foi realizada também uma análise inicial da sensibilidade de alguns modelos de turbulência e esquemas de discretização sobre o campo de fluxo produzido.

Torres (2013) determinou experimentalmente o número de potência em função do número de Reynolds nos regimes turbulento e laminar para impelidores de proximidade (helicoidal, âncora reto e âncora tubular), com e sem raspadores usando fluidos pseudoplásticos de alta viscosidade. Os resultados apresentados

para regime laminar e regime de transição para os impelidores âncora reta com raspadores e âncora tubular com raspadores mostraram maior consumo de potência com respeito aos impelidores âncoras sem raspadores.

3.3 Processos de mistura em tanques industriais

Há várias maneiras de realizar o processo de mistura em tanques. Devido à variedade de necessidades de processo e os objetivos do processo, foram desenvolvidas uma série de diferentes geometrias de tanques. Segundo Paul et al., (2004) para obter um bom resultado de mistura é importante minimizar os custos de investimento e operacionais, proporcionando alto rendimento e aumentando assim a rentabilidade.

O processo geralmente ocorre sob condições de fluxo laminar ou turbulento, dependendo do número de Reynolds. Para número de Reynolds igual ou inferior a 10, o processo é laminar. Condições de turbulência são totalmente alcançados com número de Reynolds superior a cerca de 10^4 . O fluxo é considerado de transição entre os dois regimes.

Conforme Paul et al., (2004) uma melhor abordagem para o projeto destes sistemas de mistura consiste nos seguintes passos:

- Definir os requisitos do processo de mistura, como a qualidade da mistura, redução do tamanho da partícula, grau de suspensão de sólidos, as taxas de transferência de massa, etc.
- Um tipo de impelidor adequado deve, então, ser escolhido com base no tipo de fluido e requisitos de sistema e de mistura.
- O projeto do sistema deve envolver a determinação apropriada do número de impelidores, com o devido dimensionamento, determinando a velocidade e estimando-se as necessidades energéticas.
- Outros componentes, tais como chicanas, também devem ser especificados com base no padrão de fluxo desejado;
- Importância dos componentes mecânicos, tais como o diâmetro do eixo, o espessura da lâmina, defletores e suportes, rolamentos, vedações, etc.

A posição do impelidor é muito importante nas operações do equipamento, pois influi na formação de vórtices ou na aspiração de ar para o produto. O vórtice pode se formar, dependendo das condições de rotação e potência, quando o impelidor está colocado no centro de um tanque sem chicanas ou quando aparece muito perto da superfície do líquido.

As chicanas maximizam a transferência de potência para o fluido, minimizam a “rotação sólida” do fluido no tanque e evitam a entrada de ar no sistema de mistura causada pelo vórtice na superfície. A “ rotação sólida” ocorre quando o fluido se movimenta como se fosse um corpo sólido e, como consequência, apresenta um nível de mistura muito pequeno dentro do fluido. Esse fenômeno pode causar classificação, estratificação e separação do sistema em várias fases (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

3.3.1 Agitação de mistura com alta viscosidade

Na indústria existem diversos processos industriais que envolvem agitação; muitos deles operam com fluidos viscosos, os quais podem ser newtonianos ou não-newtonianos. A operação de agitação de fluidos viscosos é frequentemente complexa e é uma etapa chave em um processo industrial.

As indústrias que fabricam produtos de higiene pessoal, como cremes e loções, necessitam agitar fluidos altamente viscosos e, algumas vezes, como a viscosidade é dependente do tempo ou o gradiente de velocidade deste fluido, o fluxo neste processo de agitação é laminar.

A dissipação de energia durante a mistura pode causar significativa variação da temperatura ao longo do tanque, contribuindo assim para uma viscosidade ainda mais não uniforme, e, possivelmente, a degradação do produto nas paredes do tanque, aumentando tempo de limpeza e custos.

De acordo com Paul et al., (2004), nesses processos, há um pequeno espaço entre o impelidor e a parede do tanque e, portanto, tem-se um alto consumo de potência por unidade de volume. Pode haver a presença de raspadores. Para uma melhor execução na agitação destes tipos de fluidos, costumam-se utilizar impelidores de proximidade (grande diâmetro), como os âncoras e helicoidais. Estes

tipos de impelidores são projetados para possibilitar a agitação de fluidos que são difíceis de bombear. A maioria dos fluidos de elevada viscosidade são não-newtonianos.

Os impelidores de proximidade tais como a âncora, fita helicoidal são freqüentemente usados na mistura e agitação de fluidos altamente viscosos. Porém atualmente existe a aplicação desses impelidores para misturas de baixa viscosidade, principalmente com o objetivo de raspar a superfície de troca térmica e diminuir a resistência convectiva interna, aumentando a transferência de calor.

3.3.2 Tipos de impelidores

De acordo com Paul et al., (2004), os impelidores típicos são divididos em diferentes classes gerais, baseadas em padrões de fluxo, aplicações e geometrias especiais. As classificações também definem os tipos de aplicações para as quais são utilizados esses impelidores.

Os impelidores podem ser classificados de acordo com o regime de mistura (turbulento e laminar), sendo as características geométricas e seus diâmetros os parâmetros mais importantes na caracterização do fluxo gerado e capacidade de mistura.

Segundo McCabe et al., (1985), o tipo de fluxo em um tanque agitado depende do tipo do impelidor; das características do fluido; do tamanho e proporções do tanque, chicanas e agitador. A velocidade do fluido em qualquer ponto tem três componentes e o padrão de fluxo no tanque depende da variação destas três componentes em cada ponto.

A escolha do tipo de impelidor a ser adotado é função dos requisitos específicos de cada processo. Os impelidores podem gerar fluxos axiais, radiais, ou tangenciais e diferentes relações entre bombeamento e cisalhamento. A escolha com a relação mais adequada e com melhor padrão de descarga de fluxo é determinante no desempenho do sistema. O padrão de fluxo é também diretamente afetado pela disposição do impelidor (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

3.3.3 Seleção do impelidor

Oldshue (1983) refere-se à escolha do impelidor a ser utilizado em um determinado processo, a qual depende do tipo de mistura que se pretende obter.

Na literatura são encontrados centenas de tipos de impelidores em uso comercial. A determinação do impelidor mais eficaz deve ser baseada na compreensão dos requisitos do processo e do conhecimento das propriedades físicas. Desenvolvimentos recentes na tecnologia de impelidor têm sido focados em projetos baseados na análise através da fluidodinâmica computacional.

Antes de se verificar a influência da geometria dos impelidores em um processo é aconselhável observar a importância da operação. Esta verificação pode ser feita de diversas maneiras, sendo a mais comum alterar a velocidade de rotação do impelidor e verificar a variação da eficiência do mesmo. Caso ocorra uma grande variação, a agitação é uma etapa determinante para o processo. Além disso, é possível variar a taxa e a localização da alimentação de uma das matérias-primas ou modificar o número de impelidores, o diâmetro dos impelidores ou chicanas. Estas três últimas mudanças mencionadas influenciam a distribuição de potência do processo (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

3.3.3.1 Impelidor de fluxo radial e axial

Para regime turbulento, os impelidores são classificados em impelidores de fluxo axial e radial. Os impelidores do tipo axial apresentam a característica de gerarem componentes de velocidade paralelas ao eixo do impelidor e os do segundo tipo, de originar componentes de velocidade na direção radial (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

Assim, os impelidores de fluxo axial são muito eficientes para mistura de líquidos e suspensão de sólidos e transferência de calor, entretanto, os impelidores de fluxo radial são mais utilizados para dispersão de gás e transferência de massa (HEMRAJANI et al., 2004).

Os impelidores tipo axial produzem um padrão de fluxo através de todo o volume de tanque em um único estágio. Os impelidores de fluxo radial produzem um padrão de dois estágios: uma circulação acima do impelidor e outra circulação

abaixo. A mistura se dá entre os dois estágios, mas é menos vigorosa que aquela que ocorre em um único estágio. Impelidores radiais colocados próximos ao fundo podem ser eficientes, mas pode haver problemas na uniformidade da suspensão. Se esta uniformidade for importante, é necessário adicionar mais impelidores ao tanque (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

Quando impelidores axiais são usados, a rotação do eixo pode ser invertida e criar uma ação de bombeamento para cima. Isso pode ser bom em alguns casos, como por exemplo, na direção de gases em que o impelidor inferior pode produzir um bombeamento para cima enquanto o bombeamento do superior é para baixo. Esta configuração fornece um maior tempo de residência para o gás e evita vibrações mecânicas causadas pelo bombeamento do fluido na direção do fundo (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

3.3.3.2 Impelidor pás inclinadas a 45°

Segundo Joaquim Jr. et al. (2007) os impelidores mais utilizados na indústria brasileira são os impelidores de pás inclinadas a 45°. É utilizado em diversas aplicações industriais, tais como suspensão de sólidos e processos que requerem alto bombeamento. O impelidor tipo pás retas inclinadas gera duas grandes zonas de recirculação entre a haste do impelidor e a parede do tanque, sendo que o impelidor bombeia o fluido para baixo em forma de leque. É um impelidor que consome proporcionalmente pouca energia. Finalmente, a altura do impelidor em relação ao fundo é determinante na forma do fluxo gerado.

A colocação descentrada no tanque minimiza a formação das correntes tangenciais, consumindo menos potência, situação análoga ao impelidor centrado com duas chicanas, com a vantagem de ser mais sanitário, ideal para o processamento de produtos alimentícios e farmacêuticos.

Os impelidores de pás inclinadas são considerados de fluxo misto, visto que sua descarga de fluxo gera componentes de velocidade tanto axiais quanto radiais. As pás podem ter um ângulo entre 10° e 90° de inclinação com relação ao seu plano horizontal, sendo comumente utilizado um ângulo de 45°. O impelidor também pode ser descrito por meio de dimensões características que são expressas em função do

diâmetro do impelidor com a largura da pá. Esse tipo de impelidor apresenta uma excelente combinação de um baixo cisalhamento com uma boa capacidade de bombeamento (OLDSHUE., 1983).

Embora os impelidores possam ter entre 2 e 12 pás, normalmente é utilizado um número entre 3 a 6 pás para manter uma maior estabilidade mecânica. Além disso, tem-se dificuldade no desenho para construir impelidores com mais de 6 pás (HEMRAJANI et al., 2004).

3.3.3.3 Impelidor de fluxo tangencial

Os impelidores são classificados de acordo com o regime de mistura, laminar ou turbulento. Para o escoamento laminar o diâmetro do impelidor se aproxima do tamanho do tanque, uma vez que o transporte de quantidade de movimento no escoamento laminar é baixo (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

Os impelidores tipo fluxo tangencial geram linhas de fluxo circular em regime de fluxo laminar. Destinados à mistura de produtos de elevada viscosidade, estes impulsionam a grande massa de líquido ao redor da parede do reator. De um modo geral, os impelidores tangenciais têm um elevado consumo potência, alto torque e elevado investimento inicial.

Tipo de aplicação: pode ser utilizado para homogeneizar resinas, misturar fluidos muito viscosos e dissolver materiais no estado sólido em meios viscosos ou com formação de subprodutos altamente viscosos.

3.3.3.3.1 Impelidor tipo âncora

Os impelidores tipo âncora possuem uma forte componente de velocidade tangencial e uma fraca componente axial. Podem atuar como um raspador e são indispensáveis na fabricação de fluidos pseudoplásticos (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

O impelidor tipo âncora tem bom desempenho na otimização da transmissão de calor e apresenta maior economia de energia. O tempo de mistura é um pouco superior ao de fita helicoidal. Pode ser dotado de raspadores, evitando a aderência

ou impregnação do fluido nas paredes do tanque, melhorando a transferência de calor.

O número de potência dos agitadores âncora depende da distância da parede e do número de Reynolds. Possui bom desempenho para viscosidades até 50.000 Pa.s. Os agitadores tipo âncora e tipo hélices são agitadores em que as pás se movimentam próximas às paredes do tanque e fornecem uma baixa movimentação axial do fluido conforme descrito por Paul et al., (2004).

Estes impelidores são fisicamente desenhados para fluidos em geral difíceis de bombear. São tipicamente de tamanho grande, quase do mesmo tamanho que o diâmetro do tanque. Os modelos mais comuns são a âncora e a helicoidal de dupla hélice.

Segundo Paul et al., (2004), âncoras são usadas para viscosidades de líquidos entre 5000 e 50 000 cP, porque a baixas viscosidades não há resistência suficiente na parede para proporcionar bombeamento. Acima de 50 000 cP, especialmente com fluidos não newtonianos, a capacidade de bombeamento do impelidor tipo âncora decresce. O líquido ao redor do impelidor se movimenta juntamente com a rotação do impelidor e à medida que vai se afastando da região do impelidor começa a tornar-se estagnado. Quando a transferência de calor através de uma camisa é desejada, juntamente com uma boa mistura, os raspadores são projetados na parede. O sistema de agitação com âncora pode ser complementado pela adição de outros impelidores, sendo esta a proposta deste trabalho.

Âncora e impelidor helicoidal de dupla hélice também podem ser utilizados em aplicações em regime turbulento onde o alto cisalhamento não é necessário. Isto é uma vantagem para os processos em que há modificações de viscosidade de fluidos de forma significativa e ambas as condições laminares e turbulentas ocorrem em diferentes fases. Embora impelidores para regimes laminares possam ser aplicados em regimes turbulentos, eles geralmente não são recomendados, devido aos seus elevados custos de investimento.

O tempo que demora a obter a qualidade desejada de mistura em perfil laminar depende da geometria do misturador e velocidade de mistura. Este tempo de mistura e velocidade do misturador devem ser determinados através de testes de planta piloto. Os dados para aumento de escala devem ser obtidos para condições que

assegurem a eliminação de zonas mortas. É também importante estudar o efeito de localização e a taxa de adição de matérias-primas (PAUL et al., 2004).

Impelidores largos próximos ao diâmetro do tanque não são necessários quando existe o escoamento turbulento por que neste caso a transferência da quantidade de movimento é ineficiente. Nessas condições, o diâmetro do impelidor varia de um quarto à metade do tanque (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

3.3.4 Tanques agitados

3.3.4.1 Geometria

O conjunto conhecido como tanque agitado consiste normalmente em um tanque cilíndrico, um ou mais impelidores, um motor e usualmente chicanas. Alguns tanques são providos de serpentinas ou camisas para promover a troca de calor. O fundo do tanque pode ser de diversos tipos, como abaulados, cônicos, planos, entre outros. Para cada processo há uma configuração mais adequada. A distância entre o impelidor e o fundo do tanque (*clearance*) geralmente afeta as linhas de fluxo na direção axial e radial. Portanto, não é aconselhável que este espaço seja muito pequeno (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

Como a maioria dos processos ocorre em regime turbulento, são adicionadas chapas verticais, mais conhecidas como chicanas ou defletores, nas paredes do tanque, introduzidas para provocar um distúrbio do fluxo ou redirecionar o fluxo. As chicanas maximizam a transferência de potência para o fluido, minimizam a “rotação sólida” do fluido no tanque e evitam a entrada de ar no sistema de mistura causada pelo vórtice na superfície (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

Normalmente a relação entre a altura do tanque e seu diâmetro segue a razão de 1:1, sendo este valor modificado em processos que necessitem alta eficiência de transferência de massa, como por exemplo, em sistemas líquido-gás.

As relações geométricas, bem como a característica do fundo utilizado, devem ser escolhidas caso a caso, respeitando as particularidades de cada processo e do produto desejado.

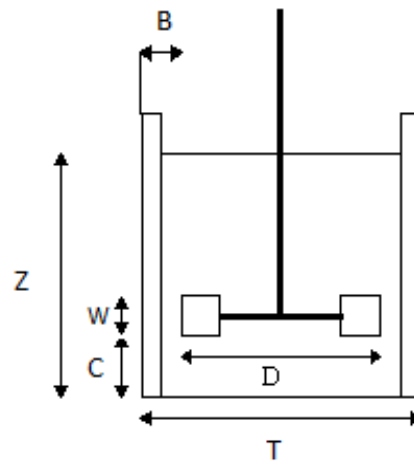
Nos tanques altos, o agitador pode ser instalado a partir da parte inferior para reduzir o comprimento da haste e proporcionar estabilidade mecânica. Em tanques de armazenagem muitas vezes é desejável que o fluido não permaneça estagnado, sob pena de queda de sua homogeneidade. Nestes casos são instalados agitadores laterais com pequenos impelidores, médias rotações, responsáveis por imprimir uma pequena velocidade ao fluido, conseqüentemente um baixo nível de agitação. Em tanques cilíndricos horizontais, o misturador pode ser instalado na parte lateral ou no topo.

O sistema de agitação é integrado à geometria do tanque para propiciar as melhores condições e maior economia de operação do processo. A geometria do tanque resulta da otimização do uso de chapas que reduz o custo do equipamento, diminuindo o número de cortes e de soldas e com uma padronização que atende à racionalização da produção e as necessidades do mercado.

Além disso, a posição é fundamental nas operações do equipamento, pois influi na formação de vórtices ou na aspiração de ar para o produto. O vórtice pode se formar, dependendo das condições de potência e rotação, por exemplo, quando o impelidor é colocado no centro de um tanque sem chicanas ou quando está muito perto da superfície do líquido. Uma das maneiras de se evitar a formação de vórtices é deslocar o impelidor do centro do tanque.

A Figura 1 apresenta as dimensões características do sistema de agitação são o diâmetro interno (T), o diâmetro do impelidor (D), a largura da pá do impelidor (w), a distância entre o fundo e o impelidor (C), a altura de líquido (Z) e a largura das chicanas (B_{chi}). A relação geométrica entre as diversas partes do tanque varia em função da aplicação, mas seguem um determinado padrão conforme a Tabela 1. (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

Figura 1 – Relações geométricas padrões de um tanque agitado



Fonte: Joaquim Junior et. al., 2007

Tabela 1 - Relações geométricas padrões

Relação	Valor
D/T	1/4 a 1/2
Z/T	1
C/T	1/6 a 1/2
B/T	1/10 a 1/12
w/T	1/4 a 1/6

Fonte: Joaquim Junior et. al., 2007

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: PROJETO DE SISTEMAS DE MISTURA

4.1 Introdução

A concepção de sistemas de mistura muitas vezes não são baseados em princípios científicos bem estabelecidos. No entanto, como é a tendência da indústria o desenvolvimento de processos de alto nível, é necessária uma compreensão mais profunda do comportamento de fluxo no interior de sistemas de mistura (CULLEN, 2009).

O estudo do fluxo fornece informações valiosas sobre o processo de mistura. Os recentes desenvolvimentos em tecnologias têm facilitado tal visão, permitindo que regiões pobres de mistura dentro dos tanques sejam identificadas.

Segundo Cullen (2009), a mistura incompleta ou excesso de mistura do produto pode resultar na separação de fases do produto e textura indesejável. Conseqüentemente, o monitoramento e controle do processo de mistura se tornam críticos.

Um conjunto considerável de informações já está disponível e constitui a base para o projeto e seleção do equipamento de mistura mais apropriado.

Segundo Chhabra e Richardson (1999), na mistura existem dois tipos de problemas a serem considerados, como projetar e selecionar o equipamento de mistura para um determinado processo e a forma de avaliar se um tanque disponível é adequado para uma determinada aplicação. Em ambos os casos, os seguintes aspectos do processo de mistura devem ser entendidos:

- (i) Mecanismos de mistura
- (ii) Os critérios de aumento de escala ou similaridade
- (iii) O consumo de energia
- (iv) Os padrões de fluxo
- (v) Taxa de mistura e tempo de mistura

4.2 Os mecanismos de mistura

Se a mistura é para ser efetuada de modo a produzir um produto uniforme, é necessário entender como misturas de líquidos se movimentam e abordar a uniformidade da composição. Para equipamentos de mistura de líquidos é necessário que duas exigências sejam consideradas. Em primeiro lugar, deve haver um fluxo convectivo de forma que não existam zonas mortas ou estagnadas. Em segundo lugar, tem que haver uma zona de cisalhamento intenso ou de alta mistura em que as zonas não homogêneas sejam progressivamente quebradas. Ambos os processos consomem energia e, finalmente, a energia mecânica é dissipada na forma de calor (CHHABRA; RICHARDSON, 1999).

Dependendo das propriedades do fluido, principalmente a viscosidade, o fluxo em tanques de mistura pode ser laminar ou turbulento, com uma substancial zona de transição entre eles e muitas vezes os dois tipos de fluxo ocorrer simultaneamente em diferentes partes do tanque. Fluxos laminares e turbulentos surgem de diferentes mecanismos e é conveniente a considerá-los separadamente (CHHABRA; RICHARDSON, 1999).

4.2.1 Regime Laminar

Segundo Oldshue (1983), em regime laminar, a mistura de fluidos miscíveis com viscosidades similares e comportamento não-elástico é obtida pela formação de camadas na medida em que os materiais são estirados e deformados entre si. É possível constatar experimentalmente ou, até mesmo matematicamente, que dificilmente um sistema de agitação trabalhará em regime laminar. Para tal regime o impelidor necessariamente trabalharia em rotações baixíssimas.

Quando o regime laminar é desejado, recorre-se normalmente aos impelidores tipo âncora, helicoidal, pequenos impelidores navais em grandes tanques de estocagem, ou quatro pás retas a 45 graus na posição descentrada. Ainda assim, próximo ao impelidor, é observado um comportamento turbulento.

Ainda segundo Oldshue (1983), em nenhum processo de agitação o escoamento poderá ser classificado como laminar nas regiões muito próximas do impelidor, onde sempre terá a condição de turbulência. Desta forma fica claro que a

classificação do regime de escoamento é para o tanque como um todo, ou seja, uma classificação tendo como parâmetro a média de diferentes velocidades proporcionadas por um impelidor, encontradas em um tanque de processo, dotado de um agitador.

Misturas em fluxo laminar em larga escala são geralmente associadas com líquidos de alta viscosidade e podem apresentar tanto características de fluxo newtonianos ou não-newtoniano. Os gradientes de velocidade perto de um impelidor em movimento são altos, assim os elementos do fluido tendem a deformar-se. Eles repetidamente alongam-se e tornam-se cada vez mais finos cada vez que passam através da zona de elevado cisalhamento.

Além disso, o fluxo extensional ou elongacional geralmente ocorre simultaneamente. Este pode ser resultado da convergência das linhas de corrente e consequente aumento de velocidade na direção do fluxo. Uma vez que para fluidos incompressíveis o volume permaneça constante, deve haver um afinamento dos elementos do fluido. Ambos os mecanismos (cisalhamento e alongamento) dão origem a tensões no líquido, os quais, em seguida, afetam no sentido de uma redução no tamanho das partículas e um aumento da área interfacial, através do qual o grau desejado de homogeneidade é obtido (CHHABRA; RICHARDSON., 1999).

Além disso, a difusão molecular sempre atua de tal maneira a reduzir a falta de não homogeneidade, mas o seu efeito não é significativo até que os elementos do fluido tenham sido suficientemente reduzidos. Deve ser reconhecido, contudo, que a homogeneização final de líquidos miscíveis pode ser provocada apenas pela difusão molecular. No caso de líquidos de elevada viscosidade, este é um processo lento.

4.2.2 Regime Turbulento

Conforme Chhabra e Richardson (1999), no caso de líquidos de baixa viscosidade ($\sim 10 \text{ m Pa. s}$), o fluxo gerado em tanques de mistura com impelidores rotativos são geralmente turbulentos. A inércia transmitida ao líquido pelo impelidor é suficiente para fazer com que o líquido circule por todo o tanque e volte para o impelidor. A turbulência pode ocorrer ao longo do tanque, mas será maior perto do

impelidor. Difusão turbulenta é muito mais rápida do que a mistura por difusão molecular e, conseqüentemente, a mistura turbulenta ocorre muito mais rapidamente do que em regime laminar. Por fim, a homogeneização a nível molecular depende da difusão molecular, que, em geral, realiza-se mais rapidamente nos líquidos de baixa viscosidade. A mistura é mais rápida perto do impelidor devido às elevadas taxas de cisalhamento e vórtices formados nas pontas das pás das hélices, além disso, uma elevada proporção da energia é dissipada.

4.3 Variáveis de projetos

Existem muitas variáveis que podem ser manipuladas para projetar um sistema de agitação, tais como a velocidade de rotação, propriedades do fluido, geometria do misturador, posicionamento, etc. Todas estas variáveis têm influência no desenvolvimento do processo e no consumo energético. Assim, vários parâmetros têm sido padronizados para correlacionar todas estas variáveis em processos de mistura, visando facilitar a análise do processo, as quais serão explicadas a seguir (PAUL et al., 2004).

Segundo McCabe et al., (1985) há uma série de números adimensionais relacionados a sistema de agitação, dentre os mais importantes, podemos citar o número de Froude, o Número de Reynolds, Número de Bombeamento e o Número de Potência.

4.3.1 Torque

O torque é definido como o produto da força pela distância ou da potência pelo tempo. No caso da agitação, ele é a relação entre a potência e a velocidade de rotação do impelidor. Esta variável é de grande importância no projeto de sistemas de mistura, já que influencia diretamente o custo do equipamento. Além da engrenagem de transmissão, que é dimensionada de acordo com o torque, o tamanho do eixo e o peso do impelidor também influenciam este valor (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

Para sistemas de agitação, pode-se calcular o torque pela Equação 1. No sistema Internacional (SI), a unidade da potência é watts = J/s, a unidade de velocidade de rotação é s^{-1} e a unidade do torque é joule (J).

$$\tau = \frac{P}{2.\pi.N} \quad (1)$$

O valor do torque pode ser estimado no Ansys CFX-post.

Segundo Paul et al, 2004, existem vários métodos disponíveis para medir o torque, alguns permitem medição da contribuição individual do torque para cada impelidor, enquanto que outros só podem ser usados para medir o torque do sistema todo. Devem ser tomadas precauções com todos os métodos para assegurar que o verdadeiro torque possa ser isolado a partir de qualquer carga de atrito aplicado.

4.3.2 Potência

A potência está relacionada diretamente com o custo da energia necessária para um processo de mistura, o qual é o principal custo de operação. Além da potência transferida do impelidor para o fluido, outros consumos energéticos causados por aspectos mecânicos devem ser considerados para o projeto de equipamentos de mistura, tais como a perda de carga no motor (SILVA, 2002).

Em um sistema de agitação e mistura em tanques a potência é a variável mais importante, pois se trata do consumo de potência do sistema como um todo. Muitas regras de aumento de escala dependem diretamente da entrada deste valor (PAUL et al., 2004).

A estimativa da potência em tanques agitados com uso de CFD é feita mediante o cálculo computacional do torque, o qual é substituído na equação do torque para obter a potência do processo.

A potência consumida no processo é proporcional à velocidade de rotação, ao diâmetro do impelidor (D) e à densidade (ρ) de acordo com a Equação (2):

$$P = \kappa.\rho.N^3.D^5 \quad (2)$$

4.3.3 Tempo de Mistura

Antes de considerar a questão da taxa e tempo de mistura é necessário dispor de meios para avaliar a qualidade da mistura do produto. Essa dificuldade decorre de dois aspectos da mistura, ou seja, a escala e a intensidade da segregação. A escala de segregação é uma medida do processo de separação de larga escala (governada por grandes quantidades e coeficiente de difusão), sem a ação da difusão molecular.

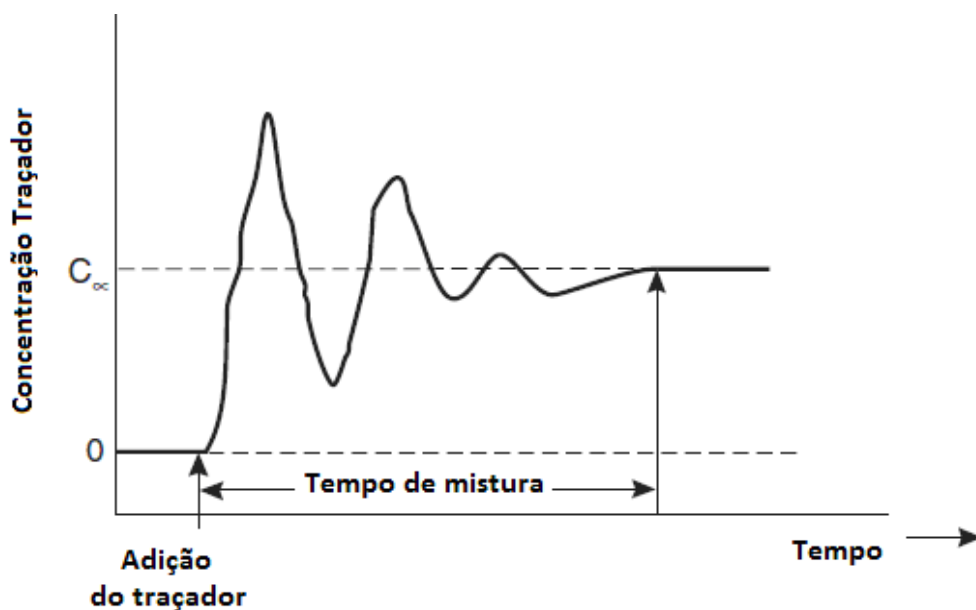
O tempo de mistura dentro de um tanque agitado é definido como o tempo medido do instante da adição de um traçador até o instante em que o líquido alcança um grau de uniformidade desejado (JOAQUIM JUNIOR. et al., 2007).

A velocidade de qualquer um dos componentes da mistura em um escoamento pode ser determinada experimentalmente pela injeção de uma substância quimicamente inerte, com características físicas semelhantes a um dos componentes da mistura que circula pelo sistema, denominado de traçador (FOGLER, 2002).

Quando um traçador é adicionado a uma única fase líquida em um tanque agitado, o tempo de mistura é medido como o intervalo entre a introdução do traçador e o momento em que o conteúdo do recipiente atinge o grau necessário de homogeneidade ou mistura pré - definido. Se o traçador é completamente miscível e tem a mesma viscosidade e densidade do líquido no tanque, a concentração do indicador pode ser medida como uma função do tempo em qualquer ponto do vaso por meio de um detector adequado, por exemplo, um medidor de cor, ou por condutividade elétrica (CHHABRA; RICHARDSON, 1999).

Para uma determinada quantidade de um traçador, a concentração de equilíbrio C^∞ pode ser calculada, valor esse que será abordado assintoticamente em qualquer ponto, conforme Figura 2 que mostra a curva de tempo de mistura:

Figura 2 - Curva tempo de mistura



Fonte: (Adaptado de CHHABRA; RICHARDSON, 1999)

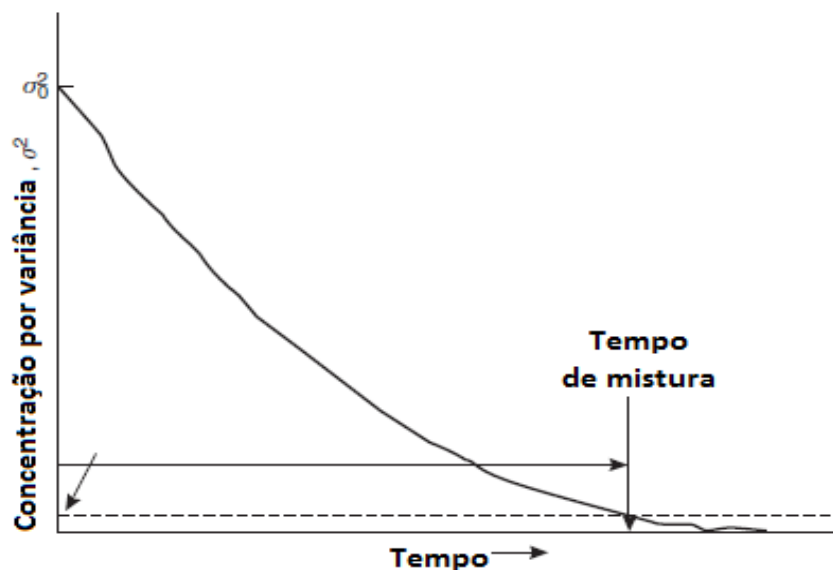
Na prática, o tempo de mistura é o período de tempo medido a partir do instante em que foi adicionado o traçador até que o conteúdo do tanque atinja o grau de mistura especificado (95% ou 99%) do valor de equilíbrio C_{∞} e este será dependente da forma em que é adicionado o traçador e a localização do detector.

O ideal é localizar o traçador em diferentes regiões no tanque e definir a variância da concentração de σ^2 sobre o valor de equilíbrio como descrito na Equação (3):

$$\sigma^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{i=0}^{i=p} (C_i - C_{\infty})^2 \quad (3)$$

onde C_i é a concentração do marcador no tempo t registrado pelo detector i . Uma curva típica de variação é mostrada na Figura 3:

Figura 3 - Redução na variância da concentração do traçador com o tempo



Fonte: (Adaptado de (CHHABRA; RICHARDSON, 1999))

Podem ser utilizadas diversas técnicas experimentais, tais como a titulação ácido base, condutividade elétrica, medição da temperatura, medição do índice de refração, a absorção de luz e assim por diante. Em cada caso é necessário especificar a forma de adição do traçador, a posição e o número de pontos de registro, o volume da amostra do sistema de detecção, e o critério utilizado para localizar o ponto final (tal como um ponto de corte pré - determinado) (CHHABRA; RICHARDSON, 1999).

Cada um desses fatores irá influenciar o valor medido do tempo de mistura e, por isso deve-se ter muito cuidado na comparação de resultados de diferentes investigações. Independentemente da técnica utilizada para medir o tempo de mistura, a curva de resposta pode apresentar comportamento periódico. Isto pode ser, muito provavelmente, devido à passagem repetida de um elemento de fluido em um local de alta concentração de traçador.

O intervalo de tempo entre dois picos sucessivos é conhecido como o tempo de circulação.

Para uma determinada experiência e configuração, o tempo de mistura, t_m , dependerá do processo e das variáveis de operação, como se segue:

$$t_m = f(\rho, \mu, N, D, g, \text{dimensões geométricas do sistema}) \quad (4)$$

Através da análise dimensional, podemos rearranjar como:

$$N t_m = \theta_m = f(\text{Re}, \text{Fr}, \text{razões geométricas}) \quad (5)$$

Para sistemas geometricamente semelhantes e assumindo que é possível desconsiderar o número de Froude tem-se:

$$\theta_m = f(\text{Re}) \quad (6)$$

4.4 Números adimensionais

4.4.1 Número de Reynolds (Re)

Existem vários números adimensionais que caracterizam o desenvolvimento de processos de mistura. O número de Reynolds é um dos mais comuns para sistemas agitados, definido como a razão entre as forças inerciais e as forças de atrito ou forças viscosas.

Segundo Cullen (2009), o número de Reynolds modificado é empregado para tanques agitados, com base no diâmetro do impelidor (D), velocidade de rotação (N) e viscosidade dinâmica do fluido (μ) conforme Equação (7):

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot D^2 \cdot N}{\mu} \quad (7)$$

Os padrões de fluxo dentro de um tanque agitado são governados pelo tipo de impelidor empregado.

Os padrões de fluxo incluem: (a) de escoamento axial, que coincide com o eixo do impelidor, (b) o fluxo radial que é paralelo ao raio do impelidor no sentido da parede do vaso, e (c) de fluxo tangencial que é induzido por agitação ou pela formação de um vórtice.

Para tanques agitados, o fluxo é laminar se $\text{Re} < 10$ e turbulento para $\text{Re} > 10^4$.

Para fluidos viscosos o regime laminar domina. Se há necessidade de induzir a turbulência com a alta rotação do impelidor, a velocidade do fluido cai rapidamente

quando distante do impelidor, assim são formadas as chamadas cavernas, que são regiões com boa agitação associada a regiões com baixa mistura ou fluido estacionário (CULLEN, 2009).

4.4.2 Número de potência (N_p)

Em um sistema de mistura de tanque agitado, a medida mais fundamental é a do número de potência do sistema, em que muitas regras de aumento de escala dependem desta variável. O consumo de energia de um impelidor é caracterizada pelo seu número de potência. A potência consumida (P) por estes sistemas é apresentada por Oldshue (1983) genericamente pela Equação (8):

$$P = N_p N^3 D^5 \cdot \rho \quad (8)$$

Onde (N_p) é o número de potência e varia com a geometria do sistema de agitação e número de Reynolds, (N) velocidade de rotação do impelidor, (ρ) densidade. Para um determinado impelidor trabalhando em regime turbulento, o número de potência é constante.

O Número de Potência (N_p) é análogo ao coeficiente de arraste ou fator de fricção. N_p é proporcional a razão da força de arraste agindo sobre unidade de área do impulsor e a tensão tangencial.

Fluidos de alta viscosidade não seguem a função acima e apresentam problemas como a formação de zonas estagnadas no tanque, geralmente nos cantos ou zonas mais distantes do impelidor como apresentado por Nagata (1975). Em geral são usados impelidores de baixa rotação e diâmetros maiores, sendo que a potência consumida é dada por:

$$P = \gamma \cdot Q \cdot H_m \quad (9)$$

Onde γ é o peso específico do líquido, H_m é a perda de carga durante a circulação do produto e Q é a velocidade de circulação ou vazão de circulação média no tanque.

Como a Equação (9) mostra a potência de entrada P no sistema, esta pode ser calculada se a velocidade do impelidor N , e o torque, τ , são conhecidos. Se o diâmetro do impelidor (D) e densidade do fluido são também conhecidos, o número de potência, N_p , de um impelidor pode ser calculado.

Em resumo, o número de potência pode ser descrito como a proporção entre forças de pressão com forças inerciais garantindo uma relação prática entre potência do impelidor, diâmetro, velocidade rotacional e densidade do fluido. Embora esses grupos não sejam mantidos constantes durante o processo de aumento de escala, eles formam a base de correlações empíricas que não dependem de escalas. Relações empíricas entre o número de potência e número de Reynolds foram desenvolvidas para diferentes tipos de impelidores geometricamente semelhantes (CULLEN, 2009).

As curvas de potência para diferentes impelidores podem ser encontradas na literatura, mas é preciso ressaltar que tais curvas são aplicáveis a líquidos newtonianos para a geometria do tanque que foi testada. Caso não exista uma curva de potência para o impelidor, será necessário fazer esta curva no laboratório ou obtê-la através da fluidodinâmica computacional (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

4.4.3 Número de bombeamento (N_Q)

O número de bombeamento é a medida mais usada globalmente para a capacidade de bombeamento do impelidor em sistemas agitados e relaciona a taxa de bombeamento do impelidor com a velocidade de rotação e o tamanho do impelidor.

O número de bombeamento é uma medida da capacidade de bombeamento de um impelidor. Medidas diferentes para a capacidade de bombeamento existem, mas o número de bombeamento é utilizado amplamente. Este parâmetro adimensional está definido pela Equação (10):

$$N_Q = \frac{Q_l}{N.D^3} \quad (10)$$

Nesta expressão, Q_i , representa a taxa de fluxo produzido pelo impelidor. Para calcular Q_i por um impelidor, uma superfície precisa de ser criada para a região do bombeamento. Esta superfície deve ser circular para um impelidor de fluxo axial e uma cilíndrica para um impelidor de fluxo radial. Ao integrar a vazão total através desta superfície, a taxa de fluxo, Q_i , e, subseqüentemente, o número de bombeamento, N_Q , podem ser obtidos (PAUL et al., 2004).

Na Equação 10, Q_i é a taxa de fluxo induzida pelo impelidor, a qual pode ser facilmente calculada em CFD posicionado uma superfície circular na região de descarga na frente do impelidor (impelidores axiais) e integrando o fluxo total de saída na superfície.

4.4.4 Número de Froude (Fr)

Este número inclui as forças gravitacionais e é usado para considerar os efeitos da superfície livre (por exemplo, vórtice central) no número de potência. Por isso, esse número é incluído em correlações de Reynolds e potência em sistemas sem chicanas (CULLEN, 2009).

O Número de Froude é uma medida da razão da força inercial pela força gravitacional por unidade de área agindo no fluido.

O efeito do número de Froude aparece quando há formação de vortex para valores de Re acima de 300. Em sistemas onde o vórtice não ocorre (devido à introdução de chicanas, para $Re < 300$, etc.) o número de Froude não aparecerá como um fator.

O número de Froude é dado pela Equação (11):

$$Fr = \frac{N^2 \cdot D}{g} \quad (11)$$

Sendo velocidade do impelidor N , diâmetro do impelidor (D) e g gravidade.

Na equação, o número de Froude é importante apenas quando ocorre a formação de vórtice, e em misturas de uma única fase. É um número que pode ser negligenciado se o valor do número de Reynolds for inferior a 300. Tendo em conta

o efeito prejudicial da formação de vórtice sobre a qualidade da mistura, os tanques são geralmente projetados com chicanas e, portanto, na maior parte das situações que envolvem fluidos newtonianos de baixa viscosidade, o número de potência é uma função do número de Reynolds e da geometria. Da mesma forma, como a viscosidade do líquido aumenta, a tendência de formação de vórtice diminui e, portanto, o mesmo acontece com a necessidade de instalação das chicanas nos tanques de mistura.

O número de Froude representa a força da gravidade quando esta tem um papel importante na determinação do movimento do fluido. O número de Froude deve ser igual em situações de aumento de escala para o novo projeto para ter um fluxo semelhante quando a gravidade controla o movimento.

4.4.5 Número de Mistura (N_{θ})

O número de mistura é um dos parâmetros mais importantes para o desenvolvimento do projeto, já que correlaciona o tempo de mistura com a velocidade de rotação, está definido pela Equação (12):

$$N_{\theta} = N\theta \quad (12)$$

É o produto da velocidade de rotação (N) e o tempo de mistura (θ). O tempo de mistura é uma medida do tempo requerido para misturar líquidos miscíveis ao longo do volume de tanque agitado. Se o número de mistura for constante, o tempo de mistura é proporcional ao inverso da velocidade de rotação do impelidor (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

5 MODELAGEM MATEMÁTICA

5.1 Introdução

O pacote computacional ANSYS CFX® é um software de simulação para resolução numérica de problemas envolvendo mecânica dos fluidos e transferência de calor. O programa emprega a metodologia de volumes finitos utilizando estruturas espaciais e gerando malhas correspondentes. É uma técnica que abrange métodos computacionais utilizados para a simulação de escoamentos que envolvem fluidos em movimento, com ou sem troca de calor, incluindo escoamentos internos e externos (FORTUNA, 2000).

A Fluidodinâmica Computacional está se tornando uma ferramenta essencial na análise de fluxos complexos dentro dos tanques, pois consiste na resolução numérica e simultânea das equações de conservação de massa, momento e energia (Equações de Transporte de Navier-Stokes) e de equações de estado.

As simulações foram feitas utilizando o modelo Frozen Rotor (MFR, Multiple Frame of Reference) disponível no software ANSYS CFX 14.0, devido a sua estabilidade numérica e menor custo computacional. Esta abordagem prediz o fluxo permanente de um sistema rotor / estator, onde o fluxo no rotor é resolvido em um bloco estacionário, e o fluxo no estator é resolvido em um bloco rotacional.

Esta abordagem possibilita o cálculo de diversas variáveis importantes para o dimensionamento de sistemas de mistura como tempo de mistura. Funções como torque, potência, número de potência e bombeamento podem ser simulados para cada passo de tempo, mostrando parâmetros importantes para o dimensionamento do sistema.

As técnicas experimentais permitem a obtenção de dados globais de comportamento e eficiência, já a técnica CFD possibilita a determinação do comportamento local dentro do sistema de mistura utilizando métodos matemáticos e algoritmos baseado nas leis de conservação de massa, momento e energia em conjunto com condições pré - definidas. Porém, existem várias premissas importantes a serem questionadas antes do início das simulações, pois elas poderão afetar a complexidade e os resultados dos cálculos. A escolha criteriosa de hipóteses simplificadoras pode levar a reduções drásticas no tempo de computação,

porém, suposições inadequadas ou má seleção de modelos podem produzir soluções de baixa qualidade, com resultados incorretos.

Os códigos CFD são estruturados em torno de algoritmos numéricos. A fim de proporcionar fácil acesso a resolução, todos os pacotes comerciais incluem interfaces sofisticadas para inclusão de parâmetros de entrada do problema e para examinar os resultados. Por isso todos os códigos contêm três elementos principais: (i) um pré-processador, (ii) um solucionador e (iii) um pós-processador (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

Segundo Joaquim Jr. et al. (2007) a modelagem e a simulação de tanques de mistura podem ser, de uma maneira geral, classificadas em dois tipos distintos de análise:

1) Análise através de correlações gerais obtidas a partir de estudos experimentais com tipos específicos de impelidores.

2) Análise que estuda ponto a ponto um determinado sistema, a qual utiliza modelos de discretização. Este enfoque procura localizar pontos específicos de ineficiência do sistema e, também compreender melhor fenômenos como turbulência, transferência de massa e de calor para propor modificações que promoverão uma otimização do equipamento.

5.1.1 Equações de conservação

As equações discretizadas são as leis de conservação de massa, quantidade de movimento linear e energia. Se um volume infinitesimal é considerado, pode-se notar que, com o tempo, ele se desloca no espaço e, adicionalmente, também se distorce, mudando seu formato. Normalmente, o processo de deslocamento é denominado convecção e o processo de distorção (que é relacionado com os gradientes de velocidade) denomina-se difusão. De um modo geral, estes são os processos que governam a movimentação de um fluido em qualquer escoamento (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

É comum que processos em tanques agitados sejam descritos por um sistema de equações de conservação ou equações de transporte. Esse sistema de equações é acoplado, ou seja, as equações são interdependentes. As equações com ênfase

nos processos de agitação e mistura são descritas a seguir (PAUL et al., 2004; JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

5.1.1.1 Conservação de Massa

As equações integrais de Mecânica dos Fluidos são utilizadas num volume de controle (V.C.) para analisar o campo de escoamento de maneira global. As equações diferenciais são utilizadas para estudar o campo de escoamento em forma mais detalhada.

A conservação da massa, também conhecida por equação da continuidade, é dada por:

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (13)$$

Na notação de Einstein tem-se:

$$\rho \frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \rho \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + \rho \frac{\partial U_3}{\partial x_3} = 0 \quad (14)$$

Na grande maioria dos casos, a massa específica varia com o tempo, de forma que a Equação (14) se apresenta por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (15)$$

5.1.1.2 Conservação da Quantidade de Movimento

A equação da quantidade de movimento, ou momento, indica a conservação do momento em cada uma das direções x_1 ou x_2 . Estas equações são normalmente conhecidas como equações de Navier- Stokes.

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais que descrevem o escoamento de fluidos. São equações a derivadas parciais que permitem determinar os campos de velocidade e de pressão num escoamento.

A Equação (16) está descrita a seguir, para regime permanente:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \rho \cdot \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \cdot \delta_{ij} \right) \right] + \rho g_i + F \quad (16)$$

O termo temporal e os termos convectivos aparecem no lado esquerdo da Equação (16). Os termos do lado direito são o gradiente de pressão, os termos responsáveis pela difusão de momento, a força gravitacional e um termo fonte.

Para haver um processo eficiente em termos de agitação e transferência de calor é necessário um elevado grau de turbulência. Existem diversos métodos que incluem o efeito da turbulência nas equações de Navier – Stokes. Quando o efeito da turbulência é incluído, as quantidades transportadas, como, por exemplo, a velocidade, acabam sendo descritas como a soma de um valor de equilíbrio (média) e um valor flutuante $U_i + u_i$.

Após se integrar na média para um tempo muito maior do que as flutuações turbulentas, a soma das flutuações será zero e sobrarão apenas os valores médios. Os únicos termos que não são zero são aqueles correspondentes ao produto de termos flutuantes. Os termos restantes são semelhantes à Equação (16). A equação final toma a seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \rho \cdot \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \cdot \delta_{ij} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{-u_i u_j}) + \rho g_i + F_i \quad (17)$$

Os novos termos $\overline{u_i u_j}$ são os tensores de Reynolds. A barra em cima significa que os valores são médios no tempo. Os modelos de turbulência aproximam os tensores de Reynolds por expressões que são coletivamente conhecidas como modelos de turbulência.

5.1.1.3 Conservação da Quantidade de Energia

A transferência de calor em tanques de mistura é aproximada numericamente através da equação de conservação de energia. O calor pode ser gerado (ou

extraído) pelo uso de serpentinas e jaquetas e, também, pode ser gerado ou consumido por reações químicas. A equação de quantidade de energia (expressa em termos de entalpia) é dada por:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \rho \cdot \frac{\partial[U_i(\rho E + p)]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ef} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j'} h_j J_{j,i} + U_j (\tau_{ij})_{ef} \right] + S_{ji} \quad (18)$$

O primeiro termo do lado esquerdo é o termo temporal da variação de energia e o segundo termo é um termo convectivo de transporte de energia. O primeiro termo da equação do lado direito representa a transferência de calor difusiva e o segundo termo representa a transferência de calor devido à difusão de espécies químicas. O terceiro termo representa a dissipação viscosa e o ultimo termo é um termo fonte geral que pode incluir fontes de calor devido a reações, radiação e outros fenômenos.

Na Equação (18), a energia E é relacionada com entalpia h. A seguinte relação envolve a pressão e a velocidade com a entalpia:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{U^2}{2} \quad (19)$$

Quando o escoamento é incompressível, as espécies químicas que estão sendo misturadas têm suas composições definidas em termos de frações mássicas, m_j e entalpias h_j , de cada espécie química individual.

$$h = \sum_{j'} m_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (20)$$

A entalpia de cada espécie é dada por:

$$h_{j'} = \int_{T_{Ref}}^T c_{p,j'} dT \quad (21)$$

5.1.1.4 Conservação da Massa da Espécie Química

Uma mistura de fluidos com diferentes propriedades físicas pode ser expressa através da conservação mássica de uma simples espécie. A solução numérica dessas equações pode prever como diferentes fluidos se misturam, mas não como eles se separam, visto que a separação resulta da ação de diferentes forças que agem nos fluidos independentemente. Caso o fenômeno da separação necessite ser predito, é necessário, então, considerar a equação de conservação da quantidade de movimento para cada fluido, de maneira que as forças possam agir nos fluidos independentemente. A equação de conservação da espécie i' , em termos da sua fração mássica $m_{i'}$:

$$\frac{\partial(m_{i'})}{\partial t} + \frac{\partial[\rho U_{i'} m_{i'}]}{\partial x_i} = -\frac{\partial J_{i'i}}{\partial x_i} + R_{i'} + S_{j_i} \quad (22)$$

Onde:

$J_{i'i}$ = componente i do fluxo de difusão da espécie química i' na mistura

$R_{i'}$ = taxa em que a espécie i é consumida ou produzida

S_{j_i} = termo fonte geral para a espécie i

Quando duas ou mais espécies estão envolvidas, as somas das frações mássicas tem que ser 1,0, de forma que para n espécies, apenas $n-1$ espécies precisam ser preditas, logo:

$$\sum_{i=1}^n m_{i'} = 1 \quad (23)$$

5.1.2 Métodos Numéricos

5.1.2.1 Solução discretizada das variáveis de fluxo

Através de um método numérico é possível resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. A tarefa do método numérico é transformar uma equação diferencial, definida no domínio, em um sistema de equações algébricas.

Para isso, as derivadas da função existentes na equação diferencial devem ser substituídas pelos valores discretos da equação. Transformar as derivadas em termos que contém a função significa integrar a equação diferencial e as diversas maneiras de fazê-lo são o que caracteriza o tipo do método numérico (MALISKA, 2004).

Como a discretização é aplicada em todo volume do tanque, os modelos são rigorosamente tridimensionais e dependentes do tempo, visto que o agitador muda de posição (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

As análises computacionais ponto a ponto visam simular tanto o fluxo primário do reator, que é o fluxo angular gerado pelo movimento direto do impelidor, como também o fluxo secundário, que corresponde ao fluxo gerado pelas forças inerciais devido ao movimento do impelidor. Este fluxo é, normalmente, de menor intensidade quando comparado ao fluxo primário, contudo, desempenha um papel importante na transferência de calor e de massa (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

O fato de o fluxo nos tanques agitados ser tridimensional não impede que aproximações sejam aplicadas aos sistemas para se obterem representações bidimensionais mais simples e que exigem um menor tempo computacional. O aumento do poder computacional, juntamente com a crescente sofisticação dos pacotes gráficos e dos modelos computacionais, fazem com que cresça a tendência da utilização de modelos tridimensionais (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

5.1.3 Malha Computacional

Ao final da geometria dá-se início á geração da malha. Este processo é responsável por traduzir a informação geométrica do modelo em pontos nodais discretos, uma vez que a solução numérica das equações governantes do escoamento somente pode ser realizada em pontos nodais discretos. Este processo também recebe o nome de discretização.

O processo de gerar malhas divide-se em etapas distintas: definir um tamanho máximo de elementos e configurar os vários refinamentos locais em regiões onde se esperam gradientes mais elevados de propriedades relevantes.

Para dividir o domínio em um conjunto de subdomínios discretos, ou células computacionais, ou volumes de controle, utiliza-se uma malha que pode conter elementos de várias formas e tamanhos. Em domínios 2D, por exemplo, os elementos são geralmente quadriláteros ou triângulos. Em domínios 3D pode ser tetraedros, prismas, pirâmides ou hexaedros (PAUL et al., 2004).

O domínio do fluxo é dividido em (i) sub-volumes, em que uma malha é gerada e (ii), em superfícies que vão ser aplicadas as condições de contorno. A geração da malha é efetuada pelo software e é uma das partes mais importantes e demoradas de realização de uma simulação de CFD. A construção de uma malha de alta qualidade é responsável por solução numérica mais eficiente e robusta (CULLEN, 2009).

Em geral, a densidade das células em uma malha computacional precisa ser muito bem detalhada para capturar os detalhes de fluxo, mas não tão fina que o número total de células no domínio seja excessivamente grande, uma vez que os problemas descritos por um grande número de células necessitam de mais tempo para resolver. Malhas não uniformes podem ser utilizadas para concentrar em regiões onde é necessário e para permitir a expansão em outras regiões (PAUL et al., 2004).

Existem vários tipos de elementos que podem ser usados na construção de malhas. Na maioria dos casos são aplicadas malhas híbridas, compostas por elementos tetraédricos e prismáticos nas regiões normais às paredes. Os elementos prismáticos conseguem produzir o nível de refino necessário a captura dos efeitos de camada limite, o que não seria possível, caso existissem tetraedros adjacentes às paredes, uma vez que a altura de um deles já seria maior do que a espessura total da camada limite, inviabilizando o cálculo.

As malhas tetraédricas e prismáticas oferecem grande facilidade de geração em geometrias complexas. Algumas aplicações especiais exigem um alto nível de controle desses parâmetros, que somente podem ser alcançados gerando-se uma malha hexaédrica com uma construção baseada na metodologia estruturada.

Muitos são os cuidados que devem ser tomados na discretização. Um desses cuidados é que os resultados não podem depender do tamanho do volume sendo

discretizado. Esse estudo é chamado de estudo de independência da malha (JOAQUIM JUNIOR. et al., 2007).

5.1.3.1 Malha Hexaédrica

A malha hexaédrica estruturada apresenta uma distribuição espacial regular dos pontos. As malhas hexaédricas são uniformes quando apresentarem os pontos distribuídos uniformemente no espaço do sistema de referência adotado. Os domínios computacionais elaborados com malha hexaédrica uniforme são para geometrias mais simples. Para geometrias mais complexas são necessárias malhas mais sofisticadas. Na discretização utilizando malha hexaédrica, cada volume interno tem o mesmo número de vizinhos.

Segundo Maliska (2004), este tipo de discretização apresenta uma série de vantagens para a implementação do programa computacional, pois a regra de ordenação dos elementos simplifica as rotinas. Nestes casos, a matriz resultante permite que métodos de resolução de sistemas lineares com matrizes com banda fixa possam ser aplicados.

5.1.3.2 Malha Tetraédrica

As malhas tetraédricas (não-estruturadas) são caracterizadas por não exibirem uma regularidade na distribuição dos pontos. Este tipo de malha permite a construção de geometrias complexas de maneira mais fácil do que se obteria com a malha estruturada.

Maliska (2004) aponta que a discretização de domínios complexos utilizando malha não estruturada é mais versátil, pois a adaptação e o refino em regiões específicas do domínio são alcançados com maior facilidade quando se emprega este tipo de malha. No entanto, os algoritmos para a solução das equações discretizadas são mais complexos. Nas malhas não estruturadas o número de elementos vizinhos pode variar de volume para volume.

A discretização de domínios que representam um sistema de mistura usando malha tetraédrica permite que a mesma possa ser construída de uma maneira mais

fácil. O emprego de domínios com volumes tetraédricos é útil quando se precisa de uma resposta muito rápida para uma determinada variável (situação normalmente encontrada na indústria). Malhas com tetraedros possuem a vantagem de acomodar praticamente qualquer geometria. Entretanto, ao utilizarem-se malhas tetraédricas com o método dos volumes finitos é aconselhável criar volumes especiais denominados prismas nas camadas adjacentes às paredes (JOAQUIM JUNIOR. et al., 2007).

5.1.4 Discretização

Discretização é o processo que consiste na conversão das equações diferenças parciais em um conjunto de equações algébricas. Existem três maneiras básicas de discretizar as equações de transporte: diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos. Embora o método de elementos finitos apresente mais estabilidade do que os métodos de volumes finitos, sua aplicação está principalmente em aplicações em códigos especializados, tais como os de fluxos não-newtonianos e visco- elásticos, por exemplo, POLYFLOW (CULLEN, 2009).

5.1.4.1 Método discretização Volumes Finitos

Segundo Joaquim Jr. et al. (2007) o principal método de discretização empregado atualmente é o método dos volumes finitos, que possui a vantagem de manter um caráter conservativo na discretização das equações de conservação de massa, momento e energia.

Todos os métodos de CFD partem do mesmo princípio: eles aproximam numericamente as equações provenientes dos balanços de conservação de massa, de quantidade de movimento linear e de energia associados às condições de contorno da geometria que está sendo estudada. Deve-se ressaltar que a modelagem que usa CFD proporciona resultados excelentes se representarem com fidelidade o problema físico em questão e, também, se estiverem livres de erros numéricos comuns a esse tipo de enfoque.

Segundo Maliska (2004), todo método que para obter as equações aproximadas satisfaz a conservação da propriedade em nível de volumes elementares é um método de volumes finitos. Existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas no método dos volumes finitos, a primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, os volumes finitos, e a segunda é integrar sobre o volume elementar, no espaço e no tempo, as equações na forma conservativa. Forma conservativa, ou forma divergente, é aquela em que na equação diferencial os fluxos estão dentro do sinal da derivada e, na primeira integração, aparecem os fluxos nas fronteiras do volume elementar, equivalente, portanto, ao balanço.

No método dos volumes finitos (MVF), as equações aproximadas são obtidas através de balanços de conservação no volume elementar. No contexto dos pacotes comerciais, o MVF é ainda o método mais empregado na indústria. A preferência é em função da robustez, devido às características conservativas do método. Como no MVF os balanços de conservação devem ser satisfeitos em nível de volumes elementares, para qualquer tamanho de malha, todos os princípios de conservação podem ser conferidos em uma malha bastante grosseira (MALISKA, 2004).

5.2 Abordagem de rotação do impelidor

5.2.1 Modelagem com o uso de um sistema de referência rotacional

Segundo Joaquim Jr. et al. (2007) à medida que o rotor se movimenta, as pás do impelidor mudam de posição com o tempo. Para modelar este comportamento em regime estacionário, utiliza-se o artifício de modelar a velocidade do impelidor de uma maneira indireta, fazendo uso de um sistema de referência rotacional. Neste caso, o impelidor e a haste estão parados e a parede do tanque gira com uma velocidade angular igual (mas em direção oposta) ao impelidor.

5.2.2 Modelagem com múltiplos sistemas de referência rotacional – MFR

Segundo Joaquim Jr. et al., 2007, o modelo de múltiplos sistemas de referência rotacional é um modelo que, como o próprio nome diz, utiliza múltiplos sistemas de

referência que podem ser utilizados simultaneamente em uma simulação (Paul et al., 2004). Isto significa que múltiplos impelidores girando em velocidades diferentes podem ser simulados em um mesmo tanque.

É importante observar que a simulação neste modelo é feita em regime estacionário. Cada sistema de referência rotacional que contém o impelidor é um cilindro que forma a superfície de revolução. Da mesma forma que em um sistema rotacional único o impelidor está parado na simulação, um tanque com mais de um sistema rotacional tem a condição de que o impelidor está parado em relação ao seu sistema rotacional. As paredes do tanque e as chicanas, no sistema estacionário, têm velocidade nula.

Uma limitação do método MFR é que, apesar do modelo fornecer a informação de movimentação do impelidor, o impelidor está estático durante todo o cálculo. Devido a isso os resultados poderão variar em função da pá do impelidor em relação às chicanas.

5.2.3 Modelagem com malhas deslizantes

Segundo Paul et al., (2004) o modelo de malha deslizante é uma abordagem de solução dependente do tempo em que a malha em torno do componente(s) rotativo (s) move-se fisicamente durante a solução. A velocidade do impelidor e do eixo em relação à região da malha em movimento é zero, como é a velocidade do tanque, pás, e outros componentes internos da região da malha em estado estacionário. O movimento do impelidor é modelado de forma realista, porque a malha que o rodeia também se move, dando origem a uma simulação mais exata.

Depois de cada um desses movimentos, o conjunto de equações de conservação é resolvido em um processo iterativo até que a convergência seja alcançada.

Segundo Joaquim Jr. et al., (2007) como o modelo é transiente, é necessário que o impelidor complete diversas voltas até que se atinja o estado de regime estacionário. A experiência mostra que, de uma maneira geral, esta condição é atingida após aproximadamente sete voltas.

Esta é considerada, atualmente, a melhor técnica para a simulação de tanques, apesar de ter a desvantagem de consumir um maior tempo computacional.

6 METODOLOGIA CFD

O pacote computacional ANSYS CFX® é um software de simulação para resolução numérica de problemas envolvendo mecânica dos fluidos e transferência de calor. O programa emprega a metodologia de volumes finitos utilizando estruturas espaciais e gerando malhas correspondentes. Em geral, o processo de executar uma simulação com CFD pode ser dividido em quatro fases:

1. Construção da geometria: nesta etapa é desenhada a geometria com a maior fidelidade possível em relação ao projeto real. Certas aproximações, porém, são necessárias por limitações do próprio software.

2. Pré-Processamento: Define as condições de contorno e as leis que regem a simulação.

3. Solver: Resolve o modelo para o perfil de escoamento definido nas etapas anteriores.

4. Pós-Processamento: Permite visualizar os resultados na forma de figuras e obter perfis ponto a ponto de uma determinada variável.

O programa calcula o deslocamento de cada um dos nós e as tensões naquele ponto. O tempo de processamento para obter os resultados depende diretamente da quantidade de nós e elementos existentes. Quanto maior a quantidade de nós e elementos, maior o tempo para o computador mostrar os resultados.

Antes da preparação das geometrias é muito importante ter bem claro quais são os objetivos da simulação e do projeto, pois existem simplificações que podem ser realizadas apenas em determinadas fases da simulação. Estas simplificações podem ser geométricas ou da modelagem física e terão influência nos resultados finais obtidos.

6.1 Pré processamento e Solver

Os passos iniciais devem considerar a coleta de dados e a seleção, com base no conhecimento de engenharia, de modelos adequados.

A parte do pré-processamento é realizada dentro do ambiente de software e envolve (CULLEN, 2009):

- Definição detalhada do domínio do fluxo interno, utilizando-se as dimensões e geometria do misturador;
- Geração de uma malha que discretize o domínio do fluxo em um grande número de volumes de controle. A malha não precisa ter uma estrutura regular, pode ser montada em torno de geometrias complexas e pode ser refinada em regiões onde há necessidade de maior resolução;
- Entrada das propriedades do fluido (geralmente disponíveis como parte de uma biblioteca), seleção apropriada de modelos para representar o fluxo e a entrada de condições de contorno, com base nas informações obtidas previamente e em conceitos de engenharia no que diz respeito às hipóteses assumidas e simplificações adequadas;
- Inicialização com entradas de partida para uma solução iterativa ou condições iniciais para o cálculo transitório;
- Seleção de esquemas numéricos, monitores adequados de soluções e controles.

6.1.1 Geração das geometrias

Esta é a primeira etapa do processo completo de uma análise CFD. É possível criar as geometrias desde o início utilizando diversas ferramentas de CAD disponíveis no mercado, ou ainda, importar um desenho previamente construído. O Ansys também permitem que o desenho seja feito no próprio programa.

6.1.2 Configuração do caso

Nesta etapa o objetivo é configurar todos os parâmetros pertinentes à simulação e acionar ou desativar os modelos que não serão empregados. A primeira configuração refere-se ao tratamento temporal da simulação. Após deve-se avaliar se os efeitos turbulentos serão ou não considerados.

Em seguida configuram-se os domínios e subdomínios que compõe a simulação. Utilizam-se domínios para especificar modelos físicos que serão empregados em determinadas regiões. Na seqüência, definem-se as propriedades dos materiais empregados.

Finalmente, devem-se definir as condições de contorno. Este é o modo como especifica-se o que ocorre no domínio. Os quatro tipos básicos de condições de contorno são: entrada/saída de escoamento, parede, simetria e cíclicas.

Segundo Maliska (2004), as equações são aproximadas para um volume elementar genérico, um volume interno. Todos os outros volumes internos possuem equações aproximadas idênticas. Para se obter o sistema de equações algébricas completo é também necessário obter as equações para os volumes que estão na fronteira. Existem diversas formas de aplicação das condições de contorno. Uma delas é criar uma malha na qual o ponto central do volume de controle fique sobre a fronteira. Esse procedimento dá origem a meio-volume de controle perto da fronteira e a volumes internos inteiros.

Tendo definidos os domínios computacionais e as condições de contorno, segue-se com a configuração dos parâmetros numéricos.

6.2 Acompanhamento da solução

A interface gráfica do CFX permite o acompanhamento em tempo real do desenvolvimento da solução. Nesta fase o importante é acompanhar o decaimento do resíduo das equações.

6.2.1 Consistência, estabilidade e convergência

Os critérios de convergência são condições pré-definidas para os resíduos (geralmente normalizados ou em escala) que determinam quando uma solução iterativa é convergente (PAUL et al., 2004).

Diz que a solução está convergida quando todos os níveis de resíduos estiverem abaixo dos níveis especificados. Caso isto não tenha acontecido, ou será necessário rodar mais algumas iterações ou alguns parâmetros numéricos devem ser ajustados.

Os métodos numéricos usualmente empregados em CFD são conservativos em nível discreto. A conservação em nível discreto acontece apenas quando a solução está convergida dentro de um critério especificado. Portanto, medir como os balanços em cada volume de controle estão satisfeitos é um bom critério para medir a convergência da solução.

Segundo Maliska (2004), um dos requisitos fundamentais de uma aproximação numérica é que ela reproduza a equação diferencial quando os tamanhos da malha espacial e temporal tendam a zero. Isto é, os erros de truncamento devem tender a zero quando a malha tender a um infinito número de pontos. A aproximação numérica que possuir essa característica é dita consistente. Em resumo, as equações discretizadas devem tender às equações diferenciais quando a malha tender a zero. Aparentemente, essa é uma questão óbvia, mas existem aproximações nas quais os erros de truncamento crescem com o refinamento da malha. Felizmente, todo modelo numérico desenvolvido a partir das equações na forma conservativa usando volumes finitos é consistente.

Outra característica importante desejada é que a solução numérica obtida seja a solução exata das equações discretizadas, ou seja, tenha estabilidade. Aqui, diversos fatores interferem, tais como erros de arredondamento de máquina, que vão se multiplicando e podem desestabilizar a solução, dificuldades de tratamentos de acoplamentos entre as variáveis, fazendo com que algumas variáveis evoluam mais rapidamente que outras, provocando instabilidades etc (MALISKA, 2004).

Consistência e estabilidade são condições necessárias e suficientes para a convergência. A solução numérica é convergente quando é estável e tende para a solução das equações diferenciais quando a malha é refinada (MALISKA, 2004).

6.3 Pós processamento

Nesta etapa avaliam-se os resultados obtidos. É possível explorar os resultados obtidos em qualquer parte do domínio, através da ferramenta CFD-Post. Nele é possível gerar contornos de propriedades em quaisquer fronteiras do modelo ou em planos de corte, curvas ou superfícies com um formato arbitrário.

Outra vantagem que se pode observar na utilização de CFD é a possibilidade de investigar, de maneira relativamente rápida, a sensibilidade de algumas propriedades do escoamento em função da variação de um ou mais parâmetros operacionais.

CFD fornece uma ampla gama de opções de pós-processamento para exibir, visualizar e analisar as soluções de fluxo. Ferramentas gráficas permitem a visualização do fluxo, geometria e distribuição da malha, bem como os vetores, e variáveis de fluxo ou de transporte (CULLEN, 2009).

6.4 Aspectos geométricos

A geometria do tanque de mistura foi baseada nas dimensões de um tanque de escala industrial, consistente com um tanque cilíndrico de diâmetro 2 m com fundo toro esférico 10%. O tanque estudado apresenta um volume útil de processo de aproximadamente $7,1 \text{ m}^3$, apresentando uma relação de altura e diâmetro igual a um.

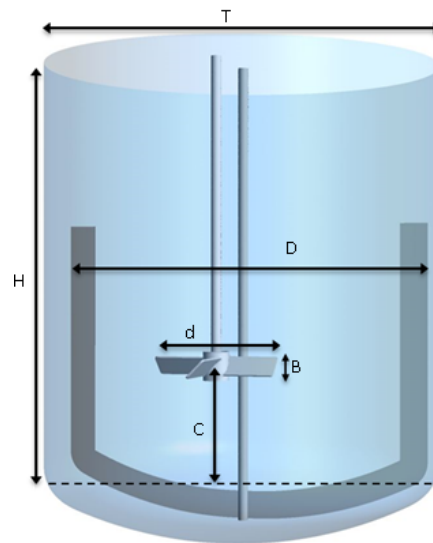
Foi estabelecido um primeiro arranjo com impelidor âncora e outro utilizando um sistema de duplo impelidor Âncora-PBT no tanque de mistura, conforme mostra a Figura 4. O segundo sistema é composto de um impelidor com quatro pás inclinadas a 45° , de forma descentralizada ao sistema já existente girando em sentido contrário.

O impelidor âncora tem diâmetro $D = 0,96 \cdot T$ e o diâmetro do impelidor PBT é

igual a $D=T/3$. As interfaces do domínio rotativo do impelidor PBT foram localizadas conforme sugestões feitas na literatura (LANE et al., 2000) e no caso do impelidor âncora foi definido pelo volume de revolução deste.

A distância entre o impelidor e o fundo do tanque (*clearance*) geralmente afeta as linhas de fluxo na direção radial e axial. Portanto, não é aconselhável que este espaço seja muito pequeno (JOAQUIM JUNIOR. et al., 2007). Tanto a altura do tanque quanto o *clearance* estão mensurados utilizando como critério o fundo reto. A Figura 4 e a Tabela 2 detalham a geometria e as relações do tanque estudado.

Figura 4 – Detalhes da geometria do Sistema de Agitação 2



Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 2: Relações geométricas do tanque em estudo

Relação	Valor
d/T	1/3
H/T	1
C/T	1/2; 1/3 e 1/4
D	0,96*T
T	2 m
B/d	1/5

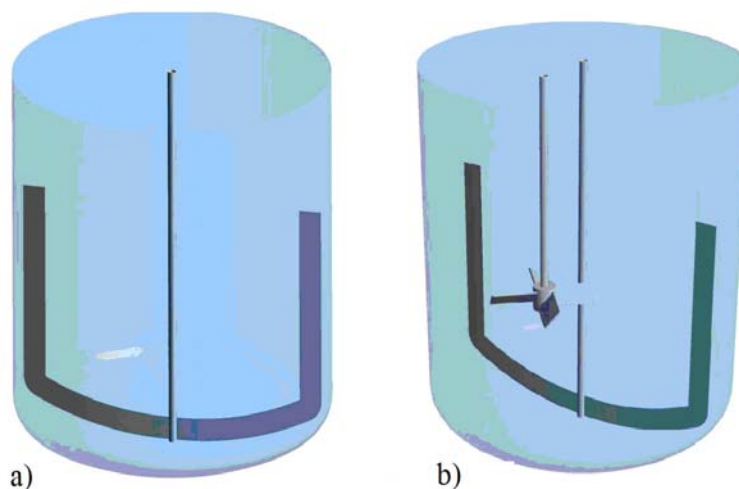
Fonte: Elaborado pela autora

Os módulos de geração de malha utilizam modos múltiplos de integração de geometrias CAD para análise. Através de um banco de dados de geometria pode-se combinar geometrias adquiridas com quaisquer das ferramentas providas.

A criação da geometria foi feita utilizando a ferramenta CAD Design Modeler disponível pelo software ANSYS CFX 14.0.

Na Figura 5 são apresentadas as geometrias dos dois sistemas: Geometria do tanque e impelidor para: a) Sistema Âncora. b) Sistema Âncora-PBT

Figura 5 - Geometria do tanque e impelidor: a) Sistema Âncora. b) Sistema Âncora-PBT



Fonte: Elaborado pela autora

6.5 Geração dos domínios

Deve-se considerar que o objetivo final da geometria é esboçar a região do fluido que está envolvida no domínio do problema. No caso de sistemas rotativos, a configuração do domínio compõe-se principalmente de duas regiões, uma região interna chamada rotativa e uma região externa chamada estacionária.

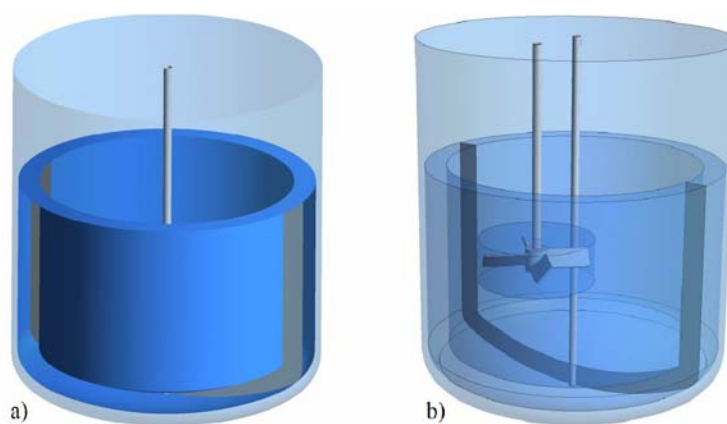
Para o primeiro sistema, o impelidor âncora situa-se no interior do domínio rotativo sob um sistema de referência rotacional determinado através da velocidade angular do mesmo, levando em consideração as forças de aceleração que interagem no fenômeno físico. Por outro lado, no domínio estacionário encontram-se as paredes do tanque.

Para o segundo sistema, o impelidor âncora situa-se no interior do domínio rotativo sob um sistema de referência rotacional determinado através da velocidade angular do mesmo e no outro sistema rotativo encontra-se o impelidor PBT 45° com uma velocidade angular diferente, porém ambos trabalhando em um mesmo regime laminar ($Re < 10$). Por outro lado, no domínio estacionário encontram-se as paredes do tanque.

A interface foi localizada numa distância axial desde o centro do impelidor pás inclinadas de $\pm 0.25D$ e raio = $0.75D$ conforme sugestões feitas na literatura (LANE et al., 2000; CORONEO et al., 2010).

Depois da geometria finalizada, agrupam-se as superfícies em famílias, determinam-se às condições de contorno e, então, se determina o tamanho da malha. Uma vez que esta informação é estabelecida, podem ser criadas modificações para otimização da malha e refino. Na Figura 6 são observados os domínios dos sistemas 1 e 2 respectivamente:

Figura 6 - Sistema de Agitação: a) Sistema Âncora. b) Sistema Âncora-PBT



Fonte: Elaborado pela autora

6.6 Geração da malha

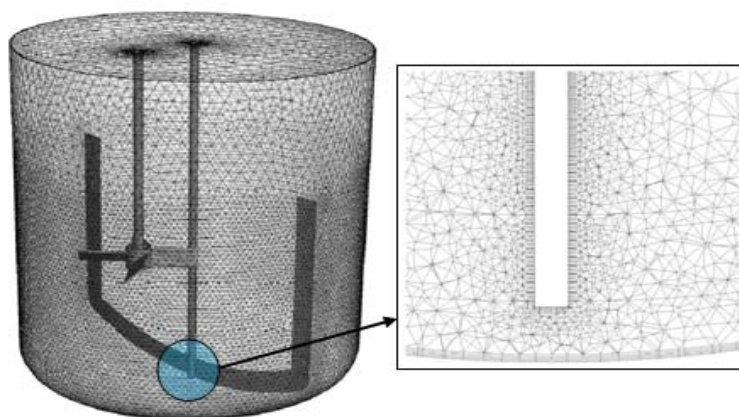
Para gerar as malhas foi utilizado o software ANSYS CFX meshing. É importante levar em consideração alguns parâmetros importantes como o tamanho mínimo do elemento, o número de elementos e o refinamento principalmente nas paredes e próximas aos impelidores.

A capacidade de geração de malhas adequadas para a discretização de um domínio é um dos principais fatores para a solução de problemas utilizando o método CFD.

Para este estudo foi feita uma malha híbrida baseada principalmente em elementos tetraédricos e prismáticos e realizou-se um teste de malha com diferentes refinamentos (0.8, 1.5 e 2 milhões de elementos), principalmente nas paredes do tanque e proximidades dos impelidor. Além disso, foi empregada uma camada de

elementos prismáticos em toda superfície do tanque e impelidor conforme pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Elementos prismáticos e tetraédricos: Sistema Âncora-PBT



Fonte: Elaborado pela autora

O efeito do número de elementos da malha sobre o cálculo das variáveis de interesse tais como potência e torque foram estudados. Finalmente, foi observado que acima de 2 milhões de elementos os resultados apresentam certa independência com variações inferiores a 3% em concordância com critérios escolhidos por outros autores (BRUCATO et al., 1998).

Todas as simulações foram realizadas em estado estacionário para um escoamento monofásico incompressível, em regime laminar ($Re < 10$). As condições de contorno de não escorregamento em todas as superfícies do tanque e impelidor, assim como a condição de superfície plana no topo do tanque foram empregadas. Uma abordagem de múltiplos sistemas de referencia (MFR-Frozen Rotor) na rotação impelidor e um esquema de discretização de alta ordem (High Resolution) também foram utilizados na configuração do modelo em CFD conforme sugestões feitas em trabalhos anteriores (NUNHEZ et al., 2012). Por ultimo, a fim de considerar a flexibilidade das operações de mistura foi utilizado um fluido com diferentes viscosidades (25, 50 e 100 Pa.s).

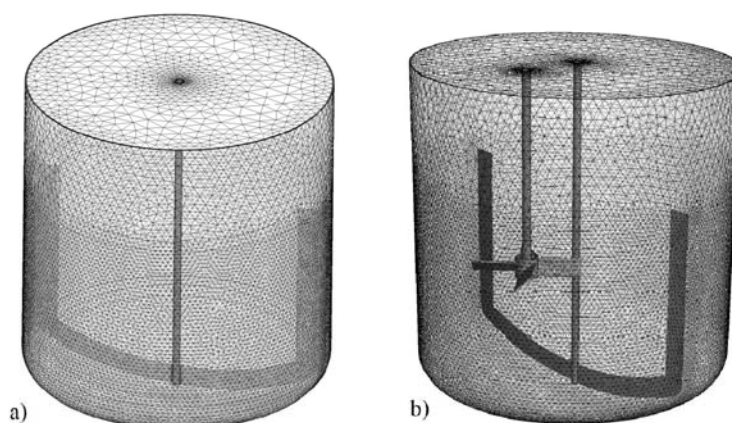
Na Figura 8 são observadas as malhas dos sistemas 1 e 2 respectivamente. Neste projeto usou-se malha tetraédrica tridimensional. Foram aplicados diversos

refinamentos e baseado nos estudos da literatura nas regiões normais como paredes e eixos foram usados elementos prismáticos em torno da distância adimensional e número de nós dentro da camada limite.

Malhas com tetraedros possuem a vantagem de acomodar praticamente qualquer geometria. Entretanto, ao utilizarem-se malhas tetraédricas com o método dos volumes finitos, é aconselhável criar-se volumes especiais denominados prismas nas camadas adjacentes às paredes (JOAQUIM JUNIOR. et al., 2007).

Desse modo, foi feita uma camada de 5 prismas com taxa de crescimento de 20% em todas as superfícies do tanque e impelidor.

Figura 8 - Detalhes das malhas: a) Sistema Âncora. b) Sistema Âncora-PBT



Fonte: Elaborado pela autora

Assim, na região do impelidor foi gerada uma malha bem estruturada enquanto na região do domínio estacionário foi aumentado o número de elementos criando diferentes densidades de malha.

6.6.1 Impelidor Tipo Âncora

O impelidor tipo âncora possui um diâmetro relativo na ordem de 96% do diâmetro do tanque. É muito efetivo em pequenos sistemas em batelada, onde o bombeamento vertical não é tão importante. Os tempos de mistura são um pouco maiores do que impelidores helicoidais de dupla hélice, porém, nele podem ser montados raspadores laterais para aplicações de transferência de calor com altas viscosidades.

O impelidor tipo âncora estudado apresenta largura das pás de 0,1 m e altura total de 1,5 m. Sua distância para a parede do tanque é de 0,1 m.

6.6.2 Impelidor de Pás Inclínadas – 4 Pás a 45°

Este impelidor possui um custo de operação razoavelmente efetivo em fluxos tanto turbulento quanto laminar. É muito utilizado para aplicações com alta variação de viscosidade, causando variação do regime em curtos intervalos de tempo. Possui também um custo razoável para suspensão de sólidos. O impelidor tipo pás inclinadas estudado apresenta inclinação das pás de 45°.

6.7 Configuração do modelo CFD

Nesta etapa, o objetivo foi configurar todos os modelos que foram empregados. Foram definidas as características do fluido envolvido e as condições de contorno que limitam o problema, como também os parâmetros numéricos.

Todas as simulações foram realizadas para um escoamento monofásico, em regime laminar ($Re < 10$) sob condições de fluido incompressível. Por último, a fim de considerar a flexibilidade das operações de mistura foi utilizado um fluido com diferentes viscosidades.

6.7.1 Propriedades do fluido

As operações de agitação em fase homogênea são muito aplicadas na indústria química, principalmente aquelas que estão em fase aquosa, sendo na

maioria das vezes fluidos Newtonianos. Assim, para efeitos de estudo para avaliar a flexibilidade operativa, as simulações foram realizadas utilizando três viscosidades entre 25 e 100 Pa.s de um fluido Newtoniano. Essas propriedades são mantidas constantes em um sistema quando este é considerado isotérmico e sob condições de fluido incompressível.

6.7.2 Condições de contorno

Cada fluxo discretizado nas condições de contorno é definido em termos de uma descrição física, uma representação matemática e uma implementação discreta.

No caso de simulação de tanques agitados, algumas condições de contorno são comuns em todas as estratégias de resolução. As condições de contorno utilizadas neste trabalho foram resumidas nas Tabelas 3 e 4:

Tabela 3: Condições de contorno

Local	Tipo	Especificações
Paredes	Não escorregamento	Velocidade na parede nula
Topo do Tanque	Superfície livre plana	Tensores e velocidade axial nulo
Impelidor e eixo arvore	Parede rotativa	$Re < 10$ (laminar)
Interface entre domínios	Fluido - fluido	Abordagem rotacional MFR

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 4: Parâmetros numéricos

Parâmetros numéricos	Detalhes
Funções de interpolação	High Resolution
Convergência	RMS < 1E-05

Fonte: Elaborado pela autora

6.7.2.1 Modelo físico

Finalmente, todas as simulações foram realizadas utilizando computadores equipados com Intel® Core i7 64 bits de quatro processadores e um total de 8GB de memória RAM e velocidade do processador de 2,80 GHz.

7 RESULTADOS

Através de CFD se pretende prever o escoamento no interior do tanque devido aos fluxos gerados pela movimentação dos impelidores, bem como a estimativa de parâmetros globais importantes no projeto de tanque. Além disso, contempla-se a utilização de um traçador numérico que permita estabelecer o tempo de mistura para os sistemas estudados.

7.1 Monitoramento da Solução

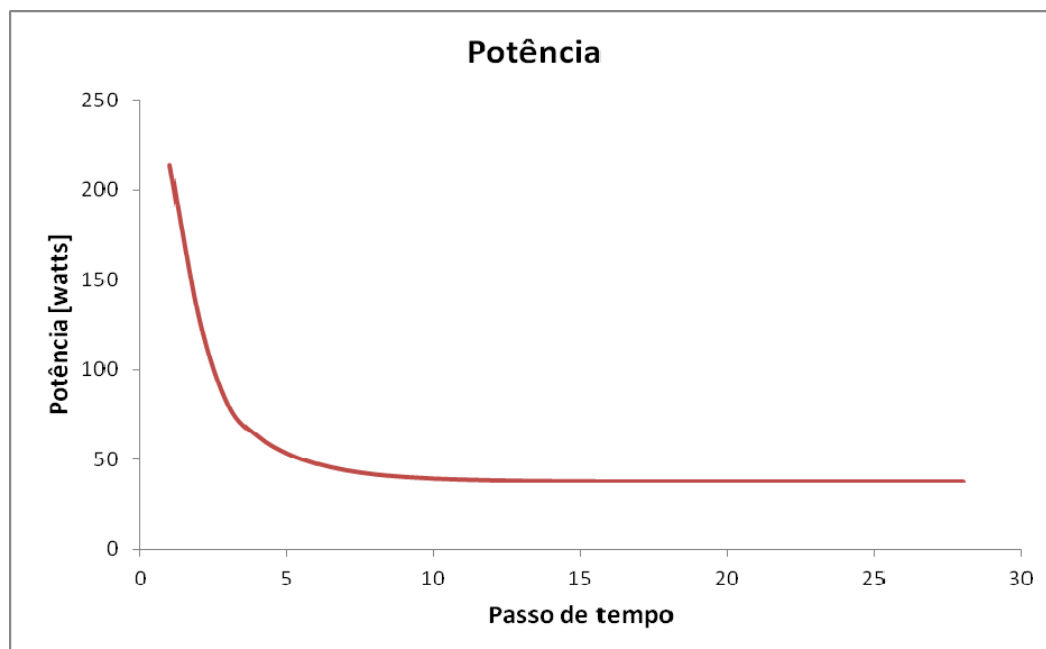
A técnica em CFD emprega um método numérico na resolução das equações de transporte. Para este trabalho foi escolhido um critério de convergência RMS (Root Mean Square) $< 10^{-5}$ seguindo trabalhos da literatura (Murthy ; Joshi, 2008), a fim de garantir que os erros residuais associados ao método não sejam significativos. A convergência da solução foi verificada através do monitoramento da estabilidade de algumas variáveis de interesse.

Existem na literatura várias correlações utilizadas para a elaboração de aumento de escala, sendo as mais populares a relação potência sobre volume (P/V) e torque/ volume (τ / V), sendo que o torque e a potência dependem de parâmetros geométricos.

A relação P/V é uma das relações mais utilizadas para a primeira análise de um projeto. Com este valor obtém-se uma orientação para se analisar um processo existente ou projetar um novo tanque (JOAQUIM JUNIOR. et al., 2007).

Através da Figura 9 é possível observar que a variável de interesse (Potência) estabiliza-se após a iteração 15, apresentando uma convergência em torno de RMS $> 2 \cdot 10^{-5}$, ou seja, a partir desse ponto o cálculo da potência não muda significativamente. Portanto, chega-se a conclusão que para garantir a convergência dos resultados podem ser considerados valores RMS residuais inferiores a 10^{-5} .

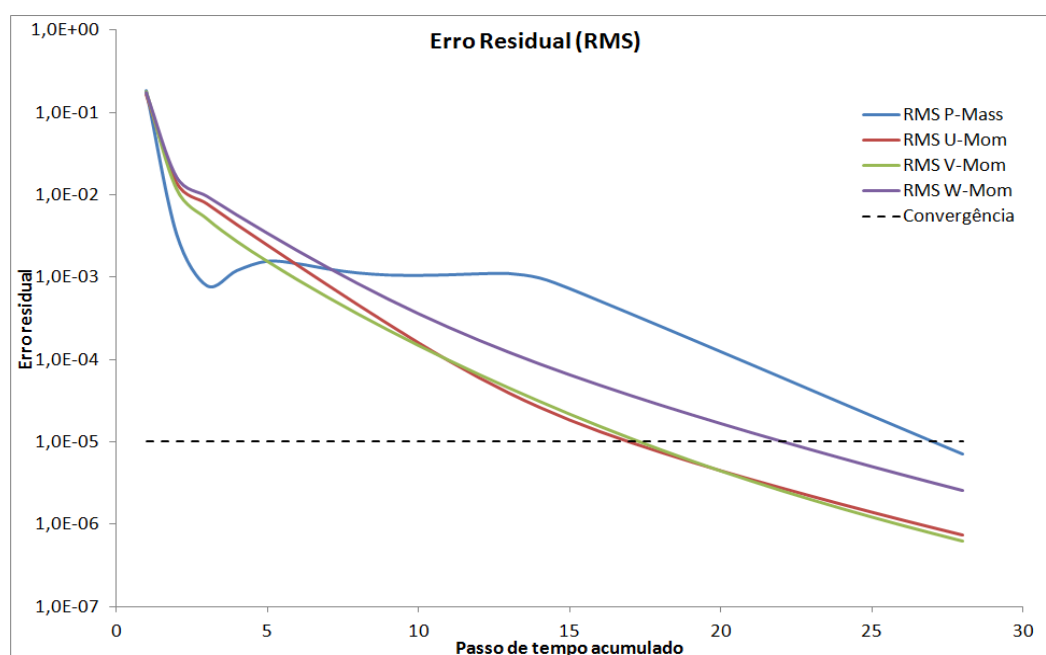
Figura 9 - Monitoramento do critério de convergência no decorrer da solução para o sistema 1



Fonte: Elaborado pela autora

A convergência da solução foi verificada através do monitoramento do valor residual das equações de transporte no decorrer da simulação, a fim que todas as variáveis de interesse tenham atingido a estabilidade necessária como se observa na Figura 10 para o sistema 1.

Figura 10 - Monitoramento do critério de convergência no decorrer da solução do sistema 1



Fonte: Elaborado pela autora

7.2 Teste de independência da malha

A fim de diminuir os erros associados à discretização do domínio, assim como evitar grande aumento do custo computacional é preciso identificar o refinamento adequado que possa garantir que os resultados não serão afetados pelo número de elementos da malha computacional utilizada. Desse modo, o refino da malha deve ser realizado em regiões em que se apresentem grandes gradientes das quantidades de transporte, tal como as regiões próximas das superfícies.

O teste de independência de malha foi realizado aumentando o número de elementos na região do domínio estacionário e criando desta forma diferentes tipos de densidades de malha até que os resultados numéricos mostraram independência do número de elementos. Entretanto, na região do impelidor, o refinamento foi realizado de maneira que os detalhes da geometria fossem capturados corretamente. Para todas as malhas foi verificada sua qualidade conforme os critérios já estabelecidos na literatura.

Para apresentar a influência da qualidade da discretização foram construídas três malhas compostas por elementos tetraédricos e prismáticos com diferentes graus de refinamento. O refinamento é ditado pelo tamanho característico para os elementos da superfície e para os elementos volumétricos. O teste de independência foi verificado através da análise das malhas 1, 2 e 3 para o sistema 1 e os resultados obtidos foram comparados para cada uma delas, sendo respectivamente 0,8, 1,5 e 2 milhões de elementos aproximadamente, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Denominação do tipo de malha conforme o número de elementos

Domínio	Malha 1	Malha 2	Malha 3
Número de Elementos	$2,1 \times 10^6$	$1,5 \times 10^6$	$0,8 \times 10^6$

Fonte: Elaborado pela autora

Para o sistema 2 foi criada uma malha em torno de 2.6 milhões de elementos. O aumento do número de elementos é devido ao refinamento feito na malha nas proximidades do impelidor acrescentado ao sistema, para garantir o detalhamento da geometria do mesmo.

Uma solução convergida e independente com modelos físicos adequados fornecerá maior precisão nos resultados. Portanto, a análise das incertezas numéricas da simulação foi feita baseada na predição de variáveis de interesse tais como, N_p , P/V , τ/V e tempo de mistura, já que são parâmetros importantes na caracterização global dos processos de mistura em tanques. Cabe salientar que um alto refino da malha também pode gerar falta de convergência ou até divergência nos cálculos envolvendo escoamentos turbulentos onde não são utilizadas funções para tratamento de parede.

A análise do refinamento da malha mostrará o efeito do número de elementos sobre o cálculo das variáveis de número de potencia (N_p), potência/volume (P/V) e torque/volume (τ/V). No estudo da independência de malha foi utilizada uma abordagem MFR- Frozen Rotor e esquemas de discretização de alta ordem (High Resolution) para todas as simulações.

Na Tabela 6 são apresentadas as porcentagens de variação entre cada malha tomando como referência a variância do Número de Potência. (BRUCATO et al., 1998) consideraram um erro de 3% a 5% para o Número de Potência.

Conforme a Tabela 6 observa-se que a malha 1 satisfaz o critério da independência de malha com cerca de $2,1 \times 10^6$ elementos.

Tabela 6: Informações da malha do sistema 1

Número de elementos	Np	Variação (%)	P/V [W m ⁻³]	Variação (%)	τ/V [Pa]	Variação (%)	t mistura [h]	Variação (%)
$0,8 \times 10^6$	4,34	-	5,0	-	11,7	-	34,4	-
$1,5 \times 10^6$	4,58	5.5%	5,2	4,0%	12,3	5,1	82,7	140%
$2,1 \times 10^6$	4,63	1,1%	5,3	1,9%	12,4	0,8	82,0	0,85%

Fonte: Elaborado pela autora

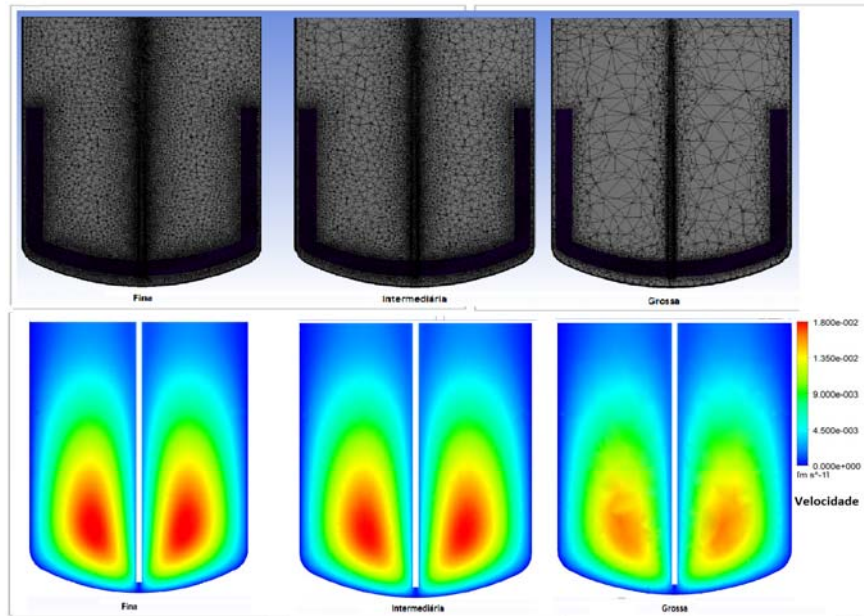
Na Figura 11, os resultados de três simulações com diferentes malhas são ilustrados pelos perfis de velocidade. A primeira imagem da Figura 11 representa a simulação com malha mais refinada (1) e a última imagem diz respeito à simulação com a malha mais grossa (3). Nota-se uma grande diferença (de até 140%) entre os tempos de mistura, mostrando que esse refinamento provocou grandes alterações nos resultados encontrados.

A diferença é pequena entre as simulações com as malhas 1 e 2, sinalizando a obtenção de independência dos resultados em relação à malha. Finalmente, conclui-se que apenas valores de densidade de malha acima 2 milhões deverão ser usados nas simulações seguintes.

Na Figura 11 é possível avaliar o padrão de escoamento com as velocidades referentes aos diferentes refinamentos testados. É possível verificar visualmente uma diferença significativa entre as malhas 1, 2 e 3. No primeiro caso seguramente muitos efeitos do escoamento estão sendo ignorados devido ao grande tamanho dos volumes de controle, portanto, conclui-se que a malha 3 não é adequada. Desta

maneira, a malha ótima para a simulação, que fornece um balanço entre refino, custo computacional e independência dos resultados, é a malha 1, com $2,1 \times 10^6$ elementos para o sistema 1 e $2,6 \times 10^6$ para o sistema 2.

Figura 11 - Plano para diferentes densidades de malha: 1, 2 e 3 respectivamente

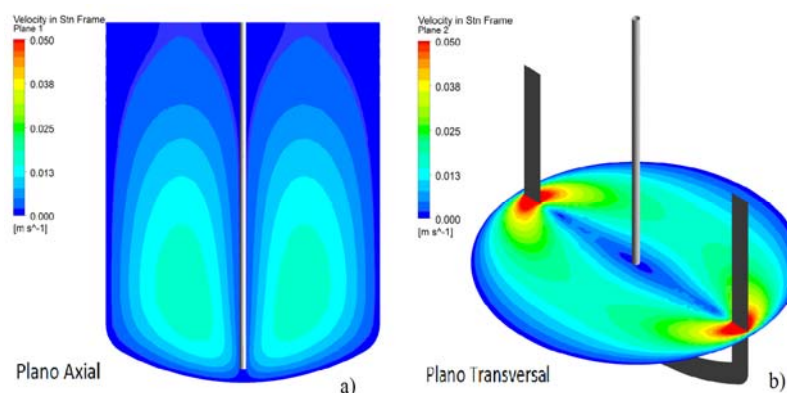


Fonte: Elaborado pela autora

7.3 Caracterização dos Fluxos

Sistema Âncora: Conforme descrito na literatura, o impelidor tipo âncora apresenta principalmente um padrão de escoamento tangencial visto na Figura 12. No entanto, os perfis indicam que o impelidor âncora possui pouco movimento axial.

Figura 12 – Perfil de velocidade do impelidor âncora



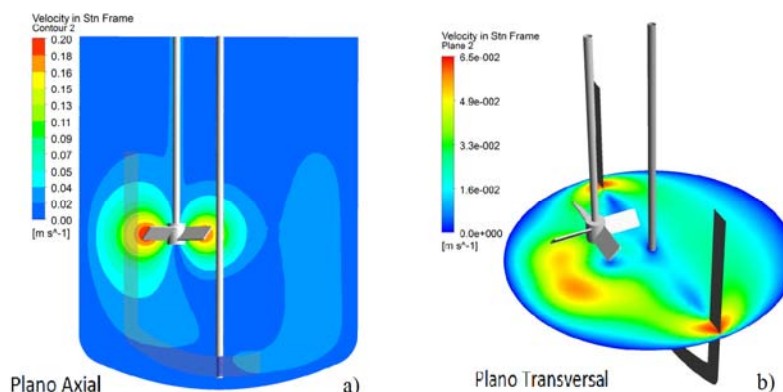
Fonte: Elaborado pela autora

Sistema Âncora – PBT: Para se garantir uma maior homogeneidade pretende-se dimensionar um sistema para favorecer circulação radial e axial do escoamento no tanque. Com isso, sugere-se que um novo impelidor seja incluído ao sistema com o impelidor âncora para aumentar a recirculação do fluido no tanque de mistura. Para isso foi escolhido o impelidor de pás inclinadas a 45° , sendo um impelidor de fluxo mistos mais comuns e de baixo custo na indústria (PAUL et al., 2004).

Na Figura 13 os fluxos das velocidades estão expressos em contornos. Pode-se perceber que há deslocamento do fluido para o fundo do tanque, somando-se as parcelas axial e radial do impelidor PBT no perfil de velocidade do sistema.

Por outro lado, embora a utilização de um impelidor descentralizado possa determinar um maior consumo de potência, esta configuração minimiza a geração de vórtices, que é um fator imprescindível no processamento de produtos viscosos (JOAQUIM JUNIOR., 1999).

Figura 13 – Perfil de velocidade do conjunto de impelidos Âncora – PBT para clearance 1/3



Fonte: Elaborado pela autora

7.3.1.1 Estudo do efeito do *clearance* no sistema 2

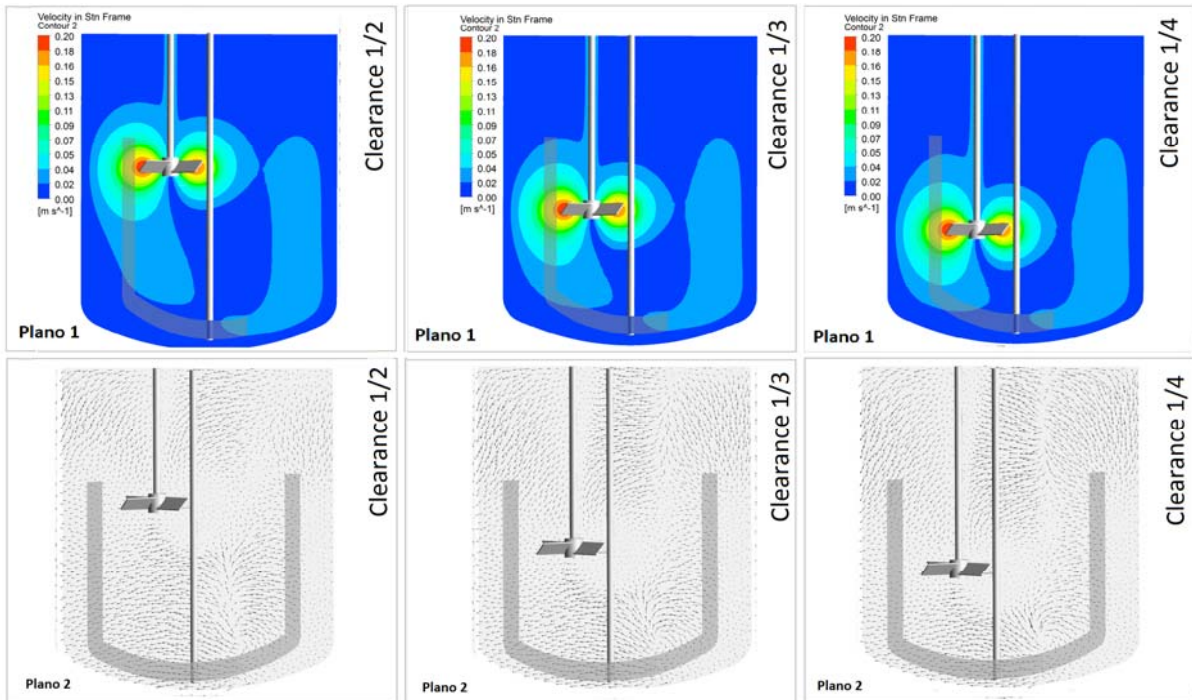
Para análise da influência do *clearance* do impelidor PBT sobre os fluxos gerados nos dois sistemas foram feitas três simulações para um mesmo fluido, neste caso 50 Pa.s, usando a relação padrão de *clearances* para engenharia: 1/2; 1/3 e 1/4 (JOAQUIM JUNIOR. et al., 2007).

Além da caracterização do escoamento no sistema, o tempo de mistura foi avaliado através da inclusão de um traçador numérico, assim foi possível definir o *clearance* adequado.

Na Figura 14 os fluxos das velocidades estão expressos em contornos. Pode-se perceber que, quanto menor o *clearance*, maior o impulsionamento da massa para o fundo do tanque, porém menor é a contribuição da componente tangencial do impelidor âncora, já que há alteração no sentido do vetor velocidade ao redor da parede do tanque de mistura, pois somam-se as parcelas axial e radial do impelidor PBT.

Para o perfil de velocidade do *clearance* 1/4, observa-se que os vetores velocidades são pequenos e em menor quantidade na metade superior do tanque e os vetores velocidade são maiores ao redor do impelidor PBT. Esta análise pode ser comparada à literatura com o fato de que impelidores radiais colocados próximos ao fundo do tanque podem ser eficientes, mas podem haver problemas na uniformidade da mistura. Se esta uniformidade for importante, é necessário adicionar mais impelidores ao tanque (JOAQUIM JUNIOR. et al., 2007).

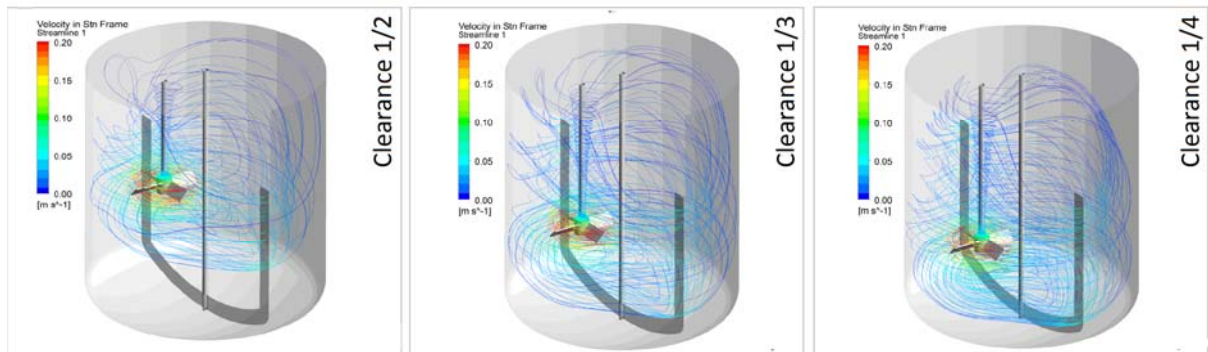
Figura 14 - Perfis de velocidade para os três *clearances* 1/2; 1/3 e 1/4, viscosidade 50 Pa.s



Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 15 observa-se que o impelidor PBT é de grande abrangência na distribuição do fluxo dentro do tanque, principalmente para *clearances* inferiores a 1/2, apresentando regiões de alta vorticidade localizadas na região inferior ao impelidor.

Figura 15 - Linhas de corrente para os três *clearances* 1/2, 1/3 e 1/4 e viscosidade 50 Pa.s



Fonte: Elaborado pela autora

Além disso, para o menor *clearance*, maior é o gradiente de velocidade ao redor do impelidor PBT, reduzindo a homogeneização da metade superior do tanque, com isso, como o produto tem alta viscosidade, há um considerável aumento do tempo de mistura, fato confirmado através do tempo de mistura obtido através do traçador numérico, conforme Tabela 7.

Tabela 7: Resultados para cada *clearance* estudado

Clearance	P/V [W m ⁻³]	τ/V [Pa]	t mistura [h]
1/2	28,164	15,582	1,11
1/3	28,149	15,583	0,98
1/4	28,154	15,599	2,36

Fonte: Elaborado pela autora

Os dois *clearances* 1/2 e 1/3 tem perfis de velocidade similares. Conforme pode ser constatado pela Tabela 7, através do traçador numérico, observam-se tempos de mistura de 1,1h para *clearance* 1/2 e 0,98h para 1/3. Portanto, pode-se concluir que o *clearance* ideal é 1/3, com menor tempo de mistura.

7.3.2 Tempo de Mistura calculado através do coeficiente de variância

O tempo de mistura dentro de um tanque agitado é definido como o tempo medido do instante da adição de um traçador até o instante em que o líquido alcança um grau de uniformidade desejado (JOAQUIM JUNIOR. et al., 2007). Na prática, o tempo de mistura pode ser medido adicionando um traçador até que o conteúdo do tanque atinja o grau de mistura especificado (95% ou 99%) da concentração de equilíbrio (C^∞). Este será dependente da forma em que é adicionado o traçador e a localização do detector (CHHABRA ; RICHARDSON, 1999).

Frequentemente, para o cálculo do tempo de mistura utiliza-se um coeficiente de variância (σ^2), o qual permite definir a variação da concentração do traçador

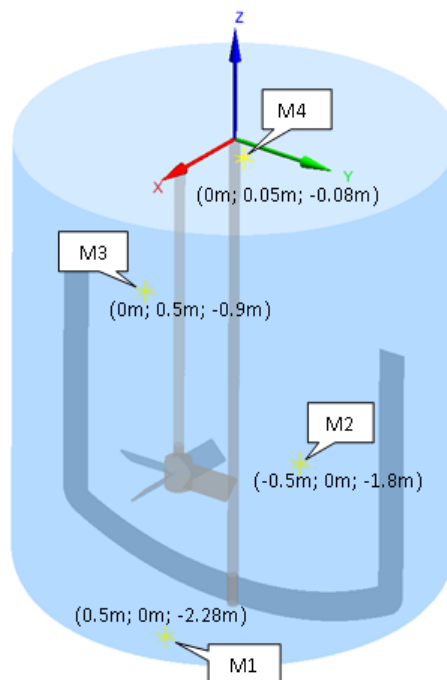
(C_i) sobre o valor da concentração média a partir da amostragem em diferentes regiões do tanque (N), descrito através da Equação (24).

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{i=p} (C_i - \bar{C})^2 \quad (24)$$

O tempo de mistura é influenciado pela adição do traçador, isso devido aos efeitos espaciais que apresenta a difusão do traçador no sistema, por isso foi utilizado mais de um monitor distribuído aleatoriamente no sistema.

A Figura 16 mostra as coordenadas espaciais de cada um dos monitores empregados neste estudo (M_i = Monitor i).

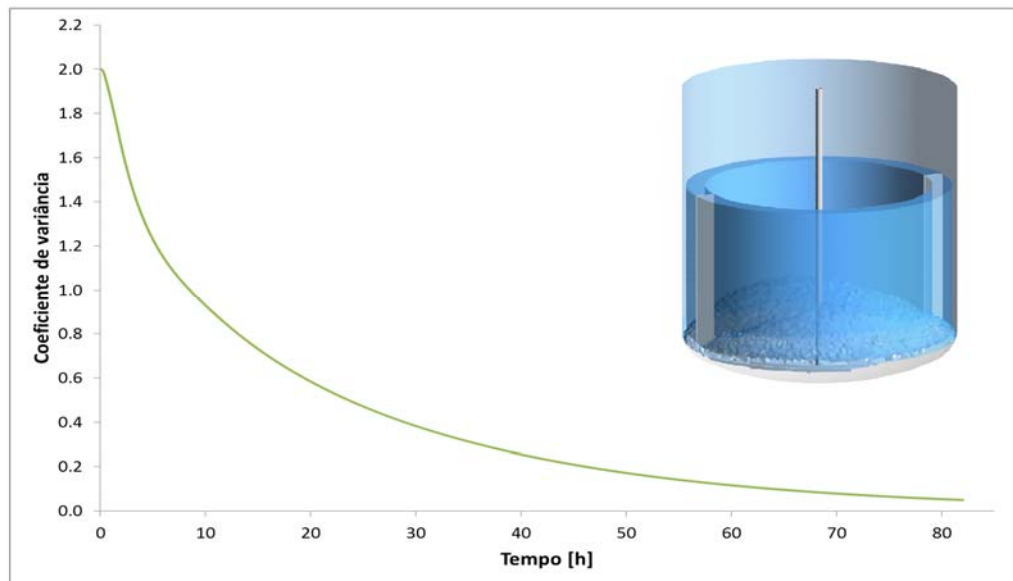
Figura 16 - Localização dos monitores no sistema 2



Fonte: Elaborado pela autora

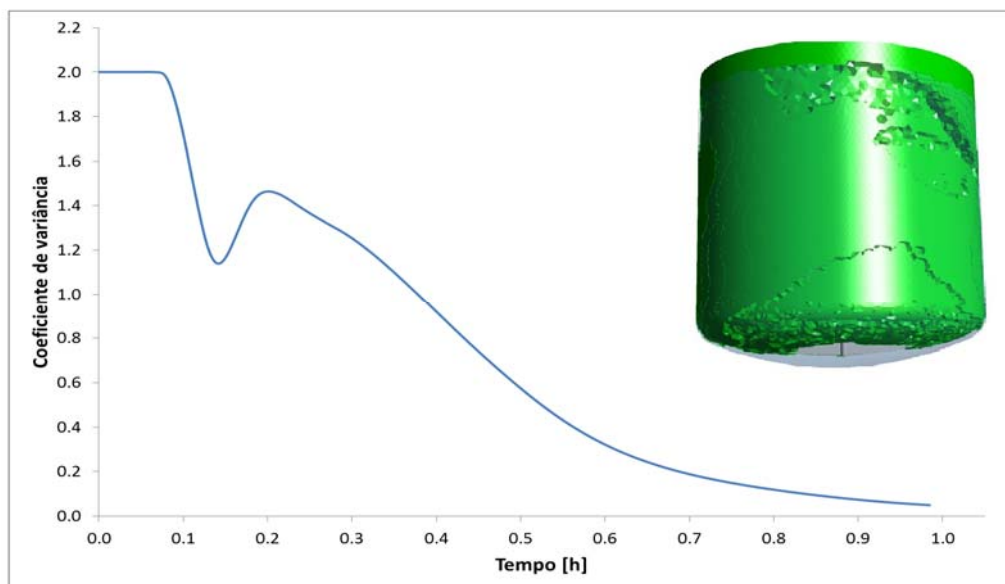
Em CFD, isso é feito utilizando um traçador numérico que represente uma concentração dentro do tanque. Assim, para determinar o tempo de mistura foi monitorado o coeficiente de variância do traçador como é observado na Figura 17 para o sistema 1 e na Figura 18 para o sistema 2, até atingir um critério de uniformidade desejado (CORONEO et al., 2010).

Figura 17 – Coeficiente de variância no decorrer do tempo: Sistema Âncora



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 18 – Coeficiente de variância no decorrer do tempo: Sistema Âncora – PBT



Fonte: Elaborado pela autora

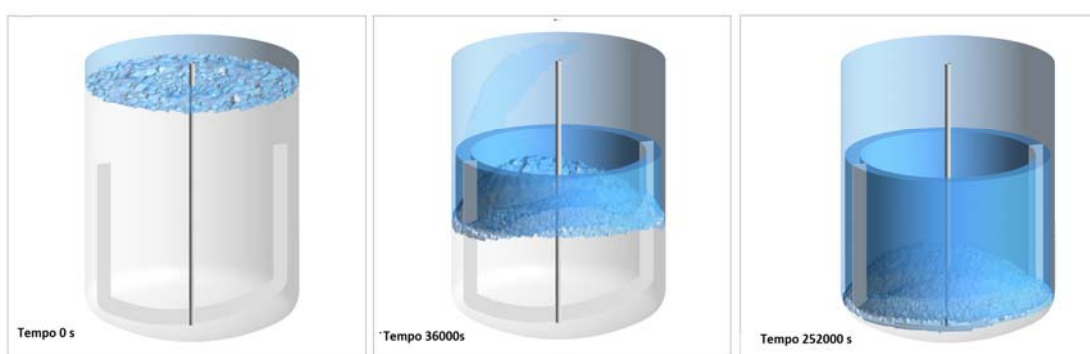
Segundo (JOAQUIM JUNIOR, Celso Fernandes, 2008), como uma regra de orientação geral, a maioria dos processos industriais de mistura pode ser satisfeita com coeficientes de variação inferior a 5% ($cv = 0,05$), portanto este foi o valor de cv empregado como critério de parada nas simulações deste trabalho.

O tempo de mistura dentro de um tanque agitado é definido como o tempo medido do instante da adição de um traçador até o instante em que o líquido alcança um grau de uniformidade desejado (JOAQUIM JUNIOR. et al., 2007).

As Figuras 19 e 20 mostram a evolução da concentração do traçador com o tempo. É importante mencionar que, para um mesmo tanque, o tempo de mistura pode variar em função do nível de líquido do tanque. Neste caso consideramos o volume de todas as simulações igual e constante.

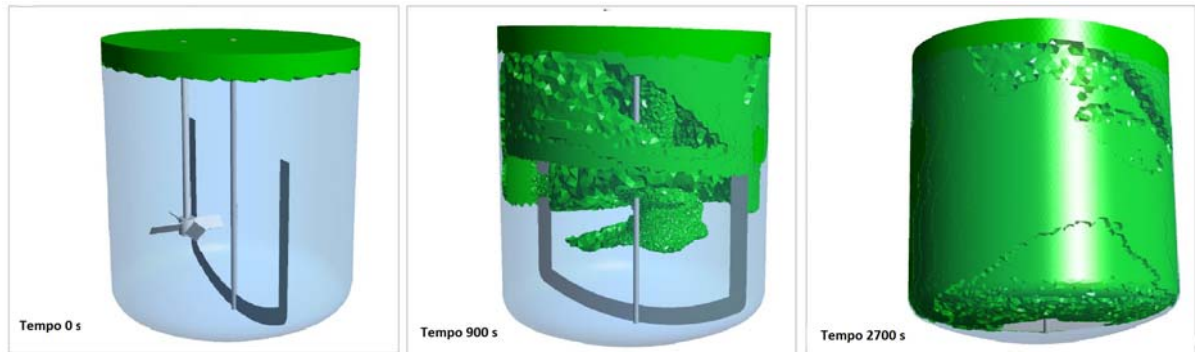
Para garantir o grau de uniformidade desejado, conforme critério de controle definido para este trabalho (coeficiente de variação de 5% ($cv = 0,05$) desde o tempo 0 foram necessários 295.000 segundos para o sistema 1, o equivalente às 82 horas e 3545 segundos para o sistema 2, o equivalente a 0,98 horas.

Figura 19 - Comportamento dos traçadores em função do tempo no sistema 1



Fonte: Elaborado pela autora

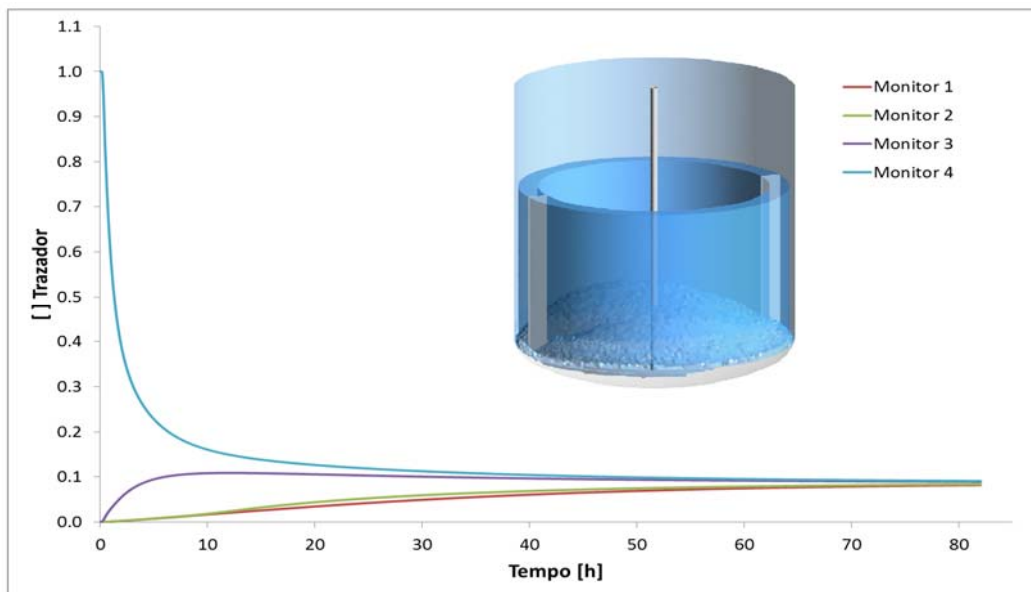
Figura 20 - Comportamento dos traçadores em função do tempo no sistema 2



Fonte: Elaborado pela autora

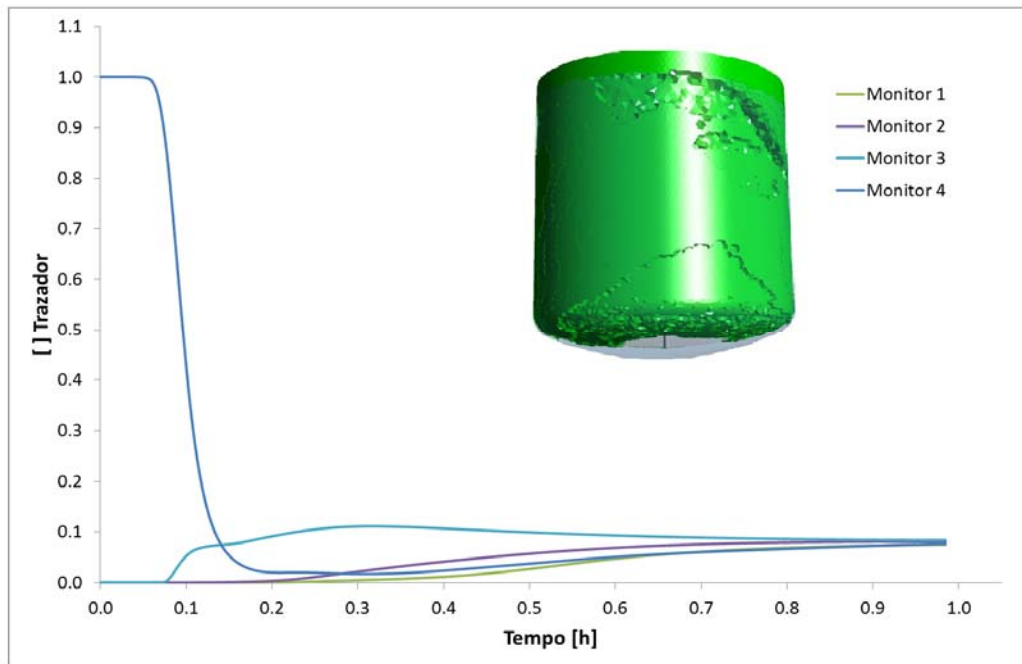
Nas Figuras 21 e 22 é possível observar a concentração dos quatro detectores em função do tempo para o sistema 1 e 2 respectivamente:

Figura 21 - Comportamento dos traçadores em função do tempo: Sistema Âncora



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 22 - Comportamento dos traçadores em função do tempo: Sistema Âncora – PBT



Fonte: Elaborado pela autora

7.3.3 Estimativa da potência e consumo de energia

Para a estimativa da potência utilizou-se o valor do torque no impelidor calculado através das sub-rotinas estabelecidas em ANSYS 14.0. A potência total consumida no processo é definida como a soma da potência consumida por cada impelidor. O consumo de energia é determinado multiplicando-se a potência total pelo tempo de mistura, que corresponde ao tempo que o equipamento permanecerá em funcionamento. Entretanto, para facilitar a comparação dos resultados foi calculada a potência específica P/V (volume do tanque de $7,1 \text{ m}^3$), apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Comparação do consumo de energia os sistemas de estudo

Sistema	P/V [W m ⁻³]	t mistura [h]	Energia [KWh]
Âncora	5,3	82,00	3,09
Âncora + PBT	28,1	0,98	0,20

Fonte: Elaborado pela autora

Embora o sistema Âncora - PBT apresente a maior potência, o tempo requerido para atingir a mistura desejada é muito menor comparado com o sistema Âncora, portanto em termos de consumo de energia, a configuração impelidor/tanque utilizando duplo impelidor apresenta menor consumo energético.

Em busca de um melhoramento do sistema proposto de duplo impelidor Âncora - PBT foi realizado um estudo da influência do *clearance* do impelidor PBT sobre os fluxos gerados no tanque de mistura. Desse modo, foram feitas simulações com diversos *clearances* conforme detalhes exibidos na Tabela 9.

Tabela 9: Influência da localização do impelidor PBT no consumo de energia

Clearance	P/V [W m ⁻³]	t mistura [h]	Energia [KWh]
1/2	28,164	1,11	0,22
1/3	28,149	0,98	0,20
1/4	28,154	2,36	0,47

Fonte: Elaborado pela autora

Conforme a tabela acima se observa que mesmo variando o *clearance*, a potência requerida pelo sistema é quase a mesma, no entanto, o tempo de mistura é influenciado pela localização do impelidor. De acordo com os resultados, o *clearance* 1/3 proporcionará um menor consumo energético pelo qual será a configuração a preferir. Esta análise pode ser comparada à literatura com o fato de que Impelidores radiais colocados próximos ao fundo podem ser eficientes, mas pode haver

problemas na uniformidade da suspensão. Se esta uniformidade for importante, é necessário adicionar mais impelidores ao tanque (JOAQUIM JUNIOR et al., 2007).

A influência da viscosidade foi avaliada através de um estudo de flexibilidade operativa do arranjo proposto, em que se avaliou a performance do sistema Âncora - PBT operando com diversas velocidades de rotação e propriedades de fluido. As simulações foram realizadas para três casos diferentes, com viscosidades entre 25 e 100 Pa.s conforme descrito na Tabela 10:

Tabela 10: Descrição das viscosidades para cada caso estudado

Caso	Viscosidade de trabalho [Pa.s]
1	25
2	50
3	100

Fonte: Elaborado pela autora

Na Tabela 11 são reportadas a potência específica e o tempo de mistura estimado para diferentes viscosidades do fluido.

Tabela 11: Influência da viscosidade do fluido no consumo de energia

Caso	P/V [$W m^{-3}$]	t mistura [h]	Energia [KWh]
1	3,52	1,97	0,05
2	28,15	0,98	0,20
3	225,19	0,49	0,79

Fonte: Elaborado pela autora

Conforme a Tabela 11 nota-se que, quanto maior a viscosidade do fluido, menor é o tempo necessário na operação de mistura, porém, a potência requerida aumenta consideravelmente e, portanto, é esperado um aumento no consumo de energia.

O aumento significativo da variável P/V ocorre devido à velocidade da rotação do impelidor PBT. Essa velocidade é muito maior no PBT do que no impelidor âncora, portanto esse fato faz com que no sistema PBT - Âncora a potência consumida seja muito mais alta.

De acordo com a Tabela 12 pode ser visto que, quanto maior a viscosidade do fluido, maior a velocidade necessária no impelidor. Neste caso o âncora apresenta valores maiores de torque comparado ao impelidor PBT, porém a velocidade de rotação do PBT é muito maior que a do âncora, isso faz que a potência do impelidor PBT seja muito maior que a fornecida pelo âncora. Se mantivéssemos a mesma velocidade em ambos os impelidores, a potência do âncora seria maior que aquela fornecida pelo impelidor PBT.

Tabela 12: Velocidade de rotação do impelidor para as diferentes viscosidades

Caso	Viscosidade de trabalho [Pa.s]	Velocidade do impelidor PBT [rpm]	Velocidade do impelidor Ancora [rpm]
1	25	41,67	2,03
2	50	83,33	4,07
3	100	166,67	8,14

Fonte: Elaborado pela autora

Em todos os casos, pode ser visto que, mesmo mudando a viscosidade do fluido no sistema de duplo impelidor Âncora-PBT, o tempo de homogeneização e o consumo de energia foi muito menor comparado ao sistema com impelidor Âncora. Assim, baseando-se nos resultados obtidos, o arranjo proposto Âncora-PBT aumenta a eficiência do processo de mistura no tanque.

8 CONCLUSÕES

Através da análise CFD pode-se concluir que a mistura no sistema Âncora-PBT é favorecida, já que o impelidor PBT ajuda na recirculação axial do fluido no tanque. Conforme os resultados, o tempo de mistura pôde ser reduzido consideravelmente com o sistema de impelidores PBT – Âncora obtendo reduções de até 80 vezes do tempo com fluidos altamente viscosos ($> 25 \text{ Pa.s}$). No entanto, observa-se um aumento na potência no sistema Âncora-PBT, que pode ser compensado devido á redução do tempo de operação, o que trará benefícios devido ao aumento de produtividade e menor gasto de energia.

Finalmente, é importante salientar que uso de CFD pode contribuir na otimização de processos visando avaliar inovações ou melhoras em equipamentos existentes que se adequem as necessidades da indústria, além disso, este trabalho permite contribuir no estado da arte em sistemas agitados com duplo impelidor, atualmente comum na indústria, porém escasso na literatura.

9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se realizar estudos em CFD utilizando outras configurações com mais de um impelidor, em que seja possível mostrar a interação dos impelidores no sistema de mistura. Além disso, pode-se contemplar o efeito dessas configurações em fluidos não Newtonianos, estudando possíveis mudanças nas zonas de recirculação e no fluxo global gerado.

Além disso, para trabalhos futuros, seria importante uma análise técnico – econômica em relação à redução do tempo de mistura versus aumento do consumo de energia, considerando o aumento da produtividade e custo do produto em questão.

REFERÊNCIAS

ANSYS, Inc. **Solver Theory Guide**. ANSYS CFX 14.0, 2011.

BRUCATO, A. et al. Numerical prediction of flow fields in baffled stirred vessels: A comparison of alternative modelling approaches. **Chemical Engineering Science**, v.53, p.3653-3684, 1998.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON J.F. **Non-Newtonian Flow: Fundamentals and Engineering Applications**, 1999.

CULLEN, P. J.; **Food mixing** : principles and applications. Wiley-Blackwell, 2009.

CORONEO, M. et al. CFD prediction of fluid flow and mixing in stirred tanks: Numerical issues about the RANS simulations. **Computers & Chemical Engineering**. 2010.

FOGLER, H. S. **Elementos de engenharia das reações químicas**, 3.ed, LTC, 2002.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas**, 3.ed, Edgard Blucher, 2000.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para dinâmica dos fluidos**. São Paulo: Edusp,2000.

GRANJEIRO-DA-SILVA, J. **Análise crítica das correlações e parâmetros fundamentais em sistemas de agitação**. Campinas, 2002. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

HEMRAJANI, R. R;TATTERSON, G. B. **Mechanically Stirred Vessel. Handbook of Industrial Mixing: Science and Practices**. Jhon Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.

JOAQUIM JUNIOR.C. F. et al. **Agitação e mistura na indústria**. LTC Editora, 2007.

JOAQUIM JUNIOR, C. F. **Verificação da Eficiência de Mistura e Levantamento dos Números de Potência para Impelidores Caules e de Alta Eficiência.** 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru. 1999.

JOAQUIM JUNIOR, C.F. **Desenvolvimento e otimização de misturador estático com o uso da Fluidodinâmica Computacional (C.F.D.)** . Campinas, 2008. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2008.

KRESTA, S.M.; WOOD, P.E. The mean flow field produced by a 45° - pitched blade turbine: Changes in recirculation pattern due to bottom clearance. **Can. Journal Chemical Engineering**, v.71. 1993.

LANE, G. L.; SCHWARZ, M. P.; EVANS, G. M. **Comparison of CFD Methods for Modelling of Stirred Tanks.** 10th European Conference on Mixing, (eds.) Akker, H. E. A. V. D. & Derksen, J. J., Elsevier Science, Amsterdam, 2000.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional.** LTC,2004.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical**, ed. 4th,McGraw-Hill, 1985.

MURTHY, B. N.; JOSHI, J. B. Assessment of standard , RSM and LES turbulence models in a baffled stirred vessel agitated by various impeller designs. **Chemical Engineering Science**. v. 63, 5468-5495, 2008.

NAGATA, S. **Mixing: Principles and Applications.** Wiley, New York, 1975.

NUNHEZ, J. R. et al. Investigating On the Influence of Mesh Density, Turbulence Models and Numerical Aspects of CFD Modeling in PBT Impellers Using Non-Structured Meshes. **AIChE Annual Meeting**, Pittsburgh, 526e, 282309, 2012.

OLDSHUE, J. Y. **Fluid Mixing Technology.** McGraw-Hill, New York, 1983.

PATWARDHAN, A.W.; JOSHI, J.B. Relation between flow pattern and blending in stirred tanks. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. 1999.

PAUL, E. L.; ATIEMO-OBBERG, V.; KRESTA, S. M. **Handbook of industrial mixing: Science and Practice**. John Wiley & Sons, 2004.

PEDROSA, S.M.C.P. ; NUNHEZ, J.R. The behavior of stirred vessels with anchor type impellers. **Computers and Chemical Engineering**. 2000.

R.N. SHREVE.; BRINK JR, J.A.. **Indústrias de Processos Químicos**, Ed. Guanabara, Rio de Janeiro, 1997.

RUDINGER, A. **Estudo do fluxo gerado por agitadores tipo âncora** . Campinas, 2002. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

SILVA, J. **Análise crítica das correlações e parâmetros fundamentais em sistemas de agitação**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

SOUZA, E. **Consumo de Potência para Impelidores Rápidos Aplicados em Processos de Agitação e Mistura**. Campinas, 2011 . Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

SPOGIS, N. **Metodologia para determinação de curvas de potência e fluxos característicos para impelidores axiais, radiais e tangenciais utilizando a fluidodinâmica computacional**. Campinas, 2002. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

VERGEL, J. **Estudo da Influência da Malha Computacional, Modelos de Turbulência e Aspectos Numéricos da Modelagem CFD em Impelidores PBT Usando Malhas Não-estruturadas**. Campinas, 2013. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

TORRES, G. A. M. **Determinação Experimental do Consumo de Potência Para Impelidores Âncora e Helicoidal Usando Fluidos Pseudoplásticos de Alta Viscosidade**. Campinas, 2013 . Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. Longman Scientific & Technical, UK, 1995.